

新一代 SAR 对地观测技术特点与应用拓展

郭华东, 李新武

中国科学院数字地球重点实验室, 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094

E-mail: hdguo@ceode.ac.cn

2010-12-31 收稿, 2011-04-07 接受

国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB723906)

摘要 从新一代 SAR 对地观测机理及其应用的角度, 对新一代 SAR 的技术特征与科学内容、新一代 SAR 对地观测领域研究前沿、新一代 SAR 研究的重大科学与技术问题和新一代 SAR 的未来发展方向等进行了深入的分析和讨论. 我国急需开展该领域的系统研究, 使 SAR 研发应用从跟踪走向创新, 提高雷达对地观测科学与技术水平, 服务国家多领域需求与发展.

关键词

新一代 SAR
对地观测技术特点
应用拓展
全球环境变化

作为主动微波对地观测的核心技术, 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)自 20 世纪 60 年代正式问世以来, 凭借所特有的全天时、全天候以及对某些地物的穿透能力, 已成为全球变化、资源勘查、环境监测、灾害评估、城市规划以至星球探测等领域的重要手段, 是当前国际最前沿的对地观测技术之一.

纵观 SAR 技术的发展, 可以把 SAR 遥感的发展分为以下几个阶段^[1]: 第一阶段为单波段单极化 SAR 遥感(如 Seasat, ERS-1/2, JERS-1, RADARSAT-1), 第二阶段为多波段多极化 SAR 遥感(ENVISAT/ASAR, SIR-C/X-SAR), 极化 SAR 和干涉 SAR 则代表了第三阶段(如 ALOS/PALSAR, RADARSAT-2 等). 而以极化干涉 SAR(PolInSAR), 三维/四维 SAR(3D/4D SAR), 双站/多站 SAR(Bi-/Multistatic SAR)和数字波束形成 SAR(DBF SAR)为代表的前沿雷达技术的出现则表明了第四阶段 SAR 或新一代 SAR 的问世. 基于新一代 SAR 理论和技术, 美国 NASA、欧盟 ESA、德国 DLR 以及加拿大 CSA 等提出了多个新型 SAR 计划, 如美国 NASA 的 DESDynI 计划, ESA 的 Sentinel-1 计划、BIOMASS 候选项目、德国的 TanDEM-L 计划, 加拿大的雷达卫星星座计划(RCM)和日本的 ALOS-2 计划等. 以上正在实施的新型 SAR 计划大多具有双/多

站或星座观测、极化干涉测量、高分宽幅测绘和三维结构信息获取能力. 新一代 SAR 的这些能力远远超越了传统 SAR, 使得它们在全球环境变化、全球森林监测、全球水循环和碳循环、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可发挥更加重要甚至唯一的作用.

1 新一代合成孔径雷达对地观测计划

全球范围内正在开展并将要开始实施多个新型 SAR 计划. NASA 的 DESDynI 计划^[2], 其对地观测系统上搭载激光雷达和 L 波段微波雷达, 主要用于全球森林生物量的估算、地表形变过程以及海冰变化监测等, 科学目标是为全球环境变化研究获取地球的动态信息, 如全球森林碳储量及其变化问题等; ESA 发起的 Sentinel-1 计划^[3], 哨兵 1 号(Sentinel-1)是该计划即将发射的新型 SAR 卫星星座^[3], 它由两个 C 波段 SAR 组成, 哨兵 1 号具有高分辨率超宽模式(400 km)(20 m × 40 m)以及高分辨率宽幅干涉(250 km)(5 m × 20 m)模式, 使其非常适合海冰监测、海风监测、土地类型动态变化等全球变化相关领域的研究; ESA 的 BIOMASS 候选项目^[4], 利用 P 波段全极化 SAR 或极化干涉 SAR 提供全球森林高度以及生物量数据, 为碳储量估算和碳模型提供支持; 德国 DLR

发起了 TanDEM-L 计划^[5], 该计划原创干涉和极化 SAR 任务概念, 由两个 L 波段 SAR 组成, 数据采集模式主要有 3D 结构模式和形变模式^[6], 主要用于为全球环境变化研究获取地球的动态变化信息. 例如, 全球森林高度和生物量变化, 由地质或人为因素引起的地球形变过程监测, 以及冰川移动速度和结构变化, 海洋表面洋流垂直结构分布等; 德国的 TanDEM-X 在轨系统^[7], 是在 TerraSAR-X 基础上形成第一个具有双站观测模式的双星干涉系统^[8], 为水文、冰川、森林、地质和海洋等领域的研究提供全球高精度的 HRTI-3 的 DEM 数据; 加拿大宇航局在 2008 年开始 Radarsat-C 星座计划(RCM), 由 3 颗卫星组成^[9], 计划 2014 年发射第一颗卫星, 其他 2 颗卫星每隔 15 个月发射. 该计划的目的是主要包括: 海洋、生态以及灾害监测; 继 ALOS 之后日本 JAXA 准备再发射一颗 L 波段 SAR, 即 ALOS-2 计划^[10]. ALOS-2 的重访周期是 14 天, 比 ALOS 的 46 天大大提高, 该 SAR 计划主要用于灾害和森林监测.

对于以上这些新型 SAR 计划, 从信息获取的技术层面, 除了现有在轨 SAR 卫星如 ALOS/PALSAR, ENVISAT/ASAR, RADARSAT-2, TERRSAR-X 等具有的单波段、多极化、极化、干涉、高分辨率、宽幅观测能力以及全天候、全天时和部分穿透外, 大多具有双站或星座观测、极化干涉测量、高分宽幅测绘和三维结构信息获取能力. 从科学目标层面分析, 这些新型 SAR 大都具有全球环境和安全监测能力, 它们的科学目标大都是瞄准当前国际关注的诸如全球变化研究等重大问题. 从上面的分析可见, 新一代 SAR 将在全球水循环、碳循环、土地利用变化、森林监测、土壤水分监测、冰川监测、海岸线监测、海浪海风监测以及人类活动对环境的影响等方面发挥重要的作用.

2 新一代 SAR 系统技术与领域应用特点

2.1 极化 SAR 和紧缩极化 SAR

近年来, 全极化 SAR 理论及应用研究发展迅速^[11]. 在极化 SAR 分解理论研究方面, 基于 Cloude 和 Pottier^[12]提出的极化 SAR 目标特征分解理论和 H-Alpha-A 分解理论以及 Freeman 和 Durden^[13]提出的以物理模型为基础的三分量散射分解模型, 最近几年极化 SAR 分解理论的研究主要是针对以上模型

存在的问题而开展. Yamaguchi 等人^[14]针对城市区等出现的非反射对称地表, 提出了四分量极化分解模型. Touzi^[15]基于 Cloude-Pottier 分解存在的问题以及 Kennaugh-Huynen 分解, 提出了旋转不变散射矢量分解模型(Target Scattering Vector Model, TSVM), 从该模型可以得到 4 个旋转不变参数, 已成功用于湿地分类研究中. 基于长波长雷达如 P 波段, 针对热带或温带森林地表, Freeman^[16]在三分量模型基础上提出了二分量分解模型. An 等人^[17]针对 Freeman 和 Durden 三分量模型存在的负功率问题, 提出了改进的三分量分解模型. Yamaguchi 等人^[18]针对极化 SAR 地物分类过程中植被和有方向建筑物在分类时存在的混淆问题, 提出了基于旋转的四分量分解模型, 很好地区分了植被和有方向性建筑物. Sato 等人^[19]利用该模型针对人工目标开展了进一步研究. Bombrun 等人^[20]将 TSVM 模型与 GLRT 探测器相结合, 开展了有方向性目标的探测与分析, 取得了较好的结果. 在极化 SAR 的应用研究方面, Arii 等人^[21]根据目前植被体散射模型存在的问题, 提出了一个广义的植被散射模型, 并将其用于实际的植被分析和模拟当中取得了较好的结果. Garestier 等人^[22]基于 L 和 P 波段极化 SAR 数据, 开展了生物物理参数提取研究, 发现各向异性参数 A 与植被高度密切相关. Jagdhuber 和 Hajnsek^[23]基于改进的 Freeman-Durden 三分量模型与地体幅度比率, 开展了植被覆盖地表参数估计方法研究, 取得了很好的结果. Lee 等人^[24]开展了极化方向角补偿对散射分量功率影响的分析研究, 发现方向角补偿将引起二面角散射分量的较大增加, 体散射分量减小. Ballester-Berman 和 Lopez-Sanchez^[25]基于极化 SAR 数据, 开展了极化特征参数与植被高度、生物量以及生长期特征参数的关系研究. 另外, 针对目前 ALOS/PALSAR 和 TerraSAR-X 获取的相干双极化数据, Cloude^[26]基于四极化模式的 H-alpha 分解理论发展了针对相干双极化模式的 H2 α 分解方法, 并深入研究了其得到参数的物理意义.

Green^[27]最早提出紧缩(Compact)极化概念, Souyris 等人^[28]提出了 $\text{PI}/4$ 模式的重建算法, 并对该模式性能与极化模式进行了详细比较分析; 随后 Raney^[29,30]提出了混合紧缩极化模式, 对该模式的优点进行了较为全面的分析. Dubois-Fernandez 等人^[31]对混合极化模式在低频 SAR 中的极化和极化干涉应用进行了分析, 发现该模式可以较好地克服电离层

效应的影响,可以得到可靠的交叉极化分量, P 波段混合极化模式森林监测具有非常大的应用潜力. Nord 等人^[32]改进了 Souyris 等人提出的紧缩极化重建算法,并对几种典型紧缩极化与极化模式进行了详细的比较和分析. Ainsworth 等人^[33]以及 Touzi^[34]也对传统极化模式和紧缩极化模式进行了详细的对比和分析.

我国在极化 SAR 以及紧缩极化 SAR 的研究方面也开展了较多的研究^[1,15,35-37],取得了很好的成果.对于极化 SAR 研究,总的来说极化 SAR 理论及应用已较为成熟.但是,目前一个新的研究动向是:将极化 SAR 目标分解模型引入到极化干涉 SAR 以及三维和四维 SAR 当中以提高信息获取的精度.紧缩极化 SAR 的优势为:(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.目前存在的问题:(1) 紧缩极化不能完全重建极化信息,是传统极化信息的一个子集,重建算法有待进一步改进;(2) 需要发展更为强劲的紧缩极化 SAR 定标方法;(3) 不同模式的紧缩极化 SAR 应用分析需进一步加强;(4) 针对具体应用的不同紧缩极化模式与极化模式的比较和分析也需进一步研究;(5) 地形对紧缩极化 SAR 测量的影响还需进一步评价.总之,紧缩极化 SAR 是目前新一代 SAR 的一种模式,结合特定的应用需求,还需进一步的深入研究.

2.2 极化干涉 SAR 和紧缩极化干涉 SAR

自 1998 年 Cloude 等人^[38]提出极化干涉 SAR 概念和最优相干分解理论以及 Treuhaft 和 Siqueira^[39]提出极化干涉相干模型以来,极化干涉 SAR 测量已成功用于森林或农作物高度估计、目标三维结构、植被覆盖区地表参数估计、积雪以及冰盖参数估计等研究中.

在极化干涉 SAR 植被高度及生物量反演研究方面, Papathanassiou 和 Cloude^[40]基于机载 E-SAR 极化干涉数据提出了基于最优化方法的植被高度反演方法, Cloude 等人^[41]提出了基于 RVoG 散射模型的三阶段植被高度反演算法,是迄今为止在所有方法中利用机载数据可获得最好估测精度的方法; Liseno 等人^[42]还提出了一种可以综合考虑衰减和垂直结构的半经验方法.由于 RVoG 模型只适用于均匀的植被层,对于更复杂的林分结构如垂直剖面变化较大的

情况则误差较大,考虑到这种情况, Garestier 和 Le Toan^[43]提出了两个考虑森林自然结构的辅助模型:垂直方向的消光系数可变和垂直方向后向散射呈高斯分布,理论模拟和 P 波段实际数据分析结果表明:改进的模型可以提高植被高度反演的精度. Neumann 等人^[44]将 Freeman-Durden 三分量极化分解模型与极化干涉 SAR 相结合,提出了改进的植被参数估计方法,他的方法增强了植被结构参数和特征估计,植被覆盖地表参量估计以及时间去相干估计及补偿.随着全球森林生物量观测任务的开展,科学家对于不同地区和不同频率极化干涉 SAR 植被高度反演的潜力和精度^[45-48]以及有关星载 L 和 P 波段极化干涉 SAR 观测植被高度的算法和需求均开展了较为深入的研究^[49,50].总的来说,目前国际上基于机载极化干涉 SAR 估计的植被高度和生物量误差均低于 10%和 20%(20 t/ha),新一代 SAR 植被高度和生物量估计预测的误差也分别低于 10%和 20%,符合当前全球变化应用对该数据的精度需求.另外,对于星载低频(如 L 和 P 波段)SAR,如何分析电离层效应引起法拉第旋转对于极化和相位等的影响是目前星载 L 和 P 波段 SAR 测量的一个重点研究课题之一. Bickel 和 Bates^[51]首次讨论了电离层效应对极化散射矩阵的影响,以后的 Freeman^[52], Freeman 和 Saatchi^[53], Meyer 和 Nicoll^[54], Qi 和 Jin^[55], Jehle 等人^[56], Meyer^[57]及 Chen 和 Quegan^[58]针对 L 或 P 波段极化雷达进一步分析了电离层效应引起的法拉第旋转对雷达数据的影响,并提出了相应的估计和校正方法. Kim 和 Papathanassiou^[59]对当前提出的法拉第算法的性能进行了评价和分析,结论是各个算法的性能差别较大,并且还依赖于地表目标的散射特征.

在极化干涉 SAR 目标三维结构获取研究方面,主要有基于层析成像理论的极化相干层析方法和基于空间阵列信号理论的目标三维结构信息获取方法. Cloude^[60]提出了极化相干层析(Polarization Coherence Tomography, PCT)方法,进一步拓展了 POLinSAR 用于植被结构参数信息提取的理论和方法.该方法依赖植被高度和地形相位,这些参数既可以利用 POLinSAR 反演得到,也可以利用 LiDAR 得到. Cloude^[61]基于模拟数据和机载 E-SAR 数据研究了极化相干层析方法用于星载 L 和 P 波段数据获取森林高度和生物量的潜力. Garestier 和 Le Toan^[62]基于 P 波段极化干涉数据,利用提出的高斯垂直后向散

射剖面模型,分析了森林区域后向散射在垂直剖面的分布.基于空间阵列信号的空间谱估计理论,Sauer等人^[63]利用德国德累斯顿的机载E-SAR数据首先开展了极化干涉SAR城市建筑物高度提取的模型和方法研究,通过该方法不仅可以获取建筑物的高度等三维信息.同时,还可以得到具有物理意义的建筑物散射机制信息.Sauer等人^[64]将极化分解模型引入到极化谱分析方法中,进一步研究了该技术在获取森林三维信息方面的能力.

在极化干涉SAR植被覆盖地表参数获取研究方面,极化干涉雷达的出现,第一次提供了一个估计植被覆盖地表下即使是弱地表散射的方法.Tabb等人^[65]基于全最大似然反演模型,得到了重建的地表极化相干矩阵.Li等人^[66]对于该模型反演植被覆盖区土壤水分的潜力和有效性进行了研究.Cloude^[67]提出了反演森林覆盖地表土壤水分的负Alpha方法,Neumann等人^[68]基于负Alpha方法的思想,针对农业区地表,结合有方向体积+地表二层模型进行了面体散射分离的模型和方法研究.Huang等人^[69]将层析成像和极化谱分析技术相结合开展了林下目标探测的研究.Ballester-Berman和Lopez-Sanchez^[70]将Freeman-Durden极化分解概念应用于极化干涉SAR中,从而可以将干涉相干表示成直接散射、二面角散射和随机体散射三种散射过程的和.这个分解过程的最大优势在于可以得到比单独的极化分解模型更准确的直接散射和体散射分量,同时,它也可以区分来自地表的和来自植被顶部冠层的直接散射分量.该研究对于精确的极化干涉SAR信息分离是一个巨大的推动.

Lavalle等人^[71]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.Truong-Lo和Dubois-Fernandez^[72]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.

我国在极化干涉SAR的研究方面,中国科学院对地观测与数字地球科学中心、中国科学院电子学研究所、中国科学院遥感应用研究所、中国林业科学研究院以及电子科技大学等^[73-75]已开展了较多的研究,但是高质量的数据源仍然是目前研究的一个极大限制.

从以上的分析可以看出,近几年极化干涉SAR在地表参数反演以及三维信息获取方面已经取得了巨大的进展,但是还存在如下问题:(1)对于全球变

化背景下的全球森林生物量估算,复杂地形和复杂森林分结构仍然是植被高度反演的一个难点和重点问题.(2)对于星载L和P波段雷达,电离层效应引起的法拉第旋转、散置以及闪烁效应的估计及校正仍然需要进一步研究.(3)极化干涉高分辨率三维重建算法以及三维信息如何用于分类,生物量估计等需要深入研究.(4)紧缩极化干涉的应用潜力还需要挖掘.(5)极化干涉SAR各个散射分量的准确获取是下一步需要深入分析的问题,对于植被参数反演以及植被覆盖地表下参数反演至关重要.

2.3 高级差分干涉SAR(ADInSAR)

高级差分干涉也可以称作长时间序列差分干涉,对于慢形变过程监测非常有效,比如对于板块构造运动和地表沉降等慢形变过程的监测精度均可以达到1mm/a.该方法主要分为两类:(1)永久散射体差分干涉^[76-78];(2)小基线子集差分干涉^[79].永久散射体差分干涉是以成像像素密度的减小为代价的,并且主要应用于城市地区,在非城市区域的应用受到了很大限制^[80].基于该方法,一些改进方法被提出,如GAMMA公司提出的IPTA(interferometric point target analysis)方法^[81],VEXCEL公司研发的CTM(coherent target monitoring)方法,Hooper等人^[82]以及Schunert等人^[83]发展的可以用于非城市区的永久散射体方法.小基线子集差分干涉技术(small-baseline subset, SBAS)^[79]使用的干涉图需要具有小的空间基线,对数据的要求比永久散射体技术稍微严格一些,但它不受研究区域的限制.该方法提出的初期,主要用于探测分辨率为100m×100m的大尺度形变,后来,Lanari等人^[84]将该方法进行扩展使其可以以全分辨率的能力探测局部小尺度形变,所以叫做全分辨率小基线子集方法.Pepe等人^[85]基于不同传感器ERS/ENVISAT获取的SAR数据,利用小基线子集差分干涉技术进行了形变场的时间序列分析.

为了改善长时间序列稳定点目标的选取,Pipia等人^[86,87]以及Navarro-Sanchez等人^[88]将极化信息引入永久散射体差分干涉处理中,成功地增加了永久散射体的点数.Costantini等人^[89,90]提出了永久散射体对差分干涉方法(PSP),该方法仅利用了永久散射体对属性信息以及一个更为广义的信号模型,克服了经典永久散射体方法的缺陷,例如对空间相干误差如大气和轨道误差不敏感,因此,不需要模型基的

内插或拟合,同时,不依赖于预先选择的点的密度和冗余信息的外插.初步实验结果表明:该方法对于永久散射体的识别以及测量精度是非常有效的.另外,Adam 等人^[91],Gernhardt 和 Bamler^[92]基于 TerraSAR-X 高分辨率数据,研究了永久散射体干涉技术估计单个建筑物内形变的潜力和有效性.

从以上的分析和研究可见:(1) 大气效应以及轨道误差消除仍然是一个难点问题;(2) 高分辨率长时间序列差分干涉是以后的一个应用方向;(3) 永久散射体对差分干涉方法还需要进一步深入研究.

2.4 新型三维和四维 SAR

三维和四维 SAR 是近十年发展起来的一种新兴技术,通过改变成像后的数据处理算法可实现对高度向分布散射体的测量,与极化信息结合起来,还可以获得目标精细结构、物理成分和空间分布信息,区分不同高度多个散射体,监视散射体的空间位置变化情况等,是未来 SAR 发展的一个重要方向.该技术已成功应用于城市三维重建、城市地表沉降和森林参数估计等领域,在地质学、冰川学及地下埋藏物体的探测方面都有着巨大的应用潜力.国外利用机载系统成功地开展了大量的研究工作,其数据处理算法、应用模型也逐步实现和完善,星载系统的研制和应用是研究热点之一.

在目标三维或四维重建的 SAR 领域,其技术主要有层析成像 SAR(3D SAR)、极化层析成像 SAR(3D SAR)、差分层析成像 SAR(4D SAR)和极化差分层析成像 SAR(4D SAR)四个方面.为了解决干涉 SAR 在高度向分布的模糊问题,Reigber 和 Moreira^[93],Gini 等人^[94],Lombardini 等人^[95],Fornaro 等人^[96]和 Fornaro 和 Lombardini^[97]基于机载或星载 SAR 或模拟 SAR 数据开展了层析 SAR 研究,成功得到了高度维后向散射分布.针对永久散射体差分干涉分析中单散射体假设带来的问题^[76],Lombardini^[98]基于二维空间-时间谱分析技术和模拟数据,对层析成像 SAR 技术进行了扩充,提出了可以同时估计散射体高程、平均形变速度和形变时间序列的差分层析成像技术.在此基础上,Fornaro 等人^[99]基于星载 SAR 数据开展了利用差分层析成像 SAR 识别单和双散射体的研究,得到了很好的结果.为了解决层析成像对数据景数需求大以及不能获取目标散射机制的问题,Guillaso 和 Reigber^[100],Sauer 等人^[63]将阵列信号处理技术引

入极化干涉中,提出了极化层析技术以获取建筑物高度及散射机制.Nannini 等人^[101]和 Frey 与 Meier^[102]基于该技术对林下目标探测进行了研究.另外,Lombardini 和 Pardini^[103],Nannini 等人^[104],Frey 等人^[105],Lombardini 等人^[106],Fornaro 和 Pauciuolo^[107],Lombardini 等人^[108],Fornaro 等人^[109],Nannini 等人^[110],Zhu 等人^[111],Huang 等人^[112],Frey 和 Meier^[113]针对层析成像 SAR、极化层析成像 SAR 以及差分层析成像 SAR 存在的非稳态体散射、时间去相干、大气相位、不规则基线采样、非线性飞行轨迹、最少需要的图像数、超高分辨率估计以及混合谱等具体技术问题开展较为广泛的研究.Lombardini 等人^[114]在差分层析成像的基础上又提出了极化差分层析成像,该技术不仅可以得到散射体的高程、平均形变速度和形变时间序列,还可以得到散射体的散射机制类型随高度和形变速度的分布,进一步增加了信息并提高了测量精度.

近年来,我国在 SAR 系统和数据处理技术的研究取得了很大进展,但是在 3D 和 4D SAR 技术研究方面还处于初步阶段.随着我国机载、星载 SAR 数据源的不断扩展,将推动我国在该方向上的发展.

从以上的分析可见,对于 3D 和 4D SAR,从最初的层析成像,到引入差分干涉技术和极化信息,使得该技术在近几年得到了飞速的发展.但是到目前为止还存在如下问题:(1) 在基线很少且不均匀和数据量不足的情况下超高分辨率重建算法的研发以及不同聚焦或重建算法的性能比较与分析需要深入研究;(2) 基于双站/多站或星座成像模式的 3D 或 4D SAR 技术的研究还处于初步阶段,需要开展大量的研究.

2.5 双站多站 SAR

双站/多站 SAR 是指收发天线分置于两个或多个不同平台的 SAR,这是与单站 SAR 的显著不同.作为一种新概念的空间对地观测手段,近年来已成为雷达成像技术研究的热点之一,与传统的单站 SAR 相比,双站/多站 SAR 有如下优势和应用前景^[115].在干涉应用上,双站/多站 SAR 可以消除时间去相干,并且可以实现单站干涉难以得到的长基线测量,提高干涉相位测量的精度和干涉测量灵敏度,从而提高生物物理参数估计、地表高程和形变测量的精度;在地物目标识别与分类应用方面,双站/多站可以得到目标不同方位的雷达散射信号,有助于地表几何

和介电特征的获取及散射机理的研究,可以显著提高图像分类和识别能力.在城市区,双站观测可以有效克服建筑物的强散射,降低图像动态范围,提高图像质量,从而提高城市区地物目标的分类和识别精度;在海洋应用领域,双站 SAR 可以观测到更宽的海洋波谱,有利于 SAR 成像海波模型的研究和应用.

自 20 世纪 90 年代中期第一个星-机双站实验开展以来^[116],针对机载双站^[117,118]、地基双站^[119]、星-地双站^[120,121]以及星-机双站^[122-125]开展了一系列实验研究.这些实验主要针对双站 SAR 的几何配置(如不同平台,前视或后视),平台的时间和相位同步和成像处理的关键技术开展研究.Krieger 和 Younis^[126]对于振荡器噪声对双站和多站 SAR 成像的影响进行了评估和分析.Lopez-Dekker 等人^[127]开展了双站 SAR 系统的相位同步和多普勒形心估计方法研究.Wang 等人^[128-130]针对不同的双站 SAR 几何配置模式如 constant-offset,星-机模式和机-地双站模式,分别开展了 Chirp scaling,波数域成像算法研究.Balss 等人^[131]以及 Rodriguez-Cassola 等人^[132]也开展了双站 SAR 的处理方法研究,并对其性能等进行了分析.另外,针对具体的应用目标,科学家们对双站 SAR 干涉、极化、极化干涉以及层析成像的成像处理算法以及图像处理与分析也开展了初步的研究^[120,133-137].

总的来说,双站 SAR 的研究在这几年取得了巨大的进步,但存在如下问题:(1)系统总体、性能分析、几何与信号模型、同步补偿、运动补偿、成像算法等问题还没有完全解决,比如在成像方面,单站 SAR 的频域算法或混合域算法均无法适用于双站 SAR 成像,需要研制实用性强、精度高、成像范围广的高效成像算法;(2)在双站/多站 SAR 的应用方面还处于非常初步的阶段如基于双站/多站 SAR 的地物目标的散射体特征模拟、分析与比较,以及地物目标分类与参数反演等都需要大力加强研究.

2.6 数字波束形成 SAR(DBF SAR)

为了克服传统 SAR 存在的高分辨率与宽幅覆盖的问题,许多学者研究了多种高分辨率宽幅 SAR 的实现方法和策略,其中 DBF(digital beam forming)技术是实现高分辨率宽幅 SAR 的有效方法,DBF-SAR 采用多通道数字化,能够产生高分辨率超宽模式 SAR 数据,并且具有高的信噪比,能够克服传统

SAR 系统的方位向分辨率与幅宽之间的矛盾问题.采用该技术,幅宽可以达到 400 km,而方位向的分辨率可以达到 5 m.高分宽幅 SAR 的实现方法和策略已经成为目前 SAR 数据采集的发展方向之一.

比较早期的实现高分宽幅方法主要有 Jean 和 Rouse^[138]提出的多波束方法,Currie 和 Brown^[139]提出的 DPCA(Displaced phase centre antenna)技术,Callaghan 和 Longstaff^[140]提出的 Quad-Array 方法以及 Suess 等人^[141]提出的 HRWS 方法.Krieger 等人^[142]对现有的数字波束 SAR 技术进行非常好的改进,改进的方法极大地提高了模糊分辨率的性能,但是以增加数据采集和处理的复杂度为代价.以上这些数字波束形成 SAR 方法或扩展方法主要是针对短波长的 SAR 系统如 C, X 和 Ka 波段而提出的.对于长波长如 L 或 P 波段 SAR,上面的 DBF SAR 方法会导致非常大而重的相控阵列天线,因此,对于长波长 SAR 急需研发既具有波束形成 SAR 优势,同时,又没有由于长波长导致的大而重的天线的劣势的新方法.基于此,Freeman 等人^[143]提出了新概念的 SweepSAR,该方法主要思想是将轻重量可放置的反射器天线与一个简单的、一维的相控阵反馈组件相结合从而得到高分宽幅的 SAR 数据.该技术将应用于美国 NASA 和德国 DLR 正在实施的 DESDynI 计划 TanDEM-L 计划项目中,用于获取高分宽幅的雷达数据.另外,Krieger 等人^[144]对实现高分宽幅 SAR 的技术以及优化策略进一步进行了详细的比较和分析.Fischer 等人^[145],Sadowy 等人^[146],Rincon 等人^[147],Suess 等人^[148],Bordoni 等人^[149]针对不同的应用目的也对数字波束形成 SAR 进行了深入的研究.在研究利用高分宽幅 SAR 模式数据的地物信息提取方法方面,德国 DLR 的 Gabele 等人^[150]利用高分宽幅 SAR 所采用的子孔径策略,发展了针对高分宽幅 SAR 的动目标监测方法.数字波束形成 SAR 技术的出现和发展为全球环境变化研究所需要的高分辨率、高幅宽和高时相数据的采集提供重要的技术保证,将极大促进 SAR 在全球环境变化中的应用.

从上面新一代 SAR 对地观测研究的最新进展的分析与讨论可以看出,总体上,国际上如欧美等国家受益于其在新型传感器研制和数据源获取等方面的优势,在新一代 SAR 对地观测的理论、方法和技术以及应用方面已开展了较多的研究,并取得了很大的进展.国内科学家由于受到新型 SAR 数据源采

集的限制,在新一代 SAR 对地观测理论与应用研究方面稍晚起步,但是国内相关单位如中国科学院相关机构和大学基于所能获取的 SAR 数据积极开展新一代 SAR 对地观测及应用方面的研究也取得了很好的成绩,为提高 SAR 的定量化遥感研究水平,为我国新一代 SAR 的研制提供了理论和方法支撑。

3 新一代 SAR 对地观测的科学问题与发展方向

基于前面对新一代 SAR 任务计划的信息获取的技术能力、科学目标以及新一代 SAR 对地观测理论与应用的最新进展的分析,本节将对新一代 SAR 对地观测与应用中存在的重大科学问题和发展方向进行分析。

3.1 新一代 SAR 的重大科学与技术问题

新一代 SAR 对地观测理论与应用研究存在的重大科学与技术问题主要有以下两个方面:

(1) 新一代 SAR 全球变化对地观测机理和信息处理的理论和方法。全球环境变化正在成为世界各国关注的重大命题,哥本哈根气候大会的召开更引起了各国的高度重视,开展全球变化研究已是我国和全球的重大政治、经济和社会需求。目前,光学对地观测已在全球变化研究中扮演了非常重要的角色,新一代 SAR 将在一些特定领域提供比当前光学与其他微波传感器更具优势的数据源用于全球变化研究,如 TanDEM-X 系统可以提供当前光学与其他微波传感器不能提供的全球高精度的 HRTI-3 DEM 数据; TanDEM-L 或 BIOMASS 系统可以提供反映植被三维结构信息的全球森林高度和生物量数据,这也是当前光学与其他微波传感器不能提供的,该数据对于全球碳循环的碳汇及其变化研究至关重要,另外, TanDEM-L 系统还可以提供区域或全球尺度的大地构造变形和极地海冰和冰盖动态变化数据,这些数据对于研究与全球变化相关的地球内部及表面动态变化过程也都至关重要。总之,目前提出的新一代 SAR 计划大多瞄准全球环境变化相关的重大课题。但是,关于如何有效发挥具有双/多站或星座观测、极化干涉测量、高分宽幅测绘和三维结构信息获取能力的新一代 SAR 全球变化对地观测机理和信息处理的理论和方法是新一代 SAR 研究目前急需解决的重大科学问题。这其中包括:新一代 SAR 估计全球森林

生物量时,复杂地形与复杂林分结构的极化干涉 SAR 成像机理与参数反演理论;适用于全球变化观测的最优紧缩极化 SAR 模式分析与设计;区域尺度的高分宽幅 SAR 数据标定问题;双站/多站或星座 SAR 观测地物目标散射机理与高分辨率高精度的信息分离理论与方法等等。

(2) 新一代 SAR 成像处理-图像处理-领域应用一体化。从前面的有关新型 SAR 对地观测技术的研究进展可见,目前对于 SAR 成像处理、图像处理与应用已不再是相互独立的,而是相互紧密联系的,需要一体化的整体设计和协同。比如有关 3D 或 4D SAR 层析成像就是这几方面相互结合的典型例子,特别是对于双站/多站或星座观测模式情形。因此,新一代 SAR 成像处理-图像处理-领域应用一体化是需要大力加强研究的重大技术问题,包括:新一代 SAR 成像处理-图像处理-领域应用一体化的理论框架;面向特定应用需求的高幅/相精度 SAR 成像机理与处理方法研究;面向特定应用需求的新一代 SAR 图像的精细定标处理方法研究;面向非自然目标的新一代 SAR 一体化处理模型与信息提取方法;构建面向特定应用需求的新一代 SAR 一体化信息处理模式等。通过对以上存在问题的研究,可以从整体角度解决新一代 SAR 应用过程中与成像和图像处理的不连续性问题。

3.2 新一代 SAR 发展方向

新一代 SAR 的未来发展受到两个因素的驱动:(1) 科学问题驱动。随着全球变化问题日益受到世界各国的重视,与全球变化有关的全球性科学问题如全球碳循环是驱动新一代 SAR 发展的主要因素之一;(2) 应用需求驱动。SAR 对地观测发展的最终目标是应用,应用需求牵引促进新一代 SAR 技术的发展。因此,笔者认为新一代 SAR 的未来发展有两大重要方向:(1) 双站/多站或星座观测模式下,高分宽幅极化、干涉、极化干涉 SAR 的地物目标散射特征模拟与分析及其应用研究,高分辨率 3D 和 4D SAR 重建理论与应用研究。传统单站 SAR 与新一代 SAR 相比存在较多问题如传统单站 SAR 重访周期长、宽幅低分辨和仅能获取后向散射方向信息等等,因此,单站 SAR 的应用受到很多限制,比如在城市区和地形起伏较大的山区。由于新一代 SAR 在观测模式上几何布局灵活多样,不再是简单的后向散射观测,因此,

在多样的几何配置下,地物目标散射特征模拟与分析以及应用研究将是未来研究的一个重要方向之一.原来的散射模拟与应用模型和方法都是针对后向散射的,所以,在新一代SAR观测模式下,原来的散射模型与应用方法需要修正或重新研发.另外,随着新一代SAR数据空间分辨率的极大提高以及城市精细化管理的需求,高分辨率3D和4D SAR的应用也将是一个发展方向之一.(2) 新一代SAR全球环境变化观测研究.从前面有关新一代SAR任务计划我们知道,从信息获取的技术层面,新一代SAR大多具有双站或星座观测、极化干涉测量、高分宽幅测绘和三维结构信息获取能力,解决了由于单站SAR重复周期长、幅宽窄和时间去相干严重等造成的在解决区域或全球尺度问题上存在的重大缺陷,具有全球环境和安全监测能力.同时,这些新型SAR的科学目标大都是瞄准当前国际关注的诸如全球变化研究等重大课题.另外,由于SAR具有的部分穿透能力,使得其在获取目标的结构信息方面具有很大优势,但是受到目前单站SAR幅宽的限制,其全球变化应用受到很大限制.新一代SAR具有的高分宽幅和极化干

涉测量能力,使得其在获取全球森林高度和生物量等方面具有很大的优势.因此,可以预见新一代SAR全球变化观测研究将是未来的研究发展方向之一.

由上面的分析可见,新一代SAR将在全球水循环、碳循环、土地利用变化、森林监测、土壤水分监测、冰川监测、海岸线监测、海浪海风监测以及人类活动对环境的影响等方面发挥更为重要的作用.

4 结语

新一代SAR具有强大的对地观测能力,正成为解决全球环境与安全问题的重要手段,应用领域正不断扩展.国际上如欧美国家,在新一代SAR对地观测的理论、方法、技术以及应用方面已开展了较多的研究,并取得了很大的进展.我国的新一代SAR对地观测与应用研究还主要处于跟踪阶段,因此急需开展新一代SAR对地观测理论及应用研究,提升我国对地观测的能力,为微波对地观测技术在我国国民经济建设和社会可持续发展方面提供理论和方法支撑,为该领域发展做出应有的贡献.

参考文献

- 1 郭华东. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社, 2000
- 2 Freeman A, Rosen P, Jordan R, et al. DESDynI — A NASA mission for ecosystems, solid earth, and cryosphere science. In: 4th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Italy. 2009
- 3 Davidson M, Snoeij P, Attema E, et al. Sentinel-1 mission overview. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 284–287
- 4 Heliere F, Lin C C, Fois F, et al. BIOMASS: A p-band SAR earth explorer core mission candidate. In: Radar Conference, 2009, IEEE. 2009. 1–6
- 5 Moreira A, Hajnsek I, Krieger G, et al. TANDEM-L: Monitoring the earth's dynamics with InSAR and Pol-InSAR. In: 4th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Italy. 2009
- 6 Krieger G, Hajnsek I, Papathanassiou K, et al. TanDEM-L: A mission for monitoring earth system dynamics with high resolution SAR interferometry. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 506–509
- 7 Krieger G, Moreira A, Fiedler H, et al. TanDEM-X: A satellite formation for high resolution SAR interferometry. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2007, 45: 3317–3341
- 8 Zink M, Krieger G, Fiedler H, et al. The TanDEM-X mission: overview and status. In: the 2007 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain. 2007
- 9 Séguin G. Radarsat constellation preliminary design. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 514–515
- 10 Shimada M. Advance land-observation satellite (alos) and its follow-on satellite, ALOS-2. In: 4th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Italy. 2009
- 11 Lee J S, Pottier E. Polarimetric radar imaging from basics to applications. London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009
- 12 Cloude R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1996, 34: 498–518
- 13 Freeman A, Durden S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1998, 36: 963–973

- 14 Yamaguchi Y, Moriyama T, Ishido M, et al. Four component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 1699–1706
- 15 Touzi R. Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 1–17
- 16 Freeman A. Fitting a two-component scattering model to polarimetric SAR data from forests. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 2583–2592
- 17 An W T, Cui Y, Yang J. Three-component model-based decomposition for polarimetric SAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 2732–2739
- 18 Yamaguchi Y, Sato A, Sato R, et al. A new four-component scattering power decomposition applied to ALOS-PALSAR PLR data sets. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 453–456
- 19 Sato R, Yamaguchi Y, Yamada H. Man-made target detection using modified scattering power decomposition with a polarimetric rotation. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 461–464
- 20 Bombrun L, Vasile G, Gay M, et al. A combined TSVM model and GLRT detector for a roll invariant target detection. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 261–264
- 21 Ariei M, van Zyl J J, Kim Y J. A general characterization for polarimetric scattering from vegetation canopies. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 3349–3357
- 22 Garestier F, Dubois-Fernandez P C, Dominique G, et al. Forest biophysical parameter estimation using L- and P-Band polarimetric SAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 3379–3388
- 23 Jagdhuber T, Hajnsek I. Model-based inversion of soil parameters under vegetation using ground-to-volume ratios. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 495–498
- 24 Lee J S, Ainsworth T L. The effect of orientation angle compensation on coherency matrix and polarimetric target decompositions. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 499–502
- 25 Ballester-Berman J D, Lopez-Sanchez J M. Time series of polarimetric indicators and their potential relationships with biophysical parameters of agricultural crops. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 754–757
- 26 Cloude S. The dual polarisation entropy/alpha decomposition: A palsar case study. In: 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Italy. 2007
- 27 Green J P E. Radar measurements of target scattering properties. In: Evans J, Hagfors T, eds. *Radar Astronomy*. New York: McGraw-Hill, 1968. 1–75
- 28 Souyris J C, Imbo P, Fjortoft R, et al. Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: The $\pi/4$ mode. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 634–646
- 29 Raney R K. Dual-polarized SAR and Stokes parameters. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2006, 3: 317–319
- 30 Raney R K. Hybrid-polarity SAR architecture. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 3397–3404
- 31 Dubois-Fernandez P C, Souyris J C, Angelliaume S, et al. The compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 3208–3222
- 32 Nord M E, Ainsworth T L, Lee J S, et al. Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 174–188
- 33 Ainsworth T L, Kelly J P, Lee J S. Classification comparisons between dual-pol, compact polarimetric and quad-pol SAR imagery. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 2009, 64: 464–471
- 34 Touzi R. Compact-hybrid versus linear-dual and fully polarimetric sar. In: 4th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Italy. 2009
- 35 Jin Y Q. *Wave Propagation, Scattering and Emission in Complex Media*. Beijing: Science Press & World Scientific, 2004
- 36 王超, 张红, 刘智. 全极化合成孔径雷达图像处理. 北京: 科学出版社, 2008
- 37 Zhang L, Li X W, Guo H D. Effect of aspect angle normalized PolSAR data on urban building detection. *Can J Remote Sens*, 2010, 36: 276–286
- 38 Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36: 1551–1565
- 39 Treuhft R N, Siqueira P R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar. *Radio Sci*, 2000, 35: 141–178
- 40 Papathanassiou K P, Cloude S R. Single base-line Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, 39: 2352–2363
- 41 Cloude S R, Papathanassiou K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. *IEE Proc-Radar Sonar Navig*, 2003, 150: 125–134
- 42 Liseno A, Papathanassiou K P, Moreira A, et al. Analysis of forest-slab height inversion from multibaseline SAR data. In: the 2005 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, South Korea. 2005. 2660–2663

- 43 Garestier F, Le Toan T. Forest modeling for height inversion using single-baseline InSAR/Pol-InSAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 1528–1539
- 44 Neumann M, Ferro-Famil L, Reigber A. Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 1086–1104
- 45 Hajnsek I, Kugler F, Lee S K, et al. Tropical-forest-parameter estimation by means of Pol-InSAR: The INDREX-II campaign. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 481–493
- 46 Garestier F, Dubois-Fernandez P C, Champion I. Forest height inversion using high-resolution P-band Pol-InSAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 3544–3559
- 47 Garestier F, Dubois-Fernandez P C, Papathanassiou K P. Pine forest height inversion using single-pass X-Band PolInSAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 59–68
- 48 Tebaldini S. Algebraic synthesis of forest scenarios from multibaseline PolInSAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 4132–4142
- 49 Lee S K, Kugler F, Hajnsek I, et al. The potential and challenges of polarimetric SAR interferometry techniques for forest parameter estimation at P-band. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 503–505
- 50 Papathanassiou K P, Cloude S R, Krieger G, et al. Polarimetric sar interferometry (Pol-InSAR) for global forest biomass monitoring. In: 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, USA 2010
- 51 Bickel S H, Bates R H T. Effects of magne-toionic propagation on the polarisation scattering ma-trix. *proc. IEEE*, 1965, 53: 1089–1091
- 52 Freeman A. Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42: 1617–1624
- 53 Freeman A, Saatchi S S. On the detection of Faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter signatures. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 42: 1607–1616
- 54 Meyer F, Nicoll J. Prediction, detection, and correction of Faraday rotation in full-polarimetric L-band SAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 3076–3086
- 55 Qi R Y, Jin Y Q. Analysis of the effects of Faraday rotation on spaceborne polarimetric SAR observations at P-band. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 1115–1122
- 56 Jehle M, Rüegg M, Zuberbühler L, et al. Measurement of ionospheric Faraday rotation in simulated and real spaceborne SAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 1512–1523
- 57 Meyer F. Performance requirements for correction of ionospheric signals in L-band SAR data. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1106–1109
- 58 Chen J, Quegan S. Improved estimators of Faraday rotation in spaceborne polarimetric SAR data. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 7: 846–850
- 59 Kim J S, Papathanassiou K P. Faraday rotation estimation performance analysis. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 182–185
- 60 Cloude S R. Polarisation coherence tomography. *Radio Sci*, 2006, 41: RS-4017
- 61 Cloude S R. Forest vertical structure from P/L band Spaceborne PolInSAR. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 321–324
- 62 Garestier F, Le Toan T. Estimation of the backscatter vertical profile of a Pine forest using single Baseline P-band (Pol-)InSAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 3340–3348
- 63 Sauer S, Ferro-Famil L, Reigber A, et al. 3D visualisation and physical feature extraction of urban areas using multi-baseline Pol-InSAR data at L-band. In: Proceedings of Urban Remote Sensing Joint Event, 2007. 1–5
- 64 Sauer S, Kugler F, Lee S K, et al. Polarimetric decomposition applied to 3D SAR images of forested terrain. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 333–336
- 65 Tabb M, Flynn T, Carande R. Full maximum likelihood inversion of PolInSAR scattering models. *Int Geosci Remote Sens Symp*, 2002, 2: 1232–1235
- 66 Li X W, Guo H D, Li Z, et al. Sub-canopy soil moisture inversion using repeat pass Shuttle Imaging Radar C polarimetric synthetic aperture radar interferometric data. *J Appl Remote Sens*, 2009, 3: 1–18
- 67 Cloude S, Williams M. The negative Alpha filter: A new processing technique for polarimetric SAR interferometry. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2005, 2: 187–191
- 68 Neumann M, Daniel S, Ferro-Famil L, et al. Ground-agriculture separation by means of PolInSAR. In: 3th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Italy. 2007

- 69 Huang Y, Ferro-Famil L, Reigber A. Under foliage object imaging using SAR tomography and polarimetric spectral estimators. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 337–340
- 70 Ballester-Berman J D, Lopez-Sanchez J M. Applying the Freeman-Durden decomposition concept to polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 466–479
- 71 Lavalle M, Pottier E, Solimini D, et al. Compact polarimetric SAR interferometry: PALSAR observations and associated reconstruction algorithms. In: 4th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Italy. 2009
- 72 Truong-Loi M, Dubois-Fernandez P. An optimized method to estimate forest height with compact polarimetric SAR interferometry. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 790–792
- 73 郭华东, 李新武. 极化干涉雷达遥感机制及应用. *遥感学报*, 2002, 6: 401–405
- 74 吴一戎, 洪文, 王彦平. 极化干涉 SAR 的研究现状与启示. *电子与信息学报*, 2007, 29: 1258–1262
- 75 Li X W, Pottier E, Guo H D, et al. Urban land cover classification with high-resolution polarimetric SAR interferometric data. *Can J Remote Sens*, 2010, 36: 236–247
- 76 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, 38: 2202–2212
- 77 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, 39: 8–20
- 78 Kampes B M, Hanssen R F. Ambiguity resolution for permanent scatterer interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42: 2446–2453
- 79 Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, 40: 2375–2383
- 80 Colesanti C, Ferretti A, Novati F, et al. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 1685–1701
- 81 Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, et al. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In: the 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France. 2003, 7: 4362–4364
- 82 Hooper A, Zebker H, Segall P, et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L23611
- 83 Schunert A, Even M, Sörgel U, et al. A modified version of StaMPS for the detection of localized surface displacement. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1126–1129
- 84 Lanari R, Mora O, Manunta M, et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42: 1377–1386
- 85 Pepe A, Sansosti E, Berardino P, et al. On the generation of ERS/ENVISAT DInSAR time-Series via the SBAS technique. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2005, 2: 265–269
- 86 Pipia L, Fabregas X, Aguasca A, et al. Polarimetric coherence optimization for interferometric differential applications. In: the 2009 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009, V: 146–149
- 87 Pipia L, Fabregas X, Aguasca A, et al. Polarimetric differential SAR interferometry: First results with ground-based measurements. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2009, 6: 167–171
- 88 Navarro-Sanchez V D, Lopez-Sanchez J M, Vicente-Guijalba F. A contribution of polarimetry to satellite differential SAR interferometry: Increasing the number of pixel candidates. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 7: 276–280
- 89 Costantini M, Falco S, Malvarosa F, et al. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. In: 2008 Int Geosci Remote Sensing Symp. Boston MA, USA, 2008. 449–452
- 90 Costantini M, Falco S, Malvarosa F, et al. Persistent scatterer pairs (PSP) approach in very high resolution SAR interferometry. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 277–280
- 91 Adam N, Eineder M, Yague-Martinez N, et al. High resolution interferometric stacking with TerraSAR-X. In: the 2008 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA. 2008, II: 117–120
- 92 Gernhardt S, Bamler R. Towards deformation monitoring of single buildings-persistent scatterer interferometry using TerraSAR-X very high resolution spotlight data. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1138–1141
- 93 Reigber A, Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, 38: 2142–2152
- 94 Gini F, Lombardini F, Montanari M. Layover solution in multibaseline SAR interferometry. *IEEE Trans Aerosp Electr Syst*, 2002, 38: 1344–1356
- 95 Lombardini F, Montanari M, Gini F. Reflectivity estimation for multibaseline interferometric radar imaging of layover extended sources. *IEEE Trans Signal Process*, 2003, 51: 1508–1519

- 96 Fornaro G, Serafino F, Soldovieri F. Three dimensional focusing with multipass SAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 507–517
- 97 Fornaro G, Lombardini F. Three-dimensional multipass SAR focusing: Experiments with long-term spaceborne data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 702–714
- 98 Lombardini F. Differential tomography: A new framework for SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 37–44
- 99 Fornaro G, Serafino F, Reale D. 4D SAR imaging for height estimation and monitoring of single and double scatterers. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 224–237
- 100 Guillaso S, Reigber A. Polarimetric SAR tomography. In: 2th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Frascati, Italy. 2005
- 101 Nannini M, Scheiber R, Horn R. Imaging of targets beneath foliage with SAR tomography. In: 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2008. 3: 241–244
- 102 Frey O, Meier E. Combing time-domain back-projection and capon beamforming for tomographic SAR processing. In: the 2008 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA. 2008, II: 445–448
- 103 Lombardini F, Pardini M. 3D SAR Tomography: the multibaseline sector interpolation approach. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2008, 5: 630–634
- 104 Nannini M, Scheiber R, Moreira A. Estimation of the minimum number of tracks for SAR tomography. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 531–543
- 105 Frey O, Magnard C, Rüegg M, et al. Focusing of airborne synthetic aperture radar data from highly nonlinear flight tracks. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 1844–1858
- 106 Lombardini F, Pardini M, Fornaro G, et al. Linear and adaptive spaceborne three-dimensional SAR tomography: A comparison on real data. *IET Radar, Sonar Navigation*, 2009, 3: 424–436
- 107 Fornaro G, Pauciuolo A. LMMSE 3D SAR focusing. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 214–223
- 108 Lombardini F, Cai F, Pardini M. Tomographic analyses of non-stationary volumetric scattering. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1142–1145
- 109 Fornaro G, Serafino F, Reale D. SAR tomography: Application examples. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 281–282
- 110 Nannini M, Reigber A, Scheiber R. A study on irregular baseline constellations in SAR tomography. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1150–1153
- 111 Zhu X X, Bamler R. Super-resolution for 4-D SAR tomography via compressive sensing. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 273–276
- 112 Huang Y, Ferro-Famil L, Reigber A. Polarimetric SAR tomography of natural environments using hybrid spectral estimators. In: the 2010 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, USA. 2010. 146–149
- 113 Frey O, Meier E. 3D SAR Imaging of a forest using airborne MB-SAR data at L and P-band: Data processing and analysis. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 166–169
- 114 Lombardini F, Pardini M, Cai F. Polarimetric differential-tomoSAR imaging. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1154–1157
- 115 仇晓兰, 丁赤飙, 胡东辉. 双站 SAR 成像处理技术. 北京: 科学出版社, 2010
- 116 Martinsek D, Goldstein R. Bistatic radar experiment, in proc. EUSAR, Friedrichshafen, Germany. In: 2th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 1998. 1154–1157
- 117 Yates G, Horne A M, Blake A P, et al. Bistatic SAR image formation. In: 5th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2004
- 118 Dubois-Fernandez P, Cantalloube H, Vaizan B, et al. ONERA-DLR bistatic SAR campaign: Planning, data acquisition, and first analysis of bistatic scattering behavior of natural and urban targets. *Proc Inst Elect Eng Radar Sonar Navig*, 2006, 153: 214–223
- 119 Ulander L, Flood B, Fröling P, et al. Bistatic experiment with ultra-wideband VHF synthetic aperture radar. In: 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2008
- 120 Sanz-Marcos J, Lopez-Dekker P, Mallorqui J J, et al. SABRINA: A SAR bistatic receiver for interferometric applications. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2007, 4: 307–311
- 121 Broquetas A, Lopez-Dekker P, Mallorqui J J, et al. SABRINA-X: Bistatic SAR receiver for TerraSAR-X. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 748–750

- 122 Baumgartner S V, Rodriguez-Cassola M, Nottensteiner A, et al. Bistatic experiment using TerraSAR-X and DLR's new F-SAR system. In: 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2008. 57–60
- 123 Qiu X, Hu D, Ding C. Some reflections on bistatic SAR of forward-looking configuration. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2008, 5: 735–739
- 124 Walterscheid I, Espeter T, Klare J, et al. Bistatic spaceborne-airborne forward-looking SAR. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 986–989
- 125 Rodriguez-Cassola M, Baumgartner S, Krieger G, et al. Bistatic TerraSAR-X/F-SAR spaceborne-airborne SAR experiment: Description, data processing and results. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 781–794
- 126 Krieger G, Younis M. Impact of oscillator noise in bistatic and multistatic SAR. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2006, 3: 424–428
- 127 Lopez-Dekker P M, Serra-Morales P, Sanz-Marcos J. Phase synchronization and doppler centroid estimation in fixed receiver bistatic SAR systems. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 3459–3471
- 128 Wang R, Loffeld O, Nies H, et al. Focusing hybrid spaceborne/airborne bistatic SAR data using wavenumber domain algorithm. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 2275–2283
- 129 Wang R, Loffeld O, Nies H, et al. Chirp scaling algorithm for the bistatic SAR data in the constant-offset configuration. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 952–964
- 130 Wang R, Loffeld O, Neo Y L, et al. Focusing bistatic SAR data in airborne/stationary configuration. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 452–465
- 131 Balss U, Niedermeier A, Breit H. TanDEM-X bistatic SAR processing. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 751–753
- 132 Rodriguez-Cassola M, Prats P, López-Dekker P, et al. General processing approach for bistatic SAR systems: Description and performance analysis. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 998–1001
- 133 Duque S, Lopez-Dekker P, Mallorqui J J, et al. Forward and backward bistatic Interferometry. In: the 2008 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA. 2008, III: 601–604
- 134 Duque S, López-Dekker P, Merlano J C, et al. Bistatic sar tomography: Processing and experimental results. In: the 2010 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, USA. 2010. 154–157
- 135 López-Dekker P, Duque S, Merlano J C, et al. Fixed-receiver bistatic SAR along-track interferometry: First results. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 990–993
- 136 Nies H, Behner F, Reuter S, et al. Polarimetric and interferometric applications in a bistatic hybrid sar mode using TERRASAR-X. In: the 2010 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, USA. 2010. 110–113
- 137 Nies H, Behner F, Reuter S, et al. SAR experiments in a bistatic hybrid configuration for generating PolInSAR data with TerraSAR-X illumination. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 994–997
- 138 Jean B, Rouse J. A multiple beam synthetic aperture radar design concept for geoscience applications. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1983, GE-21: 201–207
- 139 Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR. *IEE Proc F -Radar Signal Process*, 1992, 139: 122–135
- 140 Callaghan G, Longstaff I. Wide-swath space-borne SAR using a quad-element array. *IEE Proc RSN*, 1999, 146: 159–165
- 141 Suess M, Grafmueller B, Zahn R. A novel high resolution, wide swath SAR system. In: the 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia, 2001. 1013–1015
- 142 Krieger G, Gebert N, Moreira A. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote Sensing. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 31–46
- 143 Freeman A, Krieger G, Rosen P, et al. SweepSAR: Beam-forming on receive using a reflector-phased array feed combination for spaceborne SAR. *Radar Conference IEEE Pasadena California*, 2009, 1–9
- 144 Krieger G, Younis M, Gebert N, et al. Advanced digital beamforming concepts for future SAR systems. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 524–527
- 145 Fischer C, Heer C, Werninghaus R. Development of a high-resolution wide-swath SAR demonstrator. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1166–1169
- 146 Sadowy G, Ghaemi H, Heavey B, et al. Ka-band digital beam forming and sweep SAR demonstration for ice and solid earth topography. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1170–1173
- 147 Rincon R F, Vega M, Buenfil M, et al. DBSAR's first multimode flight campaign. In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1178–1181
- 148 Suess M, Ludwig M, Schaefer C, et al. Wide swath sar instrument for global monitoring based on digital beam forming. In: the 2010 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, USA. 2010. 146–149

- 149 Bordoni F, Younis M, Krieger G, et al. Performance investigation on the high-resolution wide-swath SAR system with monostatic architecture. P In: 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin: Offenbach, 2010. 1122–1125
- 150 Gabele M, Krieger G. GMTI performance of a high resolution wide swath SAR operation mode. In: the 2008 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA. 2008, III: 282–285
-

Technical characteristics and potential application of the new generation SAR for Earth observation

GUO HuaDong & LI XinWu

Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

From the viewpoint of Earth observation mechanisms and the potential application of new generation synthetic aperture radar (SAR), four subjects are analyzed and discussed as follows: Technical characteristics and scientific aspects of new generation SAR, the latest developments in new generation SAR Earth observation studies, the key science and methodological issues of new generation SAR, and its future development. In China, systematic study of these subjects is required for research and application of the new generation SAR, from follow-through to innovation, to improve SAR Earth observation science and techniques, and to service the demand of many fields across the nation.

new generation SAR, technical characteristics, potential application, global environmental change

doi: 10.1360/972010-2458