

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

©2011 Н. А. Сазонникова

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

С целью оценки вероятностей обнаружения и распознавания объектов в зависимости от параметров измерительной системы проведено статистическое моделирование данного процесса. Определены зависимости вероятности обнаружения от значения отношения диаметра пятна к характерному размеру элемента поверхности на исследуемой поверхности, уровня шумов, числа переотражений в элементах поверхности. Показаны возможности снижения уровня шумов в измерительной системе при стабилизации мощности источника излучения.

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

Научно-технический прогресс в ведущих отраслях экономики (авиакосмический и нефтегазовый комплексы, электроэнергетика, атомная промышленность) требует применения все более сложных изделий с одновременным ужесточением требований к точности их изготовления.

Лазерно-электронные системы дистанционного зондирования применяются для дефектоскопии поверхности летательных аппаратов и элементов их конструкций, для управления системами посадки летательных аппаратов, а также для определения характеристик летательных аппаратов в полете.

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. 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 летательных аппаратов и элементов конструкции газотурбинных двигателей.

Для решения задач авиакосмического комплекса рассмотрены основные типы измерительных систем и их характерные признаки:

- Дефектоскопические системы. Известна априорная вероятность наличия дефектов того или иного вида. Удаление поверхности от источника излучения значительно меньше длины когерентности. Наиболее информативные признаки – измерение зеркальной составляющей для оценки геометрических характеристик, определение индикатрисы рассеяния для определения шероховатости.

- Ботовой анализатор системы посадки. Априорная вероятность наличия объектов мало известна или неизвестна. Удаление зондируемой поверхности от источника излучения соизмеримо с длиной когерентности. Снижена вероятность распознавания по зависимости отражательной способности от длительности и скважности импульсов. Одновременное измерение зеркальной и диффузной составляющих.

- Обнаружение объектов в космическом пространстве. В этом случае не удается исследовать зависимость отражательной способности и индикатрисы рассеяния от длительности и скважности импульсов. Измерение проводится в дальней зоне, размеры диаметра пучка превышают размеры объекта и его элементов. Преимущественно проводится измерение диффузной составляющей при нескольких длинах волн и углах падения излучения.

Для рассмотренных типов измерительных систем построены зависимости вероятности обнаружения и вероятности ложной тревоги от соотношения сигнал/шум и раз-

ных значений порогового отношения правдоподобия (1 – локация с борта летательного аппарата, 4 – локация в космическом пространстве, 9, 19 – поверхностная дефектоскопия) для детерминированного сигнала (рис. 1).

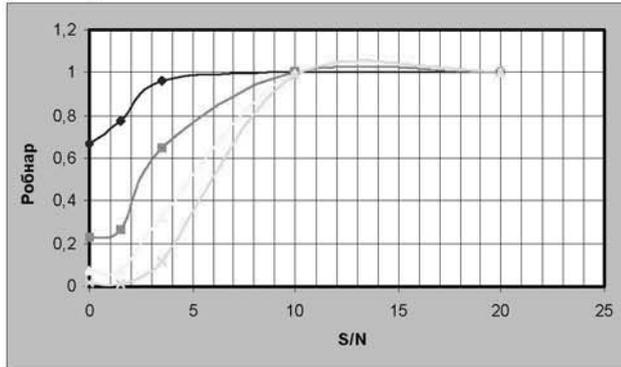


Рис. 1. Зависимости вероятности обнаружения для рассматриваемых типов задач и соотношения сигнал/шум для детерминированного сигнала

Величина порогового сигнала определяется зависимостью [1]

$$Y_{\Pi} = \left( \frac{1}{S_{\max}} \right) \left[ s^2 (S_{\max} / N) \ln L_{\Pi} + (S_{\max}^2 / 2) \right] = S_{\max} \ln L_{\Pi} + 0,5 S_{\max}^2,$$

где  $L_{\Pi}$  – пороговое отношение правдоподобия, зависит от назначения измерительной системы,  $L_n = q/p$ ;  $p$  – априорная вероятность наличия сигнала;  $q$  – априорная вероятность отсутствия сигнала.

Для рассмотренных типов измерительных систем характерны следующие значения порогового отношения правдоподобия: для локации с борта летательного аппарата  $L_n = q/p = 0,5/0,5 = 1$ , для обнаружения используется критерий максимума правдоподобия; для дефектоскопии  $L_n = q/p = 0,95/0,05 = 19$ , используется критерий Котельникова; для локации в космическом пространстве  $L_n = q/p = 0,9/0,1 = 9$ , используется критерий Котельникова.

Увеличение соотношения сигнал/шум в интервале 2...5 приводит к росту вероятности обнаружения на 20...50 % в зависимости от типа измерительной системы (20 – для локации с борта летательного аппарата, 50 – промышленная дефектоскопия).

С целью оценки вероятностей обнаружения и распознавания объектов в зависимости от параметров измерительной системы проведено статистическое моделирование

данного процесса с использованием ранее полученных аналитических зависимостей [2].

Проведено статистическое моделирование процессов обнаружения и распознавания с помощью стандартного пакета программ *Matlab 7.5 (Statistic tool box)*.

На первом этапе статистического моделирования определялись необходимые длительность и число прогонов. Для этого были выбраны элементы поверхности с шириной  $S/B_1 = 0,1 \dots 1,9$ ,  $\gamma = 30^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $A_1 = A_2 = 0,85$ ,  $B_1/H_1 = 0,75 \dots 1,5$ ,  $n = 2, 4, 6$ , где  $S$  – ширина элемента поверхности,  $B_1$  – диаметр пятна излучения на поверхности,  $A_1$  – отражательная способность исходной поверхности,  $A_2$  – отражательная способность элемента поверхности,  $H_1$  – глубина элемента поверхности,  $n$  – число переотражений излучения в элементе поверхности,  $\gamma$  – угол раскрытия элемента поверхности,  $\alpha$  – угол падения излучения на поверхность, относительная величина порогового сигнала  $(W/W_0)_{\lim} = 0,15$ .

Построены зависимости вероятности обнаружения и распознавания от длительности прогонов  $N$  и числа переотражений  $n$  (рис. 2, 3).

Необходимая длительность прогонов составляет: для  $B_1/H_1 = 0,75$ ;  $n = 40$ ; для  $B_1/H_1 = 1$ ;  $n = 80$ ; для  $B_1/H_1 = 1,5$ ;  $n = 140$ . Оптимальное число прогонов равно 5. В этом случае погрешность моделирования не превышает 5%.

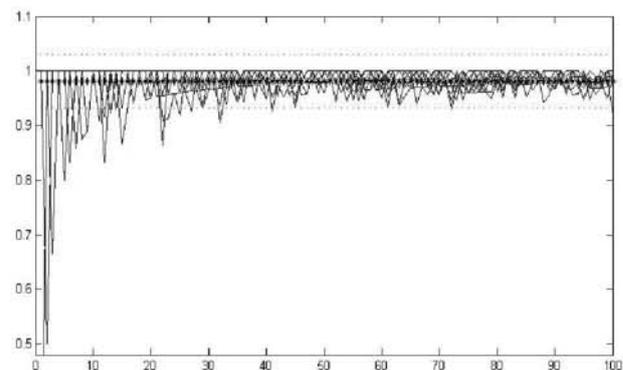


Рис. 2. Зависимость вероятности обнаружения от длительности прогонов при  $B_1/H_1 = 1$  и  $n = 2$

Затем проводилось моделирование обнаружения и распознавания при различных значениях уровня шума, оцененных экспериментально.

Величина порога обнаружения определялась в зависимости от типа измерительной системы и уровня шумов [3].

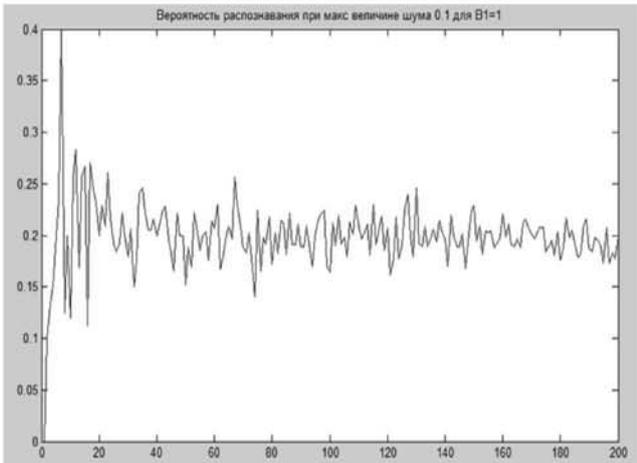


Рис. 3. Зависимость вероятности распознавания при максимальной величине шума 0,1 для  $B1=1$

Влияние характеристик источника излучения на пороговую величину сигнала при обнаружении было оценено экспериментально и определяется стабильностью мощности излучения, оси диаграммы направленности, длины волны для выбранных типов излучателей с учетом режимов эксплуатации.

Относительная величина уровня шумов составляла в зависимости от источника излучения: 0...0,05 – гелий-неоновый лазер, 0...0,10 - твердотельный лазер (или полупроводниковый со стабилизацией), 0...0,25 – полупроводниковый лазер без стабилизации мощности излучения.

Определены зависимости вероятности обнаружения от значения относительного диаметра пятна на поверхности, уровня шумов, числа переотражений в элементах поверхности (рис. 4–7).

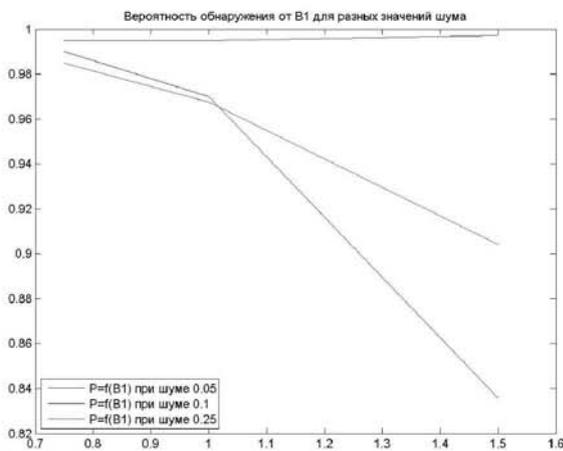


Рис. 4. Зависимость вероятности обнаружения от уровня шума и диаметра пятна

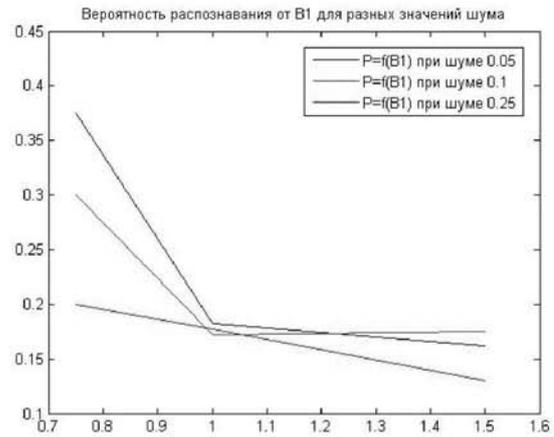


Рис. 5. Зависимость вероятности распознавания геометрии элементов от диаметра пятна и уровня шума при  $L_{пор}=19$

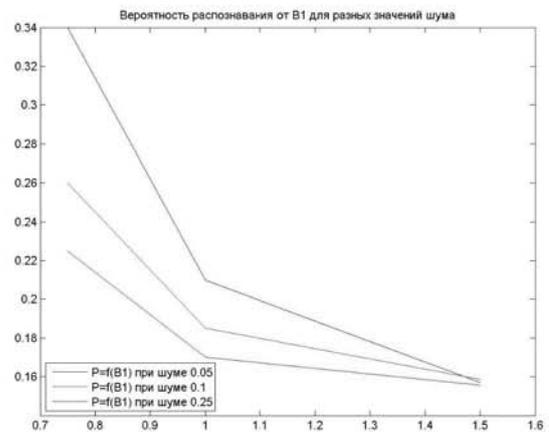


Рис. 6. Зависимость вероятности распознавания геометрии элементов от диаметра пятна и уровня шума при  $L_{пор}=4$

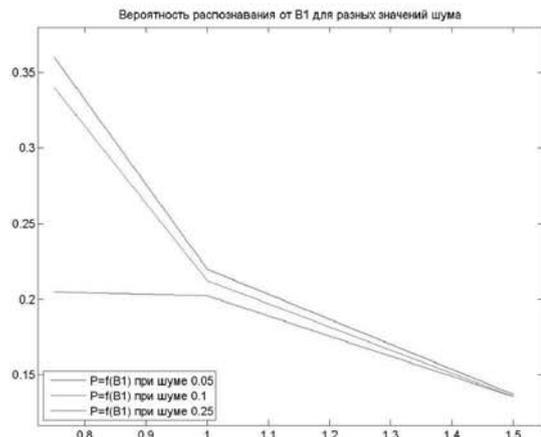


Рис. 7. Зависимость вероятности распознавания геометрии элементов от диаметра пятна и уровня шума при  $L_{пор}=1$

Снижение диаметра пятна в диапазоне  $B_1/H_1=1,5...0,75$  приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15...20 % при уровне шумов 0,1. При уровне шумов 0,05 влияние диаметра пятна соизмеримо с по-

грешностью моделирования. Аналогичное изменение диаметра пятна приводит к увеличению вероятности распознавания на 20...25%. Снижение уровня шумов, обусловленного источником излучения в диапазоне 0,25...0,1, приводит к повышению вероятности распознавания на 13...18%.

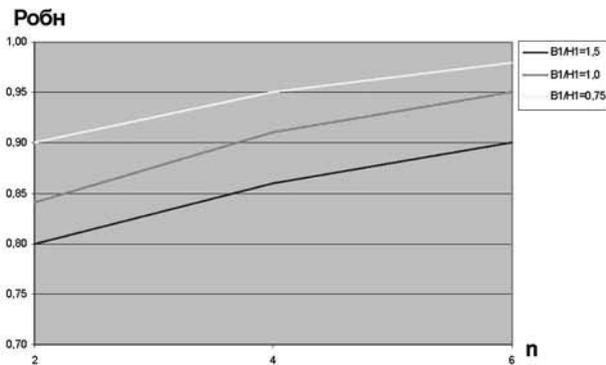


Рис. 8. Зависимость вероятности обнаружения от параметра n и диаметра пятна

Изменение параметра n в диапазоне 2...6 (т.е. изменение угла геометрии элемента поверхности в диапазоне 30...10°) приводит к увеличению вероятности обнаружения на 15% и снижению вероятности распознавания на 20...25% (рис. 8). Измерение величины зеркальной составляющей при двух различных углах падения позволяет повысить вероятность распознавания на 20...25%.

Для повышения вероятности распознавания на 20% требуется изменение показателя индикатрисы в диапазоне 4...20 за счет изменения длины волны или скважности импульса. Определение показателя индикатрисы при трех различных измерениях (модуляция длины волны, скважности импульса) позволяет увеличить вероятность распознавания на 20...25%.

Для достижения вероятности распознавания на уровне 50...60% требуется определение для дефектоскопических систем 2...3 признаков, для локационных систем обеспечения посадки 3...4 признаков, локация в космическом пространстве требует определения 4...5 признаков.

Определены зависимости вероятности обнаружения от значения отношения диаметра пятна к характерному размеру элемента поверхности на исследуемой поверхности, уровня шумов, числа переотражений в элементах поверхности. Снижение относительного диаметра пятна в диапазоне 1,5...0,75 приводит к увеличению вероятности обнаружения

на 15...20 % при отношении шум/сигнал 0,1. При относительном уровне шумов 0,05 влияние диаметра пятна соизмеримо с погрешностью моделирования. Аналогичное изменение диаметра пятна приводит к увеличению вероятности распознавания на 20...25%. Снижение уровня шумов обусловлено источником излучения в диапазоне.

Проведены экспериментальные исследования флуктуаций мощности различных типов излучателей с целью оценки уровня порогового сигнала и выбора оптимального типа излучателя для систем дистанционного зондирования. Наименьшая величина порогового сигнала (уровня шумов) (на уровне 8...10%) достигается при использовании газовых и твердотельных лазеров. С целью компенсации флуктуаций мощности излучателя вводится опорный измерительный канал. Это позволяет снизить уровень порогового сигнала до 3...5%. Исследования показали, что стабильность излучательных характеристик полупроводниковых лазеров определяется структурой и материалом активной среды. Наибольшая нестабильность диаграммы направленности наблюдается у GaAlAs-гетеролазеров с планарным полосковым контактом и достигает 7° при изменении тока накачки от 1,2 I<sub>пор</sub> до 2 I<sub>пор</sub>. Диаграммы направленности таких лазеров характеризуются наличием двух внеосевых максимумов и изменением конфигурации с ростом величины инжекционного тока. Характерно, что отклонение оси диаграммы направленности происходит при тех же значениях тока накачки, что и изгибы на ватт-амперной характеристике. Доказано, что из рассмотренной группы полупроводниковых лазеров наиболее приемлемыми для измерительных систем являются полупроводниковые инжекционные лазеры с квантово-размерными структурами на основе материалов четверных систем, характеризующиеся отсутствием дефектов темных линий, слабой зависимостью величин порогового тока от температуры лазерного кристалла и окружающей среды, наибольшей стабильностью оси диаграммы направленности и отсутствием изгибов на ватт-амперной характеристике.

Возможны два способа стабилизации мощности излучения лазерного диода: обрат-

ная связь по току при измерении мощности с помощью встроенного фотодиода и обратная связь при использовании светодиода в качестве усилителя. Такой метод используется при частотной модуляции, которая вызывает нежелательные вариации мощности излучения, ведущие к измерительным ошибкам.

Для полупроводниковых лазеров характерны флуктуации оси диаграммы направленности, нестабильность формы пятна излучения, зависимость порогового тока, излучаемой мощности и длины волны излучения от температуры. Для компенсации влияния указанных факторов необходим правильный выбор типа полупроводникового лазера, использование схемы стабилизации мощности излучения лазерного диода с использованием обратной связи по току, а также использование термостабилизаторов. Указанные меры позволяют снизить величину порогового сигнала при использовании полупроводниковых лазеров до 5%.

Таким образом, в данной работе рассмотрены основные типы лазерно-электронных систем дистанционного зондирования, применяемые для решения задач

авиакосмического комплекса. Проведено численное моделирование процессов обнаружения и распознавания. Определены требуемые диапазоны параметров измерительной системы для повышения вероятности обнаружения и распознавания на 20...25%. Рассмотрены способы стабилизации мощности излучения полупроводниковых лазеров с целью повышения отношения сигнал/шум.

### Библиографический список

1. Сверхширокополосные технологии в радиолокации [Текст] / под ред. Д.Д. Тейлора // Лондон, Нью-Йорк, Вашингтон, 2000. – 45 с.
2. Сазонникова, Н.А. Исследование преобразования излучения в элементах поверхности [Текст] / Н.А. Сазонникова // Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 2002. - Вып. 22. - С.23-28.
3. Сазонникова, Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности [Текст] / Н.А. Сазонникова // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та, - Самара: СГАУ, 2009.- №3(19).- С. 219 – 226.

## INVESTIGATION OF LASER BEAM INFLUENCE ON AIRCRAFTS SURFACE CONDITION ESTIMATION EFFICIENCY

©2011 N. A. Sazonnikova

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

For the purpose of detection and recognition probabilities estimation of objects depending on parameters of measurement system statistical modeling of the given process was spend. The functions of probability depend on relation of spot diameter to the characteristic size of an element of investigated surface, level of noise, number of rereflections in surface elements were defined. Possibilities of noise level decrease in measuring systems was shown at laser power stabilization.

*Laser surface sounding, detecting probability, reflecting parameters.*

### Информация об авторах

**Сазонникова Надежда Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-65. 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 Engineering Sciences, Associate professor of Automatic systems of energy devices department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-65. E-mail: [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru). Area of research: laser information and measurement systems.