

摘要

着眼于未来即将发射的 BIOMASS 和 Rosen-L 低频率卫星应用的背景，本研究的重点是定义对森林和冰川内部进行高分辨率三维成像的新处理方法，探索其时间维度上的变化特征。基于此，我们解决了下列若干科学问题：1) 天气条件的改变会对基于 BIOMASS 卫星层析和干涉数据的生物量估计产生什么影响？2) 哪一种信号处理方法能够最精确的反演森林高度？3) 怎样实现对自然场景实现高分辨率层析成像？

鉴于目前还没有卫星层析成像数据，该研究利用了欧空局 (ESA) 陆基和机载项目中获得的数据，包括 P 波段机载项目 BIOSAR1、AfriSAR、L 波段机载 AlpTomoSAR 项目和 p 波段陆基项目 TropiScat。

首先陆基项目 TropiScat 和两次机载项目 (BioSAR 1 和 AfriSAR) 的数据被用于探索研究时间效应的影响。我们利用 TropiScat 数据模拟 BIOMASS 卫星数据在不同天线和不同时间生成的层析图。由于 BIOMASS 卫星层析成像是基于间隔三天的采样数据处理获取的，我们考虑了每三天采集两个 TropScat 雷达天线 (最后一天采集 3 个三个天线) 获得的层析图，这意味着任何一个层析图都可以通过混合 7 个不同的采样日来获得。我们将这些层析图称为“7 天层析图”。每个 7 天的层析图都会与在第七天早上 6 点采集所有 15 个雷达天线所获得的“瞬时层析图”进行对比。然后通过时域反向投影方法将数据在地距/高程方向坐标中进行层析处理，我们获得 66 幅 7 天层析图，其中 61 幅所使用的数据是在同时敬礼阳光明媚和雨天环境的时间跨度中获取的，利用这些层析图我们就能对因为天气条件变化造成的辐射误差进行清晰的实验评估。然后，根据已有的机载数据获得的层析数据与生物量的敏感性关系，我们可将由天气状况导致的辐射误差转化为生物量估计误差。

利用地面去除技术，我们可以对因为时间去相关现象对生物量反演的影响进行了评价。该技术使用两幅或三幅 SAR 图像的相干组合，消除了地面后向散射回波并强化了树冠后向散射系数。目前这种技术已经被 BIOSMASS 项目采纳。我们在同一天和不同的日子 (时间间隔分别 4 天、5 天和 9 天) 所获得的机载数据上实施地面回波消除技术，从而直接量测由时间去相关引起的辐射误差。

最佳森林高度反演技术是通过对比两种不同方法实现的：1) 通过地面随机体积模型预测和多基线 SAR 数据之间的最小二乘问题来进行高程参数估计，2) 对层析聚焦得到的垂直后向散射设定阈值确定森林高度。在 AfriSAR 项目的 P 波段数据上分别应用了这两种方法，并利用 Lidar 的测量结果进行了验证。

我们发现当使用传统一维聚焦方法，如 Beamforming, Capon filtering 等，处理间距较大且不规则的多轨道数据时候，无法得到高质量成像结果。因此，我们提出了一种新的处理方法，该新方法不仅能获得高质量的层析影像，同时具有很高的处理效率且不用处理原始 SAR 数据。该方法的有效性已经在数值模拟实验和欧空局 AlpTomoSAR 项目的真实机载数据得到了验证。

TropiSCAT 的结果清楚地表明，树冠散射比地面散射水平更稳定，该理论也符合地面散射更受水分条件影响的物理解释。根据之前在同一测试地点的研究，在 7 天断层图中观察到的 1-1.5dB 的图像辐射变化将导致 50-80t/公顷的生物量反演误差，误差百分比约为 20%或更高。利用地面消除技术所获取的图像表现出了与生物量的高度相关性，因此该方法也将直接应用在 BIOMASS 卫星计划中。根据理论模型和相关实验表明，时间去关系主要影响几乎没有植被覆盖的区域，而在高生物量区域水平，辐射误差仅在 1dB 以内。总的来

说，这些结果支持了从利用重复轨道的 BIOMASS 卫星层析产品和干涉相位中估计生物物理信息的可行性。

对时间效应的研究并不会仅限于对由此产生的误差进行量化，而且还会发展信号处理方法来补偿这种影响。

对于森林高度的反演结果表明，最佳方式为结合非参数和参数方法的优势，即综合基于模型的反演优势，以及不需要参数调优以及 SAR 层析方法的计算效率和精度。

最后，通过 AlpTomoSAR 数据的实验充分表明，在正确应用层析处理算法的前提下，机载层析测量的质量在任何意义上都不受平台稳定性的限制，从而支持了使用小卫星形成进行层析成像的可行性。