

# 星载全波形激光测高仪仿真分析技术研究

王春辉 李旭 彭欢

北京空间机电研究所, 北京 100094

**摘要** 全波形激光测高仪技术以其高精度和信息含量丰富成为星载激光测高仪发展的重要方向。为了实现星载激光测高仪完整链路的性能评估,对星载全波形激光测高仪仿真分析模型进行了研究,提出了仿真模型的模块组成。根据激光发射模型、地物模型和接收模型,采用空间细分思想,利用激光雷达方程,完成了星载激光测高仪全波形回波信号的仿真,并采用参数提取算法对回波信号的特征参数进行了提取,实现了星载激光测高仪完整链路的仿真与数据分析。在星载激光测高仪系统设计之初即可实现各环节激光回波信号的预估,在系统设计、产品研制和数据处理中可以发挥重要作用。

**关键词** 遥感;回波仿真;全波形分析;星载激光测高仪

**中图分类号** TP79      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.102801

## Research on Simulation and Analysis of Spaceborne Full Waveform Laser Altimeter

Wang Chunhui Li Xu Peng Huan

*Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China*

**Abstract** Spaceborne full waveform laser altimeter for space remote sensing has the advantage of high precision and more information. Simulation and analysis of spaceborne full waveform laser altimeter have become a valuable tool for system design and evaluation. Modules of simulation have been proposed according to research on spaceborne full waveform laser altimeter. Transmitter model, target model and receiver model are established for simulation of full waveform echo signal. Full waveform data are simulated using a square sampling process taking no account of influence of atmosphere and difference of reflection. Moreover full waveform data are processed for parameter calculation. Laser echo calculated by each module will be estimated before system design which is useful for system design and full waveform data process.

**Key words** remote sensing; laser echo simulation; full waveform analysis; spaceborne laser altimeter

**OCIS codes** 280.3400; 280.4991; 280.3420; 350.6090

### 1 引言

激光测高技术是可以精确、快速获取目标三维信息的主动探测技术,具有主动工作、抗电磁干扰能力强和测高精度高等优点,在三维成像、高精度对地观测和深空探测等空间领域得到广泛应用,表现出良好的空间应用前景。美国在星载激光测高领域占据世界绝对领先地位,以火星观测激光测高仪(MOLA)、月球探测系统和地球科学探测系统(GLAS)为典型代表<sup>[1-6]</sup>。卫星平台上装载的全波形激光测高仪向地表发射激光,并接收经地面反射后的激光脉冲信号,记录激光全波形回波信号。

本文以激光雷达方程为理论基础,采用计算机技术,结合卫星平台参数、激光测高仪系统参数和目标模型参数,模拟各种条件下的回波信号模型,并验证全波形信号处理算法。模拟仿真与分析技术可以在论证及设计阶段,全链路追溯激光回波信号,全面了解系统性能,验证回波信号处理算法。

### 2 仿真模型

星载激光测高仪向地表发射激光照射地表,地表反射的激光回波信号经测高仪接收并全波形采样,激

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-02; 网络出版日期: 2015-09-15

作者简介: 王春辉(1983—),男,硕士,工程师,主要从事星载激光探测载荷方面的研究。

E-mail: xjtuchwang@foxmail.com

光在传输过程中两次经过大气,仿真分析模型如图1所示。激光照射到地面后形成几十米的激光足印。激光足印内复杂的地表特征和目标反射特性,将形成不同形状的回波波形。全波形激光测高仪仿真,首先对激光发射脉冲进行空间离散,根据子单元的激光飞行时间和相应的地表反射特性,计算子单元回波信号。对获取的所有子回波信号在时域上进行合成,得到激光回波光信号时域波形,回波光信号经接收模型转化为回波电压信号,对回波电压信号进行采样得到星载激光测高仪的全波形回波信号。信号处理算法对全波形回波信号进行处理,提取取波形参数,可以用于测距、地表分类和植被参数估算等。

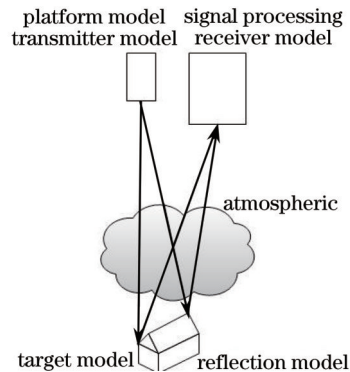


图1 全链路仿真模型链路图

Fig.1 Modules repartition of simulation model

### 3 回波信号仿真

#### 3.1 发射模型

星载激光测高仪的发射源为脉冲激光器,激光脉冲在时域和空域上具有独立的分布特征,可以采用时间分布函数 $P_t$ 和空间分布函数 $A_s$ 分别描述。

##### 3.1.1 发射模型

星载激光测高仪激光发射脉冲的能量时间分布近似为高斯脉冲<sup>[7]</sup>,采用高斯模型描述时域模型 $P_t$ ,如(1)式和图2所示:

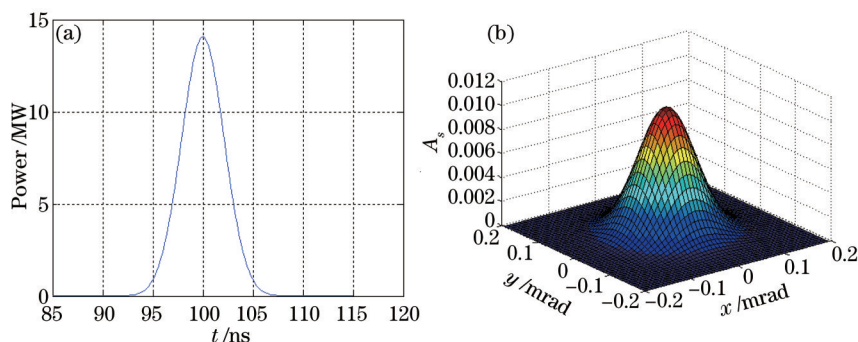
$$P_t(t) = E_t \cdot \frac{2}{\tau} \cdot \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} \cdot \exp\left[-4 \cdot \ln(2) \cdot \left(\frac{t - t_0}{\tau}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 $E_t$ 为单脉冲能量, $\tau$ 为激光脉冲的半峰全宽, $t_0$ 为激光脉冲延时。

激光发射脉冲的能量空间分布是不均匀的,取决于激光器的类型和参数<sup>[8-9]</sup>,星载固体激光器的空间分布近似为高斯脉冲,如(2)式和图2所示:

$$A_s(x, y) = \exp\left[-2\left(\frac{x}{\alpha_x}\right)^{2G_x} - 2\left(\frac{y}{\alpha_y}\right)^{2G_y}\right], \quad (2)$$

式中 $x$ 和 $y$ 表示光斑内任意点相对光斑中心的位置, $\alpha_x$ 和 $\alpha_y$ 为激光发散角, $G_x$ 和 $G_y$ 为超高斯因子,用于描述能量分布形状。

图2 发射模型( $E_t=75$  mJ,  $\tau=5$  ns,  $\alpha_x=\alpha_y=0.1$  mrad)。(a) 时域分布; (b) 空间分布Fig.2 Transmitter model ( $E_t=75$  mJ,  $\tau=5$  ns,  $\alpha_x=\alpha_y=0.1$  mrad). (a) Temporal diagram; (b) spatial diagram

### 3.1.2 光斑离散

仿真时,采用正方形对激光光斑进行空间离散,如图3所示,图中外围的圆表示激光光斑,正方形为离散单元,离散单元尺寸的选择可以根据地形特征和计算量进行优选,在保证精度的同时提高计算速度。

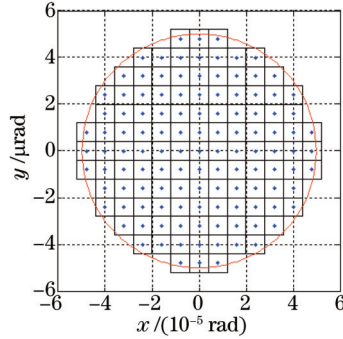


图3 空间离散

Fig.3 Sampling bundle diagram

根据(2)式计算离散后的各单元能量:

$$A_s(x_i, y_i) = \frac{1}{A_t} \cdot \exp \left[ -2 \left( \frac{x_i}{\alpha_x} \right)^{2G_x} - 2 \left( \frac{y_i}{\alpha_y} \right)^{2G_y} \right], \quad (3)$$

式中  $x_i$  和  $y_i$  表示离散单元坐标。

$$A_t = \sum_{i=1}^N \exp \left[ -2 \left( \frac{x_i}{\alpha_x} \right)^{2G_x} - 2 \left( \frac{y_i}{\alpha_y} \right)^{2G_y} \right], \quad (4)$$

式中  $N$  为离散单元数量。

根据(1)式和(3)式即可确定每个单元的发射模型,用于计算机仿真:

$$P_u(x_i, y_i, t) = P_t(t) \cdot A_s(x_i, y_i). \quad (5)$$

### 3.2 地物模型

星载激光测高仪光斑内的地物特性较为复杂,在进行仿真分析时,对地物模型进行简化,抽象为简单的平面和随机起伏的叠加<sup>[10]</sup>。斜坡地形和阶梯地形两种典型地物的三维(3D)模型如图4所示,其中蓝色区域为光斑覆盖区域。对地物目标的反射特性进行简化处理,采用漫反射模型。

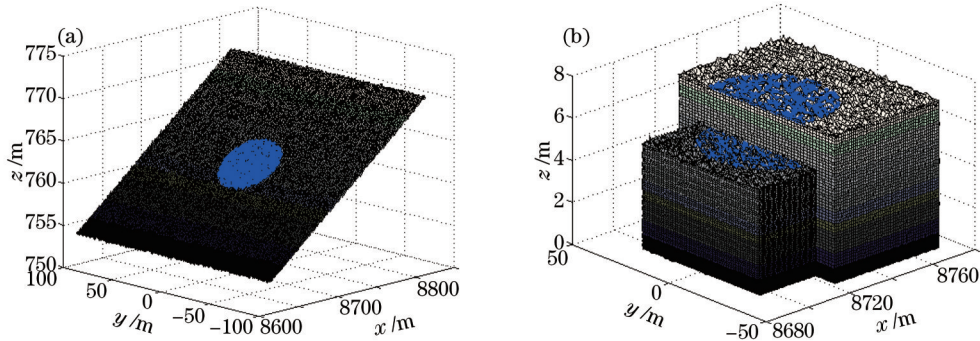


图4 地物模型

Fig.4 Target model

### 3.3 回波光信号仿真

在进行单次回波光信号仿真时,平台参数仅考虑穿轨和沿轨两个方向的观测倾角和卫星轨道高度。对激光大气传输模型进行简化处理,仅考虑大气衰减,用单向大气透射率  $T$  表示。

利用激光雷达方程计算每个离散单元的回波信号能量:

$$P_n = \frac{P_u \rho D^2}{4R^2} \cdot T^2 \eta, \quad (6)$$

式中  $P_n$  为回波光信号,  $D$  为接收口径,  $R$  为目标距离,  $\eta$  为系统效率。

每束离散激光的飞行时间为

$$t_i = \frac{2R_i}{c}. \quad (7)$$

则每个离散单元的激光回波光信号和总的回波光信号分别为

$$P_{ri}(t) = \frac{P_{li}(x_i, y_i, t + t_i) \rho D^2}{4R_i^2} \cdot T^2 \eta, \quad (8)$$

$$P_{rl}(t) = \sum_{i=1}^N P_{ri}(t). \quad (9)$$

对于图4(b)中的阶梯地形,激光回波光信号如图5所示,其中红色实线为总回波光信号,下方曲线为离散单元的子回波光信号。

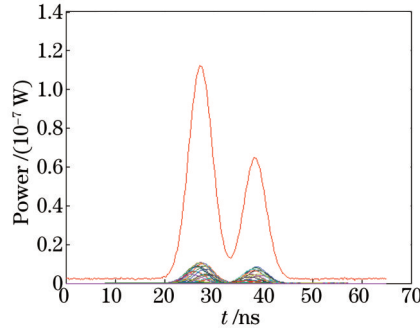


图5 回波光信号

Fig.5 Laser echo signal

### 3.4 接收模型

到达探测器的回波光信号经雪崩光电二极管(APD)探测器光电转化后,输出信号光电流,经跨导放大器(TA)转换为电压信号,经功率放大器(PA)进一步放大后进行模数(AD)采样,获取全波形回波信号,传递函数模型如图6所示。在接收模型中,采用噪声均值和高斯白噪声叠加对各环节的噪声进行模拟<sup>[11-12]</sup>,主要包括背景光噪声( $P_{bks}$ )、信号光散粒噪声( $n_{rl}$ )、背景光散粒噪声( $n_{sb}$ )、体漏电流( $n_{db}$ )、表面漏电流( $n_{ds}$ )、跨导放大器噪声( $n_{ta}$ )和功率放大器噪声( $n_{pa}$ )。

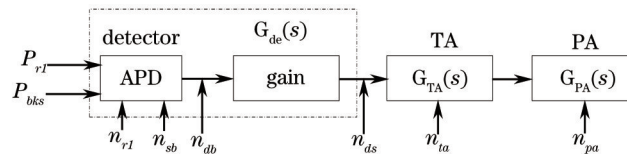


图6 接收模型

Fig.6 Receiver model

接收模型的传递函数为

$$G(s) = G_{dc}(s)G_{ta}(s)G_{pa}(s), \quad (10)$$

式中  $G_{dc}(s) = \frac{M\omega_{dc}}{s + \omega_{dc}}$ ,  $G_{ta}(s) = \frac{G_{ta}\omega_{ta}}{s + \omega_{ta}}$ ,  $G_{pa}(s) = \frac{G_{pa}\omega_{pa}}{s + \omega_{pa}}$ 。  $M$  为 APD 探测器倍增后的响应灵敏度,  $\omega_{dc}$ 、 $\omega_{ta}$  和  $\omega_{pa}$

分别为 APD 探测器、跨导放大器和功率放大器的带宽,  $G_{ta}$  和  $G_{pa}$  分别为跨导放大器和功率放大器的增益。

对于图5中的回波光信号,接收模型各模块处理后输出的信号如图7所示。

## 4 回波信号分析

信号处理算法用于对全波形回波信号进行分析,提取回波信号特征参数,不仅可以用于精确测距,还可以用于反射率测量、地表分类和森林参数提取等领域<sup>[13-15]</sup>。本文在进行信号处理时,采用了直接参数提取和高斯拟合<sup>[16-17]</sup>两种处理算法。

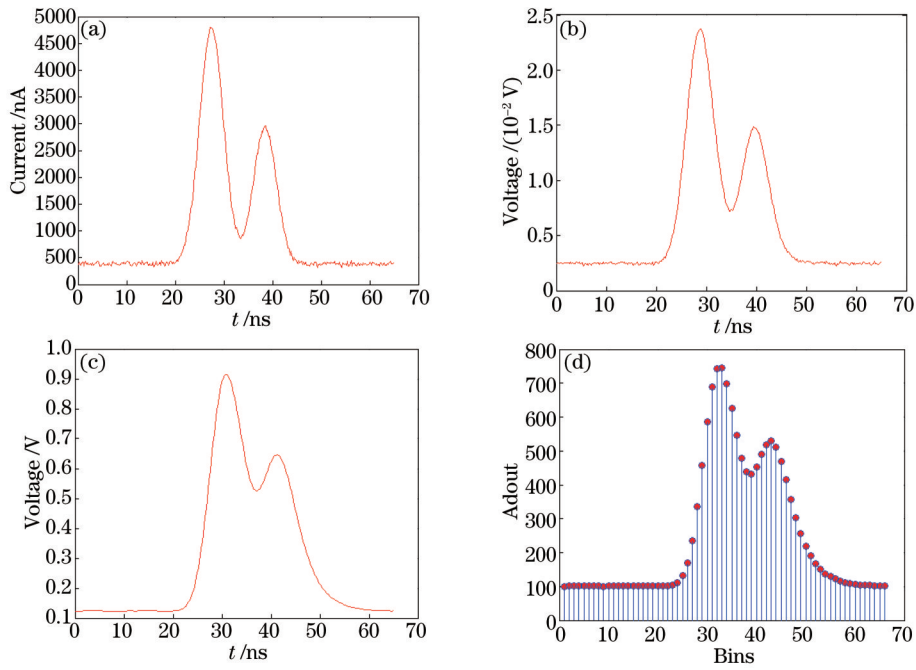


图7 接收模型各模块输出信号。(a) 探测器; (b) 跨导放大器; (C) 功率放大器; (D) AD

Fig.7 Output of Receiver model. (a) APD output; (b) TA output; (C) PA output; (D) AD output

#### 4.1 直接参数提取

采用直接参数提取可以计算回波信号的质心进行高精度测距,提高系统测距精度,也可以用于反射率测量和地表分类等领域,适用于在轨实时测距数据处理。但是,对于多峰的复杂回波,直接参数提取则不再适用于高精度测距。采用阈值法寻找波形的起始点和终止点,对有效信号进行处理,计算波形的中点、波形的峰值点、波形的面积中心和波形的质心等参数,如图8所示。

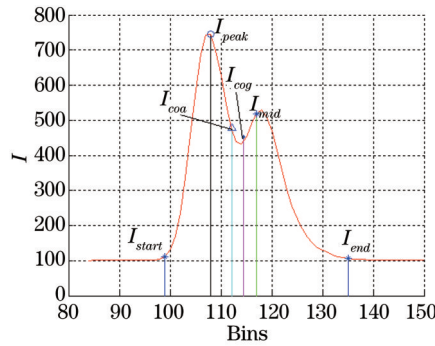


图8 波形分析

Fig.8 Analysis of full waveform

阈值的设置:

$$M_m = M_{mean} + n \cdot M_\sigma, \tag{11}$$

式中  $M_m$  为阈值,  $M_{mean}$  为噪声均值,  $M_\sigma$  为噪声标准差,  $n$  为信号提取参数。

波形的中点:

$$I_{mid} = \frac{I_{start} + I_{end}}{2}, \tag{12}$$

式中  $I_{mid}$  为波形的中点,  $I_{start}$  和  $I_{end}$  为信号起点和终点。

波形的面积中心  $I_{coa}$  :

$$\sum_{i=I_{start}}^{I_{coa}-1} M(i) < \frac{A}{2}, \quad \sum_{i=I_{start}}^{I_{coa}} M(i) \geq \frac{A}{2}, \tag{13}$$

式中  $A$  为有效回波的面积。

波形的质心  $I_{cog}$  :

$$I_{cog} = \frac{\sum_{i=I_{start}}^{I_{end}} i \cdot M(i)}{\sum_{i=I_{start}}^{I_{end}} M(i)}. \quad (14)$$

## 4.2 高斯拟合

对于多峰的复杂回波信号,直接参数提取算法进行测距具有较大的误差。而采用高斯拟合算法,可以将多重回波信号从总回波信号中分解出来,实现光斑内不同目标的测量,可以用于高精度测距、森林参数测量和生物量估算等。

回波  $M(i)$  可以表示成  $n$  个高斯函数之和,采用数据拟合算法获得每个高斯回波的特征参数,如图 9 所示,蓝色为全波形信号,红色为拟合信号,绿色为高斯分解信号。

$$M(i) = \varepsilon + \sum_{j=1}^n a_j \exp[-(i - i_j)^2 / (2\sigma_j^2)], \quad (15)$$

式中  $\varepsilon$  为回波噪声,  $i_j$ 、 $\sigma_j$  和  $a_j$  分别为第  $j$  个高斯回波的位置、标准差和幅值。

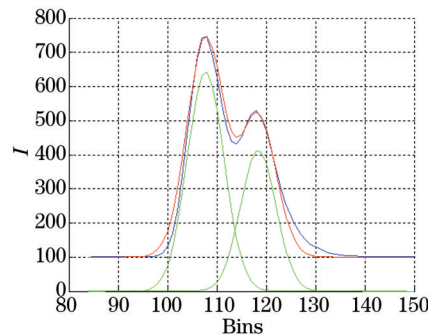


图9 高斯分解

Fig.9 Gaussian decomposition of full waveform

## 5 结 论

本文依据星载全波形激光测高仪的工作原理,提出了全波形激光测高仪仿真模型的模块组成,建立了激光发射模型、地物模型和接收模型,采用空间细分、子回波合成的方法实现了星载激光测高仪回波信号的全链路仿真。采用直接参数提取和高斯拟合两种算法对全波形回波数据进行了分析,验证了数据处理算法的有效性。在系统设计之初即可实现激光回波信号的全链路预估,为系统设计、优化和数据处理提供依据。

### 参 考 文 献

- 1 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Progress and current state of space-borne laser altimetry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020006.  
于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高仪技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020006.
- 2 Zhao Mingjun, Zhang Xiaopeng, Zhou Shengli, et al.. Study on the space-borne laser remote sensing technology[J]. Laser and Infrared, 2009, 39(1): 21-24.  
赵铭军, 张晓鹏, 周胜利, 等. 空间激光遥感技术研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 21-24.
- 3 Li Song. Recent progress of spaceborne laser altimeter system[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2004, 2(6): 4-6.  
李松. 星载激光测高仪发展现状综述[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(6): 4-6.
- 4 Li Ran, Wang Cheng, Su Guozhong, et al.. Development and application of spaceborne lidar[J]. Science and Technology Review, 2007, 25(14): 58-63.  
李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. 科技导报, 2007, 25(14): 58-63.
- 5 Zhu Mengzhen, Cheng Yong, Tan Chaoyong, et al.. Development of foreign spaceborne laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1772-1776.  
朱孟真, 程勇, 谭朝勇, 等. 国外空间激光的发展现状[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1772-1776.
- 6 Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, et al.. Received waveform model for satellite laser altimeter measuring ocean surface[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1214005.

- 马 跃, 李 松, 周 辉, 等. 星载激光测高仪海洋表面回波计算的理论模型[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1214005.
- 7 Krawczyk R, Goretta O, Kassighian A. Temporal pluse spreading of a return lidar signal[J]. Appl Opt, 1993, 32(33): 6784-6788.
- 8 Yan Xiaowei, Deng Jiahao, Sun Zhihui. Simulation of echo signal in laser imaging detection system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(12): 42-46.
- 闫小伟, 邓甲昊, 孙志慧. 脉冲激光成像探测系统回波信号仿真[J]. 光电工程, 2009, 36(12): 42-46.
- 9 Yan Xiaowei, Deng Jiahao. Modelling and simulation of 3D laser imaging detection system[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(28): 28-32.
- 闫小伟, 邓甲昊. 三维激光成像探测系统建模与仿真[J]. 科技导报, 2011, 29(28): 28-32.
- 10 Li Song, Zhou Hui, Shi Yan, *et al.*. Theoretical model for return signal of laser altimeter[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(1): 33-39.
- 李 松, 周 辉, 石 岩, 等. 激光测高仪的回波信号理论模型[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 33-39.
- 11 I Tapan, R S Gilmore. Simulation of signal generation for silicon avalanche photodiodes (APDs) [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2000, 454(1): 247-251.
- 12 H Dautet, P Deschamps, B Dion, *et al.*. Photon-counting techniques with silicon avalanche photodiodes[J]. Appl Opt, 1993, 32(21): 3894-3900.
- 13 Irfan Akhtar Iqbal, Jadunandan Dash, Saleem Ullah, *et al.*. A novel approach to estimate canopy height using ICESat/GLAS data: a case study in the new forest national park, UK[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23: 109-118.
- 14 K J Ranson, G Sun, K Kovacs, *et al.*. Landcover attributes from ICESat GLAS data in central Siberia[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Meetings, 2004: 753-756.
- 15 D J Harding, M A Lefsky, G G Parker, *et al.*. Laser altimeter canopy height profiles methods and validation for closed canopy, broadleaf forests[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(3): 283-297.
- 16 Michelle A Hofton, Jean Bernard Minster, J Bryan Blair, *et al.*. Decomposition of laser altimeter waveforms[J]. Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(4):1989-1995.
- 17 Duan Yihao, Zhang Aiwu, Liu Zhao, *et al.*. A Gaussian inflexion points matching method for Gaussian decomposition of airborne LiDAR waveform data[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 102801.
- 段乙好, 张爱武, 刘 诏, 等. 一种用于记载LiDAR波形数据高斯分解的高斯拐点匹配法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 102801.

栏目编辑: 何卓铭