

引用格式: Fan Xingwang, Liu Yuanbo. Error Analysis of Digital Elevation Model Generation based on Collinearity Equation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 694-699. [范兴旺, 刘元波. 利用共线方程的 ALOS DEM 制作误差分析[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 694-699.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0694

利用共线方程的 ALOS DEM 制作误差分析

范兴旺^{1,2}, 刘元波¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 卫星遥感是获取 DEM 数据的重要手段, 定量化和降低 DEM 数据误差是应用 DEM 数据的前提。在共线方程理论的基础上, 模拟分析了 DEM 数据精度与内外方位元素之间的定量关系, 以覆盖鄱阳湖地区的 ALOS PRISM 立体像对为研究数据, 根据 SRTM 数据计算 DEM 误差, 并求解影像内外方位元素误差。研究表明: 影像角度误差是影响 DEM 误差的主要因素。消除角度元素误差后, DEM 数据误差的均值由 4.4 m 降为 0.2 m, 标准差由 7.7 m 降为 2.7 m。

关键词: DEM; SRTM; ALOS PRISM; 内方位元素; 外方位元素

中图分类号: P 236 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2015)04-0694-06

1 引言

遥感方法能够快速高效地获取局部乃至全球范围的数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model)。全色波段的立体像对是获取 DEM 的重要数据源。目前, 能够提供立体像对的传感器主要有 Terra AS-TER^[1]、SPOT HRS^[2]、IRS P5^[3] 和 ALOS PRISM^[4] 等。这些数据具有米级、十米级的空间分辨率, 能够用于制作兼具高分辨率和高精度的 DEM 数据。2000 年, 美国国家航空航天局 (NASA, National Aeronautics and Space Administration) 和日本国家图像测绘局 (NIMA, National Imagery and Mapping Agency) 采集了全球中低纬度地区 (56°S~60°N) 的 C 波段干涉雷达数据, 制作并公布了具有 90 m 空间分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据^[5]。在 90% 的置信水平下, SRTM 数据的平面和高程精度可达 9.0 和 6.5 m^[6], 已被相关学者用作 DEM 制作的参考数据^[7]。

严格传感器模型 (Rigorous Sensor Model,

RSM) 考虑传感器成像几何的物理特性, 模型参数包括像主点坐标、焦距、摄影中心坐标、传感器定轨和定姿参数等。利用这些参数可以建立像空间坐标和物空间坐标之间的定量关系。严格传感器模型的核心是共线方程理论。共线方程是对卫星遥感影像进行目标定位的严格几何模型, 是高分辨率卫星遥感影像几何处理的基本模型^[8]。利用共线方程能够准确地恢复地表三维坐标^[9]。研究表明, 内外方位元素误差是影响遥感影像定位的直接原因, 也是影响 DEM 数据精度的主要原因^[10]。其中, 卫星姿态角的误差被认为是影响影像定位精度的主要原因^[11]。在短时间内, 包括卫星姿态角在内的外方位元素误差可视为常差或系统误差, 可通过少量高精度地面控制点加以校正^[11-12]。

高分辨率遥感影像的定位精度研究已取得显著的成果。采用控制点校正定位误差, 提高影像定位精度的方法日渐成熟。使用存在定位误差的遥感数据制作 DEM 必然会引入误差。如何量化影像定位误差对 DEM 数据精度的影响值得深入探讨。本文

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2014-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41430855), 国家 973 计划项目 (2012CB417003), 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点项目 (NIGLAS2012135001)。

作者简介: 范兴旺 (1989—), 男, 安徽芜湖人, 博士研究生, 主要从事水文遥感研究。E-mail: xwfan1989@163.com。

通讯作者: 刘元波 (1969—), 男, 山东济宁人, 研究员, 主要从事水文遥感研究。E-mail: ybliu@niglas.ac.cn。

在共线方程的基础上,量化了遥感影像内外方位元素误差对 DEM 数据精度的影响程度。以覆盖鄱阳湖地区的 ALOS PRISM 立体像对为研究对象,在实测 GPS 控制点的支持下制作 DEM 数据,并与 SRTM DEM 数据比较,得到 DEM 数据的误差分布。在此基础上计算内外方位元素误差,并从 DEM 数据中消除由内外方位元素引入的误差。本研究追溯了 DEM 数据误差的根本原因,为减少 DEM 数据误差提供了理论支持。

2 基于共线方程的理论推导

严格传感器模型是遥感影像精确定位的理论基础。除考虑影像内外方位元素外,严格传感器模型还需要考虑诸如轨道异常、大气影响和地球自转等因素的影响。对于特定传感器来说,这些因素的影响在卫星在轨运行过程中基本保持不变,经过地面控制点校正后,其影响可忽略不计^[10]。因此,本文采用的共线方程仅考虑影像的内外方位元素。

图 1 为 DEM 制作原理示意图。其中, $S(X_s, Y_s, Z_s)$ 为某一时刻 t 的摄影中心, $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 为地面点,对应于图像上的像点 $a(x, y)$ 。 $O(x_0, y_0)$ 为像主点, OS 与图像所在平面垂直,垂距为传感器(等效)焦距 f 。对于立体像对中的另一张像片,其摄影中心为 $S'(X'_s, Y'_s, Z'_s)$,像主点为 $O'(x'_0, y'_0)$,像点为 $a'(x', y')$ 。

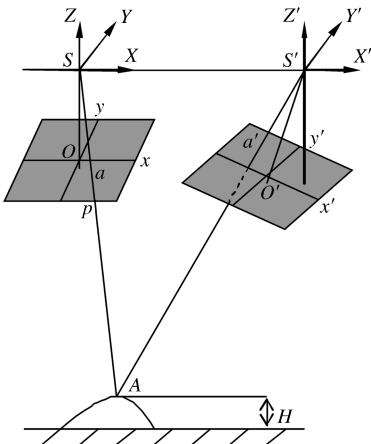


图 1 DEM 制作原理示意图
Fig. 1 Overview of DEM generation

仅考虑内外方位元素的线阵列 CCD(Charge Coupled Device) 共线方程如下^[11]:

$$\begin{aligned} \frac{X_A - X_S}{Z_A - Z_S} &= \frac{a_1 f \sin \theta + a_2 y - a_3 f \cos \theta}{c_1 f \sin \theta + c_2 y - c_3 f \cos \theta} \\ \frac{Y_A - Y_S}{Z_A - Z_S} &= \frac{b_1 f \sin \theta + b_2 y - b_3 f \cos \theta}{c_1 f \sin \theta + c_2 y - c_3 f \cos \theta} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: f 为 CCD 的等效焦距, θ 为像片倾角, y 为像点纵坐标。 $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为外方位角元素 φ, ω 和 κ 的函数。

典型的立体观测模式为星下点 / 侧视模式。式 (1) 对于星下点影像和侧视影像同时成立。对于星下点影像, 记式 (1) 的右侧分别为 g_1 和 g_2 。同理, 对于侧视影像, 记式 (1) 的右侧分别为 g_3 和 g_4 。因此, 可通过式 (2) 计算 Z_A :

$$Z_A = \frac{-(Z'_s - Z_s)g_3 + X'_s - X_s}{g_1 - g_3} + Z_s \quad (2)$$

假设传感器等效焦距 f 和侧视角度 θ 的误差可忽略不计, 式 (2) 存在误差的物理量有像空间二维坐标、外方位线元素和外方位角元素。在短时间内, 传感器的外方位元素的误差可视为常数^[11]。因此, $(X'_s - X_s), (Y'_s - Y_s), (Z'_s - Z_s)$ 的误差可忽略不计。因此, Z_A 的解算精度仅与 g_1, g_2, g_3 和 g_4 的误差相关, 即与 $Z_s, Z'_s, y, y', \varphi, \omega, \kappa, \varphi', \omega'$ 和 κ' 的误差相关。对式 (2) 求全微分得到 dZ_A 的表达式如下:

$$\begin{aligned} dZ_A &= M \cdot \delta^T \\ M &= \left[\frac{\partial Z_A}{\partial y}, \frac{\partial Z_A}{\partial y'}, \frac{\partial Z_A}{\partial Z_s}, \frac{\partial Z_A}{\partial \varphi}, \frac{\partial Z_A}{\partial \omega}, \frac{\partial Z_A}{\partial \kappa}, \frac{\partial Z_A}{\partial \varphi'}, \frac{\partial Z_A}{\partial \omega'}, \frac{\partial Z_A}{\partial \kappa'} \right] \\ \delta &= [dy, dy', dZ_s, d\varphi, d\omega, d\kappa, d\varphi', d\omega', d\kappa'] \end{aligned} \quad (3)$$

其中: dy 和 dy' 分别为星下点和后视影像的内方位元素误差, dZ_s 为外方位线元素误差, $d\varphi, d\omega, d\kappa, d\varphi', d\omega'$ 和 $d\kappa'$ 分别为外方位角元素误差。

Z_A 为 WGS-84 坐标系下坐标值。通过简单的数学推导, Z_A 与大地高 H 之间的转化公式如下:

$$Z_A = \frac{(b + H) \sin B}{\sqrt{1 + \frac{(a + H)^2 - (b + H)^2}{(b + H)^2}}} \quad (4)$$

其中: a 和 b 分别为参考椭球的长半轴和短半轴, H 为地面点大地高, B 为地面点大地纬度。对式 (4) 求微分并忽略小值项, 有式 (5) 成立:

$$dZ_A = dH \cdot \sin B \quad (5)$$

根据式 (3) 和式 (5) 可确定内外方位元素误差对于 DEM 数据精度的影响程度。

3 DEM 精度影响因子及影响程度

鄱阳湖地区毗邻庐山, 地形起伏较大, 便于 DEM 精度评价。本文拟采用 2007 年 10 月 24 日覆盖鄱阳湖地区的 2 对 ALOS PRISM 立体像对, 采用星下点和后视成像模式生成 DEM。影像头文件包含了传感器的成像过程的姿态和轨道信息。根据星下点和后视影像的头文件, $(Z'_s - Z_s)$ 约为 -300 km , $(X'_s - X_s)$ 约为 1 km 。 φ, ω 和 κ 分别为

0.4°、2.1°和 4.7°, φ' 、 ω' 和 κ' 分别为 0.4°、2.1°和 -1.6°。 θ 和 θ' 分别为 0.2°和 23.7°。由于星下点影像的中心与后视影像的中心重合,取 $y \approx y'$ 。以影像中心为坐标原点,中心以东的 y 取负值,中心以西的 y 取正值。根据式(3),计算内外方位元素误差对 Z_A 的影响程度,结果如图 2 所示。根据式(5),内外方位元素对于 DEM 的影响程度是 Z_A 的 $\sin B$ 倍。根据鄱阳湖地区的大地纬度,该值约为 0.48。

根据图 2,星下点影像内方位元素误差对

DEM 精度的影响更大,比后视影像内方位元素误差的影响高出约两个数量级。外方位线元素误差 dZ_s 对 DEM 精度的影响为一个常数。在鄱阳湖地区,1 m 的 Z_s 误差对应于 DEM 的误差约为 2 m。对于角度元素,星下点影像 φ 角误差对 DEM 精度的影响最大,其次为后视影像 φ' 角误差。星下点影像 κ 角和后视影像 κ' 角误差的影响次之,星下点影像 ω 角和后视影像 ω' 角误差对 DEM 精度的影响程度最小。

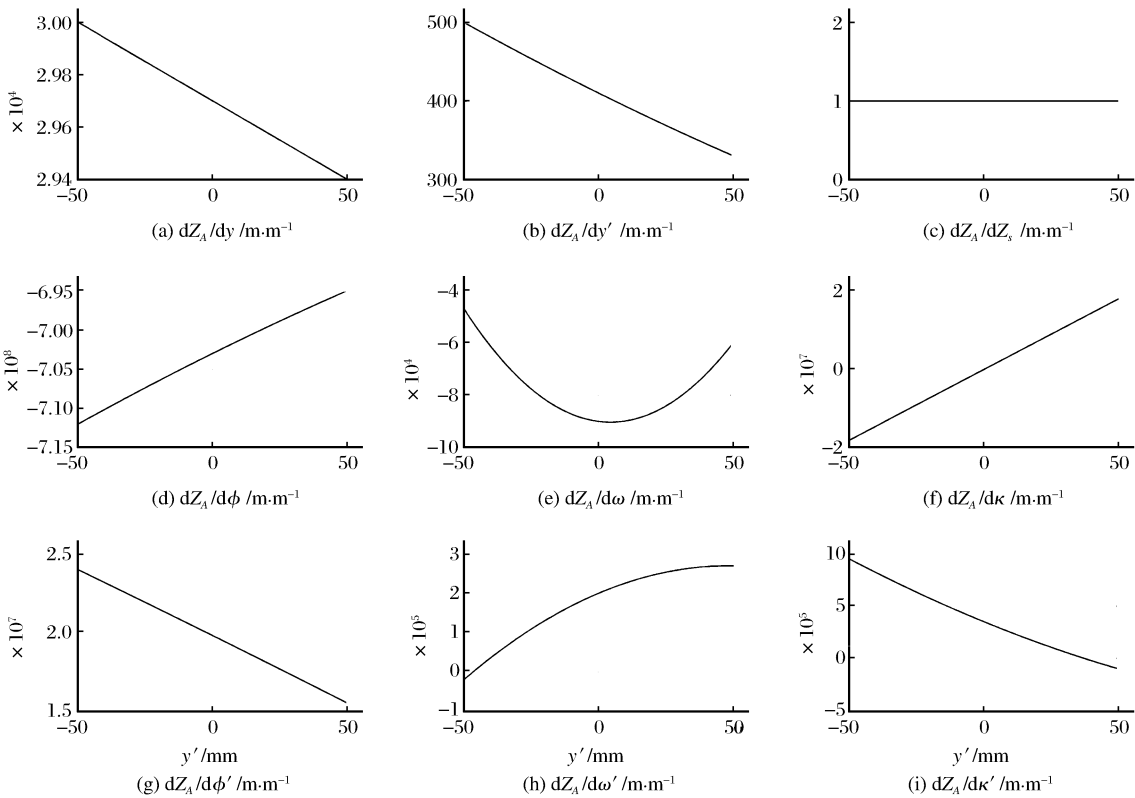


图 2 内外方位元素误差对 DEM 数据精度的影响

Fig. 2 Effects of interior and exterior orientation parameters on DEM accuracy

4 DEM 制作及其误差分布

为获取更高精度的 DEM 数据,本文采用差分 GPS 实测地面控制点坐标,用以校正内外方位元素的误差。野外采样前,根据 2.5 m 空间分辨率的 ALOS PRISM L1B2 数据确定控制点位置及其空间分布。由于两对立体像对之间具有重叠部分,设计控制点时充分考虑在影像重叠区域布设控制点,同时考虑控制点在空间上的均匀分布。野外采样时间为 2013 年 1 月,图像获取时间至采样时间内,控制点所在的目标(道路)未发生变化。控制点数据采用 WGS 84 UTM 基准,投影带为 50 N 带,坐标精度为厘米级。

DEM 制作利用 ERDAS 软件的 LPS 模块实

现。分别在星下点和后视影像上定位控制点位置,并进行三角网平差。平差结果显示,X、Y 和 Z 方向的残差都小于 2 m。经过影像匹配等过程最终生成具有 7.5 m 空间分辨率的 DEM 数据。由于山区和水面匹配的特征点少,存在影像匹配难度大等问题,相应的 DEM 数据精度较差。本文根据 SRTM 数据剔除了研究区内的庐山山区、鄱阳湖水面、大型水库和圩坑等匹配精度低的区域。对于山区,采用 SRTM 大于 300 m 作为判别条件;对于水域,采用 SRTM 坡度值为 0 作为判别条件。

尽管 SRTM 数据的空间分辨率远低于 ALOS PRISM 数据,但其较高的平面精度和高程精度能够为 DEM 数据精度评价提供支持。为评价 DEM 数

据的绝对精度,将实测 GPS 控制点高程数据与相应位置的 SRTM DEM 数据作比较,结果如图 3 所示。SRTM DEM 数据与 GPS 实测高程值之间存在的良好的线性关系,相关系数(R)和标准差(SD)分别达到 0.995 和 2.250 m。通过图 3 中的转化公式校正 SRTM DEM 数据,并将校正后的数据用于 ALOS DEM 数据精度评价。图 4 为 ALOS DEM 图像,空间分辨率为 7.5 m,高程最大值为 300.0 m(山区判别阈值),最小值为-50.0 m,均值为 33.6 m。

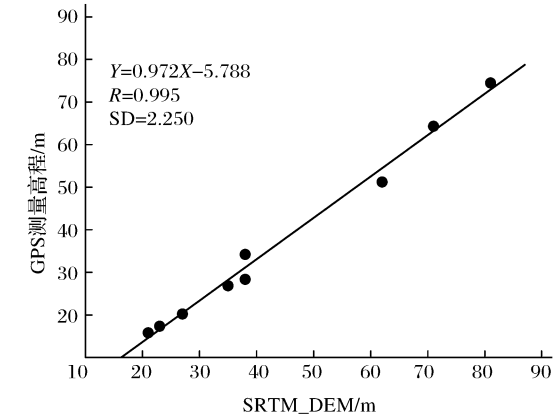


图 3 SRTM DEM 数据与 GPS 高程值比较

Fig. 3 Comparison of SRTM DEM and GPS height

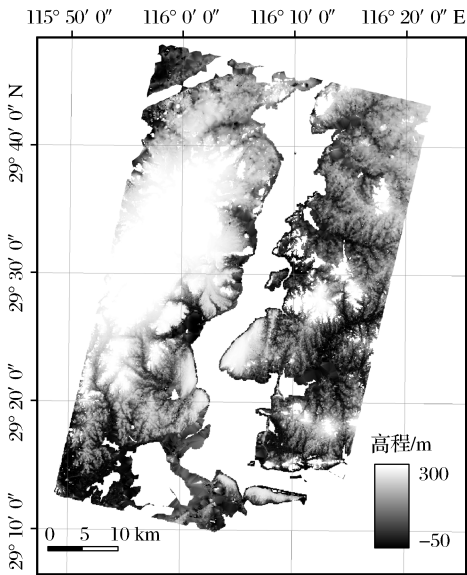


图 4 ALOS PRISM 制作的 DEM 数据

Fig. 4 ALOS PRISM derived DEM

ALOS DEM 与 SRTM 的差值具有显著的规律性。影像中心地带 DEM 误差较大,自影像中心向影像边缘(交轨方向)误差逐渐减小。DEM 数据的最大误差为 35.0 m,最小误差为-13.8 m,误差均值为 4.4 m。沿轨道方向对 DEM 误差取均值,得到 DEM 在交轨方向的误差分布,结果如图 5 所示。

DEM 误差在影像中心位置达到最大值为 13.8 m,在影像边缘处达到最小值为-4.4 m。沿轨道方向对 DEM 误差取均值可有效地降低由影像匹配问题引入的 DEM 误差。

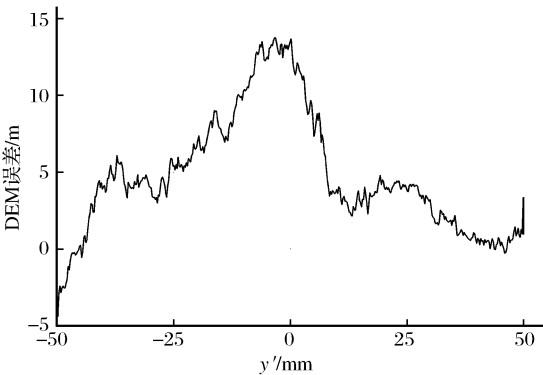


图 5 交轨方向 DEM 误差分布

Fig. 5 Error distribution of ALOS derived DEM in cross-track direction

5 内外方位元素误差求解与 DEM 精度改进

高精度 GPS 控制点数据降低了由控制点精度问题引入的误差;采用误差平均的方法减少了影像匹配问题引入的误差。假设经校正的 SRTM DEM 数据精度可靠,图 5 中的 DEM 误差与内外方位元素的残余误差直接相关。根据图 2 的模拟结果和图 5 中的 DEM 差值,通过式(3)和式(5),采用最小二乘法,可以计算内外方位元素的残余误差。计算得到的内外方位元素残余误差如表 1 所示。其中,角度误差是导致 DEM 数据误差的主要因素,内方位元素和外方位线元素的误差可忽略不计。角度元素中,星下点影像的 φ 角误差最大(58"),其次为星下点影像的 κ 角误差(-0.035"),其他角度误差均小于 0.01"。参考图 2,星下点影像的 φ 和 ω 角误差对 DEM 绝对精度的影响可达十米级,其次为星下点影像的 κ 角误差,其影响可达米级。

根据图 2 和表 1 可模拟计算 DEM 误差。模拟 DEM 误差与实际 DEM 误差对比如图 6 所示。两者之间具有显著的相关性,相关系数达到 0.864,标准差为 1.696 m。消除角度元素导致的 DEM 误差后,图 5 中 DEM 误差的均值由 5.1 m 降为 0,误差的标准差由 3.8 m 降为 1.9 m,数据精度得到了显著提高。将该方法应用于整幅 DEM 影像,DEM 误差的均值由 4.4 m 降为 0.2 m,误差的标准差由 7.7 m 降为 2.2 m,残余误差接近于正态分布。

表 1 影像内外方位元素误差

Table 1 Error associated with interior and exterior orientation parameters

内方位元素误差		线性元素	外方位元素误差					
/mm		/m	角度元素/''					
dy	dy'	dZ _s	dφ	dω	dκ	dφ'	dω'	dκ'
0	0	0	4.4e-3	-58	-0.035	6.4e-3	-2.7e-4	-8.6e-4

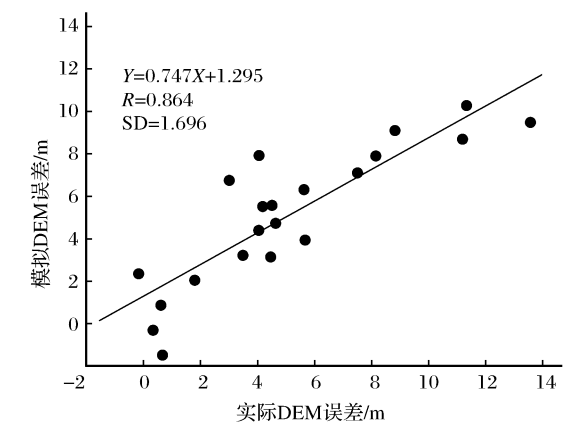


图 6 模拟 DEM 误差与实际 DEM 误差比较
Fig. 6 Comparison of simulated and actual DEM error

由图 6 可知,消除角度元素的影响后,DEM 尚存在一定的误差。这些误差可能与传感器镜头畸变、大气折光差等其他要素有关。这些因素在传感器成像过程中都会造成影像的几何误差,并最终影响 DEM 的获取。相比这些因素来说,影像的角度误差对于 DEM 精度的影响更加值得关注。

6 结 语

本文从共线方程理论出发,推导了 DEM 误差与内外方位元素误差之间的解析型数学关系,以覆盖鄱阳湖地区的 ALOS PRISM 立体像对为研究对象,由 DEM 误差推算了影像内外方位元素的残余误差,阐明了 DEM 数据误差的主要来源,为减小 DEM 数据误差提供了理论分析和案例解析。本文的主要结论包括两个方面:

(1)通过对共线方程的线性化,模拟了内外方位元素误差对 DEM 精度的影响程度。对于内方位元素来说,星下点影像的内方位元素误差对 DEM 数据精度的影响程度更大。外方位线元素对 DEM 数据精度的影响为一个常数。在所有外方位角元素中,星下点影像和侧视影像俯仰角 φ 对 DEM 数据精度的影响程度最大。

(2)外方位角元素误差是影响 DEM 数据精度的主要原因。其中,星下点影像的角元素对 DEM 精度的影响大于侧视影像的角元素。消除角元素误

差后,DEM 误差均值由 4.4m 降为 0.2m,误差标准差由 7.7m 降为 2.2m,误差接近于正态分布。

参考文献 (References):

[1] Hirano A, Welch R, Lang H. Mapping from ASTER Stereo Image Data: DEM Validation and Accuracy Assessment[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 57(5): 356-370.

[2] Poli D, Zhang L, Gruen A. SPOT-5/HRS Stereo Images Orientation and Automated DSM Generation[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 35(B1): 421-432.

[3] Fan Xingwang, Weng Yongling, Hu Wusheng, et al. DEM Extraction and Accuracy Assessment based on IRS-P5 Stereo Images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(4): 547-551. [范兴旺, 翁永玲, 胡伍生, 等. IRS-P5 立体像对提取 DEM 及精度评价[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(4): 547-551.]

[4] Schwind P, Schneider M, Palubinskas G, et al. Processors for ALOS Optical Data: Deconvolution, DEM Generation, Orthorectification, and Atmospheric Correction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(12): 4074-4082.

[5] Van-Zyl J J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): A Breakthrough in Remote Sensing of Topography[J]. Acta Astronautica, 2001, 48(5): 559-565.

[6] Rodriguez E, Morris C S, Belz J E. A Global Assessment of the SRTM Performance[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72(3): 249-260.

[7] Gonçalves J A. Orientation and DEM Extraction from ALOS PRISM Images Using the SRTM DEM as Ground Control[J]. Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37: 1177-1182.

[8] Poli D. General Model for Airborne and Spaceborne Linear Array Sensors[J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2002, 34(1): 177-182.

[9] Toutin T, Cheng P. DEM Generation with ASTER Stereo Data[J]. Earth Observation Magazine, 2001, 10(6): 10-13.

[10] Kamiya I. Geometric Characteristics of the Early Products of ALOS PRISM[J]. Bulletin of the Geographical Survey Institute, 2007, 54(2): 75-82.

[11] Yuan Xiuxiao, Yu Junpeng. Calibration of Constant Angular Error for High Resolution Remotely Sensed Imagery[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(1): 36-41. [袁修

孝,余俊鹏. 高分辨率卫星遥感影像的姿态角常差检校[J]. 测绘学报,2008,37(1):36-41.]

[12] Yuan Xiuxiao, Yu Xiang. Calibration of Angular Systematic Errors for High Resolution Satellite Imagery[J]. 2012, 41(3):385-392. [袁修孝,余翔. 高分辨率卫星遥感影像姿态角系统误差检校[J]. 测绘学报,2012,41(3):385-392.]

Error Analysis of Digital Elevation Model Generation
based on Collinearity Equation

Fan Xingwang^{1,2}, Liu Yuanbo¹

(1. Nanjing Institute of Geology and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Satellite remote sensing provides important means for DEM generation. Quantification and reduction of DEM error serves as an important prerequisite for reliable use of DEM data. For this purpose, the effects of Interior and Exterior Orientation Parameters (IOPs and EOPs) on DEM accuracy are simulated based on collinearity equation. Subsequently, errors associated with IOPs and EOPs are calculated with reference to SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data, by using stereo imageries covering Poyang lake area. The result shows that angular errors are the major contributors to DEM error. The mean DEM error would be reduced from 4.4 m to 0.2 m, and the standard error would be reduced from 7.7 m to 2.7 m without angular errors.

Key words: DEM; SRTM; ALOS PRISM; Interior orientation parameter; Exterior orientation parameter