

文章编号:1001-1498(2014)06-0815-07

多基线干涉层析 SAR 提取森林树高方法研究*

李文梅^{1,2}, 陈尔学^{1**}, 李增元¹

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 南京邮电大学地理与生物信息学院, 江苏 南京 210046)

摘要:应用瑞典 Raminstorp 研究区 BioSAR 2007 P-波段多基线 InSAR 数据,研究了基于多基线干涉 SAR 数据的层析方法,成功提取了可代表森林垂直结构信息的雷达后向散射功率垂直分布信息,并基于该信息提取了树高。应用地面实测样地对树高提取精度进行了检验,结果表明:HH 极化树高提取精度最高(R^2 为 0.65, $RMSE$ 为 2.35 m, 相关系数为 0.80),HV 其次,VV 最差。

关键词:多基线干涉层析 SAR, 森林垂直结构, 树高, Capon 频谱分析

中图分类号:S771.8

文献标识码:A

Approach for Forest Height Extraction Using Multi-baseline Interferometric Tomographic SAR

LI Wen-mei^{1,2}, CHEN Er-xue¹, LI Zeng-yuan¹

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. School of Geography and Biological Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

Abstract: Applying P-band multibaseline InSAR data from BioSAR 2007 campaign in Raminstorp test site in Sweden by Multi-baseline Interferometric Tomographic SAR (MBInTomo SAR) technique to extract forest vertical structure information and estimate forest height from them, and validating the forest height with in situ data. The results showed that the values of R^2 were 0.65, 0.55, 0.34, the values of $RMSE$ were 2.35 m, 3.27 m, 5.13 m and the values of correlation coefficient (R) were 0.80, 0.74, 0.58 among the estimated forest heights using HH, HV and VV MBInTom SAR and Lidar H80, respectively. The conclusion is that the P-band multi-baseline InSAR data can be used for forest vertical structure information extraction and forest height estimation. And traditional forest scattering model and forest height estimation approach may not be suitable for P-band.

Key words: MBInTomo SAR; forest vertical structure; forest height; Capon spectrum

目前林业遥感主要包含 3 种手段,传统光学遥感,激光雷达和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)。普通光学遥感作为研究最早、技术最成熟和数据源最丰富的技术手段,在林业应用中发挥着重要作用。它不仅可以获得森林水平分布的详细信息,同时,经过良好辐射定标的光学数据可以提

取归一化植被指数(NDVI)^[1-3]、植被冠层叶面积指数(LAI)^[4]、植被覆盖度、吸收光合有效辐射比等^[5-6]生物参数。但普通光学遥感穿透性较差,无法获取森林内部结构信息而易出现信号饱和现象,即当森林比较茂密或生物量较高时,遥感参数丧失其对生物量等参数的指示作用^[7]。作为主动遥感,

收稿日期:2013-06-20

基金项目:863 计划重点项目课题(2011AA120402),国家 973 计划项目课题(2013CB733404)

作者简介:李文梅(1984—),女,山东聊城人,博士,主要从事微波遥感提取森林垂直结构信息,林业遥感等方面的研究。Email:liwm@njupt.edu.cn

* 感谢 ESA/DLR 为“中欧合作龙计划 Pol-InSAR 项目”提供 Raminstorp 研究区 Pol-InSAR 数据及地面实测树高和 AGB 数据。

** 通讯作者:研究员,主要从事合成孔径雷达技术与应用研究。E-mail:chenrx@caf.ac.cn

Lidar 可以发射高密度、高强度的激光脉冲透过树叶、树枝的缝隙对植被层内部及植被覆盖下目标进行观测,除了获取传统生物参数外,Lidar 还可以获取植被垂直结构信息,但 Lidar 脉冲穿透性较弱,在特别茂密的森林难以获取森林垂直结构信息,同时,高昂的数据获取成本限制了其应用。SAR 作为另外一种主动遥感手段,对森林冠层具有一定的穿透能力,能够获得部分森林垂直结构信息。国内外研究者应用有/无约束相干优化、ESPRIT 相位中心分离、相干散射模型等在树高估测方面已经取得了较好的研究结果^[8-15]。

森林垂直剖面能够反映森林的三维结构,除了传统的水平信息之外,还有高度信息,能够更好地反映森林垂直结构与生态参数变化,进而可以反映不同垂直结构在碳循环和水气循环中的作用。这里所说的剖面 and 剖面方程都是指森林的雷达相对反射率垂直分布,属于森林垂直结构函数的可视化表示。森林垂直结构函数是一个以植被垂直高度为自变量、对应高度复散射功率为因变量的多参数函数,包含了森林垂直结构信息和地表近地表信息^[16-17]。森林垂直结构信息不仅可以反映森林的生态功能,而且可以反映森林生态状况,比如林火敏感性,生物多样性和区域气候变化等^[18]。因此,应用微波遥感技术反演森林垂直结构有利于了解森林内部垂直方向散射体分布状况,散射机制垂直变化规律,理解森林垂直结构在碳循环,水气循环及森林火灾敏感性等方面的作用,为森林资源调查提供新的手段。

后向散射功率垂直分布信息与散射体垂直分布密切相关,但对于森林而言垂直方向散射体比较复杂,同时电磁波与散射体之间的相互作用不仅有单次散射,可能还存在复杂的多次散射。因此,很难建立接收信号与散射体之间一一对应的关系。多基线干涉层析 SAR (Multi-baseline Interferometric tomographic SAR, MBlntomo SAR) 的出现为提取森林垂直方向结构信息提供了可能性,该技术通过重轨多次飞行增加垂直方向的合成孔径,进而实现对目标垂直方向的分辨能力,已经成为复杂场景(如城市,森林)应用的主要技术手段之一。多次重轨飞行采集的信号可能包含森林垂直方向更为详细的结构特征,这些垂直结构特征可能与枝下高、树高、蓄积量或森林地上生物量、物种多样性、鸟类栖息等相关。但目前比较容易验证的信息主要是树高和森林地上生物量,因此,为了分析利用后向散射功率垂直分布

结构信息提取树高的可行性与适用性,作者开展了应用 MBlntomo SAR 提取树高并采用地面实测数据对其精度进行验证的研究。

1 研究方法

1.1 研究区与数据

研究区位于瑞典 Remingstorp 地区 ($58^{\circ}28'40''$ N, $13^{\circ}37'25''$ E), 主要树种为挪威云杉 (*Picea abies* (L.) H. Karst.), 欧洲赤松 (*Pinus sylvestris* (L.)) 和桦树 (*Betula* spp.), 地形相对比较平坦,海拔从 120 m 到 145 m 之间,树高从 10 m 到 30 m。

1.1.1 SAR 数据 研究区主要的遥感数据为 P - 波段多基线 InSAR 数据。该数据是德国 DLR 与瑞典国防研究局应用机载 E-SAR 系统于 2007 年 3 月到 5 月在瑞典 Remingstorp 获取的,为欧空局 (ESA) BioSAR 计划的一部分,称为 BioSAR 2007。P-波段数据水平基线间隔大约为 10 m,水平总基线大约为 70 m,空间分辨率斜距约为 3 m,方位向为 1 m,入射角由近距的 25° 到远距的 55° 变化,进而可以根据垂直分辨率与入射角和空间基线之间的关系估测垂直方向几何分辨率近距到远距从 10 m 到 50 m 变化。

BioSAR 2007 获取数据集的主要目的是基于层析 SAR 分析每一个极化通道从地表到冠层散射机制的变化及垂直结构参数提取的可行性。由于时间去相干影响,P - 波段可用于层析 SAR 提取森林垂直结构信息实验的有 10 个航线。其中,2007 年 4 月 2 日和 5 月 2 日分别获取了 5 条航线的数据,主影像于 5 月 2 日获取,那么数据集的最长时间基线约为 31 天,而最短时间基线为 25 min。图 1 为 P - 波段数据集空间基线分布。粗线代表主影像航线,向下依次为各个辅影像航线与主影像航线之间的空间距离 (空间基线), 最短空间基线为 0.8 m,最长空间基线约为 70 m,按照法向合成孔径的概念,该数据集

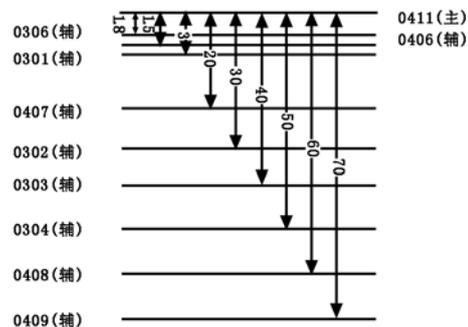


图 1 P - 波段数据集空间基线

的法向合成孔径约为 70 m。同时,可以发现航线空间分布并不均匀,因此,在实际应用中通常采用频谱分析方法来提高层析分辨率降低高程模糊。

1.1.2 地面实测数据 地面实测数据分为两部分,一部分是 2007 年春季采集的数据,包含 11 个样地内单木参数,另一部分为 2006 年秋季采集的数据,

包含 6 个样地内的单木参数,该数据于 2007 年 1 月暴风雪后已经过更新。地面实测样地及相应数据如表 1 所示。其中,样地面积有 10 个 80 m × 80 m,7 个 20 m × 50 m,测量时胸径大于 5 cm 起测并记录树种类型。

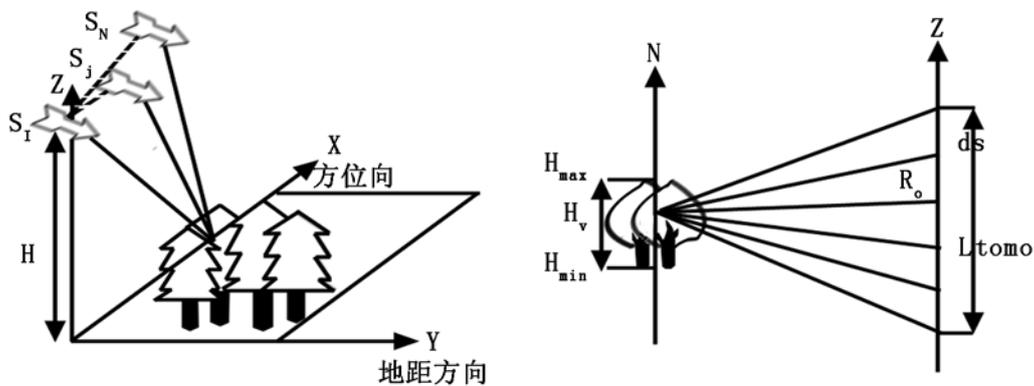
表 1 地面实测样地参数

样地编号	面积/hm ²	生物量/(t · hm ⁻²)	平均树高/m	80 分位高/m	森林密度/(株 · hm ⁻²)
1	0.64	213.034 4	22.1	28.0	433.7
2	0.09	136.312 8	16.2	21.7	878.0
3	0.08	141.516 1	18.8	22.5	501.1
5	0.65	179.868 8	16.5	23.7	852.8
6	0.10	66.666 06	10.4	17.3	1 450.0
7	0.11	182.070 1	25.3		258.8
8	0.09	244.759 5	25.0	24.6	499.8
9	0.65	217.736 3	26.3	19.0	534.1
10	0.65	150.724 8	20.8	18.6	617.8
11	0.10	198.281 4	25.5	23.4	402.8
12	0.65	309.680 1	27.9	3.5	549.3
13	0.09	158.674 8	13.6	23.3	1 185.5
14	0.66	99.759 72	13.9	14.6	521.9
15	0.64		15.4		658.4
16	0.65	314.977 8	26.8	12.4	633.8
17	0.65	164.292 5	21.7	20.4	581.4
18	0.65	223.940 2	25.9	23.3	488.2

1.2 MBInTomo SAR

层析 SAR 是传统 2-D SAR 成像到 3-D 的扩展。对于机载 SAR 系统而言有圆迹飞行模式^[19]和多基线重复飞行模式^[20]。机载重轨 SAR 层析是 Reigber 等^[21]于 2000 年应用多基线 L-波段数据首次提出的。MBInTomo SAR 采用多基线成像几何技术,其优势是所有飞行路线为直线。这样,层析处理的大部分内容可以简化为传统 2-D 处理,使得航线设计

和数据处理的相关技术可以重新应用于层析 SAR。图 2(a)为 MBInTomo SAR 数据获取的几何结构。主方向的合成孔径是为了实现高度方向的聚焦和产生 3-D SAR 影像,所谓主方向是指垂直于斜距方向和方位向的方向,通常也叫做法向(cross-range direction)。假设基线均匀分布并忽略与入射角关联的投影,简化后的层析成像几何结构如图 2(b)所示,图中法向与垂直方向一致。



(a) 层析 SAR 空间几何结构 (b) 层析 SAR 简化几何结构

图 2 MBInTomo SAR 数据获取几何结构

假设散射体位于高度 n_0 处,传感器位置与散射体之间的距离为 R ,接收的信号可以表示为:

$$s(z, n_0) = a(x_0, r_0, n_0) * \exp\{-j2kR(z, n_0)\}$$

式中,

$$R(z, n_0) = \sqrt{r_0^2 + (z - n_0)^2} \approx r_0 + \frac{(z - n_0)^2}{2r_0} \quad (1)$$

式中, r_0 为传感器与散射体之间的最小距离, $a(x_0, r_0, n_0)$ 为位置 (x_0, r_0, n_0) 处散射体的复反射率, $*$ 表示散射回波与层析 SAR 系统脉冲响应之间的卷积。经过解调后,接收信号为:

$$s(z, n_0) = a(x_0, r_0, n_0) * \exp\left\{-jk \frac{(z - n_0)^2}{r_0}\right\} \quad (2)$$

垂直有效波数 k_z 为 z 方向的函数,如式(3)所示。当 $n_0 > 0$ 时, k_z 为正频,当 $n_0 < 0$ 时, k_z 为负频。为了使所有的 k_z 均为正,需要将接收信号乘以去斜函数,进而得到去斜后的信号,如式(4)所示。

$$k_z(z, n_0) = \frac{\partial \arg(s_r)}{\partial z} = \frac{2k}{r_0}(n_0 - z) \quad (3)$$

$$s_{dr}(z, n_0) = a(x_0, r_0, n_0) * \exp\left\{-jk \frac{(n_0^2 - 2zn_0)}{r_0}\right\} \quad (4)$$

此时,垂直波数 k_z 为

$$k_z(n_0) = \frac{\partial \arg(s_{dr})}{\partial z} = \frac{2kn_0}{r_0} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,垂直波数与位置 z 无关,仅依赖于高度为 H_v 的体散射内部散射高度 n_0 。然后,对 z 方向的去斜信号 $s_{dr}(z, n_0)$ 应用 FFT,散射体的聚焦影像可以表示为:

$$S_{dm}(k_z, n_0) = a(x_0, r_0, n_0) L_{lomo} \exp\left\{-jk \frac{n_0^2}{r_0}\right\} \text{sinc}\left(kL_{lomo} \frac{(n_0 - n)}{n}\right) \quad (6)$$

层析分辨率取决于 sinc 函数的宽度,即

$$\delta_z = \frac{\lambda r_0}{2L_{lomo}} \quad (7)$$

式中, r_0 为位于层析集中心主影像的斜距距离。 L_{lomo} 为层析辐射距离等于多基线 InSAR 构架中最大基线长度。因此,层析孔径越大,所得几何层析分辨率越高,反之,要想得到较高的层析分辨率必须在满足乃昆斯特采样定理的条件下增加航线数量。这一事实限制了几何层析分辨率的提高,因为大量采集数据需要高昂的实验代价。而且在实际飞行实验中,很难实现重轨数据采集轨道均匀分布,通常轨道分布不均匀是高程模糊的主要原因。因此,为了克

服这些限制,频谱分析技术经常被用于层析 SAR 中,以实现数据采集量适中,基线非均匀分布时能够获得较高的层析分辨率。

1.3 森林垂直结构参数提取方法

应用 MBInTomo SAR 提取森林垂直结构信息方法如图 3 所示。首先,构建干涉协方差矩阵,对于单极化多基线 InSAR 而言,有一个主影像,其他均为辅影像,将所有主辅影像进行精配准、干涉相干计算、去平地相位、滤波等处理后构建干涉协方差矩阵;其次,计算导向矢量与导向矩阵,根据成像几何关系计算垂直波数文件,并根据波数文件排序建立导向矢量与导向矩阵,构建导向矢量与导向矩阵是为频谱分析技术的应用服务;再次,应用 Capon 频谱分析技术对干涉协方差矩阵进行频谱估计,提取后向散射功率垂直分布信息,这里的后向散射功率垂直分布信息针对的是每一个像素;最后,根据后向散射功率垂直分布信息结构特征,根据信号门限阈值提取森林垂直结构信息,如树高。

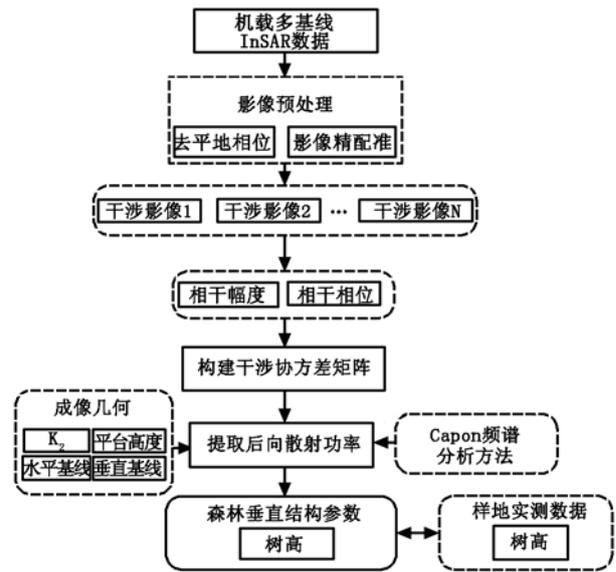


图 3 MBInTomo SAR 提取森林垂直结构参数流程图

2 研究结果

2.1 后向散射功率垂直分布

MBInTomo SAR 结合频谱分析方法能够得到森林后向散射功率垂直分布信息,如图 4 所示。从图中可以发现,后向散射功率在垂直方向上具有一定的变化规律,具有明显的地表与冠层分界,能够反映目标垂直方向散射体分布状况,进而达到反映目标

内部垂直结构信息的目的。但目前无法对后向散射功率垂直分布信息的正确性进行验证。因此,应用后向散射功率垂直分布信息提取其他的可以直接进

行验证的参数,如树高,成为 MBIInTomo SAR 在森林应用领域重要的研究方向。

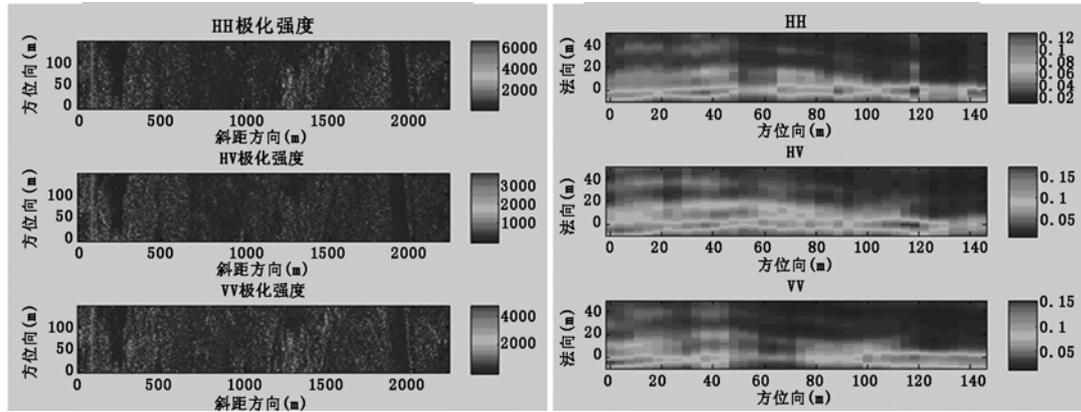


图 4 (a) P - 波段 HH/HV/VV 后向散射强度及剖面位置; (b) 对应(a)中剖面位置处的后向散射功率垂直分布

2.2 树高

应用 MBIInTomo SAR 估测树高的目的在于尽可能的规避应用物理模型的先验信息,而是在斜距方向直接根据后向散射功率的分布形状来实现树高估测。评定森林冠层高度的基本假设是后向散射功率分布的形状可以大致分为 3 个区域:相位中心区,功率损失区和噪声区。大部分后向散射功率集中于相位中心区;接着为功率损失区,在该区后向散射功率由于层析处理的点扩散函数和森林密度的逐渐降低而逐渐损失;进一步沿垂直方向向上后向散射功率绝大部分为噪声,进而该区对物理相关的散射体研究基本没有贡献。因此,通过确定功率损失区位置可以近似提取树高。图 5 为森林冠层高度提取的标准。

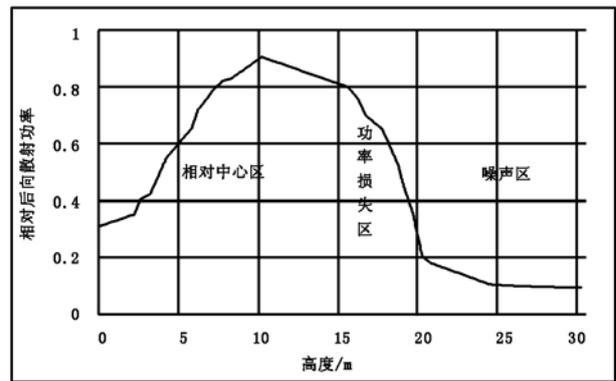
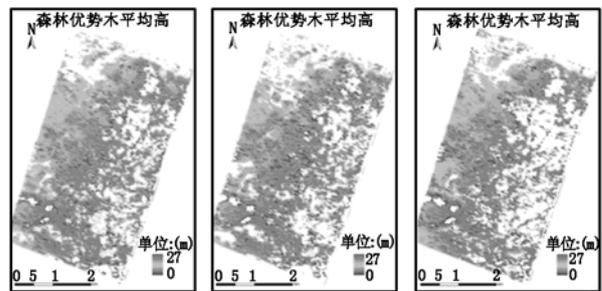


图 5 森林冠层高度提取标准(功率损失区)

在实际应用中功率损失区可以根据相对后向散射功率分布形状来确定。即采用最大相位中心位置的功率减去 3dB,4dB 等来近似确定树冠位置^[22]或采用频率谱最大最小值等来确定。本文根据信号门限阈值提取树高,即首先搜索每一个像素后向散射功率垂直方向的最大值,然后将最大值减去 3dB 得到一个临时比较值,最后搜索该像素最大值对应高度之上后向散射功率垂直方向与该临时比较值相差最小的值,该值所对应的高度即为树高。图 6 为根据此准则 P - 波段 HH/HV/VV 极化多基线 InSAR 层析估测的树高分布图,从目视角度而言,VV 极化方式估测的树高较低,HV 极化估测的树高较高。

为了更为准确的检验 3 种极化方式多基线 InSAR 层析估测的树高精度,后续将应用实测样地进行验证。



(a)HH 极化, (b)HV 极化, (c)VV 极化

图 6 3 种极化 P - 波段多基线 InSAR 层析估测森林优势木平均高

2.3 精度检验

采用 Lidar 数据的 80% 分位数 (H80) 作为树高

验证数据,对 MBInTomo SAR 估测的树高进行验证,验证样地依然是地面实测数据中的 15 块样地,并应用留一法计算其均方根误差(*RMSE*)。表 2 为 HH/HV/VV 极化 MBInTomo SAR 估测树高与 Lidar H80 树高,以其为基础来检验树高估测精度。检验结果如图 7 所示,HH 极化估测树高与 Lidar H80 的 R^2 为

0.65,*RMSE* 为 2.35 m,相关系数为 0.80。HV 极化估测树高与 Lidar H80 的 R^2 为 0.55,*RMSE* 为 3.27 m,相关系数为 0.74。VV 极化估测树高与 Lidar H80 的 R^2 为 0.34,*RMSE* 为 5.13 m,相关系数为 0.58。同时,从 15 个样地实测与估测树高散点分布图还可以发现,树高范围比较广,从 3.5 m 到 28 m。

表 2 Lidar H80 与 HH/HV/VV 极化 MBInTomo SAR 估测树高

m

样地编号	Lidar H80	HH 极化估测树高	HV 极化估测树高	VV 极化估测树高
1	28.0	18.8	19.6	15.0
2	21.7	17.2	20.0	19.8
3	22.5	18.2	17.2	17.1
5	23.7	16.4	19.1	18.1
6	17.3	18.1	18.9	18.0
8	24.6	20.4	18.4	19.1
9	19.0	17.7	17.5	17.1
10	18.6	16.0	16.4	17.7
11	23.4	14.0	14.0	13.1
12	3.5	6.6	6.1	3.0
13	23.3	17.4	17.8	17.2
14	14.6	14.0	17.9	17.2
16	12.4	12.7	16.0	18.0
17	20.4	12.7	14.9	12.2
18	23.3	16.0	18.3	17.2

HH 极化 MBInTomo SAR 提取的树高与 Lidar H80 的相关性最好,*RMSE* 最小,而 VV 极化相应的与 Lidar H80 的相关性最差,*RMSE* 最大,HV 则居于二者之间。该结果可能与 P-波段本身的散射机制相关,即 V 极化方式受树干等的衰减作用较强,而来自于树干的向后散射回波贡献大于来自枝叶的向后散射贡献,进而导致 HH 极化所得到的向后散射功率比 HV 极化更强,而由其提取的树高和 HV 极化方式相

比与 Lidar H80 的相关性较高,*RMSE* 较低。同时该现象与传统的将 HV 极化看作体散射机制有些不吻合,可能是由于 P-波段穿透能力较强,3 种极化方式的体散射相位中心均下移,甚至可能在一定程度上都趋近于地表。根据这一结果可能的推断是 RVoG 模型及 L-波段经典的树高反演方法可能不适用于 P-波段。

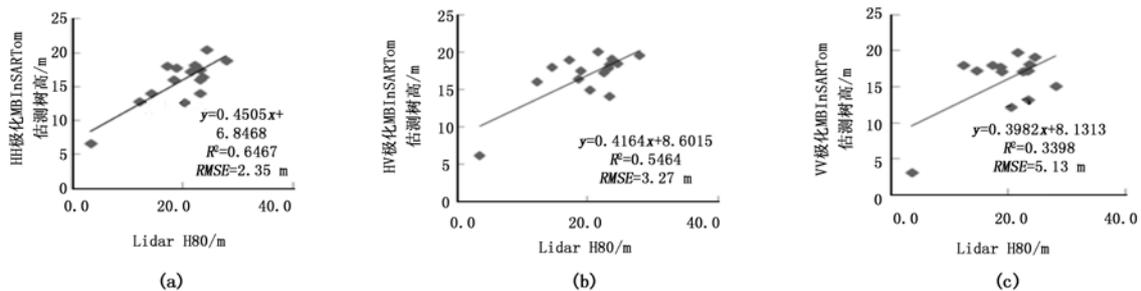


图 7 P-波段(a)HH极化,(b)HV极化,(c)VV极化 MBInTom SAR 估测树高与 Lidar 实测树高相关关系

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究应用瑞典 Raminstorp 研究区 BioSAR

2007 P-波段数据研究应用 MBInTomo SAR 技术提取森林后向散射功率分布图,进而提取树高信息。研究表明:P-波段 HH 极化 MBInTomo SAR 技术有助于提取树高,提取精度能够在一定程度上满

足林业应用需求(R^2 为 0.65, $RMSE$ 为 2.35 m, 相关系数为 0.80)。应用后向散射功率谱采用经验方法提取的树高与 Lidar H80 相比, HH 极化最优, HV 极化其次, VV 极化最差。这一现象可能推断得到的结论是传统的 RVoG 模型及树高反演算法不适合于 P-波段。

3.2 讨论

本研究森林垂直结构信息提取利用率较低, 仅提取出树高, 而且针对的是单个像元尺度, 然后进行样地范围的平均, 并没有直接对森林垂直结构进行样地内平均。今后的研究工作将进一步集中于像元尺度、林分尺度森林垂直结构信息提取、冠层高度提取、林下地形及近地表信息提取等方面的研究工作, 进一步优化改善现有频谱分析技术, 以提高森林垂直结构信息提取精度, 优化树高估测算法, 提取出能够代表森林垂直结构信息的生物参数, 为森林生物量、蓄积量估测, 进而为森林碳储量评估、森林固碳能力等研究服务。

参考文献:

- [1] Anderson J H, Weber K T, Gokhale B, *et al.* Intercalibration and Evaluation of ResourceSat-1 and Landsat-5 NDVI. Canadian [J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 37(2): 213-219.
- [2] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 131-147.
- [3] Wang Q, Tenhunen J, Dinh N Q, *et al.* Similarities in ground-and satellite-based NDVI time series and their relationship to physiological activity of a Scots pine forest in Finland[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1): 225-237.
- [4] Zhao D, Huang L, Li J, *et al.* A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(1): 25-33.
- [5] Meroni M, Atzberger C, Vancutsem C, *et al.* Evaluation of agreement between space remote sensing SPOT-VEGETATION fAPAR time series[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 41(4): 1951-1961.
- [6] Raleigh M S, Rittger K, Moore C E, *et al.* Ground-based testing of MODIS fractional snow cover in subalpine meadows and forests of the Sierra Nevada[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 128: 44-57.
- [7] Steining M. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6-7): 1139-1157.
- [8] Papathanassiou K, Moreira J. Interferometric analysis of multifrequency and multipolarization SAR data[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS 96. Remote Sensing for a Sustainable Future. , International, 1996, IEEE.
- [9] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1998, 36(5): 1551-1565.
- [10] Ferro-Famil L, López-Martínez C, Pottier E. Analysis of Natural Scene Properties from POLinSAR Data Using Coherence Set Statistics and a Multi-Dimensional Speckle Model[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on, 2006, IEEE.
- [11] Neumann M, Ferro-Famil L, Reigber A. Polarimetric Coherence Optimization for Multibaseline SAR Data[M]. ESA Special Publication, 2007.
- [12] Colin E, Titin-Schnaider C, Tabbara W. An interferometric coherence optimization method in radar polarimetry for high-resolution imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2006, 44(1): 167-175.
- [13] Tabb M, Orrey J, Flynn, *et al.* Phase diversity: a decomposition for vegetation parameter estimation using polarimetric SAR interferometry[C]. Proc. EUSAR, 2002.
- [14] Yamada H, Yamaguchi Y, Yunjin K, *et al.* Polarimetric SAR interferometry for forest analysis based on the ESPRIT algorithm[J]. IEICETransactions on Electronics, 2001, 84(12): 1917-1924.
- [15] Treuhaft R N, Madsen S N, Moghaddam M, *et al.* Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar [J]. Radio Science, 1996, 31(6): 1449-1485.
- [16] Huang Y, Ferro-Famil L, Reigber A. Under-foilage object imaging using SAR tomography and polarimetric spectral estimators[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2012, 50(6): 2213-2225.
- [17] Tebaldini S, D'Alessandro M M, Monti Guarnieri A, *et al.* Polarimetric and structural properties of forest scenarios as imaged by longer wavelength SARs[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, 2010, IEEE.
- [18] Treuhaft R N, Chapman B D, Dos Santos J, *et al.* Vegetation profiles in tropical forests from multibaseline interferometric synthetic aperture radar, field, and lidar measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 2009, 114(D23).
- [19] Ishimaru A, Chan T-K, Kuga Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1998, 36(5): 1524-1530.
- [20] Holecz F, Moreira J, Pasquali P, *et al.* Height model generation, automatic geocoding and a mosaicing using airborne AeS-1 InSAR data[C]. Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS 97. Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development. , 1997 IEEE International, 1997, IEEE.
- [21] Reigber A, Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [22] Stefano Tebaldinia F R. Single and Multipolarimetric SAR Tomography of Forested Areas: A Parametric Approach [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(5): 2375-2387.