

УДК 681.7.015.2

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТЕРМОГРАММ

В. М. Тымкул, Ю. А. Фесько

*Сибирская государственная геодезическая академия,  
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10  
E-mail: y.a.fesko@gmail.com*

Обсуждаются тенденции повышения информативности тепловизионного канала оптико-электронных приборов наблюдения и рассматривается методика использования свойств собственного поляризованного теплового излучения объектов для определения их трёхмерной формы. Приводятся схема макета установки для получения поляризационных тепловых изображений, математическая модель и результаты эксперимента по получению и обработке поляризационных термограмм объектов и определению их трёхмерной формы.

*Ключевые слова:* поляризация, собственное тепловое излучение, поляризатор, трёхмерная форма, поляризационная термограмма.

**Введение.** Существующие в настоящее время оптико-электронные системы наблюдения (ОЭСН) традиционно используют в качестве демаскирующих признаков типовых объектов наблюдения их тепловой или яркостный контраст, размеры и форму. При этом повышение пороговой чувствительности и углового разрешения ещё остаётся приоритетным направлением развития таких систем [1]. Однако сегодня разработчики ОЭСН приближаются к уровню, когда прямое наращивание пороговой чувствительности и углового разрешения уже не даёт пропорционального прироста эффективности комплекса. Кроме того, на эти параметры наложены определённые принципиальные ограничения, а именно: пороговая чувствительность ограничена фотонным шумом приёмника излучения, а угловое разрешение — дифракцией объектива оптических систем. Поэтому резервы повышения эффективности перспективных ОЭСН логично искать в регистрации и привлечении к анализу дополнительных специфических характеристик оптического поля, претендующих на роль устойчивых демаскирующих признаков объектов.

Для обработки и анализа оптических изображений, а также визуализации результатов измерений в настоящее время широко используется представление результатов в трёхмерном виде. Один из наиболее информативных демаскирующих признаков объектов — их трёхмерная форма.

В [1] демаскирующим признаком объектов для повышения эффективности ОЭСН является их поляризационный контраст, обусловленный различием коэффициентов излучения объекта в спектральном рабочем диапазоне канала для компонентов этого излучения, поляризованных в плоскости выхода его из поверхности объекта и перпендикулярно ей.

В связи с этим важно отметить, что в течение 1991–2011 гг. в Сибирской государственной геодезической академии (кафедры Оптико-электронных приборов и Наносистем и оплотехники) ведутся научные исследования поляризационных тепловизионных изображений (ПТИ) объектов, которые содержат информацию об их трёхмерной форме. На основании этих исследований разработан ряд способов распознавания объёмной формы

объектов внутри теплового контура, защищённых патентами РФ, на базе четырёх, трёх и двух ПТИ объектов с различными азимутами поляризации [2–4]. Особенный интерес вызывают тепловизионный способ и устройство распознавания трёхмерной формы объектов на основе одной комбинированной термограммы, полученной с использованием последовательно расположенных ахроматической пластинки  $\lambda/4$  и инфракрасного (ИК) линейного поляризатора [5, 6]. Эти технические решения позволяют определить объёмную форму в реальном масштабе времени.

Цель данного сообщения — описание методики и результатов экспериментального определения трёхмерной формы объектов на основе ПТИ с линейными азимутами поляризации  $t_{\text{п}} = 45^\circ$  и  $t_{\text{п}} = 90^\circ$ .

**Эксперимент.** Внешний вид макета установки для получения и обработки поляризационных термограмм приведён на рис. 1, где приняты следующие обозначения: 1 — оптическая скамья ОСК-2, 2 — тепловизионная камера "FLIR Infracam", 3 — ИК-поляризатор с возможностью вращения вокруг своей оптической оси, 4 — исследуемый объект.

С использованием установки регистрировались поляризационные термограммы, видеосигналы (для азимутов поляризации  $t_{\text{п}} = 45^\circ$  и  $t_{\text{п}} = 90^\circ$ ) которых зависят от степени поляризации собственного излучения  $P$ , азимута  $t$  и степени эллиптичности  $\gamma$ :

$$U^{(45)}(N, L) = U_0[1 + P(N, L) \sin 2t(N, L) \cdot \cos 2\gamma(N, L)], \quad (1)$$

$$U^{(90)}(N, L) = U_0[1 - P(N, L) \cos 2t(N, L) \cdot \cos 2\gamma(N, L)], \quad (2)$$

где  $N$  — номер элемента в строке термограммы;  $L$  — номер строки;

$$U_0 = S\Phi\tau_o\tau_{\text{п}}\tau_a. \quad (3)$$

Здесь  $S$  — чувствительность приёмника излучения, располагающегося после поляризационного фильтра;  $\tau_o$ ,  $\tau_{\text{п}}$ ,  $\tau_a$  — коэффициенты пропускания оптической системы тепловизора, ИК-поляризатора и слоя атмосферы между объектом и прибором соответственно;  $\Phi$  — энергетический поток собственного теплового излучения объекта.

На основании решения системы уравнений (1) и (2) зависимость степени поляризации собственного излучения элемента поверхности исследуемого объекта от видеосигналов изображения элемента, прошедшего через поляризационный фильтр с азимутами поляри-

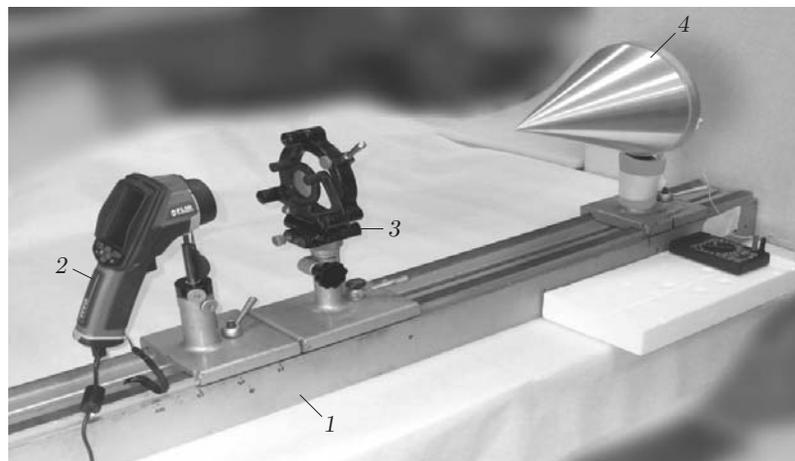


Рис. 1. Стенд для получения поляризационных тепловизионных изображений объектов

зации  $45^\circ$  и  $90^\circ$ , представлена следующим выражением [7]:

$$P(N, L) = \sqrt{\frac{U^{(45)}(N, L) - 1}{2 \sin \{ \arctg ([U^{(45)}(N, L) - 1] / [1 - U^{(90)}(N, L)]) \} - [U^{(90)}(N, L) - 1]}}. \quad (4)$$

На рис. 2 приведены экспериментальные поляризационные термограммы, полученные при наблюдении конуса в направлении его оси симметрии, что соответствует геометрии рис. 1. Установлено, что степень поляризации собственного теплового излучения поверхности исследуемого объекта меняется в зависимости от угла ориентации участка наблюдаемой поверхности объекта относительно направления её наблюдения. Анализируя рис. 2, можно сделать вывод о том, что яркость вдоль линии, совпадающей с азимутом поляризатора, с учётом постоянного отклонения значения яркости, эквивалентного шуму, имеет постоянное максимальное значение по сравнению с остальной областью изображения. Поскольку для конуса ориентация грани вдоль линии от центра к краю относительно направления визирования постоянна, то вдоль этой линии значения яркости остаются тоже неизменными. В работах [7–9] теоретически и экспериментально определено, что индикатриса степени поляризации собственного теплового излучения конструкционных материалов может быть представлена в виде

$$P(\psi) = P_{\max}(1 - \cos \psi), \quad (5)$$

где  $P_{\max}$  — максимальное значение степени поляризации, которое зависит от оптических постоянных  $n$  и  $\chi$  материала и шероховатости поверхности;  $\psi$  — угол излучения плоского элемента поверхности.

На основании (4) и с использованием (5) получим выражение для расчёта углов

$$\psi(N, L) = \arccos[P_{\max} - P(N, L)]. \quad (6)$$

Для определения знака угла  $\psi$ , необходимого при идентификации выпуклости или вогнутости формы объекта, помимо соотношения (6) в компьютерной программе анализа ПТИ объектов и построения трёхмерной формы предусмотрен расчёт углов по формуле

$$\psi(N, L) = \arcsin[2P(N, L)/(P(N, L) + \eta)]^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\eta$  — коэффициент, зависящий от индикатрисы излучения и шероховатости материала поверхности объекта.

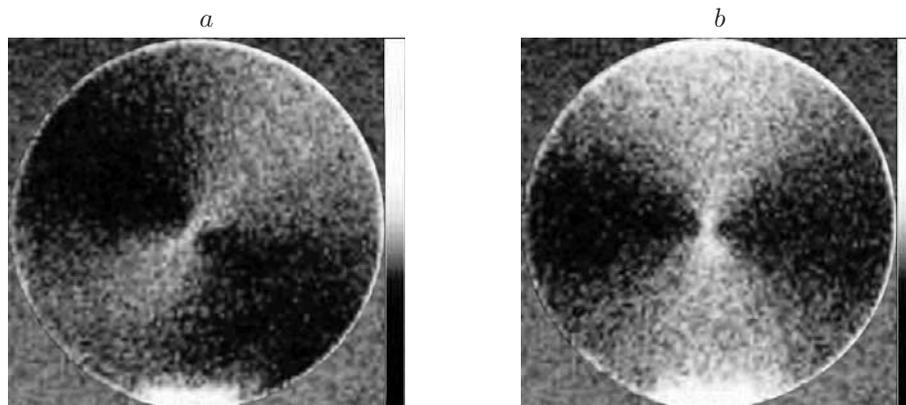


Рис. 2. Экспериментальные поляризационные термограммы кругового конуса: с азимутами поляризации  $t_{\text{п}} = 45^\circ$  (a) и  $t_{\text{п}} = 90^\circ$  (b)

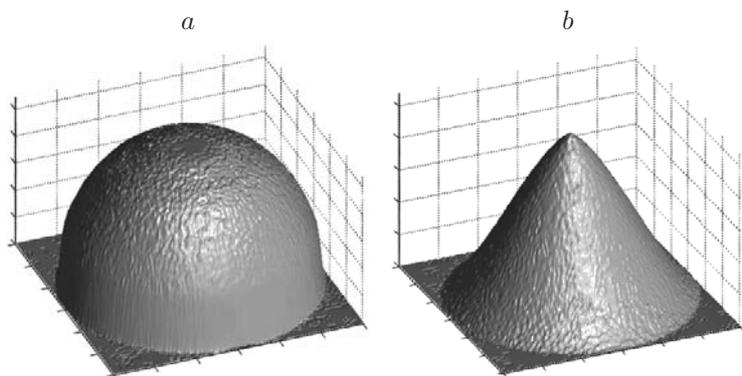


Рис. 3. Результаты математического моделирования трёхмерного изображения объектов

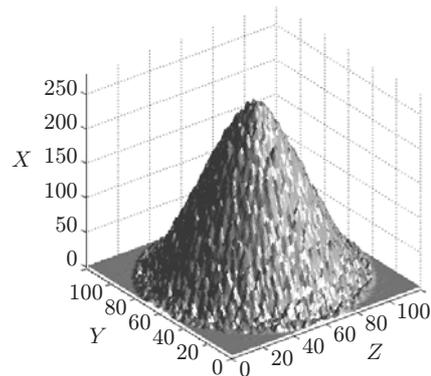


Рис. 4. Трёхмерное изображение конуса, полученное на основе экспериментальных ПТИ

При обработке термограмм процесс определения третьей декартовой координаты вдоль линии сканирования осуществляется по формулам [5, 6]:

$$x_N = x_{N-1} + \Delta y_N \operatorname{tg} \psi_{xy} \quad (z = \text{const}), \quad (8)$$

$$x_L = x_{L-1} + \Delta z_L \operatorname{tg} \psi_{xz} \quad (y = \text{const}), \quad (9)$$

где  $\psi_{xy}$ ,  $\psi_{xz}$  — проекции угла  $\psi$  на координатные плоскости  $XOY$  и  $XOZ$  соответственно;  $\Delta y_N$  и  $\Delta z_L$  — шаги сканирования вдоль координат  $OY$  и  $OZ$ .

Математическая модель, схема алгоритма и компьютерная программа обработки ПТИ и построения трёхмерной формы объектов приведены в работах [7, 8].

На основе анализа зависимости видеосигналов  $U_1$  и  $U_2$  элементов поляризационных изображений от ориентации площадки поверхности и с учётом формул (4)–(9) выполнено математическое моделирование трёхмерного изображения поверхностей металлических объектов из алюминия в виде сферы (рис. 3, *a*) и конуса (рис. 3, *b*).

Результат определения трёхмерной формы объекта в виде конуса на основе приведённых экспериментальных ПТИ представлен на рис. 4.

**Заключение.** В данной работе предложены метод и способы бесконтактного определения трёхмерной формы объектов, которые используют свойства поляризации собственного теплового излучения объектов без дополнительных средств облучения наблюдаемого объекта. Приведены методика и схема установки для получения ПТИ с различными азимутами поляризации. Также представлены результаты определения трёхмерной формы объектов на основе математического моделирования и экспериментальных поляризационных термограмм, которые оправдывают применение поляризационных свойств собственного теплового излучения в задаче расширения информативности тепловизионного канала в оптико-электронных системах наблюдения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балоев В. А., Мишанин С. С., Овсянников В. А. и др. Анализ путей повышения эффективности наземных оптико-электронных комплексов наблюдения // Оптический журнал. 2012. **79**, № 3. С. 11–21.
2. А. с. 166727 СССР. Способ тепловизионного распознавания формы объектов /В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул, М. И. Ананич и др. № 4738971/09; Заявл. 06.06.89; Оpubл. 30.07.91, Бюл. № 28. 3 с.

3. Пат. 2024212 РФ. Способ распознавания формы объектов /А. Б. Гринев, Т. Б. Куроптева, В. М. Тымкул. № 4925084/09/028136; Заявл. 3.04.91; Опубл. 10.05.94, Бюл. № 22. 3 с.
4. Пат. 2141735 РФ. Способ тепловизионного распознавания формы объектов /В. М. Тымкул, О. В. Тымкул, Л. В. Тымкул, М. И. Ананич. № 95111870; Заявл. 11.02.95; Опубл. 20.11.99, Бюл. № 32. 5 с.
5. Пат. 2431936 РФ. Способ тепловизионного распознавания формы объектов /В. М. Тымкул, Ю. А. Фесько. № 2010129703/09; Заявл. 15.07.2010; Опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29. 8 с.
6. Пат. 2469265 РФ. Устройство для бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов /В. М. Тымкул, Ю. А. Фесько. № 2011125261/28; Заявл. 17.06.2011; Опубл. 01.12.2012, Бюл. № 34. 5 с.
7. Фесько Ю. А., Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Шелковой Д. С. Математическая модель определения трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных термограмм // Сб. матер. VII Междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011». Новосибирск, 2011. Т. 5. Ч. 1. С. 164–168.
8. Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Фесько Ю. А. Методика и алгоритм определения трехмерной формы объектов на основе поляризационных термограмм // Сб. матер. VIII Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012». Новосибирск, 2012. Т. 1. С. 3–7.
9. Тымкул О. В., Тымкул В. М., Ушаков О. К. Методика определения объемной формы объектов на основе поляризационной комбинированной термограммы // Оптический журнал. 1999. 66, № 2. С. 54–59.

*Поступила в редакцию 31 января 2013 г.*

---