DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.004

李新武[1] 郭华东[1] 彭星[2] 张露[1] 傅文学[1] 梁雷[1] 吴文瑾[1]

SAR 对地观测技术及应用新进展

摘要

自 1960 年 4 月诞生国际上第一部合成孔径雷达(SAR) 以来,SAR 技术及应用发展已进入一个新的阶段.在该阶段,对电磁波的波段、极化、振幅和相位等信息的利用更加深入和综合,其显著的技术特征为双/多站或星座观测、极化干涉测量、高时序高分宽幅测绘、三维/四维结构信息获取和超高分辨率观测,其显著的应用特征为面向全球性重大问题如全球变化和全球可持续发展实现地球表面动态过程高精细、大尺度和时间连续的监测和评估.本文首先介绍了 SAR 对地观测技术的研究背景及意义,然后就四种典型的先进 SAR 即极化 SAR、极化干涉 SAR、层析 SAR 和超高分辨率 SAR 论述了其近十年来的研究进展,最后,展望了未来这些先进 SAR 对地观测技术的发展趋势,并重点探讨了在多通道信息获取、多角度观测、高时相观测、分辨率和测绘幅宽提升等方面的发展趋势.

关键词

极化 SAR;极化干涉 SAR;层析 SAR;超高分辨率 SAR;进展与趋势

中图分类号 TN959

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-08

资助项目 国家自然科学基金(41571360)

作者简介

李新武,男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为环境雷达遥感.lixw@ aircas.ac.cn

彭星(通信作者),女,博士,副教授,主要研究方向为 SAR 层析遥感. pengxing@ cug.edu.cn

1 中国科学院空天信息创新研究院/数字地球重点实验室,北京,100094

2 中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院,武汉,430074

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,SAR)技术因其可以全天时全天候工作,不受云雾等天气的影响等优势,已经成为对地观测技术的一种核心技术,被大量用于解决人类所面临的资源、环境、生态系统等方面的问题.近年来,国内外相继建立了一系列区域、国家和全球性的对地观测研究计划,如德国宇航局的 TanDEM-L 计划、欧空局的 BIOMASS 计划等,极大地促进了 SAR 技术的蓬勃发展,涌现出许多先进的 SAR 技术,如极化干涉 SAR (PolInSAR)技术、三维层析 SAR(TomoSAR)或四维层析 SAR(D-TomoSAR)技术、超高分辨率 SAR(Ultra High Resolution SAR)技术等.这些先进的 SAR 对地观测技术进一步深入利用电磁波的波段、极化、振幅和相位等信息,其显著的技术特征为双/多站或星座观测、极化干涉测量、高时序高分宽幅测绘、三维/四维结构信息获取和超高分辨率观测,能够挖掘出地物目标更加丰富的细节信息,如内部结构特征和散射体散射机理等,其显著的应用特征为面向全球性重大问题如全球变化和全球可持续发展等,实现地球表面动态过程高精细、大尺度和时间连续的监测和评估,满足对全球或区域可持续发展和全球变化监测的迫切需求.

未来,新型 SAR 对地观测技术将继续朝着多通道、多观测角、高时相、高分辨率、高测绘带宽发展,在全球环境变化、全球森林监测、城市三维信息获取、资源勘察、环境监测与评价以及对月探测等领域中将发挥重要作用[1].

本文在总结近十年来四种典型的先进 SAR 对地观测技术的研究现状的基础上,即极化 SAR 技术、极化干涉 SAR 技术、层析 SAR 技术以及超高分辨率 SAR 技术,探讨了未来先进 SAR 对地观测技术的发展趋势,重点论述了先进 SAR 技术在多通道信息获取、多角度观测、高时相观测、分辨率和测绘幅宽提升等方面的发展.

1 国内外研究现状

1.1 极化 SAR

极化 SAR(Polarimetric SAR,PolSAR)因其对散射体的形状、方向等形态学参数以及介电常数敏感的特性,能够有效识别和分离目标地物不同类型的散射机制贡献[2],如表面散射、二面角散射和体散射等.近十年来,国内外学者围绕目标地物散射机制的精细识别做了进

一步的研究,主要可分为:

1)针对表面散射建模.Bragg 散射模型是目前常用的表面散射模型之一[3],针对该模型国内外学者做了大量的改进工作.如 2011 年,Iodice 等[4]提出了一种极化双尺度表面散射模型(Polarimetric Two-Scale Model,PTSM),该模型将散射平面看成是由许多随机倾斜的粗糙小平面组成,这种随机倾斜引起的粗糙度认为是大尺度,而每个小平面仍然认为是满足小尺度粗糙度条件的 Bragg 散射模型.目前,PTSM 主要用于裸土和农作物区域土壤湿度反演.2014 年,Chen 等提出的通用模型分解框架中,表面散射建模采用考虑旋转角影响的 Bragg 散射模型,但没有考虑旋转角的概率分布[5];2016 年,Martino 等提出了一种新的 X-Bragg 模型,区别在于假定旋转角服从均值为零的高斯分布,成功应用于基于 C 波段数据的小麦区域土壤湿度反演[6].

2)针对二面角散射建模.2012 年,Shan 等提出了一种旋转 Fresnel 模型,用来解决城区 45°方向角目标与体散射混合引起的解译模糊的问题[7];2014 年,Chen 等提出了考虑旋转角的 Fresnel 散射模型,解决由方向性建筑物引起的极化基旋转导致出现交叉散射分量的问题,提高了建筑物区域解译的可靠性[5];2015 年,Xiang 等也提出了面向交叉极化的二面角散射模型,区别在于假定旋转角服从附加主要旋转角的 cosine 分布,使得模型具有自适应性,可以有效抑制体散射高估现象并应用到城区分类[8];2016 年,Jagdhuber 考虑土壤粗糙度引起的去极化影响,特别是针对明显粗糙的农作物区域,提出了扩展的 Fresnel 散射模型,即 X-Fresnel 模型[9].X-Fresnel 模型一方面采用高斯或者指数函数描述粗糙表面导致的能量损失,另一方面同样引入一个旋转角,并假定其服从均值为零和一定宽度的均匀分布.由于穿透性和土壤条件的限制,该模型目前主要应用于长波(如 L 波段)观测的农作物区域.

3)针对体散射建模.2010 年,An 等从植被散射的随机性角度出发,提出了一种完全随机的体散射模型,即最大极化熵模型,可以有效抑制散射负能量现象[10];2011 年,Antropov 等直接从地球物理媒介对称性出发推导出一种随机连续体散射模型 GVSM,散射体形状参数与 Freeman 二分量分解中的体散射模型一致,但随机程度用同极化比值参数描述[11];2012 年,Sato 等提出一种扩展的体散射模型,用于描述方向性建筑物区域二面角结构引起的体散射贡献,假定散射体形状为金属角反射器,散射体方向角服从 cosine 分布,结果表明该模型可以有效抑制城区体散射高估的现象[12];2015 年,Huang 等简化了散射体方向角分布函数,提出一种均值为零的 n 阶 sine 和 cosine 分布分别考虑垂直和水平趋向分布情况,提出了一种随机连续体散射模型 SAVSM[13];2017 年,Xie 提出了附有物理约束的通用模型分解方法(PCGMD),充分考虑分解模型中相关物理参数的先验信息,提高了在定量遥感中的可行性[14];2018 年,Xie 等提出了三种基于随机连续体散射模型的极化 SAR 分解方法(PCGMD-GVSM、PCGMD-SAVSM 及 PCGMD-SNVSM),通过引入三种随机连续体散射模型,能够考虑更复杂的体散射情况,有效提高了分解参数的估计精度[15].

4)针对其他散射分量建模.如 2015 年,Zou 等[16]提出了一个针对城区复杂形状目标或者人造结构的非反射对称分量模型,相比 Yamaguchi 方法[12]考虑了更全面的非反射对称信息.

1.2 极化干涉 SAR

PolInSAR 结合了极化 SAR 对方向、纹理等特征数敏感的特点,又具有 InSAR 对高度敏感的特点,因而可以有效识别和分离同一分辨单元内不同高度位置的散射机制贡献,已成功用于森林或农作物高度估计、目标三维结构、植被覆盖区表面参数估计、积雪以及冰盖参数估计等研究中,其中应用更多的是在森林参数反演的研究中.近十年来,关于 PolInSAR 森林参数反演主要分为以下三类:

1)干涉相位差分方法,即根据不同极化通道干涉相位中心存在差异的特性,找到冠层散射和地表散射分别占优的极化方式,然后利用这两种极化方式的干涉相位差来估计森林高度.2010 年,Bian 等基于微小低阶统计方法对相干最优算法进行了改进,适用于非高斯分布的极化干涉 SAR 数据[17].同年,Ballester-Berman 等将 Freeman 三分量分解理论引入到极化干涉 SAR 技术中,将极化干涉协方差矩阵分为表面散射机制、二面角散射机制和体散射机制,并将表面散射机制的相位中心与二面角散射机制相位中心做差分得到植被高度信息[18];2011 年,谈璐璐等利用极化相干最优理论改进了 ESPRIT 算法,可以更加精确地估计植被高度[19];2014 年,宋桂萍等提出基于极化干涉互斜方差矩阵分解方法来反演植被高度[20];2015 年,Guo 等提出目标分解法,并利用极化干涉 SAR 数据提取地形高度[21].该类方法由于森

林冠层去极化的影响几乎很难找到“纯体散射”和“纯地面散射”的极化方式,因此会存在森林高度低估现象.

2)基于物理散射模型的参数解算方法.随机体散射体/地表二层(Random Volume over Ground,RVoG)模型是目前得到证实和广泛应用的森林极化干涉相干模型.该模型将体散射体看成是一定厚度的各向同性均匀介质,并用恒定的消光系数来描述电磁波在其中的散射和吸收损失,模型简单有效而且易于实现.但该模型对具有复杂结构森林的异质性没有给出更精细的描述[22].一些学者对异质性问题进行了分析,如 Garestier 等研究了线性及高斯函数的消光曲线,但对消光系数的这些函数关系仍然只基于假设或实测获得,难以在实践中应用[22].另一方面,在有些林分,多层的森林模型可以更精确地对其结构进行描述,但在解决如何获取多层输入参数及建立相应的极化干涉复相关系数模型上存在问题[22].针对三阶段算法估计精度受相干性分布分离度的限制,国内外众多学者陆续提出了很多改进算法,如改进三阶段算法[23]、复数最小二乘算法[24]、多基线算法[25]、双极化算法[26]等.考虑时间去相干、地形坡度和植被垂直结构不均匀等因素对 RVOG 模型的影响,学者们相继提出了 S-RVOG 模型[27]、高斯后向散射模型等[28].

3)极化相干层析方法(PCT).2006 年,Cloude 基于 RVOG 模型,提出极化相干层析方法,将复相干系数通过傅里叶-勒让德级数展开,建立垂直结构函数模型进行参数求解[29].近年来许多学者进行了进一步的扩展,如 2012 年,Zhang 等利用正交函数对傅里叶-勒让德展开式进行了改进,并用单基线进行了森林结构的重构[30];2016 年,李兰利用单基线 PCT 方法提取了森林垂直结构信息[31].

1.3 层析 SAR

层析 SAR 是传统二维 SAR 成像的三维扩展,它是在 InSAR 系统基础上的进一步延伸.该技术通过在高度向上形成合成孔径得到高度向的分辨率,从而实现目标高精度三维成像.经过近二十年的发展,SAR 层析技术已被大量应用于城市高精度地形测绘、林下目标识别、森林三维成像以及垂直结构参数反演,如林下地形和森林植被高度、冰川三维成像等方面.随着 SAR 影像分辨率越来越高,SAR 层析技术也逐渐从低分辨率成像算法发展到高分辨率成像算法.目前,SAR 层析成像算法大致可以分为非参数谱估计方法、参数谱估计方法、稀疏谱估计方法等三种.

1)非参数谱估计方法(Beamforming、Capon、IAA 等).该类方法不需要任何先验信息即可进行 SAR 层析成像,计算效率高.如 2012 年,Tebaldini 等利用 BioSAR 2008 L-波段和 P-波段的多基线全极化机载 SAR 数据对北方森林进行 SAR 层析成像,有效估计了林下地形和树高[32];2018 年,Peng 等提出 IAA-ML 方法,反演了 Paracou 地区的林下地形和树高[33].

2)参数谱估计方法(MUSIC、WSF 等).该类方法虽然提高了非参数谱估计方法的分辨率,但是需要已知散射场景的一些先验知识,如每个分辨单元内散射体的个数.当输入的散射体个数符合实际情况时,该类方法的估计性能优于非参数谱估计方法,反之,则差于非参数谱估计方法.如 2012 年,Huang 等利用 WSF 方法对德国宇航局机载 SAR 系统获取的 23 景合成孔径长度为 440 m L-波段全极化 SAR 数据对森林进行 SAR 层析成像,识别了隐藏在森林中的卡车,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(森林与卡车)垂直向空间位置、能量分布与层次结构进行了解释[34].

3)稀疏谱估计方法(CS、IAA-BIC、SPICE 等).在实际数据获取中,常常得到非均匀分布基线的 SAR 影像.为实现高精度的 SAR 层析三维成像,Moglio 等提出先通过插值处理将非均匀采样的数据预处理为均匀采样的数据,来改善傅里叶变换由于数据量少、非均匀分布基线引起的成像质量差的问题[35].但是插值计算量巨大、费时费力,加之 SAR 层析成像本身的数据处理量就很大,更增加了计算负担,而且插值对噪声敏感,容易引入插值误差,限制了该类方法的应用.稀疏谱估计方法可以很好地解决这一问题.该方法能够很好地克服传统非参数谱估计算法在基线分布不均匀、数据量少的情况下分辨率低、旁瓣严重的问题,提高了高度向的成像分辨率,大大降低了数据获取的成本.如 2010 年,Zhu 等提出 SL1MMER SAR 层析成像算法[36];2013 年,Aguilera 等提出基于小波基分解的压缩感知(Wavelet-CS)SAR 层析方法[37];2014 年,Liang 等提出小波基分解的分布式压缩感知(FP-DCS)SAR 层析方法,对多基线全极化 SAR 数据进行 SAR 层析成像[38];2016 年,Li 等提出基于散射机制分解的压缩感知(SKP-CS) SAR 层析方法[39];2017 年,Huang 等提出基于混合稀疏基的

CS SAR 层析方法[40];2018 年,Peng 等提出 IAA-BIC SAR 层析方法[41];2019 年,Peng 等提出基于混合小波基的 SPICE SAR 层析方法[42].

1.4 超高分辨率 SAR

近年来 SAR 影像的分辨率不断提高,优于 1 m 分辨率的 SAR 系统即超高分辨率 SAR (UHR SAR)不断涌现,可以提供丰富的地物的细节,如绿化带上的花纹、高层居民楼每一层的阳台等,这极大地扩展了 SAR 的应用领域.超高分辨率在带来更为丰富地物细节和更好视觉效果的同时,也使得 SAR 影像的散射信息更加复杂,主要包括:

1)自然地表均质性变差、纹理更为明显、散射信息多样.在中低分辨率下,自然地表,尤其是植被覆盖的地表通常会表现为完全发育的斑点噪声,形成明暗随机分布的后向散射回波,没有明显的纹理或图案,呈现为均质区域.在超高分辨率条件下,自然地表的纹理变得非常明显,由地表起伏或植被按一定规律排列形成的图案清晰可见,使得场景复杂性增强,可获取的信息增多,同时却也增加了散射信息的多样性,从而极大地增加了自动解译难度.

2)地物各向异性更为明显、散射规律性变弱,从而难以预测.分辨率提高后,像元尺寸与波长之间的差距有所减小,导致地物回波随机性变弱,呈现出一定方向性散射特征.不同排列方向的同种地物回波差异性变大,形成了更为明显的各向异性特征,从而难以通过统一的散射强度或统计特征进行识别,给地物分类带来很大难度.

3)回波随机性减弱、非高斯性增强、统计分布更加复杂.当分辨率较低时,可认为一个像元内有无穷多个波长尺寸的粒子,从而可以用中心极限定理将回波信号建模为高斯分布.超高分辨率条件下,回波信号的非高斯性增强.

上述新特性导致传统 SAR 影像模型、特征和信息提取方法部分或全部失效.并且,尺度效应决定着过高的分辨率不利于反映地物的整体形态,加之 SAR 特殊的散射机理,在 UHR SAR 下地物被分割为细小的结构性细节而不再是一个连续的面状,这意味着 UHR SAR 与传统 SAR 和 UHR 光学影像都存在显著差异,使得 UHR SAR 信息提取缺乏可用的理论和方法支持.UHR SAR 的优势领域主要是对尺寸较小的地物进行发现和细节信息获取,因此,较多应用于城市区.主要的感兴趣地物包括建筑、桥梁、车辆、船只等人工地物,以及树木、稻田等自然地物.对 UHR SAR 系统和能力探索方面的相关研究可追溯到 20 世纪 90 年代.如 Normant 等利用 Thomson-CSF Detexis 雷达得到的 UHR SAR 影像,描述了系统的主要参数,合成了带宽波形,并发现了 UHR SAR 影像中的一些有趣特征[43].2010 年,Essen 等探讨了 UHR SAR 的图像特征、InSAR 信息提取方法,及其在城市区的应用潜力[44].Novack 等于 2015 年总结了 UHR SAR 在城市信息提取方面取得的成果和应用潜力[45].

基于高分 SAR 影像的信息获取方法主要可以分为基于几何特征、基于后向散射统计特征和面向对象方法三类:

1)基于几何特征的方法.该方法在米级分辨率 SAR 中应用广泛,但由于 UHR SAR 中地物信息过于细微和零散,几何特征变得难于提取.

2)在 UHR SAR 统计特征研究方面,Davis 等利用广义高斯模型对 GDAIS 系统 X 波段 SAR 的振幅信息进行了拟合,得到了很好的拟合效果[46].Wu 等[47]提出基于复广义高斯模型及其衍化参数的 UHR SAR 单视复数据信息提取方法,可提取出自然目标和人工目标的结构性细节.Wu 等[48]还提出了一系列复分布非对称评价参数,并探讨了这些参数在 UHR SAR 中的应用潜力.由于 UHR SAR 后向散射会随入射角、波长、方位向视角以及邻近地物的不同发生巨大的变化,地物被分为非常细小的组成部分,导致其散射特性千差万别,因此 UHR SAR 影像的统计先验知识极为难于获得.通过采用 α-stable 分布和广义高斯分布可以在一定程度上通过不同的统计分布类型对地物细节信息进行提取,然而能区分出的地物类别仍然是非常有限的.

3)面向对象方法在高分辨率光学遥感中广为应用,该类方法通过超像素(superpixel)、网格处理、多分辨率分析等技术先将影像分割成一定尺寸的小块,然后对小块的形状、纹理等特征进行分析,再进行进一步的信息提取.分割后每一个小块上的全部像素被认为属于同一种类别.对于 UHR SAR 影像来说,传统的面向对象方法难以适应影像中的斑点噪声以及地物多呈现的非均匀、非连续形式,尤其是地物混杂的城市区.为解决这一问题,Popescu 等[49]采用一套由傅里叶频谱得到的特征集对数十个场景进行了正确识别,Wu 等[50]基于更多谱特征构建了可以区分多类精细地物的特征集.Wu 等还将深度学习技术引入 UHR SAR 地物分类,分别构建了场景级和

语义级的分类模型[51-52].怎样定义和描述这些类别则是更为难以解决的问题.由于可用的信息较少而可反映的目标异常丰富,UHR SAR 地物识别同时面临着更为严重的语义鸿沟问题,即计算机识别出的类别难以对应于具有应用意义的实际地物类,而我们需要得到的类别则可能在 UHR SAR 中难以实际分开.

综上所述,针对 UHR SAR 影像的信息提取方法目前已经有一些研究和发展.但是由于 UHR SAR 影像所反映的信息较传统影像存在较大的颠覆性,距离建立稳定、有效和广泛适用的理论、模型及信息提取框架还存在很大差距.目前从 UHR SAR 影像中获取信息还主要采用目视判读的方式,受到判读和记录效率的限制,大量 UHR SAR 数据并没有得到利用,这在造成资源浪费的同时,也限制了超高分辨率 SAR 的进一步发展.为使超高分辨率 SAR 充分发挥自身优势,得到广泛而深入的应用,新的数据模型、特征以及信息提取技术亟待建立.

2 未来发展趋势

由上一节的内容,我们可以看到近十年来极化 SAR、极化干涉 SAR、层析 SAR 和超高分辨率 SAR 这四种典型的先进 SAR 对地观测技术在多通道、多观测角、高分辨率等领域取得了很大的进展,应用层面也越来越宽.未来,先进 SAR 对地观测技术将继续朝着多通道、多观测角、高时相、高分辨率、高测绘带宽发展,来满足全球环境变化、全球森林监测、城市三维信息获取、资源勘察、环境监测与评价以及对月探测等领域中的迫切需求.

2.1 多通道信息获取能力

2.1.1 紧缩极化 SAR

全极化 SAR 虽然可以全面获得目标在观测方向上的后向散射特性,但其系统存在复杂度高、成本高、数据量大、空间分辨能力较低等缺点.紧缩极化 SAR 是目前一种新型 SAR 模式,它通过发射具有特定极化状态的单一极化电磁波,两路相互正交的极化接收的方式,在降低极化 SAR 系统复杂度的同时,有效保留全极化 SAR 的回波信息.紧缩极化 SAR 在获得与全极化相当的后向散射定量分类能力的同时,还具有如下的优势:

1) 紧缩极化可以获得比常规极化更宽的幅宽;

2) 工程设计和实施较为简单,该技术除了用于对地观测外,可以很好地用于对月及行星探测;

3) 可以提高距离模糊度;

4) 采用混合紧缩极化有利于消除由于电离层效应引起的法拉第旋转的影响.

除此之外,紧缩极化技术与干涉技术的融合形成的紧缩极化干涉 SAR 技术具有更广阔的应用空间和潜力.Lavalle 等分析了紧缩极化方式获得的相位信息,研究了其在极化干涉中的应用潜力[53].Dubois-Fernandez 基于 RVoG 模型,对比分析了紧缩和全极化干涉在提取植被高度上的异同,并提出了一个植被高度反演的最优方法[54].紧缩极化干涉 SAR 是未来 SAR 技术的发展方向之一.

2.1.2 多频率(多波段)SAR

对于不同频率(波长)的电磁波,其穿透性能、可探测目标最小截面积、观测目标变化去相干程度等特性都不相同,因此,不同类型的目标发生不同尺度的变化在各个波段探测下会形成不同结果.对于不同频率的 SAR 而言,其对不同目标后向散射特性的描述能力也就不同:低频率 SAR 具有较强的穿透能力,能探测到林下或次地表目标,但由于其波长较长,使得描述场景轮廓和纹理信息的能力很弱;而高频率 SAR,其发射信号的波长较短,能够清晰地描述场景轮廓和纹理的特征,但较低的穿透性能限制其探测林下或次地表目标的能力.

在多频率(多波段)观测模式下,SAR 具有同时获得不同波段后向散射信息的能力,既能探测林下或次地表信息,也能清晰描述场景的轮廓和细节信息.因此,相比单一波段 SAR 模型,多频率(多波段)SAR 模式可以获得更丰富的场景信息,有利于提升地表参数反演结果的精度.所以,多频率 SAR 模式将在资源遥感、灾情评估和战场监视等方面获得越来越广泛的应用.例如,预计 2021 年发射的“双频(L 和 S 频段)合成孔径雷达成像卫星 NISAR(NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar),通过联合利用 L 和 S 频段信息,其能够实现对电离层较高精度的估计,也有助于提高对生物量、地表形变和土壤湿度估计的精度,还能提高土地分类结果的精度[55].

2.2 多角度观测能力

2.2.1 多维 SAR 技术

为了获取观测场景更全面的散射信息,更好地实现城市区测绘、森林区监测、地质灾害监测等应用需求,要求 SAR 系统具有多维成像能力.然而,传统 SAR 系统只具备方位向和距离向的二维分辨能力,无法实现对观测场景的多维成像.曲线/圆周 SAR

(Curvilinear/Circular SAR,CSAR) 和层析 SAR(Tomographic SAR,TomoSAR)的出现实现了真正意义上的 SAR 系统多维成像,它们能从三个维度上(距离向、方位向和高度向)对目标的散射信息进行分辨,但是它们也都存在各自的局限性.其中,CSAR 要求平台做圆周运动,从不同方位获取的目标散射系数不再保持不变,使其能够有效积累的孔径是有限的,且其飞行轨迹不易控制,运动补偿也非常复杂.TomoSAR 通过雷达平台多次不同高度航过实现地面目标的三维成像,其航过次数和基线变化都严重影响其成像质量,同时其观测成本也随航过次数增加而提高.而且 TomoSAR 采用侧视模式,也不可避免会带来一定程度的几何畸变和阴影效应.

阵列三维 SAR 系统通过在切航迹方向布置均匀线阵天线,并利用雷达平台运动可以形成一个虚拟二维平面阵列,从而能获得切航迹向和沿航迹向的分辨率[56];同时,通过发射线性调频信号并利用脉冲压缩技术来获得高度向的分辨率.阵列三维 SAR 采样正下视模式,能够克服阴影遮挡和几何失真,通过一次直线航过即能实现对观测区域的三维成像,在城市、山区等复杂区域成像方面具有显著的优势.这些特点使得阵列三维 SAR 在森林地区三维成像、减灾救灾、城市规划、军事侦查等领域具有极大的研究价值和应用前景.

2.2.2 多方位 SAR 技术

通常,多数目标在不同的方位角对电磁波的散射是不同的.因此,多方位散射信息的获取能够为解析目标提供更多信息,有利于目标的分类、检测和识别、参数反演.传统 SAR 只能在较小的方位角观测范围内获取目标的后向散射信息,这对目标信息量的获取十分有限,一定程度上增加了目标认知的难度.为了提升雷达系统的多方位探测性能,多种 SAR 技术被提出:

1)最典型的就是上节提到的 CSAR.通过以观测场景为中心,雷达平台在做 360°的圆周运动的同时波束始终照射同一地面场景,形成一个圆形的孔径,从而实现对中心场景的全方位观测.与传统条带 SAR 方式相比,CSAR 不仅能大大消除由于目标遮挡引起的阴影问题,而且能够获得目标区域全方位的信息[57].

2)CSAR 技术主要在机载平台上实现,在星载 SAR 平台上,主要采用大方位角波束扫描模式.在该模式下,平台在经过目标区域时,通过实现天线波束方位向大角度扫描,完成对目标区域的持续观测,进而获得地面目标不同方位角的后向散射信息.

3)除大角度波束扫描模式外,卫星平台也可利用其上行和下行的特点,并基于搭载的雷达系统的左视和右视能力,通过对同一区域多次过顶观测,来实现对目标区域四个方向上的散射信息的获取.

由于能够更全面地反映目标的散射特性,多方位 SAR 技术能大大提升 SAR 系统的对地观测能力,是未来 SAR 技术的发展方向之一.

2.3 高时相观测能力

2.3.1 地球同步轨道 SAR

随着星载 SAR 应用领域的进一步拓宽,现有的星载 SAR 系统的工作能力正逐渐受到需求繁多的观测任务的挑战,这不但要求星载 SAR 能获得具有超高分辨率的图像,而且能够实现对某些感兴趣的区域进行大范围高频次重复观测.这就在测绘幅宽、重访周期以及可视能力等方面对星载 SAR 系统提出新的要求.

传统 SAR 卫星系统,由于轨道高度低(2 000 km 以下)的局限,使得其在测绘幅宽与重访周期等方面的观测性能都受到了影响和限制,这已经不能满足对瞬息万变的战场或是突如其来的自然灾害等突发事件观测的需求.相对于低轨道卫星,运行在地球同步轨道(36 500 km)的卫星具有一些不同的特点,地球同步轨道的卫星由于轨道高度高,其重访周期大约为 24 h,具有比低轨道卫星更短的重访时间.此外,由于卫星的轨道高度(36 000 km)极高,因此即使视线范围很小(1°左右),对地面的覆盖范围也有约 400 km 大小.鉴于此,地球同步轨道 SAR (Geosynchronous Synthetic Aperture Radar, GEO SAR)系统,这种新体制 SAR 的提出已是 SAR 技术发展的必然要求.

GEO SAR 满足 SAR 成像的基本原理,地球同步轨道卫星实际上是周而复始地运行在一定倾角与偏心率的轨道上的卫星,这样平台与地球之间是存在相对运动的,能实现孔径合成,从而获得高质量的 SAR 图像[58].GEO SAR 具备小时级的重访能力,具有测绘面积宽、可视范围广等优势,应用前景广阔,这就使得 GEO SAR 系统具备了得天独厚的优势,特别是在重复性对地实时观测以及应对突发事件的能力等方面的潜能,确实是低轨 SAR 系统所不能企及的.

2.3.2 视频 SAR

传统的 SAR 系统主要是获取某一时刻的“瞬

间”或“瞬时”信息,不具备对观测场景内动态信息进行连续监测的能力.视频 SAR 系统作为一种新型的雷达遥感体制,它通过对目标场景进行高时相成像,利用一定时间间隔采集目标区域图像,获取目标场景的 SAR 图像码流,同时获取涵盖空间和时间维度的动态变化数据,在传统 SAR 成像的基础上扩展了信息获取的时间维度,使 SAR 系统实现了从传统的“图片”式静态遥感向新型的“视频”式动态遥感的转变,这样 SAR 系统就具备了更强的动态信息获取能力,能够获得检测目标的时变特征,适用于动态目标或场景的持续监测.视频 SAR 最主要的特点是,在给定分辨率和图像帧率的前提下,对感兴趣的区域进行连续成像,进而得到一系列的 SAR 图像.视频 SAR 系统通过将 SAR 成像技术和视频显示技术相结合,能够实现对 SAR 观测区域的高时相的显示.相比传统的 SAR 观测手段,视频 SAR 系统给出的视频成像结果,结合基于视频的运动目标探测技术,可以更加直观地获取目标的位置、速度、运动趋势等各种运动参数信息.2010 年,美国 Sandia 实验室研制出了机载 ViSAR 系统,ViSAR 实现了 SAR 成像系统类似于光学系统的成像结果,获得的 SAR 图像以视频的形式进行了输出,能够全天时、全天候观测慢速目标,重新将 SAR 带入一个新的时代,具有重要的应用价值[59].

2.4 分辨率和测绘幅宽提升

2.4.1 DBF-MA SAR

常规 SAR 系统面临着方位向高分辨与测绘带宽的相互矛盾:一方面,为了获得较高的方位分辨率,需要实现较大的多普勒带宽,这就要求 SAR 系统的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency,PRF)足够高,从而避免多普勒模糊;另一方面,为了实现大范围覆盖,SAR 系统的接收周期需要足够长,即脉冲重复时间足够长,这就要求系统的 PRF 应当足够低.因此,方位分辨率与测绘幅宽之间的相互制约关系成为常规单通道 SAR 系统性能提升的瓶颈.

为了克服上述传统 SAR 的矛盾,多种高分辨率宽测绘带 SAR 的实现模式被提出,其中研究最多的是基于数字波束形成(Digital Beam Forming,DBF)技术[60]和多天线(Multiple Aperture,MA)技术[61]的工作模式.该工作模式最显著特点是,在其接收端,利用多天线来独立接收回波数据,并且各自实现回波数据的解调、模数转换、波束形成以及数据存储等处理.在低 PRF 条件下进行工作时,对于单个天线而言,虽然方位向分辨能力不足,但利用多天线数据信息可以弥补低 PRF 的不足,通过利用 DBF 处理能力实现多普勒模糊的抑制,实现较高的方位向分辨率.同时,由于在低 PRF 情况下,使得足够远的回波信号落在接收窗内,从而也可以获得较大测绘幅宽的信息.因此,该工作模式可以实现高分辨率宽测绘带成像.

2.4.2 MIMO-SAR

多发多收(Multi-Input,Multi-Output,MIMO)雷达是近年来发展起来的一种新体制雷达,它的本质特点是雷达系统通过多天线同时发射、多天线同时接收的工作方式能够获得远多于实际天线数目的等效观测通道,可取得超越常规雷达在检测、估计、成像、跟踪和可视等各个环节的性能.MIMO-SAR 具有更高的自由度,不光能实现高分辨率宽测绘带成像,还能为解决多任务协同等实际问题提供有效的技术途径[62].

依据多个收发天线之间的位置和布局关系,MIMO-SAR 系统主要构成大致可分为两大类.第一类为“紧凑式 MIMO-SAR”,是指收发天线阵元位于同一平台或者距离紧密.通过这种模式,可用较少的收发天线阵元等效获得大的虚拟孔径,且各收发天线阵元相关性很强.通过天线阵列在平台上的布置方式的不同,不仅能够提高空间分辨率、测绘带、动目标和弱目标检测等性能,还可以实现高精度三维下视成像和多基线干涉等能力.但是在该模式下,由于天线阵元距离紧凑,所获取的回波信号主要来自于观测目标同一方向上的散射信息.第二类为“分布式 MIMO-SAR”,其主要特点是发射和接收天线分别放置在不同的运动平台上,通过雷达组网的方式构成分布式 SAR 系统,来降低目标雷达横截面积随观测角起伏变化对 SAR 系统检测性能的影响.该模式下,经过回波分离处理后就能够获得同一目标不同方位下的散射信息,从而增强了 SAR 系统的目标检测和识别性能.

3 总结

本文对近十年四种典型的先进 SAR 对地观测技术的最新进展进行了总结和分析,可以看到这几种先进 SAR 技术进一步深入利用了电磁波的波段、极化、振幅和相位等信息,极大促进了 SAR 理论和方法的发展,如地物目标散射机理的精细探测、极化干涉 SAR 理论体系的进一步完善、SAR 层析成像算

法分辨能力越来越高、超高分辨率 SAR 统计特性的探究等,能够挖掘出地物目标更加丰富的信息,可以对地球表面动态过程进行高精细、大尺度和连续不断的监测,来满足对全球或区域可持续发展和全球环境变化监测的迫切需求.

本文在现有研究的基础上,探讨了未来新型 SAR 技术的发展趋势.未来 SAR 技术将继续在多通道信息获取、多角度观测、高时相观测、分辨率和测绘幅宽等方面做进一步的提升,将会出现一些新型的 SAR 系统如阵列三维 SAR、GEO SAR、DBF-MA SAR、MiMO-SAR,使得 SAR 技术在全球环境变化、全球森林监测、城市三维信息获取、资源勘察、环境监测与评价以及对月探测等领域中发挥越来越重要的作用.虽然目前还有很多技术难题有待突破,但是随着技术的发展,相信这些难题都会最终解决,SAR 对地观测技术也将迈入下一个新的发展时期.

参考文献

References

[1] 郭华东,李新武.新一代 SAR 对地观测技术特点与应用拓展[J].科学通报,2011,56(15):1155-1168
GUO Huadong, LI Xinwu. Technical characteristics and potential application of the new generation SAR for earth observation[J].Chinese Science Bulletin,2011,56(15):1155-1168

[2] Cloude S. Polarisation: applications in remote sensing [M]. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2009. DOI: 10.1093/acprof: oso/97801995697-31.001.0001

[3] 解清华.顾及散射机理和地形坡度的极化干涉 SAR 森林高度反演模型与算法研究[D].长沙:中南大学,2017
XIE Qinghua.Model and algorithm development of PolInSAR forest height inversion taking into account scattering mechanism and terrain slope [D]. Changsha: Central South University,2017

[4] Iodice A,Natale A,Riccio D.Retrieval of soil surface parameters via a polarimetric two-scale model [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2011,49(7):2531-2547

[5] Chen S W, Wang X S, Xiao S P, et al. General polarimetric model-based decomposition for coherency matrix[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014,52(3):1843-1855

[6] di Martino G,Iodice A,Natale A,et al.Polarimetric two-scale two-component model for the retrieval of soil moisture under moderate vegetation via L-band SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016,54(4):2470-2491

[7] Shan Z L, Zhang H, Wang C, et al. Four-component model-based decomposition of polarimetric SAR data for special ground objects[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2012,9(5):989-993

[8] Xiang D L, Ban Y F, Su Y. Model-based decomposition with cross scattering for polarimetric SAR urban areas [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015,12(12):2496-2500

[9] Jagdhuber T.An approach to extended Fresnel scattering for modeling of depolarizing soil-trunk double-bounce scattering[J].Remote Sensing,2016,8(10):818

[10] An W T, Cui Y, Yang J.Three-component model-based decomposition for polarimetric SAR data[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48 (6):2732-2739

[11] Antropov O, Rauste Y, Hame T. Volume scattering modeling in PolSAR decompositions: study of ALOS PALSAR data over boreal forest[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49 (10): 3838-3848

[12] Sato A, Yamaguchi Y, Singh G, et al. Four-component scattering power decomposition with extended volume scattering model [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2012,9(2):166-170

[13] Huang X D,Wang J F,Shang J L.Simplified adaptive volume scattering model and scattering analysis of crops over agricultural fields using the RADARSAT-2 polarimetric synthetic aperture radar imagery [J]. Journal of Applied Remote Sensing,2015,9(1):096026

[14] Xie Q H,Ballester-Berman J,Lopez-Sanchez J,et al.On the use of generalized volume scattering models for the improvement of general polarimetric model-based decomposition[J].Remote Sensing,2017,9(2):117

[15] Xie Q H,Zhu J J,Lopez-Sanchez J M,et al.A modified general polarimetric model-based decomposition method with the simplified Neumann volume scattering model [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018,15(8):1229-1233

[16] Zou B,Zhang Y,Cao N,et al.A four-component decomposition model for PolSAR data using asymmetric scattering component [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2015,8 (3):1051-1061

[17] Bian Y,Mercer B.PolInSAR statistical analysis and coherence optimization using fractional lower order statistics [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010,7(2):314-318

[18] Ballester-Berman J D,Lopez-Sanchez J M.Applying the Freeman-Durden decomposition concept to polarimetric SAR interferometry[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2010,48(1):466-479

[19] 谈璐璐,杨立波,杨汝良.基于 ESPRIT 算法的极化干涉 SAR 植被高度反演研究[J].测绘学报,2011,40 (3):296-300
TAN Lulu, YANG Libo, YANG Ruliang. Investigation of tree height retrieval with polarimetric SAR interferometry based on ESPRIT algorithm[J].Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2011,40(3):296-300

[20] 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):

613-619,636
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):613-619,636

[21] Guo S L, Li Y, Zhang J J, et al. Modification of polarimetric SAR interferometry target decomposition with accurate topography [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2015,12(7):1476-1480

[22] 付海强.顾及趋势性误差改正及观测信息增强的 InSAR/PolInSAR 林下地形及森林高度反演方法研究[D].长沙:中南大学,2018
FU Haiqiang. Method development of InSAR/PolInSAR sub-canopy topography and forest height inversion taking into account trend error correction and observation information enhancement [D]. Changsha: Central South University,2018

[23] 谈璐璐,陈兵,杨汝良.利用 POLInSAR 数据反演植被高度的改进三阶段算法[J].系统仿真学报,2010,22(4):996-999
TAN Lulu, CHEN Bing, YANG Ruliang. Improved three-stage algorithm of tree height retrieval with PolInSAR data [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(4): 996-999

[24] Fu H Q,Wang C C,Zhu J J,et al.Inversion of vegetation height from PolInSAR using complex least squares adjustment method [J]. Science China Earth Sciences, 2015,58(6):1018-1031

[25] Ferro-Famil L, Neumann M, Huang Y. Multi-baseline POL-inSAR statistical techniques for the characterization of distributed media[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2009:971-974

[26] Fu W X,Guo H D,Li X W,et al.Extended three-stage polarimetric SAR interferometry algorithm by dual-polarization data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54(5):2792-2802

[27] Xie Q H,Zhu J J,Wang C C,et al.A modified dual-baseline PolInSAR method for forest height estimation[J]. Remote Sensing,2017,9(8):819

[28] Fu H Q, Wang C C, Zhu J J, et al. Estimation of pine forest height and underlying DEM using multi-baseline P-band PolInSAR data [J]. Remote Sensing, 2016, 8(10):820

[29] Cloude S R.Polarization coherence tomography[J].Radio Science,2006,41(4):1-27

[30] Zhang H,Ma P F,Wang C.A new function expansion for polarization coherence tomography[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2012,9(5):891-895

[31] 李兰.森林垂直信息 P-波段 SAR 层析提取方法[D].北京:中国林业科学研究院,2016
LI Lan.Forest vertical information extraction based on P-band SAR tomography[D].Beijing:Chinese Academy of Forestry,2016

[32] 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

[33] Peng X,Li X W,Wang C C,et al.A maximum likelihood based nonparametric iterative adaptive method of synthetic aperture radar tomography and its application for estimating underlying topography and forest height [J].Sensors,2018,18(8):2459

[34] 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

[35] Meglio F, Panariello G, Schirinzi G. Three dimensional SAR image focusing from non-uniform samples [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2007:528-531

[36] 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

[37] Aguilera E, Nannini M, Reigber A. Wavelet-based compressed sensing for SAR tomography of forested areas [J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2013,51(12):5283-5295

[38] Liang L,Guo H D,Li X W.Three-dimensional structural parameter inversion of buildings by distributed compressive sensing-based polarimetric SAR tomography using a small number of baselines[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2014,7(10):4218-4230

[39] Li X W,Liang L,Guo H D,et al.Compressive sensing for multibaseline polarimetric SAR tomography of forested areas[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54(1):153-166

[40] Huang Y, Levy-Vehel J, Ferro-Famil L, et al. Three-dimensional imaging of objects concealed below a forest canopy using SAR tomography at L-band and wavelet-based sparse estimation [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2017,14(9):1454-1458

[41] Peng X, Wang C C, Li X W, et al. Three-dimensional structure inversion of buildings with nonparametric iterative adaptive approach using SAR tomography[J]. Remote Sensing,2018,10(7):1004

[42] Peng X,Li X W,Zhu J J,et al.SPICE-based SAR tomography over forest areas using a small number of P-band airborne F-SAR images characterized by non-uniformly distributed baselines [J]. Remote Sensing, 2019, 11(8):975

[43] Normant E, Fronteau B, Hardange J P, et al. Characteristics and applications of long range ultra high resolution SAR mode[C]//IEE Colloquium High Resolution Radar and Sonar.IET,1999:4/1-4/6

[44] Essen H,Nüßler D,Krebs C,et al.Polarimetric millimetre wave SAR for precision farming applications [C]// Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XII.International Society for Optics and Photonics,2010,7824:78241Q

[45] Novack T, Stilla U. Discrimination of urban settlement types based on space-borne SAR datasets and a conditional random fields model [J]. ISPRS Annals of Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information

Sciences,2015,II-3/W4:143-148
[46] Davis M S,Bidigare P,Chang D.Statistical modeling and ML parameter estimation of complex SAR imagery[C]// Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2007: 500-502
[47] Wu W J,Guo H D,Li X W,et al.Urban land use information extraction using the ultrahigh-resolution Chinese airborne SAR imagery[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2015,53(10):5583-5599
[48] Wu W J, Li X W, Guo H D, et al. Noncircularity parameters and their potential applications in UHR MMW SAR data sets[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2016,13(10):1547-1551
[49] Popescu A A,Gavat I,Datcu M.Contextual descriptors for scene classes invery high resolution SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 9 (1):80-84
[50] Wu W J, Li X W, Guo H D, et al. Millimeter-wave ultrahigh resolution SAR image classification based on a new feature set [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2018,15(8):1204-1208
[51] Wu W J,Li H L,Zhang L,et al.High-resolution PolSAR scene classification with pretrained deep convnets and manifold polarimetric parameters[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56 (10): 6159-6168
[52] Wu W J,Li H L,Li X W,et al.PolSAR image semantic segmentation based on deep transfer learning: realizing smooth classification with small training sets[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2019,16(6): 977-981
[53] Lavalle M,Pottier E,Solimini D,et al.The feasibility of a compact polarimetric synthetic aperture radar for PolSAR and Pol-InSAR applications[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2009
[54] Dubois-Fernandez P C,Souyris J C,Angelliaume S,et al. The compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,46(10):3208-3222
[55] Rosen P,Hensley S,Shaffer S,et al.An update on the NASA-ISRO dual-frequency DBF SAR (NISAR) mission[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2016, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729543
[56] 孙龙,江凯,施晋生.阵列三维SAR系统技术研究[J].雷达科学与技术,2016,14(3):279-285
SUN Long,JIANG Kai,SHI Jinsheng.Research on linear array three-dimensional SAR technology [J]. Radar Science and Technology,2016,14(3):279-285
[57] Ponce O,Prats-Iraola P,Pinheiro M,et al.Fully polarimetric high-resolution 3-D imaging with circular SAR at L-band [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014,52(6):3074-3090
[58] Hobbs S,Mitchell C,Forte B,et al.System design for geosynchronous synthetic aperture radar missions[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014, 52(12):7750-7763
[59] Linnehan R,Miller J,Bishop E,et al.An autofocus technique for video-SAR[C]// Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XX.International Society for Optics and Photonics,2013,8746:874608
[60] Younis M,Fischer C,Wiesbeck W.Digital beamforming in SAR systems[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(7):1735-1739
[61] Jung H S,Lee D T,Lu Z,et al.Ionospheric correction of SAR interferograms by multiple-aperture interferometry [J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2013,51(5):3191-3199
[62] Krieger G. MIMO-SAR: opportunities and pitfalls[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014,52(5):2628-2645

New advances of SAR and its application in earth observation

LI Xinwu[1] GUO Huadong[1] PENG Xing[2] ZHANG Lu[1] FU Wenxue[1] LIANG Lei[1] WU Wenjin[1]
1 Key Lab of Digital Earth Sciences,Aerospace Information Research Institute,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100094
2 School of Geography and Information Engineering,China University of Geosciences (Wuhan),Wuhan 430074

Abstract The Synthetic Aperture Radar (SAR) technology and its application have developed rapidly since the birth of the first SAR in April of 1960.The deepening and comprehensive technological utilization of different electromagnetic wavebands,polarization,amplitude and phase information,is characterized by the bi-static/multi-static or constellation observation,polarimetric SAR interferometric measurement,high revisit and wide swath mapping with high resolution,3D/4D structure information retrieval,and ultra-high resolution observation.In application aspects,it is featured by efforts to realize the high precision,large scale and time continuous monitoring and evaluation of the Earth surface dynamic process,under the background of major global issues such as global change and global sustainable development.In this paper,we introduce the research background and significance of the new SAR technology for earth observation,and then analyze the progresses of four typical advanced SAR technologies for the past

decade,including polarimetric SAR (PolSAR),polarimetric interferometric SAR (PolInSAR),tomographic SAR (TomoSAR),and ultra-high resolution SAR (UHR SAR).Finally,the future development trend of the SAR earth observation technology is analyzed,mainly focused on four aspects:multi-channel information acquisition,multi-angle observation,high temporal observation,high resolution and wide swath mapping.

Key words PolSAR;PolInSAR;TomoSAR;UHR SAR;progress and tendency