

Согласно последнему замечанию предложенный метод целесообразно использовать для визуализации путей (не обязательно железнодорожных) с участками высокой кривизны.

**Заключение.** Предложен метод визуализации линий железнодорожных путей на основе кусочно-полиномиальной интерполяции массивов координат. На данной основе рассчитываются полосы отвода участка железнодорожного пути. Метод включает визуализацию пути с отображением нормали и касательной в произвольной точке.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ромм Я.Е., Шаповалова Е.Ю. Визуализация железнодорожного пути по массиву оцифрованных координат с отображением нормалей и касательных / ТГПИ. – Таганрог, 2010. – 29 с. – Деп. в ВИНТИ 15.04.2011, № 292-В2011.
2. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Физматгиз, 1966. – 660 с.
3. Аксайская Л.Н. Разработка и исследование параллельных схем цифровой обработки сигналов на основе минимизации временной сложности вычисления функций. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог. – 18 с.
4. Зорич В.А. Математический анализ. Ч. I. – М.: Наука, 1981. – 544 с.
5. Шубко В.Г., Правдин Н.В. и др. Железнодорожные станции и узлы. – М.: УМК МПС России, 2002.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
7. Блашке В. Введение в дифференциальную геометрию. – Ижевск: Изд. дом «Удмуртский университет», 2000. – 232 с.
8. Бакельман И.Я., Вернер А.Л., Кантор Б.Е. Введение в дифференциальную геометрию «в целом». – М.: Наука, 1973. – 444 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.П. Фельдман.

**Ромм Яков Евсеевич** – ГОУВПО «Таганрогский государственный педагогический институт»; e-mail: romm@listru; 347926, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: 88634601753, 88634601812, 88634601807; кафедра информатики; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Шаповалова Елизавета Юрьевна** – e-mail: lifeforever@list.ru; кафедра информатики; аспирантка

**Romm Yakov Evseevich** – Taganrog State Pedagogical Institute; e-mail: romm@list.ru; 48, Initiativnaya street, Taganrog 347926, Russia; phones: +78634601753, +78634601812, +78634601807; the department of computer science; chair of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Shapovalova Elizaveta Uyr'evna** – e-mail: lifeforever@list.ru; postgraduate student.

УДК 50.24:534.4:621.391

**Е.Ф. Стукалина, А.А. Сметанин**

#### АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

*Рассматриваются вопросы обработки изображений дистанционного зондирования на основе дешифрирования материалов космической съемки, являющейся в настоящее время актуальной проблемой. Предлагаемая цифровая модель местности позволяет формализовать контурную информацию в векторном представлении, что является основанием для оперативного обновления информации геоинформационных систем. Оригинальность*

решения заключается в применении быстродействующих алгоритмов обработки изображений на основе циклического алгоритма утоньшения линий контурного изображения и однопроходного алгоритма скелетизации методом вписанного квадрата. При формировании векторного изображения каждая точка исходного изображения рассматривается в совокупности со всеми смежными с ней точками изображения. Для удаления шумов, которые присутствуют после алгоритма утоньшения изображения, в статье дается математическое описание алгоритма удаления «бахромы» на изображении.

Картография; скелетизация; геоинформационные системы; космическая съемка

**E.F. Stukalina, A.A. Smetanin**

### ALGORITHMS FOR IMAGE PROCESSING OF SATELLITE IMAGERY

*The article deals with the processing of remote sensing images based on the interpretation of satellite imagery, which is now an urgent problem. The proposed digital terrain model allows you to create contour information in the vector representation, which is the basis for the rapid updating of geographic information systems. The originality of the solutions is to use high-speed image processing algorithms based on the cyclic algorithm of contour lines, thinning image and single-pass algorithm Skeletonization using an inscribed square. In forming a vector image, each point of the original image is considered in conjunction with all adjacent image points. To remove the noise that is present after the thinning algorithm images, the article provides a mathematical description of the algorithm remove the "fringes" of an image on.*

*Cartography; skeletonization; GIS; remote sensing.*

Практически во всех отраслях науки и производства используется картографическая информация в широком диапазоне масштабов – от 1 : 500 до 1 : 1 000 000 и мельче. С развитием геоинформационных систем (ГИС) основой представления картографической информации является цифровая модель местности (ЦММ). Основным способом формирования ЦММ в настоящее время является автоматизированное дешифрирование материалов космической съемки (МКС).

Поставим задачу создания ЦММ по результатам дешифрирования МКС.

Представим ЦММ в виде множества контуров, с описанием [1–3]:

$$M = \{L_i, S_i\}, i = 1, \dots, I, \quad (1)$$

где  $L_i$  – множество метрических характеристик контура  $G_i$ ;  $S_i$  – множество семантических характеристик  $G_i$ .

В свою очередь:

$$L_i = \{K_{i,j}, P_i\}, j = 1, \dots, J, i \neq j, \quad (2)$$

где  $K_{i,j}$  – множество контурных сегментов, ограничивающих  $G_i$  и являющихся граничными между  $G_i$  и  $G_j$ ;  $P_i$  – множество контурных признаков (периметр, изрезанность границ и т.п.).

Контурные сегменты определяются следующим образом:

$$K_{i,j} = \{V_{i,j}, c_i, c_j\}, \quad (3)$$

где  $V_{i,j}$  – множество координат вершин ломаной, аппроксимирующей сегмент;  $c_i$  и  $c_j$  – коды  $G_i$  и  $G_j$ .

Задача выделения контуров, сегментация исследуется в различных областях обработки и распознавания изображений [4] и содержит основные технологические функции: утоньшение линий контуров; устранение разрывов. Термин «утоньшение» – наиболее общий термин для обозначения процесса преобразования линий, имеющие ширину в несколько пикселей, в линии единичной ширины.

К операциям утоньшения предъявляются, как правило, следующие основные требования: после преобразования все контуры имеют единичную толщину; связность объектов изображения и фона должна быть сохранена; преобразование не нарушает топологию изображения, т.е. линиям и узлам исходного изображения соответствуют линии и узлы преобразованного изображения.

Для утоньшения контуров можно воспользоваться алгоритмом, предложенным в [5].

При обработке изображения для каждой точки растра рассматриваются восемь смежных с ней точек. Для реализации этого подхода в памяти резервируется место под три строки изображения. Обозначим через  $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$  три последовательные строки растра. Выделим в  $i$ -й строке произвольный элемент  $\alpha$ . Этот элемент имеет в выбранных строках восемь смежных (соседних) элементов, которые обозначим цифрами 0,1,2,3,4,5,6,7, как это показано на рис. 1.

3	2	1		$i-1$
4	$\alpha$	0		$i$
5	6	7		$i+1$

Рис. 1. Нумерация элементов окна 3x3

Сущность процедуры утоньшения заключается в отыскании на изображении крайних сверху, снизу, справа и слева элементы. Затем нужно принять решение о возможности их удаления. Элемент  $\alpha$  будем считать крайним сверху, если он и элемент 6 зачернены (принадлежат контуру), а элемент 2 не зачернен (не принадлежит контуру). Формально эту ситуацию можно выразить таким образом: элемент  $\alpha$  является крайним сверху, если равна единице следующая булева функция, в которой символы переменных совпадают с номерами элементов на рис. 1:

$$\varphi_s = \bar{2} \wedge 6 \wedge \alpha. \quad (4)$$

Для того, чтобы элемент  $\alpha$  стереть с изображения, в единицу должна обращаться и функция:

$$\Psi_s = \bar{1} \wedge 4 \vee \bar{3} \wedge 0 \vee 0 \wedge 4. \quad (5)$$

Таким образом, элементу  $\alpha$  будет придаваться нулевое значение при равенстве единице следующей функции:

$$F_s = \varphi_s \wedge \Psi_s = (\bar{2} \wedge 6 \wedge \alpha) \wedge (\bar{1} \wedge 4 \vee \bar{3} \wedge 0 \vee 0 \wedge 4). \quad (6)$$

Функция  $F_s$  должна быть вычислена для каждого элемента текущей строки растра. Рассуждая аналогичным образом, получим функции  $F_l, F_n, F_r$ , определяющие подлежащие стиранию крайние левые, нижние и правые элементы растра:

$$F_l = \varphi_l \wedge \Psi_l = (\bar{4} \wedge 0 \wedge \alpha) \wedge (\bar{3} \wedge 6 \vee \bar{5} \wedge 2 \vee 2 \wedge 6), \quad (7)$$

$$F_n = \varphi_n \wedge \Psi_n = (\bar{6} \wedge 2 \wedge \alpha) \wedge (\bar{5} \wedge 0 \vee \bar{7} \wedge 4 \vee 4 \wedge 0), \quad (8)$$

$$F_r = \varphi_r \wedge \Psi_r = (\bar{0} \wedge 4 \wedge \alpha) \wedge (\bar{7} \wedge 2 \vee \bar{1} \wedge 6 \vee 6 \wedge 2). \quad (9)$$

Процедуру утоньшения целесообразно выполнять вместе с процедурой стирания концевых точек, которую можно рассматривать как способ устранения шумов в виде «бахромы» и небольших изолированных групп точек (пятен на фоне). Шумы в виде «бахромы» могут присутствовать на исходном изображении или появляться при выполнении процедуры утоньшения, поэтому каждому циклу утоньшения целесообразно предпослать цикл коррекции изображения. Цикл коррекции

подобен циклу утоньшения и состоит из четырех этапов стирания «бахромы» и фона сверху, слева, снизу, справа. Можно записать выражение для функции  $R_g$ , которая обращается в единицу в верхних концевых точках  $i$ -й строки:

$$R_g = \alpha \wedge \bar{0} \wedge \bar{1} \wedge \bar{2} \wedge \bar{3} \wedge \bar{4} \wedge (\bar{5} \vee 6). \tag{10}$$

Аналогичные рассуждения приводят к следующим функциям для стирания концевых точек слева, справа и снизу:

$$R_s = \alpha \wedge \bar{2} \wedge \bar{3} \wedge \bar{4} \wedge \bar{5} \wedge \bar{6} \wedge (\bar{7} \vee 0), \tag{11}$$

$$R_n = \alpha \wedge \bar{4} \wedge \bar{5} \wedge \bar{6} \wedge 7 \wedge \bar{0} \wedge (\bar{1} \vee 2), \tag{12}$$

$$R_n = \alpha \wedge \hat{6} \wedge \bar{7} \wedge \bar{0} \wedge \bar{1} \wedge \bar{2} \wedge (\bar{3} \vee 4). \tag{13}$$

Для задачи выделения контура можно использовать алгоритм скелетизации изображения.

В группе алгоритмов на основе вписанных фигур перспективным является однопроходный алгоритм скелетизации методом вписанного квадрата.

Для реализации метода вписанного квадрата представим исходное изображение в виде матрицы рис.2, где 0 – это фон, а 1 – это изображение. Далее проиндексируем его в соответствии со следующим правилом:

$$d = \min(a, b, c) + 1, \tag{14}$$

где  $d$  – индекс текущего пикселя,  $a$  – индекс пикселя сверху,  $b$  – индекс пикселя слева сверху,  $c$  – индекс пикселя слева (рис. 3). Индекс – это размер квадрата, нижний левый угол которого совпадает с текущим пикселем.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	5	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0	0	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	5	6	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	0	
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5	6	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	0	0	
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	7	8	9	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	0	0	
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	8	9	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	13	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0

Рис. 2. Проиндексированное изображение

b	a
c	d

Рис. 3. Переменные индексирования

Если выполняется условие:

$$\begin{cases} b \geq a, \\ b \geq c, \\ b \geq d, \end{cases} \quad (15)$$

то квадрат является вписанным и заносится в матрицу размеров квадратов.

На втором шаге центры вписанных квадратов соединяются в скелетные линии. Это происходит по градиенту в матрице связанности вписанных квадратов.

Алгоритм выделения средних линий на основе вписанных квадратов выполняется за гарантированное время  $O(n)$ , что быстрее известных алгоритмов триангуляции [7], которые решают эту задачу за гарантированное время  $O(n \log n)$ .

#### **Выводы.**

1. Поставлена задача формирования цифровой модели местности и, в частности, контурной информации.
2. Предложен алгоритм утоньшения контуров.
3. Рассмотренный алгоритм выделения средних линий на основе вписанных квадратов является усовершенствованием алгоритма на основе триангуляции [7].
4. Трудоемкость рассмотренного алгоритма выделения средних линий линейная.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Сметанин А.М.* Информационная безопасность объектов местности: автоматизированное дешифрирование материалов аэрокосмической съемки // Доклады Томского гос. универс. систем управл. и радиоэлектроники. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2008. – № 2 (18). Ч. 1. – С. 18-19.
2. *Стукалина Е.Ф.* Программно-аппаратные средства анализа и распознавания изображений дистанционного зондирования: Дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2002. – 156 с.
3. *Сметанин А.М.* Природно-социальные системы: Прикладные проблемы распознавания образов // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2003. – № 1. – С. 65-80.
4. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработки изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
5. *Бутаков Е.А.* Обработка изображений на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
6. *Новиков Ю.Л.* Эффективные алгоритмы векторизации растровых изображений и их реализация в геоинформационной системе: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2002.
7. *Скворцов А.В., Костюк Ю.Л.* Применение триангуляции для решения задач вычислительной геометрии // Геоинформатика. Теория и практика. Вып. 1. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1998. – С. 127-138.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

**Стукалина Елена Федоровна** – Ижевский государственный технический университет им М.Т. Калашникова; e-mail: smtnin@gmail.com; 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7; тел.: 83412592417; кафедра СТИБ; к.т.н.; доцент.

**Сметанин Андрей Анатольевич** – аспирант.

**Stukalina Elena Fe'dorovna** – Izhevsk State Technical University behalf of the MT Kalashnikov; e-mail: smtnin@gmail.com; 7, Studencheskaya street, Izhevsk, 426069, Russia; phone: +73412592417; the department of STIS; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Smetanin Andrew Anatol'evich** – postgraduate student.