

**А. Л. Резник<sup>1,2</sup>, В. М. Ефимов<sup>1</sup>, А. В. Торгов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
пр. Коптюга, 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: reznik@iae.nsk.su

## **ЭФФЕКТИВНЫЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ \***

Приводится описание алгоритмов, положенных в основу созданного в Институте автоматики и электрометрии СО РАН программно-алгоритмического комплекса, предназначенного для обработки динамических последовательностей цифровых аэрокосмических изображений, включая оценивание неизвестных геометрических параметров съемки и трехмерную реконструкцию рельефа земной поверхности. Особенность предложенного подхода заключается в том, что основной акцент в работе сделан на высокое быстродействие создаваемого программного обеспечения и полную автоматизацию процесса обработки, не требующую участия оператора.

*Ключевые слова:* цифровое изображение, межкадровая обработка, стереопроекция, трехмерная реконструкция.

### **Введение**

В статье исследуются методы и алгоритмы обработки цифровых изображений, в основе которых лежит не только внутрикадровая и межкадровая (попарная) обработка, но и совместная обработка последовательности изображений. С помощью таких алгоритмов многие задачи цифрового анализа многомерных сигналов и изображений могут быть решены эффективнее, если иметь в виду точность получаемого решения, а некоторые задачи (например, выделение и сопровождение высокоскоростной маневрирующей цели; выявление моментов зарождения сложных атмосферных явлений; локализация малоразмерных и слабоконтрастных движущихся объектов и т. п.) в принципе не могут быть успешно решены без наличия последовательности разнесенных во времени кадров, получаемых с одной или нескольких наблюдательных платформ. В связи с большим и сверхбольшим объемом подлежащей обработке информации в таких задачах на первый план выходят вопросы быстрого действия разрабатываемых алгоритмов.

### **Ускоренное восстановление глубины трехмерной сцены и оценка неизвестных параметров камеры на основе одновременной обработки серии стереопроекций**

В дальнейшем будут представлены методы и реализованный на их основе программно-алгоритмический комплекс, ориентированный на автоматическую обработку (т. е. обработку без участия оператора) последовательности цифровых аэрокосмических изображений в условиях неполной или неточной информации о параметрах съемки. Результатом такой обработки является полный набор оцененных внутренних и внешних параметров камер и, как следствие этого, восстановленный объемный рельеф наблюдаемого участка земной поверхности.

Необходимость разработки специальных методов и алгоритмов для ускоренного решения задач восстановления объемных трехмерных сцен по последовательности космических стереопроекций возникает во многих случаях, когда требуется в реальном време-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06-01-00653), Президиума Российской академии наук (программа № 14.1/2006 г.) и Президиума Сибирского отделения РАН (интеграционный проект № 3.9/2006 г.).

ни отслеживать динамику развития быстротекущих процессов на поверхности Земли, при космическом мониторинге районов экологических и техногенных катастроф (как правило, это результат аварийных выбросов в атмосферу токсичных или радиоактивных веществ, взрывов на нефте- и газопроводах, разливов нефти и т. п.), при регистрации метеорологических и природных катаклизмов (тайфуны, торнадо, вулканические извержения и т. п.), а также в военных областях при оперативном контроле плановых либо несанкционированных ракетных пусков.

При рассмотрении подобного рода проблем наличие заранее составленных даже самых подробных и точных карт местности недостаточно для успешного решения указанных задач, так как выявлять малоразмерные объекты и локальные отличия на стереоизображениях приходится с учетом внешних характеристик съемки, зависящих от текущих погодных условий, облачности, освещенности, от состояния подстилающей поверхности и т. д. Отличие предлагаемого нами подхода от классических методов [1–4], а также от интенсивно развиваемых в последние годы новых вычислительных схем, ориентированных на эффективное (в плане быстродействия) решение задач цифровой стереообработки [5–10] заключается, во-первых, в комплексном подходе к проблеме, подразумевающим сквозную программную поддержку всех этапов автоматического восстановления наблюдаемой трехмерной сцены; во-вторых, в совместной параллельно-групповой обработке сразу нескольких стереопроекции, что значительно сокращает время получения решения, одновременно делая его существенно более надежным, несмотря на то что для этого приходится отыскивать решение многомерной нелинейной оптимизационной задачи.

### Постановка задачи

Имеется последовательность цифровых изображений, регистрируемых во время пролета искусственного спутника Земли над исследуемым участком земной поверхности. Регистрация осуществляется с помощью ПЗС-матрицы, состоящей из фотоэлементов, каж-

дый из которых имеет прямоугольную форму размером  $\omega_x \times \omega_y$ . Все зарегистрированные снимки сопровождаются дополнительной траекторной информацией о местоположении  $(X_G, Y_G, Z_G)$  спутника в жестко связанной с Землей декартовой системе координат  $(G)$  с центром в некоторой точке  $C_0$ . Находящаяся на спутнике следящая система осуществляет необходимые угловые перемещения, с тем чтобы оптическая ось камеры постоянно была направлена в точку  $C_0$ .

Входными данными для алгоритма реконструкции являются непосредственно сами цифровые изображения  $U_{t_k}$ , зарегистрированные в моменты времени  $t_k$ , а также набор связанных с ними траекторных координат спутника:

$\alpha(t_k)$  – азимутальный угол в плоскости  $(X_G, Y_G)$ ;

$\varphi(t_k)$  – угол склонения спутника над горизонтом;

$l(t_k)$  – расстояние от спутника до центра координат  $C_0$ .

Требуется, используя эту неполную информацию о геометрии съемки (в частности, отсутствуют сведения об углах поворота камеры вокруг оптической оси), оценить положение главной точки изображения (т. е. координаты оптического центра системы в плоскости проекции), рассчитать углы поворота камеры на каждом из обрабатываемых снимков и далее восстановить неизвестный рельеф. Количество имеющихся исходных стереопроекции, регистрируемых за один пролет спутника над выбранным участком земной поверхности и используемых в дальнейших расчетах, – порядка нескольких сотен.

Сначала опишем разработанный и успешно примененный нами алгоритм 3D реконструкции, предполагающий многократное итеративное решение переопределенных систем линейных уравнений с проведением глобальной оптимизации по набору неизвестных параметров съемки. Затем кратко остановимся на предложенном и программно реализованном алгоритме автоматического поиска сопряженных точек (сопряженными здесь и в дальнейшем будут называться точки на двух и более разноракурсных плоских проекциях одной и той же трехмерной сцены, физически соответствующие одному и тому же точечному объекту).

**Восстановление глубины сцены по известным сопряженным точкам**

Описываемый алгоритм восстановления 3D сцены предполагает проведение реконструкции по неограниченному (если отвлекаться от вопросов быстродействия) количеству одновременно обрабатываемых проекций при заранее найденных сопряженных точках. Пусть  $N$  – число заданных сопряженных точек на каждой из  $K$  проекций, отвечающих  $K$  различным пространственно-временным положениям спутника (рис. 1). Введем для каждого положения спутника свою подвижную систему координат. Ее начало поместим в точку  $C_k$ , соответствующую положению спутника в момент времени  $t_k$  (т. е. в момент регистрации  $k$ -й проекции). Оптическая ось камеры  $Z_k$  в момент  $t_k$  направлена в точку  $C_0$  – центр глобальной системы координат. Оси  $X_k, Y_k$  выберем так, чтобы, во-первых, создавалась «правая» декартова система координат  $(X_k, Y_k, Z_k)$ , во-вторых, чтобы ось  $X_k$  была параллельна плоскости  $(X_G, Y_G)$  глобальной системы координат  $(X_G, Y_G, Z_G)$ . Тогда произвольная точка  $M$ , имеющая координаты  $(X_G(M), Y_G(M), Z_G(M))$  в глобальной системе координат, проецируется в плоскости изображения  $P_k$  в точку с текущими проекционными координатами

$$\begin{aligned} x_k &= -\frac{1}{\omega_x} \left[ f \times \frac{X_k(M)}{Z_k(M)} \right] + X_0; \\ y_k &= -\frac{1}{\omega_y} \left[ f \times \frac{Y_k(M)}{Z_k(M)} \right] + Y_0. \end{aligned} \tag{1}$$

В этом соотношении введены следующие обозначения:

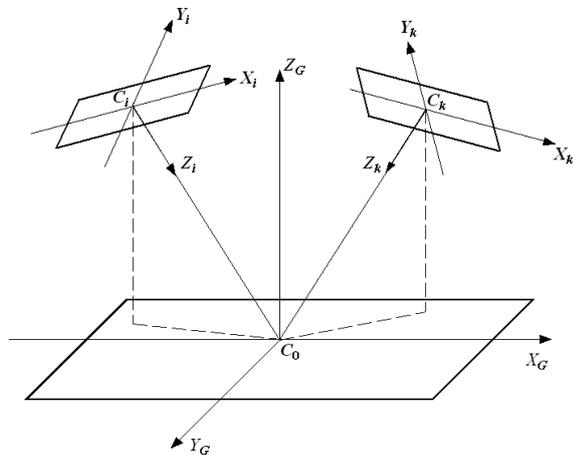


Рис. 1. Глобальная и локальные (подвижные) спутниковые системы координат

$\omega_x, \omega_y$  – линейные размеры одного элемента ПЗС-матрицы;

$f$  – фокусное расстояние камеры;

$X_0, Y_0$  – положение главной точки камеры;

$(X_k(M), Y_k(M), Z_k(M))$  – координаты точки  $M$  в  $k$ -й подвижной системе координат спутника, связанные с глобальными координатами точки  $M$  соотношением

$$\begin{pmatrix} X_k(M) \\ Y_k(M) \\ Z_k(M) \end{pmatrix}^T = R_k \times \begin{pmatrix} X_G(M) - dx_k \\ Y_G(M) - dy_k \\ Z_G(M) - dz_k \end{pmatrix},$$

где  $R_k$  – матрица поворота для перехода из глобальной в  $k$ -ю подвижную систему координат  $(X_k, Y_k, Z_k)$ , а  $(dx_k, dy_k, dz_k)$  – координаты спутника в глобальной системе координат, которые легко рассчитать из имеющихся исходных данных (расстояние до спутника  $L_k$ , азимуталь-

ный угол  $\alpha_{t_k}$  и угол восхождения  $\varphi_{t_k}$ ):

$$dx_k = L_k \times \cos(\varphi_{t_k}) \times \cos(\alpha_{t_k});$$

$$dy_k = L_k \times \cos(\varphi_{t_k}) \times \sin(\alpha_{t_k});$$

$$dz_k = L_k \times \sin(\varphi_{t_k}).$$

Каждая из матриц поворота  $R_k$  определяется как произведение матриц поворота на известные углы  $\alpha_{t_k}, \varphi_{t_k}$  и подлежащий оцениванию неизвестный угол поворота камеры вокруг оптической оси  $\Delta_{t_k}$ :

$$\begin{aligned} R_k &= R_k^\Delta \times R_k^\varphi \times R_k^\alpha; \\ R_k^\alpha &= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{t_k} & \sin \alpha_{t_k} & 0 \\ -\sin \alpha_{t_k} & \cos \alpha_{t_k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ R_k^\varphi &= \begin{pmatrix} -\sin \varphi_{t_k} & 0 & \cos \varphi_{t_k} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \varphi_{t_k} & 0 & -\sin \varphi_{t_k} \end{pmatrix}, \\ R_k^\Delta &= \begin{pmatrix} \cos \Delta_{t_k} & -\sin \Delta_{t_k} & 0 \\ \sin \Delta_{t_k} & \cos \Delta_{t_k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Для нахождения неизвестных параметров съемки и одновременного расчета трехмерных координат сцены, вычисляемых для всех сопряженных точек, имеем в общем случае переопределенную систему линейных (по отно-

шению к координатам неизвестного рельефа) уравнений

$$A \times V = B, \quad (2)$$

которая получается объединением соотношений вида (1), выписанным для всех  $N$  сопряженных точек применительно к каждой из  $K$  проекций. Здесь

$$V = (V_G(M_1), V_G(M_2), V_G(M_3), \dots, V_G(M_N))^T;$$

$$V_G(M_n) = (X_G(M_n), Y_G(M_n), Z_G(M_n)),$$

причем матрица  $A$  размерностью  $(2NK \times 3N)$  и матрица  $B$  размерностью  $(3N \times 1)$  вычисляются программно. Решение системы (2) относительно линейно входящих в нее переменных  $X_G(M_n)$ ,  $Y_G(M_n)$ ,  $Z_G(M_n)$  рассчитывается по методу наименьших квадратов с помощью псевдоинверсии:

$$V = (A^T \times A)^{-1} \times A^T \times B.$$

По нелинейно входящим неизвестным параметрам  $X_0$ ,  $Y_0$  и набору углов  $\Delta_{t_k}$  (углы поворота камеры вокруг оптической оси) проводится многомерная итерационная оптимизация с помощью направленного перебора. Основное достоинство так организованного вычислительного алгоритма, отличающее его от всех известных методов решения задач 3D-реконструкции, заключается в том, что этот многомерный оптимизационный процесс оказывается не просто высокоэффективным в плане быстродействия, но также абсолютно устойчивым, в результате чего надежные оценки неизвестных параметров съемки и восстановление неизвестной трехмерной сцены осуществляются при отсутствии каких бы то ни было априорных сведений о возможных диапазонах их изменения. Проведенные расчеты с использованием спутниковых данных показали высокую точность вычисления главной точки изображения и неизвестных углов поворота камеры, что позволило эффективно и надежно восстанавливать неизвестный трехмерный рельеф по серии космических стереопроекций в условиях реально существующих помех и шумов в отсутствие полной информации о геометрии съемки.

#### Поиск сопряженных точек при известных внутренних параметрах камеры и известной геометрии съемки

Возвращаясь теперь к важнейшей задаче 3D-реконструкции, связанной с поиском

сопряженных точек, рассмотрим сначала алгоритм, построенный для случая, когда эти сопряженные точки ищутся на двух стереопроекциях, полученных одной и той же камерой при известных внутренних параметрах оптической системы и при наличии полной информации о геометрии съемки. Такими априорно известными параметрами в нашем случае являются положение камеры в пространстве относительно глобальной системы координат, положение главной точки изображения в плоскости проекции, линейные размеры элемента ПЗС-матрицы, фокусное расстояние камеры и угол поворота камеры вокруг своей оптической оси.

Поиск сопряженных точек осуществляется при соблюдении дополнительного условия – расстояние от камеры до восстанавливаемой трехмерной сцены должно быть существенно больше характерного разброса высот искомого рельефа. (Заметим, что в задачах космического стереовидения, для решения которых в первую очередь разрабатывался описываемый алгоритм, расстояние от спутника до наблюдаемого участка земной поверхности на несколько порядков больше разброса высот на поверхности Земли, поэтому данное условие всегда выполнено.)

При описании реализованных программных алгоритмов ускоренного поиска сопряженных точек нам потребуется понятие эпилюлярной линии (эпилюляра) как базового элемента эпилюлярной геометрии. Рассмотрим две проекции  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 2). Пусть на одной из них – скажем, на  $P_1$  – существует точка  $A$ , являющаяся проекцией одной

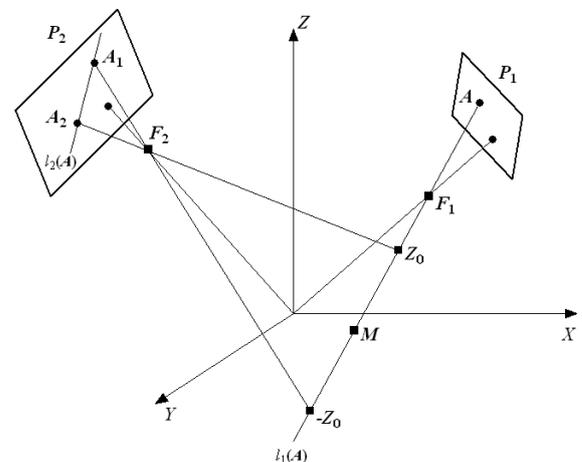


Рис. 2. Построение эпилюлярной линии  $(A_1, A_2)$ , порождаемой точкой  $A$

из точек рельефа  $M$ . Очевидно, что множество пространственно распределенных точек, которые могут проецироваться в точку  $A$ , представляет собой прямую  $l_1(A)$ , которая проходит через саму исходную точку  $A$  и оптический центр камеры  $F_1$ . Проекция прямой  $l_1(A)$  на вторую проекционную плоскость  $P_2$  есть прямая  $l_2(A)$ , которая образуется проецированием в плоскость  $P_2$  через оптический центр камеры  $F_2$  всех точек, принадлежащих прямой  $l_1(A)$ . Прямая  $l_2(A)$  называется эпполярной, порождаемой точкой  $A$ . Важность понятия эпполяры объясняется тем, что если на второй проекции имеется точка, сопряженная с заданной, то она с неизбежностью лежит на эпполяре, так что знание эпполяры значительно ограничивает область поиска взаимно-сопряженных точек и сокращает время их нахождения.

При известной геометрии съемки для каждой точки первого изображения можно найти эпполяру на втором изображении. Для этого необходимо найти для точки  $A$  первого изображения две точки  $A_1$  и  $A_2$  на втором изображении, принадлежащие эпполяре. Воспользуемся обозначениями, введенными в предыдущем разделе. Пусть точка  $A$  на первой проекции имеет координаты  $(x_A, y_A)$ , тогда система уравнений (1) для точки  $A$  первого изображения запишется так:

$$\begin{aligned} x_A &= -\frac{1}{\omega_x} \left[ f \times \frac{X_1(M)}{Z_1(M)} \right] + X_0; \\ y_A &= -\frac{1}{\omega_y} \left[ f \times \frac{Y_1(M)}{Z_1(M)} \right] + Y_0. \end{aligned} \quad (3)$$

В данной системе два уравнения и три неизвестных  $(X_1(M), Y_1(M), Z_1(M))$  – положение точки  $M$  в 1-й системе координат, связанной с плоскостью  $P_1$ . Как показано в предыдущем разделе, эти текущие координаты  $(X_1(M), Y_1(M), Z_1(M))$  связаны с глобальными координатами  $(X_G(M), Y_G(M), Z_G(M))$  соотношением

$$\begin{pmatrix} X_1(M) \\ Y_1(M) \\ Z_1(M) \end{pmatrix}^T = R_1 \times \begin{pmatrix} X_G(M) \\ Y_G(M) \\ Z_G(M) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} dx_1 \\ dy_1 \\ dz_1 \end{pmatrix}^T.$$

Положим в этом уравнении сначала  $Z_G(M) = Z_1$ , а затем  $Z_G(M) = Z_2$ , где  $Z_1$  и  $Z_2$  – некоторые произвольные высоты. Тогда получим два уравнения с двумя неизвестными, раз-

решая которые, найдем  $(X_G(M), Y_G(M))$ . Далее вычислим значения  $(X_{G1}(M), Y_{G1}(M))$  и  $(X_{G2}(M), Y_{G2}(M))$  для высот  $Z_1$  и  $Z_2$  соответственно. Используя для системы координат камеры второго изображения преобразование

$$\begin{pmatrix} X_1(M) \\ Y_1(M) \\ Z_1(M) \end{pmatrix}^T = R_2 \times \begin{pmatrix} X_G(M) \\ Y_G(M) \\ Z_G(M) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} dx_2 \\ dy_2 \\ dz_2 \end{pmatrix}^T$$

и последовательно подставляя в него значения  $(X_{G1}(M), Y_{G1}(M), Z_1)$  и  $(X_{G2}(M), Y_{G2}(M), Z_2)$ , найдем координаты  $(X_{21}(M), Y_{21}(M), Z_{21}(M))$  и  $(X_{22}(M), Y_{22}(M), Z_{22}(M))$  точки  $M$ , соответствующие высотам  $Z_G(M) = Z_1$  и  $Z_G(M) = Z_2$ . Пересчитывая полученные значения в систему координат второго изображения, т. е. используя соотношения (3), получим в плоскости  $P_2$  две пары проективных координат  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ , которые отвечают двум положениям точки  $M$  – с высотами  $Z_1$  и  $Z_2$  соответственно. Найденные проективные координаты  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  второго изображения являются искомыми точками  $A_1$  и  $A_2$  нашей эпполяры для точки  $A$ . Теперь для всех точек в пределах, ограниченных выделенным участком эпполярной линии, необходимо провести корректное сопоставление окрестностей с окрестностью исходной точки  $A$ , чтобы найти для нее точное соответствие на второй стереопроекции. Вообще говоря, стандартным методом в таких случаях является корреляционный прием – в первую очередь потому, что коэффициент корреляции инвариантен по отношению к линейным преобразованиям сигнала. Однако следует отметить, что последовательное проведение корреляции требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому нами для ускорения расчетов был программно реализован максимально упрощенный алгоритм сопоставления окрестностей, не требующий проведения трудоемких операций типа свертки, а основанный на процедуре с минимальным числом простейших арифметических операций типа сложения-вычитания. Расчеты показали, что при тех реальных световых и проективных искажениях, которые имеются на обрабатываемых космических снимках, использование такого упрощенного критерия существенно повышает скорость выполнения программ, практически не ухудшая качества сопоставления окрестностей по сравнению со стандартной процедурой корреляции.

### **Автоматический поиск сопряженных точек при неизвестном положении главной точки изображения и неизвестных углах поворота камеры вокруг оптической оси**

Описанный выше алгоритм поиска сопряженных точек эффективно работает в том случае, когда полностью известны все внутренние и внешние параметры камеры, включая полные сведения о геометрии съемки. Задача существенно усложняется, когда часть этих параметров неизвестна. В нашем случае, как уже отмечалось, требовалось разработать устойчивый алгоритм нахождения сопряженных точек в условиях, когда неизвестны координаты главной точки изображения и углы поворота камеры вокруг оптической оси. При этом угол расхождения между направлениями оптических осей анализируемых стереопроекций предполагался произвольным.

Для решения этой задачи нами был разработан специальный алгоритм отыскания сопряженных точек на стереопроекциях, не использующий априорных сведений о положении главной точки камеры и об углах поворота камеры вокруг своей оптической оси. Алгоритм предназначен для работы в условиях, когда характерное удаление камеры от наблюдаемого участка земной поверхности в момент регистрации первой и второй стереопроекций (эти расстояния обозначим соответственно  $L_1$  и  $L_2$ ) существенно больше перепада высот восстанавливаемого рельефа. Таким образом, предполагается, что значения высот в каждой точке восстанавливаемого рельефа лежат в некотором интервале ( $Z_{\min}, Z_{\max}$ ), причем ( $Z_{\max} - Z_{\min}$ ) много меньше расстояний  $L_1$  и  $L_2$ . Координаты камеры в глобальной системе, а также фокусное расстояние камеры и линейные размеры элемента ПЗС-матрицы считаются известными. Алгоритм содержит несколько основных этапов.

Сначала осуществляется поиск особых (реперных) точек. Сразу отметим, что алгоритмы поиска особых точек должны устойчиво выделять некие экстремальные локально-точечные неоднородности, присутствующие на анализируемых изображениях. В описываемом алгоритме сначала строится поле, характеризующее дисперсию сигнала в окрестности изучаемой точки. Координаты глобального максимума поля дисперсии являются главными

ми претендентами на включение в список особых точек. Затем, исключая из дальнейшего рассмотрения найденную точку максимума вместе с ее окрестностью (в нашем случае это было окно  $9 \times 9$  элементов), аналогичным образом (т. е. путем отыскания глобального максимума по оставшейся области) определяется вторая особая точка и т. д. Количество выделяемых особых точек можно варьировать изменением размера окна.

Суть процедуры, осуществляемой на следующем этапе, заключается в том, чтобы подгонкой неизвестных углов поворота камеры вокруг оптической оси, а также неизвестных координат главной точки изображения добиться такого положения, чтобы максимально возможному числу особых точек, найденных на первом изображении, были поставлены в соответствие особые точки на другом изображении. При этом должна быть минимизирована сумма невязок, взятая по всем сопряженным точкам с учетом уже известного проективно-преобразования, связывающего эти стереопроекции. Важным моментом здесь является обеспечение необходимого быстродействия, поскольку, во-первых, приходится вести оптимизацию сразу по нескольким параметрам, входящим в систему уравнений нелинейно, во-вторых, необходимо корректно учесть тот факт, что особые точки на изображениях имеют различную пространственную глубину.

Обойти различие особых точек по пространственной глубине, не прибегая к перебору в диапазоне возможного изменения глубин, удастся за счет того, что разброс высот особых точек на изображениях, как отмечалось выше, несопоставим с расстоянием от них (как и от всей наблюдаемой трехмерной сцены) до точек съемки. Поэтому, временно считая наблюдаемый объемный рельеф плоским, мы вносим в минимизируемый функционал незначительные искажения, которые в решаемых нами задачах дальнего космического стереовидения практически не влияют на точность оценки неизвестных параметров съемки и надежность программно-автоматического отыскания сопряженных точек. Итак, сначала осуществляется итеративный перебор по углам поворота камеры вокруг оптической оси. Далее последовательно для каждой особой точки исходного изображения производится поиск эпиполяр на других изображениях.

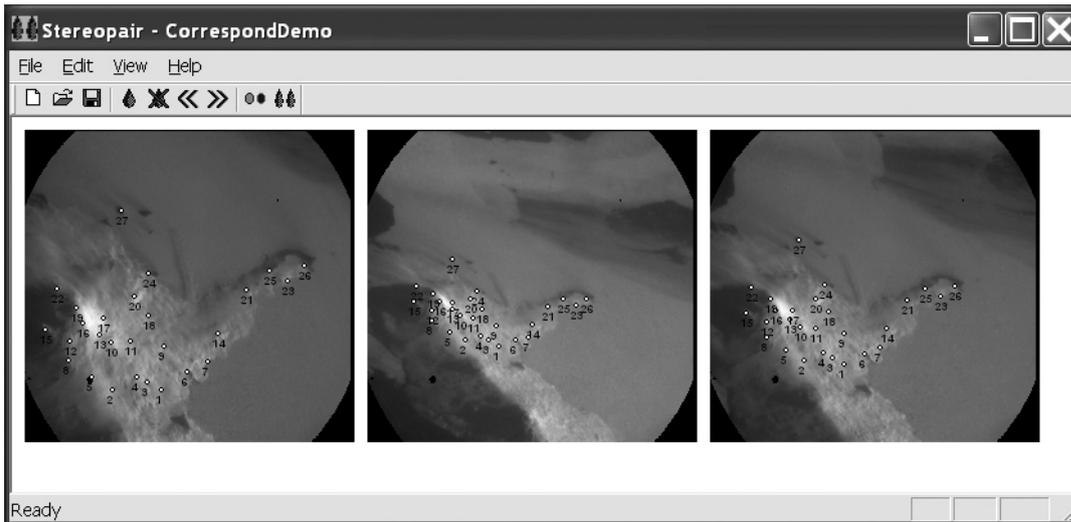


Рис. 3. Пример работы программы автоматического поиска сопряженных точек

Поиск осуществляется при ограничении на высоту соответствующей особой точки, которая считается находящейся в интервале ( $Z_{\min}$ ,  $Z_{\max}$ ), так что эпиполяра из линии преобразуется в отрезок. При этом предварительно полагаем координаты главной точки  $X_0$  и  $Y_0$  равными половине ширины рабочего диапазона ПЗС-матрицы по осям  $X$  и  $Y$  соответственно, т. е. на первом шаге процесса подгонки неизвестных параметров считаем, что оптическая ось проецируется в геометрический центр снимка.

В дальнейшем алгоритм вычислений основывается на том, что при сдвиге главной точки камеры ( $X_0, Y_0$ ) на вектор ( $\Delta X_0, \Delta Y_0$ ) все изображение смещается на вектор ( $\Delta X_0, \Delta Y_0$ ). Следовательно, найденные нами эпиполяры также будут смещены на некоторый постоянный вектор ( $\Delta X_0', \Delta Y_0'$ ) на каждом из ответных изображений, так что минимизацию совокупной невязки необходимо проводить с учетом указанного сдвига. Осуществлять полный перебор по параметрам  $X_0, Y_0$  при реальных размерах современных ПЗС-матриц ( $10^5$  и более элементов) абсолютно нереально. Находить индивидуальный сдвиг ( $\Delta X_0', \Delta Y_0'$ ) для каждой из эпиполяр, минимизирующий сумму расстояний от них до особых точек второго изображения, нецелесообразно, так как фактически это эквивалентно такому же перебору. Поэтому нами реализован быстродействующий алгоритм, суть которого заключается в следующем. Каждой из  $N_{p1}$  особых точек одного изображения последовательно ставится в соответствие каждая из  $N_{p2}$  особых точек дру-

гого изображения. Затем находится невязка, однозначно определяемая расстоянием между центром эпиполяры, порождаемой особой точкой первого изображения, и поставленной в соответствие особой точкой второго изображения. Заметим, что вычисление невязки должно вестись, как уже отмечалось, с учетом неизвестного сдвига эпиполяры на вектор ( $\Delta X_0', \Delta Y_0'$ ), но в данном случае возможность оптимизации по неизвестному вектору сдвига обеспечивается тем, что он на каждом шаге перебора по углам постоянен для всех эпиполяр. Суммарная невязка по всем сопоставляемым особым точкам характеризует степень удачности или неудачности «привязки» особых точек двух изображений при текущих значениях подгоняемых неизвестных параметров. Такой алгоритм не требует сверхмощной вычислительной поддержки и вполне реализуем на современных персональных ЭВМ средней мощности.

На рис. 3 показан пример автоматического поиска сопряженных точек при угле расхождения между направлениями оптических осей снимков более  $15^\circ$ . Проведенные расчеты показали, что при расхождении направлений оптических осей на угол до  $30^\circ$  алгоритм уверенно выделяет при первом проходе до 25–30 точек соответствия, не допуская при этом ни одной сбойной ситуации.

### Заключение

Представленное алгоритмическое и программное обеспечение позволяет в полно-

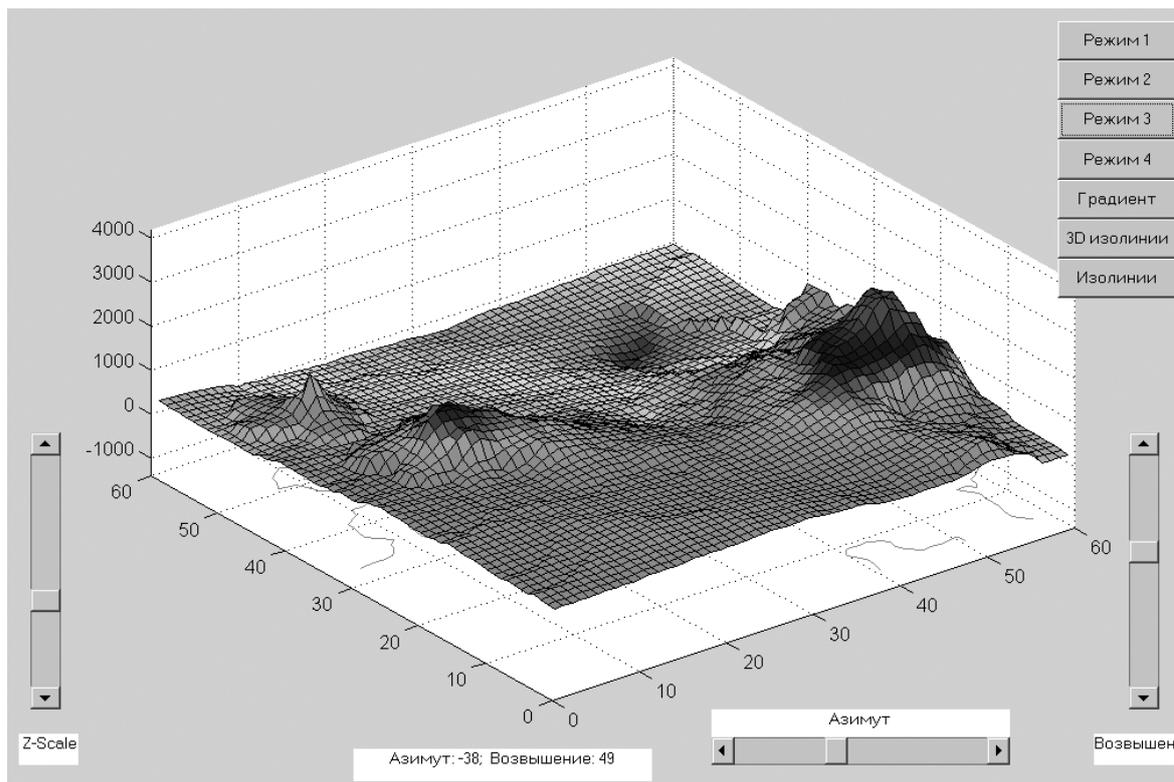


Рис. 4. Пример реконструкции участка земной поверхности (район вулкана Эребус в Антарктиде) по пяти стереопроекциям

стью автоматическом режиме последовательно решать три задачи: оценка неизвестных параметров съемки (координат главной точки изображения и углов поворота камеры вокруг оптической оси); нахождение сопряженных точек при произвольных базовых углах между направлениями оптических осей; восстановление неизвестного рельефа земной поверхности с помощью одновременной параллельно-групповой обработки нескольких стереопроекций. Кроме того, при создании функционально завершенного программно-алгоритмического комплекса космического мониторинга земной поверхности были решены задачи оптимальной интерполяции трехмерных сцен по нерегулярной системе отсчетов, а также задачи оптимального сжатия динамической последовательности цифровых изображений без потери точности. Разработанный на основе представленных алгоритмов программный пакет прошел успешную проверку на модельных (искусственно сгенерированных) стереоизображениях, а также при обработке реальных изображений (рис. 4), полученных с высокотраекторного искусственного спутника Земли MSX во время пролета над районом вулкана Эребус в Антарктиде.

### Список литературы

1. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989. 487 с.
2. Faugeras O. Fundamentals in computer vision. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
3. Marr D. Vision. N. Y.: W. H. Freeman, Inc, 1982.
4. Luong Q.-T., Faugeras O. D. The fundamental matrix: theory, algorithms, and stability analysis // International Journal of Computer Vision. 1996. Vol. 1. P. 43–76,
5. Zhou G., Albertz J., Gwinner K. Extracting 3D information using temporal-spatial analysis of aerial image sequences // Photogrammetry Engineering & Remote Sensing. 1999. Vol. 65. No. 7. P. 823–832.
6. Koch R., Pollefeys M., Van Gool L. Multi viewpoint stereo from uncalibrated video sequences // Proc. ECCV'98. Freiburg, Germany, 1998.
7. Beardsley P., Torr P., Zisserman A. 3D model acquisition from extended image sequences' // Proc. ECCV'96. Cambridge, UK, 1996.
8. Toga A. Three-dimensional reconstruction // Three-Dimensional Neuroimaging. N. Y.: Raven Press, 1990.

9. Kosykh V. P., Kirichuck V. S., Peretyagin G. I., Ivanov V. A. Reconstruction of time-dependent three-dimensional scenes based on analysis of sequences of stereo images // Proc. ISAS/SCI-2001. Orlando, Florida, USA, July 22–25. Orlando, 2001. Vol. 13. P. 35.

10. Киричук В. С., Косых В. П. Точность оценивания рельефа по последовательности перспективных изображений // Автометрия. 2002. № 5. С. 3–16.

*Материал поступил в редколлегию 17.07.2008*

**A. L. Reznik, V. M. Efimov, A. V. Torgov**

**EFFECTIVE METHODS ON SPEED  
OF DIGITAL PROCESSING DYNAMIC SEQUENCES OF IMAGES**

The sharply risen performance capabilities of the modern production-type computers allow the successful use of hybrid computing schemes in the problems related to images sequence concurrent processing. These schemes are based, on the one hand, on the most efficient recently developed analytic and numerical methods for the problem solution, and, on the other hand, on combination of methods in question with concurrent processing of not one or two images but a sequence of those. The stable method of this type for estimation of unknown parameters of camera and terrain relief reconstruction via a joint simultaneous processing of arbitrary number of satellite images is presented in this paper.

*Keywords:* digital image, interframe processing, stereoprojection, 3D reconstruction.