

合成孔径雷达与森林地上生物量反演： 好奇和实用的平衡

王勇

电子科技大学 资源与环境学院, 成都 611731

摘要: 好奇是科学与技术发展、不断创新的源泉, 实用则是科技发展、创新的结果服务人类、回馈社会, 两者无不例外共同不断地驱动着合成孔径雷达技术和森林地上生物量反演的研究和发展。在全球气候急剧变化的今天, 好奇和实用的平衡则更加至关重要。地球陆地表面森林面积大小和树木生物量是估算各国或者全球碳储量、排放及其变化的重要参数。好奇已产生的成功案例表明, 树木生物量的反演与全极化、极化干涉、层析合成孔径雷达SAR(Synthetic Aperture Radar)技术及数据集紧密相关。反思过去, 兼顾好奇和实用, 对地上树木生物量的反演, 建议将来考虑以下4种方案, 即星载双波段SAR和异速方程(Allometric Equation), 星载激光雷达LiDAR(Light Detection and Ranging)和异速方程, 第3个方案是前面两个方案的结合, 方案4为探索和好奇性的。

关键词: 雷达后向散射, 合成孔径雷达, 干涉合成孔径雷达, 树木地上生物量, 林分, 全球植被地上生物量

引用格式: 王勇. 2019. 合成孔径雷达与森林地上生物量反演: 好奇和实用的平衡. 遥感学报, 23(5): 809–812

Wang Y. 2019. Synthetic aperture radar and inversion of aboveground biomass in forested environments: balancing curiosity- and application-driven acts. Journal of Remote Sensing, 23(5): 809–812 [DOI:10.11834/jrs.20199300]

1 引言

全球气候及其变化影响人类在地球上的生存, 气候变化是人们关心的重大问题, 并与近年来极端天气高频率出现密切相关。特别是在法国巴黎召开的2015年联合国气候变化大会上, 来自196个国家和地区与会者对全球气候变化及可能产生的负面结果达成了空前共识, 并签署了“巴黎协议”, 倡议各国立即行动起来, 减少其温室气体即碳的排放(<https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/paris-climate-change-conference-november-2015/paris-climate-change-conference-november-2015>[2019-08])。

陆地森林中树的干、枝、叶主要成分是碳。据UN FAO(2018), 全球约30%的陆地被森林覆盖。联合国可持续性发展报告指出, 2030年森林发展的首要目标包括全球增加3%的森林覆盖面

积、保持或增强森林碳储存(Carbon Stocks)能力(UN ESA, 2019)。这样过去、现在、将来森林面积大小及其变化, 树木大小及其变化, 就成为世界各国估算该国或者全球碳储量、碳排放和变化的重要参数。

森林树木的地上生物量AGB(Aboveground Biomass)是指林中除地下树根外, 所有地上树干、枝、叶去除水分后的总重量。对于一个林分(Forest Stand), 其AGB是林分的面积、树种、树的大小、树的密度(每单位面积树的棵数)、树各成分(干、枝、叶)含水率的一个函数。对于单棵树而言, 其生物量的多少往往用树高、胸径或两者的结合来计算。

1957年, 美国密西根大学雷达实验室科研人员做出了第一个民用SAR对地观测雷达后向散射(Backscatter)系数图像, 成像区域为美国密西根州Willow Run Airport及周边地区(<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FirstSARimage.JPG>[2019-

收稿日期: 2019-06-14; 预印本: 2019-08-13

第一作者简介: 王勇, 研究方向为微波遥感地物反向散射建模、森林物理参数反演、森林碳储量以及变化、湿地甲烷排放及变化、合成孔径雷达原始数据成像、合成孔径雷达技术和合成孔径干涉雷达技术、微波和光学遥感图像处理与分析等。E-mail: wangy2012@uestc.edu.cn

本文为王勇在2019年第四届全国定量遥感学术论坛的特邀报告。

08])。区域内不同林分、不同树龄大小的植被,在图像中表现出不同的SAR后向散射系数强度值,由此,科研人员产生了SAR数据和植被生物量关联的好奇。

2 植被地上生物量

在给定树种的前提下,林分内单一树地上生物量的估算按精度(高, High; 中, Moderate; 低, Low)可排序为

$$\begin{cases} AGB_{High} = f_{High}(Height, DBH, \rho) \\ AGB_{Moderate} = f_{Moderate}(Height, \rho) \\ AGB_{Low} = f_{Low}(DBH, \rho) \end{cases} \quad (1)$$

式中, Height(m)、DBH (Diameter at Breast Height, cm)、 $\rho(g/cm^3)$ 分别为树高、胸径、密度。式(1)也被称为异速方程。地面实测时,测胸径易、测高度难。当林分内树的密度大、或存在多层树冠时,往往难以确定是否能同时观测到同一棵树的根部和树梢,由此也增加了树高测量的不确定性,影响测量工作,降低测量精度。

3 好奇驱动SAR后向散射系数生物量反演

利用SAR遥感技术对树木生物量的反演可以分为两类,其一为直接利用雷达后向散射系数的强弱估计生物量(Dobson 等, 1992; Le Toan 等, 1992; Wang 等, 1995);其二为先利用后向散射系数反演树的参数,如胸径、林分密度、树高等,然后结合异速方程估算生物量。虽然雷达后向散射系数随树木生物量的增加而变强,但同时林分内地面粗糙度、地表潮湿度也会影响该系数的强弱。例如,当林分的树龄较小(≤ 10 年)、生物量较低($\leq 1 kg/m^2$)时,同样林分的后向散射系数在雨前、雨后变化超过3 dB(Wang 等, 1994)。这种因地表潮湿度变化导致的大幅度SAR后向散射系数变化的情况,在农作物区域灌溉前后比比皆是。

另外当林分的单位面积生物量高到一定程度时,雷达后向散射系数会趋于饱和。解决雷达后向散射系数趋于饱和的方法可使用波长长的SAR系统。在同样波长条件下,应首选同极化雷达工作模式,因为交叉极化的后向散射系数比同极化先趋于饱和(如Wang 等, 1995)。另外全极化雷达数据分解算法的引入,也进一步提高了SAR后向散射系

数饱和时的生物量值及散射系数对生物量的敏感度(Wang 等, 1997)。

间接反演树木生物量方法是先反演树的单个或多个结构参数,比如结合全极化雷达后向散射模型(Radar Backscatter Model)和人工神经网络ANN(Artificial Neural Network)来估算树的胸径和林分密度(如Wang和Dong, 1997);利用极化干涉合成孔径雷达PolInSAR(Polarimetric Interferometric SAR)技术反演树高,典型代表为基于RVoG模型(Treuhaft和Siqueira, 2001)研发的三阶段树高反演算法(Cloude和Papathanassiou, 2003)。同时用树高估算树木生物量的精度往往高于利用胸径获取生物量的精度(如式(1)),层析SAR(Tomography SAR)因此就成了树高反演的宠儿。

4 实用驱动的雷达后向散射系数生物量反演

综上所述,树木生物量的反演与全极化、极化干涉、层析SAR技术及数据集紧密相关。可现实是以上3种数据仅仅存在于全球极少数地区,更谈不上全球数据覆盖。如从2009年—2019年间美国NASA/JPL UAVSAR获取的机载L波段全极化、极化干涉和层析数据量分别为9308景、2525景、5景(<https://uavsar.jpl.nasa.gov/cgi-bin/data.pl>[2019-08])。另外以四川省成都市周边为例,在2006年—2011年间日本ALOS/PALSAR没有采集1景全极化数据(<https://search.asf.alaska.edu/#/>[2019-08])。导致相关数据极少,甚至没有的原因涉及到现有SAR技术、大气对机载SAR工作平台稳定性、平台定位精度等问题,因而无法实现常规性(Routine)和运营行性(Operational)的对地观测获取以上数据。

5 展望:好奇驱动与实用驱动结合的地上树木生物量反演

基于目前的成功案例,生物量反演可以考虑以下4个方案。首先,鉴于2001年NASA/SRTM双天线SAR的成功,可先用SAR测高,然后用异速方程估算生物量。

方案1是星载双波段SAR或长、短波段SAR各1星。前者具体为,单天线长波段(如P波段)SAR和双天线的短波段(如K波段),SAR采用同极化(HH或VV)工作模式。图1是采用时隔5天P-HH生成

的干涉相关图, InSAR干涉数据对的获取时间为2015年8月8日和13日。图像覆盖区域是美国北卡罗来纳州Duke Forest, 图长宽约为2.7 km×1.5 km, 中心为36°00'29"N 78°58'38"W。由图1可见, 林区的干涉相关性高。参考光学图像(如谷歌地球, GoogleEarth®), 干涉图上可以清晰区分林区与非林区。因此用重轨获取P波段干涉数据, 估算出数字高程模型DEM(Digital Elevation Model)是可行的。垂直于飞行方向的双天线K波段SAR估算出数字表层模型DSM(Digital Surface Model)。用DSM和DEM的差计算地物(如树)的高度。双天线K波段SAR的实现比SRTM的C波段双天线SAR容易得多, 因为K波段波长只有C波段波长的1/5, 两天线间最小距离的要求要小很多, 有利于用现有卫星技术和星体大小来实现。同时K波段电磁波对树冠的穿透能力比C波段差, 产生的DSM更接近树冠的顶部, 有利于对树高的估算, 从而更利于结合异速方程估算生物量。后者的方案与前者类似, 差别在于长波段SAR在一颗星上, 短波段双天线SAR在第2颗星上。另外长波段SAR可以间歇、间断性开机, 因为地球地貌变化不大, DEM相对稳定。

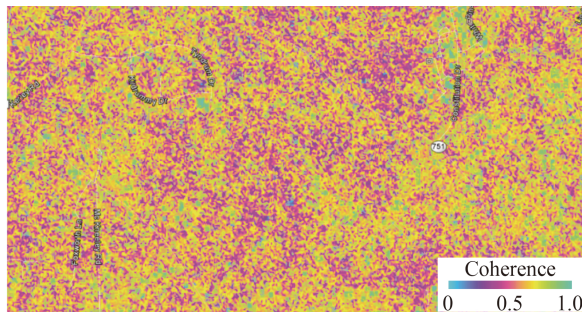


图1 NASA/JPL P-HH生成的时隔5天的干涉图

Fig. 1 InSAR P-HH coherence image of NASA/JPL airborne P-band SAR at Duke Forest, North Carolina, USA

方案2是基于星载激光雷达测取的树高和异速方程估算生物量。2018年美国ICESat-2成功发射, 该卫星载有高发射频率的激光雷达, 可以同时获取沿飞行方向3个地面轨道高精度的地物(如树)高度, 其全球数据免费发布([https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/\[2019-08\]](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/[2019-08]))。虽然两轨道间的距离为3 km, 但卫星重访轨道和重访时激光对地的照射点不可能完全重复, 可以用采样方法填补轨道间缺失的树高数据, 从而实现无缝(Wall-to-Wall)地面树高覆盖。

方案3是方案1和方案2的结合, 即ICESat-2和

SAR卫星估算的树高相互补充和验证, 无缝估算地面林分的树高、生物量。

方案4是以节约费用为目的, 同时考虑丰富的已有SAR数据集, 该方案为探索 and 好奇性方案, 具体为1星双极化SAR。我们近期研究表明, 利用ALOS/PALSAR重轨差分InSAR, 分别产生交叉极化和同极化的DSM, 通过对DSM进行加权处理, 在林区获得两个DSM的差(H_h)要远大于树高(图2)。而用重轨等效地面、等效树冠干涉相位中心差得到的树高、 H_ϕ (图2), 又往往低估树高。对两者进行加权结合可以弥补两者不足得到较准确的树高 H , 即

$$H = f(H_h, \gamma_h, H_\phi, \gamma_\phi) \quad (2)$$

式中, γ_h 和 γ_ϕ 分别是 H_h 和 H_ϕ 的加权系数, 但 $f()$ 和加权系数的确定目前处于探索阶段。

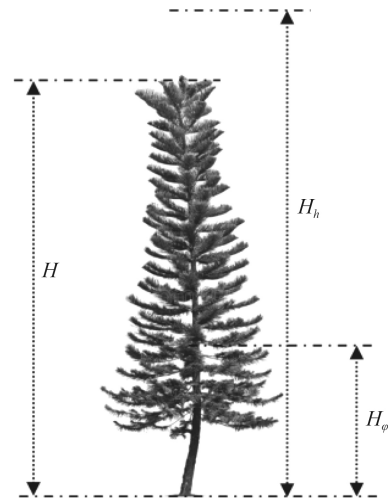


图2 用双极化SAR差分干涉数据反演树高

Fig. 2 Estimation of tree height using differential InSAR technique and dual-pol datasets

最后, 在计划和实施长波段SAR常规性地对地观测、反演植被生物量时, 电磁波干扰问题必会出现(National Academies of Sciences等, 2015)。机载、星载长波SAR接收的信号不仅有来自SAR发射脉冲产生的后向散射信号, 同时也会有来源于其他雷达的发射脉冲及它们的散射信号, 这些信号可能会干扰SAR数据的获取。另外为了避免机载、星载长波SAR发射的雷达脉冲信号影响其它地面对空雷达的工作, 很多国家都对机载、星载对地观测SAR的使用有限制。例如, 为避免与地基太空目标跟踪雷达(Space Object Tracking Radar)系统相互干涉, 欧洲太空中心ESA(European Space Agency)

的星载BIOMASS SAR目前是不能在全北美、欧洲大部、靠地中海的北非洲区域、中东地区上空开机的。ESA为此已多次与相关国家协商,但目前还未能与任何单一国家达成其SAR可开机的协议,甚至有限制性的开机协议都未能达成(National Academies of Sciences等, 2015)。因此,长波段SAR的可开机进行对地观测的协议极为重要,不然SAR升空后仅仅是满足了围着地球转动的好奇,而缺乏更大的实用价值,达不到服务人类、回馈社会的最终目的。

参考文献(References)

- Cloude, S. R., and K. P. Papathanassiou 2003. Three-stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry. IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 150(3): 125–134 [DOI: [10.1049/ip-rsn:20030449](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20030449)]
- Dobson, C. M., F. T. Ulaby, T. Le Toan, A. Beaudoin, E. S. Kasischke 1992. Dependence of Radar Backscatter on Coniferous Forest Biomass. IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing, 30(2): 412–415 [DOI: [10.1109/36.134090](https://doi.org/10.1109/36.134090)]
- Le Toan, T., A. Beaudoin, J. Riou, and D. Guyon 1992. Relating Forest Biomass to SAR data. IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing, 30(2): 403–411 [DOI: [10.1109/36.134089](https://doi.org/10.1109/36.134089)]
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2015. A Strategy for Active Remote Sensing Amid Increased Demand for Radio Spectrum. Washington, DC: The National Academies Press.
- Treuhaft, R. N., and P. R. Siqueira 2000. Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Data. Radio Science, 35: 141–177 [DOI: [10.1029/1999RS900108](https://doi.org/10.1029/1999RS900108)]
- Wang, Y., F. W. Davis, J. M. Melack, Eric S. Kasischke, and Norman L. Christensen, Jr 1995. The Effects of Changes in Forest Biomass on Radar Backscatter from Tree Canopies. International Journal of Remote Sensing, 16(3): 503–513 [DOI: [10.1080/01431169508954415](https://doi.org/10.1080/01431169508954415)]
- Wang, Y., E. S. Kasischke, J. M. Melack, F. W. Davis, and N. L. Christensen, Jr 1994. The Effects of Changes in Loblolly Pine Biomass and Soil Moisture on ERS-1 SAR Backscatter. Remote Sensing of Environment, 49(1): 25–31 [DOI: [10.1016/0034-4257\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90056-6)]
- Wang, Y., and F. W. Davis 1997. Decomposition of Polarimetric Synthetic Aperture Radar Backscatter from Upland and Flooded Forests. International Journal of Remote Sensing, 18(6): 1319–1332 [DOI: [10.1080/014311697218449](https://doi.org/10.1080/014311697218449)]
- Wang, Y., and D. Dong 1997. Retrieving Forest Stand Parameters from SAR Backscatter Data Using a Neural Network Trained by a Canopy Backscatter Model. International Journal of Remote Sensing, 18(4): 981–989 [DOI: [10.1080/014311697218872](https://doi.org/10.1080/014311697218872)]
- UN ESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs). 2019. *Global Forest: Goals and Targets of the UN Strategic Plan for Forests 2030*. 20 p.
- UN FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations). 2018. *The State of the World's Forests: Forest Pathways to Sustainable Development*. 118 p.

Synthetic aperture radar and inversion of aboveground biomass in forested environments: balancing curiosity- and application-driven acts

WANG Yong

School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: Curiosity is the source of science and technology development, and continuous innovation. Application shows how humanity and society benefit from the development and innovation of curiosity-driven. There is no exception that the development of Synthetic Aperture Radar (SAR) technology and inversion of aboveground biomass (AGB) in forested environments around the globe have been continuously driven by both curiosity and application. With the rapid climate change worldwide today, the balance of curiosity and application acts is of ever significance. The areal extents and AGB of trees in forested areas around the world are fundamental for the assessment of the global carbon stock and emission, and their variation. Of successful curiosity- and application-driven examples, the AGB estimation has been strongly coupled with quad-pol SAR, interferometric SAR (InSAR), and tomography SAR (TomoSAR) techniques and their datasets. With the reflection of the past and the balance of curiosity and application, the following four approaches are recommended for the assessment of the global AGB in the future. They are the spaceborne dual-wavelength SAR systems and allometric equations, the light detection and ranging (LiDAR) and allometric equations, the combination of the first two approaches, and the exploratory one.

Key words: radar backscatter, Synthetic Aperture Radar (SAR), Interferometric SAR (InSAR), aboveground biomass (AGB) of tree, forest stand, global AGB of forests