

МОДЕЛИРОВАНИЕ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 681.3

А. Л. Резник, К. Ю. Мокин

*(Новосибирск)***БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ
НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕРЫ
И АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК СОПРЯЖЕННЫХ ТОЧЕК
В ЗАДАЧАХ КОСМИЧЕСКОГО СТЕРЕОВИДЕНИЯ***

Описывается алгоритмическое и программное обеспечение, предназначенное для сквозной программной поддержки процесса автоматической обработки серии цифровых стереопроекций, получаемых во время пролета высокотраекторных искусственных спутников Земли над заданным участком земной поверхности, с целью восстановления глубины наблюдаемой трехмерной сцены при неточных или неполных данных о внешних параметрах съемки.

Введение. Необходимость ускоренного решения задач восстановления объемных трехмерных сцен по последовательности космических стереопроекций возникает во многих случаях, когда требуется в реальном времени отслеживать динамику развития быстропротекающих процессов на поверхности Земли, при космическом мониторинге районов экологических и техногенных катастроф (возникших, например, в результате 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 наличия 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 существующих в данный момент времени внешних характеристик съемки,

* Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и технологий РФ (программа «Модели, методы и программно-аппаратные средства обработки и анализа данных дистанционного зондирования, получаемых с сети космических станций, для оценивания в реальном времени динамики событий и явлений на поверхности Земли и в атмосфере», грант № 0201.05.221).

связанных с текущими погодными условиями, освещенностью, состоянием подстилающей поверхности и т. д.

Отличие предлагаемого нами подхода от классических методов [1–6], а также от интенсивно развиваемых в последние годы новых вычислительных схем [7–14], ориентированных на эффективное (в плане быстродействия) решение задач цифровой стереообработки, заключается, во-первых, в комплексном подходе к проблеме, подразумевающем сквозную программную поддержку всех этапов автоматического восстановления наблюдаемой трехмерной сцены, во-вторых, в совместной параллельно-групповой обработке сразу нескольких стереопроекций, что значительно сокращает время получения решения, одновременно делая его существенно более надежным.

1. Постановка задачи. Имеется последовательность цифровых изображений в виде файлов bmp-формата, регистрируемых во время пролета искусственного спутника Земли над исследуемым участком земной поверхности. Регистрация осуществляется с помощью ПЗС-матрицы, имеющей 244×256 прямоугольных разрешающих элементов размером $ix \times iy$ каждый (в нашем случае $ix/f = 0,000108$, $iy/f = 0,000092$, где f – фокусное расстояние камеры). Частота съемки 120 снимков в минуту. Характерное удаление спутника от Земли (точнее, от некоторой заранее выбранной точки C_0 , принимаемой в дальнейшем за начало глобальной системы координат) изменяется от ~ 2000 км (момент появления спутника над горизонтом) до ~ 1000 км (в этот момент угол склонения спутника над горизонтом составляет около 50°). Каждый из зарегистрированных снимков сопровождается дополнительной траекторной информацией о местоположении (X_G, Y_G, Z_G) спутника в жестко связанной с Землей декартовой системе координат G с центром в упомянутой 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 (например, отсутствие сведений об углах поворота камеры вокруг оптической оси), оценить положение главной точки изображения (т. е. координаты оптического центра системы в плоскости проекции) и далее восстановить неизвестный рельеф. Количество имеющихся исходных стереопроекций, регистрируемых за один пролет спутника над выбранным участком земной поверхности и использованных в расчетах, порядка нескольких сотен.

Ранее нами [15–17] при решении аналогичной задачи 3D-реконструкции предполагалось, что уже известны сопряженные точки, т. е. локально-точечные особенности на изображениях, которые физически соответствуют одним и тем же малоразмерным неоднородностям, отчетливо проявляющимся одновременно на всех снимках. Фактически же эта работа проводилась в диалоговом режиме с помощью графического редактора с решающим участием оператора за пультом ЭВМ. В данной работе нам удалось построить и программно реализовать алгоритмы автоматического поиска сопряженных точек и тем самым полностью автоматизировать процесс восстановления объемной трехмерной сцены по серии последовательных стереопроекций.

Для цельности изложения сначала опишем разработанный и успешно примененный нами алгоритм 3D-реконструкции, предполагающий многократное итеративное решение по методу наименьших квадратов (МНК) переопределенных систем линейных уравнений с проведением глобальной оптимизации по набору неизвестных параметров съемки. Затем подробно остановимся на предложенном и программно реализованном алгоритме автоматического поиска сопряженных точек.

2. Восстановление глубины сцены по известным сопряженным точкам. Описываемый алгоритм восстановления 3D-сцены предполагает проведение реконструкции по неограниченному (если отвлечься от вопросов быстродействия) количеству одновременно обрабатываемых проекций при заранее найденных сопряженных точках.

Пусть N – число каким-либо способом найденных сопряженных точек на K проекциях, 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:

$$x_k = -(1/\omega_x) \left[f \frac{X_k(M)}{Z_k(M)} \right] + X_0, \quad y_k = -(1/\omega_y) \left[f \frac{Y_k(M)}{Z_k(M)} \right] + Y_0, \quad (1)$$

где ω_x, ω_y – линейные размеры одного элемента ПЗС-матрицы; f – фокусное расстояние камеры; X_0, Y_0 – положение главной точки камеры; $X_k(M),$

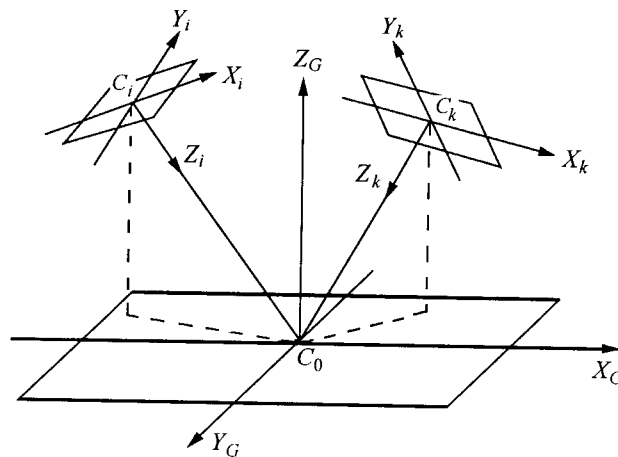


Рис. 1

$Y_k(M), Z_k(M)$ – координаты точки M в k -й подвижной системе координат спутника, которые вычисляются через глобальные координаты точки M :

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

Здесь R_k – матрица поворота для перехода из глобальной в k -ю подвижную систему координат (X_k, Y_k, Z_k) ; dx_k, dy_k, dz_k – координаты спутника в глобальной системе координат.

Глобальные координаты спутника легко рассчитать по имеющимся исходным данным (расстояния до спутника L_k , азимутального угла φ_k и угла восхождения α_k):

$$dx_k = L_k \cdot \cos(\varphi_k) \cdot \cos(\alpha_k), \quad dy_k = L_k \cdot \cos(\varphi_k) \cdot \sin(\alpha_k), \quad dz_k = L_k \cdot \sin(\varphi_k).$$

Матрица поворота рассчитывается как произведение трех матриц поворота на углы α_k, φ_k и Δ_k : $R_k = R_{\alpha_k} R_{\varphi_k} R_{\Delta_k}$.

Для нахождения неизвестных параметров съемки и одновременного расчета трехмерных координат сцены, вычисляемых для всех сопряженных точек, имеем в общем случае переопределенную систему линейных (по отношению к координатам неизвестного рельефа) уравнений

$$AV = B, \tag{2}$$

которая получается объединением соотношений типа (1), выписанным для всех N сопряженных точек применительно к каждой из K проекций:

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

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

а 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 на ЭВМ по методу наименьших квадратов: $V = (A^T A)^{-1} A^T B$.

По нелинейно входящим неизвестным параметрам X_0, Y_0 и набору углов Δ_k (углы поворота камеры вокруг оптической оси) проводится многомерная итерационная оптимизация с помощью направленного перебора. Основное достоинство таким образом 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 настолько устойчивым, что 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 показали высокую точность вычисления главной точки изображения и неизвестных углов поворота камеры, что позволило эф-

фактивно и надежно восстанавливать неизвестный трехмерный рельеф по серии космических стереопроекции.

3. 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 стереопроециях, полученных одной и той же камерой при известных внутренних параметрах оптической системы и при наличии полной информации о геометрии съемки. К таким априорно известным параметрам в нашем случае относятся: 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 на порядок 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 существенно больше разброса высот на поверхности Земли, поэтому данное условие всегда будет выполнено.)

Для нахождения сопряженных точек воспользуемся понятием эпиполяры. 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 из точек рельефа M . Очевидно, что множество пространственно распределенных точек, которые могут проецироваться в точку A , представляют собой прямую $l_1(A)$, проходящую 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 эпиполярой, порождаемой точкой A .

Важность введенного понятия эпиполяры объясняется тем, что если на второй проекции имеется точка, сопряженная с заданной, то она с неизбежностью лежит на эпиполяре, так что знание эпиполяры значительно сокращает поиск взаимно сопряженных точек.

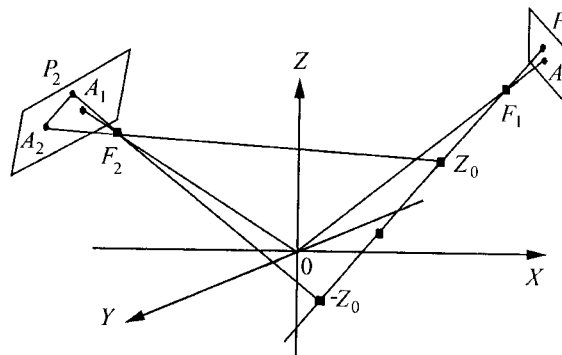


Рис. 2

При известной геометрии съемки для каждой точки первого изображения можно найти эпиполяру на втором изображении. Для этого необходимо найти для точки A первого изображения две точки A_1 и A_2 на втором изображении, принадлежащие эпиполяре.

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:

$$x_A = -(1/\omega_x) \left[f \frac{X_1(M)}{Z_1(M)} \right] + X_0, \quad y_A = -(1/\omega_y) \left[f \frac{Y_1(M)}{Z_1(M)} \right] + Y_0.$$

В данной системе два уравнения и три неизвестных $(X_1(M), Y_1(M), Z_1(M))$ – положение точки M в первой 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

$$(X_1(M), Y_1(M), Z_1(M))^T = R_1(X_G(M) - dx_1, Y_G(M) - dy_1, Z_G(M) - dz_1)^T.$$

Сначала положим в этом уравнении $Z_G(M) = Z_1$, а затем $Z_G(M) = Z_2$, где Z_1 и Z_2 – некоторые произвольные высоты. Тогда получим два уравнения с двумя неизвестными, разрешая которые, найдем $X_G(M), Y_G(M)$. Затем вычисляем 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

$$(X_1(M), Y_1(M), Z_1(M))^T = R_2(X_G(M) - dx_2, Y_G(M) - dy_2, Z_G(M) - dz_2)^T$$

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

$$x_{1,2} = -(1/\omega_x) \left[f \frac{X_2(M_{1,2})}{Z_2(M_{1,2})} \right] + X_0, \quad y_{1,2} = -(1/\omega_y) \left[f \frac{Y_2(M_{1,2})}{Z_2(M_{1,2})} \right] + Y_0,$$

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 эпиполяры для точки A (рис. 3).

Считая в дальнейшем все высоты искомого рельефа лежащими в некотором диапазоне от Z_1 до Z_2 , в соответствии с описанным алгоритмом получим, что для произвольной точки A первого

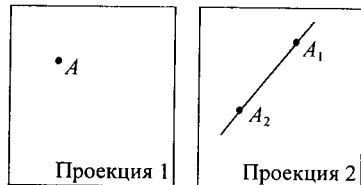


Рис. 3

изображения область поиска соответствующей точки на втором изображении фактически сужается до некоторого отрезка эпиполярной прямой $[A_1, A_2]$. Это обстоятельство в нашем случае переводит проблему поиска сопряженных точек в разряд задач, допускающих эффективное решение с помощью стандартных методов, основанных на использовании корреляционного приема.

Одним из главных мешающих факторов в проблеме поиска сопряженных точек является наличие световых и проективных искажений. При увеличении базового угла между оптическими осями камер первого и второго изображений эти искажения возрастают настолько, что делают невозможным простое корреляционное сопоставление областей без их предварительной обработки.

Для начала устраним влияние проективных искажений. На первой проекции выберем квадратное окно размером $(2N + 1) \times (2N + 1)$ элементов с центром в точке A . Далее для каждого элемента окна (так же, как и для самой точки A) положим высоту соответствующего элемента рельефа равной Z_2 . По аналогии с нахождением точки A_2 , описанным в предыдущем разделе, произведем поиск точек на втором изображении для каждой точки, лежащей в окне первого изображения. В результате получим некоторую область вокруг точки A_2 , как показано на рис. 4. Таким образом, каждому пикселу из окна первого изображения ставится в соответствие некоторый пиксел второго изображения, т. е. с помощью проективного преобразования осуществляется перевод квадратной окрестности точки A в некую четырехугольную область на второй проекции.

Следующим этапом поиска сопряженных точек является собственно корреляция отсчетов в пределах найденных областей. Для этого следует с некоторым шагом пройти по эпиполяре от точки A_2 до A_1 , как показано на рис. 5. При этом на каждом шаге производится сдвиг коррелируемой области на вектор, совпадающий по величине и направлению с вектором шага.

Следует отметить, что корректное проведение корреляции требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому нами для ускорения расчетов был программно реализован максимально упрощенный алгоритм сопоставления окрестностей двух исследуемых на «сопряженность» точек. Фактическое сопоставление двух областей осуществляется следующим образом: сначала в обеих областях из оптической плотности каждого элемента вычитается среднее значение плотности (в каждой области свое). Если результат такого поэлементного вычитания отрицателен, то его знак меняется на противоположный. Затем непосредственно вычисляется модуль разности между каждым из соответствующих элементов первой и второй области.

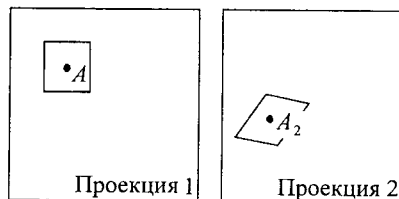


Рис. 4

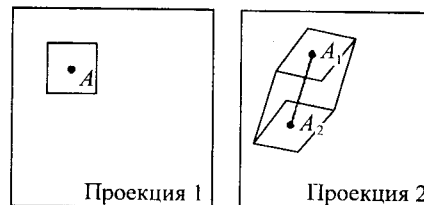


Рис. 5

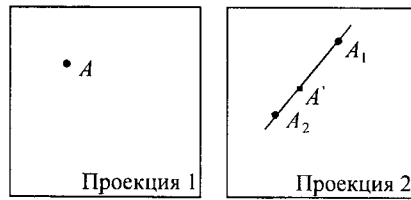


Рис. 6

Сумма модулей разности (или, что то же самое, среднее значение этого модуля), взятая по всем элементам сопоставляемых областей, служит мерой их близости. Осуществляя перебор по всем точкам, лежащим между A_1 и A_2 , находим точку A' , соответствующую минимуму представленного функционала «невязки». Точка A' и является сопряженной с A точкой на втором изображении (рис. 6).

Проведенные расчеты показали, что при тех реальных световых и проективных искажениях, которые имелись на обрабатываемых космических снимках, сделанных в районе вулкана Эребус, использование такого упрощенного критерия существенно повышает скорость выполнения программ, практически не ухудшая качества сопоставления окрестностей по сравнению со стандартной процедурой корреляции.

4. 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, если полностью известны все внутренние и внешние параметры камеры, включая полные сведения о геометрии съемки. Задача существенно усложняется, если 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 разработан специальный алгоритм отыскания сопряженных точек на двух стереопроекциях, не использующий априорных сведений о положении главной точки камеры (X_0, Y_0) и об углах поворота и второй вокруг своей оптической оси Δ_1 и Δ_2 (соответственно для первой и второй проекций). 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, 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.

4.1. Поиск особых (реперных) точек. Сразу отметим, что алгоритмов поиска особых точек может существовать и в действительности существует множество, но всех их объединяет то обстоятельство, что они должны устойчиво выделять некие экстремальные локально-точечные неоднородности, присутствующие на обоих изображениях. В описываемом алгоритме сначала на первой стереопроекции анализируется распределение сигнала по амплитуде (т. е. яркость изображения) и строится поле $\text{Disp}(x, y)$, характеризующее суммарное отклонение амплитуд сигнала I в окрестности изучаемой

точки (x, y) от локальной средней яркости, вычисляемой в пределах этой окрестности:

$$\text{Disp}(x, y) = \sum_{i=-\text{size}}^{i=\text{size}} \sum_{j=-\text{size}}^{j=\text{size}} |I(x+i, y+j) - \langle I(x, y) \rangle|,$$

где

$$\langle I(x, y) \rangle = \left[\sum_{i=-\text{size}}^{i=\text{size}} \sum_{j=-\text{size}}^{j=\text{size}} I(x+i, y+j) \right] / (2\text{size} + 1)^2$$

есть усредненная в пределах окна яркость изображения.

Точка, соответствующая глобальному максимуму поля $\text{Disp}(x, y)$, будет главным претендентом на включение в список особых. Затем, исключая из дальнейшего рассмотрения найденную точку вместе с ее окрестностью (в нашем случае это окно 9×9 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 размером окна.

На второй стереопроекции поиск особых точек осуществляется совершенно идентичным способом за исключением того, что размер окна фильтрации, используемого для построения поля $\text{Disp}(x, y)$ и отыскания его максимумов, должен учитывать различие в расстояниях, с которых производилась съемка первого и второго изображений:

$$h_1 = 2\text{size}_1 + 1, \quad h_2 = 2\text{size}_2 + 1, \quad \text{size}_2 = \text{entier}(\text{size}_1 L_1 / L_2 + 0,5),$$

где h_1 и h_2 – линейные размеры окон ($h_1 \times h_1$) и ($h_2 \times h_2$) соответственно на первом и втором изображениях.

При этом количество выделяемых особых точек на втором изображении N_{p2} совершенно не обязательно должно совпадать с их количеством N_{p1} , выделенным на первом изображении.

4.2. Алгоритм итеративной оптимизации по неизвестным параметрам съемки. Суть процедуры, осуществляемой на этом этапе, заключается в подгонке неизвестных углов поворота камеры вокруг оптической оси Δ_1, Δ_2 и неизвестных координат главной точки (X_0, Y_0) с целью добиться такого положения, чтобы максимально возможному числу особых точек, найденных на первом изображении, были поставлены в соответствие особые точки на втором изображении. При этом должна быть минимизирована сумма невязок, взятая по всем таким сопряженным парам, с учетом уже известного проективного преобразования, связывающего эти две стереопроекции. Важным моментом здесь является обеспечение необходимого быстродействия, поскольку, во-первых, приходится вести оптимизацию сразу по четырем параметрам, входящим в систему уравнений нелинейно, во-вторых, корректно учитывать 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, естественно, вносим в минимизируемый функционал небольшие искажения, которые в решаемых нами задачах дальнего космического стереовидения практически не влияют на точность оценивания неизвестных параметров съемки и надежность программно-автоматического отыскания сопряженных точек.

Итак, на данном этапе сначала осуществляется итеративный перебор по параметрам $\Delta_{1,2}$. Далее последовательно для каждой особой точки первого изображения производится поиск эпполяра на втором изображении. Поиск осуществляется при ограничении на высоту соответствующей особой точки, которая считается находящейся в интервале (Z_{\min}, Z_{\max}) , так что эпполяра из линии преобразуется в отрезок. При этом предварительно полагаем абсциссу X_0 и ординату Y_0 главной точки 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 проекций.

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 $(\Delta X_0, \Delta Y_0)$, а следовательно, найденные нами эпполяры также будут смещены на некоторый вектор $(\Delta X'_0, \Delta Y'_0)$ на втором изображении. Поэтому минимизацию совокупной невязки, которая представляет собой сумму расстояний от эпполяра до особых точек второго изображения, необходимо проводить с учетом указанного сдвига.

Делать полный перебор по параметрам X_0, Y_0 при имеющихся размерах ПЗС-матрицы (256×244 элемента) абсолютно нереально. Находить индивидуальный сдвиг $(\Delta X'_0, \Delta Y'_0)$ для каждой из эпполяров, минимизирующий сумму расстояний от них до особых точек второго изображения, нецелесообразно, так как фактически это эквивалентно такому же перебору.

Поэтому нами реализован существенно более быстродействующий алгоритм, суть которого заключается в следующем. Каждой из N_{p1} особых точек первого изображения последовательно ставится в соответствие каждая из N_{p2} особых точек второго изображения. Затем находится невязка, однозначно определяемая расстоянием между центром эпполяры, порождаемой особой точкой первого изображения, и поставленной в соответствие особой точкой второго изображения. Заметим, что вычисление невязки должно вестись, как уже отмечалось ранее, с учетом неизвестного сдвига эпполяры на вектор $(\Delta X'_0, \Delta Y'_0)$, но в данном случае возможность оптимизации по неизвестному сдвигу обеспечивается тем, что он на каждом шаге перебора по углам Δ_1 и Δ_2 постоянен для всех эпполяров. Суммарная невязка по всем сопоставляемым особым точкам характеризует степень удачности или неудачности «привязки» особых точек двух изображений при текущих значениях подгоняемых неизвестных параметров.

При таком подходе необходимо осуществить перебор $N_{p1} \times N_{p2}$ вариантов, где N_{p1} и N_{p2} – количество найденных особых точек на первом и втором изображениях. Если выбрать в соответствии с некоторым критерием, скажем, по 25 особым точкам на каждом изображении, то необходимо циклически рассмотреть 625 вариантов, что делает представленный алгоритм вполне реализуемым на современных персональных ЭВМ средней мощности с тактовой частотой 200–300 МГц.

В результате минимизации совокупной невязки определяются параметры Δ_1 и Δ_2 , а также ставится в соответствие каждой особой точке на первом

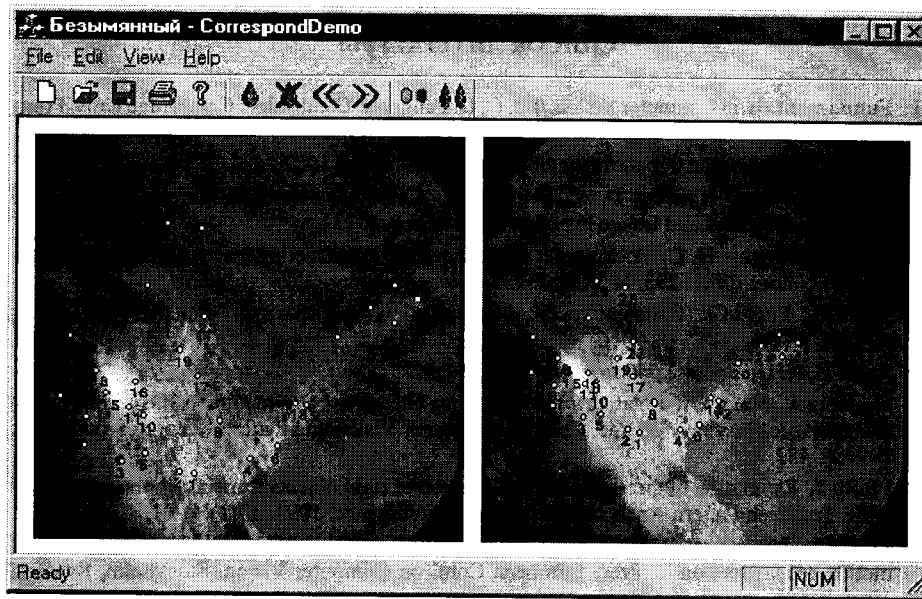


Рис. 7

изображении особая точка на втором изображении, которые и будут являться взаимно сопряженными.

На рис. 7 показан пример автоматического поиска сопряженных точек при угле расхождения между направлениями оптических осей снимков, равном примерно 15° . Проведенные расчеты показали, что при расхождении направлений оптических осей на угол до 30° алгоритм устойчиво выделяет при первом проходе 25–30 точек соответствия, не допуская при этом ни одной сбойной ситуации.

Заключение. Таким образом, в данной работе представлено алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее в полностью автоматическом режиме последовательно решать три задачи: оценивания неизвестных параметров съемки (координат главной точки изображения и углов поворота камеры вокруг оптической оси), нахождения сопряженных точек при произвольных базовых углах между направлениями оптических осей, восстановления неизвестного рельефа земной поверхности с помощью одновременной параллельно-групповой обработки нескольких стереопроекций.

Разработанный на основе представленных алгоритмов программный пакет прошел успешную проверку на модельных (искусственно сгенерированных) стереоизображениях, а также при обработке реальных изображений, полученных с высокотраекторного искусственного спутника Земли MSX во время пролета над районом вулкана Эребус в Антарктиде. В частности, в результате расчетов было установлено, что следящая система на спутнике MSX не только достаточно стабильно поддерживала направление оптической оси камеры на центр координат, но также сохраняла (с некоторой погрешностью) неизменным угол поворота камеры вокруг этой оси (угол между осью X камеры и плоскостью X_G, Y_G глобальной системы координат составляет, по нашим расчетам, $111,3^\circ$; усредненные по всем снимкам расчетные координаты главной точки на стереопроекциях: $X_0 = 77,3$; $Y_0 = 117,7$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fundamentals** in Computer Vision /Ed. O. D. Faugeras. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1983.
2. **Прэтт У.** Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982.
3. **Levine M. D., O'Handley D. A., Yagi G. M.** Computer determination of depth maps // Computer Graphics and Image Process. 1973. **2**, N 2. P. 131.
4. **Longuet-Higgins H. C.** A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections // Nature. 1981. **293**, N 5828. P. 133.
5. **Marr D., Poggio T.** Cooperative computation of stereo disparity // Science. 1976. **194**, N 4262. P. 283.
6. **Хорн Б. К. П.** Зрение роботов. М.: Мир, 1989.
7. **Shashua A., Navab N.** Relative affine structure: Theory and application to 3D reconstruction from perspective views // Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recogn. Seattle, WA, 1994. P. 483.
8. **Philip J.** Estimation of three-dimensional motion of rigid objects from noisy observations // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991. **13(1)**. P. 61.
9. **Ponce J., Marimont D. H., Cass T. A.** Analytical methods for uncalibrated stereo and motion reconstruction // Proc. European Conf. on Computer Vision. Stockholm, Sweden, 1994. P. 463.
10. **Hartley R. I.** Projective reconstruction from line correspondences // Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recogn. Seattle, WA, 1994. P. 903.
11. **Devernay F., Faugeras O. D.** Computing differential properties of 3-D shapes from stereoscopic images without 3-D models // Ibid. P. 208.
12. **Deriche R., Zhang Z., Luong Q.-T., Faugeras O. D.** Robust recovery of the epipolar geometry for an uncalibrated stereo rig // Proc. European Conf. on Computer Vision. Stockholm, Sweden, 1994. P. 567.
13. **Valentinotti F., Di Caro G., Grespi B.** Real-time parallel computation of disparity and optical flow using phase difference // Machine Vision and Application. 1997. **9**, N 2.
14. **He-Ping Pan.** General stereo image matching using symmetric complex wavelets // SPIE Conf. "Wavelet Applications in Signal and Image Process. IV". Denver, USA, 1996. (SPIE Proc. 1996. **2825**).
15. **Ефимов В. М., Киричук В. С., Колесников А. Н., Резник А. Л.** Быстродействующие алгоритмы восстановления рельефа в задачах дальнего космического стереовидения // Автометрия. 1999. № 2. С. 3.
16. **Efimov V. M., Kirichuk V. S., Kolesnikov A. N., Reznik A. L.** On the accuracy of 3-D scene reconstruction on the basis of a set of noisy stereo projections // Pattern Recogn. and Image Analysis. 1999. **9**, N 2. P. 248.
17. **Ефимов В. М., Иванов В. А., Колесников А. Н. и др.** Интерполяция трехмерных сцен по нерегулярным отсчетам // Тр. IV Всерос. с международным участием конф. «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (РОАИ-4-98). Новосибирск: ИАиЭ, 1998. Ч. 1. С. 287.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
E-mail: reznik@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
11 февраля 2000 г.*