

星载光子计数激光测高植被冠层高度误差分析

王玥¹, 王虹², 李松^{1*}, 周辉¹

(1. 武汉大学电子信息学院激光遥感与光电检测实验室, 湖北武汉430072;

2. 昆明理工大学理学院, 云南昆明650051)

摘要:通过建立植被的单光子探测模型,分析和计算了星载光子计数激光测高植被探测中,因单光子探测原理引起的植被冠层高度误差。实验表明,北方针叶林的星载光子计数测高中单次激光脉冲首次探测到的信号光子的平均高程低于LIDAR数据提供的DSM约2.435 m。仿真结果表明,提高发射脉冲能量,减小激光脉冲发散角有助于减小误差,而拥有更高郁闭度和叶面积指数的森林,其本身的探测误差也会相应减小。

关键词:光子计数激光测高;冠层高度误差;植被冠层模型

Error analysis of estimated canopy height based on photon counting laser altimetry

WANG Yue¹, WANG Hong², LI Song^{1*}, ZHOU Hui¹

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

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

Abstract: Photon counting laser altimetry could detect the continuous elevation of the earth's and vegetation's surface. But, whether a single photon event could occur in a certain period is a random event according to echo energy and detection probability. Therefore, the set of received single photon events can not accurately represent the strength of an echo, which makes it difficult to determine the starting position in monopulse detection, and may cause an error when estimating vegetation's canopy height. By establishing the photon counting detection model of vegetation, the error of canopy height caused by the principle of single photon detection is analyzed and calculated in this paper. Experimental results showed that the average elevation of the first detected signal photons was 2.435m lower than the DSM provided by LIDAR data from taiga forest. Still, it is helpful to reduce the error by increasing the energy or reducing the divergence angle of emitted laser. And the errors of forests with higher canopy density and leaf area index are smaller accordingly.

Key words: photon counting laser altimetry, error of estimated canopy height, photon counting detection model of vegetation

PACS:07.07.Df, 42.62.-b, 85.30.-z, 85.60.Gz

引言

星载光子计数激光测高系统具有较高的沿轨方向分辨率,能够进行微脉冲、高重频的连续高程探测,对森林结构制图和改进全球数字地形模型有着重要的推进作用^[1-3]。美国NASA在2018年9月发射的ICE-Sat2(Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2)极地探测卫星上搭载的ATLAS(Advanced Topographic Laser Altimeter System)星载对地光子计

数激光测高仪^[4-6]是目前唯一正式开始运行的星载光子计数激光测高仪。升空后,ATLAS系统采用10 kHz的脉冲频率,0.7 m的沿轨距离间隔,160 μJ或40 μJ的强/弱微脉冲能量,以及4 cm的高程精度,展开冰川、海洋、陆地和植被等多种目标的探测任务,其任务之一是在两年内测量全球植被的高程。

植被的冠层是指植被树干以上连同集生枝叶的部分。植被冠层的高度指树冠高度最高处即冠

收稿日期:2020-05-20,修回日期:2020-12-25

Received date:2020-05-20, Revised date:2020-12-25

基金项目:国家自然科学基金(41801261),云南省人培项目(KKSY201907027)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41801261), Yunnan Province Talent Training Program(KKSY201907027)

作者简介(Biography):王玥(1987-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要研究激光测高。E-mail:598451663@qq.com

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

层顶端到地面之间的距离,可以用以评估植被的生长状况。植被冠层的高度是一个连续的参数,随着植被的外轮廓和地表高程变化,在计算植被冠层的高度时,一般通过当地的数字表面模型 DSM 减去数字高程模型 DEM 求得具体高度。光子计数激光测高植被冠层高度估算,需要从原始的植被点云中找出属于冠层顶端和地表的离散点,并分别估算其高程。光子计数激光测高仪发射的激光脉冲能量较小,而植被在 ATLAS 激光测高仪采用的 532 nm 波段的反射率又较低,因此植被信号点云的密度很低。在这种情况下,单次脉冲探测中第一次单光子事件发生的时间不一定是脉冲回波的起始时刻,而是更偏向于发生在回波能量较强的一段时间内。此外,由于激光脉冲具有一定的发散角,探测得到单光子事件难以区分是在光斑上的何处发生的,同样可能引起误差。NASA 官方提供的 ATLO8 数据展示了 ICE-Sat2 轨道上植被的冠层高度^[7]。尽管 ATLO8 数据较为精确,不过还是有文献指出,ATLO8 提供的冠层顶端高程和机载数据有着一定的区别^[8]。Amy 等人发现^[9],光子计数激光测高仪探测得到的冠层顶端高程有着偏低趋势,并猜测误差和光斑范围内的郁闭度有一定的关系,不过没有给出误差具体的计算方式。

本文结合单光子探测的理论和森林植被的光学辐射模型,建立了森林植被的光子计数激光测高模型,分析和计算了光子计数植被测高体系中因单光子探测概率理论引起的固有误差。实验表明,在北方针叶林的星载光子计数测高中,单激光脉冲首次探测到的信号光子的平均高程低于 LIDAR 数据提供的 DSM 约 2.435 m。而提高发射脉冲能量,减小激光脉冲发散角能够有效减小误差;拥有更高郁闭度和叶面积指数的森林,其本身的探测误差也会相应减小。

1 误差分析

1.1 小光斑探测的误差

机载等光斑较小的激光测高系统,可以近似将光斑视为一个点,讨论误差时暂不考虑激光脉冲的空间分布。光子计数激光测高的发射能量较小,而植被叶片在常见的激光雷达波段的反射率又较低,并且具有一定的穿透性。因此,单次脉冲探测中发生的单光子事件数目较少,且依照探测概率,随机分布在植被冠层顶端到地表之间。此时,小光斑单脉冲探测中,第一个被探测到的信号光子不一定处

于信号起始位置(冠顶处),而是倾向于出现在探测概率较高的冠顶下方的一段较长区域中,导致目前通过单光子点云确定的冠层顶端高程,有着偏低的趋势。光子计数激光测高点云的数字表面高程(DSM)的提取难度大,为了防止不同表面提取方法导致的误差,本文仅分析第一次探测到的信号光子的高程,而不具体提取冠层的轮廓。

在激光探测的过程中,信号可以抽象成发射激光脉冲经过一次夫琅禾费衍射,到达目标表面相互作用,再经过一次夫琅禾费衍射被接收望远镜接收得到。根据夫琅禾费衍射的相关理论可知,高斯脉冲经过夫琅禾费衍射依然呈现高斯分布^[10]。因此回波信号时域的初始分布可以用高斯函数近似描述:

$$E(t) = \frac{E_0}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left[-\frac{(t-T_s)^2}{2\sigma_e^2}\right], \quad (1)$$

其中 σ_e 表示回波信号的均方根脉宽, T_s 为回波信号的时间重心, E_0 是单次脉冲的回波能量,可表示为

$$E_0 = E_1 \eta \frac{A_r}{\pi R^2} T_v^2 p \cos\theta_g, \quad (2)$$

式中 E_1 是发射脉冲能量, η 是探测器的光学传输效率, A_r 是接收口径, R 是载荷距离地表距离, p 是目标反射率, T 是大气透过率, θ_g 是激光测高仪的指向角与目标表面法向方向的夹角。

在小光斑的单光子激光测高中,可以假设入射光垂直照射在植被冠层的一个点上。此时,在植被的 BRDF 辐射模型中,冠层对入射光的衰减可由二向间隙率(BDGP)表示^[11],BDGP 可表示为

$$B(z) = e^{\int_0^z u_L(z') [1-f(z')] G(z') dz'}, \quad (3)$$

式中, B 是二向间隙率,它代表了冠层对入射光的衰减幅度, z 是光线穿透的冠层深度; $u_L(z')$ 是深度为 z' 时的叶体积密度 LVD(leaf volume density),在均匀的树冠中,可由叶面积指数除以树冠高度得到; $G(z')$ 是 Ross-Nilson G 函数,它代表着单位体积叶片在激光入射方向上的投影面积,其具体大小由叶片的叶倾角,入射的光天顶角和方位角共同决定, $f(z')$ 为 z' 深度时叶片的透射率。为了方便计算回波的能量,可以将冠层分为数个薄片,植被冠层整体的回波可以分解为数个小薄片的回波的叠加,如图 1 所示。

若将冠层被分成了 I 层,对于某一发散角极小的激光脉冲,所有 I 层冠层和地表激光信号回波可

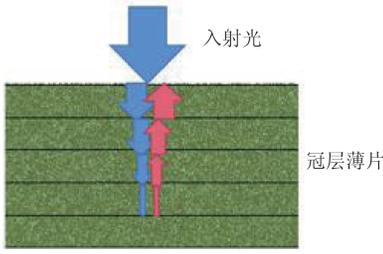


图1 植被冠层的回波

Fig. 1 Echo of vegetation canopy

以表示成

$$E = \left\{ \sum_{i=1}^i \frac{E_0}{\sqrt{2\pi} \sigma_e} \left[\exp\left(-\frac{(t - T_i)^2}{2\sigma_e^2}\right) \right] \cdot B(i) \cdot p(i) \right\} + \frac{E_0}{\sqrt{2\pi} \sigma_g} \exp\left[-\frac{(t - T_{\text{ground}})^2}{2\sigma_g^2}\right] \cdot B(h_c) \cdot p_{\text{ground}} \quad (4)$$

式中等号右边第一项为植被冠层反射的回波,右边第二项为地面反射回波, h_c 代表着树冠的总长度, p_{ground} 为地面反射率。

单光子探测器接收的平均有效信号光子数处于光子量级,比接收光学系统的散斑自由度要小很多,因而采用泊松分布可以较为准确地描述单光子探测器的探测特性^[12]。此外,单光子探测器在探测到一个光子后,存在一个无法继续进行探测的死区时间^[13]。因此,对于单光子探测器开始工作后的第 s 个时间间隔(time-bin,其长度为探测器的时间分辨率)内,其探测概率为:

$$P_s = [1 - \exp(-N_s - \tau \cdot N_n)] \exp\left(-\sum_{i=s-t_d-1}^{s-1} N_i - t_d \cdot \tau \cdot N_n\right) \quad (5)$$

其中 τ 为时间分辨率, N_s 为时间间隔 s 内的信号光子数, $N_s = E_s/h\nu$, E_s 为时间间隔 s 内的信号回波能量, $h\nu$ 为单个光子的能量, N_n 为平均噪声光子数, t_d 为死区时间长度。

虽然各种植被冠顶的高程提取算法不同^[14-16],但是一般而言,点云中高程最高(即第一个被探测到的),且非地面、非噪声的点均会被视作冠层顶端的点。在单光子回波信号中,某对应高程位于树冠中的第 s 个时间间隔是这次单脉冲探测中第一次探测到光子的概率 $P_{s,f}$ 可表示为:

$$P_{s,f} = [1 - \exp(-N_s - \tau \cdot N_n)] \exp\left[-\sum_{i=0}^{s-1} N_i + (s-1) \cdot N_n\right] \quad (6)$$

此时,可以得到小光斑探测系统误差的大小:

$$\text{ER} = \sum_{i=1}^N P_{s,f} (H_s - H_1) \quad (7)$$

式中 H_s 代表时间段 s 在空间上代表的平均高程, H_1 是冠层顶端的高程, N 为窗口内时间间隔数的总和。假设某颗树的树冠扁平,而某个小光斑单光子探测器的脉冲激光垂直入射,如图1所示。在不考虑噪声的情况下,单次激光回波的能量分布和单光子探测体系造成的系统误差如图2所示。

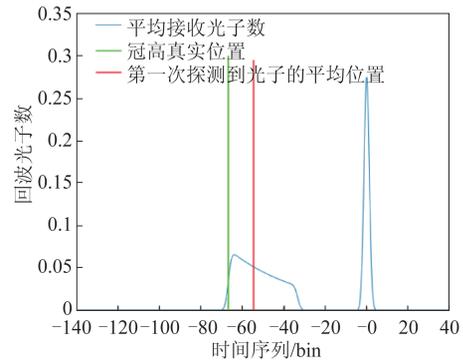


图2 小光斑探测误差

Fig. 2 Error with small laser spot

除光斑较小外,图2中探测器和卫星姿态的其他参数均按照ICE-Sat2极地探测卫星上的ATLAS星载激光测高仪参数设置,具体可见参考文献[4],植被的叶体积密度为 0.2 m^{-1} ,叶片反射率为0.3,透射率为0.1,时间间隔(time-bin)长0.1 ns。图2横坐标为时间间隔的序列,为了方便参考,将地表所在处设为序列0。纵坐标为该时间间隔内理论接收到的回波光子数。可以看到,第一次探测到光子的平均位置低于真实冠高的顶端,造成了冠层高度的错误估算,在单次脉冲探测中,首次出现光子的平均位置要落后于真实的冠层顶端位置约1.83 m。

1.2 大光斑探测的误差

星载光子计数激光测高仪在地表上的光斑一般较大,在激光雷达的回波仿真中,由于发射的激光脉冲能量在空间上不是均匀分布的,并且作为目标的树冠会呈现锥形、椭圆形、半椭圆、圆柱形等多种不同形状,所以除了在入射方向上分层外,为了方便计算入射光束和目标之间相互作用,还需要在水平方向刻画出网格,用以具体分析回波在空间上的能量分布,如图3所示。在星载系统中,激光脉冲具有一定的发散角,使得探测得到单光子事件无法区分是在光斑内的何处发生的,同样可能引起误差。

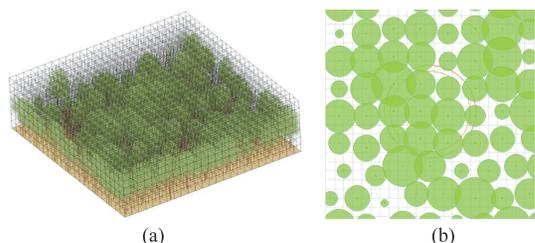


图3 地表植被场景 (a) 3D斜视图, (b) 2D平面视图
Fig. 3 Vegetation landscape of (a) 3D oblique view, (b) 2D plan view

以光斑中心为原点, 网格的行为 x 轴, 列为 y 轴建立坐标系。当激光光斑的大小如图 3 (b) 中红圈所示, 囊括了数个网格时, 总回波能量可表述为:

$$E_{\text{all}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M E_{i,j} \quad (8)$$

其中网格的总个数为 $M \times M$, x_i, y_j 分别为该网格的横、纵坐标, 设单个网格的边长为 1, $M \times 1 = D$, D 为光斑在地面投影的直径。若光斑的空间分布为高斯分布, 则每个网格的入射激光能量为:

$$E_{0,i,j} = E_0 \int_{x_i - z \cdot \tan \theta_n / 2}^{x_i + z \cdot \tan \theta_n / 2} \int_{y_i - z \cdot \tan \theta_n / 2}^{y_i + z \cdot \tan \theta_n / 2} \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right) dx dy \quad (9)$$

其中探测器的总发散角为 θ_s 时, θ_n 为单个小格所占的视场角, 且 $\theta_s \approx n\theta_n$ 。结合式(6-9)可以得到大光斑探测中, 由单光子探测原理引起的冠高的误差大小:

$$ER_{\text{all}} = \sum_{i=1}^N P_{\text{all},s,f} (H_s - H_0) \quad (10)$$

式中 H_0 为光斑中心位置的冠顶高程。

2 实验结果

为了验证系统误差估算的准确性, 本文首先选取 ATALS 在芬兰地区的植被点云数据, 和当地的 LIDAR 数据进行对比。随后通过仿真实验, 说明植被参数、探测器参数和误差之间的关系。

2.1 准确性验证

实验采用的星载光子计数激光测高数据为 ATL03_20190813231201_07160403_002_02, 其探测轨道和探测时间如图 4(a) 所示。截取的沿轨片段总长度为 1 km, 位于东经 24. 1°, 北纬 61. 7° 附近, 原始点云如图 4(b) 所示。用于对比的机载 LIDAR 数据来自于芬兰 2014 年的全国普查, 可在 <https://tie-dostopalvelu.maanmitta-uslaitos.fi/tp/kartta?lang=en> 网站下载, 其 laz 文件已经对点云进行了分类, 机

载探测的轨道和点云分别如图 4(c-d) 所示。芬兰属于北方针叶林区, 树木生长期短, 区域内生长的树种有限只有针叶树种和几种落叶树, 所选奥利维丝市西北方地区的植被树高在 10~20 m 之间, 树木处在生长期末期。由于机载数据和星载数据有着 5 年的时间差, 因此赋予植被一定的生长量以减少植被生长带来的误差。10~20 m 高的北方针叶林的 5 年树高生长量约在 1. 5 m 左右^[17]。

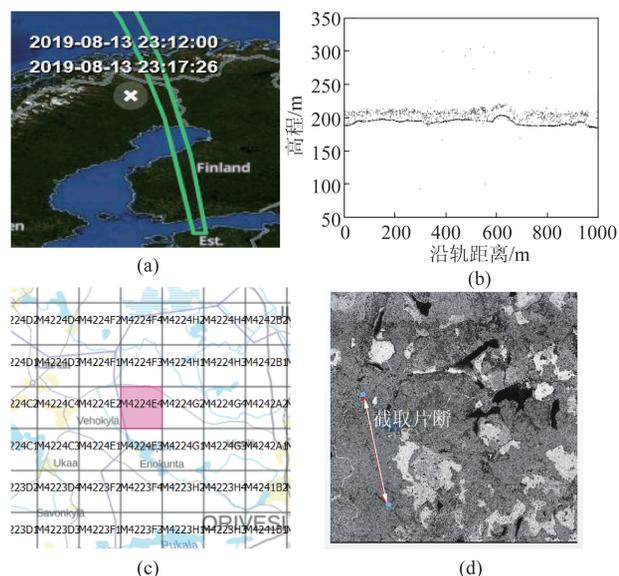


图4 芬兰境内的植被点云数据 (a) 星载探测轨道, (b) 星载探测点云, (c) 机载探测区域, (d) 机载探测点云

Fig. 4 The point cloud data in Finland of (a) spaceborne detection orbit, (b) spaceborne point cloud, (c) airborne detection zone, and (d) airborne point cloud

在对原始的 ATLAS 点云进行滤波剔除掉噪声点后, 与自机载 LIDAR 中提取的数字表面高程 DSM 和数字地面高程 DEM 进行比较, 其结果如图 5 所示。本文采用的滤波方法为方向自适应的星载光子计数激光测高植被点云滤波法^[18], 该滤波方法有着较高的准确性。

从图 5 中可以看到, 在大部分沿轨距离上, 星载光子计数激光测高点云都处在机载的 DSM 下方, 所有脉冲第一次探测到的属于树冠的离散点 (至少高于该坐标下的 DEM 5 m 以上) 的平均高度低于机载 DSM 约 2. 435 m。机载 LIDAR 点云反演植被参数的算法现已较为成熟^[19], 从机载点云中反演出的植被郁闭度约在 0. 84, 叶面积指数为 1. 22 (针叶林的叶面积指数随季节的变化较小), 叶体积密度约为 0. 11 m⁻¹, 树冠形状近似为圆锥形, 圆锥的平均高度

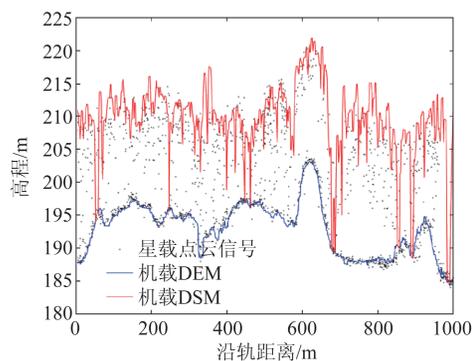


图5 星载与机载冠层高度对比

Fig. 5 Comparison of canopy height between spaceborne and airborne

约为 17.2 m, 底面半径约为 6.5 m。用森林的参数仿真植被模型, 并带入式(10)求解得到平均误差为 2.331, 与实验结果基本吻合。

2.2 误差的影响因素

2.2.1 叶体积密度和发射脉冲能量对误差的影响

从式(10)可知, 叶体积密度、发射脉冲能量、光斑大小以及树冠几何形状和误差有着密切的关系。叶体积密度和发射能量脉冲的影响较为直观, 可以通过单脉冲探测的波形进行分析。在采用图2的植被参数后, 分别改变参数中的叶体积密度和发射脉冲能量, 其单脉冲探测的误差如下图6所示。

从图6(a)中可以看出, 改变叶体积密度LVD会直接改变整个回波的形状。冠层顶端处的回波光子数 N_s 和叶体积密度成正相关, 不过增加叶体积密度会使得回波光子数随着时间序列的衰减幅度变大。叶体积密度越大, 植被冠层的反射率就越高, 同时冠层的回波能量增加, 地面的回波能量降低, 而第一次出现回波光子的平均位置 H 也就越靠前, 误差相应减少。在图6(b)中展示了测高仪发射的单脉冲能量和误差的关系, 发射脉冲能量和回波成严格的正比例关系, 因此增加发射脉冲能量虽不会改变回波波形的形状, 但是同样会增加回波光子数 N_s , 导致第一次出现回波光子的平均位置提前。因此增加发射脉冲的能量也可以有效减少单光子探测原理引起的冠层高度的固有误差。

2.2.2 光斑大小和树冠形状对误差的影响

光斑大小和树冠形状对误差的影响因光斑中心位置的不同而变化, 难以通过单脉冲的回波予以描述。为了验证光斑大小和树冠形状对误差的影响, 本文按照 ATLAS 光子计数激光测高仪的参数,

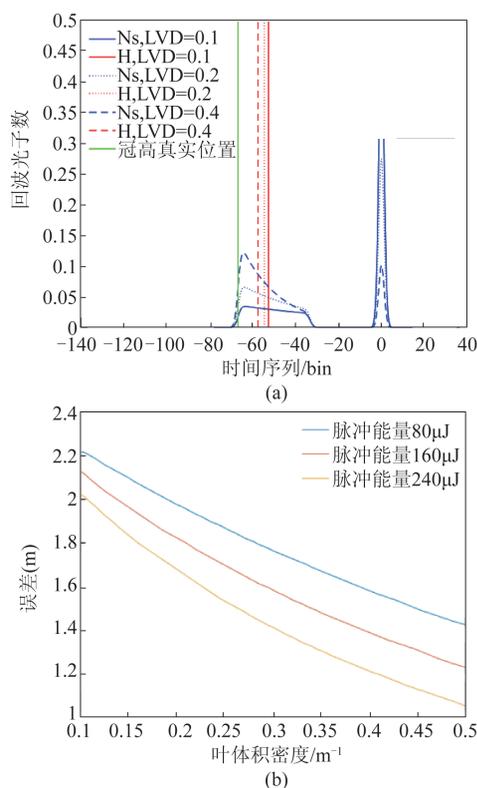


图6 误差影响因素分析 (a) 叶体积密度的影响, (b) 单脉冲能量的影响

Fig. 6 Analysis of error influencing factors including (a) leaf volume density, (b) single pulse energy

通过 DART 软件仿真出森林的光子计数激光点云图。DART 是法国的 Gastellu-Etchegorry 提出的离散各向异性辐射传输模型, 它是最为全面的三维光线追迹模型之一, 现已由 CESBIO 制作成软件, 广泛用于激光雷达^[20]的回波波形仿真和单光子激光雷达^[21]的扫描点云仿真中, 具有极高的仿真精度。

此处模拟了 1 m、2 m、5 m、10 m 等不同光斑半径脉冲对不同几何形状植被冠层探测得到的点云情况。仿真的地表植被场景中一共有四株树, 其冠层形状分别为半椭球, 椭球, 圆柱, 圆锥形, 冠高 6 m, 地面半径 5 m, 地面景观的建模如图7(a)所示, 单木的叶体积密度为 0.12 m^{-1} 。为了防止不同的冠层高度提取算法对噪声处理的效果不同导致的误差, 噪声不计入仿真中。除光斑大小外, 其他探测器参数均参照 ICE-sat2 极地探测卫星, 单次点云仿真的结果如图7(b-e)所示。

图7(b-c)中从左至右的黑框分别代表半椭球, 椭球, 圆柱, 圆锥四种几何形状的树冠在垂直于探测轨道平面上的切面轮廓。从图7中可以发现以下的点云变化规律。首先, 无论光斑大小如何变化,

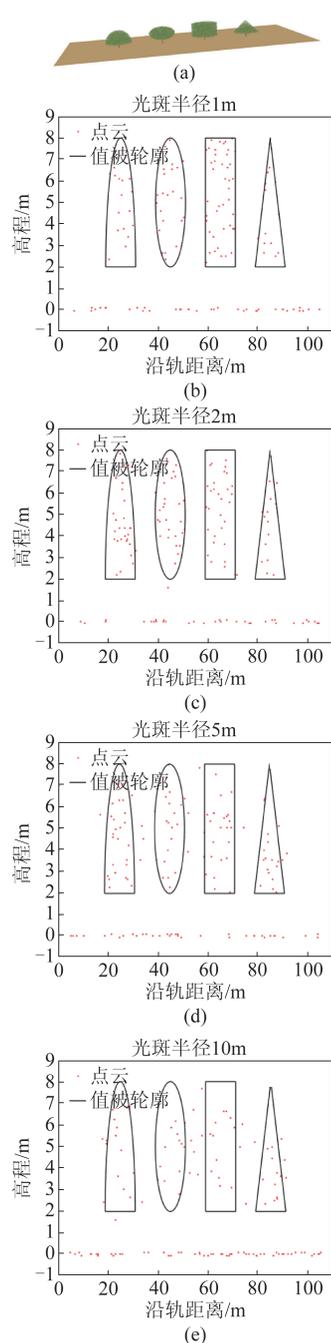


图7 仿真点云图

Fig. 7 Simulated point cloud

圆柱形树冠的点云均无法超出冠层顶端,且距离冠

层顶端有一定的距离,符合式(7)所述。其他冠层形状的点云高度有可能超过该坐标下的冠层顶端,且光斑的半径越大,超出的概率就越大。这是因为光斑半径增加后,激光能量在空间上变得分散,某次单脉冲探测得到的光子可能不是该坐标位置返回的光子,而是附近有着更高的树冠位置返回的光子。此外,随着光斑半径的增加,还会出现许多落在树冠未覆盖区域的冠层点云,这些点云同样是由于光斑在空间上的发散性引起的,可能会导致郁闭度的错误判断。DART蒙特卡洛追迹方法仿真20次后,点云内冠层高度误差的样本均值已趋于平稳。表1展示了图7中每棵树误差均值的具体大小,误差包含该地面场景通过公式(10)计算出的误差均值和DART蒙特卡洛追迹仿真点云20次结果的样本平均值。

从表1中可以看出,计算值和DART的样本平均值基本吻合,决定系数 R^2 为0.9356,有些许差距是仿真时点云的随机性导致。当光斑半径增加时,照射在植被上的光斑有更高的概率覆盖更多的裸露地表(相对来说,单个光斑内的植被郁闭度降低),冠层高度的误差随之增加。半椭球和圆柱形冠层的误差比椭球与圆锥形冠层更加严重,这是因为椭球与圆锥形冠层的边缘更薄,单光子事件要么发生在薄层中误差较小,要么入射光透过了薄层未发生单光子事件。虽然椭球与圆锥形冠层的高度误差较小,但是整体回波光子数更少,更容易出现郁闭度的误判。

3 结论

光子计数激光测高的微弱脉冲能量虽然带来了高重频高分辨率的优势,但是其单光子事件的随机性会导致难以分辨信号的起始位置。本文分析和计算了星载光子计数激光测高仪在植被探测时因光子计数激光测高原理引起的系统误差。星载单光子的数据植被冠层高度相比于机载数据略低,芬兰北方针叶林的星载光子计数测高中单激光脉

表1 误差大小/m

Table 1 Error size/m

形状	R=1 m		R=2 m		R=5 m		R=10 m	
	计算值	DART	计算值	DART	计算值	DART	计算值	DART
半椭球	-2.212	-2.293	-2.323	-2.432	-2.504	-2.491	-2.576	-2.551
椭球	-2.249	-2.265	-2.362	-2.382	-2.550	-2.446	-2.632	-2.637
圆柱	-2.443	-2.451	-2.506	-2.532	-2.662	-2.681	-2.697	-2.689
圆锥	-1.892	-1.762	-1.996	-2.037	-2.118	-2.192	-2.165	-2.201

冲首次探测到的信号光子的平均高程低于 LIDAR 数据提供的冠顶高程约 2.435 m。若想减小误差, 需要提高发射脉冲能量, 减小激光脉冲的发散角。本文冠层高度误差的分析可以定性和定量地了解森林植被的单光子探测中固有的系统误差, 有助于更精确地通过星载光子计数激光测高得到森林的生长状况。

致谢: 特别感谢法国第三图卢兹大学的 CESBIO 实验室授权使用 DART 软件。

参考文献

- [1] Richardson J J , Moskal L M , Kim S H . Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LIDAR [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**(6-7):0-1160.
- [2] Lim K , Treitz P , Baldwin K , et al. Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, **29**(5):658-678.
- [3] Morsdorf F , K.Tz B , Meier E , et al. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**(1):50-61.
- [4] McLennan D. Ice, clouds and land elevation (ICESat-2) mission [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2010, **7826**:10-18.
- [5] Markus T, Neumann T, Martino. 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.
- [6] Martino A. ATLAS performance spreadsheet (2017). https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/legacy-data/sigma/sigma_data.php.
- [7] Neuenschwander A , Pitts K . The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **221**:247-259.
- [8] Neuenschwander A L , Magruder L A . Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(14):1721-1734.
- [9] Amy N , Lori M . The potential impact of verticalsSampling uncertainty on ICESat-2/ATLAS terrain and canopy height retrievals for multiple ecosystems [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(12):1039-1055.
- [10] Gardner C S. Ranging performance of satellite laser altimeters [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1992, **30**(5):1061-1072.
- [11] Sun G , Ranson K J . Modeling lidar returns from forest canopies [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(6):2617-2626.
- [12] Johnson S, Gatt P. Analysis of Geiger-mode APD laser radars [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2003, **5086**:359-369.
- [13] Degnan J. Impact of receiver deadtime on photon-counting SLR and altimetry during daylight operations [C]. 16th International Workshop on Laser Ranging, 2008, 339-346.
- [14] Moussavi M S, Abdalati W, Scambos T, et al. Applicability of an automatic surface detection approach to micro-pulse photon-counting lidar altimetry data: implications for canopy height retrieval from future ICESat-2 data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, **35**(13):5263-5279.
- [15] Nie S, Wang C, Xi X, et al. Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(10):A520.
- [16] Kwok R, Markus T, Morison J, et al. Profiling sea ice with a multiple altimeter beam experimental lidar (MABEL) [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2014, **31**(5):1151-1168.
- [17] Jalkanen S R . Intra-annual height increment of Pinus sylvestris at high latitudes in Finland [J]. *Tree Physiology*, 2007, **27**(9):1347-1353.
- [18] WANG Yue, LI Song, TIAN Xin, et al. An adaptive directional model for estimating vegetation canopy height using space-borne photon counting laser altimetry data [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王玥, 李松, 田昕, 等. 方向自适应的星载光子计数激光测高植被冠层高度估算. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(03):363-371.
- [19] Korhonen L , Korpela I , Heiskanen J , et al. Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(4):1065-1080.
- [20] Gastellu-Etchegorry J P , Yin T , Lauret N , et al. Simulation of satellite, airborne and terrestrial LiDAR with DART (I): Waveform simulation with quasi-Monte Carlo ray tracing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **184**:418-435.
- [21] Yin T , Lauret N , Gastellu-Etchegorry J P . Simulation of satellite, airborne and terrestrial LiDAR with DART (II): ALS and TLS multi-pulse acquisitions, photon counting, and solar noise [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016:454-468.