

Н. И. Лаптев, И. А. Абдуллин, Н. А. Сазонникова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Ключевые слова:* лазерное зондирование поверхности, вероятность обнаружения, отражательные характеристики.

*Проведены экспериментальные исследования по определению отражательных характеристик поверхностей изделий аэрокосмической техники. Исследован характер поведения коэффициента отражения при импульсно-периодическом воздействии с различной величиной интенсивности. При проведении исследования влияния параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания использовался стенод лазерной локации. Получены зависимости контрастности изображения от угла падения излучения, длины волны и скважности импульсов. Проведена экспериментальная оценка влияния длины волны излучения на вероятность обнаружения объектов при лазерной локации.*

*Key words:* laser surface sounding, detecting probability, reflecting parameters.

*Experimental investigations on aircraft surface reflecting characteristics were carried out. Reflectance behavior at pulse-periodic action at different intensity value was estimated. During investigation parameters of sound laser beam influence at probability of detecting and recognition the laser location installation was used. Contrast from incident angle, light wave and relative pulse duration dependencies were received. The experimental estimation of light wave to detecting probability influence at the aircrafts surfaces distance sounding was carried out.*

### Введение

В настоящее время находят широкое применение оптические методы контроля качества изделий машиностроения и массового производства благодаря их бесконтактности, высокой информативности, быстрдействию, возможности работы в реальном масштабе времени. Лазерные диагностические системы применяются в России и за рубежом для контроля качества изделий машиностроения, авиационной и космической техники, автомобилестроения, приборостроения, для выявления повреждений нефте- и газопроводов и скважин [1-7]. Лидерство в области лазерной дефектоскопии принадлежит ученым Европы и США. Зарубежные дефектоскопические системы обеспечивают разрешающую способность на уровне 10 мкм [3]. Отечественные лазерные дефектоскопические системы не обеспечивают требуемой вероятности обнаружения и распознавания дефектов поверхностного слоя изделий авиационной и космической техники, также не имеют возможности адаптации к условиям проведения контроля.

В ряде работ проведены исследования по определению интегральных характеристик рассеяния поверхностей различных форм [5 - 7] для оценки возможностей обнаружения объектов при лазерной локации. Проведено физическое и численное моделирование процесса лазерной локации с целью определения эффективной площади рассеяния и переходной характеристик летательных аппаратов (ЛА) и элементов их внешней компоновки [8]. Исследована возможность контроля геометрии поверхности лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) при дистанционном зондировании их поверхностей [9]. С целью дальнейшего повышения эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей требуется оценить влияние параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и рас-

познавания элементов поверхности и внешней компоновки ЛА и элементов конструкции ГТД.

### 1. Экспериментальное исследование оптических характеристик конструкционных материалов

Любая исследуемая поверхность характеризуется одновременным наличием нескольких признаков, поэтому для достоверного распознавания объекта (определения его характерных признаков) и определения его состояния (температуры, уровня напряжений в поверхностном слое) необходимо формирование многоканальной информационной системы с одновременным измерением нескольких параметров.

В силу сложности аналитического расчета зависимости величины регистрируемого сигнала и вероятностей обнаружения и распознавания объектов при дистанционном зондировании с использованием лазерно-электронных систем актуальными являются методы численного и физического моделирования данных процессов.

Форма индикатрисы рассеивания в полярных координатах для источника с бесселевской корреляцией описывается выражением [7]:

$$\chi = A \frac{k+2}{2} \cos^k \varphi, \quad (1)$$

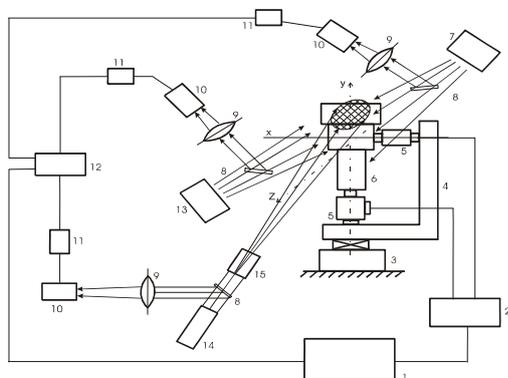
где  $k$  – показатель индикатрисы,  $k = \infty$  – зеркальная поверхность,  $k = 0$  – равномерное рассеивание во все стороны.

При этом полная величина мощности (энергии) лазерного излучения определяется площадью, ограниченной кривой индикатрисы в полярных координатах в диапазоне от 0 до  $\pi$ . Величина мощности или энергии, попадающей на приемный объект, определяется площадью, заключенной в угле, соответствующем числовой апертуре приемного объектива.

На разработанном стенде для определения оптических характеристик конструкционных материалов поверхностей проведены экспериментальные исследования по определению отражательных характеристик поверхностей материалов внешней компоновки ЛА.

Так, для алюминиевого сплава после химполирования при увеличении длины волны излучения с 0,56 мкм до 10,6 мкм происходит изменение показателя индикатрисы рассеяния с 5 до 20, что соответствует увеличению величины принятого сигнала на 35 %. Для теплоизоляционной капроновой ткани при изменении длины волны в том же диапазоне показатель индикатрисы изменяется с 2 до 12, что приводит к увеличению величины принятого сигнала на 45 %. Исследован характер поведения коэффициента отражения при импульсно-периодическом воздействии с различной величиной интенсивности. Экспериментально показано, что нитрозмалеовое, терморегулирующее покрытия и экранно-вакуумная теплоизоляция имеют диффузный характер отражения излучения, а фоточувствительный слой солнечных батарей и алюминиевый сплав после химполирования - зеркальное. Так, при отражении от поверхности химполированного алюминиевого сплава ширина индикатрисы рассеивания составляет  $\theta = 3^\circ$ , для ЭВТИ  $\theta = 25^\circ$ , а для ТРП на основе диоксида циркония  $\theta = 125^\circ$ .

При проведении исследования влияния параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания использовался стенд лазерной локации (рис. 1).



**Рис. 1 – Испытательный стенд лазерной локации: 1 - ПЭВМ; 2 - блок управления приводами модели; 3 - узел крепления стенда; 4 - рама крепления приводов; 5 - привод с датчиками углового поворота; 6 - модель цели; 7 - первый имитатор источника света; 8 - полупрозрачное зеркало; 9 - линза; 10 - фотоприемник; 11 - фоторегистратор; 12 - блок обработки информации; 13 - второй имитатор источника света; 14 - лазер; 15 - формирователь зондирующего пучка; 16 – телекамера**

Он включает в свой состав механическую систему углового сопровождения и устройства оптической визуализации и необходим для решения следующих задач: проведение анализа уровня освещенности участков элемента конструкции, исследование оптических свойств поверхностей и распределение освещенности в зондирующем пучке освеще-

ния, определение координат энергетического центра освещенности изделия при заданном уровне фона, определение вектора перемещения энергетического центра освещенности при изменении положения изделия в пространстве, определение оптических свойств материалов (коэффициент отражения и индикатриса отражения) при заданных температурах.

## 2. Физическое моделирование процесса лазерной локации

Для осуществления физического моделирования процесса дистанционного зондирования поверхностей ЛА необходимо соблюдать принцип дифракционного подобия полей, рассеянных реальным объектом и его масштабной моделью в дальней зоне [9]. Испытательный стенд обеспечивает идентичность углов облучения и приема по сравнению с реальной измерительной системой. Используемые модели цели должны подробно воспроизводить в масштабе копии объект локации и имитировать характеристики рассеяния его покрытий. При проведении подобных экспериментальных исследований на испытательном стенде изучаемая модель типового изделия с помощью двух механизмов поворота может вращаться вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. При этом угол поворота модели вокруг каждой оси отслеживается с помощью датчиков, каждый из которых представляет собой фотодиод и фотоприёмник, разделённый вращающимся диском с отверстиями, насаженным на вал электродвигателя механизма поворота. Электрические сигналы с датчиков угла поворота поступают в вычислительный комплекс, где количество поступивших импульсов преобразуется в угол поворота. Для создания зондирующего пучка освещения модели служат лазеры с рабочими длинами волн излучения в диапазоне  $(0,56-1,06) \cdot 10^{-6}$  м.

Оптический стенд имеет измерительную систему параметров выходного излучения и формирователь зондирующего пучка. Отражённое от модели излучение регистрируется фотоприёмником, телекамерой или тепловизором. Для создания фоновой обстановки служит осветитель. Стыковка исполнительных механизмов оптического стенда с вычислительной машиной и комплексом для обработки изображений позволяет автоматизировать процесс обработки результатов исследований при оптической локации типового изделия. Он включает следующее оборудование: привод модели, фотометрическую модель летящей цели, сканирующее устройство, имитаторы фонового излучения. В качестве моделей объектов используются космические аппараты ALOS (Advanced Land Observation Satellite) и КА Ikonos. Плотность мощности зондирующего пучка составляла  $0,6 \text{ Вт/м}^2$ . Съёмка отраженного сигнала проводилась телекамерой WAT-231S и вводилась для обработки в ПЭВМ. Подсветка имитатором солнца составляла удельную мощность  $1388 \text{ Вт/м}^2$ . Направление потока излучения имитатора составляло  $\varphi = -45^\circ$  относительно главной плоскости испытательного стенда и  $\beta = 10^\circ$  относительно горизонтальной плоскости. Зондирующий поток лазерного излучения располагался под углами  $\varphi =$

$-30^\circ \div -45^\circ$ ,  $\beta = 0-30^\circ$  ( $\varphi$  – угол между вертикальной плоскостью и направлением зондирующего потока лазерного излучения,  $\beta$  – угол между горизонтальной плоскостью и потоком лазерного излучения). Использовалось импульсное лазерное излучение со скважностью в диапазоне 2 – 4 и длиной волны излучения 0,56 – 1,06 мкм (скважность - отношение периода следования (повторения) импульсов одной последовательности к их длительности).

Условия проведения эксперимента представлены в табл. 1.

**Таблица 1 – Значения параметров зондирующего лазерного излучения**

Номер эксперимента	Скважность	Угол падения лазерного излучения	Длина волны излучения
1.1	2	45	1,06
1.2			0,63
1.3			0,56
1.4	2	40	1,06
1.5			0,63
1.6			0,56
1.7	2	30	1,06
1.8			0,63
1.9			0,56
2.1	4	45	1,06
2.2			0,63
2.3			0,56
2.4	4	40	1,06
2.5			0,63
2.6			0,56
2.7	4	30	1,06
2.8			0,63
2.9			0,56
3.1	6	45	1,06
3.2			0,63
3.3			0,56
3.4	6	40	1,06
3.5			0,63
3.6			0,56
3.7	6	30	1,06
3.8			0,63
3.9			0,56

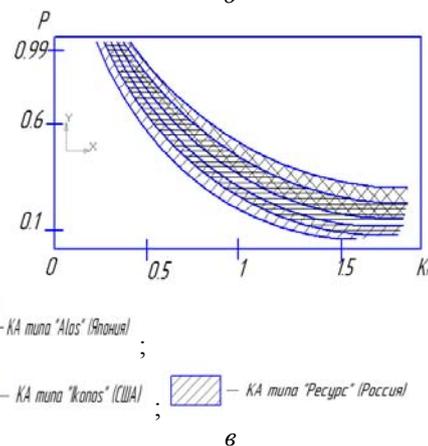
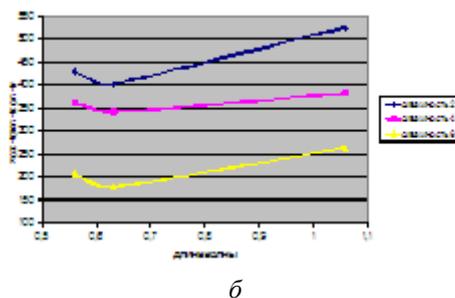
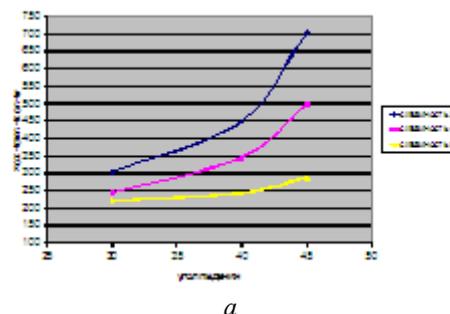
Для анализа полученных изображений был применен стандартный пакет программ *MATLAB 7.5* (пакет *Image Processing Toolbox*). На рис. 2 приведены примеры полученных гистограмм. Номера гистограмм соответствуют зарегистрированным изображениям.

По результатам анализа гистограмм распределения интенсивности в изображениях рассчитывалась величина контрастности изображения по зависимости:

$$K = \frac{I_{\max} N_{\max} - I_{\min} N_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (2)$$

где  $I_{\max}$  – максимальное значение интенсивности в изображении,  $N_{\max}$  – число пикселей с интенсивностью  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – минимальное значение интенсивности

в изображении,  $N_{\min}$  – число пикселей с интенсивностью  $I_{\min}$ .



**Рис. 2 – Экспериментальные зависимости контрастности изображения и коэффициента правдоподобия лазерной локации:** а - зависимости контрастности изображений от угла падения излучения и скважности импульсов, б - зависимости контрастности изображений от длины волны и скважности импульсов, в - зависимость коэффициента правдоподобия лазерной локации от длины волны излучения для моделей различных КА: 1 - верхняя граница области обнаружения: частота генерации- 30 Гц, скважность импульса 6; 2 - нижняя граница области обнаружения: непрерывный режим генерации

Построены зависимости контрастности изображения от угла падения излучения, длины волны излучения и скважности импульсов (рис.2 а, б).

Полученные зависимости показывают, что с ростом угла падения излучения в диапазоне 30 – 45 при скважности, равной 6, контрастность возрастает в 1,5 раза, а при скважности, равной 2 – в 2 раза. С ростом длины волны с 0,56 мкм до 0,63 мкм сначала происходит снижение контрастности на 10 – 15%, а затем ее рост на 15 – 20%.

Проведена экспериментальная оценка влияния длины волны излучения на вероятность обнаружения объектов при лазерной локации. Коэффициент правдоподобия лазерной локации  $P$  определяется как отношение площади видимого изображения, ограниченной распределением плотности мощности отраженного сигнала, к общей величине площади его изображения. Построена зависимость коэффициента правдоподобия  $P$  от безразмерного параметра  $K_1 = V_1/\lambda$ , где  $V_1$  – диаметр зондирующего потока лазерного излучения.

На рис. 2, в приводятся сравнительные зависимости величины  $P$  для различных объектов типа КА с учетом изменяемой длины волны  $\lambda$ , частоты генерации  $\nu$  и величины скважности импульса излучения  $\Lambda$ .

Заметим, что величина коэффициента правдоподобия обнаружения объекта  $P$  зависит от его конструкции при неизменном составе группы материалов внешней компоновки. Состав группы материалов внешней компоновки: теплоизоляционная капроновая ткань; пластины с покрытием на основе диоксида циркония; алюминиевые сплавы после химполирования; пластины радиационных элементов из арсенида галлия. В данных условиях проведения исследований объект типа КА «Ikonos» (США) имеет большую вероятность обнаружения (оптическая ось зондирующего пучка перпендикулярна строительной оси объекта).

### Заключение

В данной работе проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента отражения в зависимости от длины волны, угла па-

дения и скважности импульсно-периодического излучения. С использованием разработанного стенда лазерной локации получены зависимости контрастности изображения от длины волны, угла падения излучения и скважности импульсов. Показано, что с ростом длины волны в диапазоне 0,56...1,06 мкм и угла падения излучения в диапазоне 30...45° контрастность изображений возрастает. С увеличением скважности импульсов с 2 до 6 контрастность изображений снижается. Коэффициент правдоподобия обнаружения объекта зависит от его конструкции при неизменном составе группы материалов внешней компоновки.

### Литература

1. И.А.Абдуллин, Г. Г. Богатеев, Н.И.Лаптев, Ю.В.Зорин, И.Ю.Еремин, Вестник Казанского технологического университета, 13, 12, 489–495 (2010).
2. И.А.Абдуллин, Н.И.Лаптев, Ю.В.Зорин, И.Ю.Еремин, Г.Г.Богатеев, Вестник Казанского технологического университета, 13, 12, 496–501 (2010).
3. А.Н. Валентюк, Оптическое изображение при дистанционном наблюдении. Наука і тэхніка, Минск, 1991. 358 с.
4. М.А. Butler, Optics Letters, 24, 7, 457-459 (1999).
5. Е.Г. Лебедько, Ву Тунг Нгуен. В сб. *Лазеры, измерения, информация*. СПбГТУ, СПб. 2005. С.36.
6. Ю.Л.Смирнова. В сб. *Аэрокосмические технологии*. Москва. 2004. С.– 38 – 42.
6. М.Л. Белов, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1, 63-73, (2007).
7. Л.В. Лабунец, Радиотехника и электроника, 47, 3, 308-321 (2002).
8. А.А. Кеткович, Н.И. Яковлева, Б.А. Чичигин, Контроль. Диагностика, 3, 32-34 (2007).

© Н. И. Лаптев – д-р техн. наук, проф., зав. каф. сертификации энергонасыщенных производств СамГТУ, specpromtex@inbox.ru; И. А. Абдуллин – д-р техн. наук, проф., зав. каф. химии и технологии гетерогенных систем КНИТУ, ilnur@kstu.ru; Н. А. Сазонникова – канд. техн. наук, доц. каф. сертификации энергонасыщенных производств СамГТУ, nasazonnikova@yandex.ru.