

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 528.72 : 004.93

ПОИСК ОБЪЕКТОВ НЕПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИХ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ*

С. М. Борзов¹, Е. С. Нежевенко¹, О. И. Потатуркин^{1, 2}

¹ Учреждение Российской академии наук
Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: borzov@iae.nsk.su

² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный университет»,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Проанализированы наиболее существенные ограничения традиционных технологий обработки многоспектральных данных дистанционного зондирования Земли при решении задачи поиска объектов неприродного происхождения. Промоделирован и исследован ряд методов, использующих структурные особенности изображений искусственных объектов. Показана эффективность подходов, основанных на классификации фрагментов с применением детекторов Харриса.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, пространственные признаки, структура изображений, поиск объектов.

Введение. Поиск объектов неприродного происхождения, таких как здания или дороги, — это одна из практических задач обработки изображений, направленная на формирование слоёв геоинформационных систем, характеризующих застройку и транспортные коммуникации при стратегическом планировании развития городов и оценке антропогенных рисков территорий. Традиционно данная задача решается с использованием аэрофотоснимков среднего и высокого разрешения. Так, в работе [1] указывается, что для обнаружения зданий требуется разрешение до 6 см, для поиска дорог достаточно 20 см. Как правило, для обнаружения зданий применяются подходы, сочетающие выделение объектов с их 2D- или 3D-реконструкцией на основе некоторых моделей [2–5]. С совершенствованием космических средств дистанционного зондирования Земли привлекательным стало использование для этих целей изображений, получаемых со спутников. Несомненным преимуществом таких изображений является большее покрытие и отсутствие проблем с географической привязкой. В то же время непосредственная реализация методик выделения объектов, применяемых для обработки аэрофотоснимков, оказалась невозможной, поскольку космические изображения ещё не имеют требуемого разрешения.

Основой обработки космических снимков со времён запусков первых спутников являются попиксельные спектральные технологии. Наибольшие успехи при решении задач тематического дешифрирования космических изображений достигнуты в области ландшафтоведения. Анализ спектрального отклика различных участков земной поверхности в сочетании с данными наземных измерений, выполненных на эталонных участках, позволяет решать ряд задач землепользования, контроля пожарной опасности, прогноза урожая

*Работа поддержана проектом Сибирского отделения РАН, выполняемым совместно со сторонними научными организациями (№ 71).

и т. п. Однако для широкого круга практических приложений спектральных признаков недостаточно [6]. В частности, при поиске объектов неприродного происхождения необходимо использовать пространственные признаки изображений (форму объектов, текстурные свойства поверхностей и т. п.).

Хотя пространственная информация, несомненно, важна, предметом исследований остаются методы её эффективного использования. Целью данной работы является анализ эффективности различных пространственных признаков и методов описания структуры изображения при поиске объектов неприродного происхождения на космических изображениях высокого разрешения.

Методы описания структуры изображений. Для обнаружения структурных элементов типа линий и кривых могут применяться преобразования Радона и Хафа. Эти преобразования фактически эквивалентны и отличаются лишь тем, что в первом случае данные представляются в многоградационном виде, а во втором — в бинарной форме. При поиске линий вычисляются проекции градиента изображений при различных углах наклона. Однако общим недостатком описания сцены с использованием указанных методов является их значительная трудоёмкость. Поскольку при анализе параметров локальных зон изображений возникает потребность выполнять подобные преобразования «скользящим окном», для оперативной обработки такие методы не могут быть использованы.

Менее трудоёмкая технология описания и анализа структуры сцены основана на обнаружении точечных особенностей изображений. Точечная особенность (или особая точка) — это точка на изображении, окрестность которой отличается от окрестности соседних с ней точек, например углы и края зданий. Поэтому если выделить на изображении сцены точечные особенности, определить их положение и параметры, то полученные данные смогут дать большое количество информации о структуре сцены.

Существует множество детекторов точечных особенностей изображений. Все они отличаются различными подходами к оценке параметров окрестностей пикселей. Наибольшую известность получили детекторы Харриса [7]. Метод основан на выделении окрестностей пикселей трёх типов: изотропной окрестности, окрестности типа край и окрестности типа угол. Окрестность каждого пикселя изображения характеризуется функцией

$$E(u, v) = \sum_{\Omega(x, y)} [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2 \cong [u, v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $I(x, y)$ — яркость в точке (x, y) ; $\Omega(x, y)$ — окрестность анализируемой точки; M — матрица частных производных:

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{\Omega} \left(\frac{dI}{dx}\right)^2 & \sum_{\Omega} \left(\frac{dI}{dx}\right) \left(\frac{dI}{dy}\right) \\ \sum_{\Omega} \left(\frac{dI}{dx}\right) \left(\frac{dI}{dy}\right) & \sum_{\Omega} \left(\frac{dI}{dy}\right)^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Поэтому собственные значения λ_1 и λ_2 матрицы M определяют тип окрестности. Так, если:

- λ_1 и λ_2 малы (сумма квадратов разности отсчётов при смещении окрестности близка к нулю) — область изображения изотропна;
- разность между λ_1 и λ_2 велика (сумма квадратов разности отсчётов велика при смещении окрестности только в одну сторону) — окрестность типа край;
- λ_1 и λ_2 велики и $\lambda_1 \sim \lambda_2$ (сумма квадратов разности отсчётов при смещении окрестности велика при сдвигах в любую сторону) — окрестность типа угол.

Для классификации окрестностей пикселей с использованием $\text{trace}M = \lambda_1 + \lambda_2$ и $\det M = \lambda_1 \lambda_2$ формируются: мера близости типа край (функция отклика край)

$$L = (\text{trace}M)^2 - 4\det M \quad (3)$$

и мера близости типа угол (функция отклика угол)

$$R = \det M - k(\text{trace}M)^2. \quad (4)$$

При этом параметр k может принимать различные значения (в частности, Харрисом предложено $k = 0,04$).

Точки изображения, соответствующие локальным максимумам этих функций, являются особенными. В качестве оценки антропогенности F фрагмента S могут быть использованы среднее значение функции отклика, количество особых точек и т. п. В данной работе предлагается применять критерии, количественно характеризующие как число, так и степень особенности найденных точек: сумму и среднее максимумов функции отклика, сумму и среднее вторых производных функции отклика в её локальных максимумах. В частности, первый и третий из этих критериев (на основе функции отклика угол) определяются в виде

$$F = \sum_{i=0}^n R(x_i, y_i); \quad F = \sum_{i=0}^n \Delta R(x_i, y_i), \quad (5)$$

где n — количество особых точек в анализируемой зоне. Кроме того, расчёт антропогенности может выполняться с учётом лишь аномальных особых точек, для которых значения функции отклика R превосходят пороговый уровень, определяемый по результатам анализа этой функции для данного фрагмента. Это позволяет учесть ещё одну специфику изображений объектов искусственного происхождения — отсутствие значительных перепадов яркости.

Далее, используя предположение о преобладании фона (по площади) на изображении, необходимо определить участки с аномально высокими значениями данных критериев. Они с большой долей вероятности будут содержать объекты неприродного происхождения.

Целесообразно также рассмотреть возможность применения фрактальной размерности для поиска объектов неприродного происхождения. Фрактальная обработка изображений — сравнительно новое направление, активно развивающееся в настоящее время. Впервые термины «фрактал», «фрактальная геометрия» и «фрактальная обработка» были использованы в работе [8].

Фрактальная размерность фрагментов изображений определяется с использованием интенсивности в качестве третьей координаты. Разработано большое количество методов вычисления этого параметра. Такое разнообразие связано с тем, что размерность формулируется в терминах теории множеств, а метод её расчёта зависит от того, как определяется элемент множества для непрерывного полутонового изображения и какая мера вводится на этом множестве. В данной работе вычисление фрактальной размерности выполняется методом покрытий, предложенным в [9]. С этой целью значения интенсивности изображения $I(i, j)$ округляются до значений $I^\varepsilon(i, j)$ с шагом ε . Далее строятся две поверхности $U^\varepsilon(i, j)$, $V^\varepsilon(i, j)$ такие, что значения $I^\varepsilon(i, j)$ располагаются между ними. Верхняя поверхность $U^\varepsilon(i, j)$ состоит из точек, которые всегда, по крайней мере на ε , превышают $I^\varepsilon(i, j)$:

$$U^\varepsilon(i, j) = \max_{k, m \in \Omega} [I^\varepsilon(i, j) + \varepsilon, I^\varepsilon(i - k, j - m)]. \quad (6)$$

Нижняя поверхность $V^\varepsilon(i, j)$ содержит точки всегда, по крайней мере на ε , ниже, чем $I^\varepsilon(i, j)$:

$$V^\varepsilon(i, j) = \min_{k, m \in \Omega} [I^\varepsilon(i, j) - \varepsilon, I^\varepsilon(i - k, j - m)]. \quad (7)$$

Операции формирования поверхностей $U^\varepsilon(i, j)$ и $V^\varepsilon(i, j)$ являются морфологическими операциями дилатации и эрозии изображений.

Площадь $A(\varepsilon)$ сконструированного покрытия, образованного $U^\varepsilon(i, j)$ и $V^\varepsilon(i, j)$, есть объём покрытия, делённый на 2ε . Поэтому $A(\varepsilon)$ в пределах фрагмента S рассчитывается поточечным вычитанием нижней поверхности из верхней с суммированием по всему фрагменту и делением на 2ε :

$$A(\varepsilon) = \left(\sum_{i, j \in S} U^\varepsilon(i, j) - V^\varepsilon(i, j) \right) / 2\varepsilon. \quad (8)$$

Фрактальную размерность F определяют по наклону $\log A(\varepsilon)$ относительно $\log \varepsilon$ как взвешенную сумму отношений разности этих функций по всем ε :

$$F = \sum_{\varepsilon} C_\varepsilon d_\varepsilon / \sum_{\varepsilon} C_\varepsilon, \quad (9)$$

где $C_\varepsilon = (\log \varepsilon - \log(\varepsilon - 1)) / \log 2$; $d_\varepsilon = (\log A(\varepsilon) - \log A(\varepsilon - 1)) / (\log \varepsilon - \log(\varepsilon - 1))$.

Для гладких фигур (куб, клин и др.) со слабо изрезанной внутренней структурой фрактальная размерность будет близка к 2. Чем больше перепады и частота изменения интенсивности, тем больше фрактальная размерность будет приближаться к 3.

Экспериментальное сравнение методов. Экспериментальное исследование эффективности различных пространственных признаков применительно к задаче поиска объектов не природного происхождения выполнено на основе классификации фрагментов космических изображений земной поверхности высокого разрешения и сравнения полученных результатов с результатами экспертной оценки. Фрагменты, содержащие изображения зданий, были отнесены экспертом к классу «объект», а содержащие только природные объекты — к классу «фон». Примеры таких фрагментов изображений приведены на рис. 1, *a*, *b*.

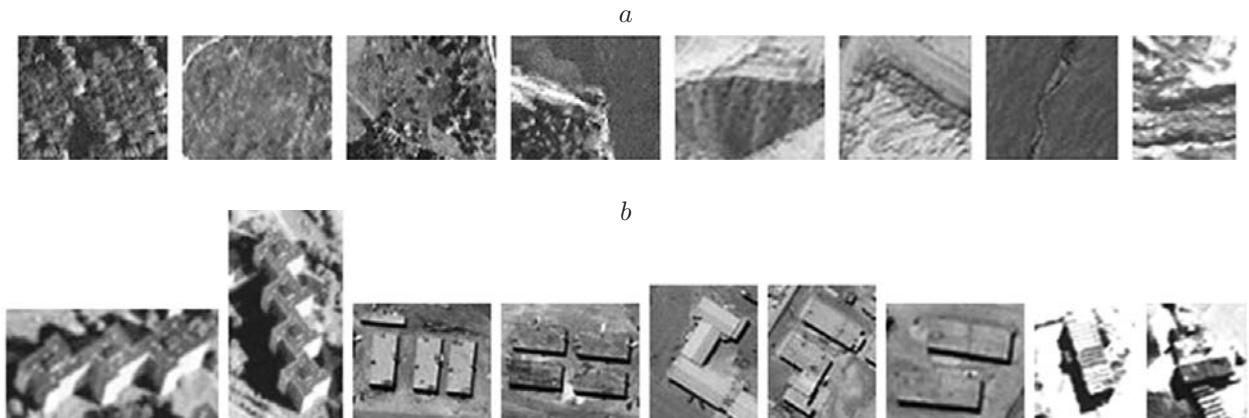


Рис. 1. Фрагменты изображений различных классов: *a* — класса фон, *b* — класса объект

Параметры	Используемый критерий											
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}
Среднее для фрагментов класса фон	3,10	45,0	11	56	12,9	59,8	12,9	36,7	2,39	1326	13931	26,6
Среднее для фрагментов класса объект	14,80	345	81	439	96,4	470	108	115,6	2,29	2779	11263	25,5
СКО класса фон	3,08	38,7	7,4	48	9,4	56,4	9,6	4,29	0,034	1034	9270	5,9
СКО класса объект	9,33	98,0	36,6	128	22,8	167	26,2	8,4	0,032	1324	3908	2,6
Нормализованное расстояние между классами	0,94	2,2	1,59	2,18	2,59	1,83	2,66	1,54	1,59	0,62	0,2	0,13

Результаты классификации, полученные с применением рассмотренных в работе пространственных признаков, приведены в таблице. В качестве количественных критериев при оценке антропогенности фрагментов использованы:

- среднее значение функции отклика угол (F_1);
- сумма локальных максимумов функции отклика угол (F_2);
- среднее значение локальных максимумов функции отклика угол (F_3);
- сумма значений лапласиана функции отклика угол во всех особых точках (F_4);
- среднее значение лапласиана функции отклика угол во всех особых точках (F_5);
- сумма значений лапласиана функции отклика угол в аномальных особых точках (F_6);
- среднее значение лапласиана функции отклика угол в аномальных особых точках (F_7);
- среднее значение лапласиана функции отклика край в аномальных особых точках (F_8);
- фрактальная размерность (F_9).

Отметим, что в качестве дискретного приближения лапласиана использована разность между средними значениями центральной и периферийной частей окрестности Ω . При этом, чтобы избежать выделения чрезмерного количества особенностей на изображении с высокочастотной пространственной структурой, введено ограничение на минимальное расстояние между найденными точками. В дальнейшем анализе учитываются только особенности с максимальным в пределах этого расстояния значением функции отклика.

По данным фрагментам также выполнен расчёт дисперсии яркости (F_{10}) и классических текстурных признаков энергии $\sum_{i,j} p_{i,j}^2$ (F_{11}) и энтропии $\sum_{i,j} p_{i,j} \log p_{i,j}$ (F_{12}), построенных на основе матриц совместной встречаемости $p_{i,j}$ (матриц смежности Харалика [10]). Для набора фрагментов классов фон и объект (природных и неприродных) рассчитано среднее значение и СКО вычисляемых критериев и оценено нормализованное расстояние между классами по соотношению

$$\left(\text{Среднее класса 1} - \text{среднее класса 2} \right) / \left(\text{СКО класса 1} + \text{СКО класса 2} \right).$$



Рис. 2. Обрабатываемое изображение

Несомненно, эффективность различных методов оценки антропогенности во многом определяется спецификой выбранных для обработки фрагментов. Однако можно выделить определённые закономерности. Так, для набора фрагментов космических изображений наилучшее разделение классов достигнуто при применении в качестве критерия среднего значения лапласиана функции отклика угол в аномальных особых точках. Как оказалось, простой расчёт среднего функции отклика угол немногим превосходит по эффективности расчёт дисперсии яркости. Следует также отметить, что текстурные признаки фрагментов различных классов оказались весьма схожими. Это связано с отсутствием на изображениях сильно выраженной однородной текстуры.

Продемонстрируем исследуемый подход на примере обработки изображения местности, полученного с аэрофотокамеры ТК-10. На рис. 2 и рис. 3 приведены исходное изображение и результат поиска объектов неприродного происхождения с использованием критерия на основе среднего значения лапласиана функции отклика угол в её локальных максимумах. На рис. 3 видно, что произошло достаточно уверенное выделение большей части строений, исключение составляют лишь некоторые отдельно стоящие здания.

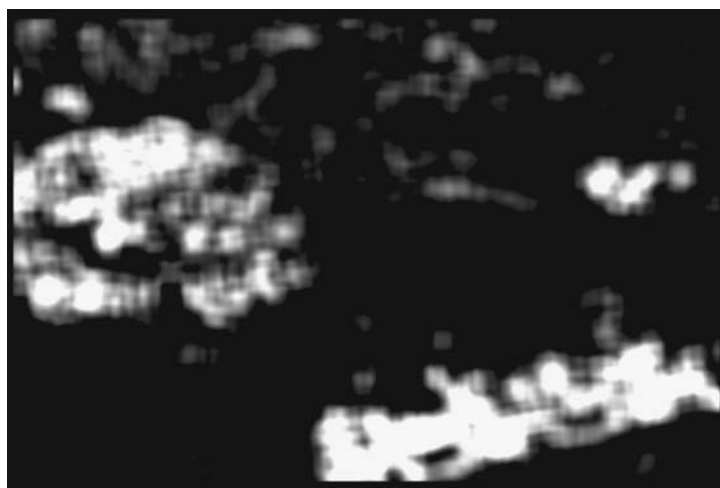


Рис. 3. Результат поиска объектов неприродного происхождения с использованием детектора углов

Заключение. В данной работе рассмотрены методы описания пространственной структуры космических изображений местности применительно к задаче поиска объектов неприродного происхождения, в частности зданий, на снимках земной поверхности высокого разрешения. В результате экспериментального исследования эффективности рассмотренных методов показано, что классификация типов фрагментов может быть выполнена как на основе вычисления фрактальной размерности, так и путём выделения и анализа точечных особенностей сцены. В последнем случае для оценки антропогенности фрагментов предложены критерии, количественно характеризующие число, а также степень особенности найденных точек. Лучшее разделение фрагментов классов фон и объект достигнуто с помощью критерия на основе среднего значения вторых производных функции отклика угол в её аномальных локальных максимумах. При пофрагментной обработке космических изображений данными методами формируются тематические слои, характеризующие антропогенность наблюдаемой территории. Предполагается развитие рассмотренного подхода для решения задач ландшафтного дешифрирования многоспектральных данных дистанционного зондирования Земли на основе совместного анализа тематических слоёв, построенных с использованием пространственных и спектральных признаков изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mayer H.** Automatic object extraction from aerial imagery — a survey focusing on buildings // Computer Vision and Image Understanding. 1999. **74**, N 2. P. 138–149.
2. **Hu J., You S., Neumann U.** Integrating LiDAR, aerial image and ground images for complete urban building modeling // Proc. of the 3rd Intern. Symp. on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT-2006). 14–16 June, 2006. Chapel Hill, North Carolina, USA. P. 184–191.
3. **Elaksher A., Bethel J.** Automatic generation of high quality 3D urban buildings from aerial images // Journ. Urban and Regional Information Systems Association. 2008. **20**, N 2. P. 5–14.
4. **Lin C., Nevatia R.** Building detection and description from a single intensity image // Computer Vision and Image Understanding. 1998. **72**, N 2. P. 101–121.
5. **Ding M.** Automated, 3D, airborne modeling of large scale urban environments // Master's Thesis. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences. University of California at Berkeley. Dec. 2007. 98 p.
URL: http://www-video.eecs.berkeley.edu/papers/ding/ms_thesis_2007.pdf
6. **Асмус В. В., Бучнев А. А., Пяткин В. П.** Контролируемая классификация данных дистанционного зондирования Земли // Автометрия. 2008. **44**, № 4. С. 60–67.
7. **Harris C., Stephens M.** A combined corner and edge detector // Proc. of The Fourth Alvey Vision Conference. Manchester, 1988. Vol. 15. P. 147–151.
8. **Mandelbrot B. B.** The fractal geometry of nature. N. Y.: W. H. Freeman and Company, 1982. 480 p.
9. **Peli T.** Multiscale fractal theory and object characterization // JOSA A. 1990. **7**, N 6. P. 1101–1112.
10. **Харалик Р. М.** Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. 1979. **67**, № 5. С. 98–118.

Поступила в редакцию 5 июля 2010 г.