

## 利用波形匹配实现卫星激光测高脚点精确定位的方法

张文豪, 李松, 张智宇, 刘芮, 马跃\*

(武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430079)

**摘要:** 激光测高仪分米量级的绝对高程精度可以满足地面高程控制点的需求, 但其十几米甚至几十米的平面偏移使得其激光脚点仅能在平坦地表区域作为高程控制点使用。通过推导激光回波模型建立回波模型仿真器, 综合考虑激光能量时空分布、地表轮廓、地表反射率等器件和目标参数的影响, 对没有考虑地表反射率影响的现有波形匹配方法进行改进; 进而, 使用机载 LiDAR 点云数据和 GLAS 波形、能量数据, 以仿真波形和真实波形相关系数最大原则进行波形匹配, 寻找 GLAS 激光脚点中心坐标的精确位置。结果表明: 在 GLAS 系统接收能量正常的工作周期内, 波形匹配的平均相关系数大于 0.9, 通过波形匹配提高 GLAS 激光脚点的平面精度, 能够实现约 2 m 的平面定位精度。研究方法能解决复杂地表条件下的激光高程控制点获取问题。

**关键词:** 激光测高; 高程控制点; 波形仿真器; 波形匹配

**中图分类号:** P224 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1117007

## Using waveform matching to precisely locate footprints of a satellite laser altimeter

Zhang Wenhao, Li Song, Zhang Zhiyu, Liu Rui, Ma Yue\*

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The footprints of a satellite laser altimeter have an elevation accuracy of the decimeter order, which satisfies the elevation accuracy needs of ground control points (GCP) for mapping. However, the horizontal accuracy of footprints is only few tens of meters, and only the footprints illuminating on flat ground targets can be used as GCPs. In this paper, the waveform model was derived and used to develop a waveform simulator of laser altimeters. Compared with the current method of waveform matching, the new simulator considered more detailed effects arising from the device and target, e.g., time and spatial distribution of lasers, surface profile, and surface reflectivity. The airborne LiDAR point cloud and the Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) data were involved to match the best-fit waveform by maximizing the correlation coefficients of the simulated waveform and GLAS waveform, and the precise location of every GLAS footprint could be acquired where the correlation coefficient was the maximum. The results show that, the mean of maximum correlation coefficients is more than

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(41506210, 11574240); 对地高分辨率观测系统国家科技重大专项(AH1601-8, 11-Y20A12-9001-17/18, 42-Y20A11-9001-17/18); 中国博士后科学基金(2016M600612); 中央高校基本科研业务费专项资金(2042017k0016)

作者简介: 张文豪(1992-), 男, 博士生, 主要从事激光遥感与光电检测方面的研究。Email: wenhao@whu.edu.cn

导师简介: 马跃(1986-), 男, 讲师, 博士后, 主要从事激光遥感与光电检测方面的研究。Email: mayue19860103@163.com

0.9 during the GLAS operating periods with normal received energies, and the horizontal accuracy of footprints is approximately 2 m after the waveform matching. The proposed method can be used to extract the laser GCPs on complex relief of the surface.

**Key words:** laser altimeter; ground control point; waveform simulator; waveform matching

## 0 引言

传统光学相机立体测绘方式,受制于基高比参数,在无地面控制点条件下,难以满足大比例尺测图精度要求,但国内部分区域及境外区域的地面控制点获取是瓶颈问题。2003年,美国国家航空航天局发射的 ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) 卫星搭载了首颗对地观测激光测高载荷 GLAS, 使用其高程精度为 15 cm 的激光脚点数据作为地面高程控制点与光学测绘卫星进行联合平差<sup>[1-2]</sup>,使得我国 ZY-3 民用三线阵光学测绘卫星在无地面控制点的情况下即可满足 1:50000 地形图绘制要求<sup>[3]</sup>。对地观测卫星激光测高是目前星载平台获取地表高程精度最高的遥感载荷,在 ICESat 之后,美国国家航空航天局计划在 2018 年发射 ICESat-2 激光测高系统卫星<sup>[4]</sup>。

激光测高仪分米量级的绝对高程精度可以满足地面高程控制点需要,但其十几米甚至几十米的平面偏移使得其激光脚点仅能在平坦地表区域作为高程控制点使用。通过与已知地表 DSM (Digital Surface Model) 作波形匹配、探测器阵列捕获地表光斑等方式,卫星的激光脚点的平面坐标存在约 10~30 m 的定位误差<sup>[5-8]</sup>,这对仅有 70 m 量级光斑直径的 GLAS 系统而言,在复杂地表区域,光斑中心偏移将导致高程测量结果产生严重偏差。

论文通过推导激光回波模型,综合考虑激光能量时空分布、地表轮廓、地表反射率等器件和目标参数,改进现有的波形匹配方法没有考虑地表反射率的影响<sup>[5-6, 9]</sup>。使用 GLAS 系统激光发射、接收脉冲波形和激光能量空间分布作为输入的器件数据,使用机载 LiDAR 点云成果作为地表轮廓和地表反射率的目标先验知识,通过波形匹配提高 GLAS 激光脚点的平面精度,能够实现约 2 m 的平面定位精度,解决复杂地表条件下的激光高程控制点难以获取问题。

目前我国 ZY3-02 星和未来 GF-7 号卫星计划

同时搭载立体测绘相机与激光测高仪系统,以完成大比例尺地形图测绘任务,但 ZY3-02 星的激光测高载荷不具备波形记录功能<sup>[10]</sup>。未来 GF-7 号的立体测绘相机可以获取地表 DSM 成果,作为地表先验知识,GF-7 号激光测高仪通过所记录的波形进行匹配可以进行激光脚点的二次精确定位,使得激光测高脚点在地表轮廓复杂地区仍可以作为高程控制点使用。

## 1 激光回波理论模型与波形仿真器

卫星激光测高仪发射的激光脉冲在经过菲涅尔衍射后到达地面,并被地面目标反射。反射的激光能量再次经菲涅尔衍射后被卫星平台的望远镜系统接收并被聚焦于光电探测器。接收的信号能量可以表示为:

$$S(t) = \frac{\eta A_R T_a^2}{h\nu z^2} \iint_{\Sigma} \beta(x, y) |a(x, y)|^2 \cdot |f(t-\psi)|^2 dx dy \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为接收系统和光电探测系统的综合效率;  $A_R$  为接收系统孔径;  $T_a$  为单程大气传输损耗;  $h\nu$  为光子能量;  $z$  为测高系统与目标之间的距离;  $\beta(x, y)$  为地面目标反射率分布函数;  $|a(x, y)|^2$  为入射激光脉冲的空间截面能量分布;  $f(t)$  为入射激光脉冲的时间波形分布;  $\psi$  为由地表起伏和激光脚点水平分布引起的时延,可以表示为:

$$\psi = \frac{2z}{c} + \frac{x^2 + y^2}{2cz} - \frac{2\xi(x, y)}{c} \quad (2)$$

式中:  $\xi(x, y)$  为  $(x, y)$  处的地表高程轮廓;  $c$  为真空中光速。假设入射激光脉冲的截面分布服从圆形或椭圆高斯分布,则可以表示为:

$$|a(x, y)|^2 = \frac{Q}{2\pi(z \tan \theta_T)^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2z^2 \tan^2 \theta_T}\right) \quad (3)$$

式中:  $\theta_T$  为激光脉冲的发散角;  $Q$  为激光发射能量。在针对不同的入射光束和地面目标时,只需对应的激光空间能量分布  $|a(x, y)|^2$ 、地表高程轮廓  $(x, y)$  和地表反射率分布  $\beta(x, y)$ ,即可利用公式(1)描述其回波。

如果将地面目标的响应视为一个线性系统,则

对于任意的输入激光脉冲波形, 其回波信号都可以表示为输入脉冲信号和系统的单位脉冲响应的卷积。将公式(1)整理为卷积的形式, 即得到对应脉冲的回波信号:

$$S(t) = \frac{\eta A_R T_a^2}{h\nu l^2} f(t) \cdot h(t) \quad (4)$$

式中:  $h(t)$  为系统的单位冲激响应。

$$f(t) = \iint_{\Sigma} \beta(x, y) |a(x, y)|^2 \cdot |\delta(t - \psi)|^2 dx dy \quad (5)$$

$f(t)$  为发射激光脉冲的波形, 假设其为高斯脉冲时, 可以表达为:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_f^2}\right) \quad (6)$$

式中:  $\sigma_f$  为发射脉冲的宽度。

事实上, 除极地平坦的冰盖表面, 绝大多数地表轮廓  $\xi(x, y)$  和地表反射率  $\beta(x, y)$  无法通过解析式表达; 此时, 可以将空间轴和时间轴离散化, 空间坐标平面  $x$  和  $y$  方向和高程方向  $\xi$  三维采样格网足够密集, 时间轴  $t$  方向采样间隔足够短, 可以通过数值解的方式计算公式(1)中的回波波形。

## 2 验证数据及波形匹配结果分析

### 2.1 验证区域及数据情况

验证地区选取河南省嵩山境内约 3.3 km×6.8 km 面积区域, 高程范围 [514~1 500 m], 如图 1 所示。地表三维轮廓数据采用河南省遥感测绘院 ALS80 机

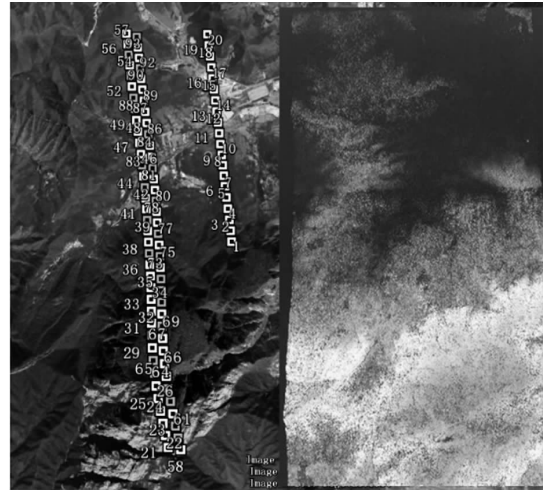


图 1 嵩山森林公园 GLAS 激光脚点足印与 LiDAR 激光点云  
Fig.1 GLAS footprints and airborne LiDAR point cloud on Songshan Forest Park

载 LiDAR 设备采集, 激光点云密度约 1.5 m×1.5 m 网格 (高斯三度带投影平面直角坐标系), LiDAR 设备采集过程同时记录对应三维点云位置的反射率信息。首先读取 GLA14 数据包<sup>[1]</sup>获得激光脚点中心位置三维坐标, 并筛选出验证区域内的激光脚点, 然后读取 GLA01 数据包获得验证区域内每个激光脚点对应的卫星激光雷达发射和接收的波形数据 (时间采样间隔均为 1 ns), 并读取 GLA04 数据包中 LPA 数据以获得每个激光脚点处激光能量的空间分布数据。

在验证区域内共有 8 条激光脚点轨迹, 选取其中 3 条脚点数目较多的轨迹作为研究目标, 3 条轨迹的具体信息如表 1 所示。由于 GLAS 系统记录的

表 1 不同工作周期 GLAS 激光脚点与机载 LiDAR 点云匹配结果

Tab.1 Matching results of GLAS laser footprints and corresponding airborne LiDAR point clouds in different working periods

DOY	2003-10-21	2004-05-23	2006-05-29
GLAS period	L2A	L2C	L3F
Track number	2103_002_9_0_02_1	2107_003_0009_0_01_1	2111_003_9_0_02_1
UTC start time/ns	120 095 599.889	138 646 972.846	202 239 337.887
Valid footprints	20	37	37
Footprint ellipticity	≈ 1.8	≈ 1.8	≈ 1.8
Received energy/fJ	8.66-14.88	0.12-2.57	5.41-10.38
Elevation range/m	540-854	580-1 438	570-1 437
Slope range/(°)	1-30	2-56	2-58
Roughness range/m	4-26	4-72	3-65



经纬度和高程坐标基于 T/P 椭球, 首先将 GLA14 读取所有工作周期的激光脚点三维坐标转换至 WGS84 椭球框架, 进而转换至高斯三度带投影平面直角坐标系, 与机载 LiDAR 点云进行坐标系统的统一。以 GLA14 激光脚点三维坐标为足印的中心, 搜索平面方向  $\pm 70$  m 方形范围内所有机载 LiDAR 点云数据 (2 倍 GLAS 光斑直径范围, GLAS 光斑直径 70 m), 则在验证区域内每个激光脚点对应一块  $140 \text{ m} \times 140 \text{ m}$  的区域的 LiDAR 点云数据。为评价 GLAS 数据质量, 利用 LPA 阵列数据计算光斑椭圆率; 利用 LiDAR 点云计算当前激光光斑对应位置的地表斜率和粗糙度, 计算结果如表 1 所示。

使用克里金算法将地表 LiDAR 点云均匀网格化, 生成  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  和  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  空间网格的轮廓和反射率阵列数据。GLAS LPA 视场角  $0.08^\circ \times 0.08^\circ$  (指向正北),  $80 \text{ pixel} \times 80 \text{ pixel}$  (只回传  $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$  数据), 每像素对应  $0.001^\circ$ <sup>[6]</sup>, ICESat 卫星的轨道高度为 600 km, 则每个像素对应地面尺寸约为 10.5 m。使用三次样条函数将 LPA 阵列数据内插生成  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  和  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  空间网格的能量分布数据。

文中所使用的反射率信息是机载 LiDAR 存储的相对反射率信息, 其受目标绝对反射率之外的例如飞行高度、角度等因素影响很小, 最大相差小于 5%。这是因为, 机载 LiDAR 系统通常使用推扫的方式获取目标点云, 激光对目标的入射角会随扫描角增加而相应增加, 入射角的增加会降低数据产品精度。为了保证测量点云三维精度, 大多数情况下, 机载 LiDAR 推荐使用的扫描角范围为  $\pm 15^\circ$ , 即在飞机平台下方有  $30^\circ$  的覆盖范围。飞机平台飞行高度不管有多高 (通常 300~3 000 m 高度), 天底方向扫描与最大扫描角之间满足  $\cos(\text{scan\_angle\_max})$  的关系, 其中  $\text{scan\_angle\_max}$  指最大扫描角, 以  $15^\circ$  为例, 其结果约为 0.97, 即激光传输距离或等效飞行高度相差最大情况下只有 3%, 因此飞行高度因素的影响很小。同理, 入射角度因素最大相差也为 3%; 考虑到几种因素的复合影响, 通常使用 RSS 进行误差合成, 而飞行高度、角度因素各对应 3% 的误差, 其 RSS 结果约 5%); 因此, 在进行归一化之后 (除以量化等级最大值 255), 可以作为目标相对反射率使用。

## 2.2 波形匹配结果分析

以 LPA 阵列光斑能量最大值处作为 GLA14 数

据包中读取的光斑中心坐标, 输入网格密度相同的地表轮廓  $\xi(x, y)$  和地表反射率  $\beta(x, y)$ , 以及 LPA 阵列加密后网格密度相同的激光空间能量分布数据  $la(x, y)^2$ , 根据公式 (5), 通过矩阵运算得到地表轮廓、反射率和能量分布共同决定的单位冲激响应信号; 与 GLAS 发射激光脉冲波形进行卷积运算, 得到激光测高仪接收的理论回波波形。

由于受到激光指向角等误差影响, GLAS 数据产品其激光脚点中心存在平面偏差。相关系数表征着曲线变化趋势的相似性, 尽管在回波波形中, 会有各种原因造成的噪声影响, 但其主要变化趋势是由地表轮廓和反射率决定 (因为器件参数和环境参数在同一次测量过程中是相同的)。使用波形匹配方法的前提是地表轮廓和反射率分布较为复杂 (在植被覆盖区域最为合适), 这样当光斑范围在地表移动时, 对应的波形受到地表轮廓和反射率变化会有相应的变化。

以当前分辨率网格 ( $2 \text{ m}$  或  $4 \text{ m}$ ) 为移动单位, 遍历光斑中心偏移  $\pm 40 \text{ m}$  内的所有激光回波波形。通常一个像素网格的平移, 波形的相关系数变化较小, 但相关系数较大的位置通常都集中在一个非常小的范围内。因此, 在确定精确激光中心位置时, 使用的是相邻 9 格平均相关系数最大位置作为最佳匹配位置, 且使用 9 格平均确定的方法与直接取最大相关系数点位作为精确位置的方法在超过 90% 的情况下结果一致; 因此, 即使平移一个像素, 对回波波形的影响也是可监测的。

表 2 中列出了  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  网格分辨率条件下, GLAS L2A 周期落在该区域的有效回波波形与相应的仿真波形取得最大相关系数 (即最佳匹配位置) 时的具体相关系数大小、对应 UTC 时间、最佳匹配位置离 GLA14 解算中心的偏移距离和方位角、当前脚点 ( $\pm 70 \text{ m}$  范围内的斜率、粗糙度和平均高程)。L2A 工作周期的 2003/10/21 日的轨迹在验证区域内有效数据共 20 组, 其中 14 组最大相关系数大于 0.9 (占比 70%, 另有两组大于 0.89), 19 组数据相关系数大于 0.8 (占比 95%), 唯一一组相关系数较低可能原因是 GLAS 数据获取时间与机载 LiDAR 点云获取时间有间隔, 地面建筑发生了变化。表 2 中 Mean Max corcoef 指最佳匹配位置对应的平均相关系数, Mean shifting Mag. 和 RMS shifting Mag. 分别

表 2 GLAS L2A 2003-10-21 数据 2 m 分辨率网格各个脚点信息和匹配结果  
**Tab.2 Detailed DEM information and matching result of every footprint on GLAS L2A 2003-10-21 with a 2 m grid resolution**

Index	UTC/s	Max correlation coefficient	Max correlation coefficient loc.		Slope/(°)	Roughness/m	Mean elev/m
			Distance/m	Azimuth/(°)			
1	120 095 599.889	0.942	20.0	-53.1	29.6	26.0	853.6
2	120 095 599.914	0.953	29.5	-61.7	17.2	17.5	796.0
3	120 095 599.939	0.974	13.4	63.4	23.6	21.9	793.9
4	120 095 599.964	0.946	23.4	70.0	23.0	21.2	755.7
5	120 095 599.989	0.943	22.8	-74.7	20.3	19.1	724.5
6	120 095 600.014	0.925	18.1	-6.3	25.8	20.6	721.5
7	120 095 600.039	0.965	28.6	-24.8	16.2	15.5	716.7
8	120 095 600.064	0.976	38.2	47.1	14.8	13.3	667.3
9	120 095 600.089	0.966	10.0	-53.1	16.2	13.8	619.9
10	120 095 600.114	0.967	33.3	-57.3	7.4	7.9	584.6
11	120 095 600.139	0.660	28.1	85.9	14.6	12.5	547.1
12	120 095 600.164	0.884	26.8	63.4	3.0	6.7	540.4
13	120 095 600.189	0.962	22.1	-5.2	2.8	4.4	541.2
14	120 095 600.214	0.877	28.8	33.7	1.8	5.2	543.4
15	120 095 600.239	0.891	35.6	-38.2	7.5	9.8	551.9
16	120 095 600.264	0.928	24.7	-14.0	7.0	7.5	562.8
17	120 095 600.289	0.945	19.8	-45.0	5.4	6.2	576.0
18	120 095 600.314	0.892	39.6	-45.0	16.6	15.0	603.5
19	120 095 600.339	0.802	29.1	-15.9	24.1	22.6	639.1
20	120 095 600.364	0.937	27.2	54.0	13.3	14.7	695.1
Mean max correlation coefficient		0.917					
Mean shifting distance/m			28.7		Std shifting distance/m		10.7

对应各个激光脚点最佳匹配位置与 GLA14 解算位置的平均偏移距离和偏移标准差。

GLAS 在此区域 3 个工作周期内, 2 m 和 4 m 网格对应的平均最佳相关系数, 最佳匹配位置对应的平均脚点偏移和偏移标准差如表 3 所示。每个工作周期对应的典型地表轮廓、地表反射率、光斑能量分布和波形对比如图 2~4 所示。其中,(1) 地表反射率为机载 LiDAR 点云对应接收能量的归一化数值(除 8 位量化等级对应最大值 255);(2) 光斑能量分布 LPA 阵列能量减 67 (8 位量化最大值 255, GLAS LPA 阵列 0 点偏置为 67)<sup>[6]</sup>;(3) GLAS 接收波形减

掉背景噪声偏置 29, 对应所有波形都使得总能量归一化, SWF (Simulated WaveForm) 指仿真回波 (Original 和 Best matching 分别是匹配前后), RWF (Received WaveForm) 为 GLAS 接收波形, TWF (Transmitted WaveForm) 为 GLAS 发射波形。

通过表 1、表 3 和图 2~4 可以得出以下结论:(1) L2C 工作周期由于激光发射能量急剧降低 (接收能量 0.12~2.57 fJ, 发射能量只有 L2A 周期的约 1/5), 部分接收能量已经处于 GLAS 探测器极限工作状态 (GLAS 探测器 APD 极限接收能量状态为 0.05 fJ<sup>[12]</sup>, 超过 13 fJ 会造成探测器饱和), 图 3 中 GLAS 接收

表 3 GLAS 3 个工作周期, 2 m 和 4 m 网格对应的平均相关系数和激光脚点偏移量

Tab.3 Mean max correlation coefficient and mean shifting distance in 3 GLAS different operating periods with 2 m or 4 m grid resolution

GLAS period	Grid scale/m	Mean max correlation coefficient	Mean shifting distance/m	Std shifting distance/m
L2A	2	0.917	28.7	10.7
	4	0.907	28.1	10.6
L2C	2	0.851	33.0	11.5
	4	0.836	34.5	11.4
L3F	2	0.916	32.9	10.2
	4	0.901	31.1	11.7
Mean value		0.888	31.4	11.0

波形信噪比明显低于 L2A 和 L3F 两个工作周期, 因此表 3 中平均相关系数也低于 L2A 和 L3F 两个工作周期。(2) L2 和 L3 周期的激光光斑能量分布都不

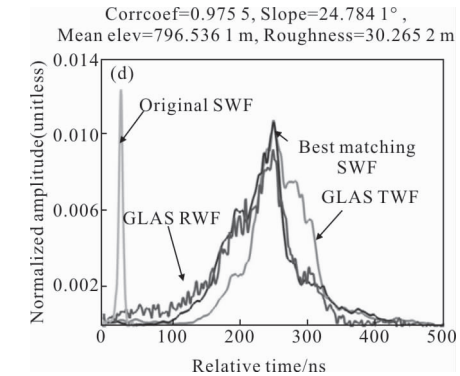
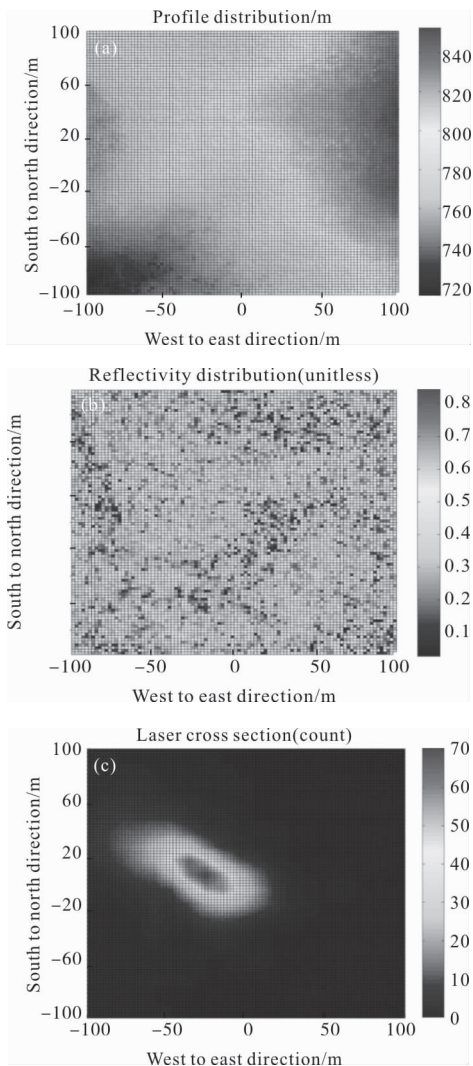


图 2 L2A 周期对应的典型地表轮廓、地表反射率、光斑能量分布和波形对比

Fig.2 Typical result including surface profile, surface reflectivity, laser energy distribution and waveform comparison in L2A working period

满足理想的圆形高斯函数, 都近似呈椭圆高斯分布, L2 周期椭圆率更高, 这与参考文献[12-13]中得到的结果一致。(3) 3 个周期 2 m 和 4 m 网格分辨率得出的平均相关系数差异都小于 0.02, 脚点平均偏移距离和偏移标准差都小于 1.8 m(小于一个分辨率网格), 即对于如 GLAS 系统 70 m 直径的激光测高系统而言, 4 m 分辨率网格的地表轮廓、反射率和激光能量分布已经足够描述回波波形。(4) 嵩山地区地形较为崎岖, 且大多有植被覆盖, 3 个周期有效回波对应的最大斜率超过 30°, 但 GLAS 仍能获取有效回波, 且平均匹配相关系数达到 0.888。(5) 通过波形匹配, GLAS 不同工作周期的平均脚点平面偏移约 31 m, 偏移标准差约 11 m, 一致性较好; 其中, L2A 周期的偏移结果与参考文献[5]匹配结果接近, Harding



对 L2A 周期的匹配结果为脚点平均平面偏移 25.2 m, 偏移标准差 6.5 m。

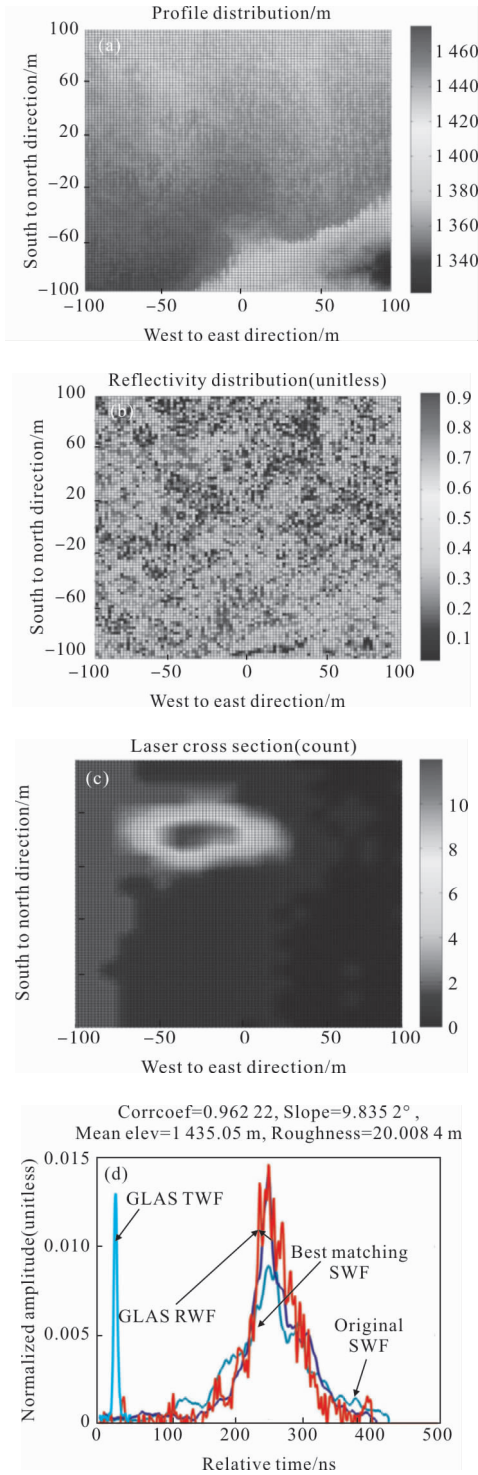


图 3 L2C 周期对应的典型地表轮廓、地表反射率、光斑能量分布和波形对比  
Fig.3 Typical result including surface profile, surface reflectivity, laser energy distribution and waveform comparison in L2C working period

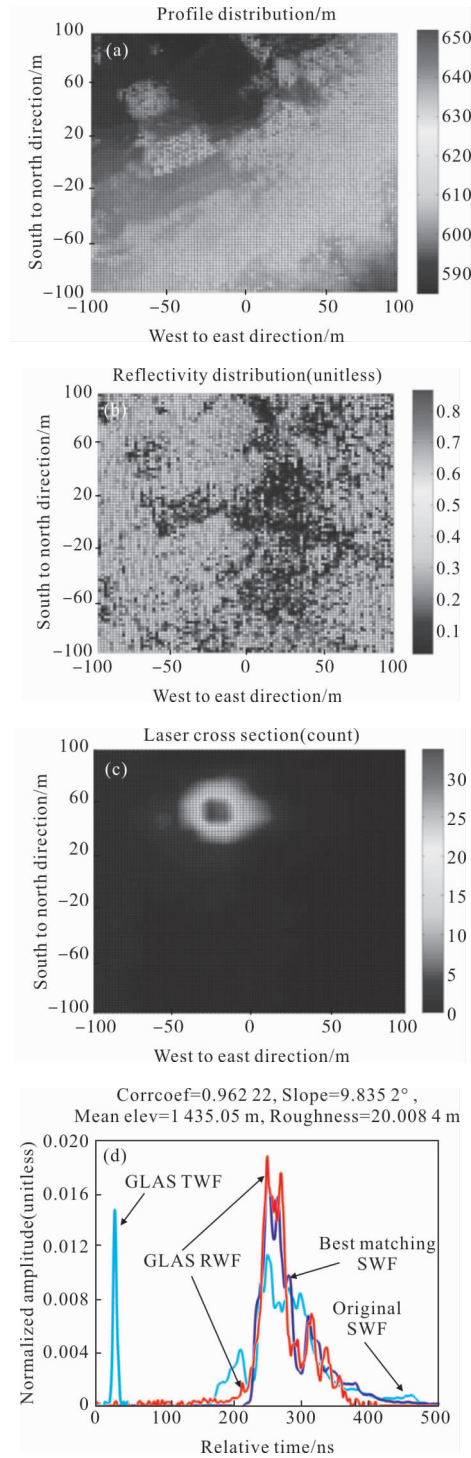


图 4 L3F 周期对应的典型地表轮廓、地表反射率、光斑能量分布和波形对比

Fig.4 Typical result including surface profile, surface reflectivity, laser energy distribution and waveform comparison in L3F working period

通过波形匹配可以得到波形对应的激光中心真实位置与原始激光脚点位置的偏移结果;并且,在复

杂地表区域,波形匹配可以做到一个像素网格的精度。文中使用的机载 LiDAR 点云数据单点绝对精度平面和高程方向都优于 0.5 m,基于 LiDAR 点云数据生成的高程轮廓网格,网格密度与点云密度基本相同,即高程轮廓网格的单点绝对精度也满足 0.5 m 平面和高程方向精度指标。根据误差传递原理,使用文中的波形匹配方法确定的激光中心平面绝对精度应等于激光中心相对于高程轮廓网格的相对精度与高程轮廓网格绝对精度的平方和的根(RSS),即激光中心定位绝对精度为  $2^2+0.5^2=2.06$  m,约为 2 m。

### 3 结 论

使用基于地表轮廓、反射率和光斑能量空间分布,发射激光脉冲时间分布为输入的激光波形仿真器,通过基于相关系数最大原则进行波形匹配获取激光脚点精确平面坐标的方法,在 GLAS 系统正常工作条件下(即 L2A 和 L3F 周期),匹配结果平均相关系数大于 0.9, GLAS 不同工作周期的平均脚点平面偏移约 31 m,偏移标准差约 11 m;在 L2A 周期中,论文匹配结果平均平面偏移 28.4 m,与 Harding 计算的平面偏移 25.2 m 接近,通过波形匹配方式获取的平面定位精度小于 1 个网格大小,文中为 2 m。未来 GF-7 号卫星计划同时搭载立体测绘相机与激光测高仪系统,立体测绘相机可以获取地表 DSM 成果,作为地表先验知识,激光测高仪通过波形匹配可以进行激光脚点的二次精确定位,能够实现约 2 m 的平面定位精度,使得激光测高脚点在地表轮廓复杂地区仍可以作为高程控制点使用。

#### 参考文献:

[1] Schutz B. E. Overview of ICESat mission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21S01.

[2] Brenner A C, DiMarzio J P, Zwally H J. Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(2): 321-331.

[3] Li G Y, Tang X M, Gao X M, et al. ZY-3 Block adjustment supported by GLAS laser altimetry data [J]. *The Photogrammetric Record*, 2016, 31(153): 88-107.

[4] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The ice, cloud, and land elevation satellite -2 (ICESat -2): science

requirements, concept, and implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.

[5] Harding D J, Carabajal C C. ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): S10.

[6] Yadav G K. Simulation of ICESat/GLAS full-waveform over highly rugged terrain [D]. Netherlands Enschede: University of Twente, 2008.

[7] Magruder L, Silverberg E, Webb C, et al. In situ timing and pointing verification of the ICESat altimeter using a ground-based system [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 365-370.

[8] Magruder L A, Webb C E, Urban T J, et al. ICESat altimetry data product verification at White Sands Space Harbor [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 45(1): 147-155.

[9] Yue Chunyu, Xing Kun, Bao Yunfei, et al. A matching method of space-borne laser altimeter big footprint waveform and terrain based on cross cumulative residual entropy [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 346-352. (in Chinese)  
岳春宇, 邢坤, 鲍云飞, 等. 以交叉累积熵为准则的星载激光测高仪大光斑波形数据与地形匹配法 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(3): 346-352.

[10] Tang Xinming, Xie Junfeng, Fu Xingke, et al. Laser altimeter on-orbit geometrical calibration and test [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(6): 714-723. (in Chinese)  
唐新明, 谢俊峰, 付兴科, 等. 资源三号 02 星激光测高仪在轨几何检校与试验验证 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(6): 714-723.

[11] Zwally H J, Schutz B E, Hancock D W. GLAS standard data products specification-Level 1/2 Version 8.0 [R]. ICESat (GLAS) science processing software document series volume, 2005: 11.

[12] Abshire J B, Sun X, Riris H, et al. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): S02.

[13] Neuenschwander A L, Urban T J, Gutierrez R, et al. Characterization of icesat/glas waveforms over terrestrial ecosystems: implications for vegetation mapping [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(G2): 1032-1032.