

Алгоритмы формирования цифровых моделей рельефа по данным от КА «Ресурс-ДК»

О.А. Гомозов¹, А.Е. Кузнецов², В.И. Побаруев², В.И. Пошехонов², А.А. Сухов¹

¹Научно-исследовательский институт точных приборов
127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51
E-mail: ctc@comail.ru

²Рязанский государственный радиотехнический университет
390005 г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
E-mail: gislab@org.etr.ru

Рассматриваются алгоритмы обработки стереоизображений высокого пространственного разрешения, полученных от космического аппарата «Ресурс-ДК». Описываются основные технологические этапы формирования цифровых моделей рельефа. Приводятся результаты практической апробации созданного программного обеспечения и примеры выходных продуктов.

Ключевые слова: космические стереоснимки, блочное уравнивание, карта диспарантности, триангуляционная модель, цифровая модель рельефа.

Введение

Установленное на космическом аппарате (КА) «Ресурс-ДК» съемочное устройство сканерного типа позволяет выполнять съемку интересующего региона с максимальным отклонением от надира до 30 градусов по крену и получать одновременные стереоизображения высокого пространственного разрешения до 1 м, сформированные на разных витках полета спутника. Исходными данными для рассматриваемых алгоритмов построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) являются покрывающие заданную территорию снимки, прошедшие этапы структурного восстановления («сшивки» информации от всех ПЗС-линеек сканера) и радиометрической коррекции. Основными этапами стереообработки являются:

- подготовка проекта блока стереоизображений и их ориентирование;
- последовательная обработка отдельных стереопар с целью идентификации одноименных точек;
- формирование выходной ЦМР в виде раstra или триангуляционной модели и ее сохранение на диске в ГИС-формате.

В статье сравниваются два подхода к обработке стереопар: идентификация отдельных одноименных точек с их последующим объединением в триангуляционную сеть; формирование карты диспарантности, задающей смещения координат одноименных точек для всех пикселей базового изображения, посредством алгоритма оптимизационного поиска. Триангуляционный алгоритм обладает высоким быстродействием и простотой реализации, однако грубо аппроксимирует рельеф, тогда как формирование карты диспарантности, напротив, позволяет извлечь максимум информации о рельефе местности на стереопаре, после чего при необходимости получить также более точную триангуляционную модель. Однако алгоритм формирования карты диспарантности, как и вся технология обработки космических стереоизображений сверхбольшого объема в целом, достаточно трудоемок, поэтому в статье уделено также внимание вопросам оптимизации вычислительного процесса построения ЦМР.

Подготовка проекта блока стереоизображений

На первом этапе формируется задание на выборку обзорных изображений маршрутов из автоматизированного хранилища. Далее создается макет задачи построения ЦМР посредством оценки по обзорным изображениям возможности стереообработки и полноты покрытия стереопарами интересующего региона. Также проверяются наличие картматериалов и возможность их использования для блочного уравнивания. После макетирования и отбора маршрутов осуществляется выборка детальных изображений.

Далее решается задача блочного уравнивания снимков, для чего используются общие и опорные точки, элементы внутреннего ориентирования, а также измеренные бортовой аппаратурой параметры внешнего ориентирования съемочных устройств. Идентификация общих точек на паре снимков $B_1(m, n)$, $B_2(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, выполняется автоматически с использованием нормализованной кросскорреляционной функции $K(X, Y)$ эталонного фрагмента размером 64×64 пикселя на снимке B_1 и фрагмента из области поиска на трансформированном в систему координат B_1 снимке B_2 ,

$$K(X, Y) = \frac{E[XY] - EX \cdot EY}{\sqrt{E[X^2] - (EX)^2} \cdot \sqrt{E[Y^2] - (EY)^2}},$$

где E – операция вычисления математического ожидания.

Трансформирование исходного снимка B_2 осуществляется на основе уравнений геопривязки в соответствии со схемой: $B_2(m, n) \xrightarrow{F_2} (y, l) \xrightarrow{F_1^{-1}} B_1(m, n)$, где F_1^{-1} , F_2 – прямая и обратная функции геопривязки, параметры которых рассчитываются на основе пространственного положения и ориентации КА, измеренных бортовой аппаратурой; (y, l) – геодезические координаты пикселя.

В результате выполнения блочного уравнивания уточняются параметры внешнего ориентирования снимков, включающие координаты пространственного (X, Y, Z) и углового (β, μ, κ) положения спутника во время формирования изображений, после чего корректируются уравнения геопривязки F^* . Это позволяет уменьшить взаимные рассогласования между снимками и повысить измерительные характеристики формируемой ЦМР.

Обработка отдельных стереопар

Основной задачей обработки стереопар является идентификация одноименных (пикетных) точек, необходимых для восстановления информации о рельефе. Для этого вначале формируется стереопара посредством геометрического трансформирования исходных снимков в общую систему координат с использованием уточненных уравнений геопривязки F_1^* , F_2^* . Изображения стереопары после их совмещения обозначим $B_1(x, y)$ и $B_2(x', y')$, $x = \overline{1, X}$, $y = \overline{1, Y}$, $x' = \overline{1, X'}$, $y' = \overline{1, Y'}$. Создание стереопары позволяет, во-первых, интерактивно обрабатывать изображения в анаглифических стереоочках. Для этого формируется цветное изображение, в котором в канал красного записывается изображение $B_1(x, y)$, в каналы зеленого и синего – $B_2(x', y')$. Во-вторых, сокращается область поиска одноименных точек – на стереопаре они будут иметь одинаковые координаты в кадровом направлении, а разница координат в строчном направлении d_x (диспаратность) пропорциональна высоте рельефа в соответствующей точке,

$$(x, y) \leftrightarrow (x', y'): y = y', d_x = x - x'.$$

Один из подходов к идентификации одноименных точек заключается в использовании алгоритмов площадной корреляции, для которых сопоставляются не отдельные точки, а

фрагменты изображений, лежащие в окрестностях этих точек. Исходя из типа рельефа на снимке, требуемой детальности выходной ЦМР и затрат времени на обработку задается некоторый шаг сетки поиска h . После чего для каждого пикселя базового изображения $B_1(ih, jh)$, $(i, j) = 1, 2, \dots$, в небольшой окрестности вычисляется значение одного из операторов интереса [1, 2], который численно оценивает присутствие различных деталей внутри фрагмента и его пригодность для дальнейшего корреляционного сопоставления. Данный фрагмент используется для идентификации одноименной точки на втором изображении, в качестве меры сходства используется нормализованная кросскорреляционная функция. Для формирования триангуляционной модели рельефа идентифицированные одноименные точки объединяются в сеть треугольников с использованием критерия Делоне [3].

Рассмотренный алгоритм в отдельных случаях грубо аппроксимирует рельеф. Кроме того, из-за сильных взаимных геометрических искажений на стереоизображениях, особенно в горных районах, площадная корреляция обладает низкой надежностью идентификации и невысокой точностью из-за усреднения диспарантности по всему фрагменту, используемому для сопоставления.

Поэтому для поиска одноименных точек используются алгоритмы оптимизационного поиска [4], которые за счет учета гладкости изменения диспарантности между соседними пикселями позволяют при использовании эталонного фрагмента небольших размеров более надежно определить смещения координат одноименных точек. На стереоизображениях высокого разрешения, сформированных многоматричными видеодатчиками сканового принципа действия, из-за погрешностей взаимного ориентирования снимков возможно появление небольшого рассогласования в кадровом направлении ($y \approx y'$) на стереопаре. С учетом этого будем формировать две карты диспарантности $D_x(x, y)$, $D_y(x, y)$, которые задают смещения координат одноименных точек в строчном и кадровом направлениях для всех пикселей базового изображения стереопары. При этом карту D_y будем использовать для повышения надежности и точности обработки за счет учета гладкости изменения диспарантности в кадровом направлении.

На первом шаге сформируем изображение пространства диспарантности (ИПД) $C(x, y, d_x, d_y)$, где (d_x, d_y) – смещение координат точки (x, y) на изображении B_1 относительно изображения B_2 . Многомерное ИПД задает цену сопоставления каждого пикселя базового изображения с каждым пикселем подчиненного в некоторой области поиска $(2l_x + 1) \times (2l_y + 1)$, определяемой пространственным разрешением снимка, а также геометрией съемки. Для вычисления цены сопоставления применим нормализованную кросскорреляционную функцию с использованием эталонного окна 5×5 пикселей

$$C(x, y, d_x, d_y) = K [B_1(x, y), B_2(x + d_x, y + d_y)],$$

$$x = \overline{1, X}, y = \overline{1, Y}, d_x = \overline{-l_x, l_x}, d_y = \overline{-l_y, l_y}.$$

На втором шаге для нахождения карт $D_x(x, y)$, $D_y(x, y)$ сформулируем задачу минимизации,

$$(D_x, D_y) = \arg \min_{D_x, D_y} E(D_x, D_y), \quad E(D_x, D_y) = E_u(D_x, D_y) + E_z(D_x, D_y).$$

Здесь слагаемое E_u определяет, насколько функции D_x , D_y согласуются с исходными изображениями,

$$E_u(D_x, D_y) = \sum_{x, y} C(x, y, D_x(x, y), D_y(x, y)).$$

Слагаемое E_z задает требование кусочной гладкости функций D_x , D_y . Для уменьшения вычислительной сложности алгоритма функция E_z задается зависимой только от разности диспарантностей соседних пикселей,

$$E_z(D_x, D_y) = \sum_{x=1}^{X-1} \sum_{y=1}^Y c(D_x(x, y) - D_x(x+1, y), D_y(x, y) - D_y(x+1, y)) +$$

$$+ \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^{Y-1} c(D_x(x, y) - D_x(x, y+1), D_y(x, y) - D_y(x, y+1)),$$

где c – функция штрафов [5].

Данная задача является NP-полной, поэтому для нахождения локального минимума E используем алгоритм полуглобального сопоставления [6], в соответствии с которым выполняется 1D минимизация функции E с использованием принципа динамического программирования вдоль восьми направлений, задаваемых векторами $\mathbf{r}_k = (r_{kx}, r_{ky})$, $r_{kx} \in \{0, \pm 1\}$, $r_{ky} \in \{0, \pm 1\}$. Цена $L_k(x, y, d_x, d_y)$ для каждого пикселя вдоль направления k определяется рекурсивно,

$$L_k(x_j, y_j, d_x, d_y) = C(x_j, y_j, d_x, d_y) + \min \{ L_k(x_{j-1}, y_{j-1}, d_x, d_y), \\ L_k(x_{j-1}, y_{j-1}, d_x \pm 1, d_y) + P_1, L_k(x_{j-1}, y_{j-1}, d_x, d_y \pm 1) + P_1', \min_{i,l} L_k(x_{j-1}, y_{j-1}, i, l) + P_2 \}, \\ x_j = x_1 + (j-1)r_{kx}, \quad y_j = y_1 + (j-1)r_{ky},$$

где $P_1 < P_1' < P_2$ – штрафы, накладываемые при изменении диспарантности между соседними пикселями.

Полученные для всех направлений цены суммируются, после чего для каждого пикселя выбираются диспарантности с минимальной ценой:

$$S(x, y, d_x, d_y) = \sum_k L_k(x, y, d_x, d_y), \\ (D_x(x, y), D_y(x, y)) = \arg \min_{d_x, d_y} S(x, y, d_x, d_y).$$

На последнем этапе выполняются процедура субпиксельного уточнения диспарантностей, отбраковка ненадежных значений с их последующей интерполяцией. Пример получаемой карты диспарантности D_x показан на рисунке 1.

Алгоритм пирамидальной обработки

Для формирования карт диспарантностей применим пирамидальный алгоритм обработки, основанный на ограничении области поиска одноименных точек на каждом уровне пирамиды, что позволит увеличить быстродействие, а также предоставит



Рис. 1. Пример 3D визуализации карты D_x

возможность настройки детальности выходной ЦМР. Обозначим $B_1^i(x, y)$, $B_2^i(x', y')$, $i = 0, 1, 2, \dots$ уменьшенные в 2^i раз исходные изображения. Тогда карты диспарантности $D_x^i(x, y)$, $D_y^i(x, y)$ будем последовательно формировать на каждом уровне пирамиды i , начиная

с грубых изображений. Алгоритм обработки на каждом уровне пирамиды состоит в следующем. Карты $D_x^{i+1}(x, y)$, $D_y^{i+1}(x, y)$, полученные на предыдущем уровне, приведем в систему координат текущего с помощью билинейной интерполяции и используем для определения координат центров областей поиска на изображении B_2^i . Далее получим по $B_1^i(x, y)$, $B_2^i(x', y')$ новые карты $D_x^i(x, y)$, $D_y^i(x, y)$, используя для всех пикселей небольшой размер области поиска 11×5 пикселей. Данный алгоритм повторяется до тех пор, пока не будут сформированы карты диспаратности на заданном уровне пирамиды $i_{\text{вых}}$.

Оценка качества формирования карт диспаратностей

Альтернативой рассмотренному алгоритму формирования карты D_y является устранение переменной d_y из ИПД и использование стандартного алгоритма полуглобального сопоставления,

$$C(x, y, d_x) = \min_{d_y} C(x, y, d_x, d_y).$$

Сравнение данных подходов с точки зрения надежности, точности и временных затрат выполним по модельному стереоизображению с известными смещениями координат одноименных точек D_x^* , D_y^* . При этом диспаратность в кадровом направлении не превышает двух пикселей $|D_y^*(x, y)| \leq 2$. Для сравнения используем значения числа ошибок N (рисунок 2, а) и времени обработки t (рисунок 2, б) стандартного алгоритма, нормированные к соответствующим значениям алгоритма, использующего карту D_y . Точка считается ошибочной, в случае если диспаратность в строчном направлении отличается от истинной более чем на один пиксель $|D_x^*(x, y) - D_x(x, y)| > 1$. Получены оценки для стандартного алгоритма при использовании различного размера l_y области поиска $(2l_x + 1) \times (2l_y + 1)$. Для алгоритма формирования карты D_y используется фиксированный размер области поиска 11×5 пикселей, позволяющий обрабатывать стереоизображения с практически неограниченным рассогласованием в кадровом направлении.

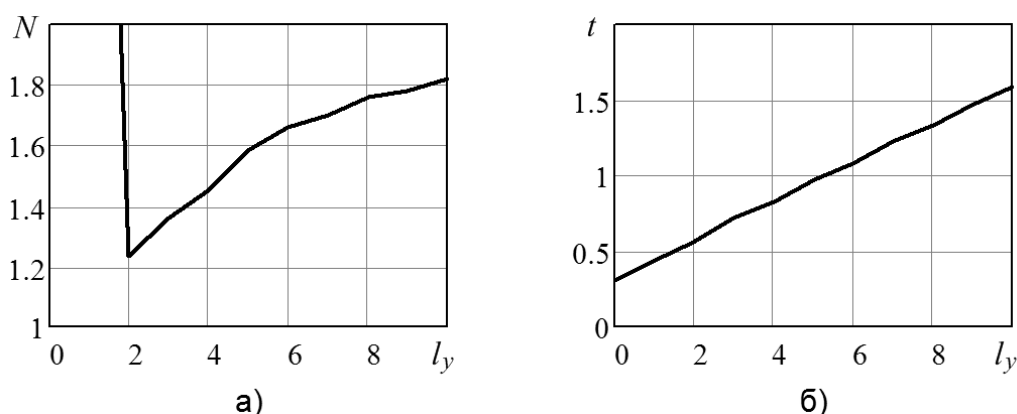


Рис. 2. Результаты сравнения алгоритмов:
а) отношение числа ошибок, б) отношение времени обработки

Из графика (рис. 2а) следует, что алгоритм, использующий карту D_y , обеспечивает получение более качественных результатов не только за счет корректного определения смещения координат одноименных точек в кадровом направлении, но и более надежного его определения в строчном. При этом время обработки, как показано на рисунке 2б, сокращается по сравнению со стандартным алгоритмом, если используется размер области поиска более 5 пикселей $l_y > 5$.

Формирование выходной ЦМР

Сформированные карты D_x , D_y представляют собой растровые изображения, определенные в системе координат базового снимка B_1 , при этом высота рельефа пропорциональна диспарантности $D_x(x, y)$ в данной точке. Для получения информации о рельефе местности в геодезической системе координат необходимо решить задачу прямой фотограмметрической засечки для всех идентифицированных одноименных точек. При этом карты D_x , D_y могут быть напрямую преобразованы в ЦМР, либо вначале сформирована триангуляционная модель пикетных точек, используемая для интерактивного контроля, а затем растровое изображение ЦМР.

Регулярная ЦМР строится в геодезической системе координат на эллипсоиде ПЗ-90 и представляет собой растровое изображение, для которого код яркости пикселя равен высоте рельефа в метрах соответствующей точки местности. Разрешение выходной ЦМР, формируемой по картам D_x , D_y , соответствует разрешению исходных снимков B_1 , B_2 с учетом уровня пирамиды $i_{\text{вых}}$. Для всех элементов карт D_x , D_y , задающих координаты одноименных точек, определяются геодезические координаты соответствующей точки местности. С этой целью ищется пересечение визирных лучей, с помощью которых были сформированы сопряженные точки изображений,

$$\begin{aligned} \mathcal{C}(\mathbf{F}_1^*, \mathbf{F}_2^*): [B_1(x, y), B_2(x + D_x(x, y), y + D_y(x, y))] &\rightarrow (l, b, h), \\ H(m, n) = h, \quad m = l/Dl + l_0, \quad n = b/Db + b_0, \end{aligned}$$

где \mathcal{C} – оператор вычисления трехмерных координат точки земной поверхности: широты, долготы и высоты; $H(m, n)$ – выходная ЦМР.

После выполнения данной процедуры точки $H(m, n)$ с неизвестной высотой, интерполируются с использованием алгоритма обратно взвешенных расстояний. Итоговая ЦМР сохраняется на диске в специализированном формате MSP или ГИС-формате. На рисунке 3 показан пример выходной ЦМР.

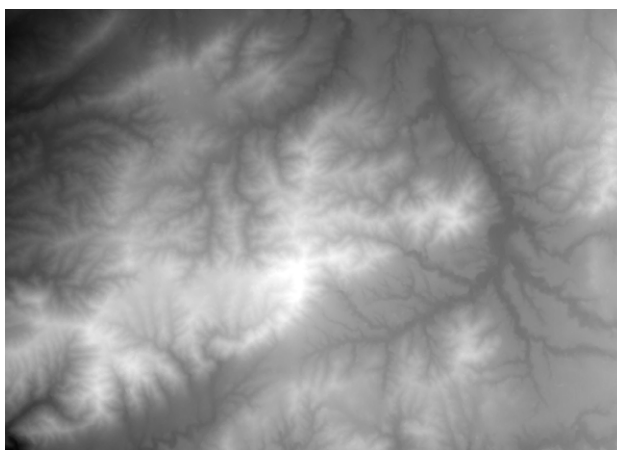


Рис. 3. Пример растровой ЦМР

Формирование триангуляционной модели по карте диспарантности

Для возможности ручного редактирования результатов автоматической обработки сформируем триангуляционную модель T пикетных точек $P = \{(x, y), d_x\}$, которая должна максимально точно аппроксимировать исходную карту диспарантности. Так как при работе в

анаглифических стереоочках имеется возможность изменять координаты одноименных точек только в строчном направлении, карту D_y в дальнейших расчетах использовать не будем.

Для решения задачи формирования триангуляционной модели могут быть использованы два подхода: получение модели, включающей все известные точки моделируемой поверхности, и ее упрощение до требуемого уровня [7], и постепенное наращивание модели путем добавления новых точек [8]. Из-за большого объема формируемых карт D_x был использован второй подход, для которого необходимо определить критерий выбора новых точек для добавления и критерий окончания процесса. Модель T , наиболее точно описывающая карту D_x , формируется исходя из условия:

$$T = \arg \min_T \sum_{(x,y)} e_T(x, y), \quad e_T(x, y) = |u_T(x, y) - D_x(x, y)|,$$

где $u_T(x, y)$ – интерполированное по модели T значение диспарантности, $e_T(x, y)$ – невязка в соответствующей точке.

Так как поиск новой точки для добавления, минимизирующей сумму модулей невязок, является слишком трудоемким, используем двухэтапный алгоритм формирования модели T . На первом этапе последовательно добавляются точки с максимальной невязкой $\arg \max_{(x,y)} e_T(x, y) > e_{\max}$, где

e_{\max} – значение максимально допустимой ошибки, задаваемое пользователем исходя из требований к точности модели и определяющее критерий останова алгоритма. Первоначальное множество вершин модели включает только 4 угловых точки карты D_x .

Полученная модель T_1 сглаживается на втором этапе. Для этого рассмотрим множество триангуляционных моделей $F(T_1)$, получаемых путем изменения координат вершин треугольников (и соответствующих им диспарантностей), входящих в модель T_1 и имеющих фиксированную связанность вершин. Из-за высокой трудоемкости для каждой точки рассматриваются только 8 соседних пикселей карты D_x , для выбора оптимального из которых используем критерий $\min_{(x,y)} \sum e_T(x, y)$. Выполнение данной процедуры для всех точек модели составляет одну итерацию алгоритма. Достаточно выполнить три итерации, чтобы обеспечить уменьшение суммы невязок примерно на 30 %.

Формирование ЦМР по триангуляционной модели

На первом шаге для всех пикетных точек решается задача прямой фотограмметрической засечки с целью получения геодезических координат местности $\{u, l, h\}$. В случае формирования ЦМР по нескольким стереопарам блока множества высотных точек всех стереопар объединяются с учетом областей перекрытия и идентифицированных на снимках облачных образований, которые не позволяют определить высоту рельефа соответствующего участка земной поверхности – эта информация восстанавливается по результатам обработки соседних стереопар. Координаты полученных точек пересчитываются в систему координат растровой ЦМР заданного масштаба, после чего формируется общая триангуляционная модель рельефа. Значения высот рельефа в узлах регулярной сетки восстанавливаются с использованием линейного алгоритма интерполяции по триангуляции Делоне [9].

Организация вычислительного процесса

Обработка космических стереоизображений высокого пространственного разрешения является очень трудоемкой с точки зрения затрат машинного времени, что потребовало разработки специальных подходов к организации вычислительного процесса на всех этапах

формирования ЦМР. Наибольшее время обработки занимает идентификация одноименных точек на стереопаре, поэтому на всех шагах формирования карт диспаратностей были применены параллельные вычисления; кроме того, так как обработка стереопары выполняется фрагментами с небольшой областью перекрытия, это позволило организовать конвейерное распараллеливание операций ввода-вывода. На рисунке 4 представлена зависимость времени формирования карт диспаратностей тестовой сцены 5000×5000 пикселей от числа задействованных процессоров, полученная на 8-процессорной ЭВМ IBM x3850 с объемом оперативной памяти 8 GB. Из графика видно, что при обеспечении достаточной производительности подсистемы ввода-вывода можно рекомендовать использование ЭВМ с числом процессоров вплоть до 8. Реализованные меры по оптимизации вычислительного процесса позволили значительно сократить общее время формирования выходной ЦМР.

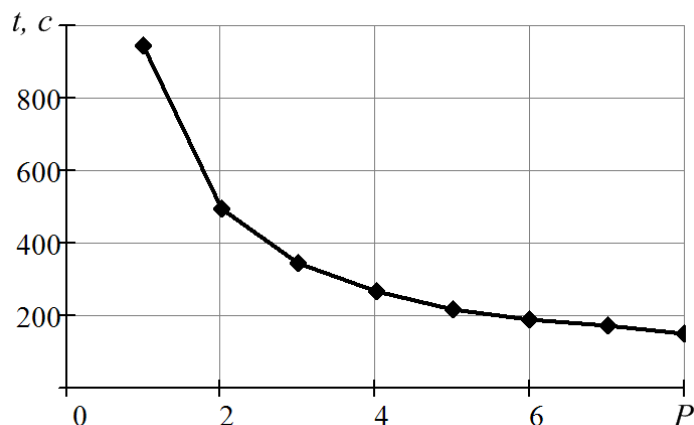


Рис. 4. Зависимость времени формирования карт диспаратностей t от числа процессоров P

Заключение

Рассмотренные алгоритмы реализованы в виде программного обеспечения геоинформационной системы GeoScan, используемой для обработки спутниковых изображений высокого пространственного разрешения. Апробация системы GeoScan выполнена по изображениям метрового разрешения от космического аппарата «Ресурс-ДК», полученным на разных витках полета спутника. Время формирования выходной ЦМР с пространственным разрешением 1 м по одной стереопаре размером 25000×55000 пикселей составляет порядка 3 часов на 8-процессорной ЭВМ.

Литература

1. Schmid, C., Mohr, R., Bauckhage, C. Evaluation of interest point detectors // International Journal of Computer Vision. 2000. № 37(2). P.151–172.
2. Harris, C. Stephens, M. A combined corner and edge detector // Alvey Vision Conference. 1988. P.147–152.
3. Скворцов А.В. Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне // Вычислительные методы и программирование, 2002. Т.3. С.14-39.
4. Scharstein D., Szeliski R. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms // International Journal of Computer Vision. 2002. № 1-3.
5. Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Идентификация одноименных точек на стереоснимках с использованием алгоритмов оптимизационного поиска // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. 2008.

6. *Hirschmuller H.* Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005. № 2.
7. *Lindstrom P., Turk. G.* Evaluation of memoryless simplification // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 1999. № 5(2). P.98-115.
8. *Ruppert J.*, A New and Simple Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation // Technical Report UCB/CSD 92/694, University of California at Berkely. 1992.
9. *Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И.* Высокопроизводительные алгоритмы формирования цифровой модели рельефа на основе точечного описания // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. 2007.

Digital elevation model generation algorithms based on “Resurs-DK” satellite imagery

О.А. Gomozov¹, А.Е. Kuznetsov², V.I. Pobaruev², V.I. Poshehonov², А.А. Suhov

¹ *Precise devices research institute
127490, Moscow, Dekabristov street, 51
E-mail: ctc@comail.ru*

² *Ryazan state radio engineering university,
390005 Ryazan, Gagarin street, 59/1
E-mail: gislab@org.etr.ru*

Algorithms for processing high resolution spaceborne stereo images, obtained from “Resurs-DK” satellite, are considered. Main technological stages of digital elevation model generation are described. Results of practical approbation of the developed software system and examples of final products are presented.

Keywords: spaceborne stereo image, block adjustment, stereopair, disparity map, triangulation model, digital elevation model.