

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОСТЕКЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

© 2012 И.Э. Вольф¹, А.Н. Малов²

¹ ВУНЦ ВВС “Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”, г. Воронеж

² Иркутский государственный медицинский университет

Поступила в редакцию 10.10.2012

Автоматическая система контроля состояния элементов остекления воздушных судов разработана на основе использования методов пошагового компьютерного восстановления записанного волнового фронта изменения интенсивности лазерного излучения при прохождении его через объект диагностики и метода анализа спекл-структур регистрируемых на ПЗС-матрицу при отражении лазерного излучения от классифицируемого дефекта.

Ключевые слова: голографическое изображение, спекл-структура, дефектоскопия.

Для остекления кабин современных воздушных судов используют материалы органического и неорганического происхождения. В процессе хранения, монтажа и эксплуатации, остекление подвергается различного рода воздействиям: аэродинамическим, температурным и механическим. Определяющее влияние на разрушение его структуры оказывают большие напряжения от аэродинамических усилий и температурных перепадов во время выполнения полёта на практический потолок при максимальном ускорении и последующем торможении. В соответствии с регламентом обслуживания инженерно-техническим составом производится только субъективный оптико-визуальный контроль. Используемые методы и приборы не позволяют классифицировать дефекты остекления на соответствие техническим условиям, снижающие степень пригодности элементов остекления к дальнейшей эксплуатации, а также осуществлять мониторинг его состояния [1].

Анализ характеристик современных образцов остекления, а также технических условий применения их на воздушных судах показал, что при оценке внутренних дефектов аппаратура контроля параметров должна обеспечивать измерение геометрических размеров малоконтрастных объектов диаметром от 0,1 до 5 мм с погрешностью не более 0,01 мм и вероятностью обнаружения дефектов диаметром 0,1 мм не менее 0,95. Достижение заданных требований и автоматизацию процесса измерений, возможно за счет применения принципиально новых алгоритмов с использованием активных методов

неразрушающего контроля на основе полупроводниковых лазерных модулей, средств регистрации и вычисления.

Появление быстродействующих цифровых матричных фотокамер с достаточно большим числом элементов, позволяют регистрировать массив фотоотсчетов, в реальном масштабе времени и в цифровом формате, согласованном с программным обеспечением компьютера [2]. Предлагается регистрировать голограмму участка элемента остекления на фотоматрицу с последующим компьютерным восстановлением изображений двумерных сечений голографируемого предметного поля.

Исследования были выполнены на экспериментальном стенде с использованием осевой схемы записи голограмм. Объект освещался когерентным параллельным пучком, прошедший через него свет состоит из двух компонент: 1) интенсивной однородной плоской волны, и 2) слабой рассеянной волны, состоящей из совокупности сферических волн, обусловленных дифракцией на элементах предмета. Таким образом, объект в некотором роде сам является источником опорной волны. В результате интерференции света, прямо прошедшего через объект и рассеянного им, получается распределение интенсивности, которое зависит как от амплитуды, так и от фазы рассеянной волны [3].

Распределение интенсивности $I(x, y)$ в плоскости записи голограммы (x, y) определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной $O(x, y)$ и опорной $R(x, y)$ волн, а именно:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 = \\ &= |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + \\ &+ R(x, y)O^*(x, y) \end{aligned}$$

Вольф Игорь Эдуардович, старший преподаватель.

E-mail: wolfigor71@mail.ru

Малов Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: coh0l2007@yandex.ru

где значок * обозначает комплексно-сопряженную величину, $O(x, y) = |O(x, y)| \exp(i\varphi_0(x, y))$ – комплексная амплитуда объектной волны с вещественной амплитудой $O(x, y)$ и фазой $\varphi_0(x, y)$, $R(x, y) = |R(x, y)| \exp(i\varphi_R(x, y))$ обозначает аналогичным образом комплексную амплитуду опорной волны.

Исходная объектная волна восстанавливается путем освещения голограммы опорной волной, как и для оптической схемы из рис. 1.

Мнимое изображение A' восстанавливает объект в трех измерениях. Четвертое слагаемое соответствует восстановленному действительному изображению A'' объекта. Некоторые свойства действительного изображения делают его, однако, менее интересным, чем мнимое изображение.

Для пояснения математического принципа, лежащего в основе голографической реконструкции изображения, умножим записанную голограмму, т. е. интенсивность интерференционной картины $I(x, y)$ на значения поля опорной волны $R(x, y)$:

$$R(x, y)I(x, y) = R(x, y)|R(x, y)|^2 + R(x, y)|O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 O(x, y) + R^2(x, y)O^*(x, y).$$

Первое слагаемое в правой части уравнения пропорционально значению $R(x, y)$ опорной волны, второе слагаемое описывает пространственно изменяющееся “облако” вокруг первого порядка дифракции. Вместе они составляют нулевой порядок дифракции, или фоновую составляющую. Третье слагаемое с точностью до известного множителя $|R(x, y)|^2$ представляет собой точную копию исходного поля $O(x, y) = |O(x, y)| \exp(i\varphi_0(x, y))$ и поэтому называется мнимым изображением (или просто изображением) объекта. Четвертое слагаемое относится к еще одному изображению объекта, “изображению-двойнику”, которое называется действительным изображением.

В процессе записи цифровой голограммы,

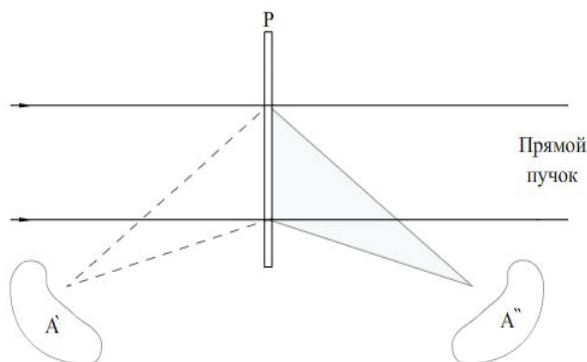


Рис. 1. Восстановление изображения объекта, диффузно рассеивающего свет

исследуемый трехмерный объект с рассеивающей свет поверхностью располагается на расстоянии d от ПЗС-матрицы. Записанная голограмма может рассматриваться как пропускающий транспарант, на котором дифрагирует опорная волна. Для получения исследуемой объектной волны в цифровой голографии применяется численный расчет распространения оптического поля в форме произведения $R(x, y)I(x, y)$ от плоскости голограммы до плоскости объекта (ξ, η) .

Численное восстановление записанной цифровой голограммы производится в соответствии со скалярной теорией дифракции в приближении Френеля для интеграла дифракции Рэля-Зоммерфельда. Восстановленное дифрагированное поле $Q(\xi, \eta)$ в плоскости изображения (ξ, η) на расстоянии d от плоскости голограммы может быть представлено в параксиальном приближении следующим образом:

$$Q(\xi, \eta) = \frac{1}{i\lambda d} \exp(i\frac{2\pi}{\lambda}d) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y)I(x, y) \times \exp\left\{i\frac{\pi}{\lambda d}[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]\right\} dx dy.$$

Данное уравнение служит отправной точкой для численного восстановления изображений в цифровой голографии в параксиальном приближении, при котором значения координат x и y , как и соответствующих им ξ и η , малы по сравнению с расстоянием d .

Из уравнения видно, что результирующее поле определяется двумерным Фурье-преобразованием произведения распределения интенсивности в голограмме $I(x, y)$ комплексной амплитуды опорной волны $R(x, y)$ и квадратичной фазовой функции пространственного распространения волны:

$$w(x, y) = \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right].$$

Отметим, что интеграл является интегралом свертки первых двух сомножителей и функции.

Интенсивность $I(x, y, d)$ и фаза $\varphi(x, y, d)$ восстановленного изображения могут быть получены из рассчитанного на расстоянии d комплексного поля $Q(\xi, \eta)$ с помощью следующих соотношений:

$$I(x, y, d) = |Q(x, y)|^2,$$

$$\varphi(x, y, d) = \arctg \frac{\text{Im}(Q(x, y))}{\text{Re}(Q(x, y))} = \arg(Q(x, y)).$$

Значения фазы, $\varphi(x, y, d)$ полученные по этой формуле, соответствуют разрывной функции с областью изменения в пределах интервала $[-\pi, \pi]$.

Для восстановления непрерывной развернутой картины значений фазы может быть применен один из широко известных алгоритмов развертывания фазы.

Распространенным методом численного восстановления записанного голографического изображения является вычисление распространения углового спектра, или так называемый “метод свертки”. В этом случае выражение для результирующего поля записывается с учетом параксиального приближения в следующем виде:

$$Q(v_\xi, v_\eta) = \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} d \left[\mathfrak{F}^{-1} \exp(i\pi\lambda d(v_\xi^2 + v_\eta^2)) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \mathfrak{F}^{+1} R(x, y) h(x, y)(v_\xi, v_\eta) \right] (v_\xi, v_\eta) \right\}.$$

Здесь в явном виде используется результат применения Фурье-преобразования к квадратичному фазовому множителю $w(x, y)$ в форме:

$$\mathfrak{F}^{+1} w(x, y)(v_\xi, v_\eta) = id \lambda \exp(-i\pi\lambda d(v_\xi^2 + v_\eta^2)),$$

где $\mathfrak{F}^{\pm 1}$ прямой (+1) и обратный (-1) непрерывные двумерные интегралы Фурье:

$$\mathfrak{F}^{\pm 1} f(x, y)(v_\xi, v_\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[\mp 2\pi i(v_\xi x + v_\eta y)] dx dy.$$

Первый шаг – восстановление голограммы. Происходит моделирование опорной волны, т.е. используя математический аппарат, соответствующий освещению голограммы опорным пучком. Математический аппарат – есть воздействие на голограмму “ h ” прямым и обратным преобразованиями Фурье:

$$F^{-1} \{ F \{ h \cdot r \} \cdot F \{ g \} \},$$

где r = reference, в нашем случае он равен единице (плоская волна).

$$g(k, l) = \frac{1}{i\lambda} \cdot \frac{\exp \left\{ \frac{2\pi i}{\lambda} \sqrt{d^2 + \left(k - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta \xi^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta \eta^2} \right\}}{\sqrt{d^2 + \left(k - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta \xi^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta \eta^2}}.$$

Второй шаг – дифракционный интеграл от каждой точки голограммы вычисляются с заданным шагом, после чего получают ряд плоскостей – слайсы. Рассматривая каждую из полученных плоскостей, можно продвигаться вглубь голограммы, фокусируясь на необходимых расстояниях. Из каждой голограммы восстанавливают численно структуру записанного волнового фронта и находят 3D координаты частиц.

Самый простой, но достаточно трудоемкий способ определения фазы восстановленного волнового поля – это просто вычислить фазу как отношение мнимой и действительной части комплексной амплитуды. Однако сделать это возможно только после второго Фурье-преобразования, т.е. после того, как мы избавимся от несущей и суперпозиции опорного и объектного пучков. Отметим, что хотя первичный массив является реальной функцией, его Фурье-образ уже функция комплексная. После второго Фурье-преобразования полученный массив $u_0(x, y, z_i)$ также будет комплексным. Тогда фаза в каждой точке определяется как:

$$\phi(x, y, z_i) = \arctg \frac{\text{Im}[u_0(x, y, z_i)]}{\text{Re}[u_0(x, y, z_i)]}.$$

Здесь z_i обозначает, что фаза определяется на определенном расстоянии от голограммы (ПЗС-матрицы).

Другой метод расчета фазы позволяет обойтись без цифровой реконструкции (двойного Фурье-преобразования), однако в этом случае полосы пространственной частоты должны иметь расстояние d между собой больше, чем 3 пикселя, т.е. $d > 3\Delta x$. В этом случае интенсивности на 3-х соседних пикселях можно записать в следующем виде:

$$I_1 = 2I_0 [1 + \cos(\phi_0 - \phi_R - \Delta\phi)] \\ I_2 = 2I_0 [1 + \cos(\phi_0 - \phi_R)] \\ I_3 = 2I_0 [1 + \cos(\phi_0 - \phi_R + \Delta\phi)]$$

$$\text{где } \Delta\phi = \frac{2\pi\Delta x}{d}.$$

Тогда, исключая из уравнений I_0 и ϕ_R , получим для ϕ_0

$$\phi_0(x, y) = \arctg \left[\frac{I_1 - I_3}{I_1 + I_3 - 2I_2} \text{tg} \frac{\Delta\phi}{2} \right].$$

Применяя данную операцию последовательно ко всем тройкам соседних пикселей, т.е. сдвигая каждый раз зарегистрированный массив на $\pm\Delta x$, получим распределение фаз для предметного пучка.

Дальнейшая обработка голограммы и извлечение информации о координатах и размерах дефектов полностью лежит на плечах компьютера или вычислительной системы. Восстановление изображения происходит по принципам компьютерной оптики. Голограмма облучается “виртуальным” опорным волновым фронтом (с параметрами реального опорного фронта). При помощи интеграла дифракции Рэля-Зоммер-

фельда, рассчитан результат дифракции “виртуального” опорного фронта на цифровой голограмме на некотором расстоянии Z . Этим изображением является проекция в плоскости XU трехмерного распределения координат дефекта. Критерием фокусного слоя, является минимум функции зависимости усредненной интенсивности от координаты Z .

Исследуя участки остекления наиболее подверженные воздействию аэродинамических нагрузок методом пошагового восстановления компьютерного голографического изображения, становится возможным выявление внутренних дефектов на начальной стадии, при их образовании. При детальном рассмотрении полученного восстановленного изображения выявлены не только видимые дефекты поверхности, но и невидимые при визуальном осмотре, которые являются основными при дефектоскопии авиационных остеклений (фонари кабин, фотолюки, иллюминаторы).

Для оперативного определения параметров дефекта также используется метод анализа профиля рельефа и структуры дефекта в полупрозрачном объекте по рассеянному излучению. Получаемые оптические поля имеют сложную амплитудно-фазовую структуру случайного характера, образующиеся при отражении или прохождении когерентной волны через случайно неоднородные объекты, например, при отражении лазерного пучка от шероховатой поверхности. Пространственное распределение интенсивности таких полей носит случайный характер с теми или иными статистическими свойствами.

Интерференция частично когерентного света связана с проявлением корреляционных свойств временных флуктуаций поля, обусловленных процессами, развивающимися в источниках света и оптических элементах схемы.

Учитывая, что при обработке записанных спекл-изображений отраженного от объекта излучения, информативные признаки последних

не изменяются и несут ту же информацию об объекте, для создания прибора целесообразно рассмотреть оптическую схему, представленную на рис. 2.

Когерентное излучение от двух полупроводниковых лазерных модулей с различной рабочей частотой, после объединения и выделения самой яркой моды, освещало исследуемый объект и отражалось. При этом часть отраженного излучения фиксировалась ПЗС-матрицей цифрового фотоаппарата.

Применительно к поставленной задаче, схема портативного устройства имеет вид [4] (рис. 2).

Когерентное излучение попадает на дефект 5 контролируемого объекта 1 и отражаясь от микроскопических образований на всю глубину объекта, в случае если он является полупрозрачным или прозрачным, попадает на матричный фотоприемник, исключая оптические элементы.

С полученными изображениями проводим корреляционную обработку, по стандартным и оригинальным программам, разработанным в среде MathCAD.

При зондировании малоcontrastных дефектов целесообразно использовать для получения спекл-изображений две рабочих частоты лазерного излучения. Данный вариант зондирования позволяет повысить точность измерений за счет равномерного распределения интервала корреляции $\Delta x = f(S_N)$. Не исключая возможности получения трех спекл-изображений при различных вариантах освещения получаем большую степень свободы для принятия решения и исключения ошибки.

Способ контроля элементов остекления воздушных судов на основе выше рассмотренных методов является неразрушающим, без демонтажа исследуемого элемента и позволяет объективно произвести их оперативный контроль, оценить параметры дефекта, определить размеры площади S_N ($мм^2$) дефекта, протяженности Δh ($мм$) с высокой точностью и проводить мо-

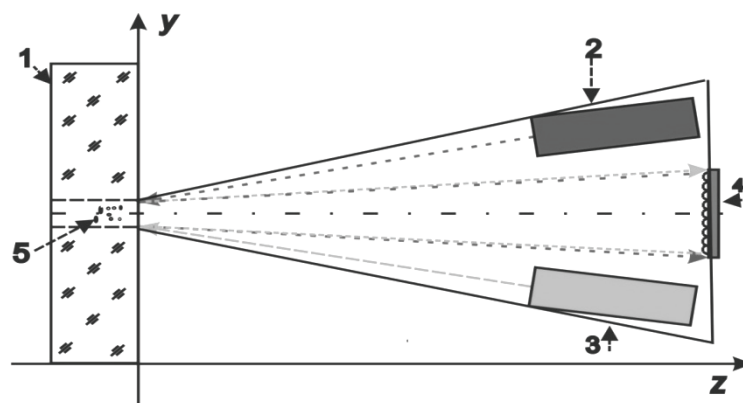


Рис. 2. Оптическая схема-макет устройства для получения спекл-картин:

1 – исследуемый объект, 2, 3 – полупроводниковые лазеры, 4 – матрица цифрового фотоаппарата (камеры), 5 – дефект

нитинг объекта. Получение результатов контроля в меньшей мере зависит от классификации специалиста, проводящего осмотр и диагностику данных элементов, и позволяют технику с низкой квалификацией выполнять данную операцию и исключить влияние субъективной составляющей на результат контроля.

С учетом полученных экспериментальных результатов, составлен алгоритм выявления, оценки, классификации и мониторинга дефектов остекления воздушных судов в процессе эксплуатации.

Полученный алгоритм позволяет максимально исключить неточности проведения контроля элементов остекления, вызванные некомпетентностью инженерно-технического состава, так как основные операции по обработке производится программными методами, с использованием портативных приборов и средств вычислительной техники. Использование данного алгоритма позволяет достаточно достоверно определить наличие малоконтрастного дефекта, произвести его оценку и классификацию, а при необходимости произвести дополнительное исследование этого дефекта с целью принятия правильного решения

по продолжению эксплуатации данного объекта, либо его ремонта или замены. Использование автоматической системы оценки, позволит производить данные операции персоналу, не имеющему высокой квалификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вольф И.Э., Малов А.Н., Сычевский А.В.* Диагностика подповерхностных дефектов прозрачных и полупрозрачных изделий // Книга "НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ-2008. Том 2. Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез. Лазерная физика. Фотоника и информационная оптика. Физика конденсированного состояния вещества" М.: МИФИ, 2008. С.110-111.
2. *Малов А.Н.* Лазерные методы бесконтактной диагностики машиностроительных изделий // Физика наукоемких технологий: сборник научных статей. Иркутск: ИВВАИУ. 2006. С. 41-68.
3. *Burley C.* The HART-II Test: Rotor Wakes and Aeroacoustics with Higher-Harmonic Pitch Control (HHC) Inputs / Casey Burley, Thomas Brook. – Hampton: NASA Langley Research Center, 2000. 120 с.
4. *Вольф И.Э., Малов А.Н., Бородин А.Н.* Мультиспектральный спекл-метод исследования полупрозрачных объектов // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11(31). № 5. С.42-45.

THE AUTOMATIC MONITORING SYSTEM OF A CONDITION OF ELEMENTS OF A GLASS COVER OF AIRCRAFTS

© 2012 I.E. Wolf¹, A.N. Malov²

¹ Military Scientific-Educational Centre of Air Forces "Military-Air Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Jr.A. Gagarin", Voronezh

² Irkutsk State Medical University

The automatic monitoring system of aircraft glass elements condition is developed on the basis of step-by-step computer restoration methods of the written down wavefront of laser radiation intensity change at its passage through testing object and a method of the analysis of speckle-structures registered on the CCD-matrix at reflection of laser radiation from classified defect.

Keywords: the holographic image, speckl-structure, defect definition.