

文章编号: 1007-4619(2006)01-0097-07

林木空间格局对大光斑激光雷达波形的影响模拟

庞 勇^{1, 2, 3}, 孙国清¹, 李增元³

(1. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091)

摘 要: 激光雷达是近年来国际上发展十分迅速的主动遥感技术, 在森林参数的定量测量和反演上取得了成功应用。激光雷达具有与被动光学遥感不同的成像机理, 对植被空间结构和地形的探测能力很强。大光斑激光雷达系统一般指光斑直径在 8-70m、连续记录激光回波波形的激光雷达系统。由于大光斑连续回波的激光雷达的光斑尺寸通常大于林木冠幅, 波形中往往包含了森林冠层和许多森林元素的信息而不仅仅是单株树的信息。对于搭载在 ICESAT 卫星上的 GLAS 而言, 光斑直径为 70m, 因此光斑对应着一片森林, 包括很多棵树, 在 GLAS 的激光光斑内树木的空间分布会有一些变化。同时激光雷达发射的脉冲信号在激光光斑内的分布也不均匀, 而是从中心到边缘呈递减的分布。因此树木空间分布模式的变化对波形会产生一定的影响。通过对几种典型的树木空间格局进行模拟 (包括规则分布、均匀 (随机) 分布和集群分布), 假定激光光斑内能量呈高斯分布, 模拟了各种树木分布模式林分的激光雷达信号。从模拟结果可见, 森林的空间分布模式对大光斑激光雷达波形有明显的影响, 对于波形面积 (AWAV) 和波形半能量高度 (HOME), 规则分布 > 随机分布 > 团状分布。其中对于 HOME 而言, 规则分布和随机分布十分接近, 而对于 AWAV 而言, 聚集中心的变动不太敏感。

关键词: 林木空间格局; 大光斑激光雷达; 波形

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

Large Footprint Lidar Waveform Modelling of Forest Spatial Patterns

PANG Yong^{1, 2, 3}, SUN Guoqing¹, LI Zengyuan³

(1. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences Beijing 100039, China;

3. Institute of Forest Resource Information Technique The Chinese Academy of Forestry Beijing 100091, China)

Abstract Large footprint lidar has demonstrated its great potential for accurate estimation of many forest parameters e.g. forest height, forest biomass and vertical structure of forest canopy. In addition to the canopy vegetation, many factors such as atmosphere, underlying surface, the shape of crown, et al., influence the lidar waveform. The illuminating intensity of the laser beam across the lidar footprint is a Gaussian distribution and reduces from 1.0 to e^{-2} from the center to the edge of the footprint. So the forest stand spatial pattern plays an important role in the lidar waveform. The contribution of each tree to the lidar waveform varies with its location in a forest stand.

This paper simulated the random, uniform and clumped tree distribution patterns in a stand. Then waveforms were simulated using a three dimensional lidar waveform model. The results show that the tree distribution patterns affect the lidar waveform profiles. The area (or energy) under the waveform from vegetation (AWAV) and

收稿日期: 2004-08-30; 修订日期: 2004-12-16

基金项目: 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, 安徽省阜阳市人, 2000 年获中国林业科学院资源信息所森林经理专业硕士学位, 现在资源信息所遥感室工作, 中国科学院遥感应用研究所在读博士。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。
E-mail: pangy@caf.ac.cn.

the height of median energy (HOME) were used to estimate the effects. Following trends have been revealed from the simulation: for AWAV and HOME, $\text{uniform} > \text{random} > \text{cluster}$. The difference between uniform and random is not obvious. For the clumped case, the number of clusters does not have much effect on the lidar waveform.

Key words: large footprint lidar; waveform; tree pattern

1 引 言

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,以激光波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]。近二十年来,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,成功反演了森林高度、冠层垂直结构、郁闭度、胸高断面面积和蓄积量(生物量)及单木参数的反演^[2-7]。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,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。

大光斑激光雷达系统的光斑直径一般为 8-70m,通常都大于林木冠幅,所记录的连续激光回波波形中往往包含了森林冠层和许多森林元素的信息而不仅仅是单株树的信息。对于目前在轨运行的 ICESAT 卫星上的 GLAS 传感器而言,光斑直径为 70m^[8],激光点对应着一片森林,包括很多棵树,因此在 GLAS 的激光光斑内树木的空间分布会有一定变化。同时激光雷达发射的脉冲信号在激光光斑内的分布也不均匀,而是从中心到边缘呈递减的分布。因此激光光斑内的每株树对回波波形的贡献与其在光斑内的位置有关,树木空间分布模式的变化对波形会产生一定的影响。

激光雷达的森林回波模型可以帮助我们深入理解激光与森林各组分相互作用的机制,揭示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^[1,9,10]。本文通过对不同树木空间格局的模拟,包括规则分布、均匀(随机)分布和集群分布,使用三维的激光雷达森林回波模型^[1]对这些不同空间格局森林的激光雷达回波进行模拟,利用常用的森林参数反演波形参量(波形面积和波形半能量高度)分析了不同林木空间格局

对森林激光雷达回波的影响。

2 激光雷达波形模拟模型

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^[11](图 1(c))。激光回波信号是由发射脉冲和激光光斑内的森林、地表参数共同决定的。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。

理想状态下,激光脉冲是一个极短持续时间的方波以确保精度和高的垂直分辨率。事实上激光脉冲的形状为曲线并有着一定的持续时间(图 1(a))。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。

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决定^[12]。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。当这些离散的单元足够小时,可以认为单元内是均一的。这些单元可能是为下列情形之一: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。

将树冠从上到下分成厚度为 Δz 的 m 层 (C_j , $j=1, m$), 将激光脉冲分成持续时间为 $\Delta t=2\Delta z/c$ 的 n 束很窄的脉冲 (L_i , $i=1, n$)。如果当激光脉冲 L_i 到达树冠层 C_1 时激光雷达就开始记录,则脉冲 L_i 到达冠层 C_j 并且返回到激光雷达的时间为:

$$t(i, j) = 2(i + j)\Delta z/c \quad (1)$$

回波信号为:

$$L(i, j) = L_i \sigma_j \Delta s \Delta z e^{-\alpha \sum_{k=1}^{j-1} \nu_k \Delta z} = L_i \Omega_j E_{j-1} \quad (2)$$

其中, $\Omega_j = \sigma_j \Delta s \Delta z$ 是从第 j 层树冠的后向散射, E_{j-1}

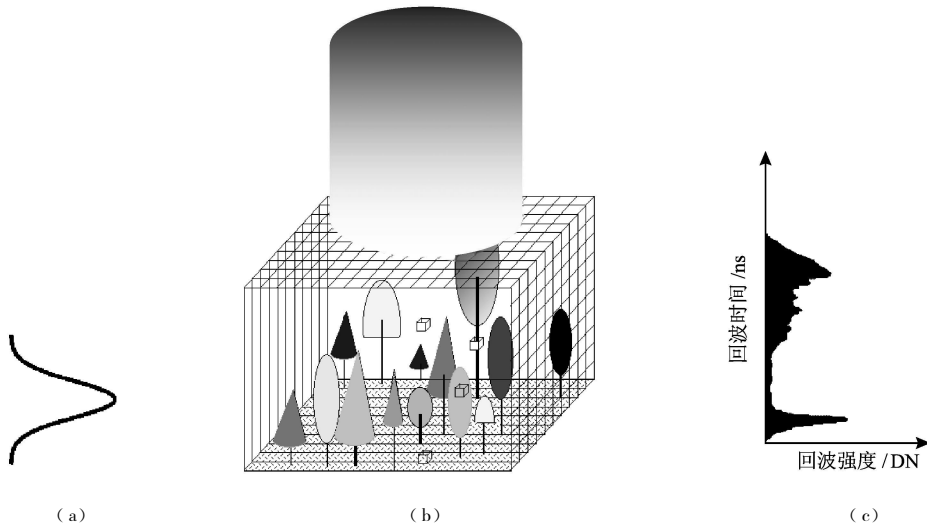


图 1 大光斑激光雷达森林回波示意图

(a)发射激光脉冲; (b)激光光斑内的三维林分模型(模型中的每一个立方体表示着相应的冠层参数); (c)激光回波波形

Fig 1 Schematic of lidar pulse and waveform from a 3-D forest stand

(a) incidence lidar pulse; (b) 3-D forest stand model within a large footprint (c) lidar waveform of the forest stand

是此层以上的衰减, L_i 是分解后的第 i 束很窄的脉冲。

激光雷达波形记录成 $(m + n - 1)$ 帧, 时间间隔为 $[0, 2\Delta z/c], [2\Delta z/c, 4\Delta z/c], \dots, [2(m + n - 2)\Delta z/c, 2(m + n - 1)\Delta z/c]$ 。第一个时间间隔为激光脉冲第一个窄脉冲从树冠层顶部的反射, 每一个很窄的子激光束将产生一系列回波, 将这些各子激光束产生的回波根据时间相加即可得到树冠的波形^[1]。

3 林分空间格局模型

空间格局是植物或其他生物体以及其他生物体的斑块在空间中表现出的具有一定可预见性的排列^[13], 反映了林木个体在水平空间的分布状况。林木空间分布格局是种群生物学特性、种内与种间关系以及环境条件的综合作用的结果, 是种群空间属性的重要方面, 也是种群的基本数量特征之一。格局不仅可以对种群和群落的水平结构进行定量描述, 给出它们之间的空间关系, 同时能够说明种群和群落的动态变化。林分空间格局能够决定树木之间的竞争势及其空间生态位, 并在很大程度上决定林分的稳定性、发展的可能性和经营空间大小^[14]。

由于自然环境的多样性, 以及种内种间个体之间的竞争, 每一种群在一定空间中会呈现出特有的分布形式。一般来说, 林木空间格局与一般种群分布的相似, 可分为 3 种基本的分布类型: 随机分布、

规则(均匀)分布和聚集分布^[13, 15]。这 3 种分布模式分别对应着不同的森林经营结果。均匀分布的现象是极少见的, 只有在农田或人工林中出现这种分布格局。聚集分布的形式较为普遍, 如森林中各个树种或林下植物多呈小簇丛或团片状分布。绝对的随机分布并不存在, 但可以发现有的分布模式与随机分布无显著性差异。影响个体水平分布形式的因素是很多的, 主要决定于物种的生态生物学特性和环境条件的状况。

3.1 随机分布

随机分布(random distribution)是指种群个体的分布相互间没有联系, 每个个体的出现都有同等的机会, 与其他个体是否存在无关, 林木的位置以连续而均匀的概率分布在林地上。对于任意两个不重叠的样地, 其上的林木数量是一个随机变量且相互独立。也就是说, 林木与其本身所处的位置互不发生影响。

在一个任意样地上, 林木的数量为随机分布时则遵从泊松分布:

$$P(r) = \frac{\lambda^r e^{-\lambda}}{r!}, \quad r = 0, 1, \dots, n \quad (3)$$

其中 $P(r)$ 表示在某取样单元中 r 个个体出现的频率 ($r=0, 1, \dots, n$), λ 为每个取样单元的平均个体数。

3.2 规则分布

规则分布(regular distribution), 又称为均匀分

布 (uniform distribution), 是指林木在水平空间中的分布是均匀等距的, 均匀地分布在规则的空间格点上, 林木之间互相排斥。

均匀分布格局的数学模型是正二项分布, 即 $(P+Q)^n$ 的展开, 其通式为:

$$P(K) = \frac{n!}{K!(n-K)!} P^K (1-P)^{n-K} \quad (4)$$

式中, $K = \frac{m^2}{S^2 - m}$, n 为每个取样单元可能出现的最大个体数, K 为集聚程度的度量指标, S^2 是所有取样单位中个体数的方差, m 是均值, k 越小种群的聚集强度越大。

3.3 聚集分布

聚集分布 (aggregated distribution), 又称为团状分布 (clumped distribution)、集群分布 (contagious distribution), 是指一个个体的存在, 会增加其他个体出现的概率, 林木之间互相吸引。与随机分布相比, 林木有相对较高的超平均密度占据的范围。

集群分布的数学模型是负二项分布:

$$P(x) = \left(1 + \frac{r}{k}\right)^{-k} \frac{(k+x-1)!}{x!(k-1)!} \left(\frac{r}{r+k}\right)^k \quad (5)$$

4 模拟结果与分析

4.1 模型整合

为了研究林木空间格局对大光斑 lidar 波形的影响, 需要对激光雷达模型和林木空间格局模型进行整合。首先利用第 3 部分所描述的方法将一定数量的树按照不同的空间分布格局分别模拟出空间坐标, 然后根据激光雷达的参数离散成均一的小立方体, 利用第 2 部分所描述的 lidar 森林回波模型模拟回波波形。

本文以目前在轨运行的 ICESAT GLAS 传感器的系统参数为例, 以实测的 1hm^2 内的每一株树的参数为树木参数, 选取其中 70m 直径的圆内的树为激光光斑内的树, 模拟产生这些树的坐标, 然后用实测参数作为模拟树木的参数。因此, 每一种格局的森林所包括的树木株数和参数都相同, 所模拟的激光雷达波形差异仅由于树木空间分布格局的变化引起。

4.2 不同林木空间格局森林的模拟

林木的空间格局与观察的尺度密切相关。在大的尺度上, 往往是不同格局的镶嵌。本文选用星载 lidar 光斑为尺度, 并且假定光斑内的格局是一致的。

从一定意义讲, 林分结构就是在一个确定范围内林木空间分布的点格局^[16]。以林木个体在空间的坐标为基本数据, 每个个体都可看成二维空间的一个点, 本研究即通过模拟空间上点的分布来实现对树木空间分布格局的模拟。

如图 2, 利用“3.1-3.3”中介绍的方法模拟产生了 4 种不同空间格局的林分, 70m 的 lidar 光斑内有 804 株树, 每株树的空间坐标 (x, y) 按照规则分布 (图 2(a))、随机分布 (图 2(b))、有 30 个中心的聚集分布 (图 2(c)) 和有 70 个中心的聚集分布 (图 2(d))。考虑到单株树木之间的竞争机制, 最小树间距假定为 1m 。图 2 中圆圈的大小表示胸径的相对大小, 但与坐标轴不成比例。树冠的形状假定为椭圆形。

4.3 大光斑 lidar 波形的模拟

模拟所用的入射脉冲为高斯脉冲, 持续时间是 4ns 相当于 60cm 的高度。光斑边缘激光能量减弱到中心的 e^{-2} (图 3)。波形数据记录间隔是 1ns (即 15cm), 所用波长为 $1064\mu\text{m}$ ^[8], 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 ^[1]。

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; 林下地表也是均一的, 地形平坦且反射率相同。模拟的森林回波波形如图 4, 其中下面的回波来自树冠, 上面的回波来自地面。

4.4 模拟波形的比较

在实际应用中, 主要从 lidar 的有效波形长度计算树木的高度、通过分析波形面积 (AWAV) 和波形半能量高度 (HOME) 等参数反演冠层垂直结构、郁闭度、胸高断面面积和蓄积量 (生物量), 从而进行林业应用。本研究采用反演的 AWAV 和 HOME 进行模拟波形的比较, 以分析林木空间格局对波形的影响 (表 1), 其中百分比是相对于规则分布计算得到的。

从模拟结果可见, 森林的空间分布格局对大光斑激光雷达波形有明显的影 响, 对于波形面积 AWAV 和波形半能量高度 HOME 均表现为: 规则分布 > 随机分布 > 聚集分布。其中规则分布与随机分布较为接近, 不同聚集中心数对聚集分布林分的波形影响不大; 规则分布和随机分布的 HOME 十分接近, 而 AWAV 对聚集中心的变动不太敏感。因此, 对于规则分布和随机分布采用 HOME 作为森林参数反演的指标较好, 而对于随机分布采用 AWAV 作为森林参数反演的指标较好。

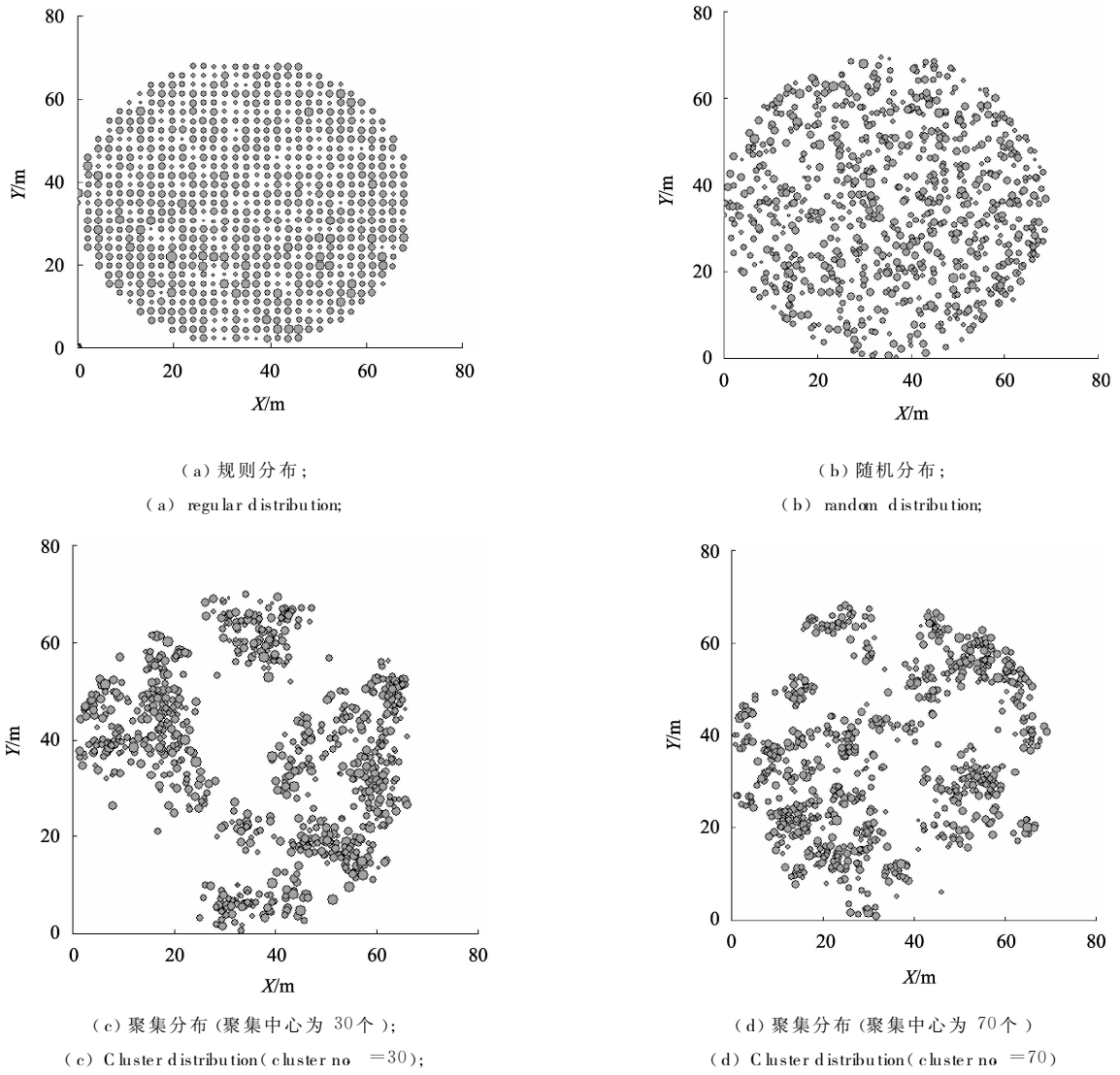


图 2 典型的树木分布模式模拟

Fig 2 Simulated four forest stands with different spatial patterns

表 1 模拟的波形参数表

Table 1 Parameters of simulated waveforms

	AWAV	AWAV /%	HOME /m	HOME /%
规则分布	41804.41	100.0	14.55	100.0
随机分布	39479.77	94.4	14.40	99.0
聚集分布 (30个聚集中心)	36689.93	87.8	11.70	80.4
聚集分布 (70个聚集中心)	36635.25	87.6	11.40	78.3

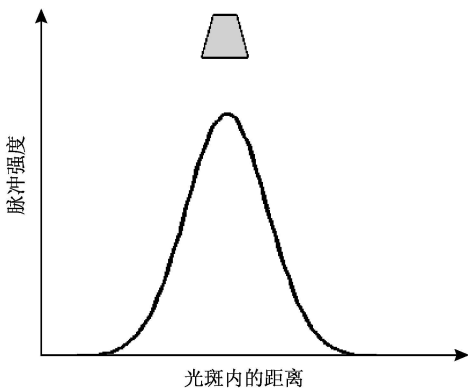
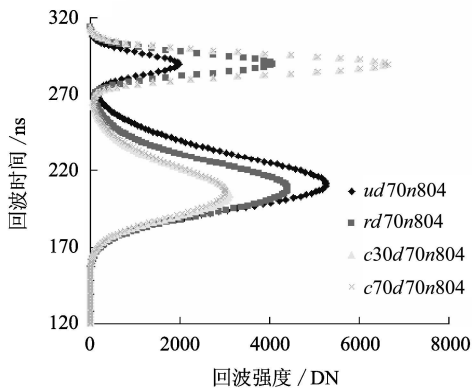


图 3 激光光斑内的能量分布

Fig 3 The illuminating intensity of the laser beam across the lidar footprint

5 结 论

采用理论模拟的技术手段研究分析了林木空间



u: 规则分布; r: 随机分布; c30: 30个聚集中心的聚集分布;
c70: 70个聚集中心的聚集分布; d70: 激光光斑直径; n804: 804株树

图 4 不同树木空间格局林分的激光雷达回波模拟

Fig 4 The simulated waveform of different tree patterns

分布格局对大光斑激光雷达波形的影响,模拟了相同树木参数和地表条件的4种空间分布格局林分的lidar波形,模拟结果表明:

(1)森林的空间分布格局对大光斑激光雷达波形有明显的影响;

(2)对于波形面积 AWAV 和波形半能量高度 HOME, 规则分布 > 随机分布 > 团状分布。其中规则分布与随机分布较为接近,不同聚集中心数的聚集分布对波形影响不大;

(3)对于 HOME 而言,规则分布和随机分布十分接近,而对于 AWAV 而言,聚集中心的变动不太敏感。因此,对于规则分布和随机分布采用 HOME 作为森林参数反演的指标较好,而对于聚集分布采用 AWAV 作为森林参数反演的指标较好。

需要指出的是,林木空间格局只有在所考察的样地包含一定数目的树才有意义。随着激光光斑尺寸的减小,林木空间分布格局对大光斑激光雷达波形的影响也将降低。

单纯地依靠地面测量来获取大范围的林木空间分布格局工作量很大,且不太现实。因此本文所揭示的现象是大光斑激光雷达波形反演森林参数的误差源之一,为了降低林木空间分布格局对参数反演的影响,可以选择影响较小的波形参数。最近有研究表明,利用多角度的光学遥感数据可以反演林木的空间结构,Chen JM 等用 POLDER 数据反演了树木聚集指数^[17], Gobron 等用 MISR 反演了植被空间结构^[18]。如果利用其他多角度遥感数据反演的树木分布格局类型,分别进行参数反演,可以进一步提

高激光雷达森林参数反演的精度,充分发挥这一技术的潜力。

致谢 本文作者感谢中国林业科学院胡艳波助理研究员、雷相东博士和中国科学院地理科学与资源研究所于信芳博士在森林空间结构和模拟上进行的有意义的讨论。

参考文献 (References)

- [1] Sun G, Ranson K J. Modeling Lidar Returns from Forest Canopies [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(6): 2617-2626.
- [2] Mats Nilsson. Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using an Airborne Lidar Systems [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56(1): 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(3): 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(1-3): 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(1): 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(2-3): 305-319.
- [7] Lin K, Paul Treitz, Ian Morrison, et al. Estimating Aboveground Biomass Using Lidar Remote Sensing [A]. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology IV Conference [C]. Agia Pelagia, Crete, Greece, 2002.
- [8] Brenner A C, Zwally H Jay, Charles R Bentley, 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]. 2000.
- [9] NiMeister W, Jupp D L B, Dubayah R. Modeling Lidar Waveforms in Heterogeneous and Discrete Canopies [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(9): 1943-1958.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V., et al. Modeling Radiative Transfer in Heterogeneous 3-D Vegetation Canopies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**(2): 131-156.
- [13] Mark R. T. Dale. *Spatial Pattern Analysis in Plant Ecology*[M]. Cambridge University Press, 1998.
- [14] Hui G. Y., Gadow K. V. *Quantitative Analysis of Forest Spatial Structure*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003. [惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. 森林空间结构量化分析方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.]
- [15] Li H. T. Introduction to Studies of the Pattern of Plant Population [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1995, **12**(2): 19-26. [李海涛. 植物种群分布格局研究概况 [J]. 植物学通报, 1995, **12**(2): 19-26.]
- [16] Wells M. L., Getis A. The Spatial Characteristics of Stand Structure in Pinus Torreyana [J]. *Plant Ecology*, 1999, **143**: 153-170.
- [17] Chen J. M., Liu J., Leblanc Sylvain G., et al. Multi-angular Optical Remote Sensing for Assessing Vegetation Structure and Carbon Absorption [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **84**(4): 516-525.
- [18] Nadine Gobron, Bernard Pinty, Michel M. Verstraete. Uniqueness of Multiangular Measurements Part II: Joint Retrieval of Vegetation Structure and Photosynthetic Activity from MISR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(7): 1574-1592.