

文章编号: 1001-1498(2007)04-0464-05

地形对大光斑激光雷达森林回波影响研究

庞勇¹, 李增元¹, Sun Guoqing², Michael Lefsky³, 车学俭¹, 陈尔学¹

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 马里兰大学地理系, 马里兰 20742, 美国;
3. 科罗拉多州立大学森林、草地与流域系, 科罗拉多 80523, 美国)

摘要: 利用三维激光雷达森林回波波形模型模拟了地形对波形的影响, 并用 ICESat GLAS 的数据对模拟结果进行了验证。结果表明坡度对大光斑激光雷达波形影响较大, 随着坡度的增大, 地面回波和树冠回波都展宽, 波形长度也随之增加, 同时地面的波峰和植被的波峰值都降低, 来自地面的回波明显减少, 并逐渐与靠近地面的回波发生信息混叠。鉴于二者的关系呈近似线性正相关, 在实际的森林参数反演中可通过减去一个含有坡度或地形起伏度的因子进行地形效应纠正。

关键词: 地形; 大光斑激光雷达; 森林回波波形; ICESat GLAS
中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

Effects of Terrain on the Large Footprint Lidar Waveform of Forests

PANG Yong¹, LI Zeng-yuan¹, Sun Guoqing², Michael Lefsky³, CHE Xue-jian¹, CHEN Er-xue¹

(1. Institute of Forest Resource Information Technique, CAF, Beijing 100091, China; 2. Department of Geography, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA; 3. Department of Forest, Range and Watershed Stewardship, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA)

Abstract: The large footprint lidar has demonstrated its great potential for accurate estimation of many forest parameters. As the lidar waveform is a record of return signal as a function of time from sensor to target, the terrain within lidar footprint will affect the waveform through changing the distance of target to sensor and make effective footprint area larger. This paper simulated the effects of terrain on large footprint lidar waveform using a three dimensional lidar waveform model from forest. The analysis of ICESat GLAS laser2b data of Northeast China showed the same phenomena with simulated results. The results showed that both of the ground return signals and vegetation return signals were widened and the peak decreased with slope increasing. The return singles began earlier with slope increasing. Meanwhile, the slope angle from the signal beginning to first peak of the waveform decreased. These two phenomena caused the error in detecting signal beginning and the following forest height estimation. The recorded lidar waveform would contain false vegetation peak at certain slope level. The relationship between waveform length and terrain slope was near linear. So the effects of terrain on lidar waveform could be corrected by subtracting a factor of slope or terrain index.

Key words: terrain; large footprint lidar; waveform from forests; ICESat GLAS

激光雷达是传统雷达与现代激光技术相结合的产物, 是一种主动遥感技术。激光雷达以脉冲激光作为技术手段, 以激光光束扫描的工作方式测量传感器

到地面上激光照射点的距离, 即通过测量地面采样点激光回波脉冲相对于发射激光主波之间的时间延迟得到传感器到地面采样点之间的距离^[1]。近 20 年

收稿日期: 2006-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30230420)、(40601070)、国家 863 计划课题 (2002AA133050) 和中国林业科学研究院基金项目 (2004Z04) 支持

作者简介: 庞勇 (1976—), 男, 安徽省太和人, 博士, 助理研究员, 主要从事合成孔径雷达和激光雷达对地观测机理和森林参数定量反演等方面的研究。Email: caf_pang@gmail.com

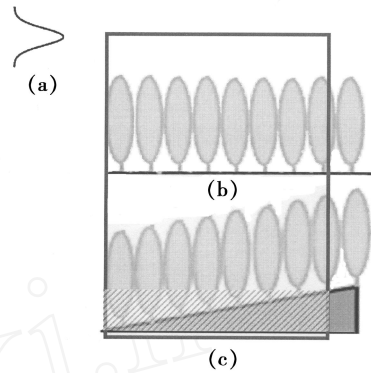
来,国外已经就激光雷达在林业上的应用进行了大量成功的尝试,成功进行了森林高度、冠层垂直结构、郁闭度、胸高断面积和蓄积量(生物量)和单木参数的反演^[2-7]。近几年来,国内也开展了一些试验研究^[8,9]。其中在林木高度测量与林分垂直结构信息获取方面具有其他遥感技术无可比拟的优势。普通的光学传感器只能用于提供森林水平分布的详细信息而很难提供垂直分布的信息,而激光雷达遥感根据采样方式和配置不同(离散回波还是波形激光雷达),可以高精度地提供森林水平和垂直的信息。

由于地球表面的复杂起伏,不同的区域坡度、坡向和粗糙度存在着较大差异,而大光斑连续回波的激光雷达系统光斑直径一般为 8~70 m。因此光斑内的地形在很多情况下不是平坦均一的,往往包含一定的起伏。激光雷达的森林回波模型可以帮助我们深入理解激光波形信号与植被参量之间的关系,发展反演模型,进行敏感性分析和误差分析^[1,9-11]。本文通过对地形影响激光雷达森林回波信号机理的分析,利用三维激光雷达森林回波波形模型模拟了地形对波形的影响,并用 ICESat GLAS 的数据对模拟结果进行了验证,探讨了地形效应的纠正方法。

1 地形对激光雷达森林回波信号影响机理

由于地球表面的复杂起伏引起的坡度和粗糙度对波形都有一定的展宽效应。地形对不同光斑尺寸的大光斑 lidar 系统的影响不同,随着光斑的增大,光斑内所包括的地形也越复杂,地形的影响也越大。并且往往是坡度和粗糙度耦合到一起对波形产生影响。粗糙度往往只是对地面的回波产生展宽效应,而对整个波形、尤其是来自上层树冠的波形几乎没有影响,这一效应可以通过寻求地面回波的峰值进行其对高度改变的消除。下面对地形坡度的影响进行模拟和纠正方法的分析。

大光斑激光雷达信号是入射激光脉冲与森林、地面相互作用的结果,反映了不同的树冠层到传感器的距离和反射强度^[13](如图 1 所示)。激光回波信号是由发射脉冲和激光光斑内的森林、地面共同决定的。前者包括工作的波长、脉冲宽度、脉冲能量、光斑尺寸和记录回波脉冲的时间间隔;后者包括激光光斑内每株树的位置、高度、树种、树冠大小和形状、冠层的反射率,以及地表的反射率、坡度、坡向等参数。



(a) 发射激光脉冲; (b) 平地森林; (c) 山坡上的森林
(斜线阴影区域表示树木回波与地面回波混叠部分)

图 1 地形对大光斑激光雷达森林回波影响示意图(方框表示激光光斑)

如图 1 所示,地形的变化会导致两种情形影响 lidar 的森林回波波形:

(1) 地形起伏改变森林组分距离传感器的距离,甚至导致光斑内上坡的地面回波与下坡的森林回波产生混叠效应(图 1(c) 中的斜线的阴影区域);

(2) 斜坡使光斑内包含的实际面积增大,比相同情况下平地的森林包含更多的树。根据图 1 中所示的几何关系,山坡上的光斑面积实际为:

$$A_s = A_f / \cos(\alpha) \quad (1)$$

其中 A_s 为山坡上的光斑面积, A_f 为地面上的光斑面积, α 是坡度。

2 地形对激光雷达森林回波信号影响模拟

根据第一部分的分析可知,为了研究地形对大光斑 lidar 波形的影响,需要一个准确刻画三维林地(包括森林和林下地表)的激光雷达回波模型。本文采用了 Sun 等的三维模型^[11]。该模型假定激光脉冲的形状为曲线并有着一定的持续时间(如图 1(a) 所示)。一般而言,脉冲宽度远大于信号数字化的间隔,每一个散射体将产生一个记录为许多帧的信号。假定每一帧信号对应着一个脉冲宽度等于所分割的树冠立方体的方波,总的信号就是这些信号帧分别按回波时间不同的和。模型假定树枝和树叶在树冠内是均匀分布的,并具有一定的取向分布,树枝的大小和取向也用直方图或分布函数来近似^[14]。根据所模拟的激光雷达系统参数,整个三维林分可被分成很多小立体单元。这些单元可能为下列情形之一:树冠;树干;空气或地表。当激光束穿过或遇到

这些单元时,就会受到相应的散射和吸收。

为了研究地形对大光斑 lidar波形的影响,本文对 Sun等的模型^[11]进行了发展,对输入的林木参数加入了地形效应的影响:(1)在对冠层进行三维空间离散时,考虑地形(主要是坡度)的影响;(2)考虑坡度对山坡上实际光斑面积的扩大(如公式(1))。

根据上面描述的方法,本研究使用专门为植被探测目的设计的植被冠层激光雷达(Vegetation Canopy Lidar,缩写 VCL)的传感器参数和模拟的林木参数作为模型输入对森林回波波形进行模拟。为了更好地探究地形的影响,使用了单一树种并且单木参数相同(胸径 25 cm,树高 20 m,冠长 9 m)的林分进行模拟,树木分布模式为规则分布。

模拟所用的入射脉冲为高斯脉冲,持续时间是 5 ns,相当于 75 cm 的高度。光斑边缘激光能量减弱到中心的 e^{-2} 。波形数据记录间隔是 1 ns(即 15 cm),所用波长为 1 064 nm^[15],树冠在该波长的反射率为 0.515,透过率是 0.305,地面反射率为 0.29^[11]。树木的胸高直径是 25 cm,树高是 20 m,树冠长度是 9 m。模型假定所有的树冠形状都是均一的椭球形,具有相同的反射率和透过率;林下地表为朗伯体。

模拟的森林回波波形如图 2 所示,其中上面的回波来自树冠,下面的回波来自地面,坡度从 0°变化到 50°,光斑内包含的树木从 32 株增大到 48 株。SigBeg表示信号开始的位置, SigEnd表示信号结束的位置, Gpeak表示地面回波峰值的位置。

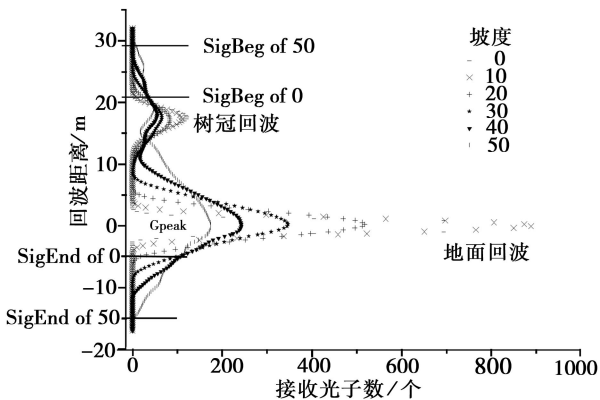


图 2 地形对大光斑激光雷达波形的影响模拟

波形长度是激光雷达进行植被高度信息提取的基础,通常定义为从信号开始位置和地面回波的峰值位置之间的距离。即图 2 中 SigBeg与 Gpeak 高度的差值。图 3 所示为根据模拟波形计算的波形长度与地形坡度的关系。

模拟结果表明坡度对大光斑激光雷达波形影响

较大。随着坡度的增大,地面回波和树冠回波都展宽,波形长度也随之增加,地面的波峰和植被的波峰值都降低,来自地面的回波明显减少,并逐渐与靠近地面回波发生信息混叠。从图 2 可看出,随着坡度的增加,回波信号记录开始时刻提前,波前的上升角度变小,这两种现象都给信号开始的判断带来误差。同时,随着坡度的增加,回波信号结束时刻推后,并且先期到达地面回波的与坡下部的森林的回波在坡度大于一定程度后发生混叠。从图 3 可看出,波形长度与坡度呈近似的线性正相关。

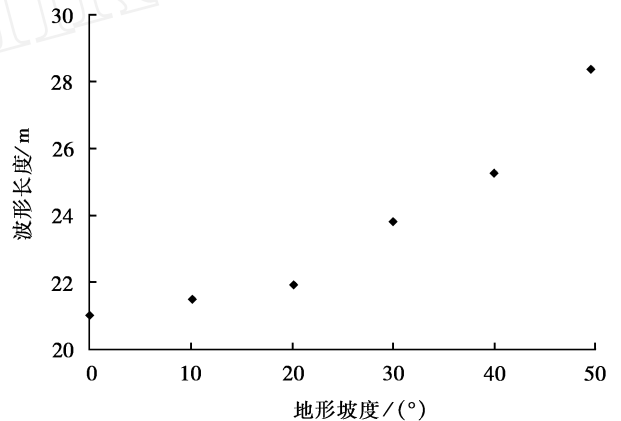


图 3 模拟的地形坡度对波形长度的影响

在图 2 的模拟结果中,虚假的地面回波出现在坡度 40 时,当坡度达 50 时,地面回波与树冠回波严重混叠。在坡度达 30 时,波前的上升角度明显减小。而坡度小于 10 的波形则与平地的一致性较好,因此对于大光斑 lidar的森林回波波形来说地形坡度小于的较为可靠。

另外,对山坡的方位角也从 0 到 50 进行了模拟,发现方位对波形的影响很小。

3 地形对 ICESat GLAS森林回波信号的影响

由于 VCL (Vegetation Canopy Lidar,植被冠层激光雷达)卫星尚未发射,本文采用了美国科学试验卫星 ICESat(冰,云和陆地高程卫星)上的 GLAS传感器的数据进行模拟结果的验证。该卫星于 2003 年 1 月成功发射,是 NASA 从 1999 年开始的地球科学计划的一部分,目的是观测 10 至 15 a 一段时期内的大气、海洋、陆地、冰和生物圈,从而监测与气候、环境变化密切相关的地球—大气系统的变化。该卫星搭载有激光雷达传感器 GLAS, GLAS 传感器采用脉冲波、非多普勒、非相干和点光束的工作方式,激光光斑大致

为 70 m,光斑间隔为 170 m^[12]。本研究中主要采用我国东北地区 GLAS 第二个激光器第二次工作期间 (Laser2b,数据获取时间为 2004 年 2 月 17 日至 2004 年 3 月 21 日) 的 1 064 nm 来自陆地的回波波形作为检验数据。

第二部分中的理论模型模拟的是规则坡面的情况,而实际的地形坡度变化多样,很少有固定坡度的情况,尤其是对较大的尺度而言。因此,在探究地形对 GLAS 波形影响时本文引入坡面复杂度描述因子中地形起伏度的概念,地形起伏度指在所指定的分析区域内所有栅格中最大高程与最小高程之差^[16]。即:

$$RF_i = H_{\max} - H_{\min} \quad (2)$$

其中 RF_i 为分析区域内的地面起伏度, H_{\max} 为分析窗口内的最大高程值, H_{\min} 为分析窗口内的最小高程值。

如图 4 所示,在规则坡面下,参与计算的窗口内坡度与地形起伏度一致;不规则坡面时,地形起伏度更容易求算和表述。

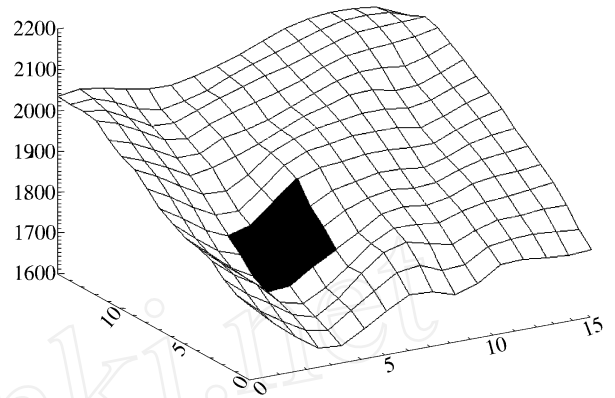


图 4 3 × 3 窗口内坡度与地形起伏度的关系
(图中坐标轴表示空间坐标的 xyz,单位:m)

对我国东北地区 GLAS Laser2b 的数据进行了处理,考虑到 SRM-DEM 的分辨率和 GLAS 的光斑尺寸,取 3 × 3 的窗口计算地形起伏度。图 5 为波形长度与地形起伏度的关系图,可见激光光斑内地形起伏度与波形长度存在明显的正相关关系,这一方面因为在我国东北山区林木较多,但另一方面也因为地形坡度对激光回波波形的展宽作用。

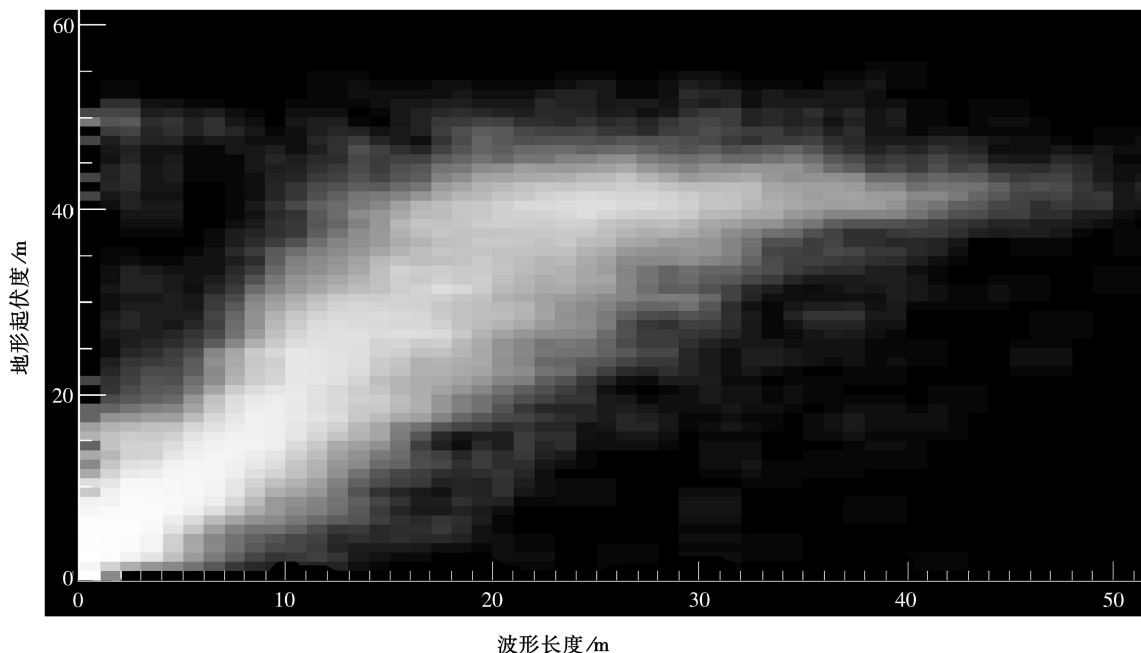


图 5 地形对 GLAS 波形的影响 (图中由暗到亮表示激光点由少到多)

根据第三部分的理论模型模拟和前面的实际数据分析可知随着地形坡度的增大波形的长度也随之增大,即在波形长度中有地形的贡献,在实际的森林参数反演中要予以纠正。鉴于二者的关系呈线性正相关,在实际波形长度计算中可通过减去一个含

有坡度或地形起伏度的因子进行地形效应纠正。Lefsky 等^[17]在巴西亚马逊的森林高度反演时采用了 3 × 3 窗口内的高程变化范围对地形效应进行了纠正,与本文的地形起伏度概念一致,本文的模型模拟结果也与其统计规律相一致。

4 结论和讨论

本文采用理论模拟的技术手段研究分析了地形对大光斑激光雷达森林回波波形的影响,模拟了相同树木参数生长在不同坡度的地形条件下的 lidar 波形,并用 ICESat GLAS 的数据对模拟结果进行了验证。结果表明:

(1) 坡度对大光斑激光雷达波形影响较大;

(2) 随着坡度的增大,地面回波和树冠回波都展宽,波形长度也随之增加,同时地面的波峰和植被的波峰值都降低,来自地面的回波明显减少;

(3) 当地形起伏大于一定临界坡度时,树冠回波与靠近地面回波发生信息混叠,当该混叠效应严重到无法将地面回波从下层的树冠回波分开时,这类波形很难应用。

(4) 鉴于坡度与回波波形长度的关系呈近似线性正相关,在实际的森林参数反演中可望通过减去一个含有坡度或地形起伏度的因子进行地形效应纠正,以减弱或消除波形长度中的地形贡献。

参考文献:

- [1] Sun G, Ranson K J. Modeling lidar returns from forest canopies[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38: 2 617 ~ 2 626
- [2] Mats Nilsson. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar systems[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56: 1 ~ 7
- [3] Means J E, Acker S A, Harding D J, et al. Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 67: 298 ~ 308
- [4] Popescu S C, Wynne R H, Nelson R F. Estimating plot-level tree heights with lidar-local filtering with a canopy-height based variable window size[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 37: 71 ~ 95
- [5] Lefsky M A, Harding D, Cohen W B, et al. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 67: 83 ~ 98
- [6] Drake J B, Dubayah R O, Clark D B, et al. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 305 ~ 319
- [7] Lim K, Paul Treitz, Ian Morrison, et al. Estimating aboveground biomass using lidar remote sensing[C]. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology IV Conference, September 23 ~ 27, 2002, Agia Pelagia, Crete, Greece
- [8] 庞勇,于信芳,李增元,等.星载激光雷达波形长度提取与林业应用潜力分析[J].林业科学,2006,42(7):137~140
- [9] 庞勇,孙国清,李增元.林木空间格局对大脚印激光雷达波形影响模拟[J].遥感学报,2006,10(1):97~104
- [10] NiMeister W, Jupp D L B, Dubayah R. Modeling lidar waveforms in heterogeneous and discrete canopies[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2001, 39: 1 943 ~ 1 958
- [11] Kotchenova S, Nikolay V Shabanov, Yuri Knyazikhin, et al. Modeling lidar waveforms with time-dependent stochastic radiative transfer theory for remote estimations of forest biomass[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 - D15: ACL12 - 1
- [12] Brenner A C, Jay Zwally, Charles R B, et al. GLAS Algorithm Theoretical Basis Document Version 3.0 - Derivation of Range and Range Distributions From Laser Pulse Waveform Analysis for Surface Elevations, Roughness, Slope, and Vegetation Heights[R], NASA's Goddard Space Flight Center, 2000
- [13] Harding D J, Blair J B, Rabine D L, et al. SLICER: Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery instrument and data product description, v. 1.3[R]. NASA's Goddard Space Flight Center, 1998
- [14] Gastellu-Etchegorry, Demarez V, Pinel V, et al. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58: 131 ~ 156
- [15] Ralph Dubayah, Blair J B, Jack Bufton, et al. The Vegetation Canopy Lidar Mission. Land Satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications[C]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD. 1997, 100 ~ 112
- [16] 汤国安,刘学军,闫国年.数字高程模型及地学分析的原理与方法[M].北京:科学出版社,2005
- [17] Lefsky Michael A, Harding D J, Michael Keller, et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using the Geoscience Laser Altimeter System[J]. Geophys Res Lett, 2005, 32, L22S02