

УДК 629.78 + 621.373.876

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

© 2011 Н. А. Сазонникова

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)

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 стенд 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.

*Лазерное зондирование поверхности, вероятность обнаружения, отражательные характеристики.*

В настоящее время находят широкое применение оптические методы контроля качества изделий машиностроения и массового производства благодаря их бесконтактности, высокой информативности, быстродействию, 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 учёным Европы и США. Зарубежные дефектоскопические системы обеспечивают разрешающую способность на уровне 10 мкм [1]. Отечественные лазерные дефектоскопические системы не обеспечивают требуемой вероятности обнаружения и распознавания дефектов поверхностного слоя изделий авиационной и космической техники, а также не имеют возможности адаптации к условиям проведения контроля.

В ряде работ проведены исследования по определению интегральных характеристик рассеяния поверхностей различных форм [3 - 5] для оценки возможностей обнаружения объектов при лазерной локации. Проведено физическое и численное моделирование процесса лазерной локации с целью оп-

ределения эффективной площади рассеяния и переходной характеристики летательных аппаратов (ЛА) и элементов их внешней компоновки [6]. Исследована возможность контроля геометрии поверхности лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) при дистанционном зондировании их поверхностей [7]. С целью дальнейшего повышения эффективности лазерно-электронных систем дистанционного зондирования поверхностей требуется оценить влияние параметров зондирующего лазерного излучения на вероятность обнаружения и распознавания элементов поверхности и внешней компоновки ЛА и элементов конструкции ГТД.

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 расчёта 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 [5]:

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

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 приёмный объектив, определяется площадью, заключённой в угле, соответствующем числовой апертуре приёмного объектива.

На разработанном стенде для определения оптических характеристик конструкционных материалов поверхностей проведены экспериментальные исследования по определению отражательных характеристик поверхностей материалов внешней компоновки ЛА. Полученные зависимости представлены на рис. 1.

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 нитроэмалевое, терморегулирующее покрытие и экранно-вакуумная теплоизоляция имеют диффузный характер отражения излучения, а фоточувствительный слой солнечных батарей и алюминиевый сплав после химпо-

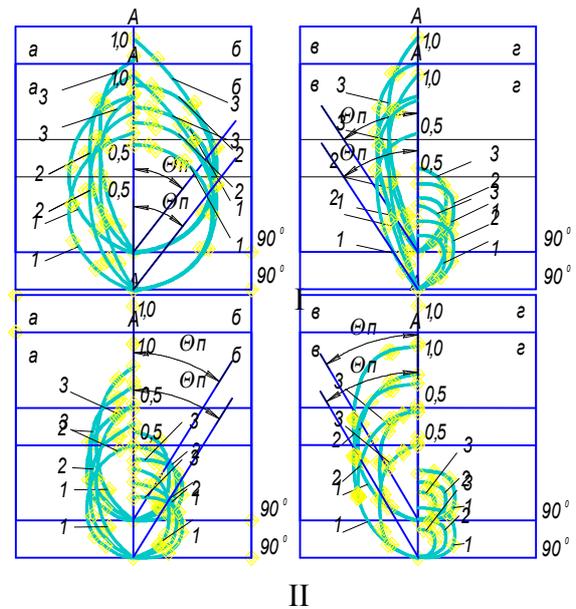


Рис. 1. Индикатриса рассеивания излучения для различных материалов (в полярных координатах):  
 I: 1 – длина волны  $\lambda = 0,56 \cdot 10^{-6}$  м, 2 – длина волны  $\lambda = 1,06 \cdot 10^{-6}$  м, 3 – длина волны  $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м;  
 II: 1 – частота повторения импульсов 10 Гц, 2 – частота повторения импульсов 20 Гц, 3 – частота повторения импульсов 30 Гц,  
 а – теплоизоляционная капроновая ткань; б – пластина с покрытием на основе диоксида циркония; в – алюминиевый сплав после химполирования; г – пластина радиационных элементов из арсенида галия

лирования - 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. 2).

Он включает в свой состав механическую систему углового сопровождения и устройства оптической визуализации и необходим для решения следующих задач: проведение анализа уровня освещённости участков элемента конструкции, исследование оптических свойств поверхностей и распределение освещённости в зондирующем пучке освещения, определение координат энергетического центра освещённости изделия

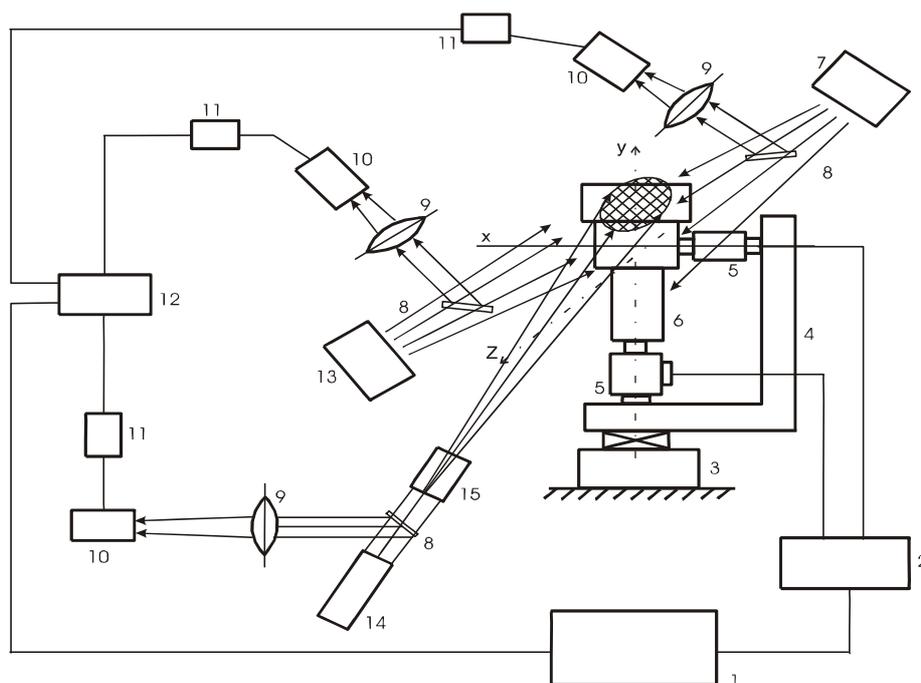


Рис. 2. Испытательный стенд лазерной локации: 1 - ПЭВМ; 2 - блок управления приводах модели; 3 - узел крепления стенда; 4 - рама крепления приводов; 5 - привод с датчиками углового поворота; 6 - модель цели; 7 - первый имитатор источника света; 8 - полупрозрачное зеркало; 9 - линза; 10 - фотоприемник;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

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

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 [6]. Испытательный стенд обеспечивает идентичность углов облучения и приёма 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

$$0,6 \frac{Вт}{м^2}.$$

Съемка отражённого сигнала проводилась телекамерой WAT-231S и вводилась для обработки в ПЭВМ. Подсветка имитатором солнца составляла удельную мощность

$$1388 \frac{Вт}{м^2}.$$

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  $\varphi = -30^\circ - 45^\circ$ ,  $\beta = 0-30^\circ$  ( $\varphi$  - 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 таблице 1.

Полученные изображения приведены на рис. 3. Номера изображений соответствуют условиям проведения эксперимента.

Таблица 1. Значения параметров зондирующего лазерного излучения

Номер	Скважность	Угол падения лазерного излучения, град	Длина волны излучения, мкм
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

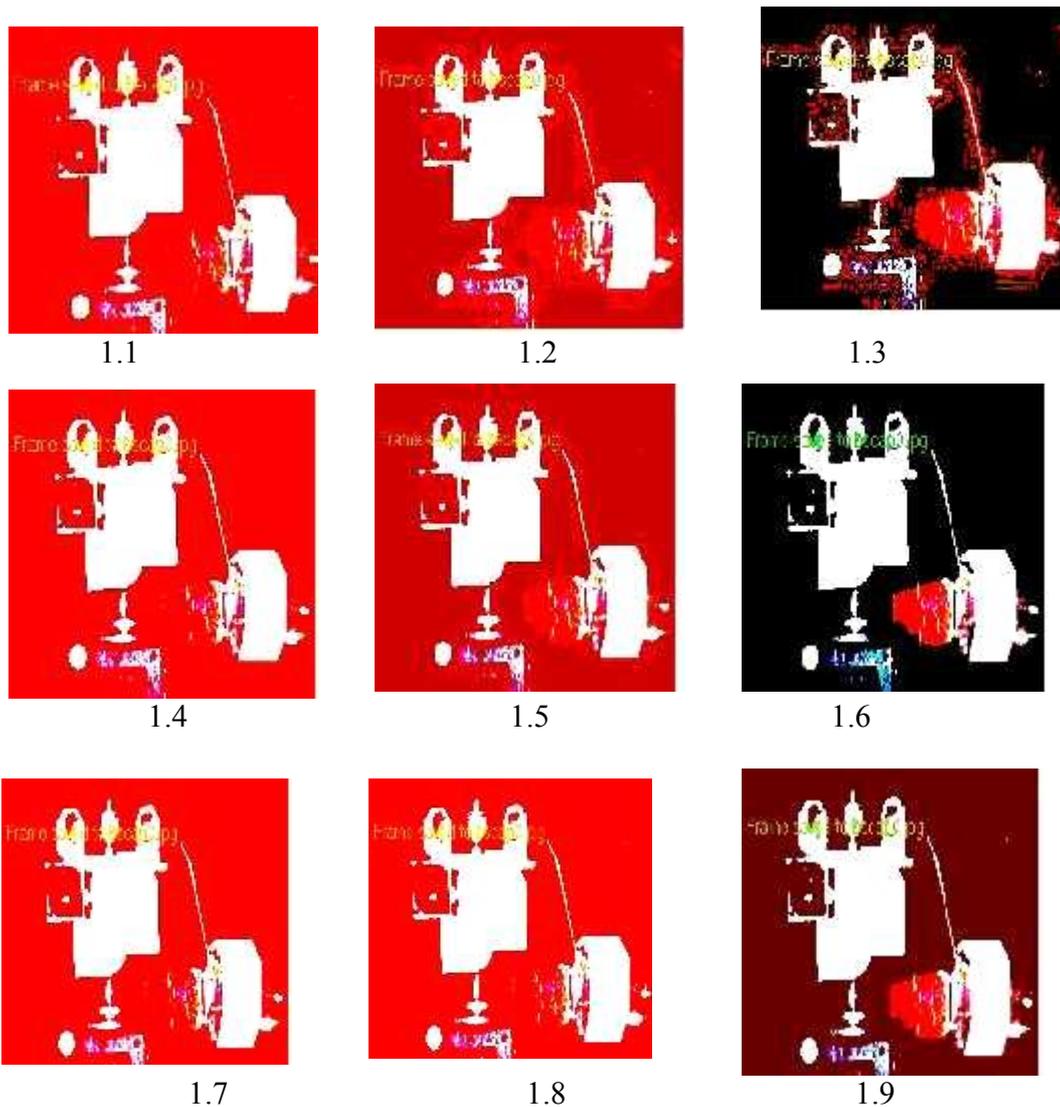


Рис. 3. Изображения фотометрических моделей космических аппаратов

Для анализа полученных изображений был применён стандартный пакет программ *MATLAB 7.5* (пакет *Image Processing Toolbox*). На рис. 4 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  $I_{\min}$ .

Построены зависимости контрастности изображения от угла падения излучения, длины волны излучения и скважности импульсов (рис. 5, 6).

Полученные зависимости показывают, что с ростом угла падения излучения в диапазоне  $30^\circ \dots 45^\circ$  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 её рост на 15...20 %.

Проведена экспериментальная оценка влияния длины волны излучения на вероятность обнаружения объектов при лазерной

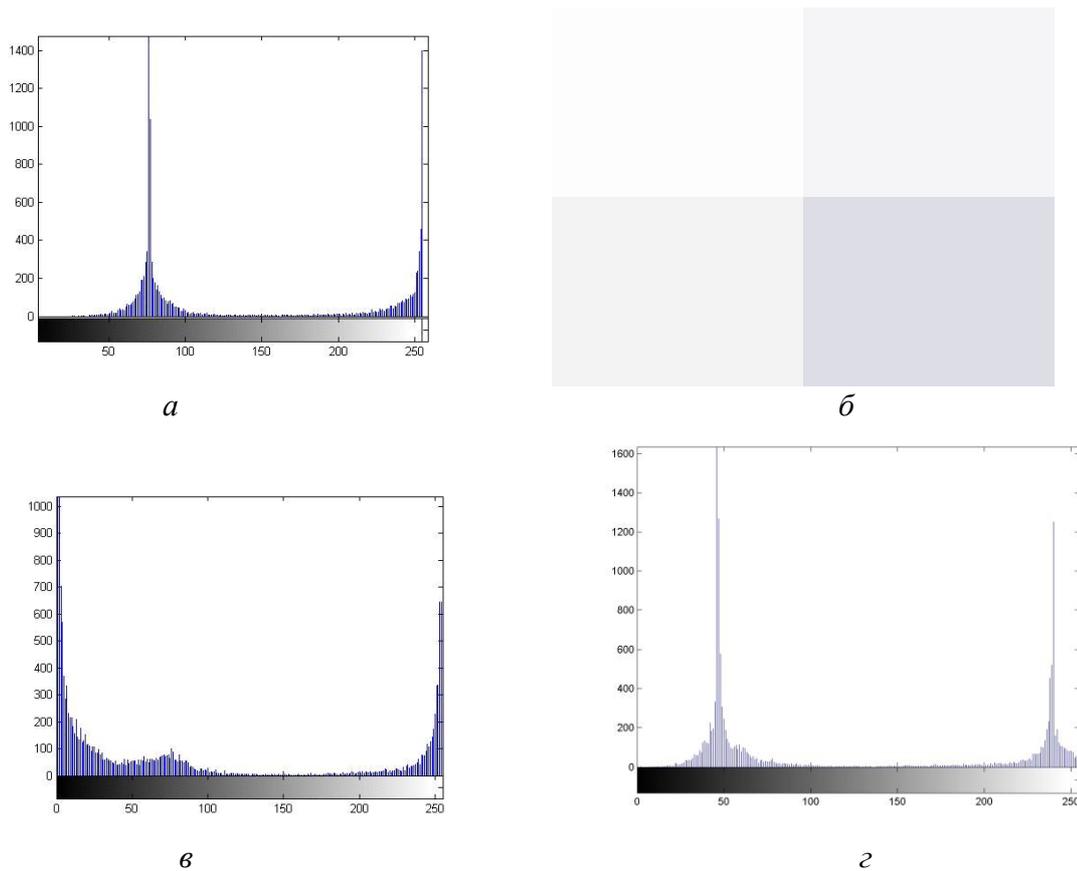


Рис. 4. Примеры гистограмм обработки изображений: а – гистограмма для изображения 1.1, б – гистограмма для изображения 1.2, в – гистограмма для изображения 1.3, г – гистограмма для изображения 3.7

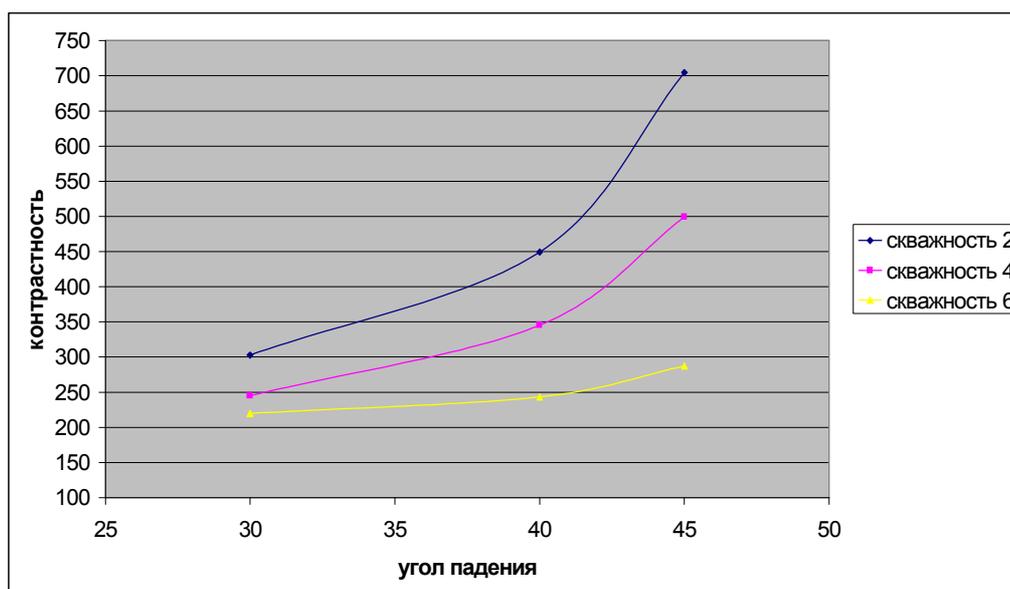


Рис. 5. Зависимости контрастности изображений от угла падения излучения и скважности импульсов

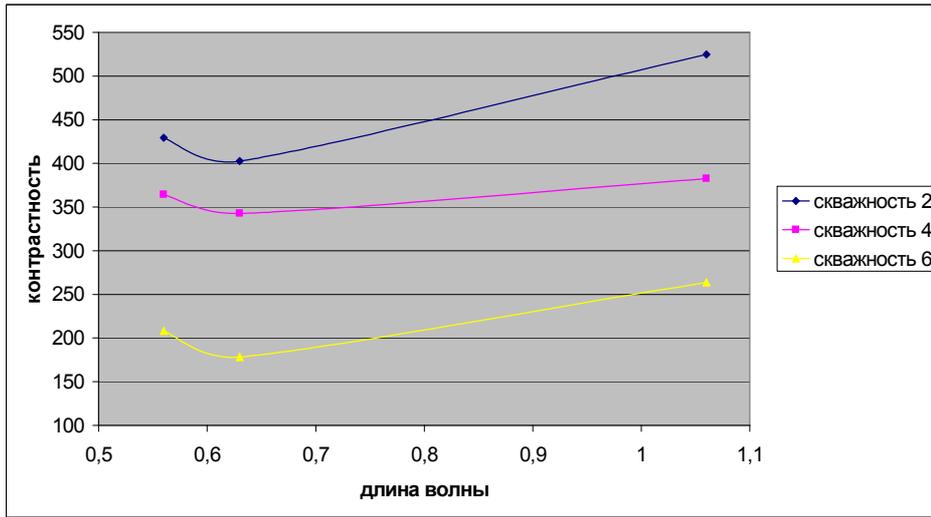


Рис. 6. Зависимости контрастности изображений от длины волны и скважности импульсов

локации. Коэффициент правдоподобия лазерной локации  $P$  определяется как отношение площади видимого изображения, ограниченной распределением плотности мощности отражённого сигнала, к общей величине площади его изображения. Построена зависимость коэффициента правдоподобия  $P$  от безразмерного параметра  $K_1 = B_1/\lambda$ , где

$B_1$  – диаметр зондирующего потока лазерного излучения.

На рис. 7 приводятся сравнительные зависимости величины  $P$  для различных КА с учётом изменяемой длины волны  $\lambda$ , частоты генерации  $\nu$  и величины скважности импульса излучения  $\Lambda$ .

Заметим, что величина коэффициента правдоподобия обнаружения объекта  $P$  зави-

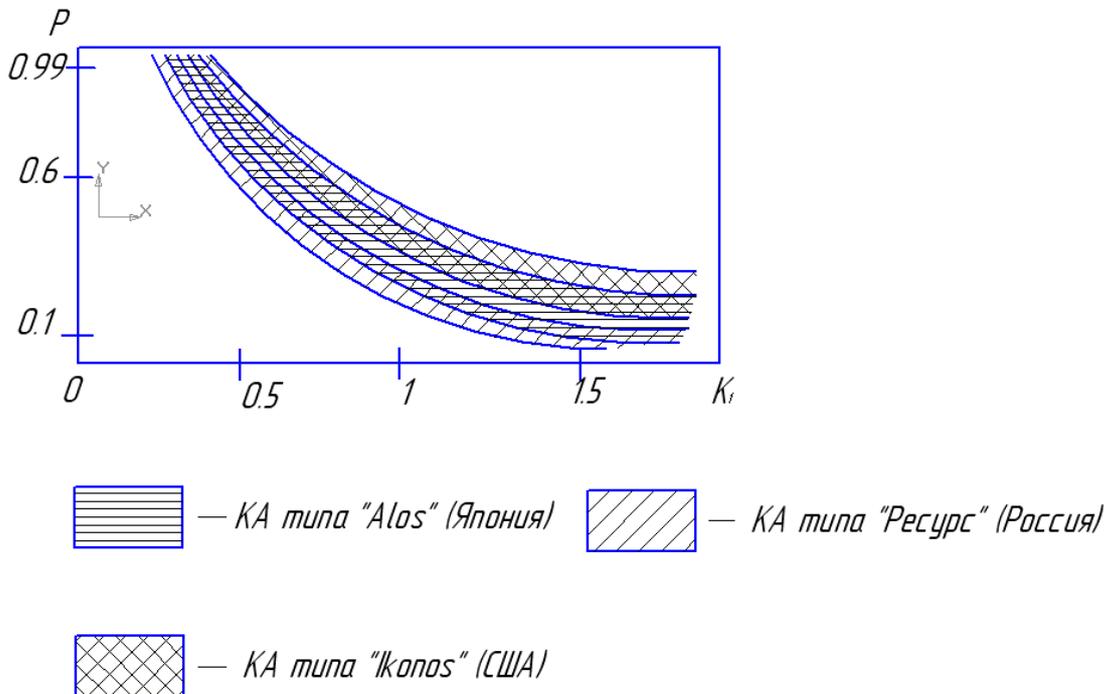


Рис. 7. Зависимость коэффициента правдоподобия лазерной локации от длины волны излучения для моделей различных КА: 1 - верхняя граница области обнаружения: частота генерации - 30 Гц, скважность импульса 1/5; 2 - нижняя граница области обнаружения: непрерывный режим генерации

сит 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 КА «Ikonos» (США) имеет большую вероятность обнаружения (оптическая ось зондирующего пучка перпендикулярна строительной оси объекта).

Таким образом, в данной работе проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента отражения в зависимости от длины волны, угла падения 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.

#### Библиографический список

1. Валентюк, А.Н. Оптическое изображение при дистанционном наблюдении [Текст]/ А.Н. Валентюк, К.Г. Предко //Институт физики имени Б.И. Степанова АН

БССР. - Минск: Навука і тэхніка, 1991.-358 с.

2. Butler, M.A. Laser surface profiler[Text]/ M.A. Butler, An-Shyang Chu// Optics Letters, 1999, Vol.24, No.7, P.457-459.

3. Лебедько, Е.Г. Анализ рельефа поверхности при моноимпульсной лазерной локации [Текст] / Е.Г. Лебедько, Нгуен Ву Тунг // Сборник трудов конференции “Лазеры, измерения, информация 2005”. – СПб: СПбГТУ. –2005. - С. 36.

4. Смирнова, Ю.Л. Лазерная дальнометрическая станция как составная часть аэрокосмической системы [Текст]/Ю.Л. Смирнова // Аэрокосмические технологии: материалы Первой международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея. - М. - 2004. - С. 38 – 42.

5. Белов, М.Л. Рассеяние лазерного излучения на неровной поверхности со сложной локальной индикатриссой отражения в турбулентной атмосфере. [Текст]/ М.Л. Белов, В.И. Козинцев, Б.В. Стрелков. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». - М. - 2007. - №1. - С. 63-73.

6. Лабунец, Л. В. Математическое и физическое моделирование переходных характеристик 3D-объектов в однопозиционной системе оптической локации [Текст]/ Л.В. Лабунец//Радиотехника и электроника. - 2002. – Т. 47. - № 3. - С. 308-321.

7. Кеткович, А.А. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 [Текст]/ А.А. Кеткович, Н.И. Яковлева, Б.А. Чичигин// Контроль. Диагностика. - № 3. - 2007. - М.: Машиностроение. – С. 32-34.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF LASER-ELECTRONIC SYSTEMS FOR AIRCRAFT SURFACE REMOTE SOUNDING

© 2011 N. A. Sazonnikova

Samara State Aerospace University named  
after academician S. P. Korolyov (National Research University)

Experimental studies to define the reflection characteristics of aircraft surfaces have been carried out. The behavior of the reflectance under pulse periodic action with different values of intensity has been analysed. A test-bed for laser detection and ranging of objects is used to analyse the influence of sounding laser radiation parameters on the probability of detection and recognition. Relationships between the image contrast range and the impulse angle of incidence, wavelength and relative pulse duration have been obtained. Experimental estimation of the influence of the radiation wavelength on the probability of detecting objects in case of using lasers has been carried out.

*Laser surface sounding, detection probability, reflection parameters.*

### Информация об авторе

**Сазонникова Надежда Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru). Область научных интересов: лазерные информационно-измерительные системы диагностики состояния поверхности конструкционных материалов.

**Sazonnikova Nadezhda Alexandrovna**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of automatic systems of energy devices, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru). Area of research: laser information and measurement systems.