

文章编号 1004-924X(2017)增-0152-08

## 基于天绘一号卫星影像的大范围 高精度数字高程模型

简剑锋<sup>1,2\*</sup>, 胡 燕<sup>1,2</sup>, 李新涛<sup>1,2</sup>

(1. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054;

2. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:**针对大范围、高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据难以获取的问题,本文提出了一种利用天绘一号卫星影像制作大范围高精度 DEM 的方法。提出基于少量地面控制点的 RPC(Rational Polynomial Coefficients)模型精化算法,进一步提高了天绘一号卫星影像定位精度;提出特征与整体松弛相结合的匹配方法,实现了立体影像高精度匹配;利用精化后的天绘一号卫星影像 RPC 模型以及立体匹配得到的同名点数据,进行前方交会得到高精度的 DEM 数据。本文利用东北辽西某地区的影像数据进行了实验,实验结果表明:利用单景天绘一号卫星影像生成的 DEM 数据,覆盖范围达到 60 km×60 km;在无地面控制点条件下,生成的 DEM 数据高程精度可达 5.12 m,满足 1:50 000 地形图成图精度要求;在 3 个地面控制点条件下,生成的 DEM 数据高程精度 3.01 m,满足 1:25 000 地形图成图精度要求。

**关键词:**天绘一号;RPC 模型;数字高程模型

**中图分类号:**P231;TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172514.0152

## Digital elevation model with large scale and high precision based on image of TH-01 mapping satellite

JIAN Jian-feng<sup>1,2\*</sup>, HU Yan<sup>1,2</sup>, LI Xin-tao<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China)

\* Corresponding author, E-mail:13991180032@139.com

**Abstract:** Aimed at the issue that difficultly obtaining digital elevation model (DEM) with large scale and high precision, a method utilizing TH-01 Mapping Satellite image to make DEM with large scale and high precision was discussed in the thesis. RPC model refined algorithm based on a few ground control points was proposed, and positioning accuracy of TH-01 Mapping Satellite image was improved further; matching method combined with feature and overall relaxation was proposed, and high-precision matching for stereo image was realized; PRC model for TH-01 Mapping Satellite image after refinement and homonymy point data obtained by stereo matching were utilized to conduct forward intersection to obtain high-precision DEM data. Image data in some place in western Liaoning of northeast was provided with experiment in the thesis, and experiment result shows that coverage

收稿日期:2017-08-29;修订日期:2017-09-20.

基金项目:国防创新研究基金资助项目(No. CX0489)

scope of DEM data generated by taking advantage of mono TH-01 Mapping Satellite image reaches 60 km × 60 km; under the condition that there is no ground control point, elevation precision of generated DEM data is 5.12 m, meeting precision requirements of the topographic map on a scale of 1 : 50 000; under the condition that there are 3 ground control points, elevation precision for generated DEM data is 3.01 m, meeting precision requirements of the topographic map on a scale of 1 : 25 000.

**Key words:** TH-01 mapping satellite; rational polynomial coefficients model; digital elevation model

## 1 引言

数字高程模型 DEM(Digital Elevation Model)是利用遥感信息经过摄影测量处理得到的典型产品之一,是地形表面形态等多种信息的一种数字表达<sup>[1]</sup>。高精度 DEM 一般指成图比例尺大于 1 : 50 000 的 DEM 数据,其用途极为广泛,可用来制作高精度正射影像图、修测大比例尺地图,还可以用于农田水利建设、防洪抗灾、城市与交通规划、环境监测以及工程设计等。DEM 数据通常可通过航摄飞机、无人机等航空平台获取光学、干涉合成孔径雷达 INSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)、激光雷达等遥感数据<sup>[2]</sup>,经过测绘处理后获得,精度较高,但其获取范围较小、易受地域限制、成图效率较低。光学遥感测绘卫星具有不受地域和地形限制、摄影范围大及成图效率高等特点,利用测绘卫星影像进行测绘处理是目前获取大范围 DEM 数据的常用手段,但测绘卫星影像往往存在定位精度偏低的问题,为此,国内外许多学者就卫星影像高精度定位开展了广泛的研究<sup>[3-7]</sup>,这些研究主要集中于两类:一是依赖于卫星的轨道、姿态和标定参数数据,同时需要在全局多地建立试验场,对卫星和相机的相关参数进行检校,从而达到高精度定位的目的,但这类方法投入大,周期长,而且相关参数由于保密因素限制,普通用户一般无法获取;二是利用足够数量的地面控制点数据,通过区域网平差等手段来提高卫星影像定位精度,这种方法需要建立数量巨大的误差方程,采用最小二乘平差方法进行解算,计算量大,处理时间长,而且有些地区往往无法保证有足够的控制点数据。

天绘一号是我国于 2010 年 10 月发射成功的第一代光学传输型立体测绘卫星,具有摄影范围大,成像质量好,定位精度高等特点,其单景影像覆盖范围达到 60 km × 60 km,在无地面控制点条

件下,影像定位精度达到 10.3 m/5.7 m(平面/高程)<sup>[3]</sup>;天绘一号卫星影像提供国际通用标准的 RPC(Rational Polynomial Coefficients)参数,对其进行处理不需要卫星相关参数,仅利用天绘一号卫星影像及其 RPC 模型参数,就可用来制作大范围的、满足 1 : 50 000 比例尺成图精度要求的 DEM 数据。但是,若需要制作更高精度的 1 : 25 000 比例尺的 DEM 数据,直接利用天绘一号卫星影像及其 RPC 模型参数则无法满足要求,由此,本文提出一种基于少量地面控制点的天绘一号卫星影像 RPC 模型精化算法,用来进一步提高天绘一号卫星影像定位精度,同时提出特征与整体松弛相结合的匹配方法,实现立体影像高精度匹配,最后,利用精化后的天绘一号卫星影像 RPC 模型以及立体匹配得到的同名点数据进行前方交会,即可得到大范围、高精度的 DEM 数据。

## 2 天绘一号卫星影像 RPC 模型

### 2.1 RPC 模型

RPC 模型<sup>[7-9]</sup>实质就是有理函数模型,其定义为:

$$y = \frac{Num_L(P, L, H)}{Den_L(P, L, H)}$$

$$x = \frac{Num_s(P, L, H)}{Den_s(P, L, H)}, \quad (1)$$

其中:

$$Num_L(P, L, H) = a_1 + a_2 L + a_3 P + a_4 H + a_5 LP + a_6 LH + a_7 PH + a_8 L^2 + a_9 P^2 + a_{10} H^2 + a_{11} PLH + a_{12} L^3 + a_{13} LP^2 + a_{14} LH^2 + a_{15} L^2 P + a_{16} P^3 + a_{17} PH^2 + a_{18} L^2 H + a_{19} P^2 H + a_{20} H^3,$$

$$Den_L(P, L, H) = b_1 + b_2 L + b_3 P + b_4 H + b_5 LP + b_6 LH + b_7 PH + b_8 L^2 + b_9 P^2 + b_{10} H^2 + b_{11} PLH + b_{12} L^3 + b_{13} LP^2 + b_{14} LH^2 + b_{15} L^2 P + b_{16} P^3 + b_{17} PH^2 +$$

$$\begin{aligned}
& b_{18} L^2 H + b_{19} P^2 H + b_{20} H^3, \\
\text{Num}_s(P, L, H) = & c_1 + c_2 L + c_3 P + c_4 H + \\
& c_5 LP + c_6 LH + c_7 PH + c_8 L^2 + c_9 P^2 + \\
& c_{10} H^2 + c_{11} PLH + c_{12} L^3 + c_{13} LP^2 + \\
& c_{14} LH^2 + c_{15} L^2 P + c_{16} P^3 + c_{17} PH^2 + \\
& c_{18} L^2 H + c_{19} P^2 H + c_{20} H^3, \\
\text{Den}_s(P, L, H) = & d_1 + d_2 L + d_3 P + d_4 H + \\
& d_5 LP + d_6 LH + d_7 PH + d_8 L^2 + d_9 P^2 + \\
& d_{10} H^2 + d_{11} PLH + d_{12} L^3 + d_{13} LP^2 + \\
& d_{14} LH^2 + d_{15} L^2 P + d_{16} P^3 + d_{17} PH^2 + \\
& d_{18} L^2 H + d_{19} P^2 H + d_{20} H^3,
\end{aligned}$$

其中:  $b_1$  和  $d_1$  通常为 1,  $(L, P, H)$  为正则化的地面坐标,  $(x, y)$  为正则化的影像坐标:

$$\begin{aligned}
P &= \frac{\text{Lat} - \text{LAT\_OFF}}{\text{LAT\_SCALE}}, \\
L &= \frac{\text{Lon} - \text{LONG\_OFF}}{\text{LONG\_SCALE}}, \\
H &= \frac{\text{Hgt} - \text{HEIGHT\_OFF}}{\text{HEIGHT\_SCALE}}, \\
x &= \frac{c - \text{SAMP\_OFF}}{\text{SAMP\_SCALE}}, \\
y &= \frac{r - \text{LINE\_OFF}}{\text{LINE\_SCALE}},
\end{aligned}$$

其中:  $(\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Hgt})$  为地面点坐标,  $(c, r)$  为影像坐标,  $\text{LAT\_OFF}$ 、 $\text{LAT\_SCALE}$ 、 $\text{LONG\_OFF}$ 、 $\text{LONG\_SCALE}$ 、 $\text{HEIGHT\_OFF}$  和  $\text{HEIGHT\_SCALE}$  为地面坐标的正则化参数。  $\text{SAMP\_OFF}$ 、 $\text{SAMP\_SCALE}$ 、 $\text{LINE\_OFF}$  和  $\text{LINE\_SCALE}$  为影像坐标的正则化参数。

## 2.2 RPC 模型的精化

对 RPC 模型进行精化, 无需直接校正 RPC 参数, 仅需使用少量的控制点求解控制点的量测坐标与利用 RPC 模型计算的影像坐标之间的变换关系即可。

在影像上定义仿射变换:

$$\begin{cases} y = a_0 + a_1 \cdot \text{sample} + a_2 \cdot \text{line} \\ x = b_0 + b_1 \cdot \text{sample} + b_2 \cdot \text{line} \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $(x, y)$  是控制点在影像上的量测坐标,  $(\text{sample}, \text{line})$  是相对应控制点的 RPC 模型计算得到的像点坐标。

若仅有一个控制点, 可只求解偏移参数  $a_0$  和  $b_0$  来消除平移误差; 而当有两个控制点时, 只需求解平移参数  $(a_0, b_0)$  和行方向  $(a_2, b_2)$  系数即可, 这是因为天绘一号卫星影像是线阵推扫式影像, 影

像在 line 方向 (CCD 线阵方向) 的变形比 samp 方向 (卫星运动方向) 的变形大, 每一行之间 (samp 方向) 可以近似看成是正射投影, 因此改正仅涉及 line 方向, 可设  $a_1 = 0, b_1 = 0$ ; 而当有 3 个地面控制点时, 则采用公式 (2) 求解得到 6 个仿射变换参数。

## 3 DEM 数据生成

天绘一号卫星三线阵 1B 级卫星影像产品包含前视、正视和后视三景影像, 各自带有 RPC 模型参数; 任意选择其中的两景影像形成立体像对, 对其进行匹配处理, 得到密集的同名像点; 采用基于 RPC 模型的解算算法求解高程值, 最终得到实验区 DEM 数据。

### 3.1 立体影像匹配

为了快速获取实验区 DEM 数据, 选择三线阵影像的正视、后视构建立体像对; 基于立体像对进行立体影像匹配, 以获得密集的同名点, 以此作为制作 DEM 数据的基础。本文提出一种特征与整体松弛相结合的匹配方法完成立体影像匹配, 具体如下:

#### 3.1.1 特征点提取

首先使用 Roberts 梯度算子进行初选点提取, 然后在提取的初始点的基础上使用 Forstner 算子<sup>[1]</sup>进行特征点的精提取。

利用 Roberts 算子在四邻域计算差分, 即计算像素  $(c, r)$  在上下左右 4 个方向的灰度差分绝对值  $d_1, d_2, d_3, d_4$ :

$$\begin{cases} d_1 = |g_{c,r} - g_{c+1,r}| \\ d_2 = |g_{c,r} - g_{c,r+1}| \\ d_3 = |g_{c,r} - g_{c-1,r}| \\ d_4 = |g_{c,r} - g_{c,r-1}| \end{cases}. \quad (3)$$

选取阈值  $T$ , 若  $M = \text{mid}\{d_1, d_2, d_3, d_4\} > T$ , 则  $(c, r)$  为初选点。

在以初选点  $(c, r)$  为中心的  $3 \times 3$  窗口中, 按照 Forstner 算子计算协方差矩阵  $N$  及误差椭圆的圆度  $q_{c,r}$ , 有:

$$N = \begin{vmatrix} \sum g_x^2 & \sum g_x g_y \\ \sum g_x g_y & \sum g_y^2 \end{vmatrix}, q_{c,r} = \frac{4 \text{Det}N}{(\text{tr}N)^2}, \quad (4)$$

其中:  $g_x, g_y$  分别是沿  $x, y$  方向的差分,  $\text{Det}N$  代

表矩阵  $\mathbf{N}$  的行列式,  $tr\mathbf{N}$  代表矩阵  $\mathbf{N}$  的迹,也就是主对角元素之和。

对于给定的阈值  $T_q$ ,若  $q_{c,r} > T_q$ ,则  $(c, r)$  为备选点,并计算权值  $\omega_{c,r} = Det\mathbf{N}/tr\mathbf{N}$ ,以  $\omega_{c,r}$  为依据选取网格中的极值点为特征点。阈值  $T_q$  是一个经验值,一般取:  $T_q = 0.45$ 。

### 3.1.2 整体松弛匹配

整体松弛法是一种整体解决的最优方法方案,其利用邻域内的上下文信息,考虑的是对象之间的约束性和一致性,并通过迭代计算来最终获得整体最优的结果,其基本思想<sup>[10]</sup>是:设  $A$ 、 $B$  两影像分别具有  $m$ 、 $n$  个特征点,即特征点列  $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  和  $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ ,且两者间已具有  $k$  对同名点,  $k \geq 6$ ,且远小于  $m$  和  $n$ ;若匹配点对  $(A_h, B_r)$  为同名点,那么对于影像  $A$  上的任一特征点  $A_i$ ,则可能在影像  $B$  上存在一点  $B_j$  满足条件距离  $[A_i, A_h] = [B_j, B_r]$ ,且  $B_j$  是  $A_i$  的同名点。也就是说,影像  $A$ 、 $B$  中所有的同名点对待配准的点都具有相应的支持。

设一个  $m \times n$  的矩阵  $\mathbf{P} = [P_{ij}]$ ,  $P_{ij}$  表示  $(A_i, B_j)$  间的匹配概率。

(1)当  $l=0$  时,  $p_{ij}^0$  是代表矩阵  $\mathbf{P}$  的初始概率。选择  $(A_i, B_j)$  在配准窗口  $(\omega \times h)$  范围内影像的相关系数<sup>[1]</sup>作为初值,设  $c = A_i, r = B_j$  即有:

$$p_{ij}^0 = \rho(c, r) = \frac{C_{gg'}}{\sqrt{C_{gg} \cdot C'_{g'g'}}$$

其中:  $C_{gg'} = \frac{1}{\omega h} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w g_{i,j} g'_{i+r, j+c} - \bar{g} \bar{g}'$ ,  $\bar{g}$  和  $\bar{g}'$  为两配准窗口内影像灰度均值,  $C_{gg}$  和  $C'_{g'g'}$  为两配准窗口内影像灰度方差,分别有:

$$\begin{cases} \bar{g} = \frac{1}{\omega h} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w g_{ij} \\ \bar{g}' = \frac{1}{\omega h} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w g'_{ij} \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_{gg} = \frac{1}{\omega h} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (g_{ij} - \bar{g})^2 = \frac{1}{\omega h} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w g_{ij}^2 - \bar{g}^2 \\ C'_{g'g'} = \frac{1}{\omega h} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (g'_{ij} - \bar{g}')^2 = \frac{1}{\omega h} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w g'^2_{ij} - \bar{g}'^2 \end{cases}$$

(2)当第  $l$  次迭代时,定义同名点对  $(A_h, B_r)$

对待配准点对  $(A_i, B_j)$  的支持概率为:

$$S^l(i, j; h, r) = p_{hr}^l \min\left\{\frac{d_{jh}}{d_{jr}}, \frac{d_{jr}}{d_{jh}}\right\}. \quad (5)$$

其中:  $p_{hr}^l$  表示第  $l$  次迭代时  $(A_h, B_r)$  为同名点的概率,  $d_{jh}$ 、 $d_{jr}$  表示  $(A_i, A_h)$  和  $(B_j, B_r)$  的距离;  $S^l(i, j; h, r)$  的取值范围为  $[0, 1]$ 。

(3)当第  $l+1$  次迭代时,  $A_i$  和  $B_j$  之间的匹配概率为:

$$p_{ij}^{l+1} = p_{ij}^l \cdot S_{ij}^l$$

$$S_{ij}^l = \sum_{\substack{h=l \\ h \neq i}}^m \sum_{\substack{r=j \\ r \neq j}}^n W_h [\max_{r \leq n} S^l(i, j; h, r)], \quad (6)$$

其中:  $S_{ij}^l$  表示第  $l$  次迭代时其它同名点对  $(A_i, B_j)$  的支持;  $W_h$  表示  $h$  点对  $i$  点支持的权函数,它是两点距离的函数,距离越近,权越大。

(4)若  $p_{ij}^l > T$ ,则该点停止迭代,并确定其为同名点,同时作为确定的同名点参与对其它待配准点匹配的支持;  $T$  为事先给出的阈值,一般取值接近 1。

迭代结束后,矩阵  $\mathbf{P}$  中每一行或每一列最多只有一个元素靠近 1,其中接近 1 的元素,则表明对应的点为同名点。若矩阵  $\mathbf{P}$  的第  $i$  行的元素均靠近 0,则表明  $A_i$  在  $B_j$  中没有同名点。

### 3.2 RPC 模型的解算

$$\text{令: } F(P, L, H) = \frac{\text{Num}_L(P, L, H)}{\text{Den}_L(P, L, H)},$$

$$G(P, L, H) = \frac{\text{Num}_s(P, L, H)}{\text{Den}_s(P, L, H)},$$

$$\text{将 } x = \frac{c - \text{SAMP\_OFF}}{\text{SAMP\_SCALE}}, y = \frac{r - \text{LINE\_OFF}}{\text{LINE\_SCALE}}$$

代入到式(1)中,整理得:

$$\begin{cases} r = \text{LINE\_SCALE} * F(P, L, H) + \text{LINE\_OFF} \\ c = \text{SAMP\_SCALE} * G(P, L, H) + \text{SAMP\_OFF} \end{cases}$$

将上式的两个方程按照 Taylor 公式展开至一次项:

$$\begin{cases} r = \hat{r} + \frac{\partial r}{\partial Lon} \cdot \Delta Lon + \frac{\partial r}{\partial Lat} \cdot \Delta Lat + \frac{\partial r}{\partial Hgt} \cdot \Delta Hgt \\ c = \hat{c} + \frac{\partial c}{\partial Lon} \cdot \Delta Lon + \frac{\partial c}{\partial Lat} \cdot \Delta Lat + \frac{\partial c}{\partial Hgt} \cdot \Delta Hgt \end{cases}$$

于是列出如下误差方程:

$$\begin{cases} v_r = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial Lon} & \frac{\partial r}{\partial Lat} & \frac{\partial r}{\partial Hgt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Lon \\ \Delta Lat \\ \Delta Hgt \end{bmatrix} - (r - \hat{r}) \\ v_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial c}{\partial Lon} & \frac{\partial c}{\partial Lat} & \frac{\partial c}{\partial Hgt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Lon \\ \Delta Lat \\ \Delta Hgt \end{bmatrix} - (c - \hat{c}) \end{cases} \quad (7)$$

根据立体像对的左右影像的同名点坐标  $(c_l, r_l)$ 、 $(c_r, r_r)$ ，由式(7)可得如下误差方程：

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (8)$$

式中：

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{rl} \\ v_{cl} \\ v_{rr} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_l}{\partial Lon} & \frac{\partial r_l}{\partial Lat} & \frac{\partial r_l}{\partial Hgt} \\ \frac{\partial c_l}{\partial Lon} & \frac{\partial c_l}{\partial Lat} & \frac{\partial c_l}{\partial Hgt} \\ \frac{\partial r_r}{\partial Lon} & \frac{\partial r_r}{\partial Lat} & \frac{\partial r_r}{\partial Hgt} \\ \frac{\partial c_r}{\partial Lon} & \frac{\partial c_r}{\partial Lat} & \frac{\partial c_r}{\partial Hgt} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta Lon \\ \Delta Lat \\ \Delta Hgt \end{bmatrix}, \mathbf{l} = \begin{bmatrix} r_l - \hat{r}_l \\ c_l - \hat{c}_l \\ r_r - \hat{r}_r \\ c_l - \hat{c}_l \end{bmatrix}.$$

根据最小二乘平差原理求解可得：

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (9)$$

由于解算地面点坐标采用的数学模型是线性化后的模型，为获取最优解需要进行迭代<sup>[11]</sup>，因而需要知道地面点的初始值，其可以通过标准化平移参数求平均值或采用一次项求解的方式获取。

## 4 实验与分析

### 4.1 实验数据

实验区为东北辽西某地区，属山地地形。实验数据为 1 景该地区天绘一号卫星 02 星 1B 级三线阵卫星影像产品，影像覆盖范围  $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ ，地面像元分辨率为  $5 \text{ m}$ ，卫星摄影时间为 2016 年 5 月 13 日，如图 1 所示，由左至右分别为三线阵影像的前视、正视和后视影像。

### 4.2 实验步骤

(1) 在无地面控制点条件下，利用天绘一号卫星三线阵正视、后视影像构建立体像对，直接经过立体匹配和 RPC 模型解算，得到覆盖范围  $60 \text{ km} \times$

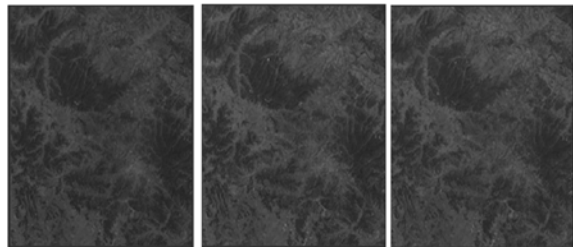


图 1 东北辽西某地区天绘一号卫星三线阵影像  
Fig. 1 TH-01 mapping satellite three line images for somewhere in western Liaoning of northeast China

$60 \text{ km}$ 、 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  格网间距的 DEM 数据。

(2) 在实验区选择利用 3 个地面控制点，对三线阵卫星影像的 RPC 模型进行精化，3 个地面控制点的分布如图 2 所示。

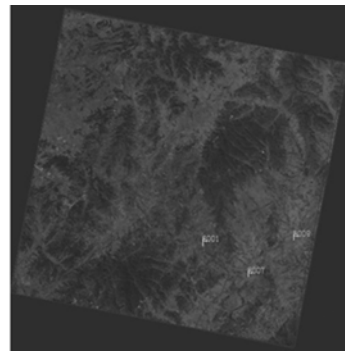


图 2 3 个地面控制点的分布  
Fig. 2 Distribution of three ground control points

(3) 选择精化后的三线阵正视、后视影像构建立体像对，对立体像对的左右影像进行影像匹配，获得密集且分布均匀的同名点，匹配结果如图 3 所示。

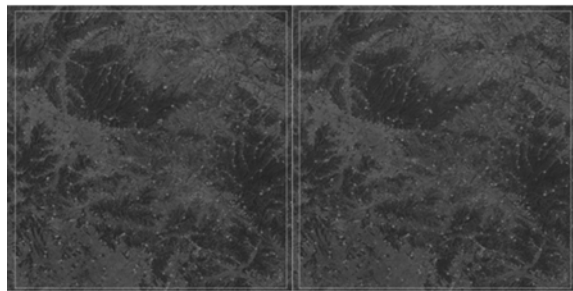


图 3 立体像对匹配结果  
Fig. 3 Matching result of the stereo pair

(4) 生成实验区 DEM 数据。根据立体像对

中左右影像的同名点的像点坐标,基于精化处理得到的左、右影像的 RPC 模型进行解算,生成得到覆盖范围 60 km×60 km、格网间距 10 m×10 m 的 DEM 数据,如图 4 所示。

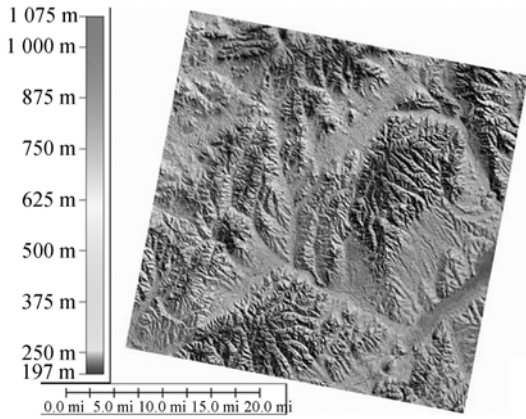


图 4 实验区 DEM 数据

Fig. 4 DEM in experimental area

(5)利用实验区 12 个检查点,对无地面控制点和 3 个地面控制点两种条件下得到的 DEM 数据进行高程精度检测,并进行比较分析。

### 4.3 实验分析

(1)无地面控制点条件下的高程精度分析。

对应 12 个检查点的位置,从无地面控制点条件下的 DEM 数据中得到高程值,并将其分别与相对应检查点的高程值进行比较,12 个点的高程精度情况如图 5 所示。

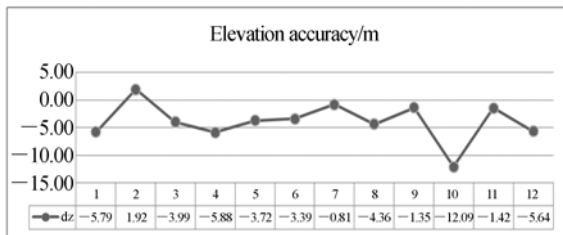


图 5 无地面控制点条件下高程精度

Fig. 5 Elevation accuracy without any ground control point

从图 5 中可看出,在无地面控制点条件下,12 个检查点中,高程最大残差为-12.09 m,最小残差为-0.81 m,高程中误差 5.12 m,与文献 3 中 10.3 m/5.7 m(平面/高程)的精度相吻合。

根据 GB/T18315-2001《数字地形图系列和

基本要求》标准<sup>[12]</sup>,1 : 50 000 比例尺地形图高程精度要求:山地为 8 m;实验区为东北辽西某地区,属山地地形,在无地面控制点条件下,实验区的高程精度为 5.12 m,达到 1 : 50 000 地形图成图精度要求。

(2)3 个控制点条件下的高程精度分析。

同样,对应 12 个检查点的位置,从 3 个地面控制点条件下的 DEM 数据中得到高程值,并将其分别与相对应检查点的高程值进行比较,12 个点的高程精度情况如图 6 所示。

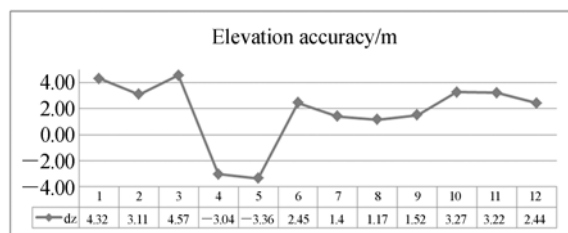


图 6 3 个地面控制点条件下高程精度

Fig. 6 Elevation accuracy with three ground control points

从图 6 中可以看到,利用 3 个控制点对三线阵影像的 RPC 模型进行精化处理后,12 个检查点中,高程最大残差 4.57 m,最小残差 1.4 m,高程中误差 3.01 m。根据 GB/T18315-2001《数字地形图系列和基本要求》标准<sup>[12]</sup>,1 : 25 000 比例尺地形图高程精度要求:山地为 4 m;在 3 个地面控制点条件下,实验区的高程精度为 3.01 m,达到 1 : 25 000 地形图成图精度要求。

(3)两种情况下的高程精度比较。

如上所述,利用天绘一号卫星三线阵影像制作 DEM 数据,在无地面控制点条件下,高程精度 5.12 m,达到 1 : 50 000 地形图成图精度要求,两种情况下的高程精度对比如图 7 所示(彩图见期刊电子版)。但从图 7 中红色曲线可以看出,曲线变化起伏较大,12 个检查点中有 11 个点的高程残差为负值,还存在一定的系统差。在利用 3 个地面控制点对三线阵影像的 RPC 模型进行精化后,生成的实验区 DEM 数据的高程精度为 3.01m,达到 1 : 25 000 地形图成图精度要求,而且从图 7 中蓝色曲线也可以看出,曲线变化起伏较小,12 个点的高程残差的绝对值稳定在 3 m 左右。

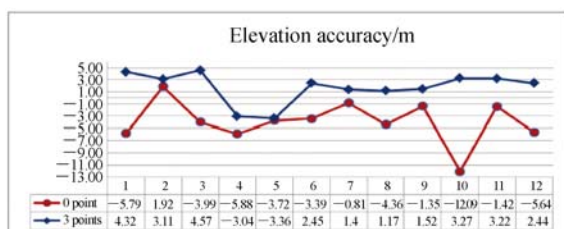


图 7 两种情况下高程精度比较

Fig. 7 Comparison of elevation accuracy in two conditions

## 5 结 论

本文提出了基于少量地面控制点的天绘一号卫星影像 RPC 模型精化算法,进一步提高了天绘一号卫星影像定位精度;提出了特征与整体松弛

相结合的匹配方法,实现了立体影像高精度匹配;最后,利用精化后的天绘一号卫星影像 RPC 模型以及立体匹配得到的同名点数据进行处理,得到了大范围、高精度的 DEM 数据,并通过实验对无地面控制点和 3 个地面控制点条件下 DEM 精度进行了比较与分析,结果表明:

(1) 直接利用单景天绘一号卫星三线阵影像可生成覆盖范围  $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$  的大范围 DEM 数据。

(2) 在无地面控制点条件下,利用天绘一号卫星影像生成的 DEM 数据,格网间距  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ,高程精度达到  $5.12 \text{ m}$ ,可满足  $1:50\,000$  地形图成图精度要求。

(3) 采用 3 个地面控制点,可提高天绘一号卫星影像的定位精度,利用其生成的 DEM 数据,格网间距  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ,高程精度达到  $3.01 \text{ m}$ ,可满足  $1:25\,000$  地形图成图精度要求。

## 参考文献:

- [1] 陈鹰. 遥感影像的数字摄影测量[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.  
CHEN Y. *Digital Photogrammetry for Remote Sensing Image*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 王蕾. 高原地区高分辨率卫星立体像对提取 DEM 及精度分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.  
WANG L. *DEM Extracted by Stereo Images of High Resolution Satellite and Accuracy Analysis in Plateau*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [3] 王任享, 胡莘, 王建荣. 天绘一号无地面控制点摄影测量[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 1-5.  
WANG R X, HU X, WANG J R. Photogrammetry of mapping Satellite-1 without ground control points [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 1-5. (in Chinese)
- [4] 刘楚斌, 张永生, 范大昭, 等. 资源三号卫星境外高精度定位方法研究[J]. 测绘通报, 2015(9): 6-8, 27.  
LIU CH B, ZHANG Y SH, FAN D ZH, *et al.*. Research on the geometrical positioning evaluation of ZY-3 satellite at abroad[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(9): 6-8, 27. (in Chinese)
- [5] 贺宏. DEM 辅助无地面控制点卫星影像定位技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.  
HE H. *Research on Satellite Image Positioning without Ground Control Point Assisted by DEM* [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [6] 张浩, 张过, 蒋永华, 等. 以 SRTM-DEM 为控制的光学卫星遥感立体影像正射纠正[J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 326-331, 378.  
ZHANG H, ZHANG G, JIANG Y H, *et al.*. A SRTM-DEM-controlled ortho-rectification method for optical satellite remote sensing stereo images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 326-331, 378. (in Chinese)
- [7] 刘楚斌, 李东, 陶俊豪, 等. 资源三号影像无(稀少)控制下的绝对定位技术[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(12): 4-7.  
LIU CH B, LI D, TAO J H, *et al.*. Direct georeferencing of ZY-03 imagery without (or with one) ground control point[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(12): 4-7. (in Chinese)
- [8] 简剑锋, 周瑜, 杨秀策. 利用天绘一号卫星影像快速制作无图区正射影像[J]. 测绘科学与工程, 2016, 36(5): 24-30.  
JIAN J F, ZHOU Y, YANG X C. Quickly produ-

- cing orthoimage at area without maps with TH-01 satellite image[J]. *Geomatics Science and Engineering*, 2016, 36(5): 24-30. (in Chinese)
- [9] 周欣,王海岩,杨国鹏. 一种天绘一号卫星影像精确定位方法[J]. *测绘科学*, 2016, 41(11): 5-9, 129.
- ZHOU X, WANG H Y, YANG G P. Precise positioning of TH-01 satellite images based on RPC models[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(11): 5-9, 129. (in Chinese)
- [10] 简剑锋,林怡,周利华,等. 一种优化的多源遥感影像高精度配准方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(10): 1427-1432.
- JIAN J F, LIN Y, ZHOU L H, *et al.*. Optimized high-precision registration method of multi-source remote sensing images[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(10): 1427-1432. (in Chinese)
- [11] 张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- ZHANG G. *Rectification for High Resolution Remote Sensing Image Under Lack of Ground Control Points*[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)
- [12] GB/T 18315-2001 数字地形图系列和基本要求[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 中国标准出版社, 2001.
- GB/T 18315-2001 Series and basic requirements of digital topographic maps[S]. Beijing: The State Bureau of Quality and Technical Supervision. China Standard Press, 2001. (in Chinese)

#### 作者简介:



简剑锋(1969—),男,江西樟树人,研究员,1990年,1996年于解放军第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位,2009年于西安电子科技大学获得博士学位,主要从事卫星摄影测量、遥感图像处理等方面的研究。E-mail: 13991180032@139.com



李新涛(1975—),男,河南临颖人,副研究员,1997年于解放军测绘学院获得学士学位,2005年于解放军信息工程大学获得硕士学位,主要从事无人机遥感图像快速测绘处理技术研究。E-mail: xintao\_li@sina.com.cn



胡燕(1972—),女,陕西西安人,副研究员,1995年于解放军第二炮兵工程学院获得学士学位,2004年于解放军信息工程大学获得硕士学位,2015年于中国科学院大学获得光学工程博士学位,主要从事航天摄影测量卫星应用的研究。E-mail: huyan999@sina.com