

文章编号 1004-924X(2007)01-0033-07

激光测高仪的回波信号理论模型

李松¹,周辉²,石岩¹,郭耀¹

(1. 武汉大学电信学院,湖北武汉430079;2. 武汉大学测绘学院,湖北武汉430079)

摘要:利用菲涅尔衍射理论推导出高斯型激光脉冲的回波计算方法,建立了斜坡、阶梯和植被三种标准漫反射地物的回波模型,以GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)系统为例,通过数值计算得到了标准漫反射地物的回波信号波形,分析了回波波形与三种地物模型参数、光束扫描角之间的关系。仿真计算结果表明:斜坡回波信号波形近似为单个高斯波形,其峰值和脉宽与斜坡倾角、光束扫描角有关;阶梯回波信号波形近似为多个高斯波形,其峰值与光斑内阶梯分布有关;波形的中心位置差与阶梯高度和光束扫描角有关;植被回波信号波形呈现出多个类高斯型,其峰值不仅与植被的位置有关,还与植被的面积有关。这些结论为地形地貌的反演及地表资源分布的分析提供了理论基础。

关键词:激光测高仪;菲涅尔衍射;地物模型;回波信号;均方根脉宽

中图分类号:TH821;TN247 **文献标识码:**A

Theoretical model for return signal of laser altimeter

LI Song¹, ZHOU Hui², SHI Yan¹, GUO Yao¹

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A method for calculating return waveform was deduced by the theory of Fresnel diffraction, and the models of return waveform from ground of slope, ladder and vegetation terrains were established. According to the data of Geoscience Laser Altimeter System (GLAS), the waveforms of corresponding return signal were obtained through computing. The relations between the waveforms of return signal and parameters of three terrains, point angle were analyzed. The conclusions show that the return waveform of slope terrain is approximately Gaussian, whose peak value and pulse width are related with slope angle and beam scanning angle; The return waveform of ladder terrain is approximately model of multi-Gaussian, whose peak value is related with ladder distribution in the footprint and simultaneity, the difference between their centers of gravity is concerned with ladder height and scanning angle; The return waveform of vegetation terrains appears multi-Gaussian, whose peak value is not only related with vegetation position, but also its area. These results provide theoretical foundation for inversion of landform and analysis of resource distribution of the earth's surface.

Key words: laser altimeter; Fresnel diffraction; terrain model; return signal; RMS pulse width

收稿日期:2006-04-21;修订日期:2006-10-16.

基金项目:教育部重点实验室开发研究基金资助项目

1 引 言

激光测高技术是一门新兴技术,在地球科学和行星探测中有着广泛的应用。激光测高仪安置在高空飞行器或者卫星上,不仅能获取高精度的三维地形信息,而且能获取丰富的地表资源及环境信息^[1]。相对于其它雷达高度计^[2]来说,激光测高仪重复频率高,在成果的水平分辨率方面有明显优势,能够快速识别具有微小粗糙度和起伏度的地物目标。随着探测技术和高精密光学技术^[3]的发展,激光测高仪的性能不断得到提高。

在忽略大气效应及目标表面微观粗糙度影响的情况下,回波信号仅与地物模型参数和测高仪系统参数有关。国内外对回波信号波形的分析并不多,本文根据菲涅尔衍射理论^[4],推导出激光测高仪的回波信号表达式,根据 GLAS 系统测参数,详细分析了三种漫反射地物模型下的回波波形,并讨论了其回波特性。所得结论为从回波中反演地表高度及资源信息提供了理论依据。

2 回波信号的理论表达式

在不考虑大气效应对脉冲影响的情况下,激光发射脉冲经过一次菲涅尔衍射,入射到目标表面。经目标表面的漫反射后,再一次通过菲涅尔

衍射,进入接收望远镜的视场。因此,接收场可以抽象成发射场经过两次菲涅尔衍射及一次目标的漫反射而得到,这一过程通过方框图 1 表示:

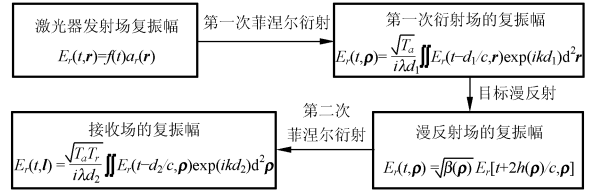


图 1 激光测高仪脉冲传输方框图

Fig. 1 Schematic of pulse transmission of laser altimeter system

其中,

$$d_1 = z + \frac{\rho^2}{2z} + \frac{r^2}{2z} - \frac{\mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\rho}}{z};$$

$$d_2 = z + \frac{\rho^2}{2z} + \frac{l^2}{2z} - \frac{\mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\rho}}{z}.$$

根据 Gardner 的理论计算^[5],回波脉冲信号的功率可表示成: $P_r(t) = \langle E_r(t, \mathbf{l}) \cdot E_r^*(t, \mathbf{r}, \mathbf{l}) \rangle$, 其中 $\langle \rangle$ 表示均值计算符号。通过简化,可以得到:

$$P_r(t) = \frac{A_R T_a^2 T_r}{z^2} \iint |\beta(\boldsymbol{\rho})| |a_i(\boldsymbol{\rho}, z)|^2 |f(t - \psi)|^2 d^2 \boldsymbol{\rho}, \tag{1}$$

其中
$$\psi = \frac{2z}{c} + \frac{\rho^2}{cz} - \frac{2h'(\boldsymbol{\rho})}{c}.$$

表 1 图 1 及表达式(1)中的参数定义

Tab. 1 Parameter definitions in Fig. 1 and formula 1

$\mathbf{r} = (x_1, y_1)$ 发射系统的横向坐标矢量	$\beta(\rho)$ 光斑内目标的反射率
$\boldsymbol{\rho} = (x, y)$ 目标横截面坐标矢量	$h'(\rho)$ 目标表面轮廓
$\mathbf{l} = (x_2, y_2)$ 接收望远镜的横坐标矢量	$\Delta h(\rho)$ 目标表面粗糙度
A_R 接收望远镜面积	ϕ 天底角(光束扫描角)
T_a 大气衰减系数	z 测高仪的轨道高度
T_r 光学系统的透过率	$a_i(\rho, z)$ 发射脉冲传输至 z 处的空间分布
λ 激光波长	$f(t)$ 发射脉冲的时间分布
c 光在真空中的速度	$a_r(r)$ 发射脉冲的空间分布
θ 光斑中心能量 $e^{-1/2}$ 处的光束发散角	

一般情况下,激光器发射脉冲在空域上可近似成高斯分布,在时域上可表示成高斯函数:

$$|a_i(\boldsymbol{\rho}, z)|^2 = \frac{E_t}{2\pi z^2 \tan^2 \theta} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2z^2 \tan^2 \theta}\right), \tag{2}$$

$$|f(t)|^2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right). \tag{3}$$

因此,在考虑光束扫描角的情况下,(1)式可以转化为:

$$P_r(t) = \gamma(z) \iint |\beta(\boldsymbol{\rho}, \phi)| \exp\left[-\frac{(t-\psi)^2}{2\sigma_t^2} - \frac{\rho^2}{2R^2 \tan^2 \theta}\right] d^2 \boldsymbol{\rho}, \tag{4}$$

$$R = z / \cos \phi, \gamma(z) = \frac{A_T T_a^2 T_r E_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_r R^4 \tan^2 \theta}$$

$$\phi = \frac{2R}{c} + \frac{\rho^2}{cR} - \frac{2h(\rho)}{c}$$

其中 E_i 为发射脉冲的能量, σ_r 为脉冲的均方根脉宽, $h(\rho)$ 为扫描坐标系下的目标轮廓。

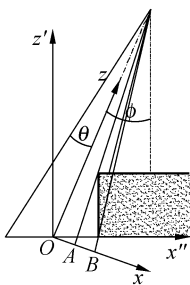
3 目标的抽象模型

在激光测高仪系统参数确定的情况下, 假如忽略大气的影 响, 则回波信号仅与光斑内的地物参数及光束扫描角有关。通常地物模型都较为复杂。但是, 由于激光光斑大小有限, 因此可以将光斑内的目标近似抽象成若干线性平面与随机起伏的叠加^[5]。常见的漫反射地物模型可归纳为以下几类: 斜坡地形、阶梯状地形、植被地形。更为复杂的漫反射地物模型可看作是这三类模型的随机组合。

以光束中心与地物的交点为坐标原点 O , 以天顶方向为 Z' 轴, 以平行于飞行轨道方向为 X' 轴, 以垂直于飞行轨道方向为 Y' 轴, 建立 $X'Y'Z'$ 直角坐标系; 同理, 以 O 为坐标原点, 以激光光轴为 Z 轴, 以垂直于飞行轨道方向为 Y 轴, X 轴与 Y 、 Z 轴满足右手螺旋法则, 建立 XYZ 直角坐标系。同时规定: 用由天顶方向转向光轴所形成的锐角度量 ϕ , 顺时针为正, 逆时针为负; 用由光斑内的目标法线方向转向天顶方向所形成的锐角度量 S , 顺时针为正, 逆时针为负。 $X'Y'Z'$ 坐标系与 XYZ 坐标系间的转化公式可表示为:

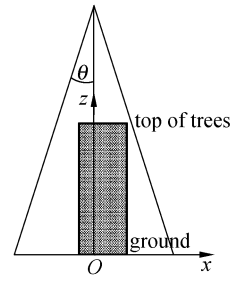
$$\begin{cases} X = X' \cos \phi - Z' \sin \phi \\ Y = Y' \\ Z = X' \sin \phi + Z' \cos \phi \end{cases}, \quad (5)$$

如图 2 所示, 建立三种地物模型的示意图。



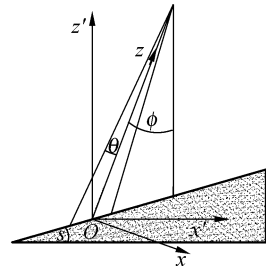
(a) 阶梯地形

(a) Ladder terrain



(b) 植被地形

(b) Vegetation terrain



(c) 斜坡地形

(c) Slope terrain

图 2 三种典型地物模型

Fig. 2 Models of three typical surface relief

通常, 地物模型都是在 $X'Y'Z'$ 坐标系下给出的, 因此必须通过公式(5)转化到 XYZ 坐标系下。经过推算, 可以得到光斑内各种地物模型的数学表达式:

(a) 对于阶梯地形, 若 $OB \geq OA$, 则

$$h(x, y) = \begin{cases} x \tan \phi + h \sec \phi & x > OA \\ x \tan \phi & x \leq OA \end{cases}, \quad (6)$$

若 $OB < OA$, 则

$$h(x, y) = \begin{cases} x \tan \phi & x \leq OB \\ (a - x \cos \phi) / \sin \phi & OB < x < OA \\ x \tan \phi + h \sec \phi & x \geq OA \end{cases}, \quad (7)$$

其中 a 为光斑中心点与阶梯分界点之间的距离, h 为阶梯的高度。

(b) 对于植被地形, 通常都采用天顶方向的光束进行探测, 因此:

$$h(x, y) = \begin{cases} h & (x-a)^2 + (y-b)^2 \leq r^2 \\ 0 & otherwise \end{cases}, \quad (8)$$

其中 (a, b) 为树木圆心坐标, r 为树木区域半径。

(c) 对于斜坡地形,

$$h(x, y) = \tan(\phi + S_{//}) \cdot x + \frac{\tan S_{\perp} \cos S_{//}}{\cos(\phi + S_{//})} \cdot y, \quad (9)$$

其中 $S_{//}$ 为平行于飞行轨道方向的目标倾斜角, S_{\perp} 为垂直于飞行轨道方向的目标倾斜角。定义目标的平均倾斜角为:

$$S = \arctan(\sqrt{\tan^2 S_{//} + \tan^2 S_{\perp}}).$$

以上建立的地物模型均忽略了地物微观粗糙度的影响。

4 回波信号波形及其特性分析

GLAS 是安置在 ICESat 卫星上,通过精确获取格陵兰岛和南极冰层的高度轮廓,来探测冰层高度变化的对地观测星载激光测高仪。它的系统参数见下表:

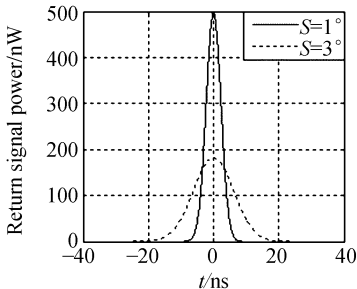
表 2 GLAS 系统参数
Tab. 2 System parameter of GLAS

symbol	z /km	λ /nm	σ_t /ns	θ_T /mrad	A_R /m ²	T_r	T_a	E_t /mJ
value	600	1 064	1	0.029	0.638	0.50	0.50	100

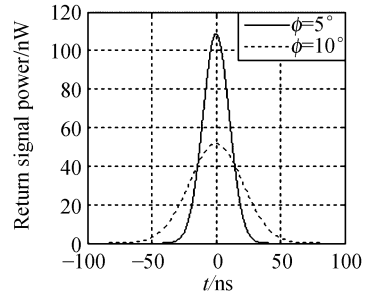
按照 GLAS 系统参数^[6],可以仿真计算得到三种漫反射地物模型下的回波波形。

4.1 对于斜坡模型

激光测高仪接收回波信号的脉宽与激光光斑内地物的起伏程度、光束扫描角有关。图 3(a)显示,对于斜坡地形而言,在扫描角确定的情况下,回波信号的峰值随着斜坡倾斜角的增加而减小,回波信号的脉宽则随着斜坡倾斜角的增加而增大。图 3(b)表明,在目标倾斜角一定的情况下,



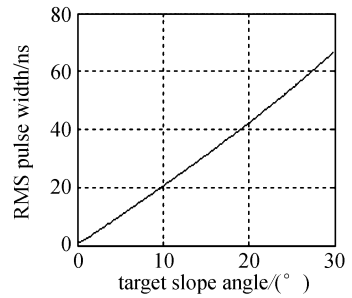
(a) $\phi=0^\circ$



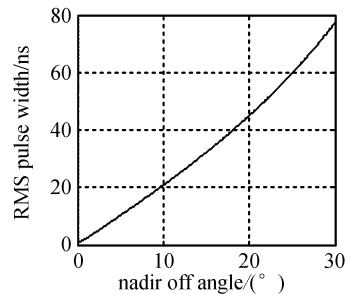
(b) $S_{//} = S_{\perp} = 0^\circ$

图 3 斜坡模型下的仿真回波

Fig. 3 Imitate waveform in slope terrain



(a) 扫描角为 0° 时,均方根脉宽与斜坡倾斜角的关系
(a) Relationship between RMS return pulse width and the slope angle when beam scanning angle equals to zero degree



(b) 目标倾斜角为 0° 时,均方根脉宽与光束扫描角的关系
(b) Relationship between RMS return pulse width and beam scanning angle when slope angle equals to zero degree

图 4 回波脉宽随斜坡倾角、光束扫描角的变化
Fig. 4 Relationship between the return pulse width and slope angle, beam scanning angle

光束扫描角越大,回波信号展宽程度也越明显;同时,其回波信号的峰值也越小。

按照 Gardner 理论,可以推导出斜坡回波波形的脉宽表达式:

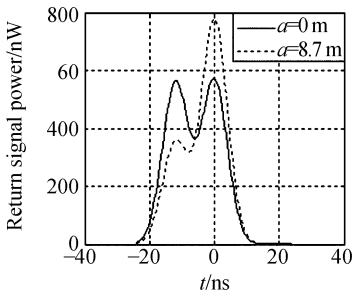
$$\sigma_{br}^2 = \sigma_i^2 + \frac{4z^2 \tan^2 \theta}{c^2 \cos^2 \phi}$$

$$\left[\tan^2 \theta + \tan^2 (\phi + S_{//}) + \frac{\tan^2 S_{\perp} \cos^2 S_{//}}{\cos^2 (\phi + S_{//})} \right], \quad (10)$$

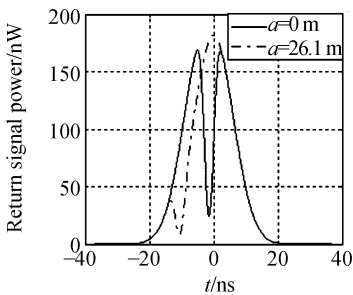
从图 4 中可以看出,随着斜坡倾斜角或扫描角的增加,回波信号的脉宽几乎呈线性增加。通常,在测高仪系统中,可以通过角度传感器来获取光束扫描角的大小。因此,在忽略斜坡粗糙度(一般很小)的情况下,斜坡回波信号波形的脉宽与斜坡的倾斜角一一对应,即可利用它来反演出斜坡倾斜角的值。

4.2 对于阶梯型模型

若同种漫反射地物(即反射率相同)出现阶梯状时,回波信号波形将由多个类高斯型组成。图 5 中,假定地物反射率为 0.4,阶梯高度为 1.5 m。图 5 表明,它们的峰值反映了构成阶梯地形的两个平面在光斑中所占的面积差异(不同的 α 值)。平面占光斑份额越大,则所在平面的回波峰值也越大。通常,大部分文献[7,8]都把两



(a) $\phi=0^\circ$



(b) $\phi=3^\circ$

图 5 阶梯型地物的回波形态

Fig. 5 Return waveform for ladder surface

高斯波形的时间中心对应的高度作为两平面的平均高度,把它们的时间差所对应高度值的一半,作为阶梯的斜距。但事实上并非如此,只有当光束扫描角 $\phi=0$ 时,这种结论才成立。在 $\phi \neq 0$ 时,可以采用表达式(11)近似表示两高斯波形的中心位置(假设阶梯高度相对轨道高度而言可以忽略的):

$$\begin{cases} T_1 = \frac{z-h}{c} \cdot [\sec \alpha + \sec (\phi-\theta)] \\ T_2 = \frac{z}{c} \cdot [\sec \alpha + \sec (\phi+\theta)], \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\alpha = \arctan \left(\frac{z \tan (\phi-\alpha)}{z-h} \right)$ 。

因此,图 5 中两高斯波形的时间中心差所对应的高度值的一半可表示为: $d = c \cdot (T_2 - T_1) / 2$ 。定义比例系数 $f = d \cos \phi / h$, 根据(11)式及 d 的定义,模拟出比例系数 f 随扫描角 ϕ 变化的关系曲线。

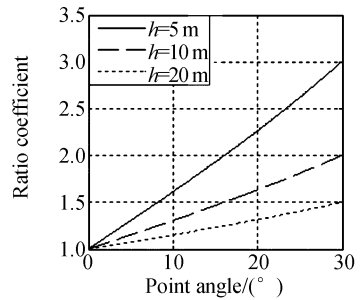


图 6 f 随 ϕ 变化的关系曲线

Fig. 6 Curve of f vs ϕ

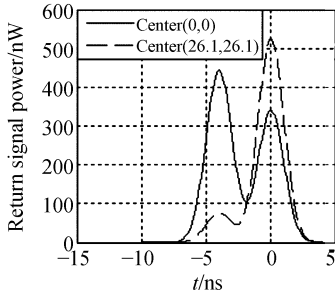
图 6 显示,回波中心所对应的高度值与真实的地形斜距值之间存在着差异,这种差异随着扫描角的增大而增大。只有当 $\phi=0$ 时,回波中心所对应的高度值才是真实的地物斜距。同时,从图 6 中可以看出,当扫描角确定的情况下,随着阶梯高度的增加,比例系数逐渐减小。

4.3 对于林地模型

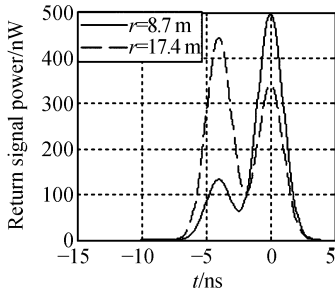
图 7 显示,若光斑内的地物出现分层状态(反射率不一致)时,回波信号波形将由多个类高斯型构成。图 7 中,假定植被的反射率为 0.4,陆地的反射率为 0.2,树木高度为 0.6 m。植被回波与阶梯型回波较为相似,只不过它们的峰值不仅与树木和地面在光斑内所占面积有关,而且还与树木和地面的反射率及光斑内树木的分布有关。由于光束垂直入射到林地表面,因此,两高斯脉冲的中

心位置时间差对应的距离值表征了树木的平均高度。

图 7(a)表明,光斑内不同位置的树木对回波信号会产生影响,当树木中心离光斑中心越远时,则对应的树木回波峰值越小;图 7(b)表明,树木区域半径越大,则对应的树木回波峰值也越大。

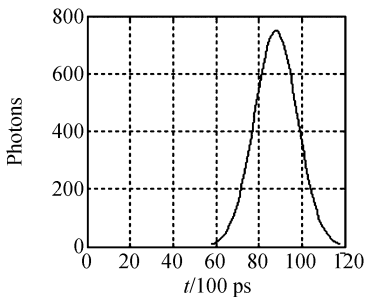


(a) 树木位置不同
(a) Tree position changed

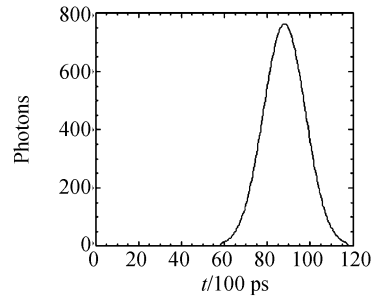


(b) 树木区域直径不同
(b) Tree diameter changed

图 7 来自林地模型的仿真回波
Fig. 7 Imitate waveform from tree model



(a) 仿真计算波形
(a) Imitate waveform



(b) 文献[9]中提供的实测波形
(b) Practical waveform in references [9]

图 8 平坦水平面回波

Fig. 8 Return waveform from horizontal surface

为了验证文中算法的正确性,根据参考文献[9]提供的参数,当地物为平坦的水平面时,模拟计算出了其回波的波形(波形的纵坐标为接收的光电子数),并与文献[9]中的实测波形进行了比较。

对比 8(a)和 8(b)图,明显可以看出,两者十分吻合。模拟接收到的总光电子数为 18 729 个,与文献提供的 18 794 值差异仅为 65 个光电子,从而验证了文中理论和算法的正确性。

5 结 论

本文根据菲涅尔衍射理论精确地推导出了激光测高仪接收回波信号功率的理论表达式。详细讨论了斜坡地形情况下回波信号的展宽效应、阶梯和植被地形情况下的分层效应,为从激光测高仪回波形态中反演地物高度信息和资源分布提供了理论依据。针对平坦水平面地物,运用文中的理论,仿真计算出的回波波形与文献[9]提供的波形完全吻合,模拟仿直接收到的总光电子数为 18 729 个,与文献[9]提供的 18 794 值差异仅为 65 个光电子,证明了理论模型的正确性。事实上,通过回波信号的波形分析,仅仅只能确定出光斑内地物的高度分布,并不能完全再现与这些高度相对应的地物在光斑内的位置分布。因此,不同地貌特征对高度的确定不会产生影响,而对回波信号的识别会带来干扰,这种干扰必须通过一些先验信息(地物的反射率分布信息)得以解除。

参考文献:

- [1] 范春波,李建成,王丹,等. 激光高度计卫星 ICESAT 在地学研究中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(2):94-97.
FAN CH B, LI J CH, WANG D, *et al.*. Applications of ICESAT to geoscience research[J]. *J. Geodesy and Geodynam.*, 2005, 25(2):94-97. (in Chinese)
- [2] 郭伟,张晓辉. 回波模拟器的研制及其对卫星雷达高度计发射前的性能评估[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 359-366.
GUO W, ZHANG X H. Development of return signal simulator for Chinese satellite altimeter prelaunch performance assessment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):359-366. (in Chinese)
- [3] 刘宏伟,张芹,丁亚林,等. 基于有限元分析的长条状主镜支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6):555-559.
LIU H W, ZHANG Q, DING Y L, *et al.*. Design of strip primary mirror supporting structure based on finite element analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6):555-559. (in Chinese)
- [4] 梁铨廷. 物理光学 [M]. 北京:机械工业出版社, 1980.
LIANG Q T. *Physical optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1980. (in Chinese)
- [5] GARDNER. C. S. Target signatures for laser altimeters; an analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(3): 448-453.
- [6] JAMES B A, SUN X L, ROBERT S A. Mars orbiter laser altimeter receiver model and performance analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(15): 2450-2451.
- [7] BRENNER A, ZWALLY H J, BENTLEY C, *et al.*. Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights[R]. *GLAS ATBD*, July 2000.
- [8] HARDING D J, LEFSKY M A, PARKER G G, *et al.*. Laser altimeter canopy height profiles methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests[J]. *Remote Sens. Environ.*, 2001, 76: 283-297.
- [9] FILIN S, CSATHÓ B. An efficient algorithm for the synthesis of laser altimeter waveforms[R]. *BPRC Technic. Report*, 2003.

作者简介:李松(1965—),女,武汉大学教授,博士生导师,主要从事光电探测、激光干涉、激光大气探测等方面的研究工作。E-mail: yflisong@public.wh.hb.cn