

层析SAR地表参数信息提取研究进展

李 震^{①②} 张 平^{*①②} 乔海伟^① 赵常军^① 周建民^{①②} 黄 磊^{①②}

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

^②(三亚中科遥感研究所海南省地球观测重点实验室 三亚 572029)

摘 要: 传统的合成孔径雷达(SAR)成像是将现实中的三维场景投影到方位-斜距向二维平面的一系列处理过程, 损失了三维空间的高度维信息。随着SAR系统及处理技术的发展, 层析SAR系统通过沿高度向的多个数据获取构造高度维合成孔径, 利用阵列信号处理方法实现目标高分辨率三维成像, 对观测场景进行三维重建, 获取地面目标的垂直结构信息, 对植被监测、雪冰探测、城市建模等应用具有重要应用价值。该文基于层析SAR观测机理, 分析了配准、去平地效应、相位补偿、高度维聚焦等三维成像关键环节以及算法研究现状, 着重阐述了层析SAR在植被、雪冰、城市信息提取方面的应用, 介绍了过去20年中相关的实验结果, 讨论了不同平台下植被高度与冠层结构、冰川厚度与内部结构、积雪厚度与分层、城市区三维重建与形变监测等方面的应用潜力与存在的问题, 并对其发展趋势进行了展望。

关键词: 层析SAR; 多基线SAR; 地表参数; 垂直结构; 冰川厚度; 积雪分层

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)01-0116-15

DOI: 10.12000/JR20095

引用格式: 李震, 张平, 乔海伟, 等. 层析SAR地表参数信息提取研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(1): 116–130. doi: 10.12000/JR20095.

Reference format: LI Zhen, ZHANG Ping, QIAO Haiwei, *et al.* Advances in information extraction of surface parameters using Tomographic SAR[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(1): 116–130. doi: 10.12000/JR20095.

Advances in Information Extraction of Surface Parameters Using Tomographic SAR

LI Zhen^{①②} ZHANG Ping^{*①②} QIAO Haiwei^① ZHAO Changjun^①
ZHOU Jianmin^{①②} HUANG Lei^{①②}

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China)

^②(Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Sanya Institute of Remote Sensing, Sanya 572029, China)

Abstract: Traditional Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging is the projection of a real three-dimensional scene onto a two-dimensional domain of azimuth and slant range, which results in the loss of the high-dimensional information. With the advancement of SAR system and its processing technology, tomographic SAR systems obtain multiple data along the height direction to construct the high-dimensional synthetic aperture, and use array signal processing methods to achieve high-resolution three-dimensional images. It can reconstruct the observation scene and extract vertical structure information of the ground target, which is very important for vegetation monitoring, snow and ice detecting, and urban modeling. This paper analyzed the key steps of three-dimensional imaging, such as image registration, flat-earth phase removal, phase compensation, and the three-dimensional focusing, as well as the current research status of each step based on

收稿日期: 2020-07-07; 改回日期: 2020-09-02; 网络出版: 2020-09-15

*通信作者: 张平 zhangping@aircas.ac.cn *Corresponding Author: ZHANG Ping, zhangping@aircas.ac.cn

基金项目: 海南省重点研发计划(ZDYF2019002), 中国科学院空天信息创新研究院重点部署项目(Y950930Z2F)

Foundation Items: The Key Research and Development Program of Hainan Province (ZDYF2019002), The Key Deployment Program of AIRCAS (Y950930Z2F)

责任主编: 廖明生 Corresponding Editor: LIAO Mingsheng

the observation mechanism of tomographic SAR system. This paper particularly focuses on using tomographic SAR on the application of vegetation, glacier, snow, and urban information. The most relevant experimental results in the past two decades were introduced. Further, the application potential and existing problems related to the vegetation height with canopy structure, glacier thickness with internal structure, snow thickness with stratification, and urban three-dimensional reconstruction with deformation monitoring under different platforms are discussed. Finally, the prospects of TomoSAR in the primary applications field are presented.

Key words: Tomographic SAR; Multi-baseline SAR; Surface parameters; Vertical structure; Glacier thickness; Snow stratification

1 前言

随着合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统及处理技术的发展, SAR的应用也逐步由最初的单极化、单波段和单基线观测发展到目前的多极化、多波段和多基线观测,多维度SAR更是成为近几年的热点^[1]。传统的SAR成像是将现实中的三维场景投影到方位-斜距向二维平面的一系列处理过程,因此损失了三维空间的高度维信息。随着软硬件技术的不断发展,目前已经有一系列的方法可以获得SAR的第三维的信息,主要有干涉SAR(Interferometric SAR, InSAR)^[2]、曲线SAR(Curvi-Linear SAR, CLSAR)^[3]、层析SAR(Tomographic SAR, TomoSAR)^[4]等成像技术。干涉SAR仅能获得目标的表面高度信息,对同一方位、距离单元的目标没有高度维的分辨能力。曲线SAR只需要1次飞行就可以获得目标散射信息在三维空间的分布,但由于传感器天线相位中心在三维内的飞行路径需要严格设定,且采样过于稀疏导致曲线SAR的成像算法很复杂,因而实际应用中受到了很大的制约,目前的实际应用较少。层析SAR可以看作单基线SAR在成像模式上的扩展,层析处理的部分步骤可以简化为传统二维处理,因此不需要改变现有SAR系统的设计结构和运行模式,成为目前SAR三维信息获取的主要手段。

层析SAR技术于20世纪90年代逐渐发展起来,1998年德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)利用E-SAR实验系统,进行了第1次机载L波段层析SAR数据获取,得到了德国Oberpfaffenhofen地区的13轨L波段全极化数据,垂直基线跨度约为260 m,高度向分辨率约为2.9 m,证明了层析SAR三维成像的可行性和应用价值^[5]。2004年,首次通过在已有的ERS-1/2数据中,选择合适轨迹位置的SAR影像,实现了第1幅星载层析SAR三维成像^[6]。近年来随着机载、星载SAR系统的不断成熟和层析SAR三维成像技术的发展,更多高质量多基线SAR影像被成功获取,发展出了更适合层析SAR三维实际应用的成像算法,使

得层析SAR技术被用于多种领域,目前国际上的研究主要集中在植被遥感^[7-9]、冰雪遥感^[10,11]、城市遥感^[12,13]等领域。

我国层析处理技术也随之大力发展,中国科学院空天信息创新研究院、武汉大学、西安电子科技大学等单位均在层析SAR成像算法研究方面取得了丰富的成果^[14-16]。目前国内层析SAR应用研究主要是以国外机载数据为基础的植被参数反演^[17,18],以及面向星载数据的建筑物参数反演^[19],近两年陆续出现我国机载数据的建筑物应用实验^[20,21],这将推动我国多维度处理技术由理论研究迈入实际应用。

本文从层析SAR技术的基本原理出发,讨论了目前层析SAR领域常用的一些数据处理方法,并对其在植被垂直结构、冰川厚度、积雪深度以及建筑物垂直信息等领域的发展现状与应用潜力进行了阐述,对层析SAR技术目前存在的问题及发展趋势进行了分析。

2 层析SAR基本原理

传统的SAR系统通过发射一定带宽的信号获得距离向的高分辨率,通过合成孔径获得方位向的高分辨率,从而得到二维斜距图像。层析SAR通过沿高度向的多次数据获取构造高度维合成孔径,利用阵列信号处理方法实现对目标高精度三维成像。层析SAR系统可以通过单天线SAR系统重复航过、多天线干涉SAR系统重复航过、阵列天线SAR系统单航过等方式完成三维原始数据获取。阵列天线单次航系统设计难度和成本较大,目前层析数据获取多采用重轨观测实现,即单天线SAR系统或多天线干涉SAR系统重复轨道飞行。

图1所示为多基线重轨层析SAR系统数据获取示意图。理想情况下,层析SAR系统 N 个天线沿垂直航向呈直线均匀分布,形成有效孔径长度为 L_n 的线性阵列,雷达视角为 θ 。某目标单元在第 n 个传感器的回波信号可以表示为^[22]

$$I_n(r, x) = \int_C \gamma(x, y, z) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_n(x, y, z)\right) dx dy dz \quad (1)$$

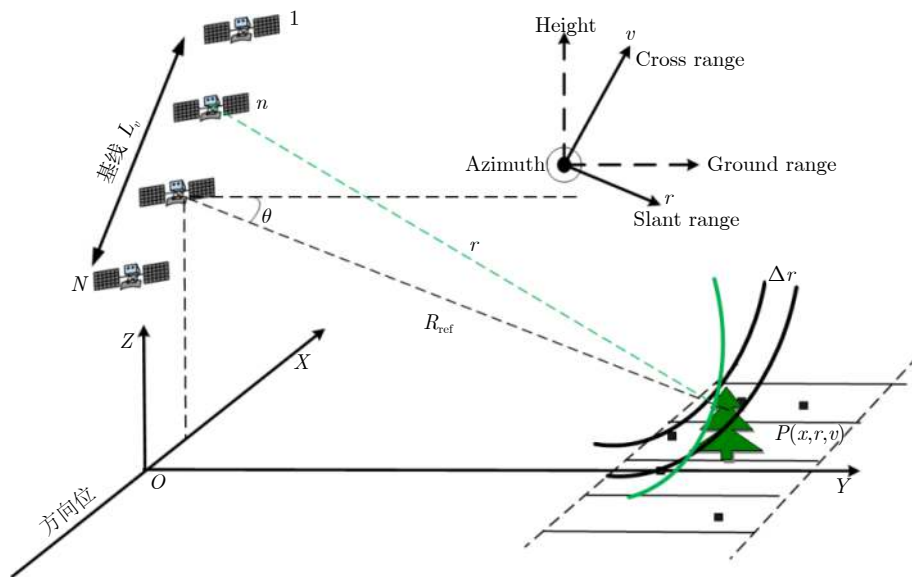


图1 层析SAR观测机理

Fig. 1 Tomographic SAR observation mechanism

其中, $\gamma(x, y, z)$ 是目标后向散射系数, C 是雷达照射区域, $R_n(x, y, z)$ 是第 n 个传感器相位中心与目标的距离, λ 是波长。去调频处理之后, 补偿相位残留误差, 对式(1)进行傅里叶变换, 可以得到第 n 个传感器在 v 向的后向散射信号

$$I_n(r, x) = \int_C s(r, x, v) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{b_n}{r} v\right) dv \quad (2)$$

其中, $s(r, x, v)$ 是目标后向散射在 v 向的分量, r 是斜距向, b_n 为第 n 个传感器相对于主传感器的垂直基线。由式(2)可知, 当所有 N 个传感器影像均已在距离-方位二维聚焦完成之后, 层析SAR的高度向成像问题转换为利用频谱离散采样重构原信号的问题, 即

$$\hat{s}(r, x, v) = \sum_n I_n(r, x) \exp\left(+j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{b_n}{r} v\right) \quad (3)$$

层析SAR的各维分辨率从本质上由各维的等效带宽决定^[22]。与传统SAR系统类似, 层析SAR系统也通常发射线性调频信号, 其回波在距离向是具有延迟的线性调频信号, 方位向也近似为线性调频信号。进行高度维成像后, 层析SAR在高度维上的像同样是一个Sinc函数, 这与方位向、距离向的情况是一致的, 且垂直距离向的理论分辨率主要由沿垂直航向形成的阵列孔径长度 L_v 决定, 此外还与系统的雷达发射信号波长 λ 、目标与层析阵列中心的距离在雷达入射面内的投影 r_0 有关, 因此层析SAR的高度向分辨率 δ_v 可以表示为^[5]

$$\delta_v = \frac{\lambda r_0}{2L_v} \quad (4)$$

此外, 一方面要获得垂直距离向的高分辨率, 必须保证足够大的垂直航向孔径长度; 另一方面, 层析SAR飞行时基线须足够小, 确保空间采样满足奈奎斯特定理, 防止空频域的频谱混叠造成成像模糊。这两者是相互矛盾的, 因此, 应尽量选择合适的阵元数量(观测次数), 平衡运行成本与分辨率。假定景物高度或散射体高度为 H , 则空间带宽为

$$B_{sd} = \frac{4\pi H}{\lambda r_0} \quad (5)$$

根据奈奎斯特定理, 空间谱不混叠的条件是:

$$\frac{2\pi}{d} \geq B_{sd} = \frac{4\pi H}{\lambda r_0}, \text{ 即飞行间距 } d \text{ 应满足}$$

$$d \leq \frac{\lambda r_0}{2H} \quad (6)$$

当各基线长度确定时, 不产生模糊的最大景物高度也是确定的, 超过这个高度成像就会发生模糊, 这一高度称为该基线下的“最大不模糊高度”, 即

$$H_{\max} = \frac{\lambda r_0}{2d} \quad (7)$$

3 常用数据处理方法

层析SAR数据处理过程如图2所示, 将不同视角获得的多幅同一区域SAR二维成像结果, 通过单视复图像序列配准、去平地效应、相位补偿(去斜、去大气效应等)、高度维聚焦等处理实现三维高分辨率成像。下面对主要步骤进行简要介绍。

3.1 预处理

图像配准的主要目的是将多次观测的不同基线单视复图像逐像素对应, 即同一目标在图像序列对

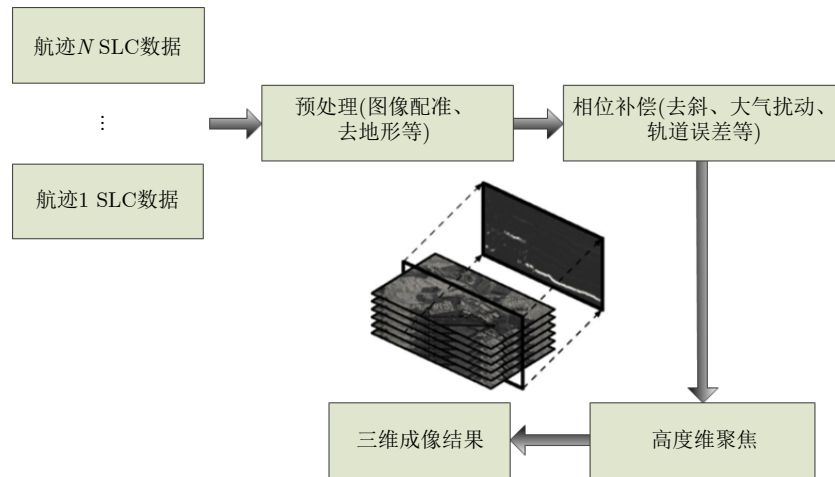


图2 层析SAR处理流程

Fig. 2 Tomographic SAR processing flow

应相同的坐标,与干涉处理中的图像配准完全相同。配准只有达到亚像元级的配准精度,才能获得高质量的干涉图,从而得到较为精确的三维成像结果。首先需要进行粗配准,然后进行精配准。配准方法众多,主要分为基于区域的方法^[23,24]和基于特征的方法^[25-27]两类。主影像的选取一般应选择时间基线、空间基线居中的影像,以尽量减小时间去相干与空间去相干效应,保证干涉图的质量。

去平地效应主要是去除因平坦的地面引起距离向和方位向呈现周期性变化的平地相位。平地相位在干涉相位图中表现为近密远疏的干涉条纹,其条纹的密度一般大于由地面高度起伏引起的干涉条纹。去除干涉相位中平地相位,需要对距离向和方位向的局部平均频率进行估计,常见的估计方法可分为基于观测数据的频率估计方法^[28]和基于成像几何系统参数的频率估计方法^[29]。基于成像几何系统参数的频率估计方法,依据InSAR几何成像关系,通过对复数干涉条纹图中的每一点乘以复指数来消除平地相位,运算速度较慢;而基于观测数据的频率估计方法,不需要飞行参数、外部DEM、基线等数据,直接从干涉条纹图本身入手,根据实际的频谱估计出主要的条纹频率,在频域内完成去平地效应,运算速度较快。

3.2 相位补偿

在实际情况下,由于时间基线和空间基线的存在,层析SAR成像过程存在着多种相位误差,例如地形形变、大气扰动等因素引起误差。相位误差的随机性严重影响了层析SAR三维测量精度。目前常用的相位误差补偿方法包括:基于永久散射体干涉(Persistent Scatterer InSAR, PSInSAR)的相位误差补偿^[30-32]、基于小基线集干涉(Small Baseline

Subsets, SBAS)的相位误差补偿方法^[33]等。PSInSAR技术要求有足够多的影像(通常大于30景),主要适用于人造目标多的场景(如城区等);SBAS则是利用较小时间、空间和基线干涉对形成多组干涉对进行相位补偿,在人造目标较少的场景下也能取得较好的效果。近年来提出的分布式目标干涉技术,可以明显增加多基线干涉的测量点密度,改进形变反演精度,其联合PSInSAR技术、SBAS技术进行多基线数据处理是目前的研究热点,而其中主要解决两个关键问题,即分布式目标同质象元选取和相位评估^[34,35]。图3为基于非线性最优化函数的相位评估算法(NonLinear optimization-based Estimation, NLE)与基于最大似然评估的相位评估算法(Maximum-Likelihood Estimation, MLE)结果比较^[34]。

此外,层析SAR观测数据通常是由雷达平台多次飞行、重复观测获得,由于飞行基线不是理想的均匀分布,单视复图像序列的参考斜距并不唯一,因此要建立观测数据和目标垂直斜距向信息之间的内在联系需要去除中心斜距相位,该相位的补偿过程称为去斜。目前去斜处理主要有两种方法:斜距去斜^[22]和参考斜距去斜^[6]。前者利用电磁波发射与接收期间的延迟,结合光速计算参考斜距进行补偿;后者利用地面参考地形、传感器的位置信息及成像几何关系计算参考斜距进行补偿。前者处理简单,但电磁波传输可能会受大气干扰影响,导致斜距计算存在误差,影响层析成像质量,因此这种方法较适用于机载平台。后者利用SAR系统成像几何关系直接计算得到参考斜距,避免了引入更多大气相位误差,较适用于星载平台,但SAR图像与参考地形数据的配准将影响其斜距计算精度。

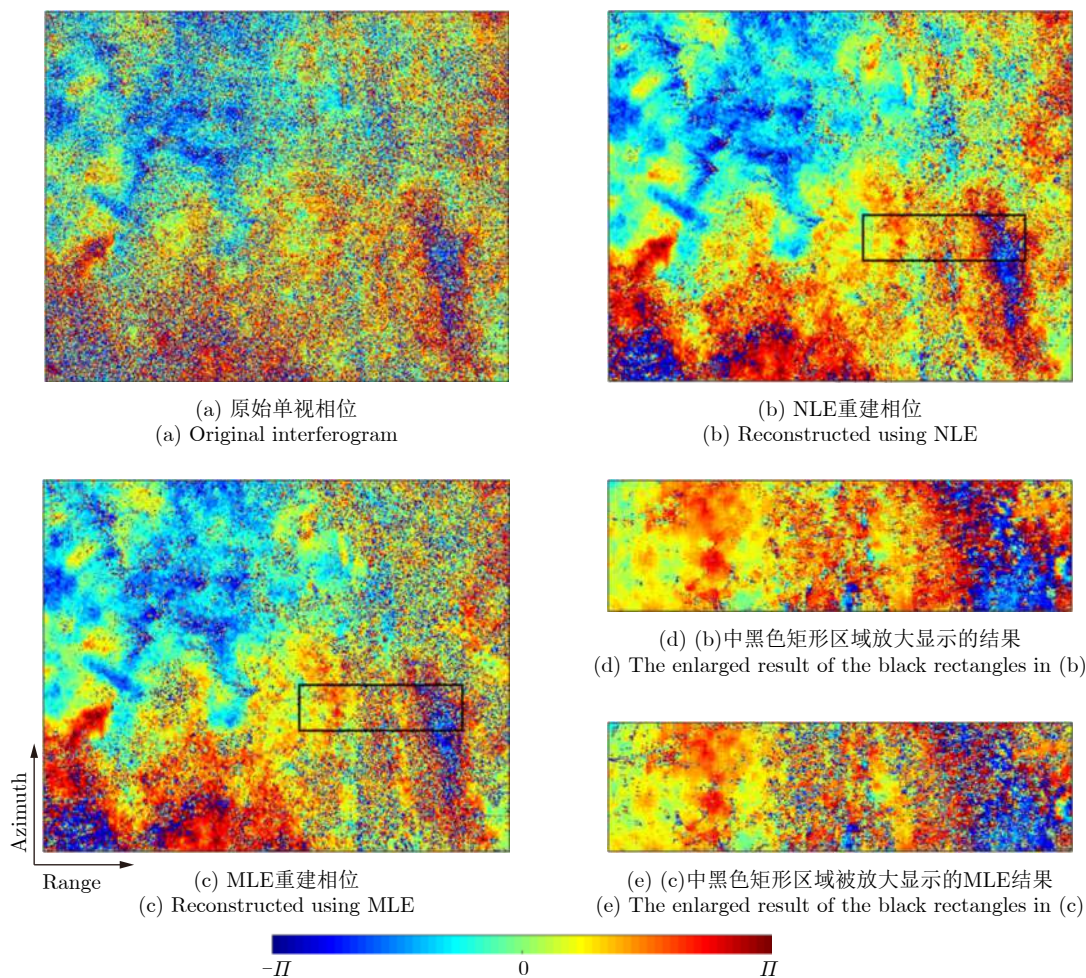


图 3 差分干涉相位，其时间基线和空间基线是490 d和97.7 m

Fig. 3 Differential interferograms with temporal baseline of 490 days and spatial baseline of 97.7 m

3.3 高度维聚焦

除高度维成像外，其他二维的处理与传统方法相同，下面着重介绍三维成像处理方法中高度维的聚焦。根据“瑞利准则”(Rayleigh criterion)，分辨率受合成孔径长度限制，使用傅里叶变换的方法成像时分辨率受瑞利准则限制。此外，由于航迹数有限且基线分布通常是非均匀的，因此通常不能直接使用传统傅立叶变换进行高度维聚焦。

由于在进行预处理、相位补偿之后，雷达回波信号的观测模型实际上就可以表示为

$$x(n) = \alpha(\omega) e^{jn\omega} + e_n(\omega) \quad (8)$$

其中， $e_n(\omega)$ 为加性噪声， $n=0, 1, \dots, N-1$ 。这就可以选择基于谱估计的算法、基于逆问题建模的算法、基于插值的成像算法等解决聚焦问题。

谱估计方法可以分为两大类^[36]：非参数化方法和参数化方法。用于层析SAR的非参数化谱分析包括奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法^[22]、最小方差法^[2]及幅度相位谱估计法^[37]等；

参数化谱分析方法包括多重信号分类法(Multiple Signal Classification method, MUSIC)^[6,38]、旋转不变性子空间方法(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique, ESPRIT)^[39]、压缩感知类方法(Compressed Sensing, CS)^[40]等，这些方法利用信号历史参数化模型，提高分辨率和对比度，减少旁瓣假峰和相干斑^[41]。非参数化方法可以直接通过谱分析得到高度维像，更适用于自然地物，比如植被、冰雪的反演；参数化方法需要估计场景内散射点数量，更适用于人造地物，比如城市的三维重建。图4所示基于MUSIC的成像方法^[38]与基于ESPRIT的成像方法对人造目标的处理结果^[42]，其中图4(a)和图4(b)为海上船只结果对比，图4(c)和图4(d)为Mig25飞机结果对比。

4 层析SAR主要应用

4.1 植被垂直结构反演

植被状态是反映区域生态环境的重要标志之一，同时作为自然资源和碳储存库，对全球碳循环

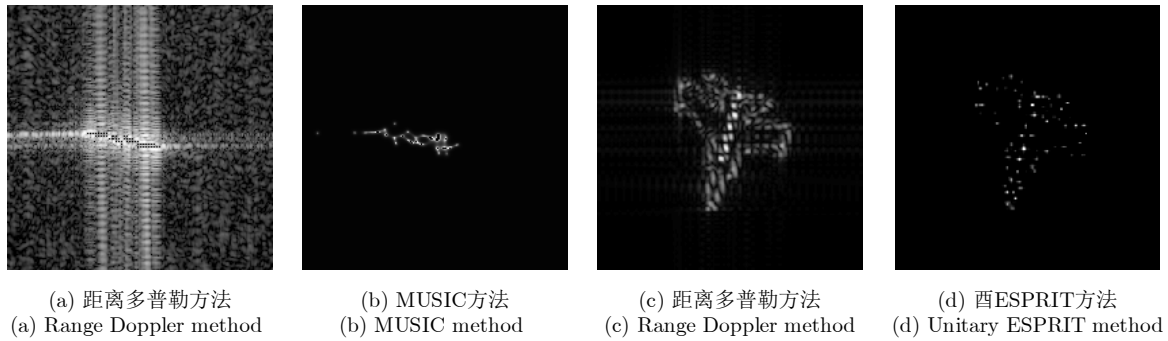


图4 人造目标成像结果对比

Fig. 4 Manmade targets imaging results comparison

和区域气候变化发挥重要作用^[43]。植被的实地监测可提供最准确的数据参数,但涉及昂贵且费时的野外工作。利用层析技术对植被场景进行三维成像,提取植被垂直结构剖面后向散射信息,可以得到植被高度、地上生物量、叶面积密度、垂直结构密度等参数与回波信号的关系,建立植被参数反演模型^[9]。目前层析SAR应用研究也主要集中在植被参数反演方面,主要分为森林参数探测和高杆农作物反演两个方向。

森林结构是森林生态学的重要因素,但是目前没有可用的全球森林结构图,仅存在少量的粗分辨率图,且仅显示了森林结构的组成部分(例如,距MODIS和ICESat的森林高度,分辨率为1 km)^[44]。早期的森林参数提取是在理论分析基础上的实验性研究。1998年DLR使用机载SAR数据进行了层析成像实验研究,首次提取了实验区的植被高度信息^[5]。2006年DLR利用E-SAR试验系统开展了机载L波段和P波段的层析SAR实验,获取了11轨数据,反演了区域的森林的生物量和层析切片,这是第1次展示较大森林面积的P波段层析SAR图像。同年,Cloude^[45]首次提出极化干涉相干层析理论,并利用仿真实验验证了其森林地上生物量的定量反演潜力,该实验中还提出了一种基于时域反投影算法的层析成像聚焦方法,此方法利用原始传感器位置和成像目标之间的几何关系,无需引入任何近似值^[46],避免了影像配准带来的误差。

随着应用需求的推动,欧空局(European Space Agency, ESA)联合众多研究机构推出面向森林探测的BIOMASS卫星计划,意在从全球森林结构和生物量研究碳循环^[7],为此该卫星计划依托E-SAR, F-SAR系统实施了大量机载飞行项目,验证传感器在森林、雪冰探测中的能力,包括BioSAR, TropiSAR, IceSAR等项目。

2007年ESA利用DLR的机载E-SAR系统开展了BioSAR机载层析SAR森林飞行验证实验,在瑞

典北部Krycklan流域的Remningstorp森林地区获取了P波段和L波段的极化层析数据, P波段水平基线8 m, L波段水平基线6 m, 获得了森林的垂直结构,并利用激光雷达进行验证,精度可达3 m^[47,48]。2011年, Frey and Meier改进了时域反投影(Time Domain Back Projection, TDBP)层析SAR成像处理方法,结合谱估计方法对2007年获取的数据集重新处理,结果表明L波段可以检测到冠层和地面,而P波段可以将树冠和下面的地表完全区分^[49]。

2012年, ESA^[50]又推出了TropiSAR项目探测Biomass计划的森林观测性能,在法国ONERA地区获取了P波段层析SAR数据,垂直分辨率约为20 m,森林高度反演范围为20~40 m,在不假设任何物理模型或采用超分辨率技术的情况下相干聚焦,可以在多达3个独立的层中映射场景复后向散射系数的三维分布,且垂直结构分析发现,在地面层中存在二面角散射,地形坡度对森林最内层的后向散射影响较小。为更好了解BIOMASS层析成像对热带地区森林生物量和高度反演的能力, Minh等人^[51]利用TropiSAR项目获取的数据生成了BIOMASS卫星仿真数据,处理后得到了热带雨林的垂直分布形状与树高,为BIOMASS卫星计划提供了算法支持。通过分析不同高度处的层析复后向散射系数与森林地上生物量(Above-Ground Biomass, AGB)之间的相关性,发现后向散射信号与冠层上部(20~40 m)的AGB之间存在高度相关性,而较低的层相关性较差^[52]。利用一个简单的AGB模型,在分辨率为125×125 m²(1.5公顷)时,AGB制图精度可以达到RMSE为10%~15%^[51]。

2015年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和DLR联合推出AfriSAR项目,开始在非洲加蓬(Gabon)热带雨林地区实施机载森林结构调查项目,利用DLR的F-SAR系统、NASA的无人机SAR系统以及激光雷达LVIS系统获取了P波段和L波段的森林

层析SAR数据,对比激光雷达数据,反演精度可达2~5 m^[53,54]。随后,结合TropiSAR实验与AfriSAR实验对L波段和P波段数据反演森林的垂直结构估计能力进行了综合评估,得出P波段和L波段反演树高的均方根误差分别为3.02 m和3.68 m^[44]。图5给出了Paracou热带森林和Boreal Krycklan森林在L波段和P波段的TomoSAR反演的森林树高切片,白线表示激光雷达测量得出的森林最高高度,结果表明P波段受外部因素影响较小,具有更强的反演能力^[44]。

除了森林监测之外,DLR在2014年推出CROPEX项目,利用机载多基线SAR进行农作物物候期生长高度监测,主要研究C波段反演农作物的三维极化散射特征,并将其与土壤和植被参数的时变散射特征进行响应分析。研究表明对于玉米等高杆植物,可以通过使用植被垂直廓线、垂直散射剖面的质心、体散射强度来检测初始生长,但随着生长,植物中水的重新分布将会增加反演难度;对于谷物等低杆植物,主要从垂直剖面、垂直散射剖面的质心、以及地表散射与体散射功率比的变化进行干枯监测^[55,56]。未来的研究应考虑如何利用多基线SAR数据进一步研究植被含水量的物理反演,以及通过对植被生物物理参数在不同频率上的敏感性差异研究,推测多频率观测的有效性。

当前机载实验数据的研究结果表明通过反演平

面和高度维的信息,TomoSAR可以估算植被的范围和结构信息,并且结合极化信息可以在三维空间上厘清植被不同层面的散射机制。复杂的垂直散射剖面反映了雷达实际接收的森林后向散射统计值,包含了传播路径引起的任何功率损耗。理想情况下,应知道并补偿每个植被层的衰减,根据雷达接收数据进行直接估算垂直剖面本身就是一个严重的不适应问题,因此在森林观测中应当使用HH极化通道或长波信号减小多路径衰减的影响。星载TomoSAR技术的主要问题之一是由于获取时间的差异导致的时间去相干,目前星载数据多用于比较稳定的目标(如城市建筑),但只要重访时间不超过4天,森林观测中的植被变化量是可以接受的^[51];而采用减小时间去相关的观测方式和处理技术,如类似Tandem结构的双星观测和新型单航过处理技术,还可以更好地对森林等自然环境目标进行三维信息提取。此外,结合植被垂直结构散射模型进行层析SAR散射特征分析,形成一种可以表征植被水平和垂直结构的算子,进而提高植被参数反演精度将是该领域的前沿课题。层析处理技术可为后续的生物量估计提供支持,利用层析技术进行植被地上参数估测可解决光学遥感估测常规方法无法获得植被垂直结构的问题,大范围动态监测植被地上生物量,随着2022年BIOMASS卫星的发射,届时将迎来层析SAR应用研究的高潮。

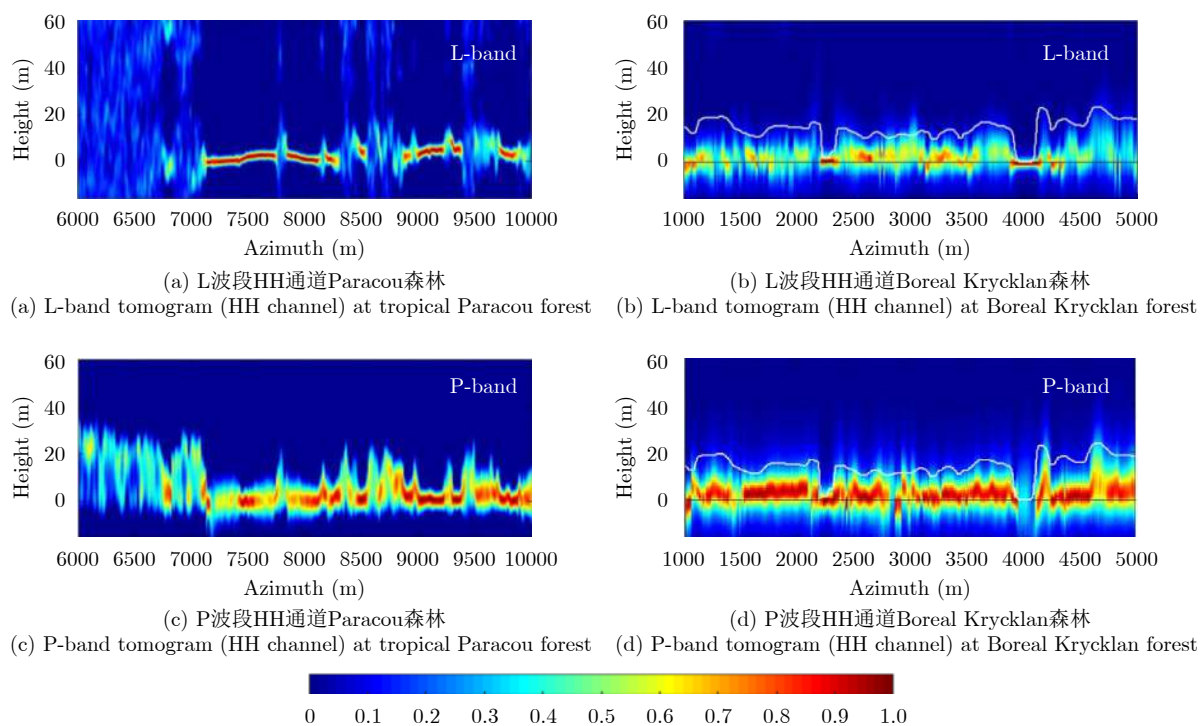


图5 TomoSAR反演的森林树高切片^[44]

Fig. 5 Forest tree height transects inverted by TomoSAR^[44]

4.2 冰川内部结构反演

冰川是气候变化最为敏感的要害之一,冰川的面积与长度、运动状态、物质平衡等参数变化是气候变化的直接体现,探究冰川参数变化在水资源利用、海平面上升、冰川灾害防治等方面有重要作用。层析SAR技术在获取地物三维信息,剖析地物内部结构方面具有独特的优势,是研究冰川垂直结构最可行的遥感方法之一。目前层析SAR在冰川结构方面的研究主要在机载平台和地基平台开展,尚未有星载平台的研究。

机载层析SAR在冰川结构反演中的研究主要集中在L波段和P波段SAR。2006年5月和2008年7月Kansas大学的研究人员利用自主研发的多相中心甚高频(Very High Frequency, VHF)雷达系统在Greenland的Summit Camp地区获取了机载层析SAR数据,利用针对VHF雷达数据的三维层析冰测深方法,对冰盖表面形貌、冰厚度以及冰盖表面和床层的雷达后向散射系数进行测量,可以达到5 m的表面精度以及14 m的冰厚精度^[57,58]。2011年,NASA的IceBridge项目利用Kansas大学研发的多通

道相干雷达测深仪MCoRDS系统在格陵兰岛南部的Isunnguata Sermia冰川进行数据获取,使用了天底探测和层析SAR处理技术对冰川厚度进行研究,层析成像数据较好地捕捉了冰川底部地形,特别是深处的冰川低谷部分^[59]。2012年ESA的IceSAR项目开展了首次P波段层析雪冰探测,评估了P波段合成孔径雷达获取冰下结构信息的能力,探测了格陵兰岛的冰川、冰盖运动速度、消融和表面结构,分析了冰面到50 m范围内的冰层内部结构^[60]。2014年,ESA又开展了AlpTomoSAR机载实验,探测L波段雷达的层析冰川观测能力,AlpTomoSAR实验证明了干雪条件下可以清晰区分雪冰交界面,提取浅层冰川的基岩交界面、冰裂隙等信息,且层析SAR可以得到与低频探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)一致的结果。图6结果显示由于过渡冰-岩石的介电特性的强烈梯度,均匀冰下的基岩表现出非常尖锐的反射,不同极化状态的层析SAR提取的冰川-基岩交界面与探地雷达的结果一致性较好,且交叉极化具有更好的效果^[61]。

2014年,DLR推出HoloSAR项目,利用F-SAR

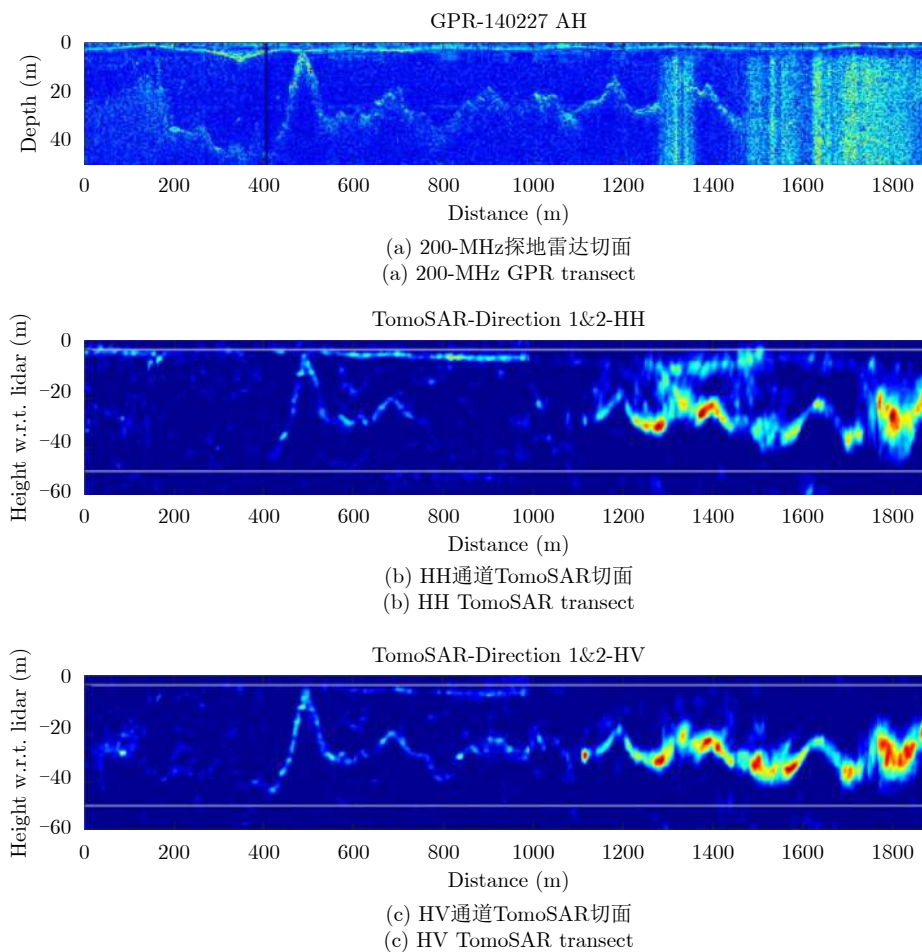


图6 阿尔卑斯山冰川反演实验^[61]

Fig. 6 Reversion experiment of Alps Glacier^[61]

实验系统搭载L波段传感器,在瑞士蒙特罗莎的Findel冰川进行合成孔径雷达层析成像,联合极化信息可以区分雪、冰原和基岩,并且由于采用多角度测量减小了山体阴影造成的影响,能更好地了解冰川的后向散射^[62]。

此外,地基合成孔径雷达(Ground-Based SAR, GB-SAR)也在冰层探测方面有一定的发展。2011年Chai等人^[63]使用地基多模调频连续波雷达GPRI-II系统获取了GB-SAR数据集,提出了一种使用区域生长的差分层析SAR(Differential TomoSAR, D-TomoSAR)处理框架,并在瑞士Aletsch冰川的采用GB-SAR数据进行实验,形成了第1个差分合成孔径雷达层析成像结果,可以探测到冰川上的大规模形变。2013年Yitayew^[10]采用X波段GB-SAR研究海冰的三维成像,成像结果能够区分不同分界面,包括空气积雪交界面,积雪海冰交界面和海冰海水交界面,其结果可用于简化雪冰电磁散射模型。

层析SAR在冰层探测方面的应用显示出了巨大的潜力,但如果在聚焦处理中未正确考虑到波在冰层中的传播速度,则所得图像可能会出现失真,因此冰川中电磁波的运行速度校正是应用中的重要问题,可以通过射线追踪技术来解决这一问题,而以层析SAR数据本身推断波传播速度的三维分布校正方法将成为层析SAR冰川探测算法的发展方向。层析SAR对冰川的观测不仅可以获取冰川表面散射,还可以揭示冰下复杂的体散射,包括冰裂隙,雪冰过渡层、基岩等散射信号,因此传统根据均匀消光构造的指数衰减模型不足以表征冰川散射特性,基于层析SAR的冰川观测信号分析将推动冰川电磁散射机制的深入研究。大量的重复航过数目使得层析SAR的应用成本很高,考虑双基和多基SAR系统,配合超分辨率信号处理可以提高层析SAR的观测效率,而后续面向森林观测的长波段(P和L波段)卫星载荷以及多星组网观测的实现,将对干旱环境中的地质结构反演、森林覆盖的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)精度提高以及冰川流速观测将产生重要意义,将使层析SAR技术可以在冰川探测中发挥巨大的作用。

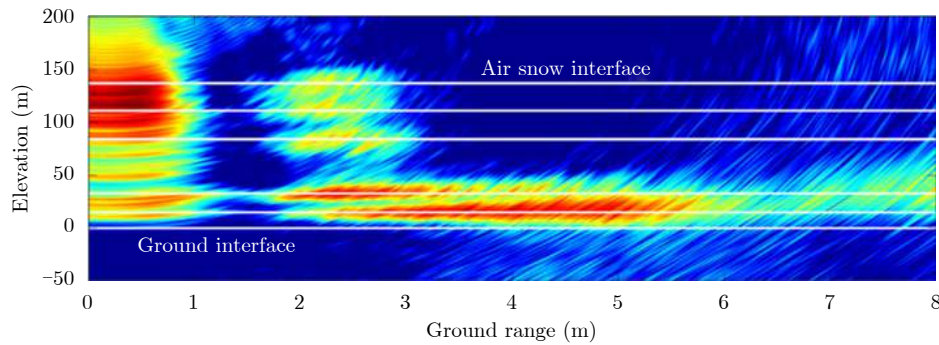
4.3 分层积雪参数反演

积雪对气候系统具有显著的正反馈作用,是全球变化研究的关键变量之一。积雪表面的高反照率,内部冰/水相变产生的潜热,以及雪层的绝热效应显著地影响着全球能量、水循环过程进而影响气候变化。多基线SAR测量在垂直结构变化探测方面具有优势,基于InSAR复相干系数或相位的参数反演方法能获取积雪参数及其变化信息,但目前研

究集中在单层积雪反演,无法获得多层积雪的变化机制和特征^[64]。层析SAR技术可以得到积雪内部分层结构信息,进而反演获得多层积雪参数,但微波穿透积雪的过程涉及许多因素,例如:雪/空气界面,雪/土壤界面,内部冰层等的多种相互作用、传播速度的变化^[11]。目前层析SAR对积雪的探测还停留在地基雷达,尚未有有机载、星载的实验尝试。

2013年ESA的AlpSAR项目在奥地利阿尔卑斯山开展实验,采用X和Ku波段地基合成孔径雷达获取积雪层析SAR数据,该设备距离向分辨率为3.75 cm,方位向分辨率为4 cm,X波段垂直分辨率为15 cm,Ku波段垂直分辨率为10 cm,采用TDBP处理技术得到了清晰的积雪垂直剖面,结果表明雪/空气界面和积雪上层的后向散射能量很弱,积雪底层后向散射能量最强,通过对积雪分层折射率的反演,可计算得到积雪分层介电常数、积雪密度等参数^[11,65],图7为该实验数据反演积雪分层的结果,从图中可以看出层析反演结果可以较好的捕捉积雪内部分层结构。2015年,ESA推出SnowLab项目针对SnowScat散射计设备进行了改造,使其具备了探测积雪垂直结构的能力,2015年—2018年的3个积雪季在瑞士格里姆塞尔山口附近进行实验,获得了积雪层析剖面的完整时间序列数据,通过研究发现积雪层中融冻结壳/冰层可被识别,这与许多学者使用不同方式测量的结果一致,表现出了层析雷达成像在雪层结构无损检测和分析中的潜力^[66]。2016—2017年积雪季NASA的SnowEx项目在美国科罗拉多州弗雷泽部署了3种频率(9.6 GHz, 13.5 GHz和17.2 GHz)的全极化调频连续波便携式SAR系统,该系统安装在一个升降轨道的框架上,能够对每个雷达通道的三维变化进行全面重建,实验获得的积雪分层剖面图与地面测量结果一致,同时,该系统能高频次的观测积雪在昼夜内的融化和再冻结的过程^[67,68]。

层析SAR对积雪的探测将对积雪资源精细化评估带来契机,层析观测模式可以探测不同雪层之间的界面,进而反演获得多层积雪参数,这是目前除人工测量之外的遥感观测方式所不能达到的,其中主要问题之一是如何解决自由空间传播假设对雪层聚焦的影响。层析SAR构建的积雪三维结构不仅可以给出积雪深度,还可以通过雪层的折射效应计算雪密度,因此层析SAR在提高积雪水当量精度方面的巨大潜力。同时,地基层析雷达的结果显示,层析SAR技术将推动积雪特性反演、雪层间电磁相互作用的物理机制研究,结合积雪物理模型的层析SAR雪层反演技术将成为应用发展的新方向,未来

图7 地基层析SAR积雪结构观测结果^[11]Fig. 7 Snow structure observation result of ground based tomography SAR^[11]

极化层析SAR的深入研究将面向更多的积雪关键参数反演,如积雪粒径、密度、分层结构等。

4.4 建筑物信息提取

由于城区密集的建筑物互相遮挡,传统SAR系统在观测城区时会收到多次散射、叠掩和阴影等现象的影响,使得解译工作很难进行。层析SAR技术可以分离同一像元内的多个散射体目标,提取每个散射体的三维空间位置及后向散射强度信息,分析城市建筑高度等信息,而在层析SAR基础上发展起来的差分层析SAR技术还可以获取高度维的形变信息,形成包括方位向、距离向、高度向以及时间维的四维成像^[69]。目前建筑物信息提取方面的应用主要分为基于高分辨率卫星数据的三维信息重构和考虑城市建筑物物理结构的层析SAR关键算法研究两方面。

目前,大部分城区三维结构重建采用了卫星数据,2009年—2014年,意大利电磁环境研究中心的Fornaro研究团队^[69-72]利用ERS, TerraSAR-X等卫星数据开展城市三维结构重建研究,利用差分层析技术研究了意大利那不勒斯市区建筑的形变、城区以及桥梁的热变形,提出了基于多视层析影像的滤波和叠掩分离算法,为多视层析SAR的三维精细重建、建筑物及基础设施监控提供了可能性。2010年—2019年DLR的Zhu研究团队^[13,40,73-75]利用高分辨率星载SAR数据对层析SAR的城市应用进行了持续的研究,提出了一系列提高高度分辨率的方法,包括基于L1范数正则化的方法、基于压缩感知的方法、基于非局部均值(nonlocal means)等,重构单个建筑物和整个城市区域的三维信息,生成四维点云(具有与激光雷达相当的点密度),在柏林市验证的平均像素精度约为93.84%,还利用非线性关系分离建筑物的运动或变形,可以用于动态城市模型重建。

此外,城市区域干扰因素很多,人为影响较大,因此与城市建筑物空间结构、热效应等有关的层析SAR关键算法近年来得到了大力发展。2015年Ma等人^[76]利用44幅TerraSAR-X图像对城市中的建

筑物进行层析处理,发现由于受热向上膨胀的作用,热量与建筑物高度之间有着线性变形关系,该技术有助于监测具有不同结构设计的新建混凝土建筑物。2019年,Aghababae等人^[12]针对层析数据获取中采样不规则以及采样点较少的问题,在标准谱估计器的基础上引入了正则化项,基于图割的优化算法将三维成像问题转化为能量最小化问题,利用E-SAR L波段层析数据生成三维点云。通常在城市地区的层析处理中会用到稀疏先验条件,但是这样假设往往错过了部分城市表面,尤其是平坦区域,例如地面或屋顶,因此Rambour等人^[77]研究了一种基于流网络最优切割计算的曲面分割算法,利用TerraSAR-X数据在三维重建过程中改善城市表面信息。2020年,Rambour等人^[78]分析了层析SAR在城区数据处理中一些关键问题,包括散射体三维定位、散射体选择、对底层目标的准确描述和恢复等问题,对目前TomoSAR技术用于城市建筑提取的不同方法进行了详细的比较,提出了一套适合精确重建市区的正则化和后处理的处理方案,并利用TerraSAR-X和Cosmo-SkyMed数据进行了城区形变监测方面的应用,采用聚束(spotlight)模式的TomoSAR数据能够达到7 m的高度分辨精度,而条带(stripmap)模式能够达到18.7 m的高度分辨精度。

城区的场景复杂,存在大量形状、高度各异的建筑物,SAR影像的地物特征更加复杂,导致二维图像难以解译。层析SAR数据可以进行建筑结构的层析重建,给出三维城市结构乃至四维形变(三维结构与表面形变速率)信息,未来层析SAR城市观测技术发展方向将面向统一框架下的城区多要素反演方法,实现城市动态监测,这必将是后续城市遥感领域的热点研究之一。城市的层析成像对辐射精度要求较低,这与自然介质层析成像显著不同,因此基于稀疏结构的三维重建算法是建筑物应用中的主流方法,但存在两个实际问题影响其更广泛的应用,其一是需要大量重复航过数据,通常需要20景

以上,即使是算法模型优化后也至少需要进行11景才能实现有效参数范围内的合理重构;其二是高昂的计算代价,因此很难扩展到大规模行业应用中。结合垂直结构信息和极化信息,根据散射机制组合选择不同的城市模型,开展高精度的相位定标技术、针对平滑表面和植被区的处理技术、时间序列大气延迟纠正技术、双基和多基系统处理技术,以及机器学习技术在层析SAR中的应用将是未来城市监测中的重要研究方向。

5 结束语

本文介绍了层析SAR机理和处理流程,并针对层析SAR主要应用方向国内外研究现状进行了综述,分析了层析SAR成像技术的研究热点,总结了其在植被垂直结构、冰川厚度、积雪深度、建筑物结构方面的应用研究前景,并对未来的发展趋势进行了展望。目前的研究集中在植被和建筑物等领域,星载层析SAR观测主要集中在建筑物信息提取方面,有关冰冻圈的层析SAR应用研究较少,尤其是积雪方面还停留在地基观测。近年来SAR卫星的研制正在朝着星座化、高重访密度的方向发展,随着BIOMASS, Sentinel-1A/B雷达卫星组网、COSMO-SkyMed星座、RCM (Radarsat Constellation 1, 2, 3)星座计划、SAOCOM-CS卫星组网和我国SAR卫星组网计划等新型空间探测概念的推出和实施,多波段、多极化联合处理技术的升级,层析SAR必将在不久的将来得到更广泛便捷的应用。

参 考 文 献

- [1] 吴一戎. 多维度合成孔径雷达成像概念[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 135-142. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13047](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13047).
WU Yirong. Concept of multidimensional space joint-observation SAR[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 135-142. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13047](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13047).
- [2] GINI F and LOMBARDINI F. Multibaseline cross-track SAR interferometry: A signal processing perspective[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2005, 20(8): 71-93. doi: [10.1109/MAES.2005.1499278](https://doi.org/10.1109/MAES.2005.1499278).
- [3] KNAELL K. Three-dimensional SAR from curvilinear apertures[C]. 1996 IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, USA, 1996: 220-225.
- [4] FORNARO G, LOMBARDINI F, PAUCIULLO A, et al. Tomographic processing of interferometric SAR data: Developments, applications, and future research perspectives[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 41-50. doi: [10.1109/MSP.2014.2312073](https://doi.org/10.1109/MSP.2014.2312073).
- [5] REIGBER A and 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. doi: [10.1109/36.868873](https://doi.org/10.1109/36.868873).
- [6] FORNARO G, LOMBARDINI F, and SERAFINO F. Three-dimensional multipass SAR focusing: Experiments with long-term spaceborne data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 702-714. doi: [10.1109/TGRS.2005.843567](https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.843567).
- [7] QUEGAN S, LE TOAN T, CHAVE J, et al. The European space agency BIOMASS mission: Measuring forest above-ground biomass from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 227: 44-60. doi: [10.1016/j.rse.2019.03.032](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.032).
- [8] TELLO M, CAZCARRA-BES V, PARDINI M, et al. Forest structure characterization from SAR tomography at L-band[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(10): 3402-3414. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2859050](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2859050).
- [9] AGHABABAEI H, FERRAIOLI G, FERRO-FAMIL L, et al. Forest SAR tomography: Principles and applications[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(2): 30-45. doi: [10.1109/MGRS.2019.2963093](https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2963093).
- [10] YITAYEW T G, FERRO-FAMIL L, ELTOFT T, et al. Tomographic imaging of fjord ice using a very high resolution ground-based SAR system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(2): 698-714. doi: [10.1109/TGRS.2016.2613900](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2613900).
- [11] REKIOUA B, DAVY M, FERRO-FAMIL L, et al. Snowpack permittivity profile retrieval from tomographic SAR data[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2017, 18(1): 57-65. doi: [10.1016/j.crhy.2015.12.016](https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.12.016).
- [12] AGHABABAEI H, FERRAIOLI G, SCHIRINZI G, et al. Regularization of SAR tomography for 3-D height reconstruction in urban areas[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(2): 648-659. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2889428](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2889428).
- [13] ZHU Xiaoxiang and BAMLER R. Superresolving SAR tomography for multidimensional imaging of urban areas: Compressive sensing-based TomoSAR inversion[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 51-58. doi: [10.1109/MSP.2014.2312098](https://doi.org/10.1109/MSP.2014.2312098).
- [14] 丁赤飏, 仇晓兰, 徐丰, 等. 合成孔径雷达三维成像——从层析、阵列到微波视觉[J]. 雷达学报, 2019, 8(6): 693-709. doi: [10.12000/JR19090](https://doi.org/10.12000/JR19090).
DING Chibiao, QIU Xiaolan, XU Feng, et al. Synthetic aperture radar three-dimensional imaging——from TomoSAR and array InSAR to microwave vision[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 693-709. doi: [10.12000/JR19090](https://doi.org/10.12000/JR19090).
- [15] 匡辉, 杨威, 王鹏波, 等. 多方位角多基线星载SAR三维成像方法研究[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 685-695. doi: [10.12000/](https://doi.org/10.12000/)

- JR18073.
- KUANG Hui, YANG Wei, WANG Pengbo, *et al.* Three-dimensional imaging algorithm for multi-azimuth-angle multi-baseline spaceborne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 685–695. doi: [10.12000/JR18073](https://doi.org/10.12000/JR18073).
- [16] 张斌, 韦立登, 胡庆荣, 等. 基于四阶累积量的机载多基线SAR谱估计解叠掩方法[J]. *雷达学报*, 2018, 7(6): 740–749. doi: [10.12000/JR18087](https://doi.org/10.12000/JR18087).
- ZHANG Bin, WEI Lideng, HU Qingrong, *et al.* Solution to layover problem in airborne multi-baseline SAR based on spectrum estimation with fourth-order cumulant[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 740–749. doi: [10.12000/JR18087](https://doi.org/10.12000/JR18087).
- [17] 张冰尘, 王万影, 毕辉, 等. 基于压缩多信号分类算法的森林区域极化SAR层析成像[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(3): 625–630. doi: [10.11999/JEIT140584](https://doi.org/10.11999/JEIT140584).
- ZHANG Bingchen, WANG Wanying, BI Hui, *et al.* Polarimetric SAR tomography for forested areas based on compressive multiple signal classification[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 625–630. doi: [10.11999/JEIT140584](https://doi.org/10.11999/JEIT140584).
- [18] 李文梅, 陈尔学, 李增元. 多基线干涉层析SAR提取森林树高方法研究[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(6): 815–821.
- LI Wenmei, CHEN Erxue, and LI Zengyuan. Approach for forest height extraction using multi-baseline interferometric tomographic SAR[J]. *Forest Research*, 2014, 27(6): 815–821.
- [19] 廖明生, 魏恋欢, 汪紫芸, 等. 压缩感知在城区高分辨率SAR层析成像中的应用[J]. *雷达学报*, 2015, 4(2): 123–129. doi: [10.12000/JR15031](https://doi.org/10.12000/JR15031).
- LIAO Mingsheng, WEI Lianhuan, WANG Ziyun, *et al.* Compressive sensing in high-resolution 3D SAR tomography of urban scenarios[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(2): 123–129. doi: [10.12000/JR15031](https://doi.org/10.12000/JR15031).
- [20] 秦斐, 梁兴东, 张福博, 等. 基于机器学习的阵列层析SAR建筑物目标提取方法[J]. *信号处理*, 2019, 35(2): 176–186. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2019.02.003](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2019.02.003).
- QIN Fei, LIANG Xingdong, ZHANG Fubo, *et al.* Building target extraction methods in array SAR tomography based on machine learning[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(2): 176–186. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2019.02.003](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2019.02.003).
- [21] 解金卫, 李真芳, 王帆, 等. 基于幅相不一致准则的建筑物SAR层析成像[J]. *雷达学报*, 2020, 9(1): 154–165. doi: [10.12000/JR19062](https://doi.org/10.12000/JR19062).
- XIE Jinwei, LI Zhenfang, WANG Fan, *et al.* SAR tomography imaging for buildings using an inconsistency criterion for amplitude and phase[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 154–165. doi: [10.12000/JR19062](https://doi.org/10.12000/JR19062).
- [22] FORNARO G, SERAFINO F, and SOLDVIERI F. Three-dimensional focusing with multipass SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(3): 507–517. doi: [10.1109/TGRS.2003.809934](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.809934).
- [23] COLE-RHODES A A, JOHNSON K L, LEMOIGNE J, *et al.* Multiresolution registration of remote sensing imagery by optimization of mutual information using a stochastic gradient[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(12): 1495–1511. doi: [10.1109/TIP.2003.819237](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819237).
- [24] LE MOIGNE J, NETANYAHU N S, and EASTMAN R D. *Image Registration for Remote Sensing*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 215–239.
- [25] CHUREESAMPANT K and SUSAKI J. Automatic GCP extraction of fully polarimetric SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 137–148. doi: [10.1109/TGRS.2012.2236890](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2236890).
- [26] LI Hui, MANJUNATH B S, and MITRA S K. A contour-based approach to multisensor image registration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(3): 320–334. doi: [10.1109/83.366480](https://doi.org/10.1109/83.366480).
- [27] HUANG Lei and LI Zhen. Feature-based image registration using the shape context[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(8): 2169–2177. doi: [10.1080/01431161003621585](https://doi.org/10.1080/01431161003621585).
- [28] SUO Zhiyong, LI Zhenfang, and BAO Zheng. A new strategy to estimate local fringe frequencies for InSAR phase noise reduction[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4): 771–775. doi: [10.1109/LGRS.2010.2047935](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2047935).
- [29] OSMANOĞLU B, SUNAR F, WADOWINSKI S, *et al.* Time series analysis of InSAR data: Methods and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 90–102. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003).
- [30] FERRETTI A, PRATI C, and ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8–20. doi: [10.1109/36.898661](https://doi.org/10.1109/36.898661).
- [31] HOOPER A, SEGALL P, and ZEBKER H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(B7): B07407.
- [32] YANG Bo, XU Huaping, LIU Wei, *et al.* An improved stanford method for persistent scatterers applied to 3D building reconstruction and monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1807. doi: [10.3390/rs11151807](https://doi.org/10.3390/rs11151807).
- [33] LANARI R, MORA O, MANUNTA M, *et al.* A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1377–1386. doi: [10.1109/TGRS.2004.828196](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.828196).

- [34] ZHAO Changjun, LI Zhen, ZHANG Ping, *et al.* Improved maximum likelihood estimation for optimal phase history retrieval of distributed scatterers in InSAR stacks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 186319–186327. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2961154](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961154).
- [35] ZHAO Changjun, LI Zhen, TIAN Bangsen, *et al.* A ground surface deformation monitoring InSAR method using improved distributed scatterers phase estimation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(11): 4543–4553. doi: [10.1109/JSTARS.2019.2946729](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2946729).
- [36] DEGRAAF S R. SAR imaging via modern 2-D spectral estimation methods[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(5): 729–761. doi: [10.1109/83.668029](https://doi.org/10.1109/83.668029).
- [37] 张福博, 刘梅. 基于频域最小二乘APES的非均匀多基线 SAR层析成像算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1568–1573. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.01184](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.01184).
ZHANG Fubo and LIU Mei. Uneven multi-baseline SAR tomography base on frequency domain least squares Amplitude and Phase Estimation (APES)[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(7): 1568–1573. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.01184](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.01184).
- [38] 张平, 商建, 杨汝良. 一种有效的二维MUSIC超分辨SAR成像算法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(1): 184–187.
ZHANG Ping, SHANG Jian, and YANG Ruliang. Efficient 2D MUSIC superresolution SAR imaging method[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(1): 184–187.
- [39] ERTIN E, MOSES R L, and POTTER L C. Interferometric methods for three-dimensional target reconstruction with multipass circular SAR[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(3): 464–473.
- [40] ZHU Xiaoxiang and BAMLER R. Tomographic SAR inversion by L_1 -Norm regularization—the compressive sensing approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(10): 3839–3846. doi: [10.1109/TGRS.2010.2048117](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2048117).
- [41] ÇETIN M, STOJANOVIĆ I, ÖNHON N Ö, *et al.* Sparsity-driven synthetic aperture radar imaging: Reconstruction, autofocus, moving targets, and compressed sensing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 27–40.
- [42] ZHANG Ping, LI Zhen, and CHEN Quan. 2D uesprit superresolution SAR imaging algorithm[C]. 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, 2010: 4067–4070.
- [43] TEBALDINI S, MINH D H T, D’ALESSANDRO M M, *et al.* The status of technologies to measure forest biomass and structural properties: State of the art in SAR tomography of tropical forests[J]. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40(4): 779–801. doi: [10.1007/s10712-019-09539-7](https://doi.org/10.1007/s10712-019-09539-7).
- [44] EL MOUSSAWI I, MINH D H T, BAGHDADI N, *et al.* Monitoring tropical forest structure using SAR tomography at L- and P-band[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1934. doi: [10.3390/rs11161934](https://doi.org/10.3390/rs11161934).
- [45] CLOUDE S R. Polarization coherence tomography[J]. *Radio Science*, 2006, 41(4): RS4017.
- [46] FREY O, MORSDORF F, and MEIER E. Tomographic imaging of a forested area by airborne multi-baseline p-band SAR[J]. *Sensors*, 2008, 8(9): 5884–5896. doi: [10.3390/s8095884](https://doi.org/10.3390/s8095884).
- [47] TEBALDINI S and 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. doi: [10.1109/TGRS.2011.2159614](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2159614).
- [48] TEBALDINI S. Single and multipolarimetric SAR tomography of forested areas: A parametric approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(5): 2375–2387. doi: [10.1109/TGRS.2009.2037748](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2037748).
- [49] FREY O and MEIER E. 3-D time-domain SAR imaging of a forest using airborne multibaseline data at L- and P-bands[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3660–3664. doi: [10.1109/TGRS.2011.2128875](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2128875).
- [50] D’ALESSANDRO M M and 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. doi: [10.1109/LGRS.2011.2170658](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2170658).
- [51] MINH D H T, 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. doi: [10.1109/TGRS.2014.2331142](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2331142).
- [52] MINH D H T, LE TOAN T, ROCCA F, *et al.* SAR tomography for the retrieval of forest biomass and height: Cross-validation at two tropical forest sites in French Guiana[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 138–147. doi: [10.1016/j.rse.2015.12.037](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.037).
- [53] PARDINI M, TELLO M, CAZCARRA-BES V, *et al.* L- and P-band 3-D SAR reflectivity profiles versus lidar waveforms: The AfriSAR case[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(10): 3386–3401. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2847033](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2847033).
- [54] EL MOUSSAWI I, MINH D H T, BAGHDADI N, *et al.* L-band UAVSAR tomographic imaging in dense forests: Gabon forests[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 475. doi: [10.3390/rs11050475](https://doi.org/10.3390/rs11050475).
- [55] JOERG H, PARDINI M, HAJNSEK I, *et al.* Sensitivity of

- SAR tomography to the phenological cycle of agricultural crops at X-, C-, and L-band[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(9): 3014–3029. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2845127](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2845127).
- [56] JOERG H, PARDINI M, HAJNSEK I, *et al.* 3-D scattering characterization of agricultural crops at C-band using SAR tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(7): 3976–3989. doi: [10.1109/TGRS.2018.2818440](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2818440).
- [57] WU Xiaoqing, JEZEK K C, RODRIGUEZ E, *et al.* Ice sheet bed mapping with airborne SAR tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3791–3802. doi: [10.1109/TGRS.2011.2132802](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2132802).
- [58] PADEN J, AKINS T, DUNSON D, *et al.* Ice-sheet bed 3-D tomography[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(195): 3–11. doi: [10.3189/002214310791190811](https://doi.org/10.3189/002214310791190811).
- [59] JEZEK K, WU X, PADEN J, *et al.* Radar mapping of isunnguata sermia, greenland[J]. *Journal of Glaciology*, 2013, 59(218): 1135–1146. doi: [10.3189/2013JG12J248](https://doi.org/10.3189/2013JG12J248).
- [60] BANDA F, DALL J, and TEBALDINI S. Single and multipolarimetric P-band SAR tomography of subsurface ice structure[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(5): 2832–2845. doi: [10.1109/TGRS.2015.2506399](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2506399).
- [61] TEBALDINI S, NAGLER T, ROTT H, *et al.* Imaging the internal structure of an alpine glacier via L-band airborne SAR tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 7197–7209. doi: [10.1109/TGRS.2016.2597361](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2597361).
- [62] PONCE O, PRATS P, SCHEIBER R, *et al.* Polarimetric 3-D imaging with airborne holographic SAR tomography over glaciers[C]. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, Italy, 2015: 5280–5283.
- [63] CHAI Huiming, LV Xiaolei, and XIAO Ping. Deformation monitoring using ground-based differential SAR tomography[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(6): 993–997. doi: [10.1109/LGRS.2019.2938233](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2938233).
- [64] 李震, 李治显, 田帮森, 等. 基于准晶体近似的多层积雪 InSAR 散射模型[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 61(8): 1112–1126. doi: [10.1007/s11430-017-9178-3](https://doi.org/10.1007/s11430-017-9178-3).
- LI Zhen, LI Zhixian, TIAN Bangsen, *et al.* An InSAR scattering model for multi-layer snow based on Quasi-Crystalline Approximation (QCA) theory[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(8): 1112–1126. doi: [10.1007/s11430-017-9178-3](https://doi.org/10.1007/s11430-017-9178-3).
- [65] TEBALDINI S and FERRO-FAMIL L. High resolution three-dimensional imaging of a snowpack from ground-based sar data acquired at X and Ku band[C]. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, 2013: 77–80.
- [66] FREY O, WERNER C L, CADUFF R, *et al.* Tomographic profiling with snowscat within the ESA snowlab campaign: Time series of snow profiles over three snow seasons[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018: 6512–6515.
- [67] XU Xiaolan, BALDI C A, DE BLESER J W, *et al.* Multi-frequency tomography radar observations of snow stratigraphy at fraser during SnowEx[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018: 6269–6272.
- [68] XU Xiaolan, YUEH S, and TSANG L. Theoretical modeling of multi-frequency tomography radar observations of snow stratigraphy[C]. 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019: 4823–4825.
- [69] FORNARO G, REALE D, and SERAFINO F. Four-dimensional SAR imaging for height estimation and monitoring of single and double scatterers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 224–237. doi: [10.1109/TGRS.2008.2000837](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2000837).
- [70] FORNARO G, PAUCIULLO A, REALE D, *et al.* Multilook SAR tomography for 3-D reconstruction and monitoring of single structures applied to COSMO-SKYMED data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2776–2785. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2316323](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2316323).
- [71] FORNARO G, SERAFINO F, and REALE D. 4-D SAR imaging: The case study of rome[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 236–240. doi: [10.1109/LGRS.2009.2032133](https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2032133).
- [72] REALE D, FORNARO G, PAUCIULLO A, *et al.* Tomographic imaging and monitoring of buildings with very high resolution SAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 661–665. doi: [10.1109/LGRS.2010.2098845](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2098845).
- [73] SHI Yilei, ZHU Xiaoxiang, and BAMLER R. Nonlocal compressive sensing-based SAR tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(5): 3015–3024. doi: [10.1109/TGRS.2018.2879382](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2879382).
- [74] ZHU Xiaoxiang, WANG Yuanyuan, MONTAZERI S, *et al.* A review of ten-year advances of multi-baseline SAR interferometry using TerraSAR-X data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1374. doi: [10.3390/rs10091374](https://doi.org/10.3390/rs10091374).
- [75] SHAHZAD M, MAURER M, FRAUNDORFER F, *et al.* Buildings detection in VHR SAR images using fully convolution neural networks[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(2): 1100–1116.

doi: [10.1109/TGRS.2018.2864716](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2864716).

- [76] MA Peifeng, LIN Hui, LAN Hengxing, *et al.* Multi-dimensional SAR tomography for monitoring the deformation of newly built concrete buildings[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 106: 118–128. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2015.04.012](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.04.012).
- [77] RAMBOUR C, DENIS L, TUPIN F, *et al.* Urban surface reconstruction in SAR tomography by graph-cuts[J].

Computer Vision and Image Understanding, 2019, 188: 102791. doi: [10.1016/j.cviu.2019.07.011](https://doi.org/10.1016/j.cviu.2019.07.011).

- [78] RAMBOUR C, BUDILLON A, JOHNSY A C, *et al.* From interferometric to tomographic SAR: A review of synthetic aperture radar tomography-processing techniques for scatterer unmixing in urban areas[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(2): 6–29. doi: [10.1109/MGRS.2019.2957215](https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2957215).

作者简介



李 震(1966–), 男, 湖北武汉人, 研究员、博士生导师。主要从事地物目标散射机制、SAR地表参数反演与冰冻圈环境变化等方面的研究。

E-mail: lizhen@aircas.ac.cn



张 平(1979–), 女, 河北沧州人, 高级工程师。主要从事合成孔径雷达信号处理、超分辨率图像处理、极化定标等方面的研究。

E-mail: zhangping@aircas.ac.cn



乔海伟(1997–), 男, 甘肃张掖人, 博士研究生。主要从事雷达干涉、层析雷达、积雪遥感等方面的研究。

E-mail: qhwwgis@gmail.com



赵常军(1991–), 男, 甘肃陇南人, 博士研究生。主要从事InSAR技术及应用研究。

E-mail: zhaocj@radi.ac.cn



周建民(1978–), 男, 山东聊城人, 副研究员。主要从事雷达遥感机理与应用、全球变化遥感等方面的研究。

E-mail: zhoujm@aircas.ac.cn



黄 磊(1982–), 男, 山东邹城人, 副研究员, 主要从事微波遥感、极化散射机制方面的研究。

E-mail: huanglei@radi.ac.cn