

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 621.391

ОБНАРУЖЕНИЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕКСТУР
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК
ДВУМЕРНОГО СПЕКТРА МОЩНОСТИИ. С. Грузман¹, К. Ю. Петрова²¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20²Филиал фирмы «Самсунг Электроникс Ко., Лтд.»,
127018, Москва, ул. Двинцев, 12, корп. 1
E-mail: isguzman@gmail.com
xenyu.petrova@samsung.com

Предложен алгоритм обнаружения квазипериодических текстур, основанный на особенностях двумерных спектров, полученных с помощью дискретного преобразования Фурье. Спектры мощности фрагментов анализируются независимо друг от друга, что обеспечивает вычислительную эффективность алгоритма обнаружения. Приведены примеры, демонстрирующие применение алгоритма обнаружения в задаче сегментации изображений на два класса текстур: периодические и непериодические. Показано, что алгоритм устойчиво работает при значительных деформациях решётки периодических текстур.

Ключевые слова: алгоритм обнаружения, квазипериодическая текстура, спектр мощности, решётка Браве, текстурный элемент.

Введение. Блочные методы оценки движения широко применяются в задачах сжатия и обработки видеопоследовательностей [1]. При блочной оценке движения текущий кадр разбивается на неперекрывающиеся блоки, для каждого из которых на предыдущем кадре ищется наиболее «похожий» (в смысле принятой метрики) блок. Алгоритмы поиска похожих блоков оказываются неэффективными, если на изображениях присутствуют периодические (ПТ) или квазипериодические (КПТ) текстуры. Из-за их периодического характера возникает множественное совпадение блоков, что приводит к аномальным ошибкам алгоритмов оценивания движения, когда экстремум функционала сходства значимо смещён относительно истинного положения [2].

В настоящее время алгоритмы обнаружения ПТ или КПТ строятся на основе автокорреляционной функции [3], обобщённой энтропии Реньи [4], представления текстур в виде повторяющегося текстурного элемента, положение которого определяется двумерной решёткой [5, 6], и т. п. Наиболее подходящим инструментом для обнаружения ПТ или КПТ является преобразование Фурье. Двумерные спектры таких текстур содержат выбросы большой мощности [7], которые могут быть обнаружены даже при сильных уровнях шумов или при значительных деформациях ПТ.

В работе [8] предложен алгоритм различения периодических и непериодических текстур с использованием двух характеристик спектра мощности (СМ) (расстояние и плотность). При построении обнаружителя авторы учли, что спектр мощности ПТ в отличие от СМ аперриодических текстур содержит выбросы большой мощности, которые находятся на относительно большом расстоянии от начала системы координат. Алгоритм обладает высоким быстродействием, однако его эффективность резко снижается при геометрических искажениях ПТ и при уменьшении контраста изображения. Для надёжного

обнаружения ПТ с помощью алгоритма [8] необходимо, чтобы анализируемый фрагмент содержал не менее 25 текстурных элементов, что трудно выполнить на практике, так как существует множество текстур, период которых превышает 10–15 пикселей. Увеличение размеров анализируемого фрагмента приводит к ухудшению разрешающей способности алгоритма при обработке изображений, содержащих различные текстуры, и к снижению вычислительной эффективности алгоритма. Также алгоритм [8] оказался чувствительным к помехам, представляющим собой медленные изменения яркости.

Цель данной работы — построение помехоустойчивого алгоритма обнаружения КПТ на основе анализа СМ, устойчиво работающего при наличии в анализируемом фрагменте не менее четырёх текстурных элементов.

Спектр квазипериодической текстуры. Формально можно считать, что ПТ бесконечных размеров состоит из двух компонент: двумерной решётки Браве [9] и текстурного элемента [6, 10]. Узлы решётки Браве, имеющей бесконечную периодическую структуру, задают пространственное положение повторяющегося текстурного элемента. Координаты узлов $\mathbf{s} = (s_1, s_2)^T$ двумерной решётки Браве определяются уравнением

$$\mathbf{s} = \mathbf{A}\mathbf{r},$$

где $\mathbf{r} = (r_1, r_2)^T$ — произвольный целочисленный вектор, T — символ транспонирования, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ — невырожденная матрица периодичности. Основной период двумерной функции представляет собой параллелограмм L площадью $\det(\mathbf{A}) \neq 0$. Если двумерная функция имеет периодичность решётки Браве

$$x(\mathbf{t}) = x(\mathbf{t} + \mathbf{A}\mathbf{r}), \quad (1)$$

то в спектре присутствуют только комплексные синусоиды, обладающие периодичностью решётки Браве [9], где $\mathbf{t} = (t_1, t_2)^T$ — вектор текущих координат двумерной функции x , которую далее будем называть ПТ. Спектр ПТ можно представить в виде взвешенной суммы δ -функций [10]:

$$X(\mathbf{f}) = \sum_{\varphi} C(\mathbf{A}^{-T}\varphi)\delta(\mathbf{f} - \mathbf{A}^{-T}\varphi),$$

где $C(\cdot)$ — спектр текстурного элемента, заданного на параллелограмме L , отсчёты которого располагаются на частотной плоскости в узлах обратной решётки Браве [9] с матрицей периодичности $\mathbf{A}^{-T} = (\mathbf{A}^{-1})^T$.

Спектральный анализ текстур реальных изображений осуществляется с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ). При этом вычисляется спектр конечного фрагмента цифрового изображения размером $N \times N$ элементов. Для удобства будем полагать, что N — нечётное число. Отсчёты с нулевыми координатами располагаются в центре фрагмента как в пространственной, так и в частотной областях. Таким образом, анализируемый фрагмент дискретной ПТ $\widehat{x} = \{x(i_1, i_2), i_1 = \overline{-n, n}, i_2 = \overline{-n, n}\}$ и его спектр $\widehat{X} = \{\widehat{X}(\mathbf{j}) = \widehat{X}(j_1, j_2), j_1 = \overline{-n, n}, j_2 = \overline{-n, n}\}$ содержат по $(2n + 1) \times (2n + 1) = N \times N$ отсчётов.

Дискретный спектр фрагмента \widehat{x} с точностью до константы определяется соотношением [10]

$$\widehat{X}(\mathbf{j}) = \sum_{\mathbf{k}} C(\mathbf{A}^{-T}\mathbf{k})W\left(\frac{1}{N}\mathbf{j} - \mathbf{A}^{-T}\mathbf{k}\right), \quad (2)$$

где

$$W\left(\frac{1}{N}\mathbf{j}\right) = \frac{1}{N^2} \prod_{l=1}^2 \left(\sin \pi N \frac{j_l}{N} \right) \left(\sin \pi \frac{j_l}{N} \right)^{-1} \quad (3)$$

— нормированная частотная характеристика двумерного дискретного окна Дирихле [11]. Наличие множителя (3) в формуле (2) отражает известный эффект растекания спектра, который возникает вследствие некратности размеров анализируемого фрагмента \widehat{x} периода ПТ. В этом случае текстура будет квазипериодической, поскольку спектр \widehat{X} вычисляется с помощью ДПФ, т. е. двумерный сигнал является периодическим продолженным [2, 7]. При этом нарушается условие периодичности (1). Кроме того, для большинства реальных изображений параметры матрицы периодичности \mathbf{A} зависят от пространственных координат. Изменение параметров матрицы периодичности может быть вызвано деформацией решётки Браве, обусловленной, например, проектированием трёхмерных текстурированных объектов на плоскость изображения. Далее реальные текстуры будем называть КПТ, если на фрагменте \widehat{x} наблюдается регулярность топологии текстуры и формула (2) достаточно адекватно отражает свойства её спектра. Для этого, как минимум, необходимо, чтобы фрагмент \widehat{x} содержал не менее 2×2 текстурных элемента, т. е. его линейный размер

$$N \geq 2 \max(a_{11} + a_{21}, a_{12} + a_{22}). \quad (4)$$

Анализируя формулы (2) и (3), можно сделать следующие выводы об основных свойствах спектра КПТ, которые далее будут использованы при построении алгоритма обнаружения.

Свойство 1. Спектр КПТ содержит выбросы. Из формулы (2) следует, что координаты максимумов выбросов

$$\mathbf{m} = N\mathbf{A}^{-T}\mathbf{k}, \quad (5)$$

причём компоненты целочисленного вектора \mathbf{k} должны быть такими, чтобы не нарушалось условие ограниченности компонент вектора \mathbf{m} : $|m_l| \leq n$, $l = \overline{1, 2}$.

Для КПТ вектор \mathbf{m} является вещественным, т. е. координаты \mathbf{m} могут не совпадать с целочисленными координатами узлов двумерной квадратной решётки, на которой определён спектр (2).

Свойство 2. Ширина выбросов определяется шириной главного лепестка частотной характеристики двумерного дискретного окна Дирихле, равной двум интервалам дискретизации по частоте.

Свойство 3. Амплитуды максимумов зависят от амплитудного спектра $|C(\cdot)|$ текстурного элемента, заданного на параллелограмме L . Как правило, функция яркости текстурного элемента представляет собой двумерный низкочастотный сигнал. Поэтому обычно максимальной амплитудой обладают импульсы с малыми значениями длины вектора \mathbf{m} .

Свойство 4. Нетрудно показать, что при выполнении условия (4) длина вектора координат

$$\|\mathbf{m}\| \geq 2. \quad (6)$$

Свойство 5. Положение выбросов на частотной плоскости определяется узлами обратной решётки Браве. В спектре КПТ должно присутствовать минимум два выброса,

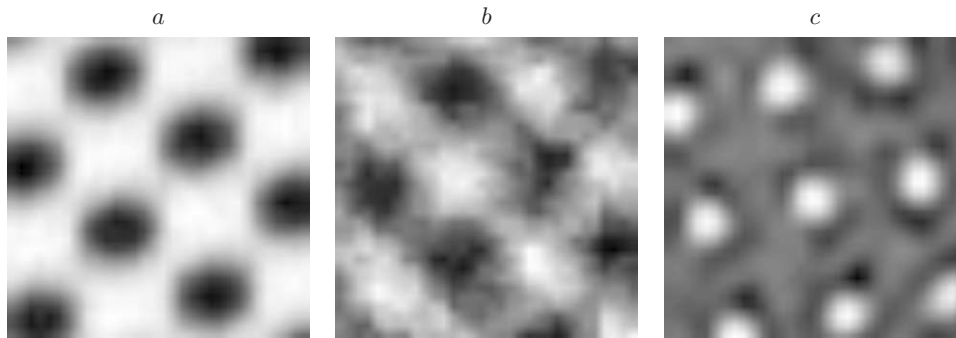


Рис. 1

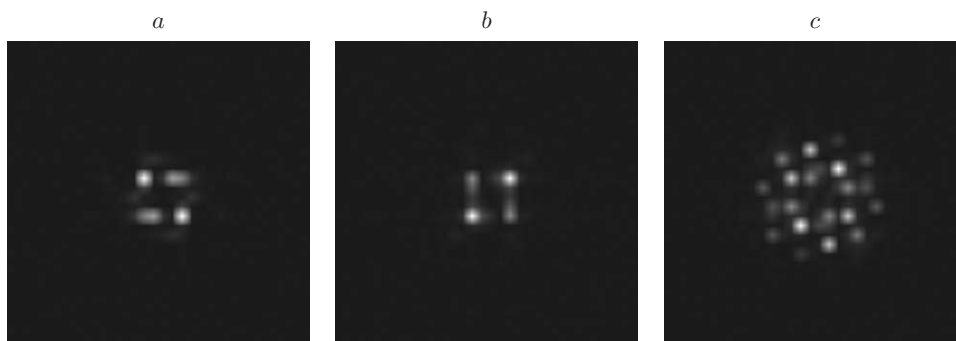


Рис. 2

векторы координат которых являются неколлинеарными. С учётом дискретности спектра $\widehat{X}(\mathbf{j})$ и условия (6) угол между векторами координат этих выбросов

$$\alpha \geq 90^\circ/4 = 22,5^\circ. \quad (7)$$

Очевидно, что СМ $G(\mathbf{j}) = (1/N^2)|\mathbf{X}(\mathbf{j})|^2$ фрагмента \widehat{x} обладает аналогичными свойствами. На рис. 1, *a—c* приведены фрагменты реальных КПТ. Изображения СМ, иллюстрирующие перечисленные выше свойства, приведены на рис. 2, *a—c*.

Алгоритм обнаружения КПТ. На реальных изображениях присутствуют локальные изменения яркости и контрастности, нестабильность которых в пределах анализируемого фрагмента приводит к искажению СМ и ухудшению эффективности алгоритма обнаружения. Поэтому предварительный этап обработки изображения состоит в его локальной нормализации по яркости и контрастности [12].

Для компенсации тренда яркости изображений применён алгоритм на основе морфологической обработки, предложенный в [13]:

$$x_l = 2x - (x \bullet B + x \circ B),$$

где x_l — нормализованное по яркости изображение, B — квадратный структурный элемент размером $n \times n$ элементов, символы « \bullet » и « \circ » — морфологические операции замыкания и размыкания [2]. Экспериментальные исследования показали, что данный алгоритм значительно меньше искажает СМ текстуры, чем классический алгоритм компенсации тренда яркости с помощью низкочастотной фильтрации [12]. Нормализация по контрастности выполняется на основе оценки локального среднеквадратического отклонения яркости изображения x_l , для вычисления которой используется окно квадратной формы размером

$n \times n$ элементов. В результате выполнения предварительного этапа средняя яркость нормализованного изображения $x_n = 0$ и дисперсия $\sigma_n^2 = 1$.

Алгоритм обнаружения состоит из следующих этапов.

1. Вычисляется СМ $G_n(\mathbf{j})$ фрагмента нормализованного изображения, сформированного с помощью окна размером $N \times N$ элементов.

2. Чтобы устранить локальные выбросы СМ, обусловленные шумами, отсчёты СМ подвергаются преобразованию [2]:

$$G_p(\mathbf{j}) = \begin{cases} G_n(\mathbf{j}), & \text{если } G_n(\mathbf{j}) \geq T, \\ 0, & \text{если } G_n(\mathbf{j}) < T. \end{cases}$$

При выборе порога полагается, что уровень отсчётов СМ шума на реальных изображениях не превышает уровень $T = 1/(\pi(f_d/3)^2)$, определяемый эквивалентным окрашенным шумом с единичной дисперсией, СМ которого постоянен и равен T на окружности радиусом $f_d/3$, где f_d — верхняя частота дискретного двумерного сигнала.

3. Определяются координаты выбросов СМ G_p (свойство 1), причём расстояние между координатами выбросов \mathbf{m} должно быть не менее двух дискрет (свойство 2) и длины их векторов должны удовлетворять условию (6) (свойство 4). Спектр мощности обладает круговой симметрией, поэтому учитывается только один из каждой пары симметричных выбросов.

4. Вычисляется отношение суммарной мощности обнаруженных выбросов к общей мощности фрагмента:

$$\mu = \sum_{k=1}^M P(k) / \sum_{j_1=-n}^n \sum_{j_2=-n}^n G_p(j_1, j_2),$$

где

$$P(k) = \sum_{j_1=m_1(k)-1}^{m_1(k)+1} \sum_{j_2=m_2(k)-1}^{m_2(k)+1} G_p(j_1, j_2), \quad k = \overline{1, M},$$

— мощность каждого из M обнаруженных выбросов. При вычислении $P(k)$, $k = \overline{1, M}$, окрестность задаётся с учётом эффекта растекания спектра (свойства 1 и 2).

5. Если

$$\mu > 0,2 \tag{8}$$

и угол между векторами координат двух выбросов максимальной мощности (свойство 3) удовлетворяет условию (7) (свойство 5), принимается гипотеза о том, что анализируемый фрагмент является фрагментом КПТ. В противном случае данная гипотеза отвергается. В (8) учтены эффект растекания спектров и наличие деформации решётки, приводящие к уменьшению мощности выбросов СМ.

Экспериментальные исследования алгоритма обнаружения КПТ. Алгоритм обнаружения был применён для сегментации реальных полутоновых изображений на два класса: непериодические (маркер класса 0) и квазипериодические (маркер класса 1) текстуры. Анализируемые фрагменты формировались с помощью перемещающегося по изображению окна с шагом n по каждой из координат. Если принималась гипотеза о том, что анализируемый фрагмент является КПТ, то отсчёты изображения $x(i_1, i_2)$,

$i_1 = \overline{c_1 - n/2, c_1 + n/2}$, $i_2 = \overline{c_2 - n/2, c_2 + n/2}$, маркировались единицей, в противном случае — нулём, здесь (c_1, c_2) — координаты центрального отсчёта окна в системе координат изображения. В результате получаем изображение, сегментированное на два класса.

Для сравнительного анализа предложенный алгоритм был реализован в 64-битной версии МАТЛАВ. Сравнение проводилось с алгоритмом [6], реализованным в этой же версии. Обработка изображений осуществлялась на компьютере с процессором Intel Core i7-2630QM 2.0 ГГц и оперативной памятью объёмом 8 Гбайт.

В качестве тестовых использовались изображения под условными названиями «бурундук» (рис. 3, *a*), «галстук» (рис. 4, *a*) и «клетка» (рис. 5, *a*) с характерными искажениями КПТ. На изображении «бурундук» имеются две области КПТ с одинаковыми по форме текстурными элементами. Расстояние между узлами решётки КПТ в верхней части изображения примерно на 30 % больше, чем в нижней. На изображении «галстук» решётка деформирована вследствие проектирования трёхмерной поверхности галстука на плоскость. Кроме того, на этом изображении наблюдается ещё одна КПТ (шов на кресле), текстурный элемент и матрица периодичности которой существенно отличаются от КПТ в области галстука. На изображении «клетка» низкое соотношение сигнал/шум в области КПТ. Результаты сегментации с помощью предложенного алгоритма (при $N = 31$) и итерационного алгоритма обнаружения узлов сетки КПТ [6] приведены на рис. 3, 4, *b* и *c* и на рис. 5, *b*. На изображении «клетка» КПТ алгоритмом [6] не обнаружены.

Очевидно, что в отличие от итерационного алгоритма [6], обнаруживающего узлы сетки КПТ в пределах только одной однородной области, предложенный алгоритм позволяет определять КПТ с существенно различающимися характеристиками (см. рис. 4, *b*) и с произвольным числом однородных областей на изображении.

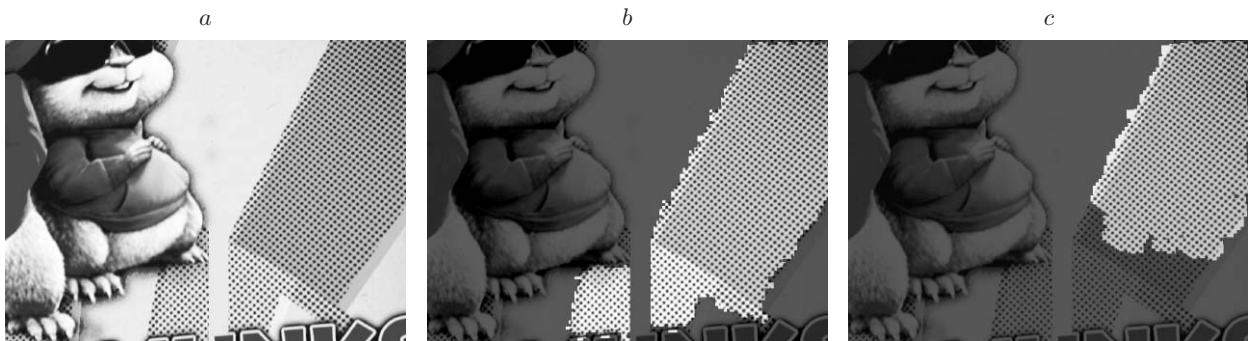


Рис. 3

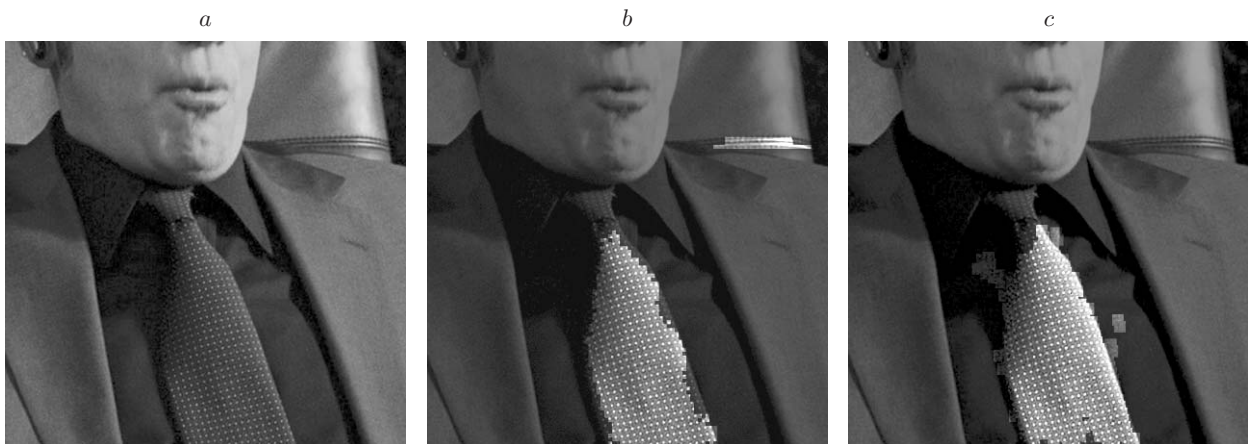


Рис. 4

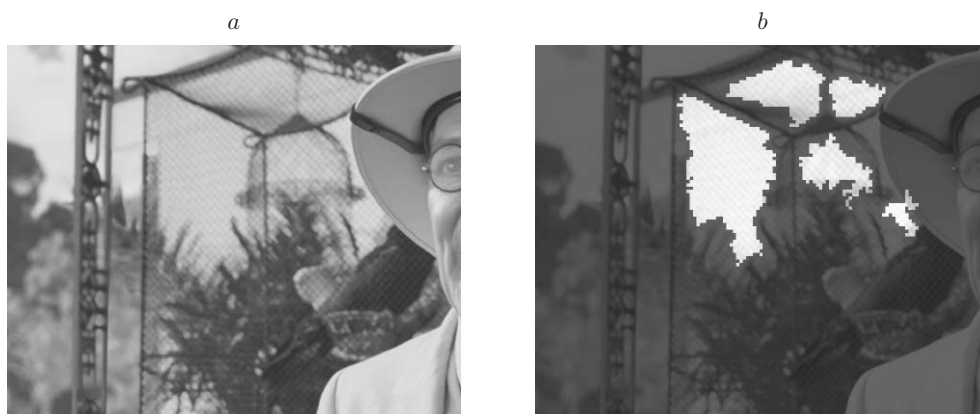


Рис. 5

Название изображения	Размер изображения	Время решения, с	
		Алгоритм [6]	Предложенный алгоритм
Бурундук	960 × 723	328	10,8
Галстук	720 × 720	214	9,1
Клетка	960 × 793	—	12,3

В таблице приведены оценки времени решения задачи обнаружения КПТ. Время работы предложенного алгоритма зависит только от числа анализируемых фрагментов и их размеров. Время работы алгоритма [6] является случайной величиной, которая зависит от результатов обнаружения текстурного элемента на этапе первичной обработки и от числа итераций. Экспериментальные исследования показали, что число итераций возрастает с увеличением степени деформации КПТ. Среднее время выполнения одной итерации ≈ 3 с.

Заключение. В данной работе предложен алгоритм обнаружения КПТ, основанный на свойствах спектров фрагментов анализируемого изображения. Анализируемый фрагмент должен содержать минимум 2×2 текстурных элемента, что в несколько раз меньше, чем для известных алгоритмов. Уменьшение требуемого числа текстурных элементов обеспечивает увеличение разрешающей способности алгоритмов сегментации изображений, применяющих алгоритм обнаружения КПТ. Предложено использовать числовые характеристики выбросов СМ в качестве основных отличительных признаков КПТ от непериодических текстур. Результаты экспериментальных исследований показали, что полученный алгоритм обладает достаточно высокой помехозащищённостью, устойчиво работает на деформированных текстурах, сохраняющих топологическую регулярность, и позволяет сократить время обработки изображений в несколько десятков раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Handbook** of Image and Video Processing /Ed. A. С. Bovik. Elsevier Academic Press, 2005. 1429 p.
2. **Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. и др.** Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
3. **Lin H. С., Wang L. L., Yang S. N.** Extracting periodicity of a regular texture based on autocorrelation functions // Pattern Recognit. Lett. 1997. **18**, N 5. P. 433–443.

4. **Grigorescu S. E., Petkov N.** Texture analysis using Renyi's generalized entropies // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Image Processing. 2003. Vol. 1. P. 241–244.
5. **Hays J., Leordeanu M., Efros A., Liu Y.** Discovering texture regularity as a higher-order correspondence problem // Lecture Notes in Comput. Sci. 2006. **3952**. P. 522–535.
6. **Park M., Brocklehurst K., Collins R., Liu Y.** Deformed lattice detection in real-world images using mean-shift belief propagation // IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell. 2009. **31**, N 10. P. 1704–1816.
7. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
8. **Puglisi G., Battiato S.** Periodic pattern detection for real-time application // Proc. of the 8th Intern. Workshop on Fuzzy Logic and Applications (WILF-2009). Palermo, Italy, June 9–12, 2009. P. 271–278.
9. **Ашкрофт Н., Мермин Н.** Физика твердого тела. М.: Мир, 1979. Т. 1. 399 с.
10. **Vartiainen J., Sadovnikov A., Kamarainen J.-K. et al.** Detection of irregularities in regular patterns // Mach. Vis. Appl. 2008. **19**, N 4. P. 249–259.
11. **Хэррис Ф. Дж.** Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978. **66**, № 1. С. 60–96.
12. **Методы** компьютерной обработки изображений /Под ред. В. А. Сойфера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
13. **Leon F. P.** Automated comparison of firearm bullets // Forensic Sci. Intern. 2006. **156**, N 1. P. 40–50.

Поступила в редакцию 7 февраля 2014 г.
