

УДК 528.873

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук, С. А. Рябоконеко

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Київ

Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов с использованием марковской модели изображений

Надійшла до редакції 07.05.01

Розглянуто можливість використання марковської моделі зображень при дешифруванні космічних знімків ландшафтних комплексів за структурно-текстурними ознаками. Показано, що застосування марковської моделі для аналізу просторових спектрів Фур'є різноманітних зображень дозволяє відобразити вірогідний взаємозв'язок їхніх складових. На цій основі розглянуто способи і результати практичного дешифрування космічних знімків ландшафтних комплексів.

Для космических изображений таких составляющих ландшафтных комплексов (ЛК) как лесная и сельскохозяйственная растительность, водная поверхность, городская застройка [1] функции автокорреляции имеют вид убывающих зависимостей, которые аппроксимируются экспоненциальными функциями с показателями степени в диапазоне $-0.2... -0.7$. Поэтому при описании структурно-текстурных характеристик изображений ЛК вероятностную зависимость значений яркости пикселей космического снимка можно представить в виде марковской модели [3, 9]. В соответствии с определением марковских процессов плотность вероятности значений яркости пикселя изображения с координатами x и y как элемента m -связного марковского поля зависит только от яркости тех пикселей, расстояние до которых не превышает m . В случае минимальной окрестности $m = 1$ имеем окрестность, состоящую из четырех пикселей с координатами $(x - 1, y)$, $(x + 1, y)$, $(x, y - 1)$ и $(x, y + 1)$. Этот случай является наиболее простым, так как его можно свести к простой (односвязной) и одномерной марковской цепи путем усреднения вероятностей по двум осям. При расстоянии $m = \sqrt{2}$ пкл к окрестности размера $m = 1$ добавляются еще пиксели $(x - 1, y - 1)$, $(x - 1, y + 1)$, $(x + 1, y - 1)$ и $(x + 1, y + 1)$, и окрестность состоит из восьми пикселей. При расстоянии $m = 2\sqrt{2}$ пкл окрестность состоит из 16 пикселей, которые обрамляют снаружи окрестность из восьми пикселей.

Для окрестности $m = \sqrt{2}$ математической формой

описания двухмерной марковской модели изображения является матрица переходных вероятностей значений яркости L_1 и L_2 соседних пикселей космического снимка, которую также называют матрицей смежных вероятностей (МСВ) [8]. При этом пиксел с координатами x, y имеет яркость L_1 , а значение L_2 является средней яркостью пикселей из окрестности $m = \sqrt{2}$. Учитывая, что яркость изображения обычно передается 8-разрядным кодом, для 256 градаций яркости МСВ имеет размер 256^2 . Элемент P_{12} матрицы является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселей, имеющих значения оптической яркости L_1 и L_2 . Величина P_{12} определяется как отношение количества пар смежных пикселей, имеющих яркости L_1 и L_2 , к общему числу различных сочетаний значений яркости в анализируемом изображении ЛК. Для окрестности $m = 2\sqrt{2}$ матрица переходных вероятностей значений яркости соседних пикселей, равной L_1, L_2 и L_3 , означает, что яркость L_1 имеет пиксел с координатами (x, y) , значение L_2 является средним значением яркости пикселей окрестности $m = \sqrt{2}$, значение L_3 — средним значением яркости пикселей на расстоянии $m = 2\sqrt{2}$. Для окрестности $m = 2\sqrt{2}$ МСВ имеет размер 256^3 , поэтому для упрощения вычислений в качестве вероятностной модели изображений ЛК выбирается марковская модель связности $m = \sqrt{2}$.

МСВ служат основой для вычисления структурных признаков ЛК. Известные методы оценки

двухмерной структуры изображений на основе статистических характеристик МСВ заключаются в вычислении совокупности параметров Харалика [8] или значений взаимной корреляционной функции для МСВ исследуемого и эталонного объекта [4].

Для сокращения вычислительных операций с учетом анализа МСВ изображений ЛК нами была выполнена замена вероятностей значений яркости смежных пикселей на вероятности разностей Δ их яркостей (контрастов).

В итоге были получены матрицы оценок вероятностей значений контрастов яркости $p(\Delta)$, $\Delta = 1, 2, \dots, 0.2^N - 1$, где $2^N \times 1$ — размерность этих матриц, N — разрядность цифрового снимка. Элемент матрицы вероятностей $p(\Delta)$ является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселей, контраст яркостей которых равен Δ . Величина $p(\Delta)$ определяется как отношение количества пар смежных пикселей, имеющих яркости L_1 и $L_1 - \Delta$ или L_1 и $L_1 + \Delta$, к общему числу различных контрастов значений яркости в анализируемом изображении ЛК.

В данной работе рассмотрена возможность применения матриц вероятностей контрастов (МВК) при дешифрировании космических снимков: 1) для определения на основе техники декомпозиции относительных площадей составляющих ЛК; 2) для дешифрирования ЛК по их пространственно-частотным спектрам — пространственным спектрам Фурье (ПСФ). В последнем случае в качестве «контрастов» выступают приращения составляющих смежных частот пространственного спектра.

Для решения первой задачи необходимо располагать базой данных космических изображений различных эталонных тестовых участков, составляющих ЛК. При этом для каждого выбранного эталонного участка по яркости изображений определяются усредненные значения $p(\Delta)$ ($\Delta = 1, 2, \dots, 0.2^N - 1$) и их доверительные интервалы. Затем выполняются следующие операции.

1. Оценка взаимной разделимости характеристик различных по составу эталонных тестовых участков на основе выражения

$$D_{nk}^{ec} = \sum_{\Delta=1}^t [p_n^{ec}(\Delta) - p_k^{ec}(\Delta)]^2, \quad (1)$$

где D_{nk}^{ec} — расстояние в пространстве Δ между элементами матриц составляющих n -го и k -го эталонных ЛК, c — порядковый номер спектрального слоя космического снимка, t — максимальное из всех значений Δ ; $p_n^{ec}(\Delta)$ и $p_k^{ec}(\Delta)$ — МВК для n -го и k -го эталонных ЛК. Пороговое значение D^* опреде-

ляется по значениям доверительных интервалов для $p_n^{ec}(\Delta)$ и $p_k^{ec}(\Delta)$. При $D_{nk}^{ec} \geq D^*$ участки, составляющие ЛК, различимы, а при $D_{nk}^{ec} < D^*$ — неразличимы.

2. Определение в каждом спектральном слое космического снимка значений МВК для v -го исследуемого участка ЛК и вычисление расстояния D_{qv}^{ec} между элементами матриц v -го исследуемого участка и q -го эталонного ЛК в пространстве Δ ($\Delta = 1, 2, \dots, t$):

$$D_{qv}^{ec} = \sum_{\Delta=1}^t [p_q^{ec}(\Delta) - p_v^c(\Delta)]^2 \quad (2)$$

где $q = 1, 2, \dots, M$, M — количество выбранных эталонных участков; $c = 1, 2, \dots, C$, C — количество спектральных слоев снимка.

3. Определение по каждому спектральному слою космического снимка функций принадлежности v -го исследуемого участка F_{qv}^c к каждому эталонному участку:

$$F_{qv}^c = 1 - \frac{D_{qv}^c - \min_q(D_{qv}^c)}{\max_q(D_{qv}^c) - \min_q(D_{qv}^c)}, \quad (3)$$

где $\max_q(D_{qv}^c)$ и $\min_q(D_{qv}^c)$ — максимальное и минимальное значения D_{qv}^c .

4. Определение функций принадлежности F_{qv}^Σ по всем спектральным слоям космического снимка:

$$F_{vn}^\Sigma = \left[\sum_C (F_{qn}^c)^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

По максимальному значению функции F_{qv}^Σ для совокупности всех спектральных слоев космического снимка определяется принадлежность v -го исследуемого участка к конкретному типу.

5. В случае неоднородного состава v -го исследуемого участка ЛК (например, из двух составляющих) методом декомпозиции определяются соотношения площадей этих составляющих:

$$S_{nv} = 1 - \frac{\left[\sum_c (D_{nv}^c)^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_c (D_{nv}^c)^2 \right]^{1/2} + \left[\sum_c (D_{kv}^c)^2 \right]^{1/2}}, \quad (5)$$

$$S_{kv} = 1 - \frac{\left[\sum_c (D_{kv}^c)^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_c (D_{nv}^c)^2 \right]^{1/2} + \left[\sum_c (D_{kv}^c)^2 \right]^{1/2}},$$

где S_{nv} и S_{kv} — относительные площади на исследуемом участке, занятые n -м и k -м типами ЛК.

Для демонстрации метода МВК и техники деком-



Рис. 1. Фрагмент космического снимка Киевской области (ИСЗ Spot): 1 — участок леса, 2 и 3 — участки, содержащие лес и городскую застройку, 4 — городская застройка

позиции при дешифрировании космических изображений ЛК был использован космический снимок SPOT (04.07.1995 г.) Киевской области (рис. 1). В качестве эталонных участков выбраны фрагменты леса (1) и городской застройки (4), для которых были вычислены МВК. Последние можно представить графически (рис. 2): горизонтальная ось соответствует значениям контрастов яркости Δ , а вертикальная — значениям их вероятности $p(\Delta)$. Графики МВК для эталонных составляющих ЛК свидетельствуют о достаточном для их классификации различии. Продолжением эксперимента был выбор на космическом снимке двух участков ЛК с неизвестным соотношением площадей, занятых лесом и городской застройкой (2 и 3), с последующим определением этого соотношения. В результате обработки изображений исследуемых участков были определены значения $p^c(\Delta)$ ($\Delta = 0, 1, \dots, 31$) в трех спектральных слоях ($\lambda\lambda = 0.5\dots 0.6, 0.6\dots 0.7, 0.8\dots 0.9$ нм) и составлены МВК для каждого спектрального слоя. После этого были определены расстояния D_{qv}^c , на основании значений которых в соответствии с (5) были определены относительные площади составляющих участки ЛК (табл. 1).

В табл. 1 приняты следующие обозначения: $D_{1,2}^1$ — расстояние в пространстве Δ между элементами матриц 2-го исследуемого участка и 1-го эталонного участка (лес) для 1-го спектрального канала, $S_{1,2}$ — относительная площадь на 2-м исследуемом

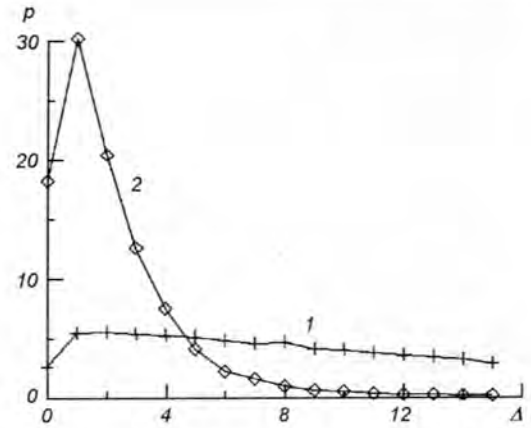


Рис. 2. Графики МВК: 1 — городская застройка, 2 — лес

Таблица 1. Соотношения площадей леса и городской застройки на исследуемых участках

Спектральный слой	Лес (1)	Городская застройка (3)
Участок 2		
1	$D_{1,2}^1 = 2.2$	$D_{4,2}^1 = 4.2$
2	$D_{1,2}^2 = 1.5$	$D_{4,2}^2 = 3.9$
3	$D_{1,2}^3 = 2.0$	$D_{4,2}^3 = 5.3$
	$S_{1,2} = 0.70$	$S_{4,2} = 0.299$
Участок 3		
1	$D_{1,3}^1 = 4.3$	$D_{4,3}^1 = 3.8$
2	$D_{1,3}^2 = 5.6$	$D_{4,3}^2 = 4.3$
3	$D_{1,3}^3 = 6.0$	$D_{4,3}^3 = 5.0$
	$S_{1,3} = 0.45$	$S_{4,3} = 0.549$

участке, занятая 1-м типом составляющих ЛК (лес) и т. д.

Таким образом, на участке 2 лес составлял 70 % территории, а городская застройка — 30 %. На участке 3 — 45 % и 55 % соответственно, что с приемлемой точностью было подтверждено наземными измерениями.

Во втором случае — применение МВК для дешифрирования ЛК по их пространственно-частотным спектрам (как двумерным процессам) — в качестве информативных признаков используются структурно-текстурные признаки, которые определяются как вероятности приращений составляющих смежных частот пространственного спектра. Обоснование использования марковской модели изображений для описания ПСФ такое же, как и для яркостных изображений. При этом в качестве модели составляющих ПСФ можно использовать дву-

мерный марковский процесс в форме матрицы-столбца вероятностей модулей приращений смежных составляющих пространственного спектра изображений ландшафтов. Матрицу для приращений спектров (контрастов спектров) назовем матрицей вероятностей приращений (МВП) составляющих смежных частот ПСФ.

В работах, посвященных анализу комплексных ПСФ, имеющих амплитудную и фазовую составляющие, чаще рассматриваются амплитудные составляющие [2, 7], что объясняется ограниченными возможностями оптических построителей пространственных спектров в ранних исследованиях. Учет фазовой составляющей ПСФ представляет интерес, так как последняя содержит информацию о текстуре изображения. В дальнейшем с применением вычислительной техники фазовые составляющие также использовались при дешифрировании изображений для устранения таких дефектов, как размытость и смазанность изображений [6].

В рассматриваемом случае фазовая составляющая учитывалась посредством перехода от комплексного спектра C_{ij} в показательной форме, включающей амплитудную A_{ij} и фазовую φ_{ij} составляющие,

к алгебраической форме с действительной R_{ij} и мнимой J_{ij} составляющими:

$$R_{ij} = A_{ij} \cos \varphi_{ij}, \quad J_{ij} = A_{ij} \sin \varphi_{ij},$$

где i, j — номера гармоник ПСФ по двум осям.

Спектры R_{ij} и J_{ij} как двухмерные процессы были использованы для классификации составляющих ЛК с помощью МВП.

В качестве примера использования метода МВП при классификации космических изображений ЛК по их ПСФ были исследованы участки территории на космическом снимке МСУ-В «Океан-О» (10.11.1999 г.). В качестве исследуемых участков были выбраны (рис. 3): городская застройка (1), лес (2) и сельскохозяйственная растительность (3). Их пространственные спектры приведены на рис. 4, обозначения на котором соответствуют рис. 3. Для спектральных изображений исследуемых участков ЛК были определены МВП. Матрицы усредненных значений вероятностей для мнимой составляющей спектра J_{ij} для трех составляющих ЛК показаны на рис. 5, где по горизонтальной оси показаны перелазы Δ составляющих спектра, а по вертикальной — вероятности наличия приращений соответствующие



Рис. 3. Фрагмент космического снимка Киевской области (МСУ-В, «Океан-О», 10.11.1999), по которому получены ПСФ: 1 — городская застройка, 2 — лес, 3 — сельхозкультуры

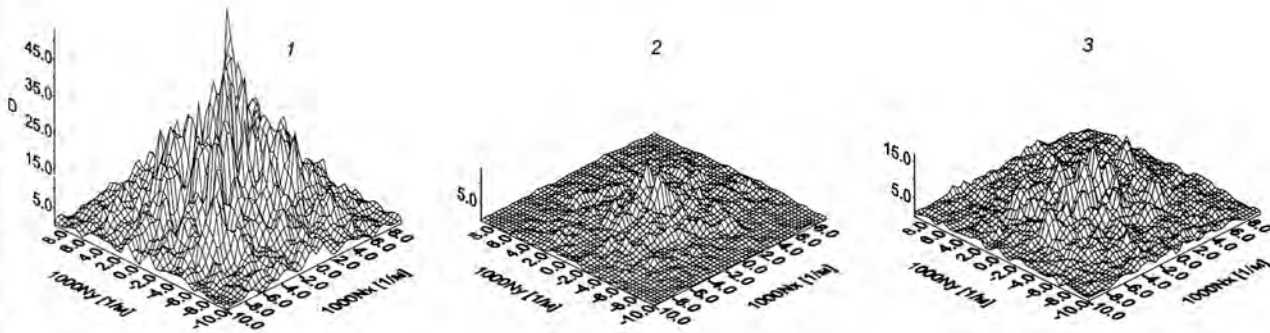


Рис. 4. Амплитудные составляющие пространственных спектров Фурье элементов ЛК: 1 — городская застройка, 2 — лес, 3 — сельхозкультуры

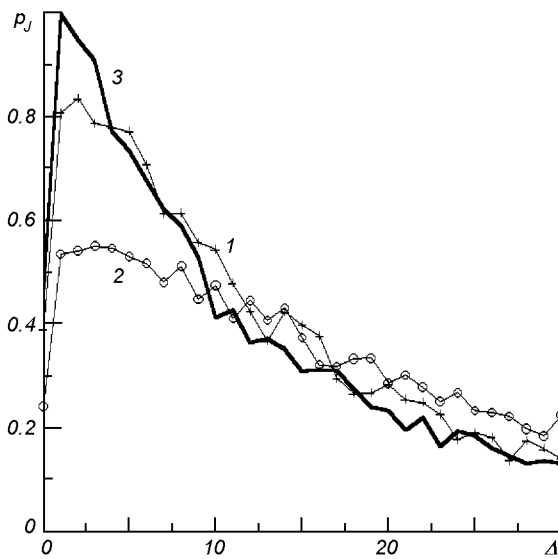


Рис. 5. Векторы смежных вероятностей контрастов между составляющими ПСФ для городской застройки (1), леса (2) и сельхозкультур (3)

го значения $p_j(\Delta)$. Видно различие МВП для городской застройки, леса и сельскохозяйственных культур, главным образом в области небольших значений приращений между спектральными составляющими.

Для оценки возможности классификации ЛК по ПСФ были определены расстояния между МВП одинаковых и разных составляющих ЛК в соответствии с выражением (2). Для сравнительной оценки расстояний между МВП принята относительная единица — максимальный разброс значений элементов МВП однотипных составляющих ЛК, а остальные разбросы приведены к этой единице (табл. 2). Из табл. 2 видно, что полученные значения расстояний между МВП позволяют распознавать разнотипные составляющие ЛК при помощи МВП по пространственным спектрам.

Проведенные исследования показали, что доверительные интервалы для элементов МВП больше, чем для МВК, но для спектров изображений имеющих структуру близкую к регулярной (городская застройка, лесонасаждения) МВП имеют меньший разброс. Таким образом МВП позволяют получить дополнительную информацию при дешифрировании космических снимков и классификации ЛК.

Рассмотренные выше примеры показали возможность использовать при дешифрировании космических снимков ЛК по структурным признакам марковские модели изображений в виде матриц вероятностей контрастов яркости смежных пикселей и

Таблица 2. Расстояния D между МВП

Составляющие спектра	Разнотипные составляющие ЛК		Однотипные составляющие ЛК
	D_{\min}	D_{\max}	D_{\max}
R_{ij}	1.61	2.16	1.0
J_{ij}	1.72	2.38	1.0

матриц вероятностей приращений составляющих смежных пространственных частот спектра. Это расширяет возможности применения при дешифрировании космических снимков структурного анализа, который позволяет ослабить влияние изменчивости тона изображений ЛК, вызванного различными условиями съемки. Однако ограниченный объем использованного экспериментального материала требует для подтверждения достоверности их результатов дальнейших исследований в этом направлении с учетом закономерностей морфологической структуры и природных взаимосвязей составляющих ЛК.

1. Викторов А. С. Рисунок ландшафта. — М.: Мысль, 1986. — 180 с.
2. Залманзон Л. А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. — М.: Наука, 1989. — 496 с.
3. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. — М.: Радио и связь, 1986. — 248 с.
4. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М., 1978. — 848 с.
5. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Новиков Р. И. и др. Дешифрирование космических снимков: распознавание ландшафтных зон на основе структурного анализа // Космична наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 39—44.
6. Янутти Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М.: Недра, 1991. — 240 с.
7. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. — М.: Радио и связь, 1987. — 296 с.
8. Haralick R. M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE.—1979.—67, N 5.—P. 786.
9. Rabiner L. R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition // Proc. IEEE.—1989.—77, N 2.—P. 257—285.

INTERPRETATION OF SPACE IMAGES OF LANDSCAPE ZONES WITH THE USE OF THE MARKOV IMAGE MODEL

A. D. Fedorovsky, V. G. Yakimchuk, S. A. Ryabokononko

We examine the possibility of using the Markov model of images for the interpretation of space images of landscape zones by their structural and textural characteristics. It is shown that the use the Markov model for the analyses of the spatial Fourier spectra of various images allows one to reflect a probable interrelation of their components. The methods of interpreting the satellite images of landscape zones are considered.