

# Полуавтоматические методы цифровой обработки аэрофотоснимков для выделения протяженных структур

С. Ю. ЖЕЛТОВ, С. Б. ПАПКОВ

Технологии создания трехмерной компьютерной модельной среды в сочетании с разработкой компьютерного стереоинтерфейса открывают перед пользователями новые возможности, позволяющие радикально изменить взаимодействие человека с компьютером. Они могут быть эффективно использованы во многих отраслях науки, промышленности, сельского хозяйства, при решении экономических, административных и политических проблем — везде, где необходим анализ пространственно распределенной информации. Проникновение трехмерного виртуального моделирования в геоинформационные технологии позволило создать так называемые пространственные модели местности [3], на основе которых можно проводить качественное обновление существующих геоинформационных систем.

При создании пространственных моделей местности основным источником исходной информации служат данные дистанционного зондирования: космические и аэрофотоснимки, радиолокационные и сканерные изображения земной поверхности. Для использования этих материалов необходимо по изображениям воссоздать описание реальной сцены, т. е. провести классификацию естественных и искусственных объектов разного рода и получить их характеристики, в частности геодезические координаты.

Создание алгоритмов интерпретации космических и аэроизображений традиционно относилось к тематике машинного зрения. В конце 60-х — начале 80-х годов бурное развитие технологий в этой области позволило предположить, что вскоре любое изображение можно будет обработать полностью автоматически с помощью небольшого числа универсальных алгоритмов. Однако со временем выяснилось, что неоднозначность получаемой по снимкам информации настолько велика, что автоматическая интерпретация объектов при существующем уровне развития машинного зрения невозможна. Вычислительная система может быстро локализовать или оконтурить большие области изображения, но не всегда способна провести надежную классификацию, особенно при перекрытиях между классами или при наличии помех. Существует ряд структур, трудно поддающихся классификации или обладающих большим количеством признаков. Кроме того, при различных условиях наблюдения количественные характеристики объектов могут меняться. Уровень алгоритмов понимания изображения пока не позволяет в ав-

томатическом режиме достоверно выделить, например, такую структуру с изменяющимся контекстом, как дорожная сеть. Известны работы, описывающие решение этой задачи в несколько этапов [1, 2, 4, 6], однако путь получения результата неоправданно сложен и требует больших временных затрат. Отсутствие алгоритмов, надежно решающих задачи идентификации различных естественных и искусственных объектов и структур и их локализации, способствует сохранению ведущей роли оператора-дешифровщика. Он выполняет наиболее творческую, интеллектуальную часть обработки, поскольку зрительный аппарат человека способен быстро и практически безошибочно идентифицировать различные типы объектов. Вместе с тем оператор-дешифровщик медленно и не всегда точно определяет положение областей на изображении.

Удачной комбинацией возможностей человека по быстрому распознаванию элементов сцены и машинных методов обработки является полуавтоматическое решение задачи векторизации космических и аэрофотоснимков: оператор помечает отдельные объекты, а ЭВМ по заданному начальному приближению выделяет их, т. е. определяет точные координаты (локализует). При этом оператор способен не только инициализировать работу алгоритма, но и следить за ней, помогая проходить наиболее трудные участки, разрешая возникающие неоднозначности, а по окончании выделения исправить оставшиеся неточности.

С точки зрения возможностей полуавтоматического дешифрирования объекты могут быть различной степени сложности. В данной статье рассматривается важный класс протяженных объектов. Под протяженными объектами будем понимать криволинейную (в общем случае) структуру с длиной, значительно превышающей ширину, которая, в свою очередь, может составлять от одного до десяти пикселей и меняться вдоль структуры. К таким объектам относятся береговые линии, дороги, магистральные нефте- и газопроводы, коммуникационные сооружения различного рода. Способ описания зависит от вида объекта и конечной цели выделения. С одной стороны, подобные структуры в большинстве случаев не могут быть выделены полностью автоматически, поскольку их характеристики часто существенно меняются в пределах снимка, что затрудняет использование корреляционных или учитывающих текстурные признаки методов [4—6]. С другой стороны, такие объекты сложны для ручной локализации, так как требуют

значительного количества точек для точного описания. Таким образом, протяженные объекты представляют собой отдельный класс, применительно к которому возможно успешное применение полуавтоматических методов. Ниже приводится описание алгоритма полуавтоматического выделения на аэрофотоснимках дорожной сети.

Дороги как протяженные объекты обладают разного рода топологическими особенностями, сложными для формализованного описания: узлами, разветвлениями и т. д. Их изображения обычно характеризуются значительным ступенчатым перепадом яркости по перпендикуляру к направлению в данной точке. Однако контраст с обочинами может нарушаться на перекрестках или мостах. Дорогу могут затенять путепроводы, виадуки, здания, деревья; возможно наличие автомобилей, дорожной разметки, следов шин. К тому же встречные полосы бывают разделены барьером. В результате подобные структуры оказываются достаточно сложными для формализации и требуют учета возможно большего объема априорной информации.

Задача выделения дорог на фотоизображениях решалась для представления их в трехмерной цифровой модели местности (ЦММ), создаваемой по стереопаре аэрофотоснимков. Был применен полуавтоматический метод, основанный на динамическом программировании. В качестве радиометрических признаков объекта на снимке использовались одинаковая (в пределах допуска) яркость пикселей изображения полотна дороги и существенное отличие ее от яркости прилегающих элементов. Геометрически изображение дороги представляет собой сравнительно узкую полосу с постоянной или медленно меняющейся шириной; для хорошей локальной аппроксимации кривой, соответствующей осевой линии дороги, достаточно полином не выше третьего порядка. Помещенная в ЦММ дорога должна представлять собой список связанных упорядоченных точек своих краев, так как именно они определяют визуальное восприятие протяженной полосы.

Процесс выделения осевой линии дороги инициализируется ручной расстановкой на изображении дорожной сети маркеров (так называемых узловых или «зерновых» точек). Их положение и частота размещения зависят от формы дороги и степени ее просматриваемости на снимке: чем сложнее ситуация, тем ближе друг к другу узловые точки, причем размещаются они вблизи резких изменений направления и яркости. Из изображения последовательно вырезаются фрагменты так, чтобы очередной маркер оказывался в левом верхнем углу, а следующий — в правом нижнем. Участок дороги каждого последующего фрагмента является продолжением выделенного раньше.

Методы динамического программирования требуют знания стоимости или работы перехода из одной точки изображения в другую, что позволяет определить дорогу как путь наименьшей стоимости между противоположными углами фрагмента. При вычислении поля функции стоимости за основу

берутся радиометрические характеристики дороги. При движении вдоль осевой линии дороги нужно набрать как можно меньше перепадов яркости, а при прослеживании ее краев, наоборот, желательно пройти через пиксели, лежащие на границе ступенчатого перепада яркости. Из этого следует, что основополагающим фактором для рассчитываемой функции стоимости может служить поле модуля градиента изображения (поле градиента). Элемент поля градиента для каждого фрагмента размером  $(M+1)$  строк на  $(N+1)$  столбцов вычисляется с помощью оператора Собеля

$$g_{i,j} = \sqrt{g_{i,j}^2 + g_{i,j}^2}$$

$$(i = 1, \dots, M-1; j = 1, \dots, N-1),$$

где

$$g_{i,j} = b_{i-1,j+1} + 2b_{i,j} + b_{i+1,j+1} - (b_{i-1,j-1} + 2b_{i,j-1} + b_{i+1,j-1});$$

$$g_{i,j} = b_{i,j-1} + 2b_{i,j} + b_{i,j+1} - (b_{i-1,j-1} + 2b_{i-1,j} + b_{i-1,j+1});$$

$b_{i,j}$  — яркость пикселя в  $i$ -й строке и  $j$ -м столбце фрагмента.

Функция стоимости перехода для элементов рассматриваемого фрагмента определяется рекуррентно

$$d_{i,j} = \min \begin{cases} d_{i,j-1} + \frac{1}{2}(g_{i,j} + g_{i,j-1}); \\ d_{i-1,j} + \frac{1}{2}(g_{i,j} + g_{i-1,j}); \\ d_{i-1,j-1} + \frac{\sqrt{2}}{2}(g_{i,j} + g_{i-1,j-1}). \end{cases}$$

Т. е. из трех возможных способов попадания в данный пиксел (слева, сверху или слева сверху) выбирается тот, стоимость которого минимальна.

Следующий этап состоит в выборе оптимального пути в обратную сторону, т. е. снизу справа вверх влево. Существуют три возможных направления движения (влево, вверх или влево вверх), из них выбирается то, на котором значение функции стоимости перехода для очередного элемента меньше. Здесь возможны неоднозначности, связанные с возможным равенством двух или всех трех величин. В качестве количественного критерия разрешения этих неоднозначностей используются разности направлений из данного пикселя на начальный ( $\arctg((i-1)/(j-1))$ ) и на три очередных ( $\pi/2, \pi/4, 0$ ). При условии равенства значений функций стоимости выбирается тот пиксел, где эта разность минимальна. Применение подобного критерия обусловлено тем, что при используемом методе выделения координаты изображения дороги

изменяются монотонно. Поэтому в большинстве случаев направление движения при обратном прослеживании должно быть близко к направлению на начальный пиксел в левом верхнем углу фрагмента.

Следующим шагом является определение краевых точек. В каждой из точек центральной линии строится перпендикуляр, представляющий собой одномерный массив яркостей. Элементы массива, имеющие наибольший положительный или отрицательный перепад по отношению к соседним, соответствуют точкам пересечения перпендикуляра с правым и левым краями дороги. Таким образом определяются координаты точек края, задающие ширину дороги в данном месте. Затем все крайние точки пересчитываются так, чтобы дорога на выделенном участке имела среднюю ширину.

Возможны ситуации, когда дорога имеет резко очерченные обочины, но затененную центральную часть, или необходимо проследить не усредненную, а точную линию края. В подобных случаях край выделяется непосредственно, а затем находятся точки осевой линии. Прослеживание края проводится описанным ранее методом с использованием динамического программирования с единственной разницей — расчет пути наименьшей стоимости ведется по преобразованному полю градиента изображения  $g_{ij}^{edge} = 255 - g_{ij}$ , где 255 — максимальная яркость;  $g_{ij}^{edge}$  — элемент преобразованного поля градиента.

При наличии стереопары аэрофотоснимков можно получить трехмерные координаты дороги, т. е. учесть рельеф. Для этого дорогу выделяют на левом изображении, как описано выше, а затем на правом ищут соответственные точки. Это может выполняться двумя способами.

Знание элементов внешнего и внутреннего ориентирования снимков позволяет для произвольной точки левого изображения определить область поиска соответственной точки на правом: она лежит на эпиполярной линии в пределах максимального изменения параллаксов данной стереопары. Положение соответственной точки в указанной области определяется с помощью корреляционной привязки. Надежные результаты получаются в случае, когда угол между линиями дороги и эпиполярной существенно отличается от нуля ( $10^\circ$  и более), а дорога имеет резко обозначенные обочины.

Альтернативная возможность определения трехмерных геодезических координат дороги заключается в использовании карты параллаксов, которая создается перед выделением фрагмента или считывается из файла. Этот метод состоит в следующем.

Карта параллаксов строится на регулярной сетке левого снимка с шагом  $S_x$  по оси  $x$  и шагом  $S_y$  по оси  $y$  (в пикселах). Для каждой точки дороги (осевая линия и края) определяются четыре ближайших узла сетки. С помощью билинейной интерполяции вычисляются приближенные значения горизонтального и вертикального параллаксов в данной точке дороги

$$D_{xy} = \frac{1}{S_x S_y} \sum D_i (S_x - dx_i) (S_y - dy_i),$$

где  $D_i$  — значение параллакса в  $i$ -м узле регулярной сетки;  $dx_i$  и  $dy_i$  — расстояния в пикселах от интересующей нас точки до  $i$ -го узла по осям  $x$  и  $y$  соответственно. Суммирование ведется по четырем ближайшим узлам. Найденные значения параллаксов прибавляются к координатам точки на левом снимке, что задает соответственную точку справа. Затем восстанавливаются трехмерные геодезические координаты точки изображения.

По сравнению с корреляционным этот метод имеет ряд преимуществ. Во-первых, он дает более надежные результаты, не нуждающиеся в дальнейшей модификации (дорогу не придется «подгонять» под рельеф). Во-вторых, трехмерная сеть, описывающая дорогу, получается более гладкой: отсутствуют резкие скачки по оси  $z$  между соседними точками даже в случаях, когда рельеф в целом недостаточно плоский. Это объясняется тем, что изображение дороги имеет характерную структуру и вблизи нее коррелятор надежно определяет соответственные точки при построении карты параллаксов. Использование готовой карты параллаксов значительно повышает скорость определения координат.

Описанные способы выделения дорог и восстановления их трехмерных геодезических координат были применены при построении ЦММ по стереопаре аэрофотоснимков, полученных вблизи Шелково Московской обл. Исходные фрагменты правого и левого снимков масштаба 1 : 14 000, содержащие изображения дорог, приведены на рисунке, а, б. Как показал опыт, при выделении осевой линии дороги или ее края не всегда удается получить достаточно гладкую и точно прослеживающую все особенности изображенной кривую. В этом случае выполнялось редактирование формы кривой: либо переносом отдельных точек (для выбранных точек указывалось новое положение, более оптимальное с точки зрения оператора), либо с использованием геометрических характеристик осевой линии дороги. В последнем случае в обе стороны от отмечаемой оператором точки выбиралось по  $N$  точек, через которые строилась наилучшая, с точки зрения метода наименьших квадратов, задаваемая параметрически параболой 2-го или 3-го порядка (по выбору оператора). После этого координаты точек пересчитывались. Результаты выделения на левом снимке и соответственные точки на правом, найденные с помощью корреляционной привязки, показаны на рисунке, в, г. Отредактированное оператором изображение смещенных точек осевой линии на правом снимке приведено на рисунке, д. Рисунок, е содержит результаты поиска дороги на правом снимке по точкам левого (см. рисунок, в) и карте параллаксов данного фрагмента; как видно, дальнейших исправлений не требуется. Показателен тот факт, что получение геодезических координат 12 дорог (в общей сложности более 5600 точек) заняло менее получаса.

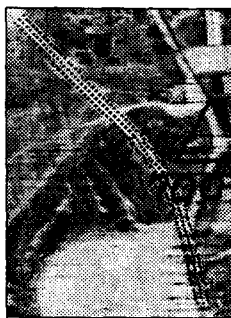
*a*



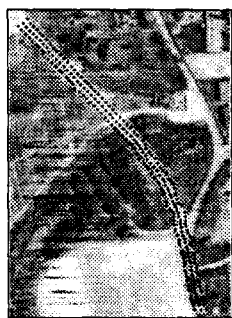
*б*



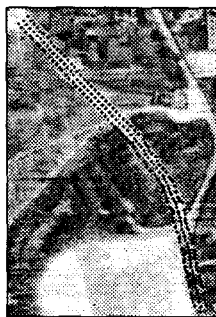
*в*



*г*



*д*



*е*



1. Avid Z., Karnine P. D. Road Finding for Road — Network Extraction // IEEE Proceedings: The Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. — Ann. Arbor, Michigan, June 5—9, 1988. — P. 814—819.
2. Bajcsy R., Tavakoli M. Computer Recognition of Roads from Satellite Pictures // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. — 1976. — N 9, September. — P. 623—636.
3. Gruber M. Requirements for Photorealistic 3-D Modeling of Urban Areas // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. — Vien-

na. — 1996. — Vol. XXXI. Pt. B3. Comiss. III. — P. 257.

4. McKeown D. M., Denlinger J. L. Cooperative Methods for Road Tracking in Aerial Imagery // IEEE Proceedings: The Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. — Ann. Arbor, Michigan, June 5—9, 1988. — P. 662—672.
5. Model — Based Road Extraction from Images / C. Steger, C. Glock, W. Eckstein et al. // Automatic Extraction of Man — Made Objects from Aerial and Space Images. — Monte-Verita: Birkhauser Verlag, 1995. — P. 275—284.
6. Vosselman G., De Knecht J. Road Tracing by Profile Matching and Kalman Filtering // Ibid. — P. 275—284.



## КАРТОГРАФИЯ

528.9(048):912.44

© Н. Д. Жданов, В. В. Свешников, А. А. Лютый, 1997

### Национальный атлас России

Н. Д. ЖДАНОВ, В. В. СВЕШНИКОВ, А. А. ЛЮТЫЙ

Национальный атлас России задуман как фундаментальное комплексное картографическое произведение, призванное дать целостное представление о природе, населении, хозяйстве, экологии, истории и культуре нашей страны, как общенациональный свод научно обработанной и взаимно согласованной пространственно-временной информации, используемой во всех отраслях экономики, управлении, науке, образовании и обороне страны. Атлас будет выполнять роль культурного посланца России за рубежом, а также посредника в развитии экономических и культурных связей с другими странами [1, 2].

Национальный атлас — особый вид картографического произведения, в котором объектом картографирования выступает государство во всех аспектах его существования. Концентрируя многообразную информацию о всей стране и ее отдельных частях, он представляет ее в систематизированной, организованной, сопоставимой, хорошо обозримой форме и выполняет важные функции банка данных, инструмента научных исследований, средства получения нового

знания, творческого поиска практических разработок, управления, передачи информации новым поколениям людей, источника формирования национального и государственно ориентированного сознания граждан.

В этом качестве национальный атлас России будет отвечать требованиям Международного географического союза к такого рода картографическим произведениям. Он отразит новейшие достижения науки и техники, а по оригинальности, объему, детальности и средствам отображения информации должен превзойти все атласы, изданные в нашей стране.

Создание национального атласа России требует особого внимания и поддержки со стороны государства, так как связано с большим объемом и сроком выполнения картографических работ (порядка 10 лет). К тому же Россия — одна из немногих стран, не имеющих своих национальных атласов, и реализация этого проекта позволит ей поднять свой престиж великой державы.

Проект концепции национального атласа России, разработанный ведущими картографами страны, — документ, в ко-