## УДК 621.384.3

## А.Н. Малов, А.Н. Онацкий

# Цифровая регистрация и обработка лазерных изображений

Рассмотрен способ построения пространства признаков для анализа шероховатых поверхностей по их лазерным спекл-изображениям. Способ основан на нелинейной регистрации монохроматического лазерного изображения цветной ПЗС-матрицей. Ключевые слова: лазер, изображение, ПЗС-матрица, корреляция, сенситометрия, спекл, фильтрация, пространство признаков, спектр.

Коммерчески доступные для различных применений ПЗС-матрицы, устанавливаемые в веб-камерах и цифровых фотоаппаратах, обычно предназначены для получения цветных (в RGB-стандарте) цифровых изображений. Сенситометрические параметры фоторегистратора обычно представляются в виде характеристической кривой (кривой ХиД), и для ПЗС-матрицы они имеют вид, показанный на рис. 1.

В современных ПЗС-матрицах цветоделение на RGB-компоненты выполняется с помощью пленочных фильтров, имеющих остаточное светопропускание на «чужих» компонентах. Поэтому регистрация монохромного лазерного, например красного, изображения обеспечивает «засветку» зеленых и голубых цифровых компонент [1]. Поэтому применение ПЗС-матриц в лазерных системах требует анализа их сенситометрических характеристик. Другой особенностью цифровой регистрации лазерных интерферограмм и спекл-картин являются высокая яркость и контрастность изображения, проявляющиеся в эффекте блюминга (расплывание изображения) и засвечивании соседних (чужих по цвету) субпикселей.

На рис. 2 приведены примеры изображений и их RGB-гистограммы при равномерной засветке матрицы полупро-



водниковым лазерным диодом. Очевидно, что разные экспозиционные режимы будут обусловливать неодинаковое изменение сенситометрических параметров для каждого из цветовых компонентов (что, впрочем, характерно и для цветных фотоэмульсий). Можно отметить, что подобные вариации сенситометрических параметров при изменении экспозиции аналогичны вариациям кривой ХиД в классической фотографии при изменении времени проявления или химического состава проявителя [2].



Рис. 2. RGB-гистограммы равномерной засветки ПЗСматрицы при различных временах экспозиции

Конкретная геометрическая структура ПЗС-матрицы и ее цветоделительных фильтров обусловливает также зависимость RGB-гистограмм регистрируемого цифрового изображения от пространственной частоты (угла падения на матрицу) оптического изображения.

При регистрации когерентных изображений также возникают различные интерференционные структуры из-за переотражений на элементах конструкции матрицы, что также влияет на величину сигнала от фотоэлементов, и, как следствие, на сенситометрические характеристики. Таким образом, при использовании данной конкретной матрицы в лазерных измерительных системах необходимо знать (измерять перед использованием) ее сенситометрические параметры для условий применяемой оптической схемы.

В случае применения ПЗС-матриц для анализа спекл-изображений, являющихся по своей природе разновидностью шума, использование компьютерных структурных методов распознавания не всегда эффективно. Если для первичной обработки лазерных спеклизображений шероховатых объектов использовать нелинейные свойства цветной ПЗСматрицы, то при компьютерном анализе по синим и зеленым RGB-компонентам можно построить пространство признаков – рассчитать центральные статистические моменты гистограмм распределения яркости в цветовых плоскостях. Для распознавания спеклизображений с наименьшей вероятностью ошибки необходимо анализировать не только статистические характеристики, но и спектральные – наилучший результат достигается при анализе как всех трех RGB-компонент, так и основного изображения.

На первом этапе выполняется пространственная фильтрация цветных изображений, которая заключается в повышении резкости с помощью линейного пространственного Лапласиан-фильтра (рис. 3).



Рис. 3. Исходное спекл-изображение (*a*) и результат Лаплас-фильтрации (б)

Затем выполняется цветовая сегментация – выделение объектов на изображении RGB, цвет которых лежит в определенном диапазоне. Обладая некоторой репрезентативной выборкой векторов, имеющих интересующий цвет, определяется оценка «среднего» цвета, который необходимо выделить. Задача сегментации состоит в том, чтобы классифицировать каждый RGB-пиксель изображения и определить, принадлежит он выделенному «среднему» цветовому классу или нет. В результате сегментации получим бинарное изо-

бражение, характеризующее распределение «среднего» цвета. На рис. 4 представлены спекл-изображения и их сегментированные представления двух различных классов. Из рисунков видно, что визуальная похожесть исходных изображений достаточно велика, однако их сегментированные аналоги имеют текстуру различного характера. Подобный результат можно достичь только в случае наличия RGB-компонентов. Данный метод обладает адаптивными возможностями.



Рис. 4. Спекл-изображения (слева) двух различных классов (*a*, б) и их сегментированные представления (справа)

Эта особенность позволяет применить корреляционные методы распознавания спеклизображений по их сегментированным представлениям. Расчет двумерных коэффициентов корреляции для исходных изображений, принадлежащих различным классам, дает 0,84–0,93, а для соответствующих сегментированных – 0,32–0,46, что говорит о возможности выбора более широкой разделяющей границы между классами. Применяя корреляционный метод распознавания к цветовым плоскостям изображений различных классов (см. рис. 4) получим вектор  $\mathbf{R} = [0,6740; 0,5041; 0,6070]$ , а между изображениями одного класса –  $\mathbf{R} = [0,964; 0,8634; 0,967]$ .

Дальнейший анализ спекл-изображений основан на изучении характеристик внутренней текстуры. Первый метод основан на статистических свойствах гистограмм яркости. Вектор признаков выглядит следующим образом:  $T = [m, \sigma, R, \mu_{3}, U, e],$ 

где  $m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$  — среднее значение;  $\sigma = \sqrt{\mu_2(z)} = \sqrt{\sigma^2}$  — стандартное отклонение;  $R = 1 - 1/(1 + \sigma^2)$  — гладкости;  $\mu_3 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i)$  — третий момент;  $U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i)$  — однородность;  $e = -\sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i)$  — энтропия.

Спектральная мера текстуры основана на спектре Фурье, который идеально подходит для описания направленности присутствующих в изображении периодических или квазипериодических двумерных текстур, которые присущи спекл-изображениям. Для обнаружения спектральных признаков перейдем к полярным координатам, в которых спектральная функция выражается в виде  $S(r,\theta)$ , где  $\theta$  и r – переменные в этой системе координат. Анализ функции  $S_{\theta}(r)$  при фиксированном  $\theta$  дает представление о поведении спектра по направлению радиуса из начала координат, а исследуя  $S_{\theta}(r)$  при фиксированном r, получаем поведение спектральной функции по окружности с центром в начале координат. Общее описание получается при интегрировании этих функций:

$$S(r) = \sum_{\theta=0}^{\pi} S_{\theta}(r), \quad S(\theta) = \sum_{r=1}^{R_0} S_r(\theta),$$

где  $R_0$  – радиус круга с центром в начале координат. Результатом вычислений является пара значений  $[S(r), S(\theta)]$ , для каждой точки спектра с координатами  $(r, \theta)$ . Варьируя эти координаты, можно построить две одномерные функции S(r) и  $S(\theta)$ , описывающие текстуру всего изображения в терминах энергии спектра (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что спектральные характеристики RGB-текстуры спеклизображений различаются по расположению максимумов, форме и другим параметрам. Таким образом, формируется комплексный вектор признаков для дальнейшего распознавания спекл-изображений:





В дальнейшем, имея достаточный статистический материал, можно на основе данных интегральных преобразований спекл-картин сформировать поля признаков, позволяющие анализировать образцы разных классов и разделять их на группы внутри одного класса.

Таким образом, использование ПЗС в оптоэлектронных системах требует специальной сенситометрической аттестации различных типов ПЗС-матриц. При этом возникает возможность управления характеристической кривой (ХК) и возможность построения пространства признаков в сочетании интегральных преобразований с нелинейной оптической фильтрацией цветной ПЗС-матрицы.

## Литература

1. Малов А.Н. Сравнительные характеристики сенситометрических параметров фотоэмульсий и мозаичных фотоприемников / А.Н. Малов, А.Н. Онацкий // Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2009. – С. 296–300.

2. Зернов В.А. Фотографическая сенситометрия. - М.: Искусство, 1980. - 351 с.

#### Малов Александр Николаевич

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. электроники твёрдого тела Иркутского государственного университета (ИрГУ) Тел.: (395-2) 22-99-53 Эл. почта: cohol2007@yandex.ru

#### Онацкий Александр Николаевич

Канд. техн. наук, доцент, зам. директора средней школы № 76 г. Иркутска, докторант каф. электроники твёрдого тела ИрГУ Тел.: (395-2) 50-62-62 Эл. почта: on62@yandex.ru

#### Malov A.N., Onatsky A.N. Digital registration and processing of laser images

A technique of indication space construction for analysis of the rough surfaces by means of their laser speckle-images is considered. The technique is based on the nonlinear registration of monochromic laser image with the use of color CCD-matrix.

Keywords: laser, image, CCD- matrix, correlation, sensitometry, speckle filtration, indication space, spectrum.