HU Wenmin,DI Kaichang,YUE Zongyu,et al. Crossover Analysis and Adjustment for Chang'E-1 Laser Altimeter Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2013,42(2):218-224.(胡文敏,邸凯昌,岳宗玉,等. 嫦娥一号激光高度计数据交叉点分析与平差处理[J].测绘学报,2013,42(2):218-224.)

嫦娥一号激光高度计数据交叉点分析与平差处理

胡文敏[1,2],邸凯昌[1,2],岳宗玉[1,2],刘召芹[1,2]

1. 遥感科学国家重点实验室,北京 100101; 2. 中国科学院遥感应用研究所,北京 100101

Crossover Analysis and Adjustment for Chang'E-1 Laser Altimeter Data

HU Wenmin,DI Kaichang,YUE Zongyu,LIU Zhaoqin

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Beijing 100101, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: A preliminary result of crossover analysis and adjustment of Chang'E-1(CE-1) laser altimeter (LAM) data of the Moon is presented. With about 9.12 million altimetric points acquired by the laser altimeter, more than 1.4 million crossovers covering the entire lunar surface are derived after eliminating outliers of orbits and altimetric points. The distribution of crossover points, the differences of crossover and the relationship with time have been systematically analyzed. Least-squares crossover adjustments with four basis functions of time (trigonometric functions and polynomials) are developed and compared to reconcile the LAM data by minimizing the crossover residuals globally. In the studying area (0°N～60°N, 50°W～0°W), the crossover residuals can be reduced from 62.1 m to less than 37 m with anyone of the four models. The artefacts are reduced and the quality of the DEM generated from the adjusted LAM data is improved accordingly.

Key words: Chang'E-1; laser altimeter; crossover; spatial and temporal distribution; adjustment; DEM

摘　要:对嫦娥一号激光高度计进行轨道交叉点分析和平差方法研究。根据获取的 912 万个激光高度测量点进行交叉点计算,产生全月范围内 140 多万个轨道交叉点,对交叉点的位置分布特点与交叉点不符值的时间分布特性进行了系统分析,并运用 4 种基于时间的函数模型对交叉点不符值进行平差处理和对比分析。在试验区(0°N～60°N,50°W～0°W)内,4 种交叉点平差模型均能使交叉点高程不符值中误差从平差前的 62.1 m 降至 37 m 以内,在此基础上产生的 DEM 条带现象消失或减弱,表明交叉点平差能明显改进 DEM 的质量。

关键词:嫦娥一号;激光高度计;交叉点;时空分布;平差;数字高程模型

中图分类号:P237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001-1595(2013)02-0218-07

基金项目:国家 973 计划(2012CB719902);国家自然科学基金(41171355;40871202)

1 引　言

月球测绘是月球探测工程和月球研究中的基础工作。中国第一颗月球探测卫星嫦娥一号(CE-1)获取了月面 CCD 影像和激光高度计(laser altimeter, LAM)数据,为研究月球地质特征、月球起源和演变提供基础的地形地貌信息。其中,激光高度计测量卫星到月表星下点的距离,用于制作月球全球表面数字高程模型(DEM)。文献[1]对 CE-1 两个月正飞阶段的激光观测数据进行了转换和处理,获取了第一个月球全球地形模型 CLTM-s01,文献[2]制作了空间分辨率 3 km 的全月 DEM 模型,文献[3]也利用 CE-1 卫星激光测高数据进行了月球 DEM 的制作,并与 Clementine、ULCN2005、CLTM-s01 进行了比较。在采用 CE-1 激光测高数据生成 DEM 时,局部区域尤其在比较平坦区域的 DEM 存在条带噪声,表明由于轨道与测量的误差,多个轨道的高度计数据间以及与CE-1 获取的 CCD 影像之间存在着误差和不一致性[4-5]。为获取更高精度的月球 DEM,为其他科学研究提供地形数据支持,对月球激光高度计数据进行误差分析和平差处理研究是非常有必要的。

在国内外对地观测海平面模型和重力场模型研究中,交叉点分析常用于消除轨道的径向误差[6-12]。在美国宇航局的火星 MOLA(Mars orbiter laser altimeter)数据、月球 LOLA(lunar orbiter laser altimeter)数据的处理中,交叉点分析也取得了较好的效果[13-16],日本 SELENE 计划中,激光测高数据

LALT 的交叉点被用来对卫星轨道解算进行约束[17]。CE-1 卫星采用 200 km 的高极轨道，飞行姿态稳定，有利于卫星精密定轨，其交叉点反映了不同轨在同一地形点上的差异，不论这些误差具体来源于轨道、测距、时间、环境或者仪器，如果能减小这些误差，即可改进地形精度。本文采用交叉点分析和平差的方法对 CE-1 激光高度计数据进行误差处理以生成高精度的 DEM。由于月球卫星的轨道并不同于对地观测卫星的轨道，其轨道的稳定性和测控精度与地面卫星均有不同[18-21]，交叉点的计算和处理也会不同。

2　CE-1 交叉点与交叉点不符值

2.1　交叉点和交叉点不符值

卫星激光高度测量中，由于其周期运行，会在不同时间点经过目标天体同一位置，这个位置即为交叉点。由于轨道误差以及测量过程的误差，轨道在两次不同时间点上对同一地点产生的高度测量值出现偏差，这个偏差称为交叉点不符值（图 1）。假设 t 和 t' 为轨道在交叉点处的测量时间，$h(t)$ 和 $h(t')$ 为产生的 2 个高度测量值，则

$$d(t,t')=h(t)-h(t') \tag{1}$$

即为交叉点不符值。

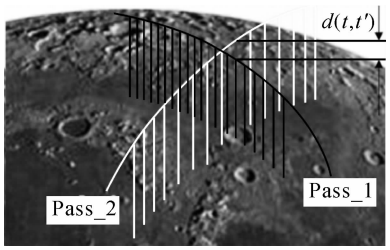

图 1　激光高度测量中的交叉点与交叉点不符值

Fig. 1　Altimetric crossover and crossover difference

2.2　CE-1 交叉点和不符值计算

从中国科学院国家天文台获取 CE-1 运行期间的 1397 轨有效激光高度计 2B 级数据，去掉其中 4 条测高点少于 50 个的轨道，采用其中 1393 轨数据用于交叉点计算与分析。每轨数据约有 5000～7000 个有效测高点，连续激光点时间间隔为 1 s，共约 912 万个激光高度测量点。计算交叉点数据之前，先对测高数据进行粗差剔除，假设相邻两点的高差为 Δh，相邻两点的直线距离为 Δd，当 $\Delta h/\Delta d>\tan 60°$ 时，该点被判定为粗差点，在本研究中，共去除 31 077 个粗差点。

由于月球引力场的特征和差异，月球卫星轨道不同于地球卫星冻结轨道[22-23]，不能利用轨道运行的周期性来求解交叉点的位置。本研究采用逐一线段检测的方式，判断每一轨上每两个连续的 LAM 轨迹点组成的线段是否与另一轨任两个连续的 LAM 轨迹点组成的线段相交，若线段相交，则为交叉点，并求解交点坐标，然后根据求出的交点坐标与线段端点的坐标，线性解算交点处在交叉两轨 (i,j) 上的时间值 t_i、t_j。在每条轨道上选取交叉点左右邻近各 3 个点，共 6 个点处的 LAM 高度值，采用 Akima 插值[24]方法解算出交点处相应的高度值 a_i、a_j。去除粗差点后的测高数据点，由于覆盖全月面，在交叉点计算中数据量非常大，因此采用了分块的策略分别计算每块区域内的交叉点。

3　CE-1 交叉点特点分析

3.1　全球空间分布特性

经过计算，全月面共产生 1 620 056 个交叉点，由于激光测高过程中有数据缺失的情况，为避免交叉点处参与插值的 LAM 点时间跨度过大而造成插值后交叉点处的高程出现较大的偏差，对相交线段端点处的 LAM 点进行了时间检核，保留了其中插值范围在 7 s 以内（对应月面距离约 9800 m）的 1 463 107个点，其不符值直方图分布如图 2。

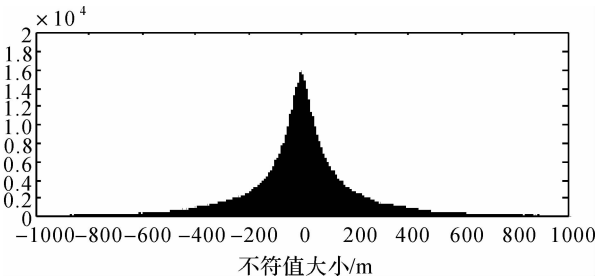

图 2　月球范围 1 463 107 个交叉点不符值的分布直方图

Fig. 2　Histogram of 1 463 107 crossover differences over the lunar surface

CE-1 卫星精密轨道由统一 S 波段（USB）测距测速和甚长基线干涉（VLBI）测量数据联合确定，轨道径向误差 30 m[1,18,21]。而对不符值幅度 300 m 以内的 1 150 346 个点进行统计，其 RMS 值为 120.05 m，可见交叉点不符值是轨道、测距、时间、环境或者仪器所造成的误差的综合反映。由于月球的自转，交叉点可以出现在任何纬度地带。

CE-1 采用的是极圆轨道，轨道倾角为 88.2°[2]，星下点轨迹在中低纬度地区与经线近似平行，随着轨道的不断运行，后期运行轨迹与前期轨迹的交叉点不断增多，因此，CE-1 激光高度计产生的交叉点在中低纬度比较稀疏，而在两极区域分布非常密集。其中，93.1%的交叉点分布在南北纬 80°以上的两极地区，如图 3(见文末)。对交叉点不符值的统计显示，97.5%不符值超过 300 m 的点分布在南北两极 70°～90°范围以内。因此，对交叉点进行平差处理时，需要先对交叉点数据进行粗差剔除以避免交叉点不符值误差过大而造成高程纠正出现较大的偏差。

3.2 时间特性

交叉点随时间变化的规律是确定平差模型的重要依据。图 4 显示了一个地球日(2008 年 5 月 17 日，第 2180～2191 轨)时段内交叉点不符值幅度的变化(a)和交叉点纬度随时间变化的分布(b)，每轨交叉点的数量在两极位置出现高峰值。随着轨道的南北运行，不符值整体幅度呈现周期性变化，周期为 2，即一轨两次变化，且相邻轨道上交叉点不符值的分布和变化规律相似，因此，可以采用基于时间参量的函数来描述不符值大小的变化。由于沿轨交叉点不符值幅度的变化类似于正余弦曲线，本文依据轨道运行周期，采用三角函数为不符值拟合的基本模型，并在三角函数模型基础上简化成多项式的形式进行交叉点不符值平差。

图 5 为第 0247、第 0555、第 2500、第 2900 轨上的交叉点不符值随时间的变化，其中轨道运行周期约为 2 h 12 min，参考时间起点为每一轨数据第一个测高点的时间值。图 5 显示了每轨变化规律在相似的基础上仍然存在差异，因此，可以对每轨数据采用相同形式但不同参数的模型进行处理，并通过时间参量的设置对相邻轨道不符值的变化进行约束。

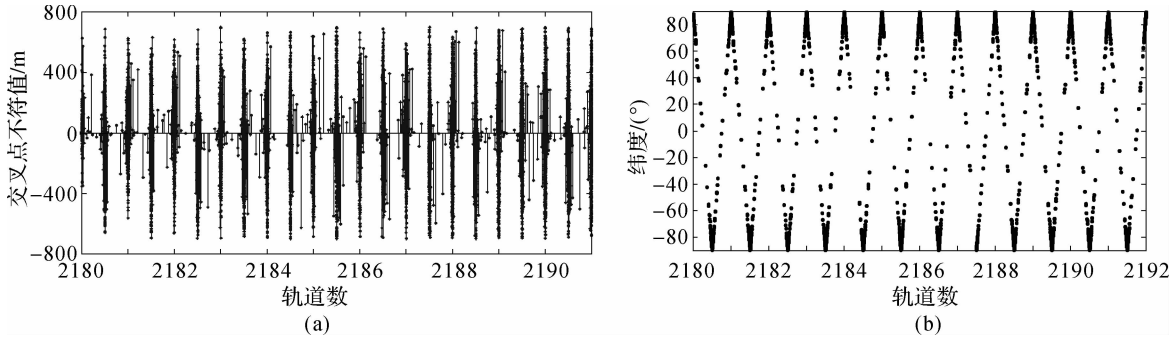

图 4 交叉点不符值(a)和交叉点纬度(b)在一个地球日内随时间的变化

Fig. 4 The variation of crossover differences(a) and latitudes(b) versus time within one Earth day

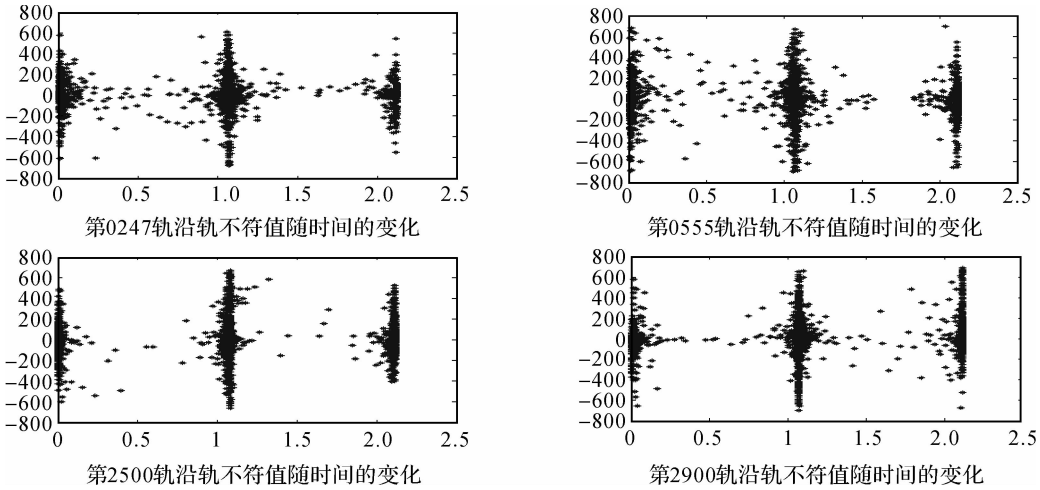

图 5 第 0247、第 0555、第 2500、第 2900 轨上的交叉点不符值随时间的变化(参考时间起点为每一轨数据第一个测高点的时间值，单位：h)

Fig. 5 Crossover differences versus time on orbits 0247、0555、2500、2900 (the reference starting point is the time of the first altimetric point on each track)

4　CE-1 LAM 交叉点平差模型

本文参考了火星激光高度计数据中交叉点的处理方法[13]，并根据不符值的定义和 CE-1 交叉点不符值沿轨分布特性，采用基于时间函数的模型来描述交叉点不符值的变化。为减小交叉点处测高点的偏差，假设 $f(t)$ 和 $f(t')$ 分别为交叉点处两个不同时间点上高度值的修正量，则可以建立 t 和 t' 时刻的不符值误差方程

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{\Delta d}(t)&=+d(t,t')+f(t)-f(t')\\ \boldsymbol{\Delta d}(t')&=-d(t,t')-f(t)+f(t')\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

通过使 $\boldsymbol{\Delta d}(t)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Delta d}(t)$ 最小达到交叉点处高度测量的修正。其中，$f(t)$ 和 $f(t')$ 是基于交叉点处时间的函数，其形式为

$$f(t)=\boldsymbol{G}_i\boldsymbol{p}_j\tag{3}$$

即位于第 j 轨上的第 i 个交叉点，$\boldsymbol{G}_i$ 为时间参数构成的系数矩阵，$\boldsymbol{p}_j=[p_0\quad p_1\quad\cdots\quad p_n]^{\mathrm{T}}$ 为模型未知参数矩阵。考虑到不同模型形式对平差结果的影响，采用了 4 种不同形式的模型对试验区进行了试验，并对平差效果进行了对比，4 种模型形式如下：

模型 1　$f(t)=p_0+p_1\cos wt+p_2\sin wt$　(4)

模型 2　$f(t)=\sum_j p_j g(t-j),\ g(t)=(1-4t^2)^2$　(5)

模型 3　$f(t)=p_0+p_1t+p_2t^2$　(6)

模型 4　$f(t)=p_0+p_1t+p_2t^2+p_3t^3$　(7)

由式(3)可知，每轨有 $(n+1)$ 个待解参数 $\boldsymbol{p}_j$，在每一个交叉点处，式(2)需要解算 $2(n+1)$ 个未知系数。由于每一轨上的交叉点数据都可以建立式(2)的误差方程，因此有足够的观测值来解算所有的未知系数。对于所有的交叉点数据，$\boldsymbol{G}$ 为一个非常庞大的稀疏矩阵，且值比较近似，解算 $\boldsymbol{p}_j$ 的过程中会出现奇异矩阵。因此，设置 $\boldsymbol{p}_j$ 的初始值为 0，即假设所有轨道的高度测量均没有误差，并通过协方差逆阵 $\boldsymbol{C}_{pp}^{-1}$ 对相邻轨道交叉点不符值的相似变化进行约束并迭代求解最终的 $\boldsymbol{p}_j$ 值[25]，迭代过程为

$$p_{k+1}=p_k+(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}+\boldsymbol{C}_{pp}^{-1})^{-1}(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\Delta d-\boldsymbol{C}_{pp}^{-1}p_k)\tag{8}$$

根据解算出每一轨的 $\boldsymbol{p}_j$ 值，式(2)得以求解，然后依据激光高度测量点处的时间值获取相对应的 $f(t)$ 值，则每一个测高点的纠正为

$$\bar{h}(t)=h(t)_0+f(t)\tag{9}$$

式中，t 为该点时刻；$h(t)_0$ 为最初获取的高度值；$\bar{h}(t)$ 为改正之后的高度值。

5　试验结果及分析

选择 CE-1 在月球(0°N～60°N，50°W～0°W)范围内的 DEM 进行交叉点平差试验，该区交叉点处理前生成的 DEM 有比较明显的条带现象(如图 6(a)，见文末)。采用 2 阶多项式模型对该区产生的 2593 个交叉点进行了平差试验。结果显示，不符值残差由平差前的 62.1 m 降低至平差后的 36.8 m。图 7 为交叉点平差前后不符值的直方图分布，表 1 显示了交叉点平差前后不符值分布范围的变化，与直方图分布显示的结果一致。其中，98.7%的交叉点不符值降低到了 100 m 以下，并且大部分处于30 m以下，而平差之前，仅有 50%是在 30 m 以下。图 6(a)、(b)为运用该区的 399 629 个激光测高点生成的 10 km 分辨率的 DEM 效果，(a)为直接采用激光高度点进行克里金插值后的结果，(b)为采用 2 阶多项式进行交叉点平差纠正之后的激光高度点克里金插值生成的 DEM。可以看出，(b)的条带现象较(a)有明显的改善，表明交叉点平差能明显改进 LAM 数据的精度和 DEM 的质量。

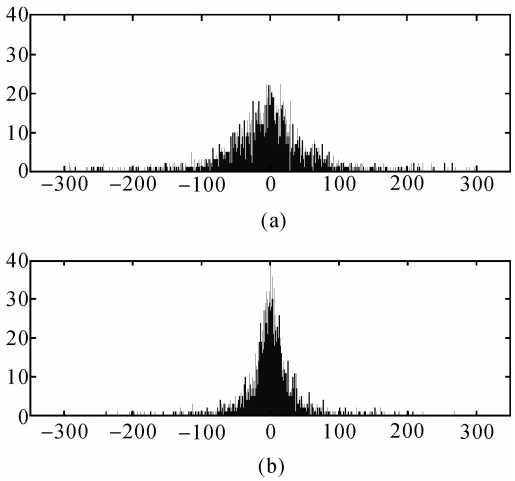

图 7　试验区交叉点不符值平差前后直方图显示

Fig. 7　The histograms before and after crossover adjustment in the test area

表 1　交叉点不符值范围分布

Tab. 1　The range of crossover differences

不符值范围	>100 m	50～100 m	30～50 m	10～30 m	0～10 m
平差前	9.99%	20.32%	19.09%	30.24%	20.36%
平差后	1.27%	4.17%	7.98%	32.66%	53.91%

为验证交叉点平差后整体精度的变化，将经过交叉点平差前后的 DEM 与美国 LRO 任务中 LOLA 产生的 DEM 进行了对比。LOLA 采用 5 束激光进行测距，其获取的 DEM 平面精度可达 5 m，高程方向约 1 m[14]，是目前发布的月球最高精度的 DEM。在月球(0°N～60°N，50°W～0°W)范围内，LOLA 约有 2.69 亿个高程点。将 CE-1 和 LOLA 的 DEM 统一到月固坐标系下，并分别采样成 10 km 分辨率等级，通过迭代最邻近点(iterative closest point，ICP)算法[26]对两个 DEM 进行整体配准，对两者 X、Y、Z 3 个方向的差异进行统计，结果如表 2。可看出，交叉点平差前后的 DEM 与 LOLA 的 DEM 的差异基本保持不变，平差前后的 DEM 均能与 LOLA 的 DEM 进行很好的配准，表明交叉点平差并未对整体地形产生变形。图 6 为该区交叉点平差前后 DEM 与 LOLA 的 DEM 显示。同时，为了解交叉点平差对细节地形的纠正，以该区哥白尼撞击坑(8.17°N～11.23°N，21.63°W～18.57°W)(红框区域)的 DEM 为例，按 CE-1 点距 1400 m 的分辨率与 LOLA 进行对比(表 3)，可看出，平差后的 DEM 与 LOLA 的 DEM 在 XYZ 方向上的差异明显缩小，且与 LOLA 的 DEM 进行配准时，Z 方向的差异由原来的 1.55 m 降至－0.91 m，表明平差后的 DEM 与 LOLA 更为接近。需要说明的是，常用的 DEM 比较方法是在 X、Y 格网完全一致的情况下只统计 Z 方向的误差；而 ICP 配准属于刚体变换，使待配准 DEM 产生整体的三维旋转和平移，配准后的两个 DEM 的 X、Y 格网并不完全一致；为了避免再次重采样产生进一步的误差，采用最近距离的方法统计了 X、Y、Z 3 个方向的误差。

表 2 交叉点平差前后的 DEM 与 LOLA 生成的 DEM 对比(10 km 分辨率)

Tab. 2 The variation analysis between CE-1, DEMs and DEM from LOLA (resolution: 10 km) m

		X	Y	Z		X	Y	Z
平差前	平均值	88.20	－46.23	－65.41	ICP	0	0	0
DEM	中误差	73.72	49.84	69.07	配准后	75.15	48.31	68.79
平差后	平均值	88.35	－46.42	－65.53	ICP	0	0	0
DEM	中误差	73.27	49.93	69.09	配准后	74.79	48.29	68.83

表 3 哥白尼撞击坑区域交叉点平差前后的 DEM 与 LOLA 生成的 DEM 对比(1400 m 分辨率)

Tab. 3 The variation analysis between CE-1, DEMs and DEM from LOLA (resolution: 1400 m) m

		X	Y	Z		X	Y	Z
平差前	平均值	448.14	－172.03	－164.12	ICP	－10.47	－18.67	1.55
DEM	中误差	209.42	388.34	453.76	配准后	209.17	375.67	342.44
平差后	平均值	94.65	－43.74	－83.67	ICP	－9.74	－19.81	－0.91
DEM	中误差	205.89	382.46	452.63	配准后	207.77	376.83	343.28

为分析基于时间模型的纠正效果和不同模型形式对结果的影响。表 4 列出了采用 4 种不同形式的模型进行平差后的数值结果。从表中可以看出，4 种模型均达到了减小不符值的效果，交叉点高程不符值中误差($RMS = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n}(h(t)-h(t'))^2}$)均降至了 37 m 以内。为显示 4 种模型的不同效果。截取了条带现象比较明显的一小块局部区域(18°N～44°N，33°W～19°W)进行 DEM 显示(图 8，见文末)，4 种模型都不同程度地减弱了原有 DEM 的条带现象，但是基于时间的 2 阶和 3 阶多项式模型产生的 DEM 效果更好。

表 4 采用 4 种模型平差后不符值参数结果

Tab. 4 The results of crossover adjustment with 4 models

不符值参数	中误差	均值	中值	最小值	最大值
平差前	62.11	2.35	1.68	－298.50	293.82
模型 1	36.30	0.37	－0.07	－242.04	270.13
模型 2	34.35	0.44	－0.23	－245.51	230.11
模型 3	36.83	0.14	－0.10	－240.27	268.92
模型 4	32.84	0.34	0.012	－229.01	259.10

在 4 种模型中，模型 1、2、3 每轨解算 3 个未知参数，模型 4 每轨解算 4 个，数值解算效果稍好。模型 1 和模型 3 的结果接近，但是在运用模型 1 的三角函数模型解算所得的参数进行式(9)高程纠正时，易出现局部区域的地形振荡现象而产生新的条

带。其可能原因为三角函数模型比模型 3 的多项式模型变化的幅度大，在每轨交叉点位置处有较好的拟合，但当轨道覆盖的区域较长时，会在个别轨上出现较大的改正幅度而导致新的条带。模型 2 为三角函数模型的多项式近似表示，含 2 阶、4 阶多项式和常数项，先对时间值进行归一化处理，$t\in[-0.5,0.5]$，$f(t)$的值变化范围与模型 1 相同，其结果在模型 1 基础上有较好的改善，但不能完全消除这种局部新条带现象。模型 3 和模型 4 是模型 2 的变体，模型 4 的效果比模型 3 效果稍好，但每轨需要多解算一个未知数，计算量比模型 3 大，需要保证所有轨道都有至少 4 个交叉点参与计算。由于两者产生的 DEM 效果非常接近，当局部区域交叉点个数较少时，而模型 3 解算未知数要少，则更适用。

6　结　论

本文根据 CE-1 激光高度计数据的特点，探讨了全月球范围内交叉点位置和高程计算的方法，对交叉点时空分布特性进行了分析，发现了交叉点在两极密集分布，中低纬度处密度较低，沿轨不符值随时间规律变化且相邻轨道变化规律相似。采用 4 种基于时间的函数模型在局部试验区域(0°N～60°N，50°W～0°W)内进行交叉点平差试验，均能使交叉点高程不符值中误差显著减小(从平差前的 62.1 m 降至 37 m 以内)，在此基础上产生的 DEM 条带现象明显减弱，表明这些方法是可行的。

交叉点不符值的产生是由很多误差因素造成的，是轨道、测距、时间、环境或者仪器所造成的误差综合反映。在运用二阶多项式模型用于极区(60°N～90°N，0°W～40°W)和全月正面范围内的交叉点处理时，不符值均方根误差降低了 9～14 m左右(分别为 99.44 m 至 85.71 m，117.5 m 至 109.6 m)，DEM 效果有所改善，但不够显著。在交叉点产生的过程中，是根据沿轨邻近点的高度值插值产生的，且由于月球的转动和卫星轨道测控的精度，在 CE-1 卫星运行过程中，很多时段尤其是背面运行时段没有测控数据[2,18,21]，卫星位置姿态的精度为交叉点分析带来了不确定性。因此，全月范围内的交叉点平差模型和方式还需要进一步考虑轨道精度在其中的影响和不符值模型的适用范围。在后期的工作中，将在依据时间建立不符值模型的基础上，进一步研究各种误差源的影响，并考虑交叉角度和地形因素对不符值的影响，在局部区域交叉点平差的基础上，建立全月交叉点整体平差模型。

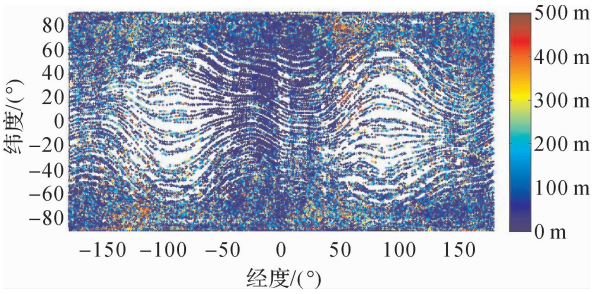

图 3　交叉点月球范围分布图

Fig. 3　The global distribution of crossovers on lunar surface

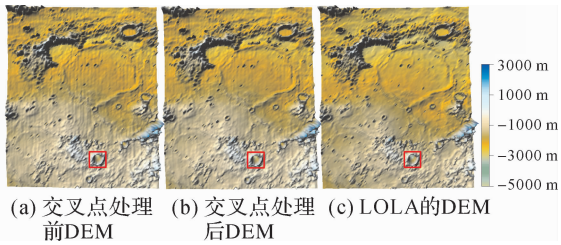

图 6　交叉点处理前后 DEM 与 LOLA 的 DEM 显示效果

Fig. 6　The DEMs before/after crossover adjustment and DEM from LOLA

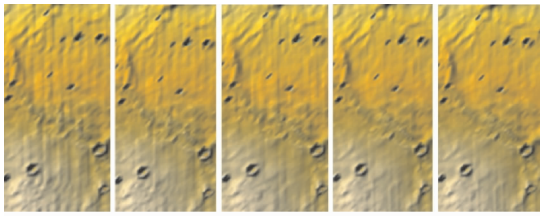

图 8　采用不同模型处理前后的 DEM 效果(18°N～44°N，33°W～19°W)

Fig. 8　The DEMs before and after adjustment in a local area (18°N～44°N，33°W～19°W)

参考文献：

[1]　PING Jinsong，HUANG Qian，YAN Jianguo，et al. Lunar Topographic Model CLTM-s01 from Chang' E-1 Laser Altimeter[J]. Science in China Series G：Physics，Mechanics & Astronomy，2009，52(7)：1105-1114.

[2]　LI Chunlai，REN Xin，LIU Jianjun，et al. Laser Altimetry Data of Chang'E-1 and the Global Lunar DEM Model[J]. Science China：Earth Science，2010，40(3)：281-293.（李春来，任鑫，刘建军，等. 嫦娥一号激光测距数据及全月球 DEM 模型[J]. 中国科学：地球科学，2010，40(3)：281-293.）

[3]　CAI Zhanchuan，LIANG Yanyan，LI Jian，et al. Digital Elevation Model of the Moon from the Chang' E-1 Laser Altimeter[J]. Progress in Geophys，2010，25(4)：1153-1160.（蔡占川，梁延研，李坚，等. 基于嫦娥一号卫星激光测高数据的月球数字高程模型[J]. 地球物理学进展，2010，25(4)：1153-1160.）

[4]　ZHAO Shuangming，LI Deren，MOU Lingli. Inconsistency

Analysis of CE-1 Stereo Camera Images and Laser Altimeter Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(6): 751-755. (赵双明, 李德仁, 牟伶俐. CE-1 立体相机影像与激光高度计数据不一致性分析[J]. 测绘学报, 2011, 40(6): 751-755.)

[5] DI Kaichang, HU Wenmin, LIU Yiliang, et al. Coregistration of Chang'E-1 Stereo Images and Laser Altimeter Data with Crossover Adjustment and Image Sensor Model Refinement[J]. Advances in Space Research, 2012, 50(12): 1615-1628.

[6] NISHIIMURA C E, FORSYTH D W. Improvements in Navigation Using Sea Beam Crossing Errors[J]. Marine Geophysical Research, 1988, 9(4): 333-352.

[7] TAI C K, FU L L. On Crossover Adjustment in Satellite Altimetry and Its Oceanographic Implications[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(C2): 2549-2554.

[8] KIM M. Theory of Satellite Ground-track Crossovers[J]. Journal of Geodesy, 1997, 71(12): 749-767.

[9] LUTHCKE S, MCCARTHY J J, PAVLIS D E, et al. Spaceborne Laser-altimeter-pointing Bias Calibration from Range Residual Analysis[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2000, 37(3): 374-384.

[10] LI Jiancheng, CHEN Junyong. Determination of Gravity Anomalies over the South China Sea by Combination of TOPEX/Poseidon, ERS2 and Geosat Altimeter Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(3): 192-202. (李建成, 陈俊勇. 联合 TOPEX/Poseidon, ERS2 和 Geosat 卫星测高资料确定中国近海重力异常[J]. 测绘学报, 2001, 30(3): 192-202.)

[11] HUANG Motao, WANG Rui, ZHAI Guojun, et al. Integrated Data Processing for Multi-satellite Missions and Recovery of Marine Gravity Field[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(11): 988-993. (黄谟涛, 王瑞, 翟国君, 等. 多代卫星测高数据联合平差及重力场反演[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(11): 988-993.)

[12] ZHAI Guojun. The Theory and Method of Satellite Altimeter Data Processing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2000. (翟国君. 卫星测高数据处理的理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2000.)

[13] NEUMANN G A, ROWLANDS D D, LEMOINE F G, et al. Crossover Analysis of Mars Orbiter Laser Altimeter Data[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(E10): 23753-23768.

[14] MAZATICO E, NEUMANN G A, ROWLANDS D D, et al. Geodetic Constraints from Multi-beam Laser Altimeter Crossovers[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(6): 343-354.

[15] MAZATICO E, ROWLANDS D D, NEUMANN G A, et al. Selenodesy with LRO: Radio Tracking and Altimetric Crossovers to Improve Orbit Knowledge and Gravity Field Estimation[C]// Proceedings of the 42nd Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: [s. n.], 2011: 2215-2216.

[16] SMITH D E, ZUBER M T, JACKSON G B, et al. The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission[J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1): 209-241.

[17] GOOSSENS S, MATSUMOTO K, ROWLANDS D D, et al. Orbit Determination of the SELENE Satellites Using Multi-satellite Data Types and Evaluation of SELENE Gravity Field Models[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(8): 487-504.

[18] QIAO Shubo, LI Jinling, SUN Fuping. Application Analysis of Lunar Exploration Satellite Positioning by VLBI Technique[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(3): 262-268. (乔书波, 李金岭, 孙付平. VLBI 在探月卫星定位中的应用分析[J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 262-268.)

[19] YAN Jianguo, PING Jinsong, LI Fei, et al. Chang'E-1 Precision Orbit Determination and Lunar Gravity Field Solution[J]. Advances in Space Research, 2010, 46(1): 50-57.

[20] HUANG Qian, PING Jingsong, YAN Jianguo, et al. Chang'E-1 Laser Altimetry Data Processing[J]. Advances in Geosciences: Planetary Science, 2010, 19: 137-149.

[21] CHEN Ming, TANG Geshi, CAO Jianfeng, et al. Precision Orbit Determination of CE-1 Lunar Satellite[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(2): 212-217. (陈明, 唐歌实, 曹建峰, 等. 嫦娥一号绕月探测卫星精密定轨实现[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(2): 212-217.)

[22] HUANG Yong. Orbit Determination of the First Chinese Lunar Exploration Spacecraft CE-1[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory of Chinese Academy of Sciences, 2006. (黄勇. "嫦娥一号"探月飞行器的轨道计算研究[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2006.)

[23] LIU Lin, LIU Shiyuan, WANG Yanrong. The Frozen Orbit of the Orbiter of the Major Planet (or Moon)[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2003, 22(2): 19-24. (刘林, 刘世元, 王彦荣. 关于大行星(或月球)轨道器的冻结轨道[J]. 飞行器测控学报, 2003, 22(2): 19-24.)

[24] AKIMA H. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures[J]. Journal of the ACM, 1970, 17(4): 589-602.

[25] TARANTOLA A, VALETTE B. Generalized Nonlinear Inverse Problems Solved Using the Least Squares Criterion[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20(2): 219-232.

[26] BESL P J, MCKAY N D. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2012-06-11
修回日期: 2012-11-15

第一作者简介: 胡文敏(1982—), 女, 博士生, 研究方向为月球与火星激光高度计数据处理及与卫星影像的配准。
First author: HU Wenmin(1982—), female, PhD candidate, majors in Lunar and Mars laser altimeter data processing and co-registration of CCD images and laser altimeter data.
E-mail: huwm@irsa.ac.cn
通信作者: 邸凯昌
Corresponding author: DI Kaichang
E-mail: kcdi@irsa.ac.cn