

**СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ
АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ**

УДК 681.3

В. М. Ефимов, В. С. Киричук, А. Н. Колесников, А. Л. Резник

(Новосибирск)

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА
В ЗАДАЧАХ ДАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО СТЕРЕОВИДЕНИЯ**

Обсуждаются задачи, относящиеся к восстановлению трехмерных сцен по набору цифровых космических стереопроекций, регистрируемых с разных ракурсов при пролете высокотраекторных космических летательных аппаратов над заданным участком земной поверхности. Предложен и программно реализован эффективный способ скоростной реконструкции рельефа, основанный на совместной параллельно-групповой обработке нескольких стереопроекций.

Введение. Целью настоящей работы являлось создание методики высокоточного и устойчивого восстановления трехмерной сцены по последовательности цифровых снимков, регистрируемых с помощью высокотраекторных космических летательных аппаратов. Важной особенностью обработки космических стереопроекций, получаемых с высоких орбит, характеризующихся удалением летательного аппарата на расстояние свыше 1000 км, является необходимость построения сверхустойчивых алгоритмов реконструкции, поскольку в задачах дальнего космического стереовидения малейшие неточности в задании угловых траекторных параметров и сравнительно небольшие координатные отклонения (даже на уровне дискрета) в плоскости проекции, с неизбежностью возникающие при цифровой космической съемке удаленных участков земной поверхности, могут приводить к огромным абсолютным ошибкам в определении координат восстанавливаемой трехмерной сцены. Нами предлагается эту задачу решать с помощью совместной параллельной обработки сразу нескольких стереопроекций одного и того же участка земной поверхности, регистрируемого с разных ракурсов. Для этого нами создан программно-цифровой испытательный стенд, важной отличительной особенностью которого является его многофункциональность, позволяющая в рамках единой математической концепции проводить, с

одной стороны, анализ и синтез модельных изображений, с другой стороны, реконструкцию реальных трехмерных сцен по неограниченному числу (если абстрагироваться от проблемы быстродействия) ранее полученных двумерных проекций. Еще одно достоинство описываемой программной системы заключается в том, что она содержит модули, обеспечивающие оценивание эффективности базовых алгоритмов реконструкции по таким параметрам, как быстродействие и точность, а также в том, что эта система оснащена программными компонентами, позволяющими рассчитывать влияние фоновых шумов и шумов регистрирующего тракта на качество алгоритмов цифровой обработки. Это позволило осуществить корректное сравнение разработанных алгоритмов с другими методами решения задач 3D реконструкции, которые основаны на созданных в последнее время новых высокоэффективных технологиях обработки цифровых сигналов, регистрируемых с помощью средств дальнего дистанционного зондирования [1–8].

Постановка задачи. Итак, имеется последовательность цифровых изображений в виде файлов BMP-формата, регистрируемых во время пролета искусственного спутника над исследуемым участком земной поверхности. Регистрация осуществляется с помощью ПЗС-матрицы, имеющей 244×256 прямоугольных разрешающих элементов размером $w_x \times w_y$ каждый (в нашем случае $w_x/f = 0,000108$, $w_y/f = 0,000092$, 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 $(X_G, Y_G, Z_G)_{C_0}$ спутника в некоторой жестко связанной с Землей декартовой системе координат G с центром в упомянутой точке C_0 . (Считается, что 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_{i_k} , зарегистрированные в моменты времени t_k , а также набор связанных с ними траекторных координат спутника: α_{i_k} – азимутальный угол в плоскости $X_G Y_G$; φ_{i_k} – угол склонения спутника над горизонтом; l_{i_k} – расстояние до центра координат C_0 .

Описание метода 3D реконструкции, основанного на параллельной обработке нескольких стереопроекций. Большинство известных методов цифрового восстановления 3D изображений непосредственно или косвенно опираются на поиск локальных особенностей (реперов) на изображениях, которые физически соответствуют одной и той же малоразмерной неоднородности, отчетливо проявляющейся одновременно на всех стереопроекциях. Важное преимущество такого подхода заключается в том, что при этом удается общую задачу реконструкции разбить на две самостоятельные проблемы: а) автономный поиск взаимно сопряженных точек; б) собственно восстановление исходной трехмерной сцены. В рамках настоящей работы не будут рассматриваться вопросы оптимизации процесса выделения и идентификации подобных малоразмерных реперных объектов, поскольку это

является самостоятельной проблемой как с чисто научной точки зрения, так и в плане построения практически реализуемых быстродействующих робастных алгоритмов стереообработки. Для этих целей может быть рекомендован общий подход на основе эпиполярной геометрии [9–12], который резко сокращает необходимый перебор при поиске сопряженных точек на разных изображениях. Кроме того, весьма эффективно применение алгоритмов поиска, инвариантных к повороту [13]. Возможен также полуавтоматический режим с использованием оператора за пультом ЭВМ. (Кстати, два последних режима успешно применялись нами на практике: первый – при цифровой обработке радиолокационных снимков ледовых поверхностей, а второй – при реконструкции рельефа участка земной поверхности с вулканом Эребус в Антарктиде по серии цифровых аэрокосмических снимков.) Здесь же мы предполагаем, что заранее известны координаты (x_k'', y_k'') , $k = \overline{1, K}; n = \overline{1, N}$, каждой из N точечных особенностей на всех K одновременно обрабатываемых проекциях.

Введем для каждого из K рассматриваемых пространственно-временных положений спутника свою подвижную систему координат. Ее начало поместим в точку C_k – оптический центр камеры в момент времени t_k . Ось Z^k направим в точку C_0 – центр глобальной системы координат. Оси X^k и Y^k выберем так, чтобы создавалась «правая» декартова система координат $(X, Y, Z)_k$ и чтобы ось X^k при этом была параллельна плоскости X_G, Y_G из глобальной системы координат (X_G, Y_G, Z_G) с центром в точке C_0 . Тогда произвольная точка M , имеющая координаты $(X_G(M), Y_G(M), Z_G(M))$ в глобальной системе координат G , проецируется в плоскости изображения P_k в точку с текущими координатами:

$$x_k'' = -(1/w_x) \left[f_k \frac{X_k(M_n)}{Z_k(M_n)} \right] + X_0, \quad (1)$$

$$y_k'' = -(1/w_y) \left[f_k \frac{Y_k(M_n)}{Z_k(M_n)} \right] + Y_0,$$

где

$$(X_k(M), Y_k(M), Z_k(M))^T = R_k (X_G(M) - dx_k, Y_G(M) - dy_k, Z_G(M) - dz_k)^T.$$

Здесь введены следующие обозначения:

1) R_k – произведение трех матриц поворота, так что

$$R_k = R3_k \times R2_k \times R1_k,$$

причем матрицы $R1_k$ и $R2_k$ известны:

$$R1_k = \begin{pmatrix} \cos\alpha_{t_k} & \sin\alpha_{t_k} & 0 \\ -\sin\alpha_{t_k} & \cos\alpha_{t_k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$R2_k = \begin{pmatrix} -\sin\varphi_{t_k} & 0 & \cos\varphi_{t_k} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos\varphi_{t_k} & 0 & -\sin\varphi_{t_k} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

а матрица $R3_k$ (точнее, угол Δ_k) подлежит оцениванию:

$$R3_k = \begin{pmatrix} \cos\Delta_k & -\sin\Delta_k & 0 \\ \sin\Delta_k & \cos\Delta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

2)

$$\begin{aligned} dx_k &= l_k \cos\varphi_{t_k} \cdot \cos\alpha_{t_k}, \\ dy_k &= l_k \cos\varphi_{t_k} \cdot \sin\alpha_{t_k}, \\ dz_k &= l_k \sin\varphi_{t_k}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для нахождения неизвестного центра (X_0, Y_0) и неизвестного вектора $(X, Y, Z)_G$, описывающего трехмерные координаты сопряженных точек в глобальной системе координат G , на основе соотношений (1)–(5) программно вычисляются прямоугольная матрица A размерностью $(2NK \times 3N)$ и вектор-столбец B размерностью $(3N \times 1)$, а затем решается переопределенная система уравнений

$$A \times V = B, \quad (6)$$

где

$$V = (V_G(M_1), V_G(M_2), \dots, V_G(M_N))^T, \quad (7)$$

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

Ввиду полной симметрии системы (6) относительно линейно входящих в нее переменных $X_G(M_n), Y_G(M_n), Z_G(M_n)$ решение, которое рассчитывается на ЭВМ по методу наименьших квадратов, представляется в виде

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

(При этом по нелинейно входящим параметрам Δ_k, X_0, Y_0 осуществляется направленный программный перебор.)

Такой подход с двойным разложением фундаментальной матрицы (с первоначальным выделением матрицы поворота R_k и ее последующей факторизацией по трем пространственным углам) в сочетании с параллельной обработкой нескольких проекций позволил при известных глобальных координатах камеры dx_k, dy_k, dz_k эффективно воспользоваться траекторной информацией, существенно сократить число оцениваемых параметров и достичь полной однородности соотношений, составляющих переопределенную систему уравнений для нахождения параметров смещения оптической оси (X_0, Y_0) , углов разворота камеры Δ_k и неизвестных координат $(X_G(M_n), Y_G(M_n), Z_G(M_n))$, описывающих искомый рельеф.

Резкое упрощение вычислительного алгоритма, в свою очередь, привело к тому, что процесс итеративного решения системы (6) стал эффективно сходиться вне зависимости от начального приближения, а точность реконструкции трехмерной сцены при одновременной обработке четырех стереопрооекций улучшилась более чем на порядок по сравнению с попарной обработкой. Для унификации оценки качества разнородных базовых алгоритмов восстановления трехмерных сцен нами введена величина σ_{uni} , рассчитанная как совокупная невязка по всей системе (6) и нормированная на число уравнений системы. Этот универсальный параметр оказался полезен в первую очередь для корректного сопоставления качества различных версий и модификаций программ 3D реконструкции, которые в наших исследованиях отличались не только числом обрабатываемых проекций, но также количеством элементов в исходном трехмерном объекте и типом обрабатываемых изображений (искусственно сгенерированные модельные сигналы либо реальные двумерные стереопроекции).

О точности восстановления рельефа и точности оценивания параметров камеры. В табл. 1 приводится пример, демонстрирующий точность и скорость сходимости одного из разработанных нами алгоритмов 3D реконструкции.

Таблица 1

Показатели точности и эффективности алгоритма 3D реконструкции при одновременной обработке четырех модельных стереопрооекций в присутствии шума квантования по уровню

Оцениваемый параметр	Истинное значение параметра модели	Найденное итеративно решение (количество итераций 7)
X_0	100	99,93
Y_0	100	99,91
Δ_1	10°	$9,50^\circ$
Δ_2	-10°	$-9,99^\circ$
Δ_3	-30°	$-30,03^\circ$
Δ_4	-50°	$-50,23^\circ$
σ_{uni}	–	32,08

Содержащиеся в табл. 1 сведения соответствуют реконструкции эталонного модельного объекта с использованием параллельной обработки по четырем стереопроекциям. В данном случае было проведено полное программное моделирование процесса регистрации, включая имитацию квантования по уровню при расчете цифровых проективных координат на каждой из проекций. Самым интересным в приводимой цифровой информации является даже не чрезвычайно высокая точность нахождения неизвестных углов разворота камеры ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$) и неизвестного смещения оптической оси (X_0, Y_0), а то, что решение достигнуто всего лишь за семь итераций при отсутствии каких-либо априорных сведений об этих величинах.

Табл. 2 характеризует степень устойчивости алгоритма 3D реконструкции по отношению к ошибкам задания исходных параметров.

Табл. 3 содержит информацию о восстановлении рельефа земной поверхности по серии цифровых космических снимков, полученных с искусственного спутника Земли при дистанционном зондировании участка земной поверхности в районе вулкана Эребус (Антарктида). Участок имеет размеры 10×10 км, а его реконструкция, как и в предыдущих случаях с модельными изображениями, осуществлялась путем одновременной обработки четырех стереопроекций. Значения ранее введенного универсального параметра $\sigma_{uni} = 69,34$ и $\sigma_{uni} = 67,55$ (см. табл. 3) позволяют сделать заключение о высокой потенциальной эффективности представленного метода, так как космическая съемка восстанавливаемого участка земной поверхности осуществлялась с расстояния 1000–2000 км, что при характерном отношении линей-

Таблица 2

Влияние ошибок в исходных данных на точность алгоритма 3D реконструкции при одновременной обработке четырех стереопроекций (модельные данные)

Номер п/п	Исходный параметр модели	Диапазон ошибок при задании параметра	Точность реконструкции модельного 3D изображения (σ_{uni})
1	Азимут точки съемки	$\pm 1^\circ$	59,66
2	Угол склонения точки съемки над горизонтом	$\pm 1^\circ$	43,87
3	Смещение оптических осей от центров проекций	± 1 элемент разрешения	103,16
4	Удаление точки съемки от объекта	$\pm 1\%$	36,23
5	То же	$\pm 2\%$	72,47
6	– " –	$\pm 5\%$	181,57
7	Квантование по уровню при моделировании целочисленных проективных координат	$\pm 0,5$ дискрета	34,54

Таблица 3

Восстановление внешних параметров камеры при реконструкции рельефа земной поверхности по серии цифровых изображений. (Реальные аэрокосмические снимки. Параллельная обработка четырех стереопроекций)

Оцениваемый параметр	Найденное итеративно решение (количество итераций 7)	Оцениваемый параметр	Найденное итеративно решение (количество итераций 12)
Без индивидуальной подстройки смещения оптической оси по стереопроекциям		С индивидуальной подстройкой смещения оптической оси по каждой из стереопроекций	
X_0	77,30	X_{0_1}	77,25
Y_0	117,70	Y_{0_1}	118,65
–	–	X_{0_2}	77,55
–	–	Y_{0_2}	118,65
–	–	X_{0_3}	77,75
–	–	Y_{0_3}	118,00
–	–	X_{0_4}	77,85
–	–	Y_{0_4}	117,40
Δ_1	-70,50	Δ_1	-70,50
Δ_2	-69,40	Δ_2	-69,40
Δ_3	-69,30	Δ_3	-69,30
Δ_4	-69,20	Δ_4	-69,20
σ_{uni}	69,34	σ_{uni}	67,55

ного размера разрешающего элемента камеры к ее фокусному расстоянию $w/f \cong 10^{-4}$ соответствует точности $\epsilon = 0,3-0,7$ элемента в пересчете на внутреннее разрешение оптической системы.

ВЫВОДЫ

Проведенные модельно-стендовые испытания показали, что описанная методика 3D реконструкции изображений с использованием параллельной обработки нескольких стереопроекций дает выигрыш по точности более чем на порядок по сравнению с попарной обработкой. Кроме того, предложенная методика имеет ряд других достоинств и преимуществ, а именно:

– универсальность алгоритмов обработки при произвольном числе стереопроекций;

- быстрая сходимость итерационного процесса к решению при реконструкции исходной трехмерной сцены;
- абсолютная неизменность структуры вычислительного алгоритма при неполной информации о взаимно сопряженных точках на одной или нескольких стереопроекциях;
- возможность простого и эффективного использования дополнительной информации о внешних и внутренних параметрах камеры для повышения точности 3D реконструкции;
- высокое быстродействие, позволяющее проводить одновременную обработку до пяти стереопроекций на современных ЭВМ среднего класса с тактовой частотой процессора 100–200 МГц;
- внутренний программный контроль качества восстановления неизвестных трехмерных сцен;
- наличие программных средств для расчета влияния ошибок в исходных данных на точность алгоритма 3D реконструкции;
- единый системный подход к обработке модельных (искусственно сгенерированных) и реальных (зарегистрированных при пролете искусственного спутника Земли над заданным участком земной поверхности) трехмерных сцен.

В качестве программной платформы нами использовалась система "MatLab", предоставляющая пользователю достаточно удобные средства графического взаимодействия, включая визуализацию цифровых изображений, и имеющая широкий набор стандартных библиотечных модулей для проведения различных математических расчетов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Миннауки № 0201.05.12 «Модели, методы и программно-алгоритмические средства анализа многозональных стереоизображений, получаемых с сети космических станций».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. **Hartley R. I.** Projective reconstruction from line correspondences // Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recogn. Seattle, WA, 1994. P. 903.
5. **Хорн Б. К. П.** Зрение роботов. М.: Мир, 1989.
6. **Horn B. K. P.** Relative orientation // Internat. Journ. of Computer Vision. 1990. **4(1)**. P. 59.
7. **Devernay F., Faugeras O. D.** Computing differential properties of 3-D shapes from stereoscopic images without 3-D models // Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recogn. Seattle, WA, 1994.
8. **Faugeras O. D., Lustman F.** Motion and structure from motion in a piecewise planar environment // Internat. Journ. of Pattern Recogn. and Artificial Intelligence. 1988. **2(3)**. P. 485.

9. **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.
10. **Nishimura E., Xu G., Tsuji S.** Motion segmentation and correspondence using epipolar constraint // Proc. 1st Asian Conf. Computer Vision. Osaka, Japan, 1993. P. 199.
11. **Olsen S. I.** Epipolar line estimation // Proc. European Conf. on Computer Vision. 1992. P. 307.
12. **Shapiro L. S., Zisserman A., Brady M.** Motion from point matches using affine epipolar geometry // Technical Report OUEL, 1994/1993. Oxford University, June 1994.
13. **Ефимов В. М., Резник А. Л.** Алгоритмы идентификации фрагментов двух изображений, инвариантные к повороту // Автометрия. 1984. № 5. С. 61.

Поступила в редакцию 29 декабря 1998 г.

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!