

# 光束发散角对星载激光测高仪森林回波的影响

王虹<sup>1,2</sup>, 马跃<sup>1</sup>, 李松<sup>1\*</sup>, 张智宇<sup>1</sup>, 黄科<sup>1</sup>, 易洪<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072;

2. 昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 植被树高是生物量评估和森林生态监测的重要参数, 但是大区域的植被树高数据获取困难. 由大光斑星载激光测高系统森林回波可反演大区域植被树高, 然而大坡度山区的植被和地面回波混叠严重, 难以准确提取波形参数反演植被树高. 为此建立森林目标回波的解析模型, 推导出从混叠回波中分离植被和地面回波的必要条件, 指出导致回波混叠的因素除了目标粗糙度和坡度, 还有发射脉冲的发散角. 分析了地表粗糙度和地形坡度对植被冠层回波的展宽效应及其对波形分解的影响, 通过比较实测 GLAS 波形和仿真回波波形, 验证了压缩光束发散角可降低森林回波对大坡度地形的敏感性. 对于卫星轨道高度在 500 ~ 600 km 之间时, 激光测高仪光束发散角一般在 40 ~ 60  $\mu\text{rad}$ , 更有利于森林植被树高的反演. 所得结论为提高大坡度山地森林树高反演精度, 从星载激光测高仪的系统设计角度提供了有意义的参考.

**关键词:** 星载激光测高仪; 光束发散角; 光斑直径; 森林回波

**中图分类号:** TP79      **文献标识码:** A

## Impact of beam divergence angle on forest echo from satellite laser altimeter

WANG Hong<sup>1,2</sup>, MA Yue<sup>1</sup>, LI Song<sup>1\*</sup>, ZHANG Zhi-Yu<sup>1</sup>, HUANG Ke<sup>1</sup>, YI Hong<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** Vegetation height is an important parameter for biomass assessment and ecosystem structure monitoring. However, vegetation height data over large areas are difficult to obtain. Vegetation heights can be retrieved by using large-footprint satellite altimeter system GLAS waveforms, but the current method can only be used in relatively flat forest regions because over sloping mountainous areas, the effects of ground and canopy are mixing on the waveforms and cannot be distinguished. By establishing analytical model of forest target echo, the separation requirement of vegetation echo and ground echo from aliasing waveforms is derived. It is pointed out that the factors of leading to echo aliasing in addition to target roughness and slope, and beam divergence angle is also a factor. The broadening effect and waveform decomposition related to the beam divergence angle, surface roughness and topography slope is analyzed. By using the waveform simulation and GLAS actual waveforms, it is verified to decrease beam divergence angles can reduce the sensitivity of forest echo to sloping mountainous terrains and be more conducive to the retrieval of canopy heights. For laser altimeter to carry on satellite in the orbit of 500 ~ 600 km, the beam divergence angles is 40 ~ 60  $\mu\text{rad}$  better. The result provides a meaningful reference for designing of satellite laser altimeter system for the retrieval of canopy heights over high sloping terrains.

收稿日期: 2017-08-09, 修回日期: 2017-10-20

Received date: 2017-08-09, revised date: 2017-10-20

基金项目: 对地高分辨率观测系统国家科技重大专项 (11-Y20A12-9001-17/18, 42-Y20A11-9001-17/18); 国家自然科学基金 (41506210, 11574240); 中国博士后科学基金项目 (2016M600612) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (2015212020201) 资助的课题; 测绘地理信息公益性行业科研专项 (201512010)

**Foundation items:** Supported by the National Science and Technology Major Project, National Natural Science Foundation of China (41506210, 11574240) China (11-Y20A12-9001-17/18, 42-Y20A11-9001-17/18), China Postdoctoral Science Foundation (2016M500612), and the Fundamental Research Funds for the Central University of Ministry Education of China (2015212020201), Public Science and Technology Research Funds Projects of Survey (201512010)

作者简介 (Biography): 王虹 (1975-), 女, 云南建水人, 讲师, 博士生, 主要研究领域为激光遥感与光电检测. E-mail: wanghong@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ls@whu.edu.cn

**Key words:** satellite laser altimeter, beam divergence angle, footprint diameter, forest echo

**PACS:** 42. 62. -b, 42. 60. Jf, 78. 47. jf

## 引言

激光测高仪凭借其出色的垂直空间结构信息获取能力,被广泛用于森林冠层高度、郁闭度、冠层垂直分布和生物量等林业研究<sup>[1-3]</sup>,特别是具有波形记录功能的回波数据蕴含丰富的地物垂直结构信息,更是应用潜力巨大<sup>[4-7]</sup>. 星载激光测高仪的发射脉冲具有一定的发散角,从几百公里的高空到达地面目标,会形成较大尺寸的脚步光斑直径,例如 ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) 卫星搭载的地球科学激光测高系统 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), 光束发散角为  $110\mu\text{rad}$ , 激光脚印光斑直径约 66 m, 远大于单株林木冠幅, 全波形记录的回波波形中包含多株林木的冠层垂直结构信息和林下地表信息, 可用于高分辨率的冠层垂直结构和相关高度信息的反演<sup>[8-10]</sup>. 通常林下地形具有一定的坡度和地表起伏, 并且不同地域的地形结构也会有较大的差异, 因此复杂的地形起伏和坡度变化共同影响地面回波的脉宽展宽. 对于同样的森林结构, 生长在复杂地形上相比平坦地面上, 其回波也会受影响展宽, 当脉宽展宽到一定临界值时, 植被回波与地表回波严重混叠, 无法准确分离出地表回波, 提取有用信息. 为了更好的应用回波数据, 有的学者研究了不同的波形分解方法以提高回波信息的提取<sup>[11-13]</sup>; 也有学者从激光测高系统的激光模式研究了其对海洋表面的激光回波脉宽的影响<sup>[14-15]</sup>, 但鲜有分析系统参数对大坡度地形森林回波影响的研究.

众多中外学者讨论更多的是在森林树高反演中去除地形影响, 提高反演精度的方法. Lefsky 等改进早期依靠 DEM 数据消除地形坡度影响, 用 GLAS 回波反演植被树高的算法得到较好的反演精度<sup>[16]</sup>. Chen 对 GLAS 回波数据比较了直接反演法和统计学方法反演山区植被的冠层最大高度, 并用机载激光雷达数据对反演结果进行评估, 认为在山区直接反演法通常会高估最大冠层高度, 统计学模型的精度较好, 但其通用性较差, 只适用于特定地区<sup>[17]</sup>. 诸多方法在特定的地域取得了较好的反演结果, 但是, 对于大坡度的地形影响还是没有通用的解决办法. Pang 等基于辐射传输模型模拟了树高反演算法中光斑直径的影响, 并指出随着光斑直径的增大, 地形坡度的影响加剧, 光斑直径大约在 25 ~ 30 m 时最有

利于估测森林树高<sup>[18]</sup>.

GLAS 的主要任务是观察地球南北极区的冰层变化, 其次才是陆地表面高程的测量, 大脚印光斑尺寸有利于观测大面积的海水海冰的平均变化, 但是对于森林目标而言, 多大的光斑直径才适于反演森林参数和森林生态监测值得研究. 光束发散角是光斑直径的直接影响因素, 现有的研究成果都没有针对光束发散角对大坡度地形的回波影响给出解析或量化的分析结果. 目前, 在坡度为  $15^\circ$  以下的缓坡区域, GLAS 数据融合多源数据用于森林树高反演获得了很好的精度, 但对于  $15^\circ$  以上的斜坡陡坡等大坡度区域的数据并没有得到广泛应用, 而大面积的森林植被往往覆盖于坡度较大的山地区域. 据统计 ICESat/GLAS 数据在中国境内有 40.8% 覆盖于坡度  $>5^\circ$  的区域, 其中有 18.2% 覆盖于  $>15^\circ$  的陡峭山地<sup>[19]</sup>. 因此, 量化分析光束发散角或光斑尺寸对大坡度地形的森林目标参数反演的影响是亟需研究的.

论文首先建立森林目标回波的解析模型, 分析地表粗糙度和地形坡度对植被冠层回波的展宽效应, 推导了从混叠回波中分离植被和地面回波的必要条件. 通过仿真波形与实测波形对比, 证明压缩激光脉冲发散角, 减小光斑直径, 可降低森林回波对坡度变化的敏感性, 有利于提取波形参数进行森林结构特征的反演, 提高激光测高仪回波数据的可用性. 我国在 2016 年立项未来几年发射的陆地生态系统碳监测卫星和 GF-7 号光学/激光立体测绘卫星都将搭载与 GLAS 系统技术参数类似的、带全波形记录的激光测高载荷, 但设计的光束发散角都较 GLAS 系统减小, 约为  $60\mu\text{rad}$ ; 美国计划 2018 年发射的 ICESat-2 ATLAS 激光测高仪设计光束发散角也降为约  $35\mu\text{rad}$ . 通过带波形记录功能的激光测高仪进行大区域范围和长时间周期的森林植被参数遥感监测是林业调查的重要发展方向之一, 论证光束发散角对地物目标反演具备现实意义, 可解决在大坡度区域条件下激光测高仪反演植被参数的数据可用性问题, 将为激光测高仪系统参数的优化设计提供理论和技术参考.

## 1 光束发散角对森林回波分解的解析条件

### 1.1 植被目标回波模型

在 NASA 关于 GLAS 的算法理论基础文档<sup>[20]</sup>

以及诸多文献<sup>[10,21-22]</sup>中都提到,激光测高系统发射激光脉冲和接收脉冲都可以认为符合高斯分布.当发射时间序列满足高斯函数时,平面或斜面地表反射过程等同于一次高斯卷积响应,反射时间序列仍满足高斯函数<sup>[23-24]</sup>.假设林下地表为漫反射体,回波近似可以用单高斯函数表示;而植被冠层的空间结构的复杂性很难用统一的模型来描述,若植被冠层垂直分布不连续,有较大的高差,可分为 $n$ 层独立分层时,其回波需要用 $n$ 个高斯函数来表示,即综合回波信号可看作是多个子信号的线性叠加,用公式(1)表示.其中 $A_0$ 为地表目标的回波振幅, $T_0$ 为地表目标的时间重心偏移, $\sigma_0$ 为地表目标的回波脉宽; $A_i$ 为各植被冠层分层对应的回波振幅, $T_i$ 为各植被层相应的时间重心偏移, $\sigma_i$ 为各植被层相应的回波脉宽.由于对森林回波数据主要分析植被冠层回波相对于地表回波的变化,噪声影响在运算过程中抵消,故噪声的影响不加以表述.

$$p(t) = A_0 \exp\left[-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] + \sum_{i=1}^n A_i \exp\left[-\frac{(t-T_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (1)$$

当植被为单层林时,光斑内的植被冠层垂直高度分布近似为具有一定粗糙度的均匀分布,只考虑植被冠层表面单次散射的回波波形即可反映大部分的真实回波特性<sup>[25]</sup>.因此,把植被冠层的回波近似为单高斯函数,假定植被叶面反射率不变,则具有一定郁闭度的森林回波可以表示为:

$$p(t) = \frac{\rho_0(1-\alpha)}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \exp\left[-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] + \frac{\rho_1\alpha}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(t-T_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (2)$$

其中, $\alpha$ 为植被冠层郁闭度, $\rho_1$ 为植被反射率, $\rho_0$ 为地表反射率.

当激光测高仪近天顶入射时,激光指向角的影响忽略不计,地表回波和植被冠层回波的时间重心偏移和脉宽可表示如下<sup>[24]</sup>:

$$T_i = \frac{2z_i(1+\tan^2\theta_T)}{c} \quad (3)$$

$$\sigma_i^2 = (\sigma_f^2 + \sigma_h^2) + \frac{4\text{Var}(\Delta\xi_i)}{c^2} + \frac{4z_i^2 \tan^4\theta_T}{c^2} + \frac{4z_i^2 \tan^2\theta_T \tan^2 S}{c^2} \quad (4)$$

式中, $\sigma_f$ 表示发射脉冲的脉宽, $\sigma_h$ 表示接收装置导致的脉冲展宽, $\theta_T$ 表示激光光束发散角, $c$ 为光速.当 $i=0,1$ 时,分别表示地表和植被的参数; $z_0$ 为卫

星轨道高度, $z_1$ 为光斑内植被冠层顶部到接收机的平均距离, $\text{Var}(\Delta\xi_0)$ 表示地表粗糙度, $\text{Var}(\Delta\xi_1)$ 表示植被树高方差. $S$ 表示地表二维斜率,满足 $\tan^2 S = \tan^2 S_{//} + \tan^2 S_{\perp}$ ,其中 $S_{//}$ 和 $S_{\perp}$ 分别表示平行和垂直于卫星飞行轨道方向的目标地表斜坡角,假设 $S_{//}=0$ ;由于植被层位于地表上,假设植被层具有与地表相同的斜率 $S$ .

## 1.2 森林回波分解条件

树高反演模型建立后,能否将植被目标对应的激光测高仪回波进行分解,分离提取植被冠层回波分量和地面回波分量的波形参数是树高反演的关键前提.由公式(4)可看出,导致综合回波中冠层回波和地表回波混叠的原因是回波脉冲宽度展宽,而影响脉宽展宽的因素可分为目标特性参数和系统参数.目标特性参数为:光斑内的地表粗糙度、地表斜率(坡度)、平均树高和树高方差;系统参数为:激光发射装置和接收装置导致的脉冲展宽、卫星轨道高度和光束发散角.公式(4)中第一项为系统固有的脉冲展宽;第二项为目标表面粗糙度效应引起的脉冲展宽,以GLAS系统为例,通常在 $10^{-1} \sim 10$  ns量级;第三项为光束弯曲引入的脉冲展宽,在 $10^{-2}$  ns量级;第四项为目标倾斜角引入的脉冲展宽,在 $10 \sim 10^2$  ns量级,可见该项对于总的脉冲展宽影响最大,并随着光束发散角和目标斜率的增大,脉宽展宽明显.

因此,为了更好的从激光测高仪回波波形中提取有利于分析目标特性的信息,本文推导光束发散角和目标斜率与可分辨树高之间的定量关系.用公式(2)对 $t$ 求二阶导数寻找拐点求解能提取地表回波的条件,求得恰能分辨两目标回波的条件是:

$$T_0 - T_1 \geq \sigma_0 + \sigma_1 \quad (5)$$

考虑到在实际波形处理中,回波噪声不能完全滤除,会对两目标波形的分离有一定影响;林下灌木等覆盖物的回波会造成一定的波形混叠;不同森林郁闭度对两目标回波峰值能量比值的影响也会给波形分解带来一定的困难,因此放宽式(5)的条件为:

$$T_0 - T_1 \geq 1.2(\sigma_0 + \sigma_1) \quad (6)$$

当波形中的两高斯子波的面积比大于5%,可以准确分解两高斯子脉冲<sup>[20]</sup>.对于林业调查中主要调查的有林地(郁闭度大于0.2),只要 $T_0$ 和 $T_1$ 满足式(6)条件,即可准确分离植被冠层和林下地表的回波.把公式(3)和(4)代入(6)式,化简得:

$$(z_0 - z_1)(1 + \tan^2\theta_T) \geq 0.6 * \sqrt{(\sigma_h^2 + \sigma_f^2)c^2 + 4\text{Var}(\Delta\xi_0) + 4z_0^2 \tan^2\theta_T [\tan^2\theta_T + \tan^2 S]}$$

$$+ 0.6 * \sqrt{(\sigma_h^2 + \sigma_f^2)c^2 + 4\text{Var}(\Delta\xi_1) + 4z_0^2 \tan^2 \theta_T [\tan^2 \theta_T + \tan^2 S]}$$

, (7)

由于  $\tan \theta_T < 1$ , 则  $1 + \tan^2 \theta_T \approx 1$ ,  $\tan^2 \theta_T \approx \theta_T^2$ ; 而  $z_0 - z_1 \approx h$ ,  $h$  为修正前的平均树高, (7) 式可简化为:

$$h \geq 0.6 * \sqrt{(\sigma_h^2 + \sigma_f^2)c^2 + 4\text{Var}(\Delta\xi_0) + 4z_0^2 \theta_T^2 [\theta_T^2 + \tan^2 S]} + 0.6 * \sqrt{(\sigma_h^2 + \sigma_f^2)c^2 + 4\text{Var}(\Delta\xi_1) + 4z_0^2 \theta_T^2 [\theta_T^2 + \tan^2 S]}$$

. (8)

由式(8)可知, 保持发射装置和接收装置造成的脉冲展宽不变, 对于固定的卫星轨道高度, 植被冠层的回波与地表回波是否可分辨, 主要取决于光束发散角与地形坡度和平均树高三者之间的关系. 而光束发散角直接决定了地面光斑的大小, 光斑直径  $d = z_0 \tan \theta_T / \cos S$ , 光斑直径随着光束发散角、地形坡度的增加而变大.

光束发散角不变的情况下, 在同样坡度的地形上, 低于一定值的林木高度就难以分辨准确的林木冠层和地表层; 坡度越大, 能分辨的林木高度的阈值就越高. 压缩光束发散角可以获得更小的光斑直径, 如图 1 所示, 同样坡度的植被, 当光斑直径由  $R_1$  减小为  $R_2$  时, 在冠层顶部与之同时发生反射的地表层由高度  $h_1$  减小到  $h_2$ , 回波也从单波峰展宽的混合波形变为双波峰的, 易于准确地提取地表回波和冠层回波.

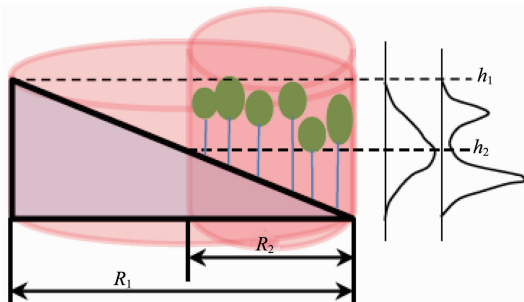


图 1 坡度和光斑尺寸对树高反演的影响

Fig. 1 Influence of slope and footprint diameter to forest height retrieval

## 2 GLAS 与机载 LiDAR 数据验证

目前对地观测的激光测高数据只有 GLAS 提供, L3F 工作周期的光斑最接近高斯分布, 而河南省嵩山森林公园的森林植被生长稳定, 变化缓慢, 所以选取 2006 年 5 月 29 日经过河南省嵩山森林公园 ( $34^{\circ}27'58''-34^{\circ}31'32''\text{N}$ ,  $112^{\circ}54'46''-112^{\circ}56'56''$ ) 上空的回波数据做验证. 激光脉冲发射和接收波形数据由 GLAS 系统 GLA01 数据包获取, 激光能量分布

数据由 GLA04 LPA (Laser Profiling Array) 数据包获取, 激光脚点中心位置三维坐标由 GLA14 数据包获取. 地表三维轮廓数据采用河南省遥感测绘院 ALS80 机载 LiDAR 设备采集得到, 激光点云密度约  $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$  网格 (高斯三度带投影平面直角坐标系), 同时记录对应三维点云位置的反射率信息.

首先, 对两类数据进行坐标系统的统一; 第二, 将 LiDAR 点云均匀网格化, 生成  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  空间网格的目标轮廓和反射率阵列数据; 第三, GLAS LPA 数据包记录  $20 \times 20$  像素数据, 每像素对应地面尺寸约  $10.5 \text{ m}$ . 用三次样条函数将 LPA 阵列数据内插生成  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  空间网格的能量分布数据. 最后, 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目标轮廓和反射率, 以及 LPA 阵列插值后的激光空间能量分布数据, 通过矩阵运算得到相应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.

根据 GLAS 系统参数, 即卫星轨道高度  $z_0 = 600 \text{ km}$ , 光束发散角  $\theta_T = 110 \mu\text{rad}$ , 垂直投影光斑直径约为  $66 \text{ m}$ . 压缩光束发散角, 等效于减小光斑直径. 减小 LPA 中每像素对应的地面尺寸, 保持能量不变, 仿真光束发散角减小的回波波形.

图 2 左上图为河南省嵩山森林公园区域的部分机载激光雷达采集的激光点云数据生成的数字地表模型 DSM (Digital Surface Model). 图 2 右上图为 UTC 时间为 202 239 338. 262 的 GLAS 脚点的 LPA; 图 2 左下图为用 LPA 和 DSM 仿真的波形与 GLAS 回波的波形对比, 仿真波形与 GLAS 实测波形的相关系数达到 0.968, 与实测回波高度相关, 说明仿真方法可行; 图 2 右下图分别为 LPA 能量不变, 空间分布范围向中心点收缩为原来的  $1/2$  和  $1/4$ , 得到的仿真波形与 GLA04 读取的 LPA 仿真回波的对比. 图中黑色实线表示原 LPA 仿真波形, 波形呈现脉冲明显展宽多毛刺, 无明显双峰或多峰值, 很难准确提取地表和植被冠层信息, 反演植被树高等参数. LPA 尺寸依次缩小为原来的  $1/2$  和  $1/4$  后, 波形长度逐渐减小, 回波有了明显的多波峰特征, 多子波可见, 可分辨植被冠层的垂直分层情况; 脉冲展宽变小, 可以更准确地判断出地表回波和植被冠层回波. 可见, 光束发散角减小, 对应的光斑尺寸也减小, 地形坡度造成的回波混叠下降, 有利于分析森林植被冠层的垂直空间结构, 分离地表回波, 反演森林结构参数.

为了使用单一的地物为目标, 更直观地分析在

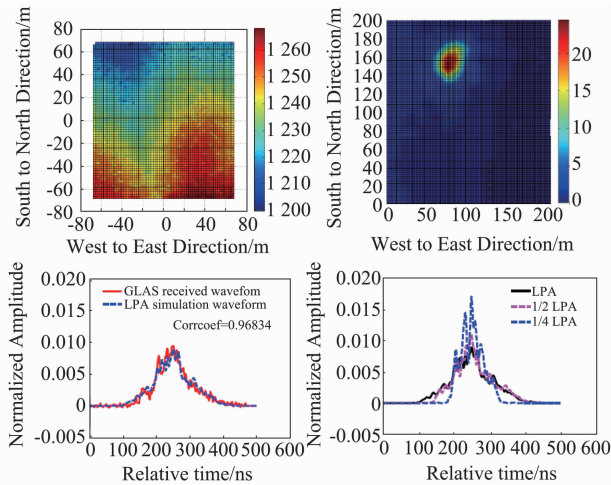


图2 典型植被地表轮廓、光斑能量分布仿真波形和 GLAS 对比及改变发散角的波形对比

Fig. 2 DSM, laser profile, waveform comparison between simulation and GLAS, and waveform comparison among simulation by changing beam divergence angle

不同坡度上的回波情况,建立了波形仿真器来分析光束发散角与大坡度森林回波的关系,如图3所示。同样以 GLAS 系统参数为输入,轨道高度为 600 km,光束发散角分别为  $110 \mu\text{rad}$  和  $50 \mu\text{rad}$ ,以森林植被的统计规律生成均匀分布的森林模型为目标,即满足地物一致性的目标,模拟激光测高系统的回波。由图3中的曲线可看出,随着坡度的增加波形脉宽展宽,脉冲峰值能量下降,波形的时间长度增加。当光束发散角为  $110 \mu\text{rad}$ ,坡度小于  $5^\circ$ 时,回波波形的展宽和混叠不明显,冠层的回波波形与地表的回波波形可以明显地区分;随着坡度增大,可以观察到明显的波形展宽,当坡度达到  $15^\circ$ 时,已经不能区分冠层回波和地面回波。而对于光束发散角为  $50 \mu\text{rad}$ ,坡度为  $15^\circ$ 时,依然能分辨出冠层回波和地面回波。即对于同样的树高分布,减小光束发散角,回波对于坡度的敏感性也降低。

### 3 模型的应用分析

保持发射装置和接收装置造成的脉冲展宽不变,对于固定的卫星轨道高度,分析公式(8)表示的可分离植被冠层和林下地表回波的条件中,光束发散角、坡度、粗糙度和平均树高之间关系。

#### 3.1 光束发散角、坡度和平均树高之间的关系

以公式(8)作图描述光束发散角、坡度和平均树高之间的关系。根据 GLAS 系统参数,假设  $z_0 = 600 \text{ km}$ ,  $\sigma_f = 2.73 \text{ ns}$ ,  $\sigma_h = 1/12^{0.5} \text{ ns}$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $\text{Var}(\Delta\xi_0) = 9 \text{ m}^2$ ,  $\text{Var}(\Delta\xi_1) = 1 \text{ m}^2$ , 光束发散角  $\theta_r$ :

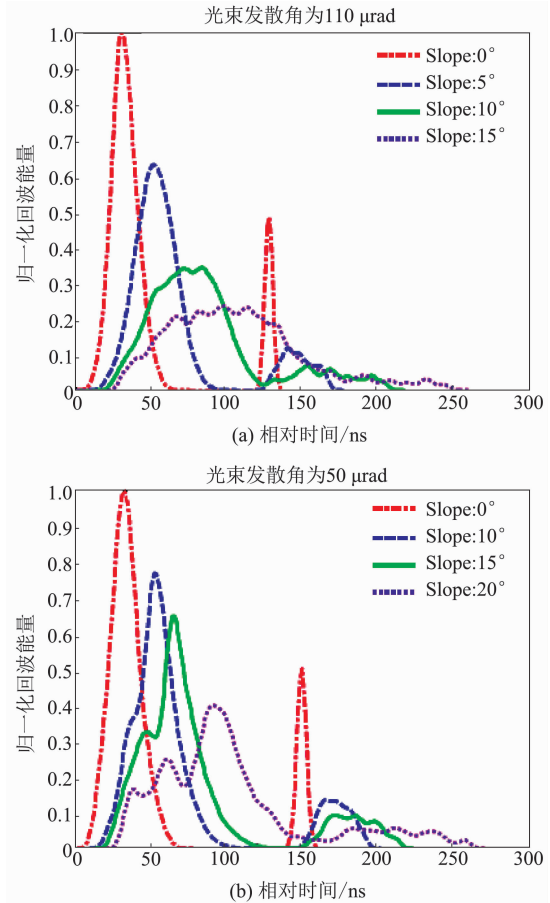


图3 光束发散角对不同坡度森林回波的影响

Fig. 3 Influence of beam divergence angle on forest echo of different slope

$0 \sim 110 \mu\text{rad}$ , 平均树高  $h = 5 \text{ m}$ ,  $10 \text{ m}$ ,  $15 \text{ m}$ ,  $20 \text{ m}$ ,  $25 \text{ m}$ ,  $30 \text{ m}$ 时,可分辨植被的坡度如图4所示。随着激光光束发散角  $\theta_r$  增大,要分辨越小的植被树高,坡度的极限值也越小。例如,对于平均树高  $20 \text{ m}$  的植被,当激光发散角为  $50 \mu\text{rad}$ 时,在坡度约为  $28^\circ$ 的地形植被树高可以反演,而发散角为 GLAS 系统的参数  $110 \mu\text{rad}$ 时,在坡度约为  $14^\circ$ 时才能反演树高,坡度增大则会使波形完全混叠,无法提取地表和植被对应的波形参数,这与目前 GLAS 激光测高仪植被参数反演只在地表坡度  $15^\circ$ 以内的区域进行相吻合。对于反演大坡度地形的森林树高,光束发散角越小越好;发散角越小,同样的坡度地形上能反演越矮的森林植被树高。

表1和表2中分别给出轨道高度为  $600 \text{ km}$  和  $500 \text{ km}$  的几种常见树高对应不同发散角的坡度阈值,低于阈值坡度时可反演相应的树高。表1和表2显示,要反演  $28^\circ$ 坡度上的平均树高为  $20 \text{ m}$  的森林参数,轨道高度为  $600 \text{ km}$ 时,光束发散角为  $50 \mu\text{rad}$ ;轨道高度为  $500 \text{ km}$ 时,光束发散角为  $60 \mu\text{rad}$ 。可见,

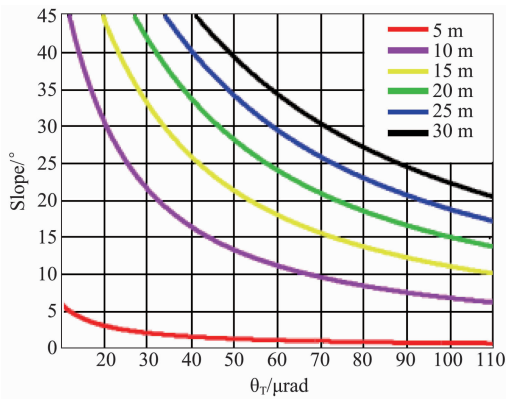


图4 光束发散角  $\theta_T$  与坡度的关系曲线  
Fig. 4 Relationship curve between  $\theta_T$  and slope

轨道高度越高, 要对同样坡度上的森林结构参数进行反演就需要越小的光束发散角. 轨道高度在 500 km 至 600 km 之间时, 要保证大部分的森林回波能够准确反演森林参数, 光束发散角应该在 40 ~ 60  $\mu\text{rad}$ .

表1 轨道高度为 600 km 时光束发散角  $\theta_T$  对应的坡度阈值

Table 1 Corresponding slope threshold of  $\theta_T$  ( $z_0 = 600$  km)

Slope	$\theta_T = 110 \mu\text{rad}$	$\theta_T = 60 \mu\text{rad}$	$\theta_T = 50 \mu\text{rad}$	$\theta_T = 40 \mu\text{rad}$
$h = 5$ m	$0.5^\circ$	$1^\circ$	$1.2^\circ$	$1.5^\circ$
$h = 10$ m	$6^\circ$	$11^\circ$	$13^\circ$	$16^\circ$
$h = 15$ m	$10^\circ$	$18^\circ$	$21^\circ$	$26^\circ$
$h = 20$ m	$14^\circ$	$24^\circ$	$28^\circ$	$34^\circ$

表2 轨道高度为 500 km 时光束发散角  $\theta_T$  对应的坡度阈值

Table 2 Corresponding slope threshold of  $\theta_T$  ( $z_0 = 500$  km)

Slope	$\theta_T = 110 \mu\text{rad}$	$\theta_T = 60 \mu\text{rad}$	$\theta_T = 50 \mu\text{rad}$	$\theta_T = 40 \mu\text{rad}$
$h = 5$ m	$0.6^\circ$	$1.1^\circ$	$1.4^\circ$	$1.7^\circ$
$h = 10$ m	$7^\circ$	$13^\circ$	$15^\circ$	$19^\circ$
$h = 15$ m	$11^\circ$	$21^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$
$h = 20$ m	$16^\circ$	$28^\circ$	$32^\circ$	$38^\circ$

### 3.2 光束发散角、粗糙度和平均树高之间的关系

在对脉宽展宽的贡献中, 目标的粗糙度也是一个重要原因. 为了观察粗糙度的变化是否会影响随光束发散角增大的坡度变化规律, 对相同的平均树高, 增大发散角, 改变目标粗糙度, 观察坡度变化. 根据实测森林树高和树高方差的统计分析, 树高标准差通常不超过 5 m; 一般林地下地表起伏的高差不超过 3 m. 因此, 依然采用 GLAS 的系统参数, 并假设  $h = 15$  m, 图 4(a) 中保持地表粗糙度不变, 植被冠层粗糙度增加, 设置植被树高标准差分别为: 2 m, 3 m,

4 m, 5 m; 图 4(b) 保持植被粗糙度不变, 设置地表高度变化标准差分别为: 0.1 m, 1 m, 2 m, 3 m, 得出随光束发散角增大的可反演植被树高的坡度.

由图 5 可见, 随着目标粗糙度的增加, 发散角与坡度的关系不变, 同一发散角对应的坡度阈值略有降低. 例如,  $\theta_T = 110 \mu\text{rad}$  时, 图 5(a) 中显示的坡度阈值约  $9^\circ$ , 而图 5(b) 中显示的介于  $9^\circ \sim 10^\circ$  之间, 与表 1 对照, 降低不到 10%. 所以, 目标粗糙度的增加, 不改变上述规律, 即要分辨的植被树高不变时, 坡度越大, 需要越小的光束发散角.

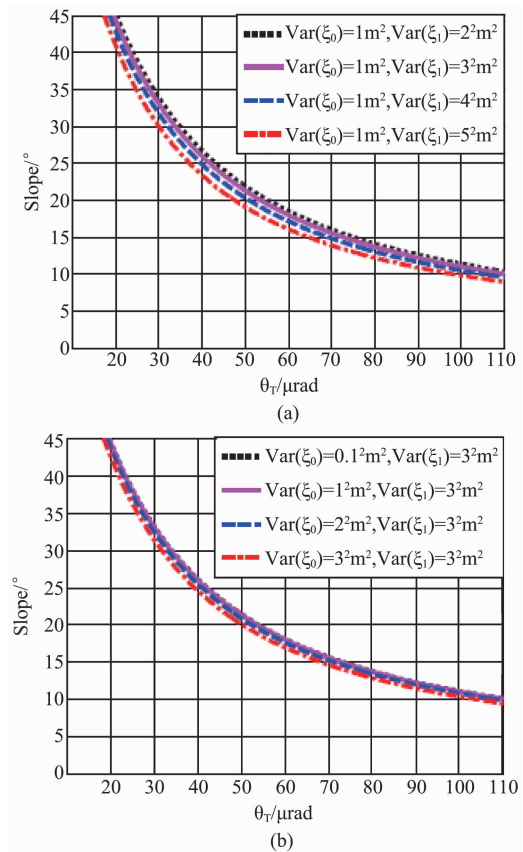


图5 目标粗糙度与  $\theta_T$  和坡度的关系曲线  
Fig. 5 Relationship curve among  $\theta_T$ , slope and target roughness

## 4 结论

为了分析星载激光测高仪光束发散角对大坡度地区森林植被目标回波的影响, 本文建立抽象的植被回波模型, 推导出植被回波分解条件. 在保持激光测高系统的其他硬件参数不变时, 以解析的方式分析了随着光束发散角的减小, 光斑内的地形坡度影响减弱, 同样的林木高度可以在更大坡度的地形上被反演. 随着光束发散角的减小, 森林回波对地形坡

度的敏感性降低,为了更准确地反演大坡度区域的森林植被结构信息,光束发散角越小越好.但是由于单株林木树冠具有一定冠幅尺寸,如果光斑太小,会丢失树冠顶部信息或失去地表信息,也不利于大区域森林树高的反演.因此在设计星载激光测高系统时,应根据待测的森林目标,选定合适的激光光束发散角.对于大坡度山地植被目标,卫星轨道高度在500 km至600 km时,激光测高仪光束发散角一般以40~60  $\mu\text{rad}$ 为宜.这对我国未来发射面向森林目标的带全波形记录功能的星载激光测高仪系统设计具有重要参考价值.

## References

- [1] Allouis T, Durrieu S, Couteron P. A New Method for Incorporating Hillslope Effects to Improve Canopy-Height Estimates From Large-Footprint LIDAR Waveforms[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2012, **9**(4): 730–734.
- [2] Lefsky M A, Cohen W B, Harding D J, et al. Lidar Remote Sensing of Above-Ground Biomass in Three Biomes[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2002, **11**(5): 393–399.
- [3] Xing Y Q, de Gier A, Zhang J J, et al. An improved method for estimating forest canopy height using ICESat-GLAS full waveform data over sloping terrain: A case study in Changbai mountains, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2010, **12**(5): 385–392.
- [4] WANG Cheng, XI Xiao-Huan, LUO She-Zhou, et al. Data processing and application of spaceborne LiDAR[M]. Beijing: Science Press(王成, 刁晓环, 骆社周, 等. 星载激光雷达数据处理与应用. 北京: 科学出版社), 2015.
- [5] Bye I J, North P R J, Los S O, et al. Estimating forest canopy parameters from satellite waveform LiDAR by inversion of the FLIGHT three-dimensional radiative transfer model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **188**: 177–189.
- [6] Nie S, Wang C, Zeng H, et al. A revised terrain correction method for forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2015, **108**: 183–190.
- [7] Nelson R, Margolis H, Montesano P, et al. Lidar-based estimates of aboveground biomass in the continental US and Mexico using ground, airborne, and satellite observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **188**: 127–140.
- [8] Tian J, Wang L, Li X, et al. Differentiating Tree and Shrub LAI in a Mixed Forest With ICESat/GLAS Spaceborne LiDAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*. 2016, **10**(1): 87–94.
- [9] Hilbert C. and Schmillius C. , Influence of Surface Topography on ICESat/GLAS Forest Height Estimation and Waveform Shape[J]. *Remote Sensing*, 2012, **4**(8): 2210–2235.
- [10] Mallet C, Bretar F. Full-waveform Topographic Lidar: State-of-the-art[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, **64**(1): 1–16.
- [11] WANG Cheng, TANG Fu-Xin, LI Li-Wei, et al. Wavelet analysis for ICESat/GLAS waveform decomposition and its application in average tree height estimation[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*. 2013, **10**(1): 115–119.
- [12] LAI Xu-Dong, QIN Nan-Nan, HAN Xiao-Shuang, et al. Iterative decomposition method for small foot-print LiDAR waveform[J]. *J. Infrared Millim. Waves*( 赖旭东, 秦楠楠, 韩晓爽, 等. 一种迭代的小光斑 LiDAR 波形分解方法. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(4): 319–324.
- [13] 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): 741–746.
- [14] MA Yue, LI Song, ZHANG Wen-Hao, et al. Waveform width of a satellite laser altimeter illuminating on sea surface. *Applied Optics*, 2017, **56**(22), 6130–6137.
- [15] MA Yue, WANG Ming-Wei, LI Guo-Yuan, et al. Waveform model of a laser altimeter for an elliptical Gaussian beam. *Applied Optics*, 2016, **55**(8): 3567–3574.
- [16] Lefsky M A, Michael A. A Global Forest Canopy Height Map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(15): 78–82.
- [17] Chen Q. Retrieving vegetation height of forests and woodlands over mountainous areas in the Pacific Coast region using satellite laser altimetry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(7): 1610–1627.
- [18] Pang Y, Lefsky M, Sun G, et al. Impact of footprint diameter and off-nadir pointing on the precision of canopy height estimates from spaceborne lidar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(11): 2798–2809.
- [19] Huang H, Liu C, Wang X, et al. Mapping vegetation heights in China using slope correction ICESat data, SRTM, MODIS-derived and climate data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017, **129**: 189–199.
- [20] Brenner A C, Zwally H J, Bentley C R, et al. , Derivation of Range and Range Distributions from Laser Pulse Waveform Analysis for Surface Elevations, Roughness, Slope, and Vegetation Heights[R]. *US: GLAS Algorithm Theoretical Basis Document*. Version 5.0, 2011.
- [21] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, **60**(2): 100–112.
- [22] Hofton M A, Minster J B, Blair J B. Decomposition of laser altimeter waveforms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1999, **38**(4): 1989–1996.
- [23] Gardner C S. Target signatures for laser altimeters: an analysis[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(3): 448–453.
- [24] Gardner C S. Ranging Performance of Satellite Laser Altimeters[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(5): 1061–1072.
- [25] Blair J B, Hofton M A. Modeling Laser Altimeter Return Waveforms Over Complex Vegetation Using High-Resolution Elevation Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(16): 2509–2512.