

文章编号: 2095-4980(2019)01-0046-07

灾害遥感中 SAR 三维成像技术的研究与应用

梁兴东¹, 卜运成^{*1,2}, 张福博¹, 王 宇¹, 陈龙永¹

(1.中国科学院电子学研究所 微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 随着遥感技术的发展及防灾减灾救灾经验的积累, 中国在灾害遥感研究与应用服务上取得了丰硕的成果。总结了我国灾害遥感技术的发展, 从数据获取方式和成像方法 2 方面阐述了合成孔径雷达(SAR)三维成像技术的研究情况, 重点介绍了国内外 SAR 三维成像技术在灾害遥感中的应用现状及潜力。将 SAR 三维成像技术广泛用于灾害遥感还需要在系统设计、成像分辨力提升、观测场景建模及可视化、灾害系统理论及灾害遥感信息融合等方面进行重点研究。

关键词: 自然灾害; 遥感; 合成孔径雷达; 三维成像; 应用潜力

中图分类号: TN959

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0046

Research and application of SAR 3D imaging technology in disaster remote sensing

LIANG Xingdong¹, BU Yuncheng^{*1,2}, ZHANG Fubo¹, WANG Yu¹, CHEN Longyong¹

(1.National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the development of remote sensing technology and the accumulation of experience in disaster prevention and relief, China has made fruitful results in disaster remote sensing research and application services. The stages of development of China's disaster remote sensing technology are introduced. 3D Synthetic Aperture Radar(SAR) imaging technology is discussed from two aspects: data acquisition mode and 3D imaging method. The application potential of SAR 3D imaging in disaster remote sensing is highlighted. It is pointed out that the system design, image resolution enhancement, observation scene modeling and visualization, disaster system theory and disaster remote sensing information fusion will be the focuses of future research.

Keywords: natural disaster; remote sensing; Synthetic Aperture Radar; 3D imaging; research progress

近年来全球自然灾害呈现发生次数多、频率高、破坏大、范围广的态势, 严重威胁人类的生命财产安全, 极大地妨碍国家的经济建设和社会进步, 因此各国在防灾减灾救灾等工作中进行了深入和广泛的研究^[1-3]。其中, 现代遥感技术的发展和运用, 在防灾减灾救灾工作中起着日益重要的作用。我国地域辽阔, 是世界上自然灾害最为严重的国家^[4]。面对严峻的国内国际灾害遥感形势, 我国灾害遥感技术经历了从无到有, 分辨力从低到高, 遥感手段从单一到多元的发展历程。

合成孔径雷达(SAR)作为一种主动式微波传感器, 可以采用航空或航天平台获取观测区域的二维图像, 2 种平台配合使用既可以对全球进行常规性的观测, 也可针对灾害区域重点详查。相对于其他遥感手段, SAR 具有全天候全天候特点, 这在灾害遥感中显得尤其重要, 可以及时对灾情进行评估和监测, 为减灾救灾及灾后重建选址工作等提供决策支撑, 因此 SAR 成像技术在灾害遥感中发挥了越来越重要的作用。近年来, 随着技术的发展, SAR 已经从获取高分辨的二维图像发展到多基线 SAR、圆迹 SAR、曲线 SAR 和阵列 SAR 等多种方式获得高分辨的三维图像^[5-6]。由于 SAR 三维图像能够带来第三维高度信息, 呈现灾区的三维信息, 因此在对灾区的房屋倒塌评估、基础设施损毁评估、紧急转移安置区规划与监测、恢复重建监测等方面提供更加直观的信息, 为减灾救灾的决策工作部署提供重要的信息支撑。

收稿日期: 2017-10-06; 修回日期: 2018-01-22

*通信作者: 卜运成 email: buyuncheng@163.com

1 SAR 三维成像技术

1.1 SAR 三维数据获取方式

目前, SAR 三维成像数据获取方式从平台角度可以分为车载、机载和星载 3 种;按平台轨迹可以划分为圆迹、曲线和多基线 3 种;从观测视角来看可以分为下视和侧视 2 种;从数据获取的次数可以分为多航过获取和单航过获取 2 种。

从平台角度划分, 车载^[7]、机载^[8-9]和星载^[10-12]是 3 种常用的 SAR 数据获取平台。车载平台小巧灵活, 改装与调试方便, 数据获取的成本比较低, 常用于 SAR 系统的初期调试与指标验证。机载平台获取的 SAR 数据信噪比较高, 具备快速响应能力, 但飞行受气流影响较大, 稳定性较差。星载平台稳定度高, 观测范围大, 具备全球观测能力, 但相对机载平台信噪比较低、重访时间相对较长^[13]。

按平台轨迹划分, SAR 三维成像方式可以分为圆迹、曲线和多基线^[14-18]等, 如图 1 所示, 其中圆周是曲线的一种特殊形式。多基线 SAR 系统可以通过单通道多次航过或阵列 SAR 单次航过获取三维信息。曲线和圆周轨迹进行 SAR 数据获取对 SAR 载荷平台的姿态控制要求较高, 因此通常是机载平台使用, 但由于曲线轨迹和圆周轨迹能够在高度向构成合成孔径, 因此可以通过单传感器单次数据获取即可获得观测场景三维信息。

按观测视角划分, 在对地观测应用中可分为下视和侧视 2 种方式。下视三维成像 SAR 系统典型的是 ARTINO^[19-20], 受叠掩影响小, 在城市和陡峭山区等区域的观测中具有优势, 但下视方式测绘带宽一般较窄, 工作效率较低且跨航向分辨率较低。侧视三维成像 SAR 系统测绘带宽较宽, 效率高且分辨率高^[21]。

从数据获取次数来看, 可以分为单航过和多航过 2 种方式。单航过方式一次航过就可以获得观测区域的三维信息, 效率非常高, 而且时间相干性高, 但要实现 SAR 三维成像需在平台上搭载多个传感器构成高度向的合成孔径^[22], 而且需要考虑多通道幅相一致性问题, 这对平台尺寸和系统制造水平提出了要求。多航过方式^[23-24]可以使用同一个传感器, 而且基线长度不受平台的限制, 但多航过的方式受时间去相干影响较大, 不同航次获取的数据图像畸变较大, 多次航过的方式效率较低并且也会带来较高的成本。

从灾害遥感对大范围灾情的快速普查、重点区域的详查、灾情快速评估等要求考虑, 结合上述各种数据获取方式的优缺点, 机载单航过侧视 SAR 三维成像、星载单/多航过侧视三维成像具备较强的应用潜力。

1.2 SAR 三维成像方法

相对于常规的二维 SAR 成像, SAR 三维成像最大的优势是可以获得观测区域的第三维信息——高度信息。考虑到相对于距离, 高度向上可实现的合成孔径较小, 因此高度向上的聚焦可以从三维聚焦过程中分离出来^[25]。从而 SAR 三维成像技术可以先采用二维 SAR 成像再进行高度维聚焦重建的方式。目前 SAR 二维成像处理算法已经比较成熟, 重点在于高度维聚焦, 目前高度维聚焦方法主要有以下几类:

1.2.1 基于傅里叶变换的三维成像方法

无论是通过多航过还是单航过获取的 N 幅 SAR 二维图像, 对其进行配准、幅相一致性定标及相位补偿等步骤之后, 取这 N 幅 SAR 二维图像的某一个距离-方位单元 (r_0, x_0) 的复观测数据构成一个 N 维数组, 其中第 n 个数据对应第 n 幅 SAR 图像中该距离-方位单元的复数据 g_n ^[26]:

$$g_n = \int_{\Delta s} \gamma(s) \exp(-j2\pi\xi_n s) ds \quad (1)$$

式中: $\gamma(s)$ 为高程向位置为 s 处的目标后向散射系数; Δs 为目标在高程向可能分布的区域; 空间频率 $\xi_n = \frac{-2b_n}{\lambda r_0}$ 为

高程向天线位置 b_n 的函数, λ 为工作波长。观察式(1)可发现, 对 N 维复观测数据进行傅里叶变换便可以高效获得目标的高程向位置及其后向散射系数, 这就是基于傅里叶变换的三维成像方法的基本思想。它的高度维分辨能力 $\rho_s = \frac{\lambda r_0}{2B}$ 称为瑞利分辨力, 其中 B 为垂直视线方向的基线长度。根据瑞利分辨力公式, 在现有一些星载和机载 SAR 系统的参数下, 高度维分辨力通常在数十米甚至上百米量级, 如 TerraSAR 的高度维分辨力为 30 m 左右^[27]。这样的高度维分辨力远小于距离和方位维的分辨能力, 因此基于傅里叶变换的三维成像方法实用性不强。

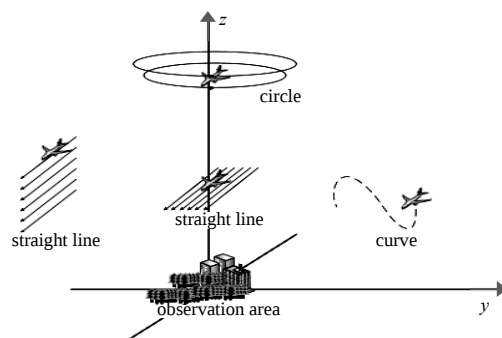


Fig.1 Sketch map of platform track
图 1 平台轨迹示意图

1.2.2 利用叠掩和阴影长度重建高度信息

在高分辨力 SAR 二维图像中, 当具有目标的某些先验知识时(如建筑物的楼体侧面与地面垂直), 利用 SAR 二维图像中可精确测量的阴影和叠掩的长度, 可以计算出目标的高度^[28]。该方法可以利用单通道 SAR 图像实现目标高度的计算, 但它强烈依赖于目标的先验知识, 得不到目标的后向散射系数估计。此外, 由该方法的原理可知, 它不能对同一个距离-方位单元内的叠掩目标进行分辨, 即只具备高度测量能力, 而不具备高度维分辨能力。

1.2.3 基于现代谱估计的三维成像方法

在阵列信号处理领域, 现代谱估计的方法得到广泛而深入的研究。 N 幅 SAR 二维图像可以等效为 N 个阵列天线自发自获取的阵列数据, SAR 三维成像本质上也可以视为阵列信号处理问题, 因此利用阵列信号处理中的波达方向(Direction Of Arrival, DOA)估计技术, 可以在基线数很少的情况下达到很高的高度维成像分辨力^[29]。

1.2.4 基于压缩感知的三维成像方法

压缩感知于 2006 年提出^[30], 之后在各学科引起了广泛的研究和讨论。其基本原理如下^[31]:

假设一个离散信号向量 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^N$ 在某个正交基 $\boldsymbol{\psi}$ 上的稀疏度为 K , 则信号可以表示为:

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^N \varphi_i \alpha_i = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\alpha} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}$ 是信号 $\mathbf{y}$ 在正交基 $\boldsymbol{\psi}$ 上展开后的系数向量, 其稀疏度为 K ; φ_i 代表正交基 $\boldsymbol{\psi}$ 的第 i 行。

根据压缩感知理论, 当信号 $\mathbf{y}$ 进行线性投影得到一个随机向量 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^M$, 满足 $M = O(K \lg(N/K)) \ll N$, 则信号 $\mathbf{y}$ 可以由 $\mathbf{x}$ 以极高的概率实现精确重构。由线性投影得到的信号 $\mathbf{y}$ 的测量值 $\mathbf{x}$ 表示为:

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\phi} \mathbf{y} = \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\Theta} \boldsymbol{\alpha} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\phi}_{M \times N}$ 为测量矩阵; $\boldsymbol{\Theta}_{M \times N}$ 为感知矩阵。根据压缩感知相关理论, 对于 $\boldsymbol{\alpha}$ 的求解问题转化为对如下最优化问题的求解

$$\min \|\boldsymbol{\alpha}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{x} = \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\alpha} \quad (4)$$

在压缩感知研究中, 具有代表性的求解算法有以正交匹配追踪算法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)为代表的贪婪追踪算法和以基追踪(Basis Pursuit, BP)算法为代表的凸优化类算法。在高分辨力 SAR 系统里, SAR 二维图像中每个距离-方位单元内的目标数在高度向满足稀疏特性, 可以利用压缩感知方法对目标在高度维的分布情况进行高概率超分辨成像^[21,27]。

综上所述, 基于现代谱估计的三维成像方法和基于压缩感知的三维成像方法具有高度向的超分辨性能, 能够提供高精度的三维信息, 因此在灾害遥感中更具有研究和应用价值。

2 SAR 三维成像技术在灾害遥感中的应用潜力

SAR 三维成像自 20 世纪 90 年代提出以来, 国外学者已经进行了很多研究。2000 年, Reigber 等利用德国 Oberpfaffenhofen 地区的 L 波段 E-SAR 机载数据进行了多基线三维成像实验, 提出一种合成孔径的思路解决高度向的聚焦问题, 这是第一次机载极化 SAR 三维成像实验, 验证了多基线 SAR 的三维成像能力, 成像结果如图 2 所示^[32]。

2011 年, 朱晓香和 Bamler 提出了一种 SL1MMER 方法, 分析了该方法的超分辨能力。利用 TerraSAR 和 TerraSAR-X 的数据进行了三维成像, 结果如图 3 所示。通过对结果的切片分析, 验证了该方法的超分辨性能^[33]。

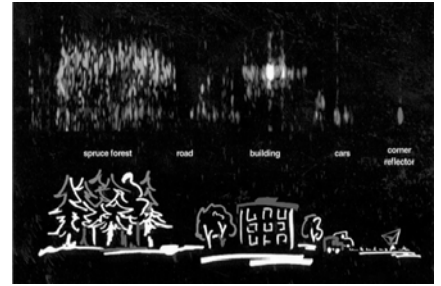


Fig.2 3D imaging result of E-SAR
图 2 E-SAR 三维成像结果



(a) Google image of observation region



(b) SAR 3D imaging result and slice portion

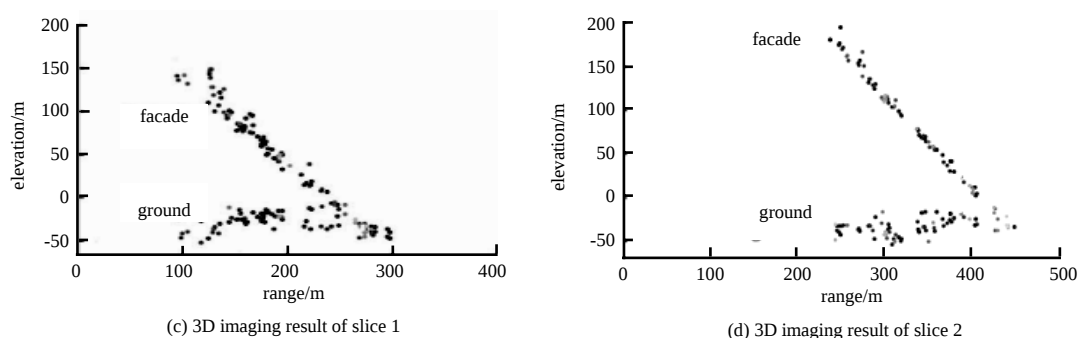


Fig.3 3D imaging results of TerraSAR

图 3 TerraSAR 三维成像结果

由于 SAR 侧视成像的特性, 从一个侧面获取的数据只能重建观测区域一侧的三维图像, 如在建筑物的三维重建中, 另一侧将会出现阴影。在一些特殊应用中, 特别是在灾害监测与评估, 希望得到观测区域无阴影图像。2014 年朱晓香和 Bamler 采用德国柏林地区 TerraSAR-X 的升轨和降轨数据, 利用基于压缩感知的方法分别对其进行了三维成像, 然后将升轨和降轨的三维成像结果进行了点云融合, 获得了观测区域的无阴影图像, 如图 4 所示。图中颜色代表高度信息, 灰色区域是时间去相干区域^[34]。这次实验验证了 SAR 三维成像技术具备生成大面积观测区域无阴影三维图像的能力, 说明了 SAR 三维成像技术在灾害遥感中巨大的应用潜力。

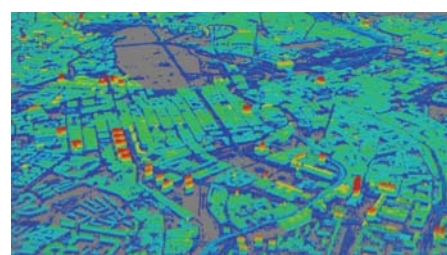


Fig.4 Fusion of two-point clouds generated from TerraSAR-X data stacks of ascending and descending orbits

图 4 TerraSAR-X 升轨和降轨点云融合图像

SAR 三维成像技术在森林遥感中也得到了应用。2015 年, Schmitt 等利用德国 MEMPHIS 系统获取的一发四收 Ka 波段 SAR 数据, 采用最大似然的方法对德国慕尼黑“Nordfriedhof”地区的一片树林区域进行了三维成像实验^[35], 成像结果如图 5 所示, 图中可以清晰分辨树冠形状和位置。该实验展示了 SAR 三维成像技术在森林植被生物量和森林碳储量估算、森林火灾灾情监测与评估等森林灾害遥感中的巨大潜力。

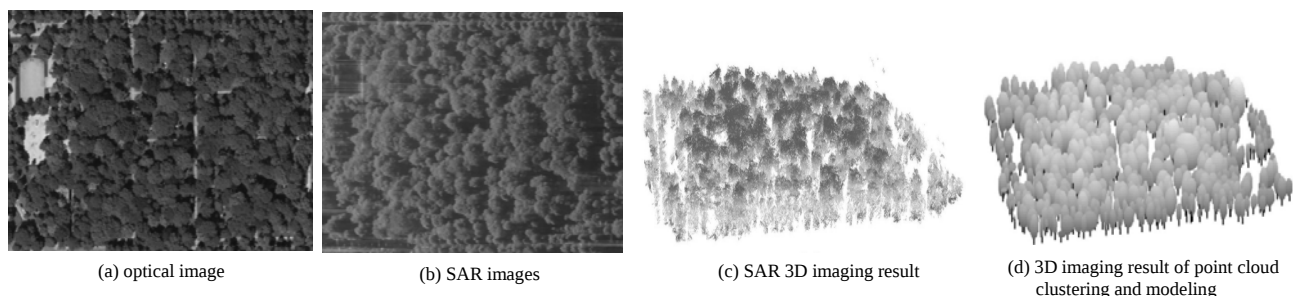


Fig.5 SAR 3D imaging results of forest

图 5 树林的 SAR 三维成像结果

我国 SAR 三维成像技术研究起步较晚, 电子科技大学、国防科技大学、西安电子科技大学等单位在 SAR 三维成像技术的理论研究中取得了不少成果^[36-37]。中科院电子所在 SAR 三维成像技术方面的研究处于国内领先水平, 并于 2014 年研制成功了国内首套机载阵列干涉 SAR 三维成像系统, 该系统以单发多收的模式进行工作, 可以单航过获取观测区域的三维图像^[21]。

2015 年 4 月, 中科院电子所利用自主研发的阵列干涉 SAR 三维成像系统, 在山西某县进行了飞行试验, 成功获取了城市的高分辨率三维图像。利用观测区域的双侧数据, 获得了国内首幅城市小区建筑物群的双侧三维高分辨力图像, 如图 6 所示, 与光学图像比对可知, 建筑物重建结果良好, 楼前地物信息、楼基折线结构得到了准确重建, 特别地, 重建的建筑物楼体侧面的窗台等纹理信息清晰可见。该实验极大地推动了我国 SAR 三维成像技术的发展, 显示了其在灾害遥感中城市遥感监测的巨大应用潜力。

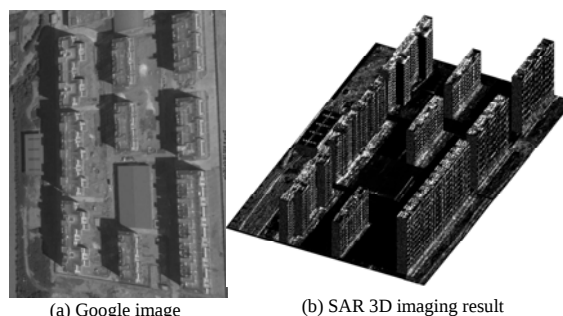


Fig.6 SAR 3D imaging results of urban area

图 6 城市区域 SAR 三维成像结果

2015 年中科院电子所利用阵列干涉 SAR 三维成像系统进行了山区地形的机载 SAR 三维成像实验, 图 7 是山西某县山区的三维成像结果。图中可以清晰直观的看到山区沟谷、坡度、坡形、高度分布等信息。由于暴雨或者地震等自然灾害很容易造成滑坡、崩塌和泥石流等次生山地灾害, 对山区城镇村庄、道路交通、水利水电工程和通信基础设施等造成严重破坏, 给灾区抗震救灾和灾后重建带来巨大的困难。该次实验说明了 SAR 三维成像技术是一种切实有效的山区灾害遥感手段, 能够为移民安置点设置、灾区重建、选址及后期抢险提供依据。

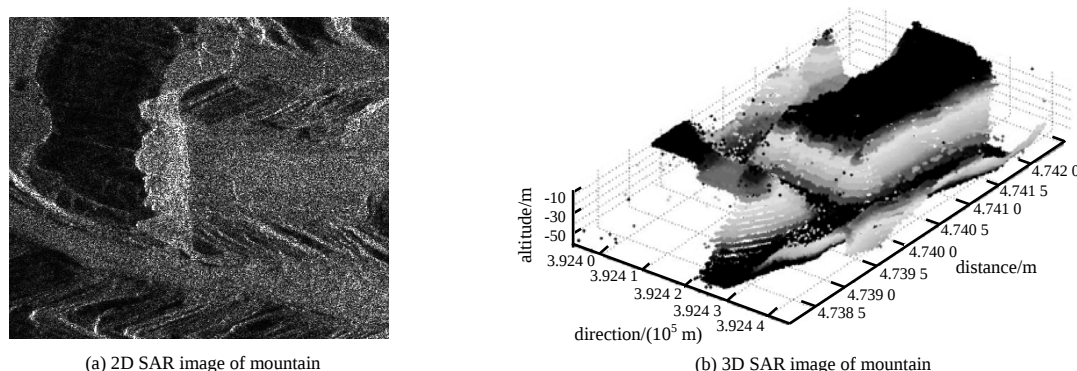


Fig.7 SAR 3D imaging results of mountain area
图 7 山区的 SAR 三维成像结果

3 未来的研究重点

目前针对 SAR 三维成像技术的数据获取、成像方法等都有一定的研究基础, 并且在森林、城市及山区遥感中得到了初步应用, 然而, 将 SAR 三维成像技术广泛用于灾害遥感仍需对以下内容进行重点研究:

1) SAR 三维成像系统设计。SAR 三维成像系统该采用何种数据获取方式需要根据灾害遥感需求选择, 单一的方式不能满足需求。若采用单传感器多航过方式, 一方面要面临多航过的时效问题, 不太适用于实时性要求较高的情况(如灾源定位, 灾情快速评估等); 另一方面要面临时间去相干以及轨道控制精确度差带来的三维重建效果变差的问题。若采用多传感器单航过即阵列方式, 虽然不存在时间去相干问题, 但基线数目和基线长度都受到严重限制, 导致 SAR 三维成像系统分辨率较低。其次, SAR 系统的阵列构型设计、重轨的轨迹设计及通道数目设计等还需要合理考虑, 否则会带来分辨率降低、最大可分辨的目标数减少、信号相关性差、栅瓣等问题。

2) 成像分辨率提升。在有限的基线长度、基线数目等条件限制下, 高度维瑞利分辨能力十分有限, 虽然现代谱估计方法和压缩感知方法具有超分辨能力, 但由于受到通道幅相误差、信噪比、基线数目、时间去相干等条件的影响, 超分辨算法对高度维分辨能力的提升有限。因此, 为了得到更高分辨力 SAR 三维图像, 需要从增大基线长度、增加通道数目等角度进行考虑, 如利用阵列系统进行重轨飞行; 另一方面, 需要进行超分辨算法改进以及系统的幅度、相位、相位中心位置、耦合等参数定标方面的研究。

3) 观测场景建模、可视化以及自动化研究。一些 SAR 三维成像方法的高度维高分辨性能依赖于对观测场景建模的准确度, 目前简单规则建筑物的建模研究较多, 但对于复杂场景的建模还有待进一步发展。观测场景三维信息的可视化研究, 目前的手段主要有点云和贴片方式, 两者都是静态图像, 包含的信息有限。未来可以探究动态的展示方法, 如多角度融合的全景图像以及视频等。SAR 三维成像的自动化研究还有很长的路要走, 目前仅在滤波方法、聚类方法及建筑物自动提取等方面开展初步研究。

4) 深入研究灾害系统理论, 探索 SAR 三维成像技术在灾害预防中的应用, 如深入研究滑坡等地质灾害的发生规律, 利用 SAR 三维成像技术的精细形变监测特点, 提前对灾害进行预报, 尽量减轻灾害损失。

5) 与现有灾害遥感信息的融合。随着遥感技术的发展, 可见光、红外和微波等大量不同传感器搭载于不同平台以不同方式获得了同一地区的大量不同维度不同分辨力的遥感数据, 这为防灾减灾救灾工作提供了丰富的数据。如何将 SAR 三维成像结果与这些数据进行融合, 对损失评估、防灾减灾救灾、辅助决策具有重要的意义。

4 结论

灾害遥感中 SAR 三维成像技术的研究与应用, 可以充分发挥主动式微波遥感全天时全天候的特点, 综合利用机载和星载平台可以对全球进行常规性的观测, 对灾害起到预测及预防作用, 在突发灾害时可以对灾区进行快速普查以确定受灾方位, 以对灾情进行更细致的判断及灾害损失的评估。SAR 三维成像技术带来的观测区域高

分辨力三维信息给决策部门提供了更加丰富、精细和直观的图像,为减灾救灾的决策工作部署提供重要的信息支撑。目前,国内外的 SAR 三维成像技术在森林遥感、城市监测及山区遥感等领域的实验结果表明了其在灾害遥感中的巨大应用潜力。未来还需要在系统设计、成像分辨力提升、观测场景建模及可视化、灾害系统理论、灾害遥感信息融合等方面进行研究,以促进 SAR 三维成像技术广泛用于灾害遥感中。

参考文献:

- [1] BALA P,TOM S,SHINDE R. GIS and remote sensing in disaster management[J]. Imperial Journal of Interdisciplinary Research, 2017,3(5):732-737.
- [2] BRAKENRIDGE G R,ANDERSON A E,NGHIEM S V,et al. Flood warnings flood disaster assessments and flood hazard reduction:the roles of orbital remote sensing[C]// 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Honolulu,HI,USA:[s.n.], 2003:29-37.
- [3] MA Y,CHEN F,LIU J,et al. An automatic procedure for early disaster change mapping based on optical remote sensing[J]. Remote Sensing, 2016,8(4):272.
- [4] 范一大,吴玮,王薇,等. 中国灾害遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2016,20(5):1170-1184. (FAN Yida,WU Wei,WANG Wei, et al. Research progress of disaster remote sensing in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2016,20(5):1170-1184.)
- [5] 杜磊. 阵列天线视合成孔径雷达三维成像模型、方法与实验研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2010. (DU Lei. Three-dimensional imaging model,method and experimental study of array antenna down synthetic aperture radar[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2010.)
- [6] 尹智龙,王可东,高意峰. 基于 InSAR 的三维地形匹配导航技术的研究与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):717-722. (YIN Zhilong,WANG Kedong,GAO Yifeng. Implementation of 3D terrain matching navigation technology based on InSAR data[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5): 717-722.)
- [7] WANG W Q. Near-space vehicle-borne SAR with reflector antenna for high-resolution and wide-swath remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012,50(2):338-348.
- [8] FRANCESCHETTI G,IODICE A,PERNA S,et al. Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2006,44(10):2851-2860.
- [9] MOREIRA A,HUANG Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1994,32(5):1029-1040.
- [10] ZHANG T,LYU X,HAN B,et al. Repeat-pass SAR interferometry experiments with Gaofen-3:a case study of Ningbo area[J]. [EB/OL].(2017-03-31)[2017-10-06]. <https://arxiv.org/abs/1704.01067>.
- [11] WERNINGHAUS R,BUCKREUSS S. The TerraSAR-X mission and system design[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010,48(2):606-614.
- [12] MOREIRA A,MITTERMAYER J,SCHEIBER R. Extended chirp scaling algorithm for air and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1996,34(5): 1123-1136.
- [13] MICHAEL S,UWE S. Maximum-likelihood-based approach for single-pass synthetic aperture radar tomography over urban areas[J]. IET Radar,Sonar & Navigation, 2014,8(9):1145-1153.
- [14] ORIOT H,CANTALLOUBE H. Circular SAR imagery for urban remote sensing[C]// European Conference on Synthetic Aperture Radar. Friedrichshafen,Germany:[s.n.], 2008.
- [15] PONCE O,PRATS P,RODRIGUEZ-CASSOLA M,et al. Processing of circular SAR trajectories with fast factorized back projection[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver,BC,Canada:[s.n.], 2011.
- [16] TEBALDINI S,ROCCA F. Multibaseline polarimetric SAR tomography of a boreal forest at P and L bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012,50(1):232-246.
- [17] GINI F,LOMBARDINI F,MONTANARI M. Layover solution in multi-baseline SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002,38(4):1344-1356.
- [18] REIGBER A,MOREIRA A. First demonstration of airborne SAR tomography using multi-baseline L-band data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1999,38(5):2142-2152.
- [19] KLARE J,WEISS M,PETERS O,et al. ARTINO:a new high resolution 3D imaging radar system on an autonomous airborne platform[C]// 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Denver,CO,USA:[s.n.], 2006.
- [20] WEIB M,PETERS O,ENDER J. A three dimensional SAR system on an UAV[C]// 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona,Spain:[s.n.], 2007.

- [21] 张福博. 阵列干涉 SAR 三维重建信号处理技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015. (ZHANG Fubo. Research on signal processing of 3D reconstruction in linear array synthetic aperture radar interferometry[D]. Beijing:The University of Chinese Academy of Sciences, 2015.)
- [22] SCHMITT M,STILLA U. Compressive sensing based layover separation in airborne single-pass multi-baseline InSAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013,10(2):313-317.
- [23] ASKNE J,SANTORO M. Multitemporal repeat pass SAR interferometry of boreal forests[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2005,43(6):1219-1228.
- [24] HOMER J, LONGSTAFF I D, SHE Z, et al. High resolution 3-D imaging via multi-pass SAR[J]. IEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation, 2002,149(1):45-50.
- [25] 闵锐. 机载 SAR 三维成像理论及关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (MIN Rui. Research on airborne SAR three-dimensional imaging theory and key technologies[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [26] FORNARO G, REALE D. 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.
- [27] ZHU X X, BAMLER R. Super-resolution power and robustness of compressive sensing for spectral estimation with application to spaceborne tomographic SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012,50(1):247-258.
- [28] 邹斌, 许可, 张腊梅, 等. SAR 图像建筑物三维信息提取方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2009,7(2):95-101. (ZOU Bin, XU Ke, ZHANG Lamei, et al. Study on extraction methods of three-dimension information of buildings in SAR images[J]. Radar Science and Technology, 2009,7(2):95-101.)
- [29] 王永良. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. (WANG Yongliang. Theory and algorithm of spatial spectrum estimation[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2004.)
- [30] DONOHO L D. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006,52(4):1289-1306.
- [31] HU 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.
- [32] 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.
- [33] ZHU X X, BAMLER R. Demonstration of super-resolution for tomographic SAR imaging in urban environment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012,50(8):3150-3157.
- [34] ZHU X X, 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.
- [35] SCHMITT M, SHAHZAD M, ZHU X X. Reconstruction of individual trees from multi-aspect TomoSAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2015,165(2015):175-185.
- [36] 王青松, 时信华, 黄海风, 等. 星载干涉 SAR 阴影及叠掩区域相位重构方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010,32(4):699-702. (WANG Qingsong, SHI Xinhua, HUANG Haifeng, et al. Method of spaceborne InSAR shadow and layover phase reconstruction[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010,32(4):699-702.)
- [37] SHI J, ZHANG X, YANG J, et al. Surface-tracing-based LASAR 3D imaging method via multi-resolution approximation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(11):3719-3730.

作者简介:



梁兴东(1973-), 男, 西安市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高分辨力合成孔径雷达系统、干涉合成孔径雷达、成像处理及应用、实时数字信号处理等。

王 宇(1976-), 男, 西安市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为机载 SAR 定标和雷达信号处理。

卜运成(1991-), 男, 湖南省醴陵市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为多通道 SAR 三维成像、阵列干涉 SAR 系统定标。

张福博(1983-), 男, 河北省邢台市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为多通道 SAR 三维成像。

陈龙永(1979-), 男, 安徽省淮北市人, 博士, 研究员, 研究方向为新概念雷达系统设计与实现。