

С. Ю. МИРОШНИЧЕНКО, В. С. ТИТОВ, А. А. ЯЩЕНКО

## МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ

Разработан метод локализации протяженных геопространственных объектов, позволяющий повысить точность автоматизированного формирования тематических слоев электронных карт геоинформационных систем на основе космических снимков. Повышение точности достигается за счет построения фильтра с конечной импульсной характеристикой, учитывающего характерные признаки объектов дорожной сети.

**Ключевые слова:** геоинформационные системы, космические снимки, объекты дорожной сети, КИХ-фильтр.

Для актуализации дорожных карт и управления городским транспортом в условиях быстрого увеличения транспортных потоков и активного развития сети автомобильных дорог в настоящее время широко используются картографические данные, полученные путем анализа и дешифрировки космических снимков.

Выделение на космических снимках участков дорожной сети, относящихся к классу протяженных геопространственных объектов, является нетривиальной задачей, поскольку их геометрические и яркостные характеристики могут различаться в пределах одного изображения. Распознавание объектов дорожной сети затруднено их перекрытием другими объектами, такими как растительность, здания, тени, атмосферные явления (туман, облачность), транспортные средства. Приведенные факторы значительно усложняют локализацию объектов дорожной сети и построение их векторных представлений как в ручном, так и в автоматическом режиме. Более того, методы выделения контуров и построения кластеров [1], применяемые при автоматической сегментации космических снимков на однородные области, характеризуются невысокой точностью и эффективностью [2].

Повышение точности автоматического выделения заданной области (целевого слоя) дорожной сети на космических снимках достигается путем их сопоставления с векторными топографическими картами местности [2], что возможно лишь при наличии географической привязки, помимо того, возникают ошибки дешифрировки, обусловленные погрешностью привязки и инструментальными погрешностями векторизации.

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является повышение точности автоматического выделения объектов дорожной сети на космических снимках. Для ее решения разработан метод выделения протяженных геопространственных объектов на космических снимках, основанный на поиске областей изображения, соответствующих пространственным характеристикам объектов целевого слоя [3] с учетом их основных признаков и свойств.

К основным признакам объектов дорожной сети относятся:

- 1) значительная протяженность на прямолинейном участке;
- 2) одинаковая ширина участка;
- 3) равномерное распределение яркости в пределах объекта;
- 4) четкие контуры дорожного полотна.

Для локализации объектов дорожной сети с учетом описанных свойств разработан фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) [4]. Выбор КИХ-фильтра обусловлен высокой производительностью и простотой реализации. КИХ-фильтр предназначен

для аппроксимации „идеального“ импульсного отклика, определяющего принадлежность точек космического снимка к участкам дорожной сети, с применением указанных выше признаков.

Характерные признаки дорожной сети математически описываются следующим образом. Исходное изображение  $I$  представлено как дискретное двумерное поле яркости  $f(\cdot)$  [1]:

$$I = f(x, y), \quad x = \overline{1, K}, \quad y = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $x, y$  — координаты отсчета яркости вдоль осей абсцисс и ординат соответственно;  $K$  — ширина,  $N$  — высота изображения  $I$ .

В пределах поля изображения  $I$  прямолинейный участок объекта дорожной сети представляет собой некоторую прямоугольную область  $d(a, b, \alpha)$ , где  $b$  — ширина,  $a$  — длина,  $\alpha$  — угол поворота дорожного полотна относительно его центра.

Для области  $d(a, b, \alpha)$  должны выполняться следующие условия:

1) значительная протяженность, т.е. ширина области  $d(a, b, \alpha)$  много меньше ее длины

$$b \ll a; \quad (2)$$

2) одинаковая ширина на всем протяжении

$$b = \text{const}; \quad (3)$$

3) равномерное распределение функции яркости в области объекта дорожной сети, т.е. значение среднего квадратического отклонения (СКО) яркости  $\sigma[f(x, y)]$  точек изображения  $I$ , принадлежащих области  $d(a, b, \alpha)$ , стремится к нулю

$$\sigma[f(x, y)] \rightarrow 0, \quad (x, y) \in d(a, b, \alpha); \quad (4)$$

4) четкие контуры полотна объекта дорожной сети, т.е. модуль градиента функции яркости  $\nabla f$  на границах области  $d(a, b, \alpha)$  выше среднего значения модуля градиента  $\nabla \tilde{f}$  внутри области  $d(a, b, \alpha)$

$$\nabla f_{d(a, b, \alpha)}(x, y) > \nabla \tilde{f}(x, y). \quad (5)$$

Таким образом, область  $d(a, b, \alpha)$  считается принадлежащей дорожной сети, если выполнены все необходимые условия (2)—(5). При поиске областей определяется набор значений функции отклика КИХ-фильтра, полученный путем вращения окна КИХ-фильтра относительно исследуемой точки изображения, взятой в качестве начала координат.

Значение угла поворота окна фильтра вычисляется по формуле

$$\varphi = \frac{180^\circ}{N_\varphi}, \quad (6)$$

где  $N_\varphi$  — параметр, определяющий число секторов, на которое разбивается диапазон значений угла поворота окна фильтра  $[0^\circ; 180^\circ)$ .

Для нахождения значения яркости точек, принадлежащих окну фильтра с заданным углом поворота  $\varphi$ , необходимо определить их координаты в узлах дискретной сетки исходного космического изображения. Координаты рассчитываются путем объединения уравнения прямой, которую образует окно фильтра в выбранной системе координат, и уравнения окружности, описываемой окном фильтра при вращении относительно исследуемой точки

$$\left. \begin{aligned} y_h &= \pm \frac{kh}{\sqrt{(1+k^2)}}, \\ x_h &= \pm \frac{h}{\sqrt{(1+k^2)}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $(x_h, y_h)$  — координаты  $h$ -й точки, принадлежащей окну фильтра;  $k$  — угловой коэффициент прямой, которую образует окно фильтра в выбранной системе координат; индекс  $h$  определяет положение точки в окне фильтра относительно исследуемой точки.

В случае, если в результате с помощью уравнений (7) получены вещественные значения координат, яркость точек окна фильтра вычисляется следующим образом. Для точки с координатами  $(x_h, y_h)$  в узлах дискретной сетки изображения определяются четыре ближайшие точки  $h_j$  с координатами  $(x_{hj}, y_{hj})$ , где  $j$  — индекс смежного узла сетки (рис. 1). Далее вычисляются расстояния вдоль осей абсцисс и ординат  $\Delta x_j$  и  $\Delta y_j$  от смежных узлов дискретной сетки до точки  $h$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_j &= |x_h - x_{hj}|, \\ \Delta y_j &= |y_h - y_{hj}|, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

а также значения весовых коэффициентов  $\omega_{hj}(x_{hj}, y_{hj})$  узловых точек

$$\omega_{hj}(x_{hj}, y_{hj}) = (1 - \Delta x_j)(1 - \Delta y_j). \quad (9)$$

Значение яркости  $h$ -й точки окна фильтра определяется как

$$f_h(x_h, y_h) = \sum_j \sum_j \omega_{hj}(x_{hj}, y_{hj}) f_j(x_j, y_j), \quad (10)$$

где  $f_j(x_j, y_j)$  — значение яркости  $h_j$ -го узла дискретной сетки.

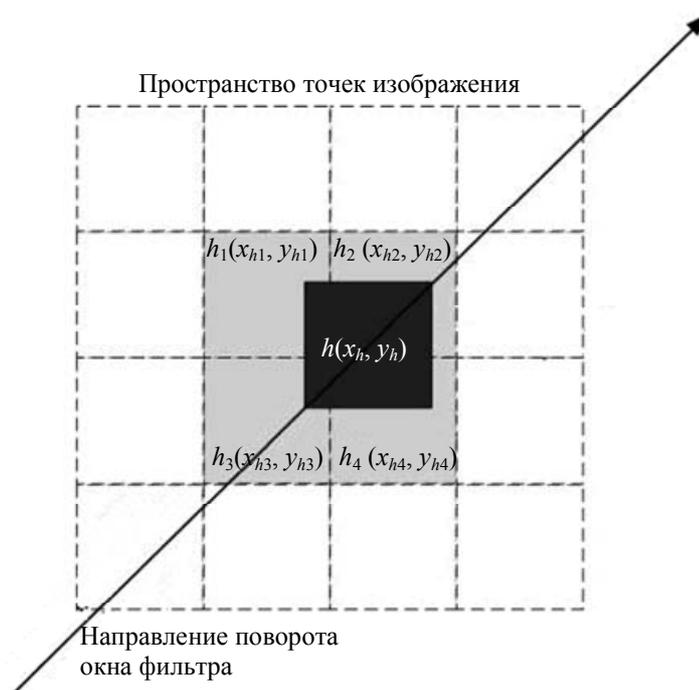


Рис. 1

Так как окно фильтра симметрично относительно исследуемой точки, отдельно рассматриваются первая половина окна (рис. 2), к которой относятся точки с положительным смещением координат относительно оси ординат, и вторая половина, к которой относятся точки с отрицательным смещением. Для первой и второй половины окна фильтра рассчитываются значения СКО яркости точек  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответственно [5].

Среди группы рассчитанных для различных углов поворота окна КИХ-фильтра  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  определяются минимальные значения  $\sigma_{1\min}$  и  $\sigma_{2\min}$  и соответствующие им углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Согласно (4), для проверки принадлежности исследуемой точки участку дорожной сети необходимо выполнение следующей совокупности условий:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1\min} < T_1, \\ \sigma_{2\min} < T_1, \\ \sigma_{1\min} \rightarrow 0, \\ \sigma_{2\min} \rightarrow 0, \\ |\sigma_{1\min} - \sigma_{2\min}| \rightarrow 0, \\ \varphi_1 \approx \varphi_2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $T_1$  — эмпирически выбираемое пороговое значение, определяющее максимально допустимые значения  $\sigma_{1\min}$  и  $\sigma_{2\min}$ , при которых точка считается принадлежащей участку дорожной сети.

Учитывая (5), сформулируем дополнительное условие

$$\left. \begin{aligned} |\bar{\sigma}_1 - \sigma_{1\min}| > T_2, \\ |\bar{\sigma}_2 - \sigma_{2\min}| > T_2, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $\bar{\sigma}_1$  — средняя величина СКО для группы вычисленных значений  $\sigma_1$  различных углов поворота окна фильтра относительно исследуемой точки,  $\bar{\sigma}_2$  — средняя величина СКО для группы вычисленных значений  $\sigma_2$ ,  $T_2$  — эмпирически устанавливаемое пороговое значение.

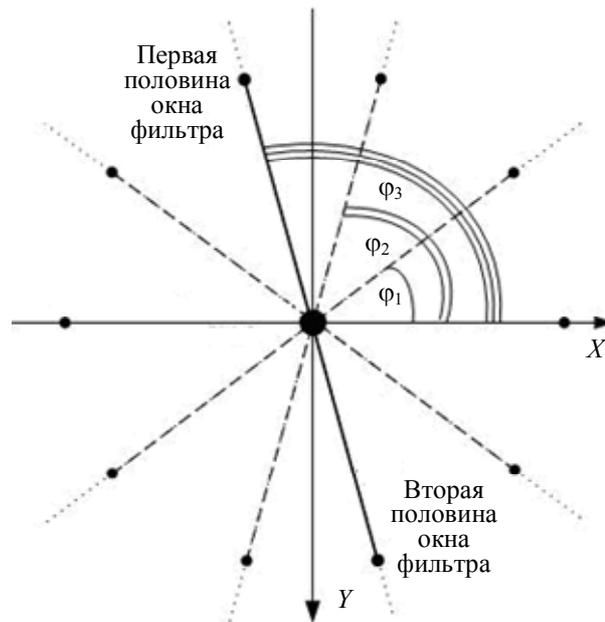


Рис. 2

Метод выделения протяженных геопространственных объектов на аэрокосмических изображениях заключается в поэлементном обходе изображения в порядке возрастания координат. Текущая точка изображения принимается за начало координат и проверяется на принадлежность объекту целевого слоя, с этой целью в точке определяется значение отклика КИХ-фильтра для каждого из углов его поворота (6). С учетом условий (2) и (3) в качестве окна КИХ-фильтра выбран прямолинейный отрезок, ширина которого равна одной точке растра, длина  $L$  устанавливается согласно масштабу аэрокосмического изображения [6, 7]. Количество положений окна фильтра относительно исследуемой точки равно значению параметра  $N_\varphi$ . Схема поворота окна КИХ-фильтра относительно исследуемой точки представлена на рис. 2.

Таким образом, для текущего положения окна фильтра определяется величина  $\varphi$ , после чего для каждой точки окна фильтра по формуле (10) вычисляется значение яркости. Если  $\varphi = 90^\circ$ , формулу (10) применить невозможно, так как тангенс угла девяносто градусов не определен. В этом случае окно фильтра параллельно оси ординат и значения яркости точек в пределах окна совпадают с узлами дискретной сетки. Для каждого угла поворота фильтра относительно исследуемой точки вычисляются значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  для первой и второй половины его окна соответственно. Также для обеих групп значений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  определяются  $\sigma_{1\min}$  и  $\sigma_{2\min}$ , соответствующие им величины  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , а также  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_2$ . Если для исследуемой точки одновременно выполняются условия (11) и (12), значение функции отклика КИХ-фильтра считается положительным.

Условие (11) позволяет определить объекты с равномерным распределением функции яркости. Условие (12) необходимо для исключения площадных объектов с одинаковым уровнем яркости (водоемы, поля, большие здания), не принадлежащих целевому слою, но удовлетворяющих условию (11). Параметры  $T_1$  и  $T_2$  выбираются с учетом яркости и контрастности исходного изображения.

В случае положительного отклика функции КИХ-фильтра текущая точка считается принадлежащей объекту целевого слоя. Для нее сохраняется минимальное значение СКО  $\sigma'_{\min}$ , равное меньшему из значений  $\sigma_{1\min}$  и  $\sigma_{2\min}$ , и соответствующее ему значение угла поворота  $\varphi'$ . Значения  $\sigma'_{\min}$  для всех точек изображения с положительным откликом КИХ-фильтра образуют карту минимальных СКО, величины углов поворота  $\varphi'$  — карту углов поворота окна фильтра.

Построение объектов дорожной сети осуществляется с помощью полученной карты углов поворота окна фильтра с использованием метода дополнения объектов по направлению угла поворота. Для каждой точки карты углов поворота окна фильтра в направлении сохраненного для нее значения угла происходит поиск точек на исходном изображении с яркостью, близкой к яркости текущей точки. Если такие точки найдены, они добавляются на карту углов поворота окна фильтра, уточняя участки дорожной сети.

На рис. 3, *а* представлен исследуемый фрагмент изображения космического снимка размером  $400 \times 400$  точек; *б* — карта минимальных значений СКО; *в* — результат применения метода дополнения объектов по направлению угла поворота. Для вычислений использованы следующие значения параметров:  $L=10$ ,  $N_\varphi=20$ ,  $T_1=4$ ,  $T_2=4$ .

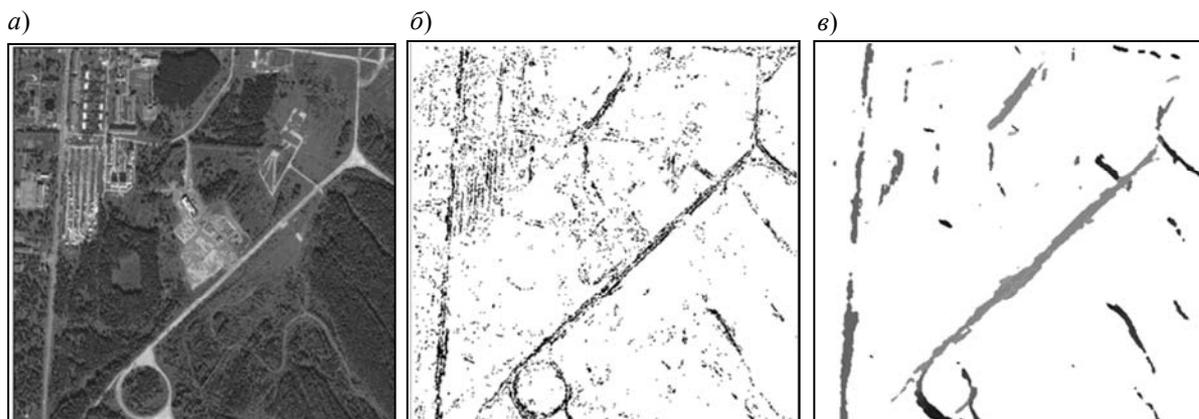


Рис. 3

На рис. 4, *а* представлен исследуемый фрагмент изображения аэрокосмического снимка размером  $1580 \times 870$  точек; *б* — карта значений углов поворота окна фильтра; *в* — результат применения метода дополнения объектов по направлению угла поворота. Для вычислений использованы следующие значения параметров:  $L=40$ ,  $N_\varphi=20$ ,  $T_1=5$ ,  $T_2=2$ . Данное изображение

представляет собой фрагмент космического снимка города и характеризуется наличием большого количества зданий, а также присутствием на дорогах транспортных средств.

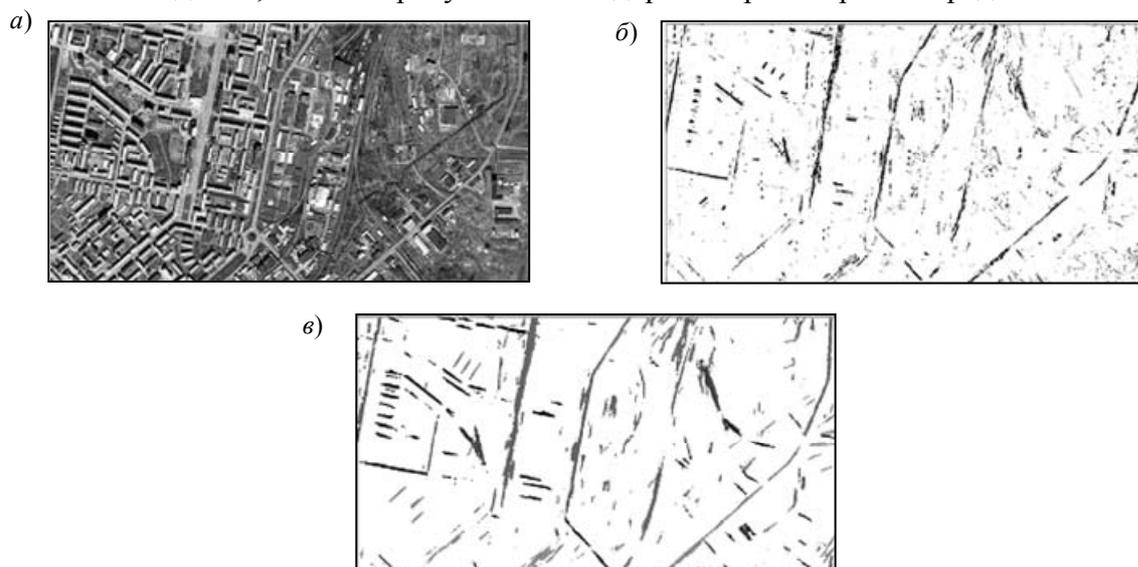


Рис. 4

Таким образом, предложенный метод позволяет выделять протяженные геопространственные объекты на космических снимках, он обеспечивает автоматическую локализацию прямолинейных участков объектов дорожной сети. В дальнейшем метод будет использован для построения векторных представлений объектов целевого слоя дорожной сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: Учеб. пособие. М.: Аспект Пресс, 2004. 184 с.
3. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учеб. пособие. М.: Логос, 2001. 264 с.
4. Емельянов С. Г., Кудряшов Е. А., Мирошниченко С. Ю., Титов В. С. Методы и системы цифровой обработки аэрокосмических изображений. Новосибирск: Наука, 2012. 175 с.
5. Кочетков П. А. Краткий курс теории вероятностей и математической статистики: Учеб. пособие. М.: МГИУ, 1999. 51 с.
6. Яценко А. А. Алгоритм локализации объектов дорожной сети // „Распознавание — 2012“: Сб. матер. X Междунар. науч.-техн. конф. Курск: ЮЗГУ, 2012. С. 278.
7. Мирошниченко С. Ю., Титов В. С. Метод локализации теней геопространственных объектов на цифровых аэрокосмических изображениях // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 9. С. 7—13.

#### Сведения об авторах

- Сергей Юрьевич Мирошниченко** — канд. техн. наук; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск; старший преподаватель; E-mail: oldguy7@rambler.ru
- Виталий Семенович Титов** — д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск; заведующий кафедрой; E-mail: titov-kstu@rambler.ru
- Анна Александровна Яценко** — аспирант; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск; E-mail: annajaschenko@rambler.ru

Рекомендовано Юго-Западным  
государственным университетом

Поступила в редакцию  
18.02.2013