

引 用 格 式:Li Lan,Chen Erxue,Li Zengyuan,*et al.*A Review on Forest Height and Above-ground Biomass Estimation based on Synthetic Aperture Radar[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(4):625-633.
[李兰,陈尔学,李增元,等.合成孔径雷达森林树高和地上生物量估测研究进展[J].遥感技术与应用,2016,31(4):625-633.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.4.0625

合成孔径雷达森林树高和地上生物量估测研究进展

李 兰^{1,2},陈尔学^{1,2},李增元^{1,2},冯 琦^{1,2},赵 磊^{1,2}

(1.中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091;
2.国家林业局遥感与信息技术重点开放性实验室,北京 100091)

摘要:微波遥感具有一定的穿透性,能够与森林内部的散射体发生相互作用,从而获得指示森林垂直方向的参数,被认为在森林垂直结构参数估测方面具有很大的潜力。PolSAR、InSAR、PolInSAR、多基线 InSAR 以及多基线 PolInSAR 技术的发展进一步拓展了微波遥感在林业中的应用,为森林垂直结构参数估测提供了可行的解决方案。首先总结了森林垂直结构剖面的层析提取方法;然后重点阐述了林下地形、森林树高以及森林地上生物量的微波遥感估测方法;最后就森林垂直结构参数估测研究中存在的问题及其发展趋势进行了分析。

关 键 词:合成孔径雷达;层析;森林垂直结构;森林树高;森林地上生物量

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)04-0625-09

1 引 言

近年来,随着对全球气候变化和碳循环研究的普遍关注,森林生态系统受到世界各国政府和科学家的高度重视。森林垂直结构信息不仅反映了森林空间结构特征,还反映了森林的生理生态过程,可为森林资源经营管理和生态研究提供数据支持。林下地形、森林树高和森林地上生物量(Above Ground Biomass,AGB)不仅是林业资源信息中的重要参数,也是描述生态系统的重要组成部分。林下地形作为重要的森林生态因子,不仅影响森林资源的空间分布,还与森林生态系统的稳定性有关。树高作为森林蓄积量和森林地上生物量估计等模型的一个重要输入参数,是森林资源调查所必需的参数。森林生态系统的生物量及其碳吸存能力是系统功能的主要体现,是系统发挥其它生态功能的物质基础,准确估算森林地上生物量及其动态变化是当前陆地碳

循环研究的核心内容,同时也是生态学与全球气候变化研究的重要组成部分。

传统的森林资源调查以抽样理论为基础,以地面调查为主要方法,但森林资源调查的地面测量不仅工作量大、周期长,而且难以在大面积范围内连续取样,遥感技术能够快速、准确、实时、宏观地以不同时空尺度获取地面森林资源分布、结构、动态变化/格局及过程信息,为森林资源调查及其动态变化监测提供了科学有力的工具,多光谱、高光谱、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,SAR)和激光雷达(Light Detection And Ranging,LiDAR)等数据被用于森林类型、结构特征和森林生长状态的监测与评估研究^[1-3]。多光谱、高光谱等光学遥感对森林结构信息表现较为直观、敏感,在森林植被参数反演研究中起步较早,在森林树种识别、叶面积指数以及郁闭度等参数估测方面发挥了很大作用。但光学遥感只能获得森林表层信息,难以获得表征森林垂直

收稿日期:2015-05-12;修订日期:2015-08-25
基金项目:国家 973 计划项目“复杂地表遥感信息动态分析与建模”(2013CB733404)。
作者简介:李 兰(1988—),女,河北邢台人,博士研究生,主要从事 SAR 森林参数估测研究。E-mail:lilanlan1128@163.com。
通讯作者:陈尔学(1968—),男,山东菏泽人,博士,研究员,主要从事雷达应用技术研究。E-mail:chenerx@caf.ac.cn。

结构特征的信息,在生物量估测方面亦有其局限性,因为森林地上生物量由叶生物量和枝干生物量两部分组成,而光谱信号只能够和叶生物量发生反应,在较低的生物量水平上即饱和,当生物量较高时将失去其指示作用。激光雷达能获取高精度的森林垂直结构信息,在林下地形、树高、森林生物量等参数估测方面起到了重要作用。然而,激光雷达受到大气、云雾的限制,并且小光斑激光雷达的飞行成本很高,大光斑激光雷达会受到林下地形和树木空间结构的影响,限制了其在复杂地形条件下的大范围应用。

随着 SAR 成像系统的发展,SAR 数据获取方式日臻多样化,逐步由最初的单极化、单波段和单轨道发展到目前的多极化、多波段和多基线等不同观测方式及其组合,多维度 SAR 的概念应运而生^[4]。其中,极化合成孔径雷达(Polarimetric SAR, PolSAR)能够反映散射体的物理特性;干涉合成孔径雷达(Interferometric SAR, InSAR)通过相位差异可以反映散射体的高程信息;极化干涉合成孔径雷达(Polarimetric Interferometric SAR, PolInSAR)同时具有 PolSAR 和 InSAR 的优势,已成为植被参数反演研究的重要手段;多基线 InSAR 实现了对高程向散射体空间分布模式与垂直结构的精确测量,不仅可以获取更高精度的高程信息,还可以有效解决叠掩和透视收缩问题,在植被参数估计领域具有很大的应用潜力^[5];多基线 PolInSAR 综合了多基线 InSAR 和 PolInSAR 的优势,基于层析成像的方法可将具有不同散射机制的散射体在垂直方向上进行有效分离,有助于深入理解森林内部散射体的物理机制^[6]。多维度 SAR 通过综合利用多个观测数据,可以更为精细的描述森林的垂直结构信息,从而确保反演模型的稳健性。

森林垂直结构是森林形态特征的重要体现,指森林植被地上部分(包括乔、灌、草)在空间中的垂直分层现象。林业上通常以林分为单位,依据等高距或树冠光竞争高度原理对其垂直层次进行划分,然后以各层的树高多样性、径级结构、物种多样性、蓄积量/生物量等指标对林分的垂直结构特征进行描述^[7]。SAR 以像元为单位,提供分辨单元内所有散射体的后向散射信息,通过 SAR 层析技术可提取垂直方向分布信息,得到后向散射功率谱形式表示的森林垂直结构剖面,该剖面分布形状与森林空间分布形态具有较强的相似性,可在一定程度上反映森林的垂直结构信息^[8]。此外,SAR 可用于估测林下

地形、树高以及地上生物量,从而获得指示森林垂直结构的参数信息。本文首先总结了森林垂直结构剖面的层析提取方法,然后对林下地形、树高以及地上生物量的估测方法进行了介绍,最后对森林垂直结构参数估测研究中存在的问题以及发展趋势进行了分析。

2 森林垂直结构剖面层析提取

利用层析技术可对森林场景进行三维成像,进而提取森林垂直结构剖面信息。SAR 层析旨在恢复 SAR 分辨率单元内多个散射体的高程位置,以得到后向散射功率的垂直分布。就层析成像所采用的方法而言,大体可以将其划分为 3 类:物理模型法、极化相干层析(Polarization Coherence Tomography, PCT)法、频谱分析法。

2.1 物理模型法

物理模型法通常需要依赖于一定的先验假设条件,将包含较少参数的经验模型与观测数据进行关联,通过对模型参数进行求解获得严格的模型解析表达,重构出精确的垂直结构函数。Treuhart 等利用不同基线的 InSAR 数据对叶面积密度(Leaf Area Density, LAD)进行反演,获得了较为精确的重构结果^[9-10]。该方法基于包含垂直结构函数的相干散射模型,利用多个高度上的基线相干矢量,找出使模型预测值和观测值相差最小的结构参数,从而得到假设为高斯分布的相对反射率分布函数,但将其直接反演较为困难,计算复杂度较高。

2.2 极化相干层析法

极化相干层析的方法即通常所说的傅立叶—勒让德级数展开法,其运用数学物理手段,首先将干涉复相干表示为垂直结构函数在高度方向上的积分,并将该垂直结构函数以傅立叶—勒让德级数形式进行展开和截断,然后通过输入树高和地形相位,利用干涉复相干值对勒让德系数进行求解,进而重构出该垂直结构函数。其中,所需输入的树高和地形相位参数可通过极化干涉数据本身反演而得,也可利用已知的外部数据(如 LiDAR 提取的数字高程模型和冠层高度模型)直接输入,其树高和地形相位精度将会影响重构垂直结构函数的精度。该方法由 Cloude^[11]提出,最早利用单基线极化干涉 SAR 数据对森林垂直结构函数进行重构,而后将其扩展应用到双基线极化干涉 SAR 数据中,利用更高阶数的傅立叶—勒让德展开式进行重构,以

获得更好的反演结果,同时指出当基线数较多时求解方程会出现病态现象,从而降低数值求解的稳定性^[12]。国内学者陈曦等^[13]基于双基线极化干涉 SAR 数据通过改进的两次拟合法获取较高精度的树高和地相位,进而利用傅立叶—勒让德级数展开式重构垂直结构剖面。张红等^[14]将傅立叶—勒让德级数将带有权重的正交多项式级数进行展开,实现了一种更为稳定的反演方法。目前,该类方法的理论与实验研究均已趋于成熟,成为了 SAR 层析反演较为经典的方法^[15-16]。

2.3 频谱分析法

频谱分析法即采用阵列信号处理的方法对多基线 SAR 数据进行层析反演,需要通过飞机或卫星平台的多次飞行对同一对象进行多次观测,在垂直于雷达视线和飞行方向的法向上构造一个合成孔径,而获得在高程方向的分辨能力。频谱分析法的成像理论严谨,物理含义明确,且可获得较高的高程分辨率,因此受到各科研机构的广泛关注。多基线 InSAR 层析三维成像理论源于快速傅立叶变换(FFT)成像理论^[17],为解决 FFT 方法成像分辨率较低的问题,相关学者提出 SVD^[18]、Capon^[19]、MUSIC^[20]、ESPTIT^[21]、压缩感知(CS)^[22]等超分辨率层析成像算法。此外,针对多基线 PolInSAR 数据,基于极化敏感阵列信号处理理论,将已有的频谱分析算法进行扩展,可获取到分辨单元内散射机制的高程分布信息^[23]。

3 林下地形和森林树高反演

地表高程信息提取是雷达干涉测量最主要的应用领域之一,早在 1974 年,Graham 就已提出雷达干涉测量的基本思想^[24];1986 年,Zebker 和 Goldstein 对雷达干涉测量理论作了进一步的完善,并利用机载 InSAR 数据获取了第一幅具有较高实用性的三维地形图^[25]。但针对森林覆盖区域的林下地形和森林树高反演,还需要引入 PolInSAR、多频 InSAR、多基线 InSAR 以及多基线 PolInSAR 技术。可将林下地形与森林树高反演方法大致归为三类:相位差分反演法、基于物理模型反演法以及基于层析成像反演法。

3.1 相位差分反演法

相位差分反演法需要首先寻找到可分别代表森林冠层和地表散射的相位中心,然后利用与地表散射相对应的相位信息反演得到地表高程,利用森林

冠层和地表散射的相位差信息反演得到森林树高。1996 年,Papathanassiou 等通过对 SIR—C 全极化干涉数据的研究,发现通过极化基变换可以获取任意极化状态下的干涉图^[26]。1998 年,Cloude 和 Papathanassiou 提出无约束相干最优理论^[27]。随后,相关学者相继提出相位中心分离(Phase Diversity, PD)算法^[28]和数值半径(Numerical Radius, NR)优化方法^[29]。2001 年,Yamada 等利用 ESPRIT 算法将植被冠层散射相位中心和地表散射相位中心进行分离^[30]。此外,相关学者还利用不同频率 InSAR 差分技术进行森林树高提取^[31-32]。

3.2 基于物理模型反演法

微波散射模型包括基于林分结构模拟雷达后向散射信息的雷达后向散射模型以及描述干涉信息的地体散射模型,其中后者主要用于林下地形和森林树高反演,该类模型的主要特点是假设植被覆盖区域体去相干分量在植被冠层的衰减形式为指数函数。由植被层和地面层组成的 RVoG 双层植被结构模型便是在该假设条件下提出,奠定了 PolInSAR 树高反演的理论基础^[33]。2001 年,Papathanassiou 和 Cloude 利用六维非线性迭代法对 RVoG 模型直接进行反演,由于该方法比较复杂且依赖于初始值的设定,所以并不实用^[34]。随后,相关学者利用模拟加温—退火算法^[35]、最大似然估计算法^[36]、神经网络法^[37]等对 RVoG 模型进行反演。2003 年,Cloude 和 Papathanassiou 利用 RVoG 模型的几何线性关系,提出了经典的三阶段反演法,不仅提高了地相位和树高的反演精度,且大大减小了反演过程的复杂性^[38]。2009 年,Neumann 等发展了三层植被结构模型,为林下地形和树高反演提供了新的理论模型^[39]。2010 年,Neumann 等将 Freeman-Durben 极化分解理论扩展到极化干涉协方差矩阵分解,为树高反演提供了新的研究思路^[40]。随后,三层植被结构模型和极化干涉协方差矩阵分解理论被用于树高估测研究^[41-42]。

雷达后向散射模型用来模拟给定林分结构的森林雷达后向散射信息,如密歇根微波散射模型(MIMICS)^[43]、三维森林后向散射模型^[44]、COSMO 模型^[45]等。该类模型可用来分析雷达后向散射系数对林分结构的敏感性,进而估测森林树高和林分密度^[46]。但由于正向模拟模型通常较为复杂,输入参数较多,所以其实用性较差。

3.3 层析反演法

利用层析技术对森林场景进行三维成像,进而

依据后向散射功率在垂直方向的变化信息进行森林参数提取。2000 年,Reigber 等利用 L 波段多基线机载数据对位于德国 Oberpfaffenhofen 附近的试验区进行层析成像,成功获取了森林的垂直结构信息,指出层析技术在林下地形和森林树高估测中具有应用潜力^[17]。2005 年,Reigber 等根据层析结果通过信号门限阈值提取森林树高,并将其作为参考对 PolInSAR 树高反演结果进行分析^[47]。2008 年,Frey 等利用 P 波段多基线机载数据对森林场景进行层析成像,层析成像结果表明大部分高能点集中分布在林下地表^[48]。2012 年,Tebaldini 等^[6]分别利用 L 波段和 P 波段的多基线 PolInSAR 数据对北方森林进行层析成像,成像结果指示 P 波段各极化通道的相位中心均固定在地表,L 波段的后向散射功率垂直分布相对较为均匀,利用代数合成方法提取体散射结构矩阵,对其进行层析成像并通过信号门限阈值提取树高,发现反演的树高与自 LiDAR 数据提取的树高具有较好的一致性。同年,Huang 等利用 L 波段全极化机载数据通过层析技术对林下卡车进行识别,并根据极化角的垂直分布从散射机理角度对不同地物目标(森林与硬目标)垂直向空间位置、能量分布与层次结构进行了解释^[49]。2015 年,Ho Tong Minh 等利用机载和 BIOMASS 卫星仿真数据对热带雨林进行层析成像,根据后向散射功率垂直分布形状,再次应用信号门限阈值的方法提取了树高^[50]。

4 森林地上生物量估测

基于 SAR 数据的森林地上生物量估测方法可归为以下四类:基于后向散射系数估测法、基于干涉相干性估测法、基于异速生长方程估测法、基于层析成像估测法。

4.1 基于后向散射系数估测法

雷达的后向散射强度随着森林生物量的增加而线性增加,但当森林地上生物量达到一定水平时,后向散射强度趋于饱和。孙国清等^[51]应用后向散射模型与 SAR 数据研究了不同频率 SAR 数据与森林生物量的相关性。陈尔学等^[52]总结了不同波段不同极化方式的雷达后向散射系数对森林地上生物量估测的“饱和点”的变化。发现,后向散射强度对森林地上生物量的敏感性依赖于雷达的频率,其对森林生物量及其变化的敏感性随着波长的增大而增强,其中 P 波段是森林 AGB 估测的首选波段,L 波

段为其次,C 波段最差;HH 极化后向散射主要来自于树干—地面散射,VV 极化后向散射同时受体散射和地面散射的影响,HV 极化后向散射主要受木质材料的体散射作用主导,更大程度上反映了森林地上生物量的信息,其后向散射强度与森林地上生物量的相关性较大。利用后向散射系数估测森林地上生物量的方法可分为 3 类:统计回归法、半经验半物理模型法以及物理模型法。其中,最基本也是最常采用的方法为统计回归法,即基于某一极化的后向散射系数通过建立线性回归关系直接进行森林地上生物量估测^[53],Saatchi 等^[54]还进一步发展了基于多极化后向散射系数通过建立二次回归关系进行森林地上生物量估测的方法。半经验半物理模型法通常指基于水云模型^[55]的估测方法,该模型具有一定的物理机理,但需要利用样地数据对模型中的少量未知参数进行“训练”^[56]。物理模型法指基于森林雷达后向散射模型的估测方法,通过模拟数据建立生物量与后向散射系数的回归关系^[57]、也可通过神经网络^[58]和查找表^[59]等方法估测森林地上生物量。Sandberg 等^[60]利用 L 波段和 P 波段的机载数据对瑞典半北方森林进行研究,发现针对 L 波段 HV 极化后向散射系数,当森林地上生物量高于 150 t/hm^2 时就已“饱和”,针对 P 波段 HV 后向散射系数,其饱和点相对高一些,但当森林地上生物量较高时,其相对关系不再呈线性。Le Toan 等^[61]联合多个实验区的 P 波段机载数据进行分析,发现随着生物量从 6 t/hm^2 左右增加到 300 t/hm^2 ,HV 极化后向散射系数值增加了 17 dB,说明利用 P 波段后向散射信息有望对森林干扰(如伐木)进行监测,针对 150 t/hm^2 以下的低生物量,其敏感性很大,说明利用 P 波段后向散射信息有望对干扰之后的早期次生林进行监测。针对高生物量的热带雨林地区(生物量大于 250 t/hm^2),研究发现,常规的后向散射系数与森林地上生物量之间的相关性很小^[62]。

4.2 基于干涉相干性估测方法

受植被体去相干的影响,森林覆盖区域的相干性相比非植被覆盖区域要低,其干涉相干系数与森林地上生物量之间存在负相关关系,且其对森林地上生物量的敏感性相比后向散射系数要高,因此可利用统计回归的方法对森林地上生物量进行估测^[63]。相关学者进一步讨论了气候对相干性的影响,指出利用相干系数进行森林地上生物量估测需要考虑物候信息^[64]。此外,也可基于半经验半物理

模型估测森林地上生物量。1997年,Askne等^[65]在水云模型的基础上提出干涉水云模型,为半经验半物理模型估测法奠定了理论基础。随后,干涉水云模型被应用于森林地上生物量反演^[66]。但干涉水云模型的应用研究多是针对C波段SAR数据,针对L波段和P波段SAR数据,其应用往往受到一定的限制。因为应用干涉水云模型进行森林地上生物量估测需要满足一定的假设条件:森林中的散射机制主要来自冠层的体散射和来自地面的表面散射,地面与树干以及地面与冠层之间的二次散射可以忽略^[67]。对于穿透性较弱的C波段数据,该假设条件总能成立,但对于穿透性较强的L波段和P波段数据,由于森林中的二次散射作用不可忽略,该假设条件往往并不能得到满足。

4.3 基于异速生长方程估测法

利用林木生长规律可进行森林地上生物量的估算,在生物量估算模型中,以异速生长方程最为常见^[68]。以树高为自变量,以森林地上生物量为因变量,异速生长方程可表示为如下函数形式: $B \propto H^\alpha$,其中 B 为森林地上生物量, H 为估测的树高,指数 α 的变化主要受自然或人工抚育间伐的影响,根据森林状况不同, α 值可在0~4之间变化^[69]。可见,利用PolInSAR、多频InSAR数据反演得到树高,然后应用树高通过异速生长方程便可计算得到森林地上生物量^[32]。当生物量水平较高时,通过该方法仍然可以获取到森林地上生物量,且不存在饱和现象,但树高的估测精度会直接影响森林地上生物量的估测精度。

利用异速生长方程估算森林地上生物量存在模型误差^[70],因为森林地上生物量的大小不仅仅由树高确定,还受林龄、胸径、植株密度、气候以及立地条件等因素的制约^[71-72]。当树高不再生长时,林木的胸径可能仍在生长^[73],若仅将树高作为异速生长方程的自变量,则会低估森林地上生物量。因此基于异速生长方程估测森林地上生物量还需要考虑其适用条件。

4.4 基于层析成像估测法

森林垂直结构直接影响森林地上生物量,利用层析技术获取后向散射功率垂直分布信息,进而挖掘与森林地上生物量相关的特征,建立森林地上生物量估测模型。2002年,Treuhaft等^[10]利用C波段多基线InSAR数据基于物理模型反演得到森林垂直结构函数,同时结合高光谱遥感提取的LAI,得

到LAD,并进一步将LAD用于森林地上生物量估测。2006年,Cloude^[11]首次提出极化干涉相干层析方法,并指出该方法提取的层析信息具有定量估测森林地上生物量的潜力。随后,罗环敏等^[74]通过对PCT层析结果采用9个参数进行参数化的方法建立了森林地上生物量模型,李文梅等^[75]利用10个参数进行PCT层析结果的参数化,同时结合极化干涉SAR分割得到的林分边界,实现了对整幅影像森林覆盖区的地上生物量估测。2012年,Mariotti D'Alessandro等^[76]利用P波段多基线数据对热带雨林进行层析成像,发现森林内部的层析相对反射率受地形的影响较小。针对该层析结果,Ho Tong Minh等进一步分析了不同高度处的层析相对反射率与森林地上生物量之间的相关性,发现森林内部30 m高度处的层析相对反射率与森林地上生物量有较高的相关性,且在生物量高达450 t/hm²时仍未出现饱和现象^[50,77]。

5 结 语

综上所述,微波遥感在森林垂直结构参数估测方面具有很大的潜力,已存在针对森林垂直结构剖面、林下地形、森林树高以及森林地上生物量估测研究的多种方法,但不同方法均存在其各自的局限性。

利用相位差分法反演林下地形和森林树高需要解决所选极化或频率通道的相位中心高度与地表实际高度和森林冠层顶部高度相分离的问题,基于物理模型反演法需要对植被结构模型进行假设;后向散射系数对生物量的敏感性在高生物量区将会降低,利用干涉相干性进行生物量估测受限于对特定波长和应用区域的选择,基于异速生长方程进行森林地上生物量估测会受树高估测精度以及模型误差的影响。可见,基于上述方法进行森林垂直结构信息反演存在模型适应性以及信号饱和问题。利用层析技术可以获取后向散射功率的垂直分布,得到可指示森林垂直结构的剖面信息,根据垂直结构剖面的形状通过定义相应的特征,不但可以用来提取林下地形和森林树高,还可以对森林地上生物量进行估测。但后向散射功率垂直分布与森林垂直结构进行关联的机理性认识还不够深入,对这些信息的利用率还较低,如何进一步挖掘其在森林垂直结构参数估测中的价值,仍然是需要进一步研究的关键问题。

总体来说,层析技术进一步拓展了多维度SAR

在林业应用领域的理论和方法,对森林垂直结构参数的量化估测具有重要意义。目前,SAR 层析成像理论已成为当前的研究热点,随着 TerraSAR-X 卫星的成功发射(已于 2007 年发射,现可提供重复观测数据)以及“BIOMASS”对地观测卫星发射计划的开展(将于 2020 年发射),基于层析 SAR 的森林垂直结构参数估测研究也将更为系统和成熟,从而促进对全球气候变化和碳循环研究的深入开展。

参考文献(References):

- [1] Wu Jian, Peng Daoli. Advances in Researches on Hyperspectral Remote Sensing Forestry Information-Extracting Technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(9): 2305-2312. [吴见, 彭道黎. 高光谱遥感林业信息提取技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(9): 2305-2312.]
- [2] Pang Yong, Li Zengyuan, Chen Erxue, *et al.* Lidar Remote Sensing Technology and Its Application in Forestry[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(3): 129-136. [庞勇, 李增元, 陈尔学, 等. 激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 129-136.]
- [3] Xiao Hongyan, Yue Cairong. Review of Synthetic Aperture Radar Application in Forestry[J]. Forest Inventory and Planning, 2014, 39(2): 132-137. [肖虹雁, 岳彩荣. 合成孔径雷达技术在林业中的应用综述[J]. 林业调查规划, 2014, 39(2): 132-137.]
- [4] Wu Yirong. Concept of Multidimensional Space Joint-observation SAR[J]. Journal of Radars, 2013, 02(2): 135-142. [吴一戎. 多维度合成孔径雷达成像概念[J]. 雷达学报, 2013, 02(2): 135-142.]
- [5] Pang Lei, Zhang Jixian, Fan Hongdong. Progress and Tendency of Multibaseline Synthetic Aperture Radar Interferometry Technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2152-2157. [庞蕾, 张继贤, 范洪冬. 多基线干涉 SAR 测量技术发展与趋势分析[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2152-2157.]
- [6] Tebaldini S, Rocca F. Multibaseline Polarimetric SAR Tomography of a Boreal Forest at P- and L-Bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(1): 232-246.
- [7] Yu Bao, Zhang Qiuliang, Wang Liming. Comprehensive Characteristics of the Vertical Structure of Middle Young Over Cutting Forest of Larix Gmelinii[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(1): 132-139. [玉宝, 张秋良, 王立明. 中幼龄兴安落叶松过伐林垂直结构综合特征[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 132-139.]
- [8] Li Wenmei, Li Zengyuan, Chen Erxue, *et al.* Principle and Method of Forest Vertical Structure Inversion Using Polarization Coherence Tomography[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 232-239. [李文梅, 李增元, 陈尔学, 等. 极化相干层析反演森林垂直结构原理与方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 232-239.]
- [9] Treuhaft R N, Chapman B D, Dos Santos J R, *et al.* Vegetation Profiles in Tropical Forests from Multibaseline Interferometric Synthetic Aperture Radar, Field, and Lidar Measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D23110). doi:10.1029/2008JD011674.
- [10] Treuhaft R N. Forest Leaf Area Density Profiles from the Quantitative Fusion of Radar and Hyperspectral Data[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D21). doi:10.1029/2001JD000646.
- [11] Cloude S R. Polarization Coherence Tomography[J]. Radio Science, 2006, 41(RS4017): 1-27.
- [12] Cloude S R. Dual-baseline Coherence Tomography[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 127-131.
- [13] Chen Xi, Zhang Hong, Wang Chao. The Inversion of Vegetation Structural Parameters Using Dual-baseline Polarimetric SAR Interferometry[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2009(4): 49-52. [陈曦, 张红, 王超. 极化干涉 SAR 反演植被垂直结构剖面研究[J]. 国土资源遥感, 2009(4): 49-52.]
- [14] Zhang H, Ma P F, Wang C, *et al.* A New Function Expansion for Polarization Coherence Tomography[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(5): 891-895.
- [15] Zhang Hong, Jiang Kai, Wang Chao, *et al.* The Current Status of SAR Tomography[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(2): 282-287. [张红, 江凯, 王超, 等. SAR 层析技术的研究与应用[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2): 282-287.]
- [16] Li Wenmei, Li Zengyuan, Chen Erxue, *et al.* Status and Development of Tomographic SAR for Forest Vertical Structural Parameters Inversion[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(4): 741-751. [李文梅, 李增元, 陈尔学, 等. 基于层析 SAR 的森林垂直结构参数反演现状及发展趋势[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 741-751.]
- [17] Reigber A, Moreira A. First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-band Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [18] Fornaro G, Serafino F, Soldovieri F. Three-dimensional Focusing with Multipass SAR Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(3): 507-517.
- [19] Lombardini F, Reigber A. Adaptive Spectral Estimation for Multibaseline SAR Tomography with Airborne L-band Data[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France, 2003.
- [20] Guillaso S, Reigber A. Scatterer Characterisation Using Polarimetric SAR Tomography[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
- [21] Ertin E, Moses R L, Potter L C. Interferometric Methods for Three-Dimensional Target Reconstruction with Multipass Circular SAR[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2010, 4(3): 464-473.

- [22] Zhu X X, Bamler R. Tomographic SAR Inversion by L1-Norm Regularization—The Compressive Sensing Approach [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(10): 3839-3846.
- [23] Gini F, Lombardini F. Multibaseline Cross-track SAR Interferometry: A Signal Processing Perspective [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20(8): 71-93.
- [24] Graham L C. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763-768.
- [25] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B5): 4993-4999.
- [26] Papathanassiou K P, Moreira J R. Interferometric Analysis of Multifrequency and Multipolarization SAR Data [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Lincoln, Nebraska, USA, 1996.
- [27] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551-1565.
- [28] Tabb M, Orrey J, Flynn T, *et al.* Phase Diversity: A Decomposition for Vegetation Parameter Estimation Using Polarimetric SAR Interferometry [C]// European Conference on Synthetic Aperture Radar. Cologne, Germany, 2002.
- [29] Colin E, Titin-Schnaider C, Tabbara W. An Interferometric Coherence Optimization Method in Radar Polarimetry for High-Resolution Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(1): 167-175.
- [30] Yamada H, Yamaguchi Y, Kim Y. Polarimetric SAR Interferometry for Forest Analysis based on the ESPRIT Algorithm [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2001, 84(12): 1917-1924.
- [31] Neeff T, Dutra L V, Dos Santos J R, *et al.* Tropical Forest Measurement by Interferometric Height Modeling and P-band Radar Backscatter [J]. Forest Science, 2005, 51(6): 585-594.
- [32] Balzter H, Rowland C, Saich P. Forest Canopy Height and Carbon Estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, Using Dual-Wavelength SAR Interferometry [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(3): 224-239.
- [33] Treuhaft R N, Madsen S R N, Moghaddam M, *et al.* Vegetation Characteristics and Underlying Topography from Interferometric Radar [J]. Radio Science, 1996, 31(6): 1449.
- [34] Papathanassiou K P, Cloude S R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2352-2363.
- [35] Li Xinwu, Guo Huadong, Liao Jingjuan, *et al.* Inversion of Vegetation Parameters Using Spaceborne Polarimetric SAR Interferometry [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(6): 424-429. 李新武, 郭华东, 廖静娟, 等. 航天飞机极化干涉雷达数据反演地表植被参数 [J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 424-429.
- [36] Tabb M, Flynn T, Carande R. Full Maximum Likelihood Inversion of PolInSAR Scattering Models [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Alaska, USA, 2004.
- [37] Angiuli E, Del Frate F, Vecchia A D, *et al.* Inversion Algorithms Comparison Using L-Band Simulated Polarimetric Interferometric Data for Forest Parameters Estimation [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona, Spain, 2007.
- [38] Cloude S R, Papathanassiou K P. Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(3): 125-134.
- [39] Neumann M, Ferro-Famil L, Pottier E. A General Model-based Polarimetric Decomposition Scheme for Vegetated Areas [C]// International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry. Frascati, Italy, 2009.
- [40] Neumann M, Ferro-Famil L, Reigber A. Estimation of Forest Structure, Ground, and Canopy Layer Characteristics from Multibaseline Polarimetric Interferometric SAR Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1086-1104.
- [41] Li Tingwei, Huang Haifeng, Liang Diannong, *et al.* The Polarimetric InSAR Model and A Novel Method for Parameter Inversion of The Three-layer Vegetation [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(4): 333-338. [李廷伟, 黄海风, 梁向农, 等. 三层植被极化干涉建模及参数反演新方法研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(4): 333-338.]
- [42] Song Guiping, Wang Changcheng, Fu Haiqiang, *et al.* A Novel Vegetation Height Inversion Method based on Polarimetric Interferometric Covariance Matrix Decomposition [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(6): 613-619. [宋桂萍, 汪长城, 付海强, 等. 植被高度的极化干涉互协方差矩阵分解反演法 [J]. 测绘学报, 2014, 43(6): 613-619.]
- [43] Ulaby F T, Sarabandi K, McDonald K, *et al.* Michigan Microwave Canopy Scattering Model [J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(7): 1223-1253.
- [44] Sun G Q, Ranson K J. A Three-dimensional Radar Backscatter Model of Forest Canopies [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 372-382.
- [45] Thirion L, Colin E, Dahon C. Capabilities of a Forest Coherent Scattering Model Applied to Radiometry, Interferometry, and Polarimetry at P- and L-Band [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(4): 849-862.
- [46] Wang C, Qi J. Biophysical Estimation in Tropical Forests Using JERS-1 SAR and VNIR Imagery. II. Aboveground Woody Biomass [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(23): 6827-6849.
- [47] Reigber A, Reigber A, Neumann M, *et al.* Evaluating PolInSAR Parameter Estimation Using Tomographic Imaging Results [C]// European Radar Conference. Paris, France, 2005.
- [48] Frey O, Morsdorf F, Meier E. Tomographic Imaging of A For-

- ested Area by Airborne Multibaseline P-band SAR[J]. *Sensors*, 2008, 8(9): 5884-5896.
- [49] Huang Y, Ferro-Famil L, Reigber A. Under-foliage Object Imaging Using SAR Tomography and Polarimetric Spectral Estimators[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(6): 2213-2225.
- [50] Ho Tong Minh D, Tebaldini S, Rocca F, *et al.* Capabilities of Biomass Tomography for Investigating Tropical Forests[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 965-975.
- [51] Sun G Q, Ranson K J. Relating Multifrequency Radar Backscattering to Forest Biomass: Modeling and AIRSAR Measurement[C]// *Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, Pasadena, USA, 1992.
- [52] Chen Erxue. Development of Forest Biomass Estimation Using SAR Data[J]. *World Forestry Research*, 1999, 12(6): 18-23. [陈尔学. 合成孔径雷达森林生物量估测研究进展[J]. *世界林业研究*, 1999, 12(6): 18-23.]
- [53] Le-Toan T, Quegan S, Woodward I, *et al.* Relating Radar Remote Sensing of Biomass to Modelling of Forest Carbon Budgets[J]. *Climatic Change*, 2004, 67(2-3): 379-402.
- [54] Saatchi S, Halligan K, Despain D G, *et al.* Estimation of Forest Fuel Load From Radar Remote Sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1726-1740.
- [55] Attema E P W, Ulaby F T. Vegetation Modeled as A Water Cloud[J]. *Radio Science*, 1978, 13(2): 357-364.
- [56] Santoro M, Beer C, Cartus O, *et al.* Retrieval of Growing Stock Volume in Boreal Forest Using Hyper-temporal Series of Envisat ASAR ScanSAR Backscatter Measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 490-507.
- [57] Ranson K J, Sun G Q, Weishampel J F, *et al.* Forest Biomass from Combined Ecosystem and Radar Backscatter Modeling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(1): 118-133.
- [58] Kimes D S, Ranson K J, Sun G Q. Inversion of a Forest Backscatter Model Using Neural Networks[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(10): 2181-2199.
- [59] Ni W J, Sun G Q, Guo Z F, *et al.* Retrieval of Forest Biomass from ALOS PALSAR Data Using a Lookup Table Method[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(2): 875-886.
- [60] Sandberg G, Ulander L M H, Fransson J E S, *et al.* Comparison of L- and P-Band Biomass Retrievals based on Backscatter from The BioSAR Campaign[C]// *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape Town, South Africa, 2009.
- [61] Le Toan T, Quegan S, Davidson M W J, *et al.* The BIOMASS Mission: Mapping Global Forest Biomass to Better Understand The Terrestrial Carbon Cycle[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(11): 2850-2860.
- [62] Villard L, Le-Toan T. Relating P-band SAR Intensity to Biomass for Tropical Dense Forests in Hilly Terrain: γ_0 or t_0 ? [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(1): 214-223.
- [63] Gaveau D L A, Balzter H, Plummer S. Forest Woody Biomass Classification with Satellite-based Radar Coherence over 900 000 km² in Central Siberia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174(1): 65-75.
- [64] Eriksson L E B, Askne J, Santoro M, *et al.* Forest Parameter Estimation Using JERS-1 Repeat-Pass Interferometry: Stem Volume Retrieval in Siberia and Sweden[C]// *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Denver, Colorado, USA, 2006.
- [65] Askne J I H, Dammert P B G, Ulander L M H, *et al.* C-band Repeat-pass Interferometric SAR Observations of The Forest[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(1): 25-35.
- [66] Cartus O, Santoro M, Schmillius C, *et al.* Large Area Forest Stem Volume Mapping in The Boreal Zone Using Synergy of ERS-1/2 Tandem Coherence and MODIS Vegetation Continuous Fields[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(3): 931-943.
- [67] Dai Yufang, Ling Feilong. Suitability Analysis of Water Cloud Model for L Band Synthetic Aperture Radar to Forest in Northeast China[J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28(4): 44-49. [戴玉芳, 凌飞龙. 水云模型于 L 波段 SAR 和中国北方森林的适用性分析[J]. *遥感信息*, 2013, 28(4): 44-49.]
- [68] Luo Yunjian, Zhang Xiaoquan, Wang Xiaoke, *et al.* Forest Biomass Estimation Methods and Their Prospects[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(8): 129-134. [罗云建, 张小全, 王效科, 等. 森林生物量的估算方法及其研究进展[J]. *林业科学*, 2009, 45(8): 129-134.]
- [69] Woodhouse I H. Predicting Backscatter-biomass and Height-biomass Trends Using A Macroecology Model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(4): 871-877.
- [70] Fu Yu, Lei Yuancai, Zeng Weisheng. Uncertainty Assessment in Regional-scale Above Ground Biomass Estimation of Chinese Fir[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(12): 79-86. [傅煜, 雷渊才, 曾伟生. 区域尺度杉木生物量估计的不确定性度量[J]. *林业科学*, 2014, 50(12): 79-86.]
- [71] Li Chunping, Li Gang, Xiao Chunwang. The Application of Allometric Relationships in Biomass Estimation in Terrestrial Ecosystems[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2007, 29(2): 51-57. [李春萍, 李刚, 肖春旺. 异速生长关系在陆地生态系统生物量估测中的应用[J]. *世界科技研究与发展*, 2007, 29(2): 51-57.]
- [72] Yan Jing, Luo Yunjian, Zheng Defu, *et al.* Source Appointment of Differences in Biomass Estimations of Eucalypt Plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(2): 92-98. [闫晶, 罗云建, 郑德福, 等. 桉树生物量估算差异的源解析[J]. *林业科学*, 2014, 50(2): 92-98.]
- [73] Wang X P, Fang J Y, Tang Z Y, *et al.* Climatic Control of Primary Forest Structure and DBH-height Allometry in North-

east China[J].Forest Ecology and Management,2006,234:264-274.

[74] Luo Huanmin,Chen Erxue,Li Zengyuan,*et al.*Forest Above Ground Biomass Estimation Methodology based on Polarization Coherence Tomography[J].Journal of Remote Sensing,2011,15(6):1138-1155.[罗环敏,陈尔学,李增元,等.森林地上生物量的极化相干层析估计方法[J].遥感学报,2011,15(6):1138-1155.]

[75] Li W M,Chen E X,Li Z Y,*et al.*Combining Polarization Coherence Tomography and PolInSAR Segmentation for Forest Above Ground Biomass Estimation[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,Munich,Germany,2012.

[76] Mariotti D'Alessandro M,Tebaldini S.Phenomenology of P-band Scattering From a Tropical Forest through Three-dimensional SAR Tomography[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2012,9(3):442-446.

[77] Ho Tong Miah D,Thuy L T,Rocca F,*et al.*Relating P-band Synthetic Aperture Radar Tomography to Tropical Forest Biomass[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014,52(2):967-979.

A Review on Forest Height and Above-ground Biomass Estimation based on Synthetic Aperture Radar

Li Lan^{1,2},Chen Erxue^{1,2},Li Zengyuan^{1,2},Feng Qi^{1,2},Zhao Lei^{1,2}

(1.*Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry,Beijing 100091,China*;
2.*Remote Sensing and Information Technology,State Forestry Administration Key Lab,Beijing 100091,China*)

Abstract: Microwave remote sensing could interact with forest internal scatterers,because of its penetrability.So it could provide the parameters indicating forest vertical direction and be considered to have the potential to estimate forest vertical structure parameters.With the rapid development of the InSAR,PolInSAR,multi-baseline InSAR and multi-baseline PolInSAR technologies,the application in forestry for microwave remote sensing has been extended,provides a feasible solution to forest vertical structure parameters estimation.Firstly,the methods of extracting forest vertical structure profile based on the technology of tomography are summarized.Then,the methods for estimating topography,forest height and forest above-ground biomass are described.Finally,the existential problems and research trends for forest vertical structure parameters estimation are analyzed.

Key words: SAR;Tomography;Forest vertical structure;Forest height;Forest above-ground biomass