

А. Л. Дорожинский, д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой фотограмметрии и геоинформатики,
Р. А. Абдаллах, асп. кафедры фотограмметрии и геоинформатики,
Национальный университет «Львовская политехника»

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ДОРОГ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

Выделение дорог на спутниковых снимках является одним из этапов обновления топографической карты по данным такого снимка. В статье приведена схема автоматического обновления карты, сформулирована задача локализации элементов дорожной сети на спутниковом снимке, выполнен анализ исследований в данной области. Описывается модифицированный алгоритм выделения элементов дорожной сети, предложенный автором. Приведены результаты экспериментов, которые показали, что выделяется до 76% дорожной сети.

Ключевые слова: обновление топографических карт, спутниковый снимок, автоматические выделения дорожной сети, сканирующий алгоритм, сегментация спутникового снимка.

Введение. Выделение дорожной сети на спутниковых снимках является важнейшим этапом обновления топографических карт. Даже частичная автоматизация выполнения данного этапа позволила бы ускорить процесс обновления и снизить его стоимость. Задача обновления топографических карт актуальна для многих местностей в связи с постоянным изменением инфраструктуры территорий. В настоящее время в связи с оцифровкой имеющихся топографических карт и появлением спутниковых снимков, отражающих текущее состояние местностей, возникает необходимость в решении задачи автоматического обновления топографических карт по данным спутниковых снимков. Автоматическое выделение дорожных сетей на аэрокосмических снимках является одним из этапов решения этой задачи.

Анализ исследований и публикаций. Выделение дорожной сети на растровых спутниковых снимках является предметом исследований ряда ученых в различных странах мира и описано в соответствующих источниках.

Так, в работе А. Гроте [1] используются аэрофотоснимки окрестностей города Грейнджмут (Шотландия) и Vaihingen (Германия). Для сегментации изображений автор представляет изображение в виде графа и использует метод нормализованных разрезов. Дорожные фрагменты извлекаются из сегментированных изображений и объединяются для формирования дорожной сети P.N. Anil и другие авторы [2] предложили статистическое слияние областей для сегментации изображений. Дорожная сеть извлекается в виде скелета методом обрезки на основе контура. В работе [3] предлагается методика извлечения дорог на основе алгоритма динамического программирования в пространстве объектов вместо пространства изображения. Кроме того, различные методы обсуждаются в работах [4; 5; 6]. Все подходы характеризуются одной общей особенностью – полуавтоматической сегментацией изображений. Это означает, что оператор выбирает начальные точки

для извлечения дорог. Ни в одной работе не описан подход, позволяющий выделить дорожную сеть абсолютно правильно. Например, в работе [4] в лучшем случае выделяется 73% дорог. Подход, описанный в работе [6], позволяет выделить почти 58% дорог.

В работе [7] предложен и обоснован автоматический метод извлечения дорожной сети на аэрокосмических снимках. Проблема извлечения дорог решается после бинаризации изображения, при этом используются два подхода – отслеживание и сканирование. Отслеживающие алгоритмы [11] предполагают, что обнаруживается одна точка объекта, после чего определяется контур. Преимуществом этих алгоритмов является их простота, недостатками – медленная реализация последовательного выполнения и некоторая сложность поиска и обработки внутреннего контура.

Алгоритмы сканирования [10; 12] основаны на сканировании изображений в целом и извлечении граничных точек без отслеживания контуров. Бинаризацию космического снимка выполняют путем его сегментации, в результате которой все пиксели делятся на два сегмента: «дорога» и «не дорога». Основными проблемами в решении этой задачи является недостаточная точность, которая проявляется как в избыточном выделении элементов, не принадлежащих дорожной сети, так и в «пропуске» элементов, которые должны быть выделены. Методы, применяемые для сегментации произвольных изображений, описаны в литературе [8], наиболее популярны среди них методы выделения контуров и построения кластеров [8]. Однако, как показано в научной работе [7], применительно к космическим снимкам описанные методы обладают недостаточной точностью.

Постановка задачи. Целью статьи является описание предложенного авторами модифицированного метода выделения элементов дорожной сети и анализ полученных результатов с точки зрения их достоверности.

Основная часть. Обновление топографической карты по данным спутниковых снимков выполняется следующим образом. Имеются растровая карта и растровый снимок, полученный позже, чем формировалась карта, и известны процедуры, позволяющие выделить для карты и снимка множество их элементов. Задача обновления карты по снимку может быть решена путем нахождения двух наборов элементов. Первый набор - это элементы, которые есть на снимке, но которых нет на карте (то есть более новые объекты, которые появились на местности после создания карты); эти элементы должны быть нанесены на карту. Второй набор - элементы, которые есть на карте, но отсутствуют на снимке (то есть объекты, которые исчезли после создания карты); эти элементы должны быть удалены с карты [8].

Таким образом, процесс автоматического обновления карты по спутниковому снимку может быть описан в виде схемы, представленной на рис. 1 [13].

При выделении элементов дорожной сети на топографической карте ключевым элементом идентификации является цвет [13]. В случае космического снимка, как показано в работе [1], цвет в таком качестве использовать нельзя. В этой работе идентифицирующим параметром в выделении городских и загородных дорог является яркость точек.

Целевым слоем выделения являются элементы дорожной сети, обладающие следующими свойствами [7]: значительная протяженность на прямолинейном

участке; одинаковая ширина участка; равномерное распределение яркости в пределах объекта; четкие контуры дорожного полотна.

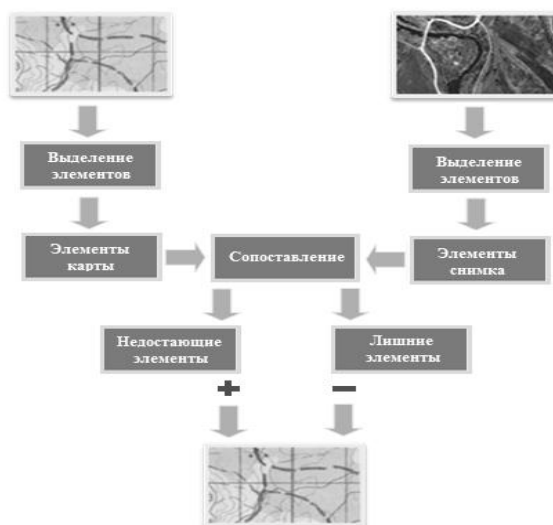


Рис. 1. Общая схема обновления карты по снимку

Процесс выделения элементов дорожной сети на аэрокосмическом снимке показан на рис.2.

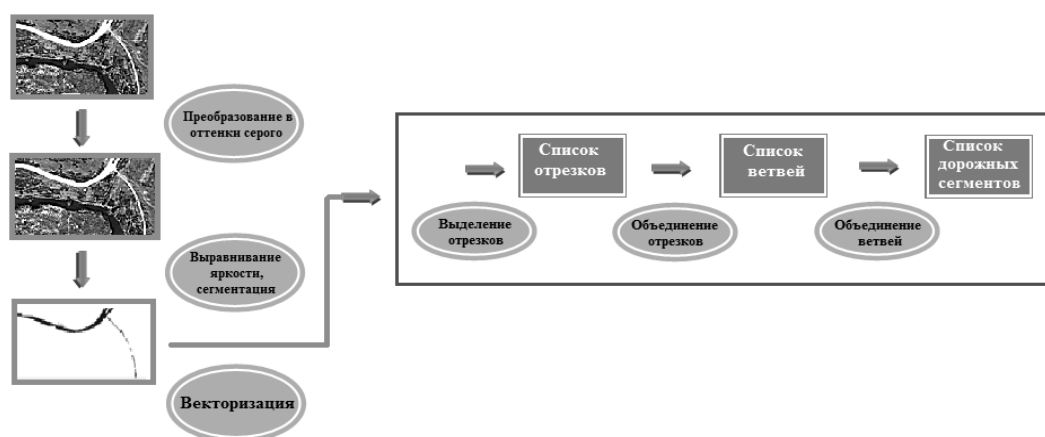


Рис.2. Этапы выделения дорожной сети на снимке

Для локализации объектов дорожной сети с учетом описанных свойств в качестве базового использован метод, предполагающий использование фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) [7]. Модификации внесены на этапе нахождения значения яркости точек, принадлежащих окну фильтра. В алгоритме, выбранном в качестве базового, координаты точек фильтра в узлах дискретной сетки исходного космического изображения рассчитываются путем объединения уравнения прямой, которую образует окно фильтра в выбранной системе координат, и уравнения окружности, описываемой окном фильтра при вращении относительно исследуемой точки. Однако показано [9], что описываемый подход обладает недостаточной точностью при разложении в растр. Для повышения точности авторами использован растровый алгоритм Брезенхема [9] для получения точек окрестности заданного радиуса и для генерации точек окна фильтра.

Таким образом, процесс выделения целевого слоя (элементов дорожной сети) состоит из следующих этапов:

1. Чтение снимка. Исходными данными для этого шага является растровый файл со снимком, результатом выполнения – битовая карта изображения (24 бита на пиксель).

2. Преобразование снимка в оттенки серого по формуле [8]:

$$Y=0.299R+0.587G+0.114B,$$

где R,G,B – цветовые составляющие точки исходного изображения, Y – яркостная составляющая.

3. Выделение линейных фрагментов с равномерной яркостью и четким контуром, у которых длина значительно больше ширины (волновая сегментация). В результате выполнения этого этапа формируется матрица бинарного представления, размер матрицы равен размеру исходного снимка, каждый элемент хранит значение «1» для точек, принадлежащих линейным фрагментам, и «0» – для остальных.

4. Векторизация полученного представления для описания геометрических параметров элементов дорожной сети.

Рассмотрим более подробно этап волновой сегментации. Первым шагом является выделение точек в R-окрестности текущей точки. Авторы работы [7] используют для определения координат точек такой окрестности уравнение окружности $x^2+y^2=R^2$. Авторами же настоящей работы предлагается генерировать точки окрестности с помощью растрового алгоритма Брезенхема, так как использование уравнения окружности в растровом представлении не дает равномерного распределения точек и, следовательно, снижает точность результатов [9].

Вторым шагом рассматриваемого этапа является определение координат точек линейного фильтра. В базовом алгоритме используется уравнение прямой в виде $y = kx + b$. Авторы и на этом этапе применяют для генерации точек отрезка прямой растровый алгоритм Брезенхема: как и в случае генерации точек окружности, он обладает лучшими характеристиками с точки зрения быстродействия и точности.

Третьим шагом является проверка принадлежности точек в окне фильтра объекту, обладающему свойствами элемента дорожной сети, перечисленными выше. Для этого вычисляется среднеквадратичное отклонение яркости точек в окне фильтра.

Четвертый шаг - анализ среднеквадратичного отклонения и принятие решения о принадлежности точки элементу дорожной сети [7].

Для экспериментов использовался фрагмент космического снимка окрестностей г.Сулеймания, показанный на рис.3. Космический снимок, полученный съёмочной системой спутника GeoEye-1 в 2013 г., имеет пространственное разрешение 2,8 м, радиометрическое разрешение – 11 бит, уменьшенное до 8 бит.



Рис. 3. Фрагмент космического снимка окрестностей г. Сулеймания (Ирак)

Размер фрагмента космического снимка – 2500*1500 пикселей. На территории, представленной на снимке, расположены река, элементы малоэтажной застройки, дорожная сеть, состоящая из городских и загородных дорог.

На рис. 4, *а* – приведен фрагмент, для которого анализировалась эффективность описываемого подхода (данный фрагмент выделен на рис.3 прямоугольной рамкой 1), на рис. 4, *б* – результат сегментации этого изображения с использованием метода, разработанного авторами.



Рис. 4. Результаты сегментации фрагмента спутникового снимка

Исходный фрагмент снимка содержит два слоя, которые могут быть описаны как линейные протяженные объекты: фрагменты дорожной сети (светлый объект) и река (темный объект). Река, запечатленная на снимке, тоже выделяется как дорога. Данная ситуация вполне естественна, так как с точки зрения геометрических и яркостных характеристик изображения реки и дороги на снимке практически не отличаются. Река, как и дорога, - линейный протяженный объект, у которого длина значительно больше ширины, а яркость точек – равномерна. Чтобы различить их, нужны либо дополнительные сведения о местности, либо корректировка результатов выделения вручную.

На рис. 5, *а*, *б*, показаны результаты сегментации другого фрагмента снимка (выделен на рис. 3 прямоугольной рамкой 2), на котором также представлены река и фрагмент дорожной сети. В этом случае в силу некоторых причин (значительная ширина реки по сравнению с шириной дорожного полотна) путем фильтрации выделяется не все русло реки, а только его границы. Для устранения этого недостатка также может быть привлечен эксперт.

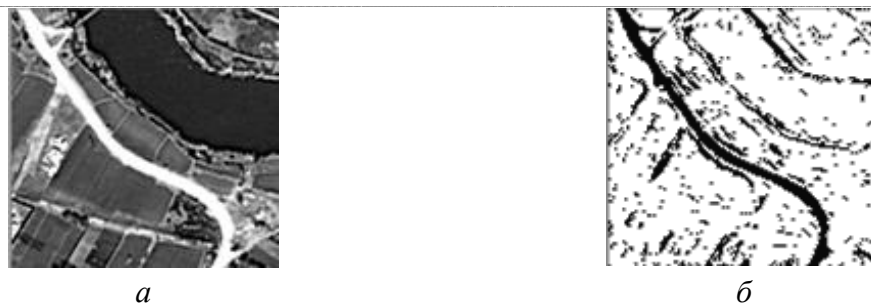


Рис. 5. Результаты сегментации фрагмента спутникового снимка

Если рассматривать сегментацию снимка в целом, то следует отметить, что на нем представлены различные типы местности, для каждого типа стоит выполнять сегментацию с разными значениями параметров. Так, путем подбора параметров сегментации получены приемлемые результаты, показанные на рис.6. Анализ результатов свидетельствует о том, что приемлемые результаты получаются для тех районов, где все дороги имеют примерно равную ширину и придорожная территория однородна. На рис. 7 приведены примеры ошибочной сегментации, обусловленной характером местности. Указаны значения параметров сегментации, для которых получены результаты: R – радиус сегментации в пикселях, K – минимальное соотношение яркостей между точками интереса и окрестностью. Выделение избыточных элементов и проблемы с выделением дорог небольшой ширины говорят о необходимости корректирования результатов оператором.

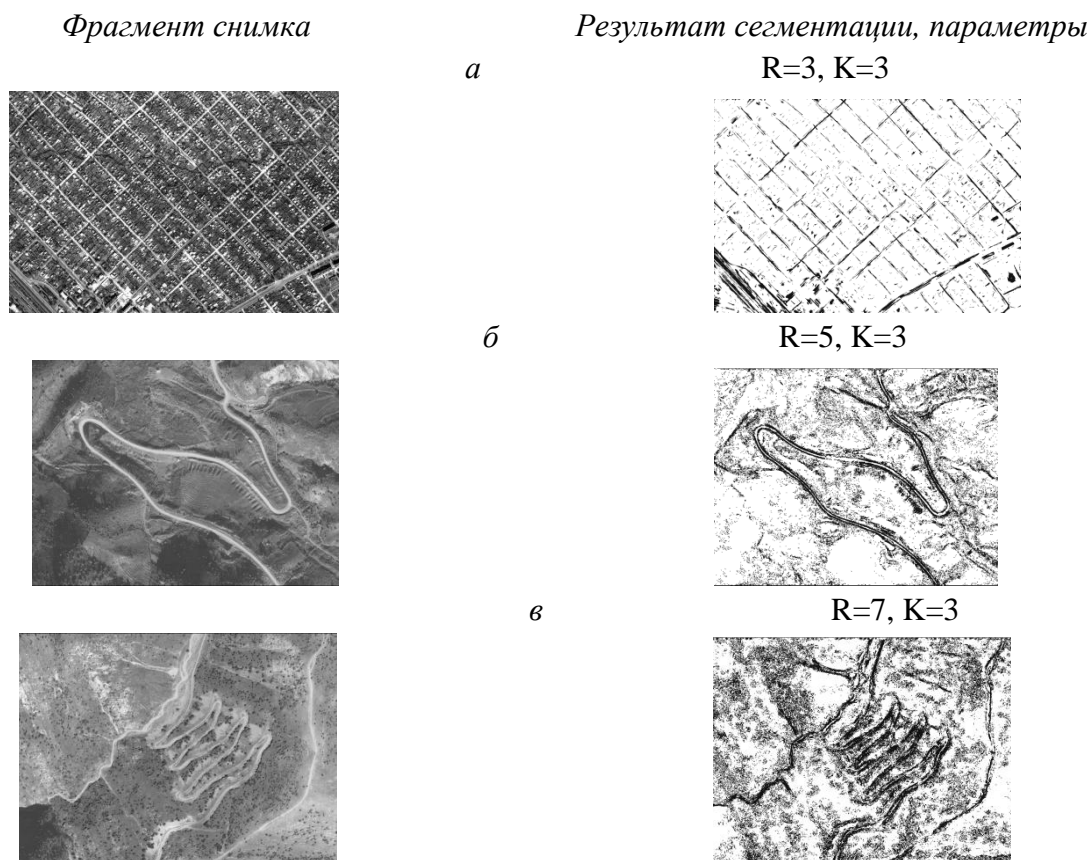


Рис. 6. Фрагменты, для которых получены приемлемые результаты сегментации

Фрагмент снимка

Результат сегментации

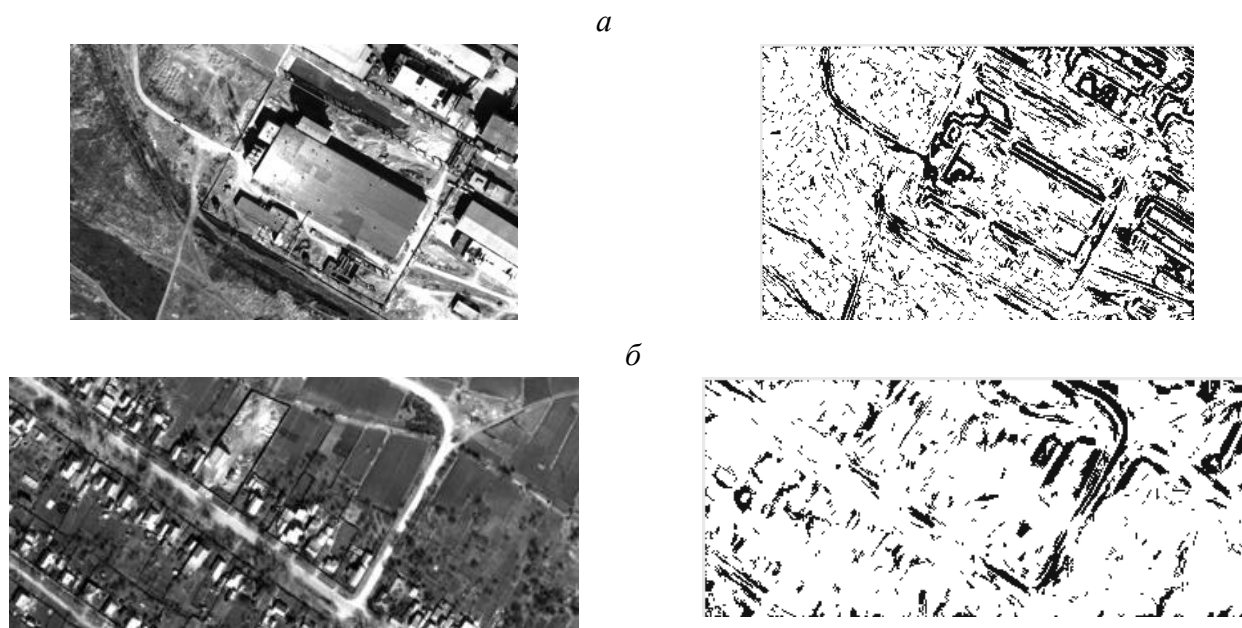


Рис. 7. Неудовлетворительные результаты сегментации

Для анализа эффективности алгоритма была выполнена обработка различных фрагментов спутникового снимка г. Сулеймания и его окрестностей.

В результате сегментации снимков выделены фрагменты дорожной сети (рис. 6). Результаты выделения оценивались экспертом (табл. 1). Процесс сегментации усложняется за счет таких свойств местности: дорога проходит близко к протяжённому строению прямоугольной формы; местами деревья и тень закрывают дорогу; слишком узкая дорога.

Таблица 1

Результаты сегментации спутниковых снимков

	Виды дорог	Общая протяженность дорог (км)	Протяженность дорог, выделенных в результате сегментации (км)	Эффективность выделения, %
а	Городские	5.1	3.4	67
б	Загородные	1.1	0.85	77
в	Горные	1.3	1.1	85
г	Сельские	1.0	0.75	75

Результаты экспериментов говорят о том, что необходима дополнительная обработка сегментированного изображения оператором, поскольку некоторые элементы, имеющие яркие характеристики, схожие с характеристиками дорожной сети, выделяются неправильно. Кроме того, в ряде случаев дорожная сеть выделяется неполностью.

Для определения геометрических параметров элементов дорожной сети используют сканирующий алгоритм, который ранее позволил получить приемлемые результаты для топографических карт [13].

Сканирующий алгоритм [10] основан на схеме хранения полосы изображения в памяти ЭВМ и нахождении контурных точек в процессе движения полосы по всему изображению. Для обработки информации в полосе различают два случая: выявление ситуации в полосе изображения и ее разрешение. В полосе одновременно хранятся две строки изображения (текущая и предыдущая). Анализируются х-координаты черных серий обеих строк в порядке их возрастания (слева направо) и выявляются пять ситуаций, которые могут возникнуть. При анализе отдельно обрабатываются ситуации «начало», «продолжение», «ветвление», «слияние» и «конец».

Результатом работы процедуры выделения отрезков являются список отрезков и список образуемых отрезками ветвей. Оба списка представляют собой массивы, элементы которых описывают выделенные отрезки и образуемые ими ветви. Для каждого отрезка в ходе работы процедуры вычисляют координаты X и Y начальной и конечной точек, толщину отрезка, количество образующих его точек, номер ветви, к которой отрезок принадлежит.

Список ветвей – это массив, каждый элемент которого содержит номер ветви, количество образующих ее отрезков, номера начального и конечного отрезков ветви. Количество отрезков, выделяемых на данном шаге, достаточно велико, полученный список может включать изолированные короткие отрезки, не являющиеся фрагментами дорожной сети, а также фрагменты одной прямой, поэтому сформированный список отрезков подвергают дальнейшей обработке.

Первым шагом такой обработки является объединение пар отрезков, начальная и конечная точки которых расположены достаточно близко друг от друга. Следующим этапом является объединение ветвей. Также удаляются короткие изолированные отрезки.

На рис. 8, а приведено изображение, полученное в результате сегментации фрагмента снимка (см. рис. 4) и ручной обработки оператором, на рис. 8, б – результат его обработки сканирующим алгоритмом (осевые линии выделенных элементов дорожной сети показаны светлым цветом).



Рис. 8. Результаты работы сканирующего алгоритма

Анализ эффективности применения сканирующего алгоритма позволяет утверждать, что при качественной подготовке сегментированного изображения геометрические параметры дорожной сети определяются достаточно точно.

Выводы. В работе авторами представлен подход к выделению элементов дорожной сети на космических снимках. В этом подходе использован модифицированный метод волновой сегментации для кластеризации, а для формирования описания дорожной сети применены сканирующие алгоритмы. Эксперименты показали приемлемые результаты выделения.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. *Grote A.* Automatic road network extraction in suburban areas from aerial images / A.Grote – DGK, Reihe C, Heft № 663, 2011. – 96 p.
2. *Anil P.N., Natarajan S.* Automatic Road Extraction from High Resolution Imagery Based On Statistical Region Merging and Skeletonization / P.N.Anil, S.Natarajan // International Journal of Engineering Science and Technology/ – Vol. 2(3). – 2010. – P.165-171.
3. *Dal Poz A. P.* Semiautomatic road extraction by dynamic programming optimisation in the object space: single image case./ A. P.Dal Poz, R. A.Gallis, J. F. C.da Silva // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Vol. 34, Part XXX. – P.34-40.
4. *Qiaoping Zhang.* Automated Road Network Extraction from High Spatial Resolution Multi-Spectral Imagery. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Department Of Geomatics Engineering, University Of Calgary, APRIL, 2006.
5. *Ziems M.* Multiple-model based verification of road data. / M.Ziems, U.Breitkopf, C.Heipke, F.Rottensteiner // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Volume I-3. – 2012. – P. 329-334.
6. *Ziems M.* Multiple-model based verification of Japanese road data. / M.Ziems, H.Fujimura, C.Heipke, F.Rottensteiner, // IntArchPhRS. – Vol. XXXVIII-4-8-2/W9, Haifa. – 2010. – P. 13-19.
7. *Лавриненко А.А.* Методы, алгоритмы и системы обработки растровых аэрокосмических изображений объектов дорожной сети: дис... канд. техн. наук: 05.13.01/ А.А. Лавриненко. – Курск, 2014. – 90 с.
8. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений./ Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2000. – 1072 с.
9. *Роджерс Д.* Алгоритмические основы машинной графики: пер. с англ. / Д. Роджерс. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
10. *Форсайт Д.А.* Компьютерное зрение: современный поход / Д.А. Форсайт, Д.М. Понс. – Вильямс, 2004. – 928 с.
11. *Шапиро Л.* Компьютерное зрение. / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
12. *Zhelton S.Yu.* Robust Computer Image Analysis for Flight Vehicles Navigation. / S.Yu.Zhelton, Yu.V. Vizilter // 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. – Vol.2. - St.Petersburg, 2004. – P. 164-167.
13. *Rang A.* Geometric characteristics of Iraq"s raster topographic maps used for automatic updating the road network. / A.Rang // Geomatics, Landmanagement and Landscape. – № 3. – Poland, University of Agriculture Krakow. – 2015. - P.14 -19.

REFERENCES

1. Grote A. (2011) Automatic road network extraction in suburban areas from aerial images. DGK, Reihe C, Heft № 663, 96 p.
2. Anil P.N., Natarajan S. (2010) Automatic Road Extraction from High Resolution Imagery Based On Statistical Region Merging and Skeletonization. International Journal of Engineering Science and Technology. (Vols. 2(3)), (p.165-171).

3. Dal Poz A. P. Gallis R. A., J. F. C. da Silva Semiautomatic road extraction by dynamic programming optimisation in the object space: single image case. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. (Vols. 34, Part XXX), (p.34-40).
4. Qiaoping Zhang (2006) Automated Road Network Extraction from High Spatial Resolution Multi-Spectral Imagery. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Department Of Geomatics Engineering, University Of Calgary.
5. Ziems M. Breitkopf U., Heipke C., Rottensteiner F. (2012) Multiple-model based verification of road data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. (Vols I-3), (p. 329-334).
6. Ziems M., Fujimura H., Heipke C., Rottensteiner F., (2010) Multiple-model based verification of Japanese road data., IntArchPhRS. (Vol. XXXVIII-4-8-2/W9), (p. 13-19).
7. Lavrinenko, A.A. (2014). Metody, algoritmy i sistemy obrabotki rastrovyyih aerokosmicheskikh izobrazheniy ob'ektov dorozhnoy seti [The methods and algorithms of aerospace image processing raster objects of the road network]. *Candidate's thesis*. Kursk [in Russian].
8. Gonsales, R. (2000). *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing]*. Moskva [in Russian].
9. Rodzhers, D. (1989) *Algoritmicheskie osnovyi mashinnoy grafiki [Algorithmic foundations of computer graphics]*. Moskva: Mir [in Russian].
10. Forsayt D.A. & Pons D.M. (2004) *Kompyuternoe zrenie. Sovremennyiy podhod [Computer vision. Modern Approach]*. [in Russian]
11. Shapiro L. & Stokman Dzh. (2006) *Kompyuternoe zrenie [Computer vision]* Moskva [in Russian].
12. Zheltov S.Yu. (2004) Robust Computer Image Analysis for Flight Vehicles Navigation. 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. - Vol.2. - St.Petersburg, (p. 164-167).
13. Rang A. (2015) Geometric characteristics of Iraq"s raster topographic maps used for automatic updating the road network. Geomatics, Landmanagement and Landscape. 3, (p.14 -19). Poland, University of Agriculture Krakow.

О.Л. Дорожинський,

Р.А. Абдаллах

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧНОГО ВИДІЛЕННЯ ДОРІГ НА СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКАХ

Виділення доріг на супутникових знімках є одним з етапів оновлення топографічної карти за даними такого знімка. У статті наведено схему автоматичного оновлення карти, сформульовано задачу з локалізації елементів дорожньої мережі на супутниковому знімку, виконано аналіз досліджень у цій галузі. Описано модифікований алгоритм виділення елементів дорожньої мережі, запропонований автором. Наведено результати експериментів, які засвідчили, що виділяється близько 76% дорожньої мережі.

Ключові слова: оновлення топографічних карт, супутниковий знімок, автоматичне виділення дорожньої мережі, скануючий алгоритм, сегментація супутникового знімка.

O.L. Dorozhynskyy,

R.A. Abdallah

**METHOD OF AUTOMATIC SELECTION OF ROADS ON THE
SATELLITE IMAGES**

Isolation of the road network on satellite images is an important step in updating topographic maps. Even partial automation of the present stage would allow to speed up the upgrade process and reduce its cost. The updating process of topographic maps is relevant to many areas due to the constant changes in the infrastructure area. Nowadays, digitizing existing topographic maps, and the advent of satellite imagery, reflecting the current state of the areas, there is a need to address the problem of automatic updating of topographic maps from satellite images. Automatic extraction of road networks in the aerospace images is one of the stages of solving the problem of updating topographic maps from satellite images. Road selection on satellite images is one of the stages of topographic map updating. In this paper the scheme of automatic map updating is described, the problem of road network elements localization on the satellite image is formulated, researches in this area are analyzed. Proposed by author modified algorithm for road network elements detection is described. The results of the experiments showed that 76% of road network are selected.

Keywords: *renovation of topographical maps, satellite image, automatic selection of the road network, the scanning algorithm, the segmentation of satellite image.*

Надійшла до редакції

09.11.2015

УДК 621.397.6

В.И. Кортунов, *д-р техн.наук, професор,*
А.А. Молчанов, *ассист.*
И.А. Гергель, *ассист.,*
Национальный аэрокосмический
университет им. Н.Е. Жуковского

**3D-РЕКОНСТРУКЦИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ
БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ**

В статье представлены различные методы 3D-реконструкции объектов по снимкам стереосъемки или серии снимков, приведены преимущества и недостатки предложенных методов. Большое внимание в статье отведено факторам рассогласования стереокамер и методам их калибровки. Представлен также метод ускорения просчета карт глубины путем использования многопоточности графического процессора, что позволит выполнять 3D-реконструкцию в режиме реального времени с помощью видеопотока.

Ключевые слова: *3D-реконструкция, калибровка, карта глубины.*