

Идентификация природных объектов при обработке данных дистанционного зондирования Земли на основе контурного анализа

© А.Б. Домрачева, М.А. Басараб, А.Л. Медведева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Описывается возможность применения технологий «машинного зрения» к решению задач ориентации, навигации и управления беспилотными летательными аппаратами, а также проблема идентификации местоположения наблюдаемого объекта на основе сравнения его очертаний с эталонным изображением на цифровой карте местности. Решается задача выделения контуров объектов при обработке данных дистанционного зондирования Земли. Предлагается подход к выделению и сравнению очертаний объекта, основанный на контурном анализе. Описываются методологии выделения и сравнения контуров. Определяются показатели сходства контуров. Анализируются проблемы, возникающие при построении и сравнении выделенного и эталонного векторов, указываются пути их решения. Обосновывается выбор вычислительных методов для решения поставленных задач. Для замыкания контуров применяется метод картографической генерализации, основанный на теории фракталов, для упрощения контуров — метод де Берга, позволяющий получать контуры без самопересечений. Приводятся результаты апробации применения контурного анализа к фрагменту космоснимка, включающего, в том числе, природные объекты.

Ключевые слова: навигация, ориентация, управление, данные дистанционного зондирования Земли, картографическая генерализация, контурный анализ.

Введение. Современные технологии навигации, основанные на использовании GPS-навигаторов, с одной стороны, позволяют с достаточно высокой точностью решать задачи ориентации, навигации и управления беспилотных аппаратов, а с другой — оказываются крайне ресурсозатратными. Альтернативой традиционного подхода при решении перечисленных проблем выступают технологии «машинного зрения». Предполагается, что в состав беспилотного комплекса включают одну или нескольких камер (аналоговых или цифровых), цифровой сигнальный процессор или многопроцессорный компьютер, соответствующее программное обеспечение для предварительной обработки и трансформирования изображений, распознавания образов, а также оборудование ввода/вывода данных и каналы связи [1].

Перечисленное аппаратно-программное обеспечение называют «интеллектуальная камера». В ее функции входят:

- предварительная обработка изображений [2, 3], полученных в результате зондирования Земли;

- построение ортофотоплана [4] фрагмента местности, на которой осуществляется ориентация и навигация аппарата;
- выделение контура объекта (объектов) на текущем изображении (ортофотоплане);
- сопоставление выделенного контура с соответствующим векторным объектом (точечным, полилинейным, полигональным) эталонного изображения.

Под эталонным изображением будем иметь в виду фрагмент цифровой карты анализируемой территории в векторном формате с атрибутивной информацией, описывающей объекты на карте [1]. Атрибутивная информация уточняет тип объекта, кроме того, цифровая карта местности зарегистрирована в заданной системе координат, что позволяет рассчитывать координаты объекта и обеспечивать решение задач ориентации, управления и навигации беспилотного летательного аппарата.

Проблемой являются фрагменты карт, не содержащие объекты, произведенные человеком, в первую очередь, здания и сооружения. В этом случае приходится осуществлять ориентацию по незначительно меняющимся во времени природным объектам, например водоемам, лесам и т. п. Для идентификации фрагмента местности достаточно выделить три объекта (можно наложить условие: объекты максимальной площади).

Непосредственно для выделения контура объекта традиционно применяют методы контурного анализа, описанные в работе [5].

1. Контурный анализ. Контурный анализ позволяет кодировать объект его контуром (внешним очертанием), что сокращает ресурсы, необходимые для описания, хранения, сравнения и поиска объектов.

При обработке на основе контурного анализа используются монохромные изображения, как правило, черно-белые, т. е. изображение представляется в виде матрицы, где значения в ячейках соответствуют значениям градаций серого точки (пиксела) изображения. Вводится понятие *границных точек*, совокупность которых и называется *контуром*. Остальные точки подразделяются на точки, определяющие объект, и точки фона, на котором расположен объект. Можно трактовать точки объекта и фоновые как точки разных объектов. В обоих случаях задача построения контура сводится к идентификации границных точек.

Предполагается, что границные точки — это точки объекта, рядом с которыми находятся одна или несколько фоновых точек (или точек другого объекта). Принимается следующее условие идентификации граничной точки: фоновая точка должна соседствовать и находиться в одной строке либо в одном столбце матрицы с граничной, в противном случае предполагаемая граничная точка идентифицируется как точка объекта. Выделение контура представлено на рис. 1.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

a

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	X	X	0	0	0
0	X	X	1	1	X	0	0
0	0	X	1	1	1	X	0
0	0	X	1	1	1	X	0
0	0	0	X	1	X	0	0
0	0	0	0	X	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

б

Рис. 1. Иллюстрация выделения контура. Идентификация фоновых точек, обозначенных «0» и точек объекта, обозначенных «1» (*a*). Получение граничных точек (*б*)

Идентификация фоновых точек и точек объекта проводится следующим образом. Рассмотрим представление изображения как функции двух переменных $z = f(x, y)$ (рис. 2) с последующим ее описанием, например, посредством дискретного прямого и обратного преобразования Фурье.

Очевидно, что при значительном перепаде значений функции (предварительно определяется некоторое пороговое значение такого перепада) можно классифицировать точку как предположительно граничную и далее анализировать массив таких точек.

Контур кодируется как последовательность комплексных чисел $a + ib$, где a — смещение относительно предыдущей точки по оси X , а b — смещение по оси Y , что определяет контур как сигнал. При обработке подобных сигналов применяются традиционные подходы: спектральный и корреляционный анализ, фильтрация, дискретное преобразование Фурье. Вектор, определяющий контур, обозначается $N = (n_1, n_2, \dots, n_k)$, $n_j = a_j + ib_j$ — j -й элементарный вектор.

2. Сравнение выделенных контуров. Для сравнения полученного контура и контура объекта с эталонного изображения используют две величины: максимального значения взаимокорреляционной функции (ВКФ) f_{\max} и максимальной разности соответствующих значений автокорреляционной функции (АКФ) v_{\max}^1 и v_{\max}^2 векторов сравниваемых контуров. Обе величины безразмерные и изменяются от 0 до 1. Для одинаковых контуров первая из двух величин равна 1, вторая — 0.

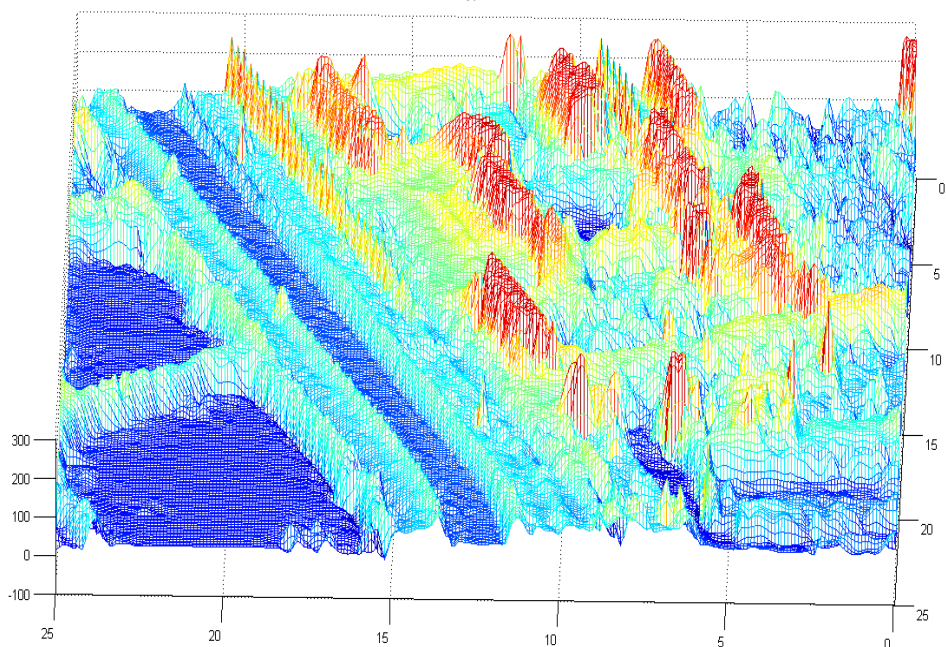
Вводится понятие *взаимокорреляционной функции* (ВКФ) двух контуров, которая определяется как нормированное скалярное произведение их векторов: $f(m) = (A, B^{(m)}) / (|A| \cdot |B|)$, где $B^{(m)}$ — контур, полученный из B путем циклического сдвига его элементарных векторов на m элементов, $|A| = (\sum |a_i|^2)^{1/2}$ — норма вектора A , $|B| = (\sum |b_i|^2)^{1/2}$ — норма вектора B . Максимальное значение

$$f_{\max} = \max \{f(m)\} \quad (1)$$

определяет степень схожести контуров.



a



б

Рис. 2. Описание изображения функцией двух переменных:
a — исходное изображение; *б* — поверхность, соответствующая изображению

В случае $A = B$ определяется автокорреляционная функция (АКФ) $v(m) = (A, A^{(m)}) / (|A| * |A|)$, где $A^{(m)}$ — контур, полученный из A путем циклического сдвига его элементарных векторов на m элементов, $|A| = (\sum |a_i|^2)^{1/2}$ — норма вектора A .

Тогда

$$v_{\max} = \max \{v(m)\}. \quad (2)$$

Посредством АКФ определяется симметрия контура, т. е. если контур симметричен, то аналогичную симметрию имеет его АКФ. Очевидно, что максимум разности между соответствующими значениями АКФ одинаковых контуров равен 0.

Недостатки подхода:

- получение в ряде случаев незамкнутых контуров объекта, при этом соответствующий эталонный объект в векторном формате является полигоном или замкнутой полилинией;

- сравнению подлежат контуры одинаковой длины.

Остановимся подробнее на первой проблеме. Поскольку выделяемый контур имеет разрывы, то вместо него анализируется набор полилиний, что исключает применение контурного анализа.

3. Замыкание контуров. Для замыкания контуров интерполяции можно воспользоваться традиционными методами интерполяции (интерполяция сплайнами, вейвлет-преобразования и т. п.). При этом следует отметить, что контуры природных объектов теряют естественные очертания. Предлагается следующий подход.

Совокупность методов обобщения географических изображений мелких масштабов относительно более крупных, называемая генерализацией объектов, может быть использована для выделения замкнутого контура. Формализованный отбор, сглаживание или фильтрация изображения в соответствии с заданными алгоритмами и формальными критериями называется автоматической или алгоритмической генерализацией. Алгоритмическая генерализация предполагает выбор подхода с учетом назначения, тематики, изученности объекта, технических условий получения самого изображения, особенностей алгоритма обработки изображения.

В решаемой задаче речь идет о выделении замкнутого контура объекта с неправильными очертаниями с целью сравнения контуров выделяемого объекта и объекта на эталонном изображении. В этом случае принципиальным является сохранение природного вида контура при замыкании.

Предлагается применять подход, основанный на теории фракталов, т. е. контур между узлами интерполяции строится подобным части базового контура, описывающего объект [6]. Могут быть использованы:

- триадные кривые Коха;
- фрактализация Даттона;
- построение «дракона» Хартера — Хейтуэя [6].

По результатам предварительных исследований рекомендуется применять триадные кривые Коха как наименее трудозатратный способ замыкания. Для моделирования естественного контура учтены случайные возмущения функции (рандомизированные кривые Коха). Результат замыкания контуров приведен на рис. 3, б. В ряде случаев [6] предпочтение отдается фрактализации Даттона, обеспечивающей естественный вид контура. В рамках решаемой задачи после замыкания контура проводится упрощение полученных полилиний с целью обеспечения заданной длины контура, в связи с чем выбор триадных кривых вполне обоснован.

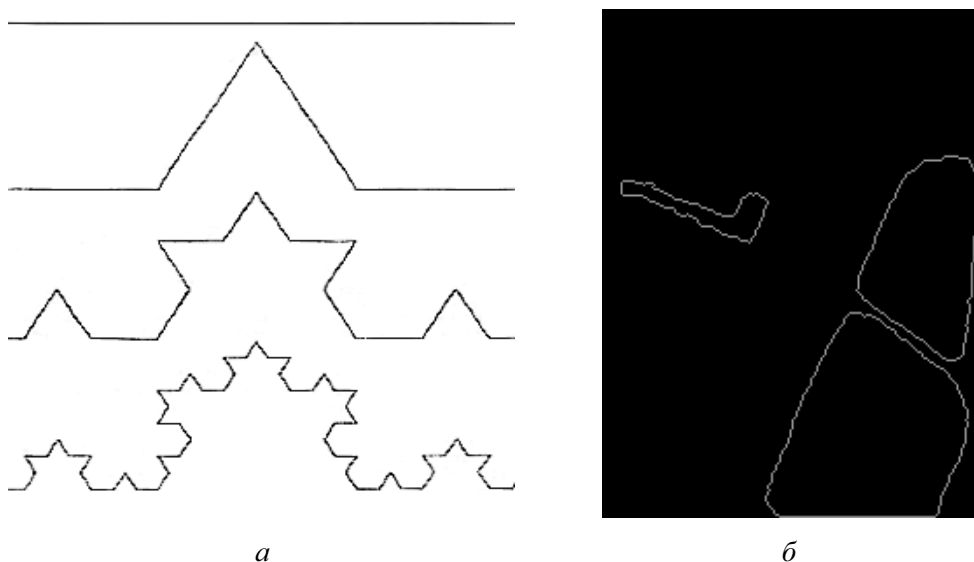


Рис. 3. Результаты замыкания контуров:
a — снежинка Коха; *б* — результат замыкания контуров

4. Построение контура заданной длины. Вторая проблема связана с появлением дополнительных точек в контуре, что делает невозможным сравнение контуров. Для удаления лишних точек и упрощения полилинии, описанной вектором, традиционно используют алгоритмы Рамера — Дугласа — Пекера и его модификации, дополнения (алгоритмы Мелкмана, Реуманна — Виткама, Опхейма, Ланга и пр.). Однако алгоритм Рамера — Дугласа — Пекера не является оптимальным с точки зрения количества полученных точек и быстродействия. Кроме того, необходимо сохранять топологию контура, чтобы исключить получение контура с самопересечением. Ме-

тод, позволяющий избежать указанных проблем, предложен М. де Бергом и реализован в [7], результаты упрощения контуров приведены на рис. 4, б, з.

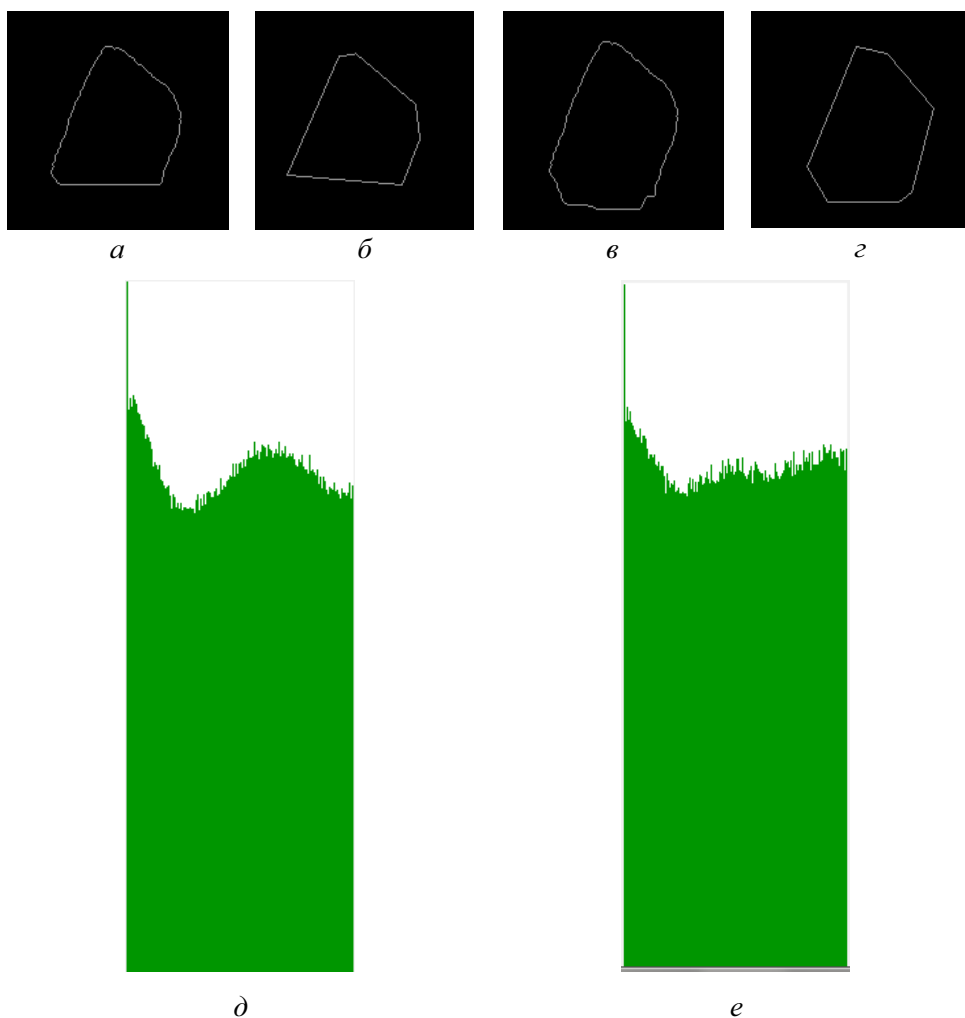


Рис. 4. Автокорреляционные функции для двух сравниваемых контуров: *a* — эталонное изображение; *б* — упрощенный контур эталонного изображения; *в* — текущий контур; *з* — упрощенный контур текущего изображения; *д* — АКФ эталонного изображения; *е* — АКФ текущего контура

5. Анализ результатов. Следует отметить, что применение контурного анализа к задачам идентификации объектов апробировано на ряде контуров тестового изображения, результаты приведены на рис. 4. Для анализа взяты два контура — объект, попавший на край фрагмента цифровой карты (рис. 4, *a*), и соответствующий ему выделяемый контур (рис. 4, *в*). Контур замкнут, а результаты упрощения обеспе-

чивают их одинаковую длину $k = 7$ (см. рис. 4, б, з). Приведены АКФ для сравниваемых контуров (см. рис. 4, б, з).

Оценки, полученные по формулам (1) и (2), составили $f_{\max} = 0,85$, а $v_{\max} = 0,13$, что говорит о неполном совпадении контуров, но и об их сходстве. При тестировании одинаковых контуров были получены результаты: $f_{\max} = 1$, $v_{\max} = 0$, а для значительно отличающихся контуров — $f_{\max} = 0$, $v_{\max} = 1$, что соответствует теоретическим предположениям. Приведенный на рис. 4 результат является выборочным. Всего на тестовом фрагменте проведено сравнение 18 контуров.

Заключение. Можно сделать вывод, что в целом возможность выделения и сравнения очертаний природных объектов на основе контурного анализа подтверждена.

Выявлены основные проблемы, возникающие при построении и сравнении выделенного и эталонного векторов, указаны пути их решения. Даны рекомендации по выбору вычислительных методов для реализации. В частности, для замыкания контуров применяются триадные кривые Коха, а для упрощения контуров — метод Марка де Берга, позволяющий получать контуры без самопересечений. Перспективой исследований можно считать анализ высоконагруженного изображения, предполагающего получение пересекающихся и наложенных контуров.

Предложенный в статье подход упрощает процессы векторизации и сравнения с эталоном текущего контура анализируемого объекта, снижая затраты ресурсов на идентификацию местоположения идентифицируемого объекта по сравнению с технологией, использующей GPS-навигаторы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Красильщиков М.Н., Серебряков Г.Г. *Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий*. Москва, Физматлит, 2005, 556 с.
- [2] Иванов Д.В., Карпов А.С., Кузьмин Е.П., Лемпицкий В.С., Хропов А.А. *Алгоритмические основы растровой машинной графики*. Москва, Интернет-Университет Информационных Технологий, Бином. Лаборатория знаний, 2007, 304 с.
- [3] Гонсалес Р., Вудс Р., Эддингс С. *Цифровая обработка изображений в среде Matlab*. Москва, Техносфера, 2006, 616 с.
- [4] Лобанов А.Н. *Фотограмметрия*. Москва, Недра, 1984, 552 с.
- [5] Фурман Я.А., Кревецкий А.В., Передреев А.К., Роженцов А.А., Хафизов Р.Г. *Введение в контурный анализ; приложение к обработке изображений и сигналов*. Москва, Физматлит, 2003, 456 с.
- [6] Берлянт А.М., Мусин О.Р., Собчук Т.В. *Картографическая генерализация и теория фракталов*. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт геоэкологии РАН, 1998, 136 с.

- [7] De Berg M., Van Kreveld M., Schirra S. A New Approach to Subdivision Simplification. *Scientific research*. 1995.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Домрачева А.Б., Басараб М.А., Медведева А.Л. Идентификация природных объектов при обработке данных дистанционного зондирования Земли на основе контурного анализа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/1093.html>

Домрачева Анна Борисовна родилась в 1970 г, кончила Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана в 1993 г. Доцент кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 работ в области цифровой обработки сигналов, математического моделирования, геоинформатики, информационной безопасности. e-mail: annd70@mail.ru

Басараб Михаил Алексеевич окончил Харьковский авиационный институт им. Н.Е. Жуковского в 1993 г.. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретическая информатика и компьютерные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 монографий и более 100 научных работ в области прикладной математики, информатики, цифровой обработки сигналов, радиофизики. e-mail: bmic@mail.ru

Медведева Александра Львовна родилась в 1989 г. Студентка кафедры «Теоретическая информатика и компьютерные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научные интересы: искусственный интеллект, компьютерное зрение. e-mail: keng_di_en@mail.ru