

## 新体制SAR三维成像技术研究进展

洪文 王彦平\* 林贇 谭维贤 吴一戎

(微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

(空间信息处理与应用系统技术中国科学院重点实验室 北京 100190)

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

**摘要:** 常规SAR成像, 平台沿直线飞行, 形成直线型合成孔径, 仅能获取2维图像, 即3维空间中的观测场景在斜距-方位平面的2维投影, 图像具有叠掩、透视缩短、阴影等畸变现象。SAR 3维成像突破了斜距-方位2维频率信息获取, 能够获取第3维频率信息, 实现3维分辨, 可获得观测场景的散射中心在3维空间中的分布, 从而解决叠掩问题, 消除透视缩短、顶底倒置等几何形变现象, 更直观地描述客观场景, 已成为国际研究热点。该文介绍SAR 3维成像的概念和主要观测模式, 分析该领域国内外研究现状和进展, 重点阐述作者所在研究团队的SAR 3维成像研究进展, 最后对SAR 3维成像技术进行总结和展望。

**关键词:** SAR 3维成像; 多基线层析SAR; 阵列3维SAR; 曲线轨迹SAR; 圆迹SAR; 多基线圆迹SAR

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)06-0633-22

DOI: [10.12000/JR18109](https://doi.org/10.12000/JR18109)

**引用格式:** 洪文, 王彦平, 林贇, 等. 新体制SAR三维成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 633–654. DOI: 10.12000/JR18109.

**Reference format:** Hong Wen, Wang Yanping, Lin Yun, *et al.*. Research progress on three-dimensional SAR imaging techniques[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 633–654. DOI: 10.12000/JR18109.

## Research Progress on Three-dimensional SAR Imaging Techniques

Hong Wen Wang Yanping Lin Yun Tan Weixian Wu Yirong

(*Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China*)

(*Key Laboratory of Technology in Geo-Spatial Information Processing  
and Application System, Beijing 100190, China*)

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

**Abstract:** Conventional Synthetic Aperture Radar (SAR) moves along a straight line and forms a linear synthetic apertures. It can only obtain the two-dimensional (2-D) image of illuminated scene that is the projection of the three-dimensional (3-D) real scene onto a slant plane. The slant plane 2-D SAR image, however, suffers from layover and foreshortening effects. 3-D SAR imaging enables 3-D resolving capability by extending the acquisition of frequency information from 2-D to 3-D. It can obtain the 3-D distribution of scattering centers; therefore, it solves the geometric deformation problems of layover and foreshortening. 3-D SAR imaging has become a trending topic in research on SAR techniques worldwide. In this paper, we first introduced the concept of 3-D SAR imaging and several typical 3-D SAR imaging modes. Furthermore, it provides a discussion on research progress at home and abroad, particularly focusing on the progress of our research team. Finally, future research prospects are presented.

**Key words:** 3-D SAR imaging; Multi-baseline SAR; Array 3-D SAR; Curvilinear SAR; Circular SAR; Multi-baseline Circular SAR

收稿日期: 2018-12-05; 改回日期: 2018-12-21

\*通信作者: 王彦平 wangyp@ncut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61431018, 61860206013, 61571421)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61431018, 61860206013, 61571421)

## 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)采用微波波段,具有全天时全天候高分辨成像能力。SAR通常发射大时间带宽积信号,如线性调频信号,通过脉冲压缩,获得距离向高分辨率。其平台通常沿直线飞行,天线侧视照射观测场景,以均匀的时间间隔发射信号,利用平台与目标之间的相对运动,形成多普勒带宽,实现方位向的高分辨率。近20年来,机载、星载SAR的系统技术和成像处理技术发展飞速,SAR已成为对地观测的最重要手段之一。

距离-多普勒成像是SAR的基本成像原理,目标聚焦于零多普勒-最近斜距处,这使得常规的直线飞行SAR仅具备2维成像能力,获取的是3维场景在方位-斜距平面的2维投影图像。SAR 2维图像仅反映方位和斜距信息,无法获得3维位置信息,也无法对同一距离和方位、但不同高度的目标进行分离。SAR 2维图像存在几何形变和叠掩问题,尤其在地形起伏区域,如山区,或具有垂直结构的区域,如森林区、城市区等,图像的顶底倒置、透视缩短、叠掩等问题尤为严重,属于SAR的困难测绘区,难以准确反映目标的几何和散射信息,给SAR图像判读解译带来极大困难。

SAR 3维成像突破了常规SAR斜距-方位2维频率信息获取局限,通过孔径设计,将场景的频率信息获取拓展到3维,能够实现3维分辨,获取观测场景散射中心在3维空间中的分布,从根本上解决叠掩问题和透视缩短、顶底倒置等几何形变问题,更直观、准确地描述3维观测场景的几何和散射信息,为SAR成像技术带来了更广阔的应用领域。

SAR 3维成像研究开始于20世纪90年代初,最初在地面可控实验环境下开展机理、算法与实验研究,最具代表性的包括:美国海上作战中心(Naval Surface Warfare Center, NSWC)的Knaell<sup>[1]</sup>对曲线SAR 3维成像机理和算法进行了研究;美国纽约

州立大学(State University of New York, SUNY)的Soumekh等人<sup>[2,3]</sup>对圆迹SAR和多基线圆迹SAR 3维成像开展了暗室实验数据获取;欧洲执行委员会联合研究中心(Joint Research Centre of The European Commission, JRC)的Fortuny等人<sup>[4,5]</sup>研究了柱面孔径、球面孔径等多种SAR 3维成像模式。上述学者都通过可控实验获得了典型目标的3维图像,验证了SAR 3维成像的可行性,奠定了SAR 3维成像的理论基础。20世纪90年代末,德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR)开展了世界首次机载多基线SAR层析成像试验<sup>[6]</sup>,采用L波段E-SAR系统在不同高度多次飞行,在方位合成孔径的基础上,形成了俯仰方向的合成孔径,实现了自然场景散射中心在高度维的分辨,是自然场景3维成像效果的首次展示,为SAR对地观测打开了新的视野,是SAR成像技术发展的重要里程碑。

SAR 3维成像有多种实现方式,可以是曲线孔径、平面孔径、曲面孔径等,这些孔径以不同的形式将传统直线孔径宽带SAR的距离-方位2维频率信息获取拓展到3维,实现对观测场景的3维分辨。面向实际应用需求和当下数据获取的可实现性,在对地观测领域发展出了一系列典型的SAR 3维成像工作模式,如图1所示,包括:(1)适用于飞机、卫星平台的多基线层析SAR(Multi-Baseline SAR, MBSAR),主要应用方向为植被区的垂直结构获取、城市建筑3维信息提取;(2)适用于飞机平台的阵列下视SAR(Downward-Looking SAR, DLSAR),利用阵列在垂直于飞行航迹的方向形成实孔径,实现跨航向的分辨,获取平台正下方观测区域的3维图像,主要应用方向为飞机辅助起飞着陆、城市3维测绘等;(3)适用于飞机平台和地球同步轨道卫星平台的圆迹SAR(Circular SAR, CSAR)和多基线圆迹SAR(Multi-Baseline CSAR, MBCSAR),通过平台围绕观测区域作圆周飞行,获取观测区域360°全方位3维散射信息,主要应用方向为重点目标的精

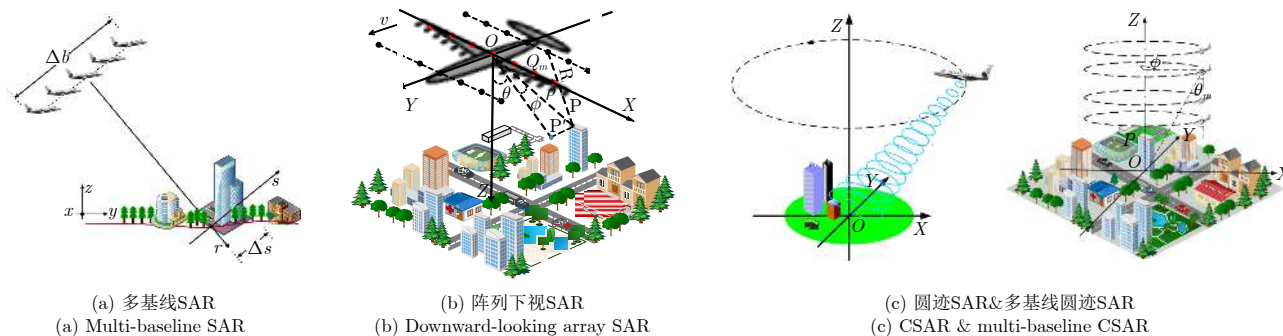


图 1 典型SAR 3维成像模式

Fig. 1 Typical 3-D SAR imaging mode

细3维成像。上述新体制SAR 3维成像模式的独特应用潜力已在国内外多次机载、星载实验中得到初步展示。随着数据获取和数据处理技术的不断进步, SAR 3维成像技术将得到快速发展, 并逐步迈向应用, 同时, 更多新体制SAR 3维成像模式也将不断涌现, 未来在森林遥感、城市遥感、侦察监视等民用和军事应用领域发挥重要作用。

本文对国内外SAR 3维成像技术的研究进展进行概述, 首先介绍了SAR 3维成像的基本概念和典型SAR 3维成像模式, 然后分析了国内外研究进展, 重点对作者所在研究团队的研究成果进行了阐述, 最后对SAR 3维成像技术进行了总结和展望。

## 2 3维SAR的概念

SAR 3维成像是指通过发射宽带信号、形成合成孔径或实孔径等方式获取被观测对象在3维波数空间中的3维频率信息, 且在3个正交方向都具有一定带宽, 通过成像处理能够获得3维分辨图像的成像模式。

SAR成像观测可由下图的信息球来统一表达<sup>[7]</sup>, 如图2所示。该信息球对3维波数域角度SAR信息获取进行了表达, 图中, 半径为发射信号频率, 方位角和俯仰角为雷达相对于观测目标的观测视角, 分别代表了SAR的观测频率和观测角度。观测频率由SAR的发射信号决定, 仅能获取有限的频率带宽内的目标信息, 而观测角度分布的差异则体现了各种SAR成像模式的不同之处。下面将在信息球中介绍典型SAR 3维成像模式。

A对应于多基线SAR 3维成像, 在一定高度对观测对象进行多次飞行观测, 在形成航迹向合成孔径的基础上, 又形成了高度向合成孔径, 从而构成一个平面矩形孔径, 实现对观测对象的3维分辨, 多应用于对地观测。

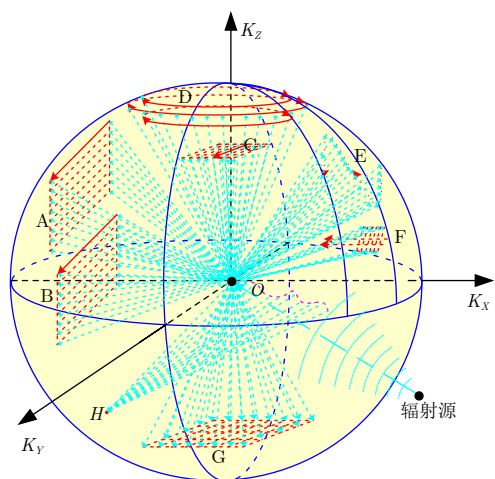


图2 信息球

Fig. 2 Information sphere

B对应于平视条件下的多基线SAR 3维成像, 即观测位于平台正前方, 是A的一种特例, 主要在微波暗室可控环境中进行, 在目标高精度诊断、人体表面微波成像等方面具有广泛应用。

C对应于阵列下视SAR 3维成像, 跨航向阵列实孔径与航迹向合成孔径结合, 形成了水平的矩形合成孔径。其平台主要为飞机, 在城市测绘、军事侦查中具有重要的应用潜力。

D对应于圆迹SAR 3维成像, 通过平台的圆周运动获取同一入射角, 不同方位角的目标信息, 合成孔径为圆形。在不同高度进行相同半径的圆周运动时, 则形成圆柱曲面形合成孔径。主要平台为飞机、地基、地球同步轨道平台等, 在高分辨率军事侦查、近景人体表面微波成像方面具有广泛应用潜力。

E对应于曲线SAR 3维成像, 通过平台非规则曲线运动, 形成曲线合成孔径, 圆迹SAR是曲线SAR中的特例。

F对应于前视观测模式, 将阵列天线实孔径与合成孔径相结合, 对前下方区域进行观测, 形成了与水平面有一定夹角的矩形合成孔径。主要平台为飞机或导弹等, 在应急救援、辅助导航等方面具有重要应用潜力。

G是一种对空观测天线阵列, 将合成孔径和实孔径相结合, 对空中目标进行实时监测, 在预警和目标跟踪等方面具有重要应用潜力。

本文对目前最具代表性的3维成像模式: 多基线SAR, 阵列下视SAR, 圆迹SAR和多基线圆迹SAR开展了3维分辨理论研究, 下面分别给出以上3维成像模式的频谱支撑集和点扩展函数<sup>[8]</sup>。

(1) 多基线SAR数据采集位置构成的平面合成孔径位于目标的侧上方, 如图3所示, 在3维波数域中的频谱支撑集近似为矩形体, 且呈一定倾角。对应的点扩展函数为有一定倾角的3维sinc函数, 3维分辨率分别由斜距、方位、垂直于斜距方向, 这3个正交方向的信号带宽决定。

(2) 阵列下视SAR数据采集位置构成的平面合成孔径位于目标的正上方, 频谱支撑集近似为矩形体, 如图4所示, 对应的点扩展函数为3维sinc函数。3维分辨率由斜距、阵列向、航迹向3个正交方向的信号带宽决定。

(3) 圆迹SAR数据采集位置构成的圆周形合成孔径位于目标的正上方, 频谱支撑为圆台曲面, 如图5所示。其点扩展函数在水平面上为贝塞尔函数, 在高度向上近似为sinc函数。平面分辨率由圆台曲面在水平面的圆环形投影的直径决定, 理论值可达亚波长量级, 高程分辨率由圆台曲面在垂直向



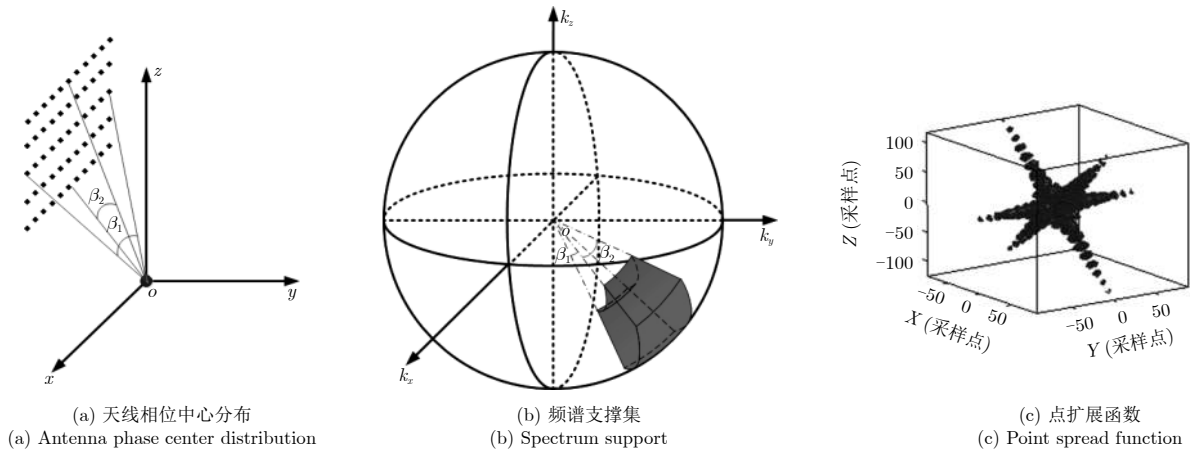


图3 多基线SAR的数据采集天线相位中心分布、频谱支撑集和点扩展函数

Fig. 3 The antenna phase center distribution, spectrum support and point spread function of multi-baseline SAR

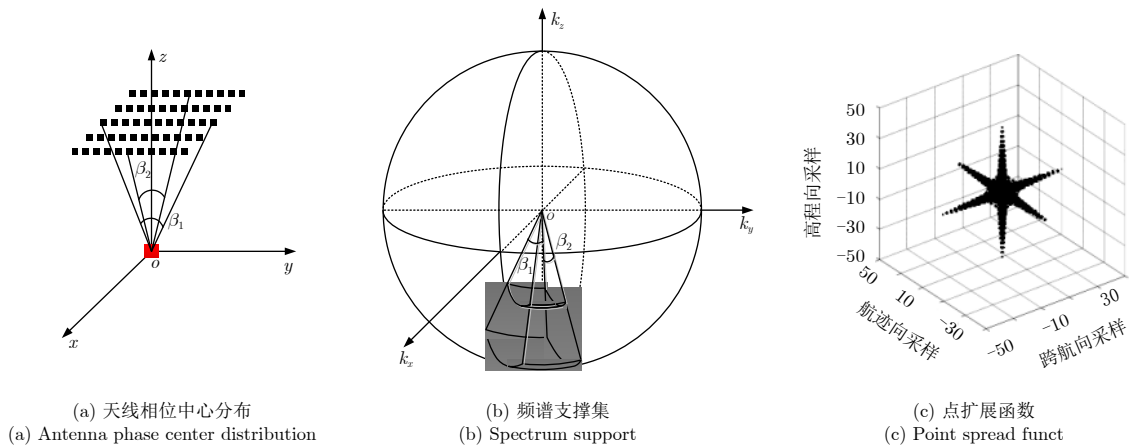


图4 阵列下视SAR的数据采集天线相位中心分布、频谱支撑集和点扩展函数

Fig. 4 The antenna phase center distribution, spectrum support and point spread function of downward-looking array SAR

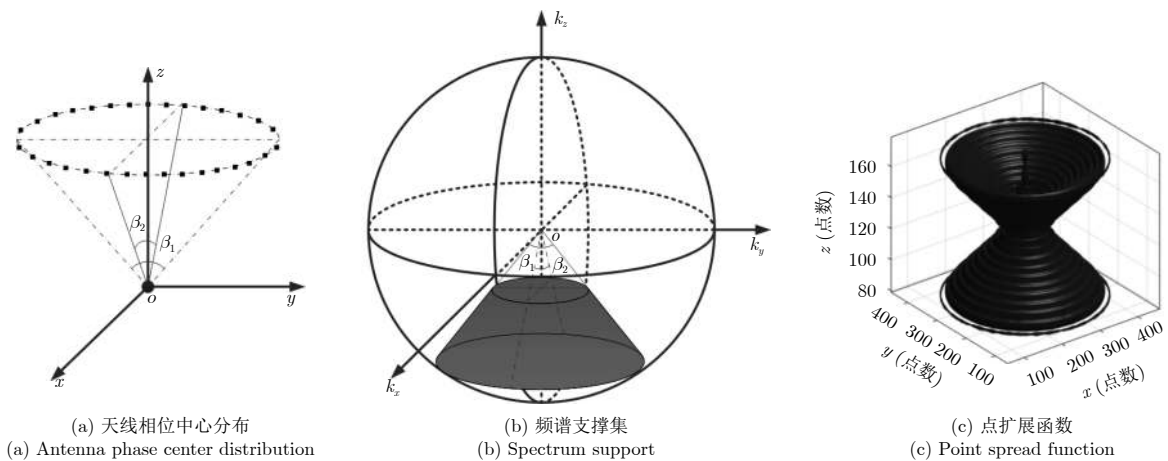


图5 圆迹SAR的数据采集天线相位中心分布、频谱支撑集和点扩展函数

Fig. 5 The antenna phase center distribution, spectrum support and point spread function of circular SAR

的投影带宽决定。由于其频谱支撑集为曲面，具有稀疏性，点扩展函数的旁瓣水平较高。多基线圆周SAR的频谱支撑集为扇环绕 $k_z$ 轴旋转而成的体，如图6所示，可有效改善频谱稀疏性，降低旁瓣水平。

SAR 3维成像的本质是对目标的观测在3个正交方向都具有频率带宽，3维分辨率由这3个正交方向的带宽决定。上述典型3维成像模式在发射宽带信号的基础上，通过数据采集天线相位中心的曲线

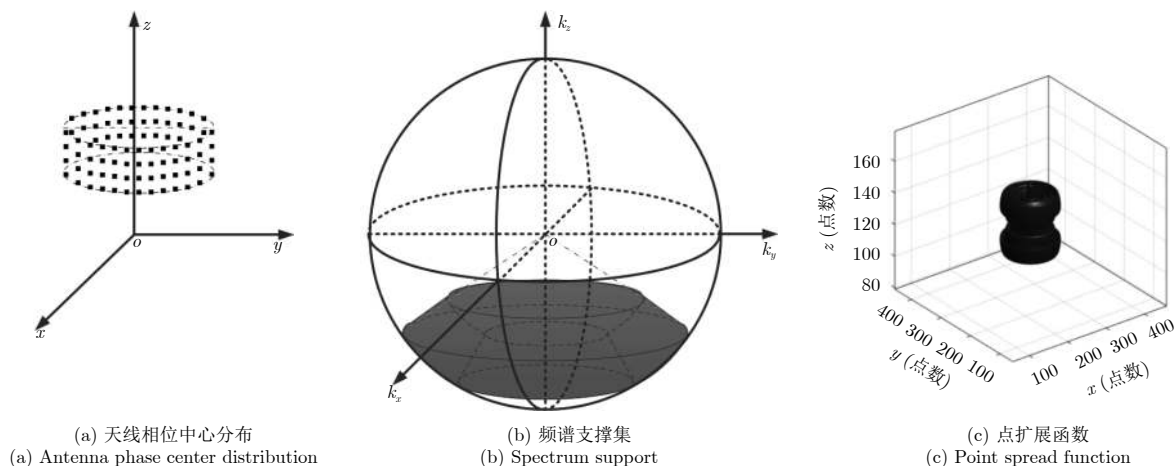


图6 多基线圆迹SAR的数据采集天线相位中心分布、频谱支撑集和点扩展函数

Fig. 6 The antenna phase center distribution, spectrum support and point spread function of multi-baseline circular SAR

分布、曲面分布、平面分布,实现频谱支撑集的3维分布。SAR 3维成像还有其他多种方式,例如,仅发射单频信号,通过俯仰和方位的多角度观测,在3维波数域中以发射信号为半径的球面上,形成曲面支撑集,理论上也能实现3维分辨。

### 3 国内外研究现状

SAR 3维成像的研究始于20世纪90年代初,美国和欧洲的专家学者,包括Knaell, Soumekhm, Chan T K, Fortuny等人<sup>[1-5,9]</sup>对圆形孔径、曲线孔径、曲面孔径等多种形式的SAR 3维成像模式开展了成像机理、3维分辨率理论和成像算法的研究,通过暗室实验验证,获得了简单目标的3维分辨图像,验证了SAR 3维成像的可行性,奠定了SAR 3维成像的理论基础。随着机载SAR平台的发展,2000年左右,德宇航利用机载实验系统E-SAR开展了多基线3维成像实验<sup>[6]</sup>,获取了自然场景的3维分辨图像,验证了SAR 3维成像在对地观测中的可行性和应用潜力。此后,在对地观测领域,面向实际应用需求和数据获取的可实现性,发展出了一些列SAR 3维成像模式,主要包括:多基线SAR、阵列下视SAR、圆迹SAR和多基线圆迹SAR。本文后续将重点对上述典型3维成像模式的研究进展进行介绍。

经过20多年的快速发展,SAR 3维成像技术日趋成熟,并逐步迈向应用,且随着SAR技术领域的不断进步,新的SAR 3维成像模式不断涌现,一直以来,SAR 3维成像技术是国际研究热点,国外的欧空局(European Space Agency, ESA)、德宇航、德国弗劳恩霍夫高频物理与雷达技术研究所(Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques, FHR)、法国宇航局(The French Aerospace Lab, ONERA)、瑞典国防研究

院(Swedish Defense Research Agency, FOI)、意大利米兰理工大学(Polytechnic University of Milan)、意大利那不勒斯大学(University of Naples Parthenope)等高校和机构引领了SAR 3维成像技术的发展。我国在新体制SAR 3维成像技术的理论和成像处理技术方面处于国际领先地位,中国科学院电子学研究所、清华大学、中国民航大学、中科院空间中心、电子科技大学、北京航空航天大学、空军工程学院、国防科技大学、上海交通大学、香港中文大学、中科院对地观测与数字地球科学中心、武汉大学、西安电子科技大学、南京航空航天大学、复旦大学、中国航天科工二十三所等多家高校和研究机构都在持续开展新体制SAR 3维成像技术研究。

多基线SAR方面,国际先进技术已具备满足3维成像要求的机、星载多基线数据获取能力,成功实现了城市的3维重建和植被区的垂直结构获取。我国也已具备机、星载多基线SAR的3维成像处理能力,已利用国外机、星载数据实现了城市的3维重建和植被区的垂直结构获取。在数据获取方面,我国自主研发的航空遥感机载平台,具备多航过数据采集能力,目前处于测试和科学实验阶段;2016年发射的高分三号星载SAR的重轨数据的相干性已得到初步验证,上述平台都将为多基线SAR研究提供数据。

阵列下视SAR方面,国际上顶尖机构已成功研制了线阵系统,并安装于小型无人机平台,开展了飞行实验,但3维成像结果未见公布。我国多家高校和研究机构成功研制了阵列天线,开展了地面实验,获取了下视3维图像,然而,将阵列搭载于飞机平台实现下视3维成像,还面临受限于阵列尺寸跨航向分辨率低、下视阵列多通道3维运动补偿困

难等技术难题,目前还未见实际机载阵列下视SAR的3维成像结果。

圆迹SAR和多基线圆迹SAR方面,国外于2004年左右已有机载圆迹SAR实验报道,但未见360°图像公布,2011年,中科院电子所与德宇航同期获得机载圆迹SAR全方位图像,国内外多家机构已具备圆迹SAR数据获取和成像处理能力,然而,随着频段增高,其运动补偿难度大大增加,且成像对地形更为敏感,高波段圆迹SAR成像技术仍在发展中。国外已公布了机载多基线圆迹SAR 3维成像结果,国内虽已开展了多基线圆迹SAR数据获取实验,但还未见公开成像结果。

下面,具体对上述典型SAR 3维成像模式的主要研究进展进行介绍。

### 3.1 多基线SAR

20世纪90年代末,德国宇航局Reigber等人提出了多基线SAR 3维成像的概念,并利用机载SAR实验系统E-SAR开展了世界首次机载3维成像实验,给出了多基线数据的相位校正预处理方法,并利用谱估计的方法解决了基线非规则、欠采样带来的栅瓣问题,获得了距离向2.3 m、方位向1 m和高程向3 m分辨率的L波段3维微波图像。他们公开了高程-地距2维剖面图,图中散射中心在高度向可分辨,可以准确地获得角反射器、汽车、建筑等目标的高度信息<sup>[6]</sup>。而在植被区,由于L波段的穿透性,树冠、树干和地面各分层结构均有散射回波,3维成像能够获得植被的垂直结构信息。首次的机载SAR 3维成像实验展示了SAR 3维成像在对地观测中的重要应用潜力。

此后,陆续有星载多基线SAR实验报道,澳大利亚阿德雷德大学的She等人<sup>[10]</sup>利用ERS-1(European Remote sensing Satellite)星载SAR对德国波恩地区的9景重航过复图像进行3维成像。2005年,Fornaro等人<sup>[11]</sup>采用ERS-1/2 30条重航过数据,对San Paolo露天运动场进行3维成像,后又利用63条重航过数据获得了该地区效果更好的3维成像结果<sup>[12]</sup>。这些实验验证了星载SAR重航过的3维成像能力,但是受基线跨度和航迹数目的限制,经典谱估计方法的高程向重建结果存在分辨率较低、旁瓣较高和模糊较严重等问题。

在城市测绘应用方面,Zhu等人<sup>[13]</sup>于2010年提出了基于L1范数正则化的星载多基线SAR成像方法,利用25景TerraSAR-X 1 m分辨率聚束数据,对柏林城区进行3维重建。基于L1范数正则化的稀疏重建方法利用了城市中建筑散射中心分布在垂直斜距面方向的稀疏性,相比于谱估计方法具有更强

的解叠掩能力,即高程向的超分辨能力。通过稀疏重建处理。意大利那不勒斯大学的Budillo等人<sup>[14]</sup>也在同期开展了同一研究,先后利用15景的ERS1-2数据与13景的COSMO-SKYMED数据,分别对城市体育场及城市建筑群进行了基于L1范数正则化的稀疏3维成像。

在森林监测应用方面,欧空局预计于2021年发射世界首颗P波段星载SAR-BIOMASS,多基线SAR是其工作模式。任务是利用P波段的穿透性及卫星重航过的3维成像能力,获取植被区的垂直结构,估计生物量,为气候等环境变化提供与碳排放相关的数据。针对这一卫星任务,欧空局从2008年开始,开展了一系列机载BIOMASS实验。在植被区多基线3维成像方面,针对森林区域散射中心在垂直视线方向分布不稀疏的情况,德国宇航局Aguilera等人<sup>[15]</sup>首先利用小波基对高程向进行稀疏表征,然后通过基于L1正则化的稀疏重建技术实现了森林区域的稀疏3维重建,有效降低了高程向模糊,提升了3维成像质量。随后,Aguilera等人<sup>[16]</sup>还将稀疏重建技术应用于极化多基线SAR 3维成像中,通过解决混合范数最优化问题,实现了同时对不同极化通道的高分辨率3维重建。

### 3.2 阵列下视SAR

1999年,德国宇航局的Gierull<sup>[17]</sup>提出了机载下视成像雷达的概念,利用跨航向的阵列孔径和航迹向合成孔径,形成2维孔径,仅需发射单频信号即可实现正下方观测场景的2维成像,避免了常规SAR存在的左右模糊和阴影等问题。

2004年,法国宇航局的Giret等人<sup>[18]</sup>以宽带发射信号代替单频信号,通过增加距离向分辨,将机载下视成像雷达的概念从2维拓展到3维。2006年,该研究机构Nouvel等人<sup>[19]</sup>开始研制Ka波段阵列下视DRIVE实验系统。该系统具有侧视2维观测和下视3维观测2种工作模式。2006年至2010年,该机构利用DRIVE系统开展了下视机载飞行试验,并公开了1 km高度平面上的航迹-跨航2维成像结果,但相关3维成像结果未曾公开。

2006年,德国FHR开始研制机载阵列雷达系统ARTINO<sup>[20]</sup>。该系统采用Ka波段FMCW工作体制以降低系统对功率和体积的要求,并采用两端密集发射-中间稀疏接收的稀疏线阵构型,安装于小型无人机平台。他们于2010年开展了首次数据采集试验,但相关实验结果并未公布。

2013年,中科院电子所研制了Ku波段全极化塔吊下视阵列实验系统,开展了首次塔吊阵列下视实验,获取了地面目标3维图像。详见本文的第4节。



### 3.3 圆迹SAR & 多基线圆迹SAR

2004年开始,法国宇航局(ONERA)、德国宇航局(DLR)、瑞典国防研究院(FOI)以及中科院电子所等研究机构相继开展了圆迹SAR机载飞行试验,挖掘圆迹SAR全方位观测在对地观测中的应用优势。

2007年,法国宇航局利用圆迹SAR的多角度观测几何获取了Nîmes城区斗兽场附近区域的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)<sup>[21]</sup>,精度达2 m。

2009年,德国宇航局利用E-SAR系统,开展了L波段全极化机载圆迹SAR飞行实验,并于2011年IGARSS会议上公开了全极化360°圆迹SAR图像,这也是圆迹SAR对地观测全方位高分辨成像效果的首次展示<sup>[22]</sup>。2011年,中科院电子所开展了国内首次机载圆迹SAR实验,与德宇航同期获取了P波段全极化360°圆迹SAR图像。相比于常规SAR单一角度观测图像,圆迹SAR图像在分辨率、相干斑抑制、目标几何特征完整性等方面的质量大大提升,显示了更为精细和丰富的地物信息。

在对地观测中,由于目标的各向异性散射特性,单迹圆迹SAR的3维分辨成像能力较弱。早在90年代,美国纽约州立大学的M. Soumekh<sup>[3]</sup>就提出了ECSAR(Elevation CSAR)模式,即多基线圆迹SAR模式,在全方位观测的同时,解决各向异性目标的叠掩问题。2013年,德宇航提出了全息SAR(holographic SAR)的概念<sup>[23]</sup>,也是通过多基线圆迹SAR实现的,并在林区开展了L波段全极化多基线圆迹SAR实验,利用19条轨迹数据处理获得了林区的3维图像。

## 4 研究团队3维成像技术研究

在国家自然科学基金项目、国家预研项目的支持下,中科院电子所微波成像新概念新体制新技术研究团队持续开展新体制SAR 3维成像技术研究,是国内最早开展相关研究的团队。相关项目支持主要有:国家自然科学基金(以下简称NSFC)青年基金项目“多基线SAR层析的解析建模与数据处理技术”[2007-2009],国家863计划项目“下视阵列天线3维成像合成孔径雷达”[2007-2010],NSFC杰青项目“合成孔径雷达3维成像”[2008-2011],NSFC重大项目“多维度微波成像基础理论与关键技术”[2009-2012],总装重点探索项目“地球同步轨道圆迹SAR”[2010-2012],高分专项“分布式阵列SAR”[2011-2017],NSFC青年基金“人体表面微波极化全息成像方法与实验”[2011-2013],中科院重点部署项目创新团队国际合作伙伴计划“阵列天线3维稀疏微波成像方法与实验研究”[2013-2016],

NSFC青年基金“基于回波数据的圆迹SAR高精度3维成像处理方法研究”[2013-2015],NSFC面上项目“机载阵列下视SAR高分辨率成像模型与处理方法研究”[2014-2017],NSFC重点项目“多角度SAR成像理论与方法”[2015-2019],NSFC青年基金“直升机载阵列快拍成像雷达模型与方法研究”[2015-2017],NSFC面上项目“圆迹SAR目标方位散射特征提取方法研究”[2016-2019],NSFC青年基金项目“多基线圆迹SAR成像处理方法研究”[2016-2018],NSFC重点国际合作研究项目城市基础设施3维形变监测的雷达成像模型与方法研究[2019-2023]。

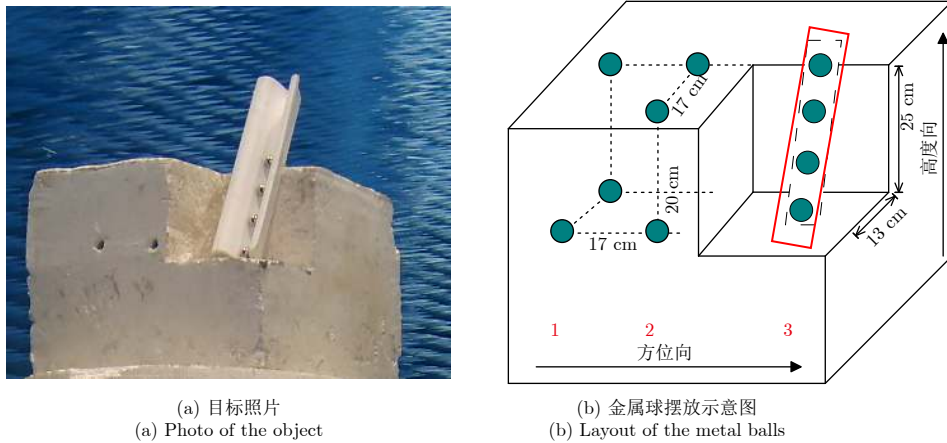
研究团队的主要研究成果包括:提出了信息球的概念,能够对SAR 3维成像观测模式进行统一表达;提出了稀疏微波成像的概念,并将稀疏成像引入多基线SAR,获取了林区和建筑的3维重建图像;研制了多通道阵列SAR系统,开展了国内首次下视SAR塔吊实验,获取了地面目标3维图像;开展了国内首次圆迹SAR机载实验,成功获得首幅全方位高分辨圆迹SAR对地观测图像。

下面,将对研究团队的研究成果进行具体介绍。

### 4.1 多基线SAR

研究团队将现代信号处理中的谱估计方法引入多基线SAR<sup>[24,25]</sup>,以实现垂直视线方向的高分辨率。在微波暗室条件下开展了多基线SAR 3维成像实验,通过天线在方位向和高度向上的运动形成对目标观测的方位向-高度向2维合成孔径。高度方向上共进行了12条轨迹的平行观测,观测对象为10个金属球,分布于3个方位向位置上,如图7所示,红框内的4个金属球在斜距面处于等方位-等距离的叠掩位置。图8为成像处理结果,其中,图8(a)为常规2维成像图,可以看到,红圈内的散射中心为4个金属球叠掩在一起,无法区分;图8(b)为基于FFT 3维成像的叠掩金属球方位切片,可以看到,通过多基线处理实现了解叠掩;图8(c)为基于谱估计方法Yule-Walker的方位切片,可看到叠掩方向的分辨率得到提升。

针对多基线SAR轨迹非均匀、欠采样等问题,研究团队引入了基于L1正则化的稀疏微波成像方法<sup>[26-29]</sup>,利用观测场景在垂直视线方向的稀疏性,降低对基线数量、跨度和均匀性的要求。图9为利用TerraSAR的14条重航过数据对盘古大楼进行3维重建的结果,其中,图9(a)为基线分布示意图,可以看到,基线分布非均匀且稀疏,图9(b)为盘古大楼光学图片,图9(c)为基于L1正则化的稀疏3维重建结果。图10为使用BioSAR 2008机载多基线数

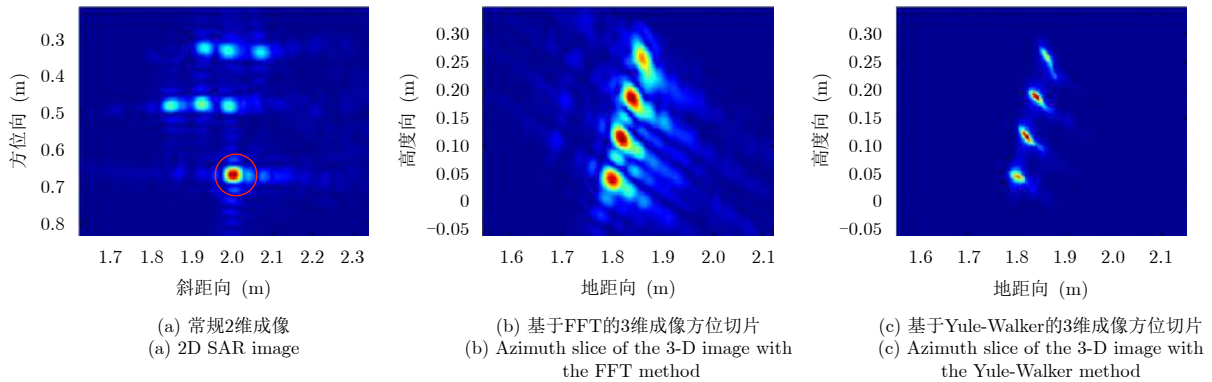


(a) 目标照片  
(a) Photo of the object

(b) 金属球摆放示意图  
(b) Layout of the metal balls

图7 暗室多基线SAR观测的目标场景

Fig. 7 The object of the multi-baseline SAR experiment in the chamber



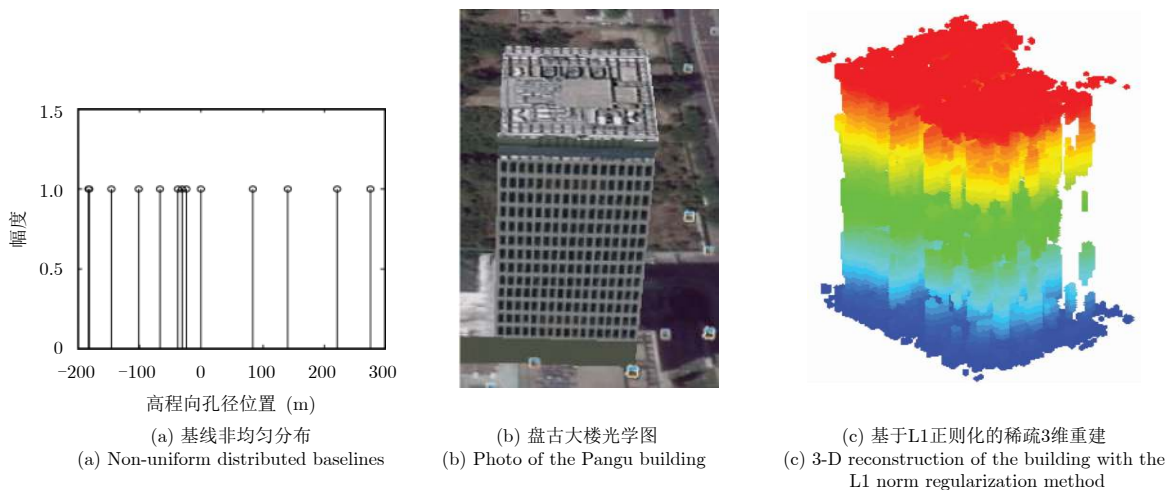
(a) 常规2维成像  
(a) 2D SAR image

(b) 基于FFT的3维成像方位切片  
(b) Azimuth slice of the 3-D image with the FFT method

(c) 基于Yule-Walker的3维成像方位切片  
(c) Azimuth slice of the 3-D image with the Yule-Walker method

图8 暗室多基线3维SAR成像结果

Fig. 8 3-D imaging results of the multi-baseline SAR experiment carried out in the chamber



(a) 基线非均匀分布  
(a) Non-uniform distributed baselines

(b) 盘古大楼光学图  
(b) Photo of the Pangu building

(c) 基于L1正则化的稀疏3维重建  
(c) 3-D reconstruction of the building with the L1 norm regularization method

图9 利用TerraSAR数据的多基线SAR 3维重建结果

Fig. 9 3-D reconstruction of the Pangu building using the TerraSAR-X multi-baseline data

据，分别采用谱估计和基于L1正则化稀疏重建方法的对比结果。该数据是由德国宇航局E-SAR传感器于2008年在瑞典北部森林区域获取，包含6条重航过数据。由于植被在垂直视线方向不具有稀疏性，

我们使用了小波基使垂直视线方向的信号稀疏化。图10(a)为谱估计Beamforming算法的高程向重构结果，图10(b)为基于小波变换的L1正则化稀疏重建结果，可以看到Beamforming仍存在着高旁瓣和高



程向模糊问题，而基于小波变换的L1正则化方法可实现对高程向旁瓣和模糊的有效抑制，有效提升了高程向重构质量。

### 4.2 阵列下视SAR

研究团队对阵列下视SAR的信号模型、分辨率理论、成像算法、阵列稀疏布局、阵列多通道幅相校正等方面进行了深入研究，开展了暗室和塔吊实验验证[7,30-45]。

在成像算法方面，提出了基于波数域积分的3维成像方法[7]，开展了模拟下视3-D SAR进行城区测绘的暗室实验，以验证其能够对不同高度平面逐层进行2维成像。观测对象由建筑模型和金属球构成，

如图11所示，其中，建筑A高度最高，建筑B次之，建筑C摆放位置最低。图12为不同高度剖面图像，从高到低依次看到建筑A房顶、建筑B房顶和金属球，验证了算法的正确性。在此基础上，针对该算法需在阵列向大量补零，数据量和运算量大的问题，提出伪极坐标阵列下视SAR 3维成像算法[34-36]，提高了运算效率；针对阵列长度有限，跨航向分辨率低的问题，提出了无网格L1正则化稀疏重建方法[38-41]，实现跨航向的超分辨，同时，相比于常规基于网格L1正则化稀疏重建方法，散射中心位置重建更准确。

在阵列系统研制和通道一致性校正方面，研制了由96个收发单元构成的Ka阵列SAR系统，利用

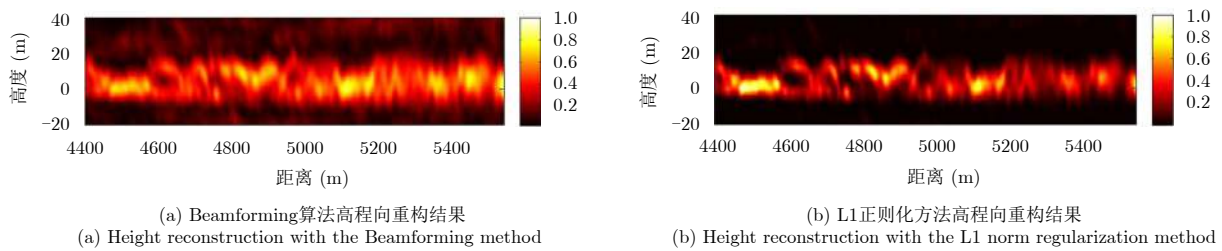


图 10 BioSAR森林地区多基线SAR 3维重构结果

Fig. 10 3-D reconstruction of a forest area using the BioSAR multi-baseline data

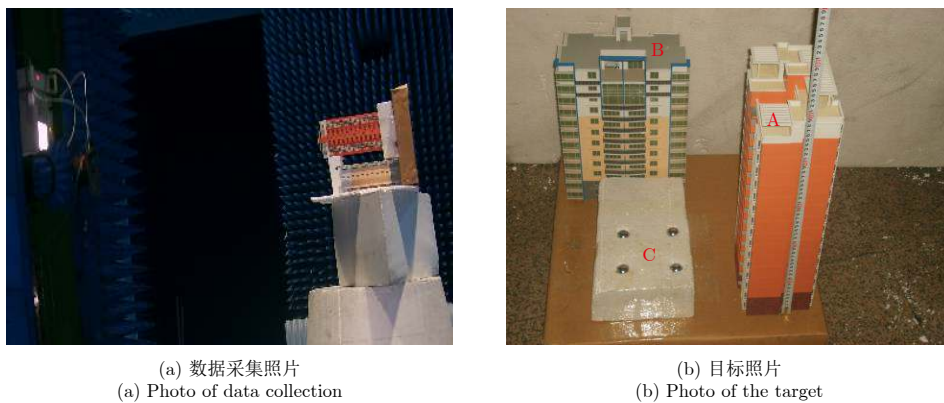


图 11 模拟下视3-D SAR的成像几何及建筑物模型

Fig. 11 Geometry of the downward-looking SAR experiment and the building model

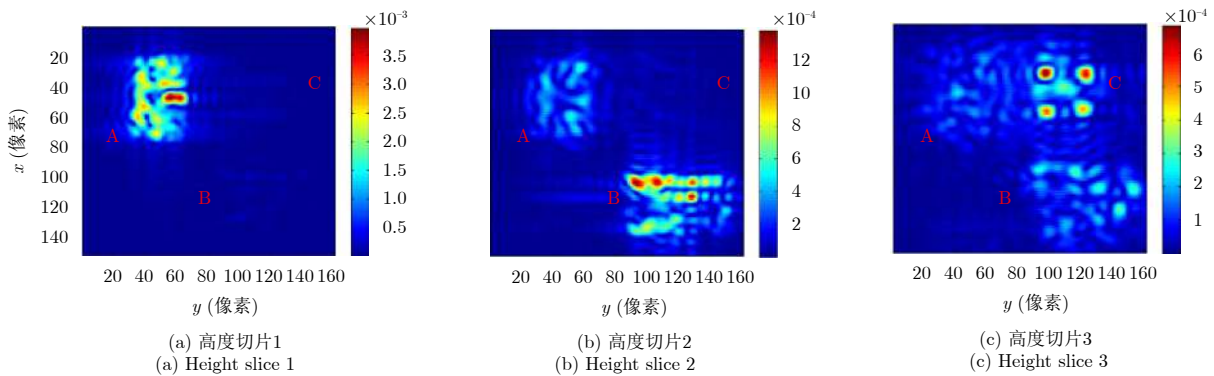


图 12 3维成像结果(2维剖面显示)

Fig. 12 3-D imaging results (shown by height slices)

该系统开展了暗室实验<sup>[42,43]</sup>。阵列SAR系统如图13所示，实验时，阵列SAR装载于直线轨道上，阵列天线沿跨航向布置，发射信号为步进频信号。数据采集时，由微波开关控制依次导通相应收发单元完成跨航向回波采集，同时，阵列天线沿轨道运动，完成航迹向回波采集。观测目标分别为1个三面角反射器和1个由平面铝板组成的字母IE。采用特显点外定标的方式对阵列多通道幅相一致性进行校正，图14为通道一致性校正前后三面角反射器数据的距离压缩信号和2维成像结果，可以看到，校正前，由于各通道信号相参性差，图像散焦严重，方位向难以分辨；校正后，角反射器聚焦良好。图15为通道一致性校正前后字母IE板的3维成像结果，可以看到，IE字样清晰可见。

阵列稀疏布局方面<sup>[30]</sup>，依据阵列收发组合和阵

列收发信道特性，研究了等效相位中心均匀的收发分置和收发共用稀疏阵列布局，在此基础上，研究了受限于载机安装条件等效相位中心近似均匀的收发分置稀疏阵列布局，并对不同稀疏阵列布局方法性能进行了综合比较。表1为不同阵列稀疏优化布局方案对比，可以看出等效相位中心均匀的稀疏阵列阵元安装位置要求都比较严格，相位中心与稀疏阵列长度比最小的是两侧接收中间发射收发分置稀疏阵列，阵列稀疏率都比较大，实际载机平台可能会由于阵元安装位置受载机平台制约而出现等效相位中心近似均匀的情况。

2013年，研究团队研制了Ku波段全极化塔吊下视阵列实验系统，开展了国内首次塔吊阵列下视SAR 3维成像实验，获得了地面目标的3维图像<sup>[30,34]</sup>。

该原理验证装置主要由发射分系统、接收分系

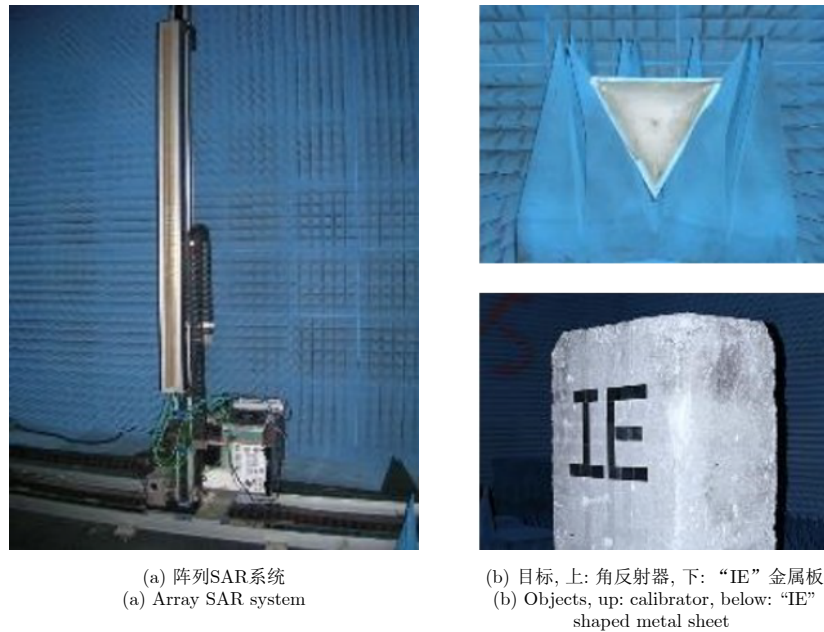


图 13 阵列SAR系统与暗室实验观测目标

Fig. 13 Array SAR system the objects used in the experiment

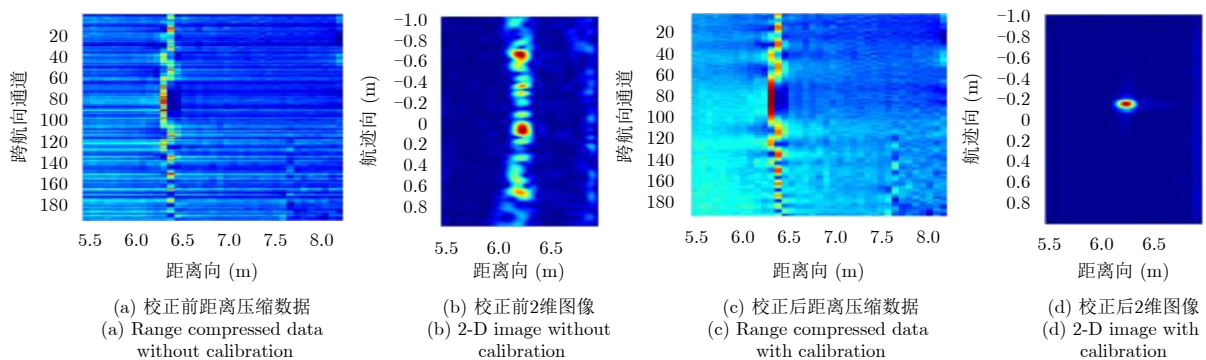


图 14 通道一致性校正前后角反射器数据处理结果对比

Fig. 14 Imaging results of the corner reflector with and without the multi-channel calibration

统、线阵天线与微波网络分系统、频率源与定时分系统、数据采集与记录器、计算机监控单元、供电模块，以及POS、支撑机构等组成，系统组成框图

如图16所示。阵列天线由4排256个喇叭天线均布组成了全极化收、发阵列，如图17所示，发射信号为调频连续波(FMCW)。

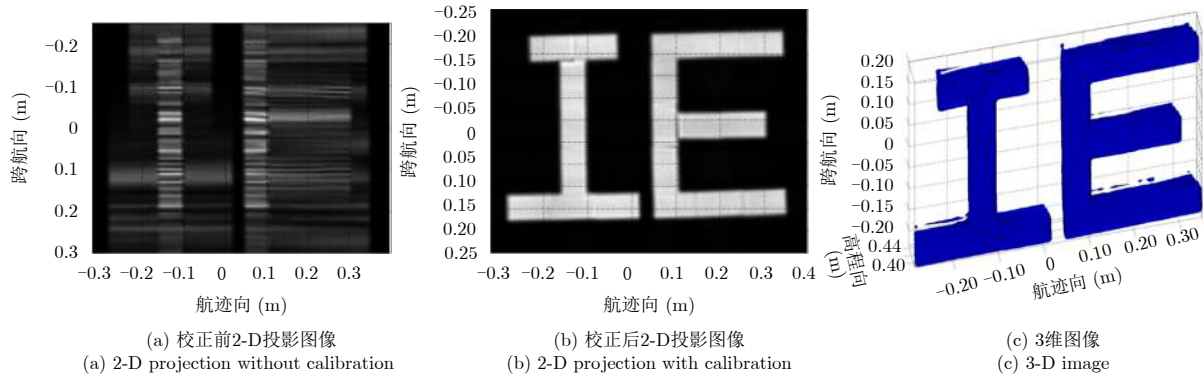


图 15 字母IE数据的通道一致性校正前后成像结果对比

Fig. 15 Imaging results of the IE metal sheet with and without the multi-channel calibration

表 1 不同阵列稀疏优化布局方案对比

Tab. 1 Comparison of different sparse array scheme

阵列布局方式	相位中心与稀疏阵列长度比	阵列稀疏率	安装要求	阵列方向图
两侧发射中间接收收发分置	$\frac{2MN-1}{2M(N+1)-2}$	$1 - \frac{2M+N}{2MN}$	阵元相对安装位置要求严格	无模糊成像范围内低旁瓣
两侧接收中间发射收发分置	$\frac{(MN-1)}{2M(N-1)}$	$1 - \frac{M+N}{MN}$	阵元相对安装位置要求严格	无模糊成像范围内低旁瓣
等效相位中心均匀收发共用	1	极限接近90%	阵元相对安装位置要求严格	无模糊成像范围内低旁瓣
等效相位中心近似均匀收发分置	因平台差异	因平台差异	阵元相对安装位置要求不严格	无模糊成像范围内旁瓣相对较低

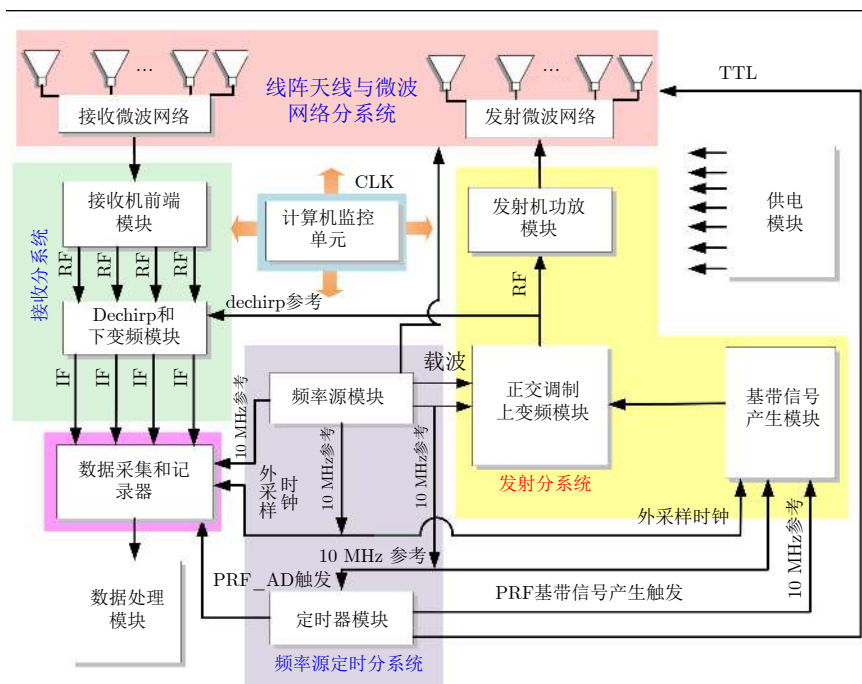


图 16 塔吊下视阵列原理验证系统组成框图

Fig. 16 System block diagram of the tower crane downward-looking array SAR system



在塔吊实验中，阵列天线安装在与塔臂垂直的方向，波束向下，照射正下方区域，在平台沿着塔臂匀速直线运动的过程中进行数据采集，如图18(a)所示。观测场景为放置于地面的1个孤立角反射器，和由7个角反射器构成的呈3维立体构型的三面角反射器阵，如图18(b)所示。

塔吊阵列下视3维成像实验结果如图19所示。其中，图19(a)为3维图像数据的3维等值面图，可以看出，每个角反射器的散射中心呈3维分布，且清晰分辨，图19(b)–图19(d)分别为航迹-跨航平面、航迹-高程平面、跨航-高程平面3个平面的正射投影图，可以看到各角反射器的散射中心3维分布，图中，由于天线正下视照射，地面镜面反射较强，形成较强的地面背景杂波，这也是机载下视SAR实际化应用需要应对的一个问题。

该原理验证装置还具有较大升级空间，如可采用同时多发多收的最小冗余线阵设计、正交波形编码信号、可构建实时处理器等。

### 4.3 圆迹SAR与多基线圆迹SAR

研究团队对圆迹SAR的点扩展函数、分辨率理论、成像算法等成像机理进行了深入研究，开展了金属球暗室转台实验验证，图20为3维成像结果，可以看到，对于散射各向同性的点目标，圆迹SAR具有3维分辨能力<sup>[46-48]</sup>。

研究团队将圆迹SAR 3维成像应用于地球同步

轨道，提出了地球同步轨道圆迹SAR的概念<sup>[46,49-51]</sup>。对轨道参数进行设计，可形成近似圆形的合成孔径，通过SAR系统凝视观测，可对大面积区域进行连续定点连续观测，并获取3维分辨图像。地球同步轨道圆迹SAR在连续覆盖区域、瞬时可视范围和3维信息获取方面，具有低轨卫星无法比拟的优势，在对地观测方面有重要的应用前景。

研究团队对地球同步轨道圆迹SAR的分辨率指标、时间覆盖度等成像能力进行了分析，对轨道模型、大面积快速3维成像算法等进行了研究。图21为地心惯性直角坐标系下地球同步轨道圆迹SAR观测几何，卫星轨迹位于赤道上方，在 $xoy$ 平面上的投影近似为圆形。地球同步轨道圆周观测中，观测视角差异最大为图21(a)中的角度 $\theta_a$ ，约为 $20^\circ$ ，目标可认为是各向同性的，因此，该观测几何下具有3维分辨能力。在L波段，500 MHz带宽条件下，3维分辨率可达约 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 。由于观测视角的差异，3维成像的点扩展函数朝向的空变性随着目标位置变化，但分辨率的空变性不大，图22给出了不同位置目标的3维点扩展函数，可以看到明显地旋转，但3 dB分辨率差异不大。时间覆盖度方面，在满足 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 分辨率要求的条件下，单颗卫星时覆盖率为地球总面积的33%，4颗卫星时，覆盖率达到地球表面总面积的92%。

在圆迹SAR机载实验方面，研究团队开展了国

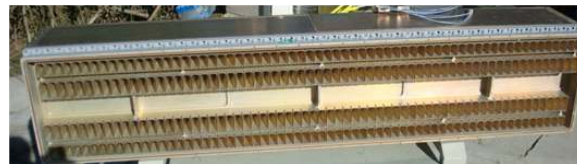
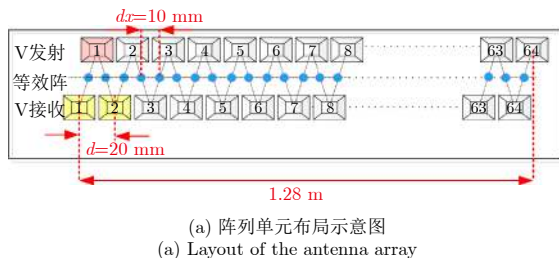
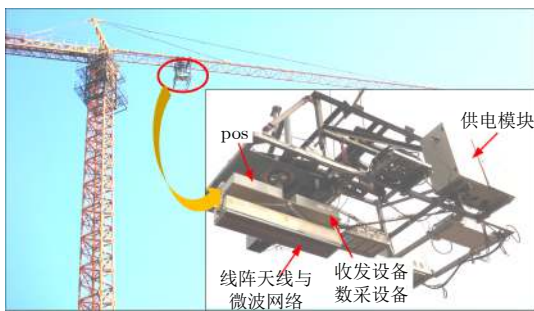


图 17 塔吊下视阵列天线

Fig. 17 Antenna array of the system



(a) 原理验证装置照片  
(a) Photo of the device

(b) 实验场景照片  
(b) Photo of the experiment scene

图 18 塔吊阵列SAR下视实验

Fig. 18 The tower crane downward-looking array SAR experiment

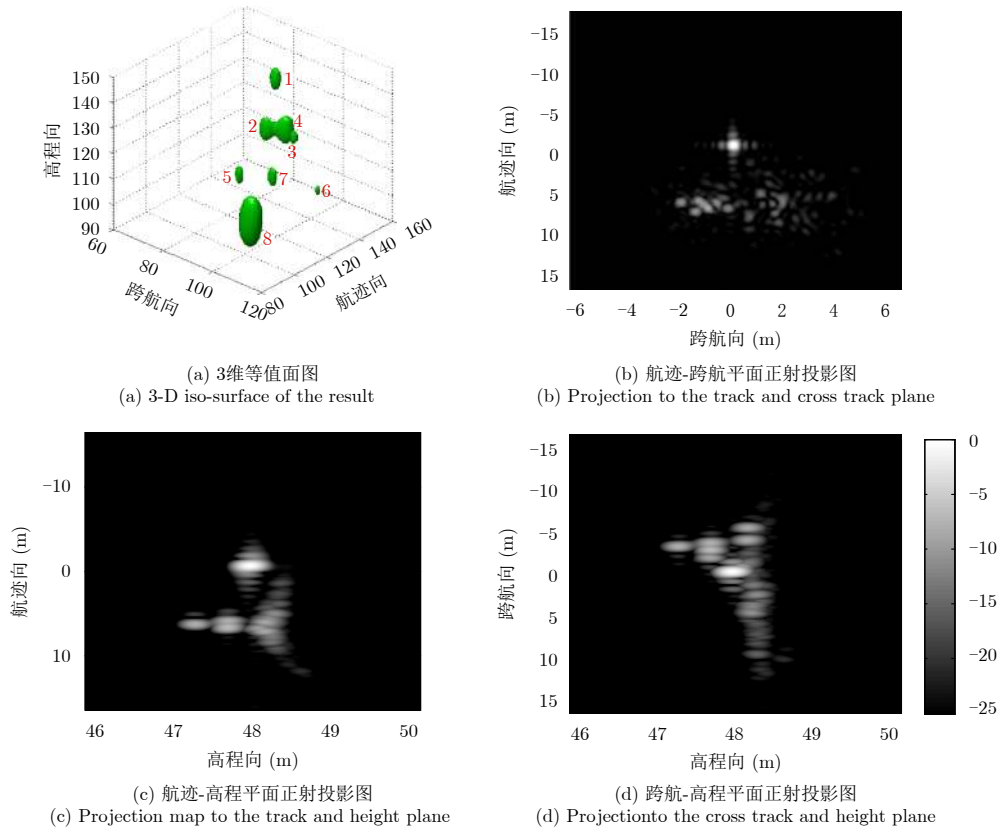


图 19 塔吊阵列SAR下视实验3维成像结果

Fig. 19 3-D imaging results of the tower crane downward-looking array SAR experiment

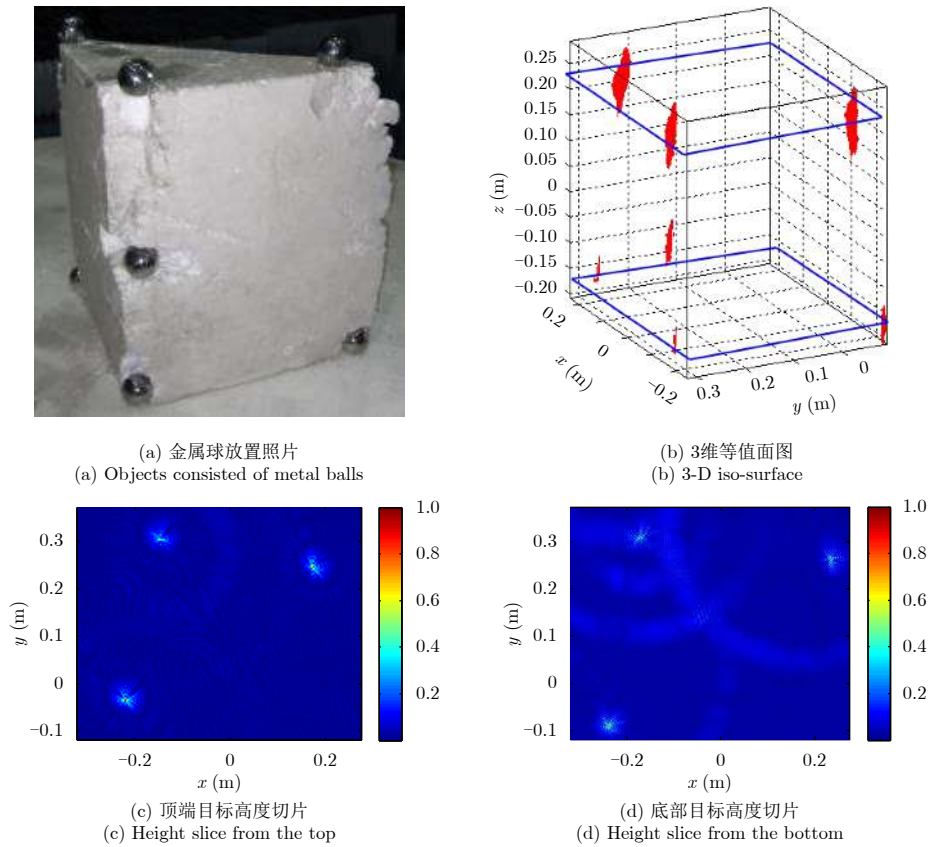


图 20 金属球暗室转台实验。

Fig. 20 Metal ball turn table experiment in the chamber

内首次机载圆迹SAR实验, 获得了全方位高分辨观测图像<sup>[52]</sup>。与地球同步轨道圆迹SAR的观测几何不同, 机载圆迹SAR对目标观测的入射角更大, 360°观测时, 则视角差异更大, 实际场景的散射各向异性明显。图23为某一观测场景在不同方位角下的图像, 可以看到, 真实场景, 尤其是人造目标, 散射

各向异性明显, 圆迹观测能够获得目标更完整的轮廓信息, 然而对各向异性目标的3维分辨能力较弱。

研究团队分析了各向异性散射特性对圆迹SAR 3维分辨能力的影响<sup>[46,53]</sup>, 如图24所示。对于各向同性目标, 在其真实高度平面成像, 回波信号聚焦成强点, 而在其他高度平面成像, 由于圆迹SAR的

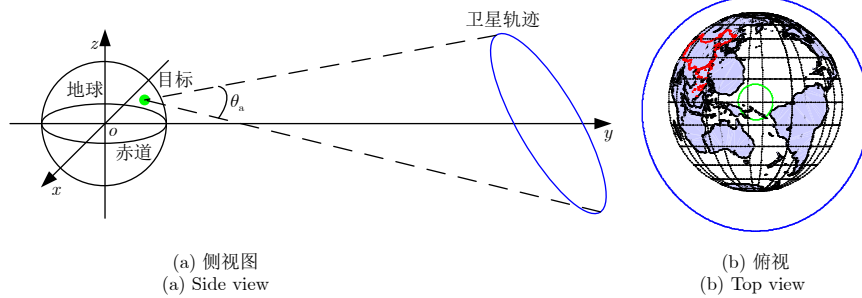


图 21 地心惯性直角坐标系下地球同步轨道圆迹SAR观测几何

Fig. 21 Geo-CSAR geometry in the geocentric inertial cartesian coordinate

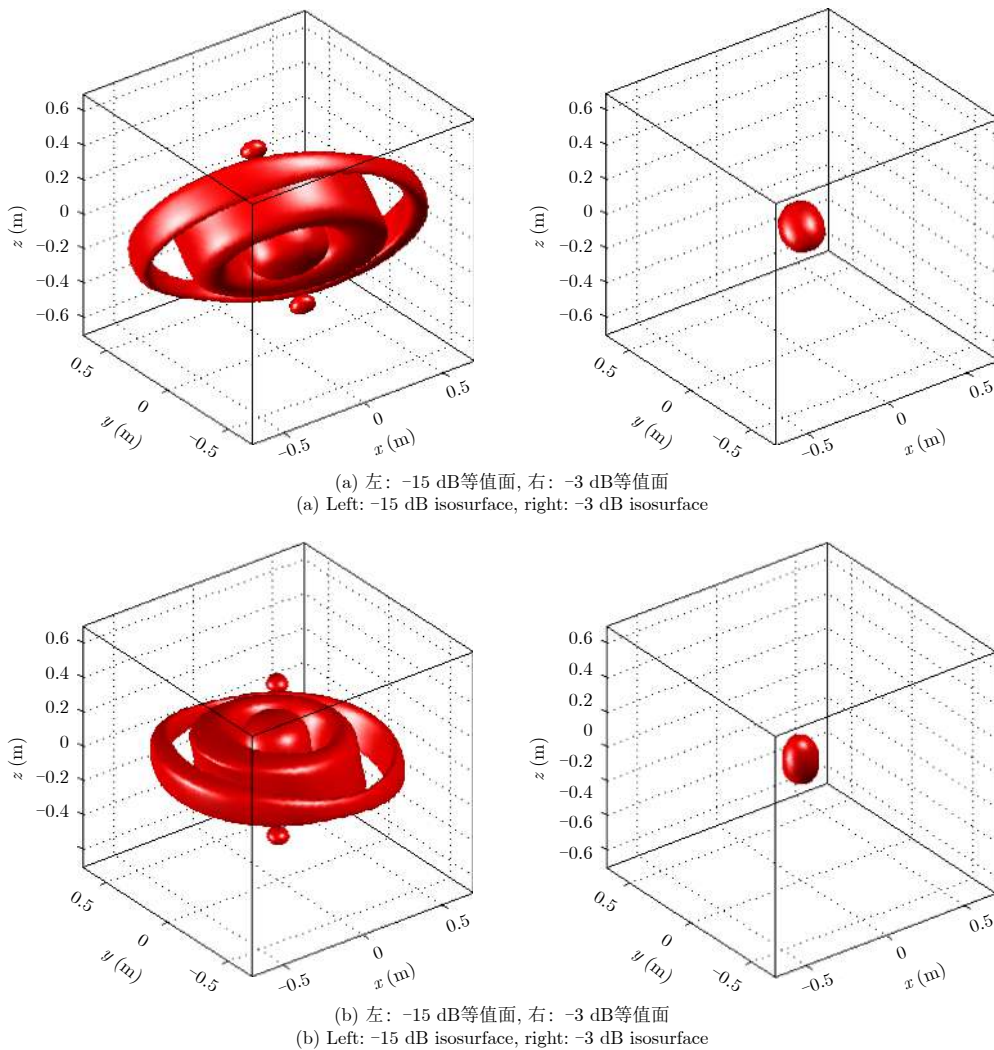


图 22 地球同步轨道圆迹SAR 3维成像点扩展函数

Fig. 22 3-D point spread function of Geo-CSAR



斜距随着平台的运动不断变化，根据零多普勒-最近斜距成像原理，信号能量扩散为半径与高度误差成正比的圆环，形成旁瓣，因此能够对目标进行3维分辨；而对于各向异性目标，尤其是散射方向性较强的人造目标，因只在某个角度有散射回波，在各高度平面成像时，聚焦性能对高度不敏感，在垂直视线方向不具有分辨能力。

在实际场景圆迹SAR成像时，由于目标各向异性，难以获得3维分辨图像，但是仍需要辅助的高度信息，否则，同一位置的目标在不同观测角度的投影位置不同，会形成上文所述的圆环或弧形假目标。如图25所示，图25(a)为错误高度平面成像

时，目标投影呈环形的示意图；图25(b)为实际数据处理时，在错误高度成像，目标错位，形成环形假目标；图25(c)为正确高度成像时，目标聚焦于正确位置。为解决成像对高度的敏感性，利用多角度图像间的偏移与高程的正比关系，提取高程信息，用于圆迹SAR成像。图26给出了基于圆迹SAR数据的DEM提取结果及利用DEM进行圆迹SAR成像的结果，可以看到，图像聚焦质量良好。

针对典型目标的3维精细成像问题，研究了干涉圆迹SAR(Interferometric Circular SAR, InC-SAR)<sup>[46,54-56]</sup>和多基线圆迹SAR的3维成像方法<sup>[37,57]</sup>。对于特定的无叠掩现象的情况下，可采用干涉圆迹

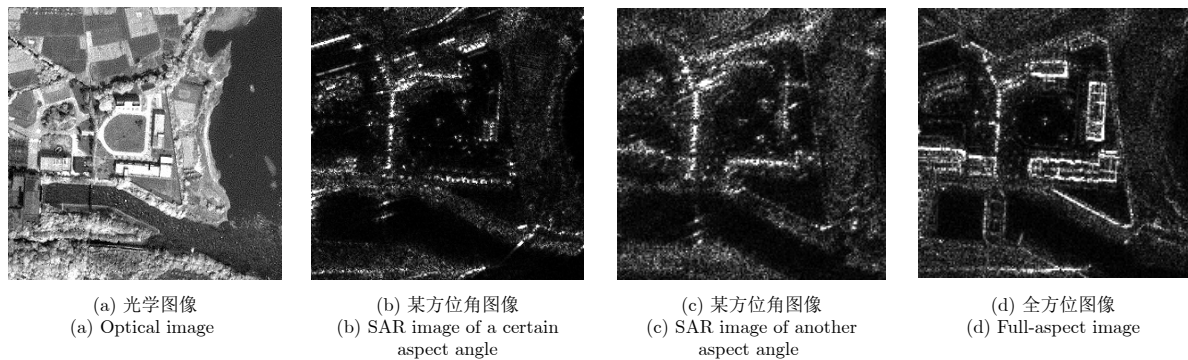


图 23 真实场景的各向异性特性

Fig. 23 Anisotropic properties of the real scene

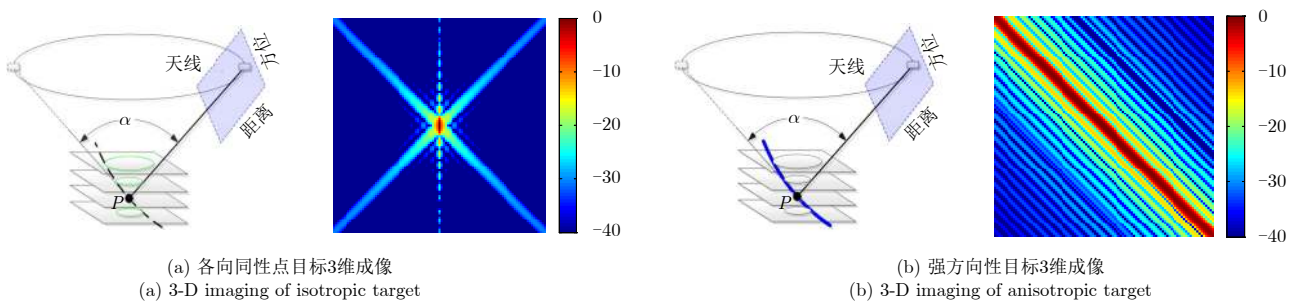


图 24 散射各向异性对圆迹SAR 3维分辨能力的影响

Fig. 24 The effect of anisotropic property to the 3-D resolving capability of circular SAR

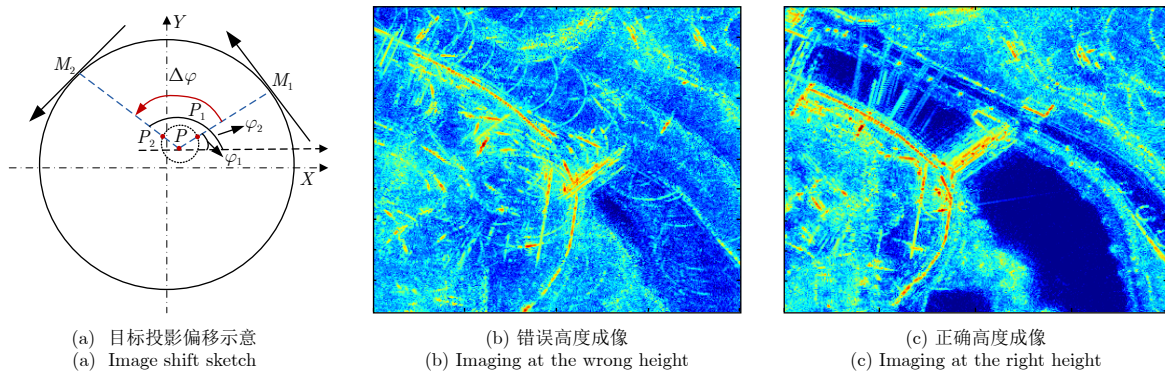


图 25 高程对圆迹SAR成像的影响

Fig. 25 Effect of height to the imaging of circular SAR

SAR剔除错误高度平面上的错位图像，获得目标的3维结构信息。其基本原理是对各高度平面逐层进行干涉处理，在目标真实高度，干涉相位为0，而在其他高度，两通道的错位带来干涉相位或低相干性予以剔除，从而增强圆迹SAR 3维成像能力。图27为暗室坦克模型的干涉圆迹SAR 3维成像结果，可以看到，通过干涉处理，非正确高度处的投影图像被剔除，目标3维结构信息清晰可见。相比于常规2维成像，全方位3维重建具有精细结构描述能力，更利于目标判读解译。

对于存在叠掩问题的情况下，研究团队采用多基线圆迹SAR 3维成像技术，利用多基线数据解叠掩。与常规多基线SAR不同的是，首先需要判断目标的散射方向，然后解叠掩。研究团队采用美国空军实验室(AFRL)发布的Gotcha数据开展了实验验证。该数据包含了8条X波段全极化圆迹SAR重轨

数据，实验场景是一个停车场。对其中的HH极化8基线数据进行了成像处理，并选取场景中的一辆汽车进行3维成像。如图28所示，图28(a)为基线分布，图28(b)为目标汽车的光学照片，图28(c)为以地平线为成像平面的单条轨迹2维成像结果。地平线2维图像中可看到内外两个轮廓，经过成像几何分析可知，内轮廓为汽车的底部，代表了汽车的真实轮廓；外轮廓为汽车的顶部，由于汽车顶部高度与成像平面高度的差异，顶部轮廓偏离真实位置，向外侧扩散，即产生几何畸变，不能代表汽车的真实轮廓。图28(d)和图28(e)给出了多基线处理后，汽车的3维成像结果点云图的侧视图和俯视图，可以较清晰地看出车体的轮廓。

研究团队将多基线圆迹SAR模式用于近景人体表面成像<sup>[7,58]</sup>，在安全检测领域有重要应用。研制了一套工作在毫米波阵列雷达圆柱扫描人体表面

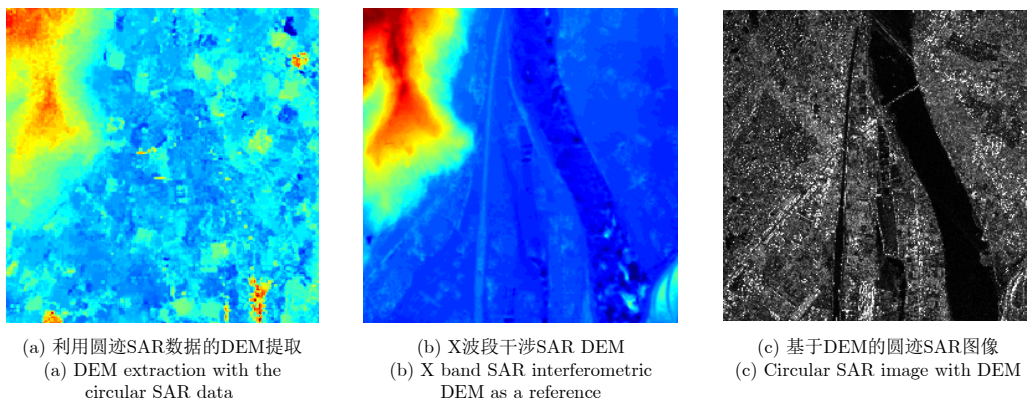


图 26 利用多角度图像的高程提取与利用高度信息的圆迹SAR成像

Fig. 26 DEM extraction with circular SAR data and circular SAR imaging with DEM

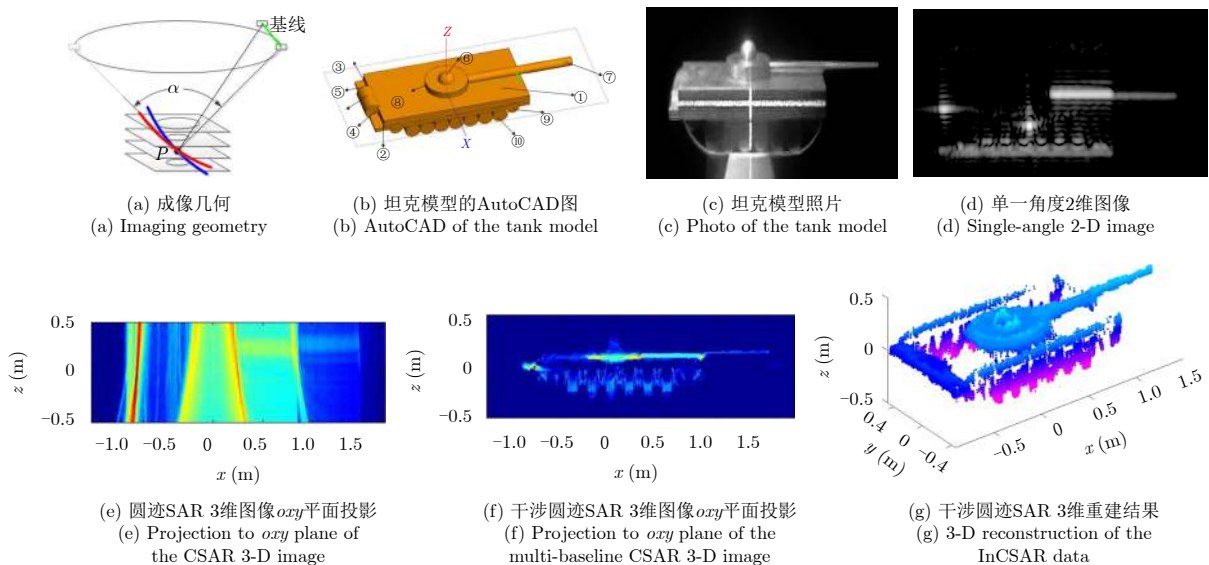


图 27 干涉圆迹SAR 3维重建

Fig. 27 3-D reconstruction of InCSAR

3维成像试验系统，系统的成像几何和实物照片如图29所示。阵列天线垂直放置，数据采集时，由微波开关控制依次导通相应收发单元完成阵列向回波采集，同时，阵列天线以一定半径围绕中轴旋转，完成柱面回波采集。毫米波阵列雷达圆柱扫描系统可以穿透遮蔽物，对人体表面进行全方位3维成像，探测体表隐蔽目标。图30为人体模型的3维图

像数据分别在正面、侧面和背面的投影图像，可以看到，该系统具有全方位高精度3维成像能力。

### 5 总结与展望

从2维成像拓展到3维成像是SAR成像技术的一次重要跨越。SAR 3维成像解决了常规SAR中的叠掩问题，能够实现3维分辨，从而在复杂场景下，

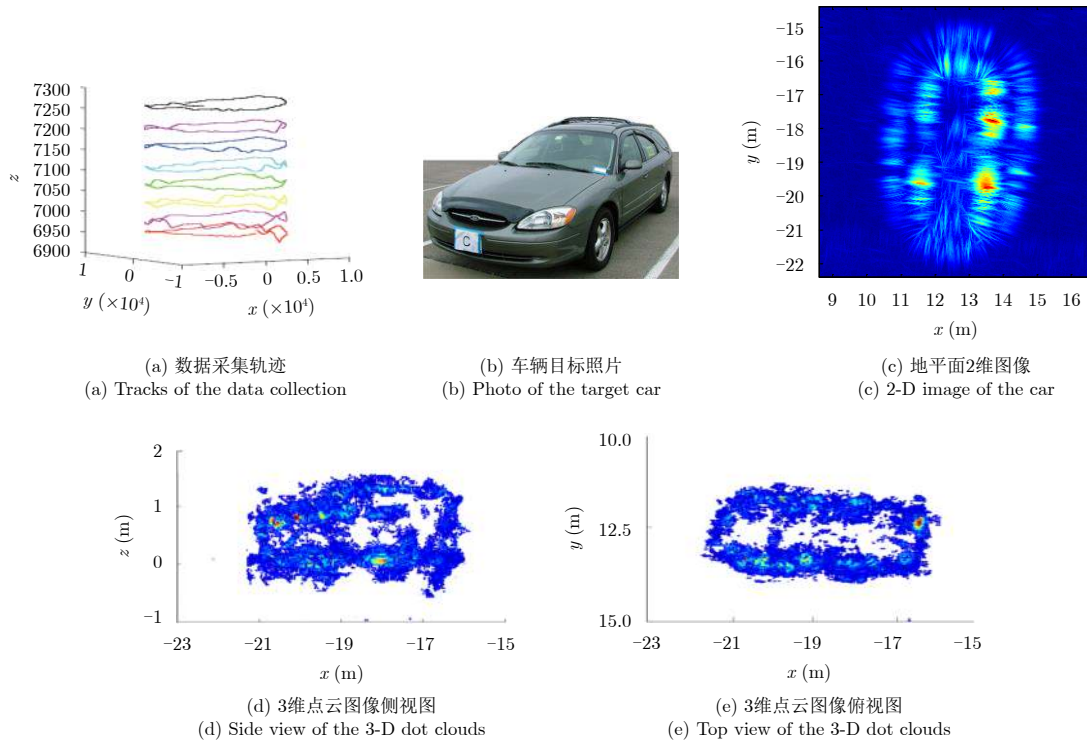


图 28 多基线圆迹SAR 3维成像结果

Fig. 28 3-D imaging results of multi-baseline circular SAR

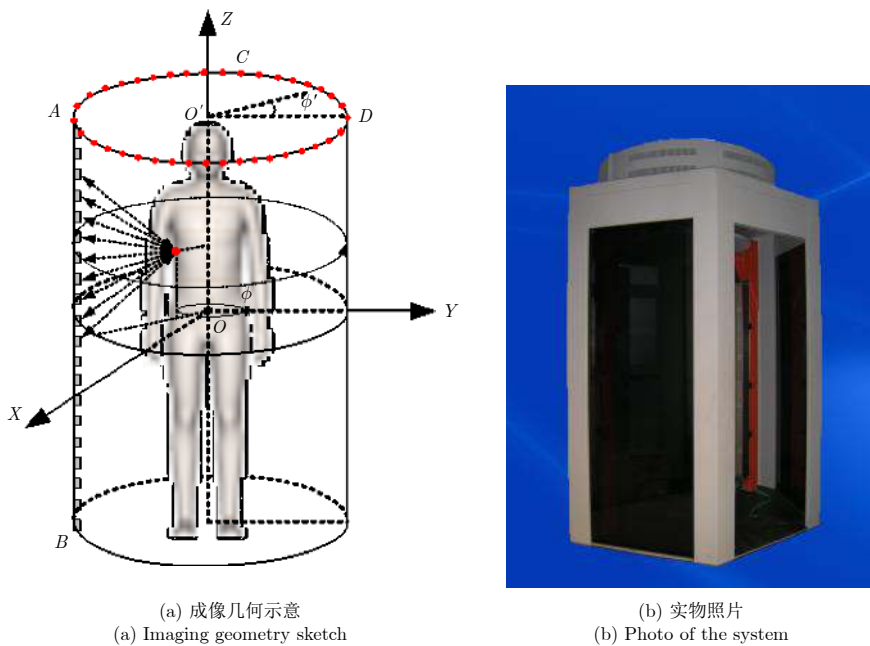


图 29 阵列雷达圆柱扫描3维成像试验系统

Fig. 29 Cylindrical scanning array radar 3-D imaging system



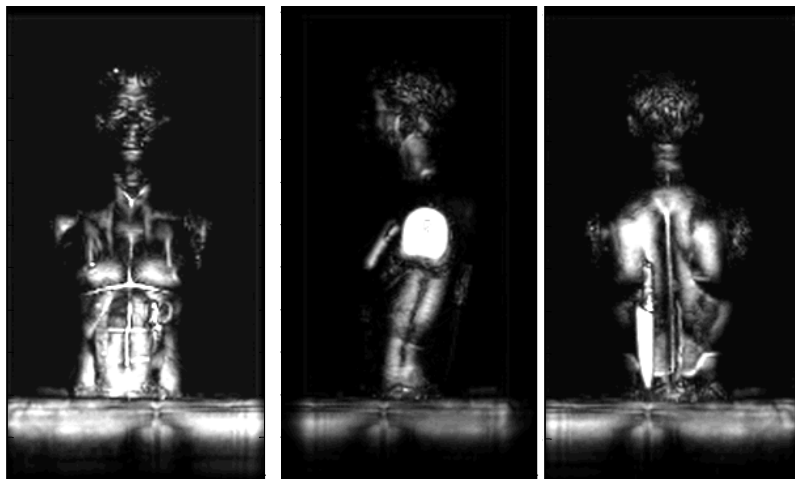


图 30 人体模型3维成像结果

Fig. 30 3-D imaging result of a mannequin with the cylindrical scanning array radar system

对目标进行3维定位、获取垂直结构信息等。为适应不同的平台,满足不同的应用需求,发展出了一系列新体制SAR 3维观测模式,包括多基线SAR、阵列下视SAR、圆迹SAR、多基线圆迹SAR等。国内外的机载、星载实验已验证了SAR 3维成像的可行性,展示了SAR 3维成像带来的全新视野,展现了其在城市测绘、森林监测、重点目标精细监测等领域的重要应用潜力。未来SAR 3维成像技术还将在以下几个方面有进一步的发展。

(1) 3维散射特征描述:目前已经能够获取SAR 3维图像数据,但如何对3维图像的散射特征进行描述仍是一个新的课题。如何将图像统计分布、纹理特征等在SAR 2维图像中常用的图像散射特征拓展到3维? 3维图像又有哪些新的散射特征量? 上述问题的深入研究对于深入理解SAR 3维图像,并服务于目标识别、分类等应用具有重要意义。

(2) 复杂轨迹精细化处理:现有SAR 3维成像模式多采用较为规则的轨迹,例如,多基线SAR和阵列下视SAR都采用直线飞行、圆迹SAR和多基线圆迹SAR采用圆形轨迹。未来,研究机动轨迹下的精细化3维成像数据获取与数据处理方法能够提升SAR 3维成像技术对复杂应用环境的适应能力,增强实用性。

(3) 多维度3维成像:多维度观测是SAR技术发展的重要趋势,SAR 3维成像技术已经开始与SAR极化技术、SAR多角度成像技术相结合,并开始展现出了更为丰富的目标信息。未来,与多极化、多角度、多波段、多尺度相结合的多维度SAR 3维成像是重要的发展方向,对观测对象生物物理参数的准确反演、提升目标理解能力具有重要意义。

(4) 新的数据获取方式:随着SAR系统技术的

不断进步,新的SAR 3维成像模式将不断涌现。例如,随着单系统成本的降低、多系统同步性能的提升,分布式SAR 3维成像或将成为下一阶段的一个研究热点。分布式SAR 3维成像利用分布在空间中多个雷达节点进行相参数据采集,通过联合数据处理实现3维分辨成像,在工作模式的灵活性、数据获取的时效性、3维分辨能力提升、多维度信息获取等方面具有显著优势,在卫星、飞机和地基平台上都具有重要的应用潜力。

**致谢** 本文的研究进展主要源于中国科学院电子学研究所SAR成像新概念新体制新技术研究团队。团队2005年开始致力于SAR 3维成像概念与模型的探索研究,10余年来陆续开展了以极化特征和多角度观测为代表的多维度SAR成像机理、体制与方法研究,近年来以其高精度高效算法优化、全息信息提取方法、及其面向未来敏捷平台+数字扫描星/机基和分布式无人观测平台等的应用研究。研究团队成功获得2007年科技部“下视阵列天线3维成像SAR”前沿探索项目、2009年国家部委“同步轨道圆迹SAR”探索项目、2011年国家高分专项“分布式阵列SAR”新体制项目、2015年国家自然科学基金委(NSFC)重点项目“多角度SAR”项目、2017年国家部委“无人机载圆周SAR”关键技术项目和“星载SAR多角度成像”预研项目等多项国家级项目的持续立项,并在多项NSFC杰出青年/面上/青年基金、NSFC“多维度微波成像重大项目”、973项目“稀疏微波成像”等的共同支持下,在国内率先完成第1幅360°全方位圆周SAR飞行试验和成像处理、阵列系统3维分辨成像可行性论证实验、近直线航迹宽角SAR及多角度特征研究、曲线轨迹单通道SAR-GMTI、稀疏微波成像方法及其在3维成像算法中的应用等研究工作。上

述工作依托中国科学院电子学研究所卓越的研究平台,在模型方法研究、可行性验证、原型系统研制、科学实验等方面,与所内外、国内外多个优秀团队研究人员进行了持续、广泛的交流与合作,在此一并表示衷心感谢,并对所有参研同事和研究生在长期的科研活动中所展现出的热情、智慧、执着和奉献致以诚挚的敬意。

### 参 考 文 献

- [1] Knaell K. Three-dimensional SAR from curvilinear apertures[C]. Proceedings of SPIE 2230, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, Orlando, FL, USA, 1994.
- [2] Soumekh M. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8): 1252–1265. DOI: [10.1109/83.506760](https://doi.org/10.1109/83.506760).
- [3] Bryant M L, Gostin L L, and Soumekh M. 3-D E-CSAR imaging of a T-72 tank and synthesis of its SAR reconstructions[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(1): 211–227. DOI: [10.1109/TAES.2003.1188905](https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1188905).
- [4] Fortuny J. Efficient algorithms for three-dimensional near-field synthetic aperture radar imaging[D]. [Ph.D. dissertation], University of Karlsruhe, 2001.
- [5] Fortuny J and Lopez-Sanchez J M. Extension of the 3-D range migration algorithm to cylindrical and spherical scanning geometries[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(10): 1434–1444. DOI: [10.1109/8.954932](https://doi.org/10.1109/8.954932).
- [6] 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).
- [7] 谭维贤. 合成孔径雷达三维成像理论与方法研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2009.  
Tan Wei-xian. Study on theory and algorithms for three-dimensional synthetic aperture radar imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [8] 洪文, 丁赤飏, 王彦平, 等. 确定微波三维成像中相位中心时空分布的方法[P]. 中国, CN201310699025, 2014.  
Hong Wen, Ding Chi-biao, Wang Yan-ping, *et al.*. Method for confirming space-time distribution of phase center in microwave three-dimensional imaging[P]. CN, CN201310699025, 2014.
- [9] Chan T K, Kuga Y, and Ishimaru A. Experimental studies on circular SAR imaging in clutter using angular correlation function technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2192–2197. DOI: [10.1109/36.789616](https://doi.org/10.1109/36.789616).
- [10] She Z, Gray D A, Bogner R E, *et al.*. Three-dimensional SAR imaging via multiple pass processing[C]. Proceedings of IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 1999, 5: 2389–2391. DOI: [10.1109/IGARSS.1999.771519](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.771519).
- [11] Fornaro G, Serafino F, and Soldovieri 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).
- [12] Fornaro G and Serafino F. Imaging of single and double scatterers in urban areas via SAR tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3497–3505. DOI: [10.1109/TGRS.2006.881748](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.881748).
- [13] Zhu X X and 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. DOI: [10.1109/TGRS.2011.2160183](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160183).
- [14] Budillon A, Evangelista A, and Schirinzi G. Three-dimensional SAR focusing from multipass signals using compressive sampling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 488–499. DOI: [10.1109/TGRS.2010.2054099](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2054099).
- [15] Aguilera E, Nannini M, and 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. DOI: [10.1109/TGRS.2012.2231081](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2231081).
- [16] Aguilera E, Nannini M, and Reigber A. Multisignal compressed sensing for polarimetric SAR tomography[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(5): 871–875. DOI: [10.1109/LGRS.2012.2185482](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2185482).
- [17] Gierull C H. On a concept for an airborne downward-looking imaging radar[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 1999, 53(6): 295–304.
- [18] Giret R, Jeuland H, and Enert P. A study of a 3D-SAR concept for a millimeter wave imaging radar onboard an UAV[C]. Proceedings of the 1st European Radar Conference, Amsterdam, The Netherlands, 2004: 201–204.
- [19] Nouvel J, Jeuland H, Bonin G, *et al.*. A Ka band imaging radar: DRIVE on board ONERA motorglider[C]. Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, USA, 2006: 134–136. DOI: [10.1109/IGARSS.2006.39](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.39).
- [20] Klare J, Weiß M, Peters O, *et al.*. ARTINO: A new high resolution 3D imaging radar system on an autonomous airborne platform[C]. Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, USA, 2006: 3842–3845.
- [21] Palm S, Oriot H M, and Cantalloube H M.

- Radargrammetric DEM extraction over urban area using circular SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4720–4725. DOI: [10.1109/TGRS.2012.2191414](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2191414).
- [22] Ponce O, Prats P, Rodriguez-Cassola M, *et al.*. Processing of circular SAR trajectories with fast factorized back-projection[C]. Proceedings of 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011: 3692–3695.
- [23] Ponce O, Prats-Iraola P, Scheiber R, *et al.*. First airborne demonstration of holographic SAR tomography with fully polarimetric multicircular acquisitions at L-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(10): 6170–6196. DOI: [10.1109/TGRS.2016.2582959](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2582959).
- [24] 王斌. 多基线SAR三维成像的参数化模型和方法研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院研究生院, 2010.  
Wang Bin. Parametric algorithms of multi-baseline synthetic aperture radar[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [25] Wang B, Wang Y P, Hong W, *et al.*. Studies on MB-SAR 3D imaging algorithm using Yule-walker method[J]. *Science China Information Sciences*, 2010, 53(9): 1848–1859. DOI: [10.1007/s11432-010-4040-7](https://doi.org/10.1007/s11432-010-4040-7).
- [26] 毕辉. 基于稀疏信号处理的SAR/TomoSAR成像方法研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院大学, 2017.  
Bi Hui. Study on sparse signal processing based SAR/TomoSAR imaging methods[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [27] Bi H, Zhang B C, and Hong W. Matrix completion-based distributed compressive sensing for polarimetric SAR tomography[J]. *Science China Information Sciences*, 2015, 58(11): 1–3. DOI: [10.1007/S11432-015-5395-6](https://doi.org/10.1007/S11432-015-5395-6).
- [28] Bi H, Zhang B C, and Hong W. Lq regularization-based unobserved baselines' data estimation method for tomographic synthetic aperture radar inversion[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(3): 035014. DOI: [10.1117/1.JRS.10.035014](https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.035014).
- [29] Bi H, Liu J G, Zhang B C, *et al.*. Baseline distribution optimization and missing data completion in wavelet-based CS-TomoSAR[J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(4): 042302. DOI: [10.1007/s11432-016-9068-y](https://doi.org/10.1007/s11432-016-9068-y).
- [30] 彭学明. 机载下视稀疏阵列3D SAR分布式大场景回波模拟与成像处理算法研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院大学, 2014.  
Peng Xue-ming. Airborne downward looking sparse linear array three dimensional synthetic aperture radar distributed large imaging scene echo simulation and imaging algorithm research[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [31] Peng X M, Hong W, Wang Y P, *et al.*. Polar format imaging algorithm with wave-front curvature phase error compensation for airborne DLSLA three-dimensional SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(6): 1036–1040. DOI: [10.1109/LGRS.2013.2282335](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2282335).
- [32] Peng X M, Wang Y P, Hong W, *et al.*. Autonomous Navigation airborne forward looking SAR high precision pseudopolar format imaging with overlapped sub-aperture algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(11).
- [33] Peng X M, Wang Y P, Hong W, *et al.*. Airborne downward looking sparse linear array 3-D SAR heterogeneous parallel simulation[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(10): 5304–5329. DOI: [10.3390/rs5105304](https://doi.org/10.3390/rs5105304).
- [34] 韩阔业. 阵列天线下视3D SAR多通道幅相误差校正成像方法研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院研究生院, 2011.  
Han Kuo-ye. Study on multi-channel amplitude-phase errors calibration and imaging methods of downward-looking 3D-SAR based on array antennas[D]. [Master dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [35] Han K Y, Wang Y P, Tan W X, *et al.*. Efficient pseudopolar format algorithm for down-looking linear-array SAR 3-D imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(3): 572–576. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2351792](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2351792).
- [36] Han K Y, Wang Y P, Chang X K, *et al.*. Generalized pseudopolar format algorithm for radar imaging with highly suboptimal aperture length[J]. *Science China Information Sciences*, 2015, 58(4): 1–15. DOI: [10.1007/S11432-014-5224-3](https://doi.org/10.1007/S11432-014-5224-3).
- [37] 鲍谦. 三维合成孔径雷达稀疏成像方法研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院大学, 2017.  
Bao Qian. Study on sparse imaging algorithms for three-dimensional synthetic aperture radar[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [38] Bao Q, Peng X M, Wang Z R, *et al.*. DLSLA 3-D SAR imaging based on reweighted gridless sparse recovery method[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(6): 841–845. DOI: [10.1109/LGRS.2016.2550057](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2550057).
- [39] Bao Q, Peng X M, Lin Y, *et al.*. Suboptimal aperture radar imaging by combination of pseudo-polar formatting and gridless sparse recovery method[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(9): 765–766. DOI: [10.1049/el.2016.0234](https://doi.org/10.1049/el.2016.0234).
- [40] Bao Q, Jiang C L, Lin Y, *et al.*. Measurement matrix optimization and mismatch problem compensation for DLSLA 3-D SAR cross-track reconstruction[J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1333. DOI: [10.3390/s16081333](https://doi.org/10.3390/s16081333).
- [41] Bao Q, Peng X M, Wang Y P, *et al.*. Downward looking sparse linear array 3D SAR imaging algorithm based on back-projection and convex optimization[J]. *Journal of Electronics (China)*, 2014, 31(4): 298–309. DOI: [10.1007/s11767-014-4095-5](https://doi.org/10.1007/s11767-014-4095-5).
- [42] 杨晓琳. 线阵成像雷达系统设计及幅相误差一致性校正方法研



- 究[D]. [博士学位], 中国科学院研究生院, 2014.
- Yang Xiao-lin. Research on system design and amplitude/phase errors correction for linear array imaging radar[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [43] 杨晓琳, 谭维贤, 乞耀龙, 等. 基于单特显点目标回波的阵列3D SAR幅相误差一致性校正方法研究[J]. 雷达学报, 2014, 3(4): 409–418. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2014.14037](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14037).
- Yang Xiao-lin, Tan Wei-xian, Qi Yao-long, *et al.*. Amplitude and phase errors correction for array 3D SAR system based on single prominent point like target echo data[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(4): 409–418. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2014.14037](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14037).
- [44] 丁振宇, 谭维贤, 王彦平, 等. 基于波数域子孔径的机载三维SAR偏航角运动误差补偿[J]. 雷达学报, 2015, 4(4): 467–473. DOI: [10.12000/JR15016](https://doi.org/10.12000/JR15016).
- Ding Zhen-yu, Tan Wei-xian, Wang Yan-ping, *et al.*. Yaw angle error compensation for airborne 3-D SAR based on wavenumber-domain subblock[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(4): 467–473. DOI: [10.12000/JR15016](https://doi.org/10.12000/JR15016).
- [45] 丁振宇. 机载下视觉阵列三维SAR运动补偿方法研究[D]. [博士学位], 中国科学院大学, 2015.
- Ding Zhen-yu. Research on airborne downward looking array three dimensional synthetic aperture radar motion compensation method[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [46] 林贇. 圆迹合成孔径雷达成像算法研究[D]. [博士学位], 中国科学院研究生院, 2011.
- Lin Yun. Study on algorithms for circular synthetic aperture radar imaging[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [47] 林贇, 谭维贤, 洪文, 等. 圆迹SAR极坐标格式算法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2802–2807. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2010.00003](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00003).
- Lin Yun, Tan Wei-xian, Hong Wen, *et al.*. Polar format algorithm for circular synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2802–2807. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2010.00003](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00003).
- [48] Lin Y, Hong W, Tan W X, *et al.*. Extension of range migration algorithm to squint circular SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 651–655. DOI: [10.1109/LGRS.2010.2098843](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2098843).
- [49] 洪文, 林贇, 谭维贤, 等. 地球同步轨道圆迹SAR研究[J]. 雷达学报, 2015, 4(3): 241–253. DOI: [10.12000/JR15062](https://doi.org/10.12000/JR15062).
- Hong Wen, Lin Yun, Tan Wei-xian, *et al.*. Study on geosynchronous circular SAR[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(3): 241–253. DOI: [10.12000/JR15062](https://doi.org/10.12000/JR15062).
- [50] 刘启. 地球同步轨道圆迹SAR成像方法研究[D]. [博士学位], 中国科学院电子学研究所, 2012: 1–18.
- Liu Qi. Investigation on the imaging methods for geosynchronous circular SAR[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 1–18.
- [51] Liu Q, Hong W, Tan W X, *et al.*. An improved polar format algorithm with performance analysis for geosynchronous circular SAR 2D imaging[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 119: 155–170. DOI: [10.2528/PIER11060503](https://doi.org/10.2528/PIER11060503).
- [52] 洪文. 圆迹SAR成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 124–135. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2012.20046](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20046).
- Hong Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 124–135. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2012.20046](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20046).
- [53] 刘婷. 基于DEM提取技术的机载圆迹SAR三维成像方法研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院大学, 中国科学院研究生院, 2012.
- Liu Ting. Three-dimensional imaging Based on the technique of DEM extraction in Airborne Circular SAR[D]. [Master dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [54] Lin Y, Hong W, Tan W X, *et al.*. Interferometric circular SAR method for three-dimensional imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1026–1030. DOI: [10.1109/LGRS.2011.2150732](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2150732).
- [55] 侯丽英. 干涉圆迹SAR的典型目标全方位三维重建方法研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院大学, 2016.
- Hou Li-ying. Interferometric circular SAR all-around 3D reconstruction method study on typical target[D]. [Master dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [56] 侯丽英, 林贇, 洪文. 干涉圆迹SAR的目标三维重建方法研究[J]. 雷达学报, 2016, 5(5): 538–547. DOI: [10.12000/JR16009](https://doi.org/10.12000/JR16009).
- Hou Li-ying, Lin Yun, and Hong Wen. Three-dimensional reconstruction method study based on interferometric circular SAR[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(5): 538–547. DOI: [10.12000/JR16009](https://doi.org/10.12000/JR16009).
- [57] Bao Q, Lin Y, Hong W, *et al.*. Holographic SAR tomography image reconstruction by combination of adaptive imaging and sparse Bayesian inference[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(8): 1248–1252. DOI: [10.1109/LGRS.2017.2704601](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2704601).
- [58] 乞耀龙. 近景微波三维成像模型与方法研究[D]. [博士学位], 中国科学院研究生院, 2012.
- Qi Yao-long. Study on imaging model and algorithms for near range three-dimensional microwave imaging[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2012.

## 作者简介



洪文(1968-),女,上海人,研究员、博士生导师。2002年“百人计划”加入中国科学院电子学研究所至今。主要从事合成孔径雷达(SAR)成像新概念新体制研究,领导团队开展以极化特征和多角度观测为代表的多维度SAR成像机理与方法研究,在国内率先完成第一幅360°全方位圆周SAR飞行试验和成像处理、阵列系统3维分辨成像可行性论证实验、近直线航迹宽角SAR及多角度特征研究、曲线轨迹单通道SAR-GMTI、稀疏微波成像方法及其在3维成像算法中的应用等研究。担任国家高分对地观测重大专项项目总师、国家自然科学基金重点项目和重点国际合作项目负责人、中科院创新团队国际合作伙伴项目负责人等,《雷达学报》、《物联网学报》编委,IEEE GRS 北京分部副主席,IEEE JSTARS副主编等。



王彦平(1976-),男,山东人,教授,博士生导师,国家安全生产专家。2001年3月获中国科学院电子学研究所工学博士学位并留所工作,曾任微波成像技术国家重点实验室副主任;2015年1月至2017年6月中国安全生产科学研究院工作;2017年6月至今在北方工业大学信息学院工作。长期从事雷达三维成像、地基SAR系统研制及其应用研究,研制成功国内首套地基SAR形变灾害监测预警系统并应用于“12.20深圳渣土受纳场滑坡”、“9.28浙江丽水苏村山体滑坡”、“6.24四川茂县山体滑坡”等我国重大灾害事故的抢险救援应急监测。获省部级奖2项、中国优秀专利奖1项、发表学术论文70余篇、授权发明专利30余项、软件著作权登记7项,任中国高科技产业化研究会理事、中国电子学会信号处理分会委员、中国电子学会DSP专委会委员、《信号处理》编委等。



林 贇(1983-),女,浙江人,工学博士,副研究员,硕士生导师。2011年获中国科学院电子学研究所工学博士学位后留所,并从事新体制微波成像技术成像算法及其应用研究。在国内率先开展圆迹合成孔径雷达SAR成像博士学位论文研究,设计完成国内首次机载圆迹SAR数据获取实验,处理获得国内首幅360°全方位高分辨圆迹SAR图像。近年来的主要学术方向为多角度SAR精细观测和信息提取的理论与方法研究,主持国家自然科学基金项目2项、国家基础研发项目子课题和国家级预先研究项目各1项,参与国家级重大项目4项。五年来,发表第一/第二作者学术论文29篇、授权发明专利5项。



谭维贤(1981-),男,湖北恩施人,博士,教授,硕士生导师,内蒙古自治区“草原英才”引进人才。2009年获中国科学院电子学研究所工学博士学位,2009年-2014年,微波成像技术国家级重点实验室副研究员、国家高分重大专项某型载荷副总设计师;2015年至今,内蒙古工业大学雷达技术研究所、内蒙古自治区雷达技术与应用重点实验室任教。主持国家自然科学基金面上项目、国家级预研基金、973子课题等多项。获内蒙古自治区科学技术进步奖一等奖、中国科学院院长优秀奖、第十届全国雷达年会优秀论文奖、IET国际雷达会议优秀论文奖等多项奖励。近年来,共发表学术论文60余篇、授权国家发明专利40余项、软件著作权5项、科技成果转化1项。入选内蒙古自治区“321人才工程”、内蒙古自治区“草原英才”工程,主要从事结合国家重大需求及内蒙古自治区经济发展需求,雷达系统技术、微变监测雷达、雷达信号处理和微波遥感等方面的研究和产品开发工作。



吴一戎(1963-),男,安徽人,1981年考入北京理工大学,先后获学士和硕士学位,在中国科学院电子学研究所获得博士学位。现任中国科学院空天信息研究院院长,中国科学院大学电子电气与通信工程学院院长,中国科学院信息技术科学部第十六届常委会副主任,国务院学位评定委员会信息与通信工程学科召集人,国家杰出青年基金获得者,“百千万工程”国家级人选入选者,享受国家政府特殊津贴。2007年当选中国科学院院士。长期从事微波成像技术以及大型遥感地面处理系统的设计和研制工作,近十年又在推动国家航空遥感系统的建设与发展。在微波成像领域,发明了多维度微波成像技术和稀疏微波成像技术,领导了关键技术的攻关,并将成果应用于后续的卫星系统。在遥感卫星地面处理与应用系统的体系结构、数据处理算法等方面,系统性地解决了一系列理论与关键技术,提高了我国在该领域的技术水平,主持完成了多项国家重大科研项目,承担的项目规模大,技术复杂,影响深远,推动了该领域的长远发展。作为项目负责人主持完成了国家科技基础设施-航空遥感系统的建设,作为总设计师主持了国家重大专项高分辨对地观测系统中航空系统的建设,系统性地推动了一系列国际领先的航空对地观测载荷的发展。曾获得国家科技进步一等奖、二等奖,全国创新争先奖,国防科技工业杰出人才奖,国防科技进步一等奖,中科院科技进步一等奖,何梁何利基金科学技术进步奖、陈嘉庚科学奖等国家和省部级重大奖项。