

УДК 004.93

А.М. АХМЕТШИН, В.А. БОЙКО, Б.С. БУСЫГИН

*Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина***ИНВАРИАНТНЫЕ К ВЛИЯНИЮ ПОВОРОТА СПЕКТРАЛЬНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКСТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Описан новый метод выделения информативных характеристик текстурных изображений в спектральной области, инвариантный к влиянию поворота анализируемого изображения, и не требующий перехода к полярной системе координат. Метод достаточно прост и удобен, поскольку все математические операции совершаются в декартовой системе координат. Представлены результаты численного моделирования и реальной проверки работоспособности метода.

**текстура, инвариантность к повороту, спектральная характеристика, автокорреляционная функция, модуляционное преобразование**

**Введение**

В работах [1, 2] нами были рассмотрены два новых метода классификации текстур, основанных на представлении ансамбля эталонных гистограммных характеристик в качестве основы нового информационного базиса путем использования различных ортогонализирующих преобразований. Целесообразность использования гистограммных характеристик обуславливалась их инвариантностью к влиянию поворота. Вместе с тем, легко привести примеры текстур (например, бинарных), имеющих совершенно различную структуру, но обладающих одинаковыми или очень похожими гистограммами. Это обстоятельство диктует необходимость и целесообразность использования дополнительных характеристик, к наиболее распространенным из которых относятся статистики второго порядка, основанные на анализе спектральных и корреляционных характеристик текстур. К сожалению, эти характеристики не являются инвариантными к влиянию поворота изображения. Это обстоятельство привело к появлению большого числа работ, связанных с поиском различных типов преобразований, в целях обеспечения инвариантности к влиянию поворота спектральных и корреляционных характеристик текстур

(обзор и большая библиография приведены в работе [3]). Не вдаваясь в детальный анализ существующих подходов, остановимся лишь на двух наиболее распространенных методах, с которыми у авторов имеется практический опыт работы – это преобразование Фурье-Меллина [4] и разложение двумерной автокорреляционной функции (АКФ) изображения текстуры по полиномам Цернике, ортогональных на единичной окружности [5]. Характерной особенностью обоих методов является необходимость перехода от декартовой системы координат к полярной. Это, учитывая пиксельную структуру изображения, неизбежно ведет или к упрощению самого преобразования, сопровождающегося потерей точности, или к существенному усложнению алгоритма из-за необходимости введения процедуры интерполяции в полярной системе координат, наподобие того, как это происходит в компьютерной рентгеновской томографии.

**Формулировка проблемы.** Учитывая отмеченные выше обстоятельства, представляется крайне желательным поиск таких типов интегральных преобразований спектральных и корреляционных характеристик текстур, которые бы не требовали перехода к полярной системе координат, а осуществлялись бы непосредственно в декартовой плоскости.

**Целью данной работы** является описание и демонстрация возможностей нового метода выделения информационных характеристик текстур в спектральной области, инвариантного к влиянию поворота текстуры и не требующего перехода к полярной системе координат.

### Решение проблемы

Новый метод выделения инвариантной к влиянию поворота характеристики текстуры в спектральной области включает в себя четыре этапа.

1. Вычисление энергетического Фурье-спектра изображения анализируемой текстуры на основе алгоритма прямого преобразования Фурье

$$S(f_x, f_y) = \left| \iint I(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \right|^2, \quad (1)$$

где  $I(x, y)$  – изображение текстуры.

2. Вычисление двумерной АКФ текстуры на основе выражения

$$r(x, y) = \iint S(f_x, f_y) e^{j2\pi(f_x x + f_y y)} df_x df_y. \quad (2)$$

Конечно, можно было бы вычислить АКФ и непосредственно, т.е. не прибегая к помощи быстрого преобразования Фурье, однако вычисление АКФ на основе выражения (2) обеспечивает ускорение вычислений в несколько десятков раз, по сравнению с прямым подходом. Целесообразность работы именно с АКФ текстуры обуславливается тем фактом, что для мелкозернистых текстур она более сконцентрирована (по сравнению с модулем Фурье-спектра) и всегда центрирована, т.е. максимум АКФ всегда находится в центре зависимости  $r(x, y)$ .

3. Вычисляются две спектральные характеристики от зависимости  $r(x, y)$  на основе использования преобразования Фурье, но отдельно для координаты  $x$  и координаты  $y$ , т.е.

$$R(x, f_y) = \int r(x, y) e^{-j2\pi f_y y} dy; \quad (3)$$

$$R(f_x, y) = \int r(x, y) e^{-j2\pi f_x x} dx. \quad (4)$$

4. Вычисление результирующей интегральной спектральной характеристики на основе использования выражения

$$Z(f_x, f_y) = |R(f_x, y) + R(x, f_y)|. \quad (5)$$

Здесь необходимо дать качественные пояснения, почему характеристика  $Z(f_x, f_y)$  является инвариантной к влиянию поворота изображения текстуры. Дело в том, что зависимости  $R(x, f_y)$  и  $R(f_x, y)$  представляют собой «спектральные катеты», т.е. они зависят от угла ориентации текстуры (фактически, ее АКФ), но зависимость  $Z(f_x, f_y)$  представляет собой «спектральную гипотенузу» и, следовательно, не зависит от угла поворота (некоторый аналог теоремы Пифагора, но в спектральной области).

Поскольку любой новый инвариант представляет интерес не только с точки классификации текстур, но и с точки зрения теории распознавания образов, то численное моделирование проведем на примере простого объекта (рис. 1, а), дающего, однако, достаточное представление об информационных возможностях нового метода.

Поскольку моделированный объект имеет небольшие размеры и характеризуется резкими границами, то в данном случае целесообразно провести сопоставление  $Z(f_x, f_y)$  с энергетическим двумерным Фурье-спектром  $S(f_x, f_y)$ , а не с АКФ  $r(x, y)$ .

Из рассмотрения  $S(f_x, f_y)$  на рис. 1, б для различных углов ориентации  $\theta$  видно, что двумерный энергетический Фурье-спектр поворачивается в спектральной плоскости на угол, соответствующий повороту моделируемого объекта, т.е. он не обладает инвариантностью к повороту, тогда как характеристики  $Z(f_x, f_y)$  (рис. 1, в) этой способностью обладают, т.е. они инвариантны.

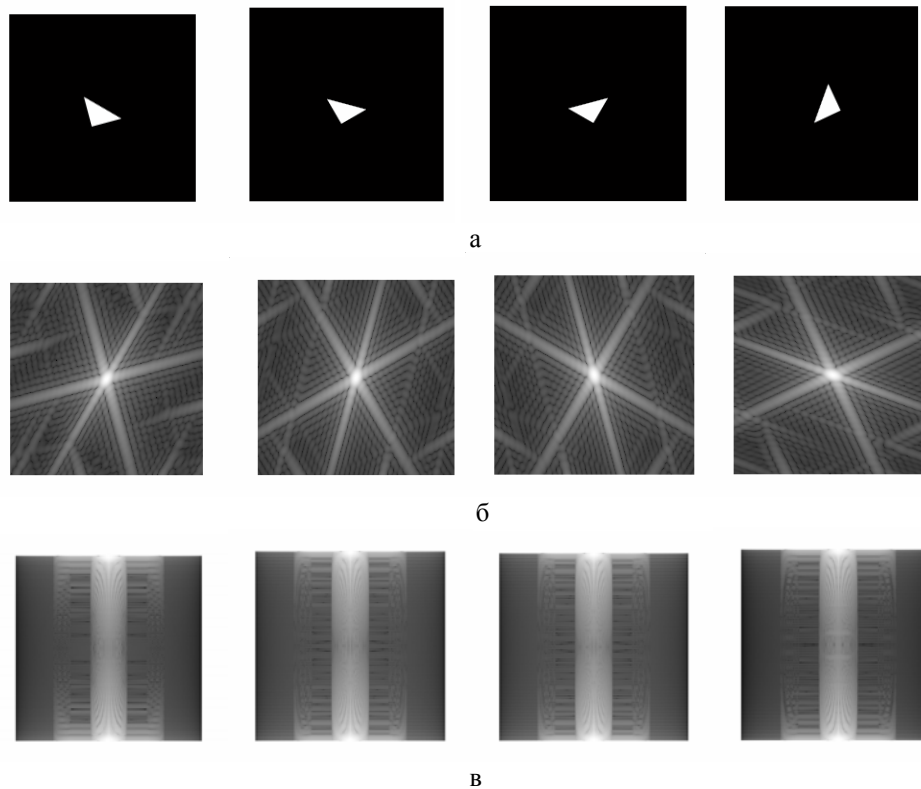


Рис. 1. Результаты численного моделирования:

а – моделируемый объект для углов поворота  $\theta$ , равных 15, 30, 60 и 115 градусов соответственно;  
 б –  $S_{\theta}(f_x, f_y)$ ; в –  $Z_{\theta}(f_x, f_y)$

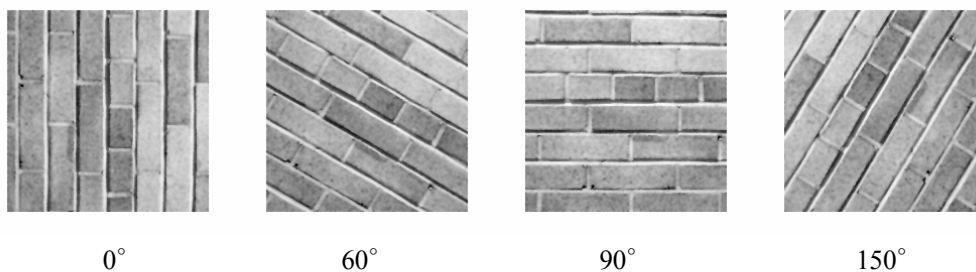


Рис. 2. Изображение текстуры для различных углов ориентации

Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что все операции производились в декартовой системе, без использования процедуры перехода к полярной системе координат.

На рис. 2 представлены четыре изображения реальной текстуры с различными углами ориентации.

Двумерные автокорреляционные функции изображений текстуры представлены на рис. 3, из рассмотрения которого отчетливо видно, что автокорреляционная функция не инвариантна к влиянию поворота и поворачивается в соответствии с углом поворота самой текстуры. На рис. 4 представлены

спектральные характеристики  $Z_{\theta}(f_x, f_y)$ , которые, как это хорошо видно, такой инвариантностью обладают.

Некоторое представление о степени взаимного отличия инвариантных спектральных характеристик различных текстур дает анализ результатов, представленных на рис. 5.

Из результатов анализа данных, представленных на рис. 5, можно заключить, что степень визуального отличия спектральных инвариантов невелика, что, безусловно, приводит к проблемам обеспечения требуемой степени надежности идентификации

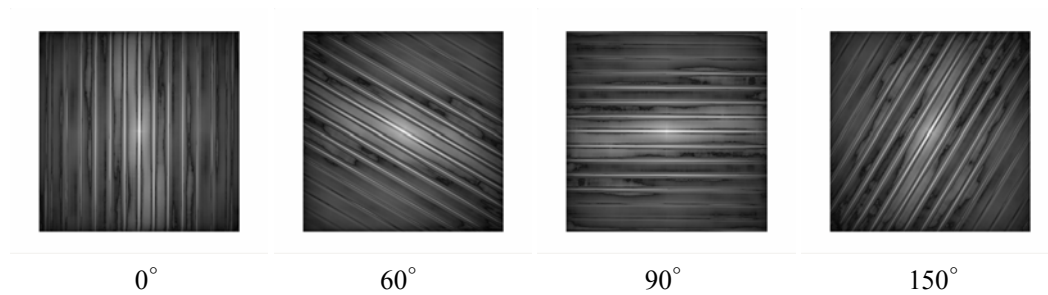


Рис. 3. Двумерные автокорреляционные функции изображения текстуры для различных углов ориентации

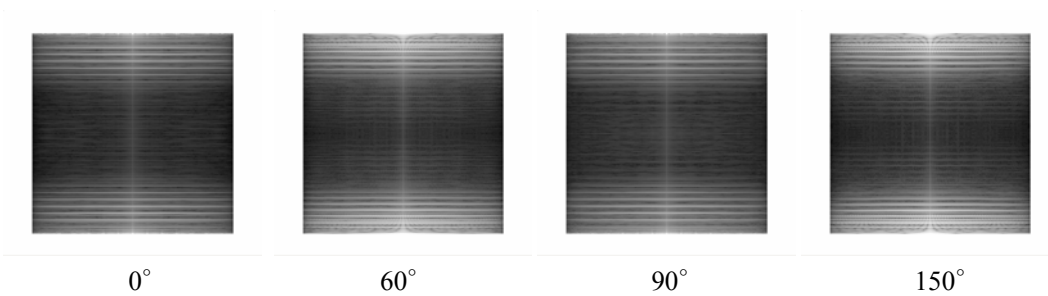
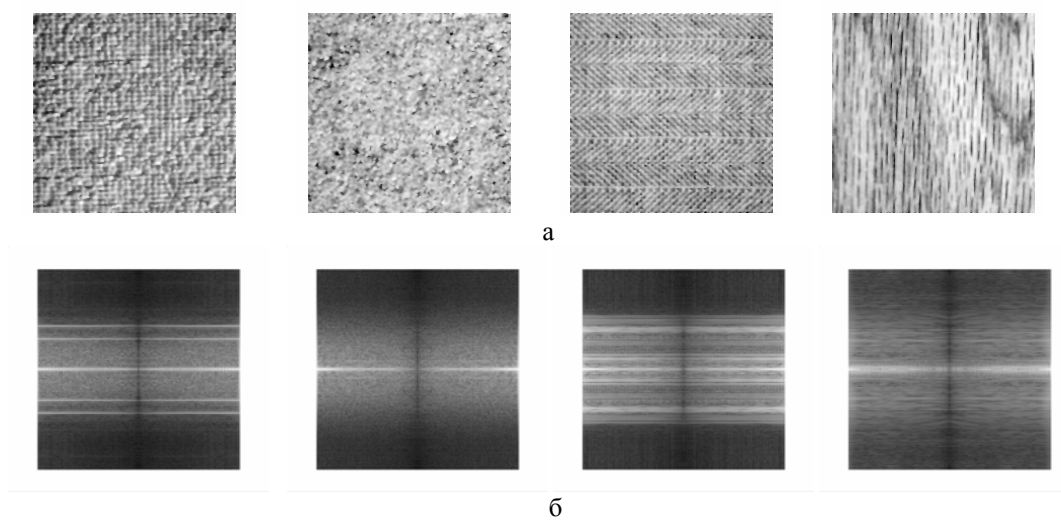
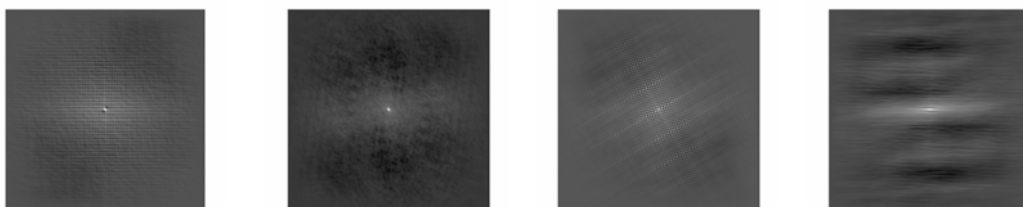
Рис. 4. Спектральная характеристика  $Z_{\theta}(f_x, f_y)$  для различных углов ориентации текстурыРис. 5. Изображения четырех различных текстур (а) и соответствующие им спектральные инварианты  $Z_{\theta}(f_x, f_y)$  (б)

Рис. 6. Автокорреляционные функции текстурных изображений, показанных на рис. 5, а

(классификации) типа текстуры. Однако этот вопрос связан со степенью отличия АКФ классифицируемых текстур, поскольку, если это отличие незначительно, то сама возможность осуществления классификации на основе спектральных инвариантов

становится проблематичной.

На рис. 6 показаны АКФ текстур, представленных на рис. 5, а. Видно, что их АКФ весьма близки друг к другу, что непосредственно сказывается на степени различия и спектральных инвариантов.

Эксперименты, проведенные на изображениях текстур десяти типов (их изображения приведены в работе [2]) и для семи углов ориентации каждой текстуры показали, что коэффициенты корреляции между спектральными инвариантами текстур различных типов (обозначим их как

$$c_{ij} : i = 1, \dots, 10; j = 1, \dots, 10)$$

были не ниже 0,80 и в ряде случаев достигая значения 0,92, что делает малочувствительной прямую процедуру распознавания по значению максимума коэффициента взаимной корреляции спектрального инварианта классифицируемой текстуры с набором эталонных характеристик  $Z_{\theta}(f_x, f_y)$ .

В целях повышения чувствительности процедуры классификации по максимуму значения коэффициента взаимной корреляции, нами было применено так называемое «модуляционное преобразование», впервые использованное в работе [6] и заключающееся в преобразовании АКФ  $r(x, y)$  к виду

$$r_{\text{mod}}(x, y) = \text{real} \left\{ r(x, y) e^{j 2\pi \frac{r(x, y)}{\lambda}} \right\}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – эмпирически подбираемый коэффициент, значение которого лежит в пределах  $(0 \div 1)$  при условии нормировки значения АКФ  $r(x, y)$  на единицу. В табл. 1 приведены значения коэффициентов корреляции между спектральными инвариантами

десяти текстур для угла ориентации  $90^\circ$ .

Применительно к данным, представленным в табл. 1, идеальным вариантом явилась бы ситуация, когда вне диагональные элементы были бы как можно ближе к нулю, т.е. корреляция между различными типами спектральных инвариантов текстур была бы минимальной. Из рассмотрения табл. 1 видно, что в большинстве случаев коэффициент корреляции близок к нулю, за исключением текстур второго и шестого типов, но максимум коэффициента корреляции равен 0,52, тогда как без применения модуляционного преобразования он, как это было отмечено выше, во всех случаях не опускался ниже значения 0,80. В этой связи особый интерес представляет степень внутриклассового отличия коэффициентов корреляции при использовании модуляционного преобразования.

В табл. 2 представлены значения  $c_{ij}$  для семи углов поворота изображения первой текстуры, показанной на рис. 5, а.

Из рассмотрения табл. 2 и сопоставления ее с данными табл. 1 видно, что минимальное значение коэффициента внутригрупповой корреляции равняется 0,33, тогда как типичные значения коэффициентов межгрупповой корреляции составляют порядка 0,10, что свидетельствует о допустимости использования коэффициентов корреляции

Таблица 1

Коэффициенты корреляции  $c_{ij}$  спектральных характеристик  $Z_{90}(f_x, f_y)$  для десяти типов текстур после проведения модуляционного преобразования над АКФ

$c_{ij}$	Текстуры									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,0000	-0,0780	0,1031	0,0438	0,0311	0,0830	-0,0230	-0,0063	0,2564	0,0993
2	-0,0780	1,0000	0,2933	0,3935	0,2701	0,5295	0,3067	0,4919	-0,0071	0,1746
3	0,1031	0,2933	1,0000	0,2721	0,3339	0,5169	0,3356	0,4133	0,1353	0,3695
4	0,0438	0,3935	0,2721	1,0000	0,2601	0,3983	0,3258	0,3823	0,0860	0,0895
5	0,0311	0,2701	0,3339	0,2601	1,0000	0,3425	0,1698	0,3195	0,1215	0,2244
6	0,0830	0,5295	0,5169	0,3983	0,3425	1,0000	0,3786	0,4999	0,0992	0,3352
7	-0,0230	0,3067	0,3356	0,3258	0,1698	0,3786	1,0000	0,4119	-0,0173	0,2082
8	-0,0063	0,4919	0,4133	0,3823	0,3195	0,4999	0,4119	1,0000	0,0784	0,2485
9	0,2564	-0,0071	0,1353	0,0860	0,1215	0,0992	-0,0173	0,0784	1,0000	0,1540
10	0,0993	0,1746	0,3695	0,0895	0,2244	0,3352	0,2082	0,2485	0,1540	1,0000

Таблица 2

Коэффициенты корреляции  $c_{ij}$  спектральных характеристик  $Z_{\theta}(f_x, f_y)$  одной текстуры для семи углов поворота после проведения модуляционного преобразования над АКФ

$c_{ij}$	Углы поворота (в градусах)						
	0	30	60	90	120	150	200
0	1,0000	0,4223	0,3313	0,4066	0,3956	0,4606	0,4103
30	0,4223	1,0000	0,5300	0,4975	0,6770	0,5273	0,5785
60	0,3313	0,5300	1,0000	0,5493	0,5772	0,5485	0,5758
90	0,4066	0,4975	0,5493	1,0000	0,5570	0,4248	0,5235
120	0,3956	0,6770	0,5772	0,5570	1,0000	0,5189	0,5997
150	0,4606	0,5273	0,5485	0,4248	0,5189	1,0000	0,5331
200	0,4103	0,5785	0,5758	0,5235	0,5997	0,5331	1,0000

спектральных инвариантов в качестве информативных признаков в рамках процедуры классификации типа текстуры.

### Заключение

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Определена новая спектральная характеристика, инвариантная к влиянию поворота изображения текстуры.

2. Основным достоинством нового спектрального инварианта является отсутствие необходимости перехода к полярной системе координат, поскольку все вычисления совершаются в декартовой системе координат.

3. Степень межгруппового различия спектральных инвариантов прямо связана со степенью различия АКФ анализируемых текстур, но она может быть повышена за счет использования модуляционного преобразования их АКФ.

4. Помимо задач классификации собственно текстур, новые спектральные инварианты естественно могут быть использованы и для традиционных задач распознавания образов, связанных с нейтрализацией влияния поворота образа или цели.

### Литература

1. Ахметшин А.М., Бусыгин Б.С., Бойко В.А. Статистическая классификация текстурных изобра-

жений методом обобщенного спектрального анализа в базисе Грамма-Шмидта // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2005. – № 2. – С. 13 – 15.

2. Ахметшин А.М., Бусыгин Б.С., Бойко В.А. Классификация текстурных изображений в спектральном базисе сингулярных векторов гистограммных характеристик // Науковий вісник НГУ. – Дн-ск: НГУ, 2005. – № 1. – С. 108 – 114.

3. Zhang J., Tan T. Brief review of invariant texture analysis method // Pattern Recognition. – 2002. – Vol. 35. – P. 735 – 747.

4. Ахметшин А.М, Киргизов А.А. Нейросетевая классификация текстурных изображений на основе инвариантных дескрипторов преобразования Фурье-Меллина // Сб. научных трудов НГУ. – Дн-ск: НГУ, 2002. – № 14. – С. 170 – 177.

5. Довженко О.В., Ахметшин А.М. Инвариантное распознавание текстурных изображений в пространстве моментов Цернике на основе метода амплитудно-частотной демодуляции // Вестник ХГТУ. – Херсон: ХГТУ, 2003. – № 19. – С. 123 – 126.

6. Ахметшина Л.Г. Информационные возможности модуляционного преобразования при сегментации мультиспектральных изображений // Системні технології. – 2004. – № 6. – С. 122 – 127.

Поступила в редакцію 2.11.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Корчинский, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.