

文章编号: 2095-4980(2022)02-0106-13

雷达目标双基地散射特性研究进展

艾小锋, 徐志明*, 邱梦奇, 赵 锋, 肖顺平

(国防科技大学 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 随着同步技术和高性能计算的发展, 双/多基地雷达的“四抗”优势逐渐得以实现, 双/多基地雷达成为当今雷达领域关注的焦点。雷达目标的双基地散射截面(RCS)、双基地散射中心、双基地极化等特性与目标单基地散射特性相比, 具有显著的差异。只有深刻理解雷达目标双基地散射特性才能充分挖掘双/多基地雷达在目标检测、特征提取与识别方面的潜力。因此, 雷达目标双基地散射特性是一个亟需深入研究的方向。论文总结了雷达目标双基地散射特性研究的最新成果, 为后续研究提供一定的借鉴。

关键词: 双基地雷达; 目标特性; 雷达散射截面; 散射中心; 极化

中图分类号: TN955

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021310

Overview of bistatic scattering characteristics of radar targets

AI Xiaofeng, XU Zhiming*, QIU Mengqi, ZHAO Feng, XIAO Shunping

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: With the development of synchronization and high-performance computing technologies, the four advantages of bistatic/multi-static radar systems on anti-jamming, anti-destruction, anti-stealth targets, and anti-low-altitude target invasion have been gradually coming true. The bistatic/multi-static radar systems have attracted great attention. The bistatic scattering characteristics on Radar Cross-Section(RCS), scattering center, and polarization are quite different from the monostatic radar. Only based on the detailed understanding of bistatic scattering characteristics, the bistatic/multi-static radar potentials in target detection, feature extraction, and target recognition can be fully exploited. The issue of bistatic scattering characteristics is one of the urgent problems waiting to be investigated. This paper reviews the newest development of bistatic scattering characteristics and attempts to guide future research on bistatic radar.

Keywords: bistatic radar; scattering characteristics; Radar Cross-Section; scattering center; polarization

广义地说, 发射天线和接收天线分置的雷达即为双基地雷达。1904年德国工程师Christian Huelsmeyer设计了世界上公认的第一部雷达Telemobiloscope^[1], 可以认为是双基地雷达。从1904年到1930年代初期, 世界上所有的雷达都是像Telemobiloscope一样的双基地连续波雷达^[2]。1936年雷达双工器和1940年高功率脉冲磁控管被发明之后, “收发合一”的单基地雷达逐渐成为主流, 第二次世界大战后双基地雷达的发展则处于停滞阶段。从20世纪60年代末开始, 双基地雷达的抗隐身目标、抗低空突防、抗干扰、抗摧毁、抗目标“角闪烁”效应等优势被逐渐引起重视, 双基地雷达的研究开始复苏并发展至今。近年来, 由于“三大同步”、直达波抑制、目标检测、融合定位与跟踪等方面的关键技术已经取得突破, 很多类型的双基地雷达系统已经走向实用, 突出代表有双基地合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[3-4]和外辐射源雷达^[5]。

为了实现目标的分类与识别, 国内外众多科研机构对雷达目标双基地散射特性开展了研究, 国外包括英国伦敦大学、伯明翰大学、美国海军研究院、意大利比萨大学等, 国内包括武汉大学、北京理工大学、复旦大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学、北京环境特性研究所等众多科研院所, 取得了丰硕的研究成果。但仍然缺乏

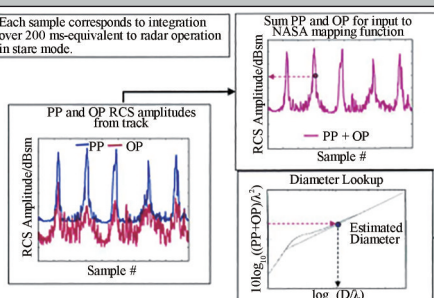
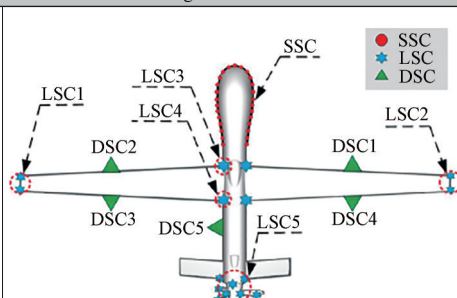
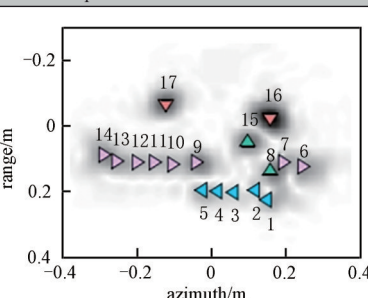
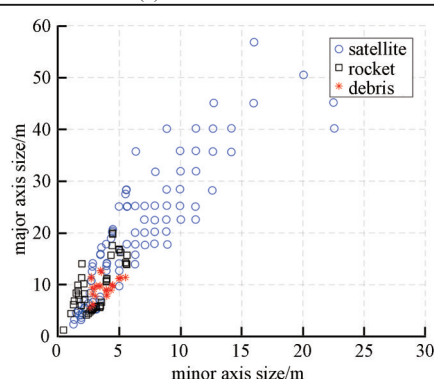
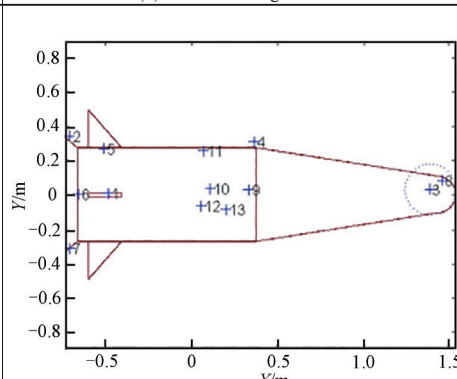
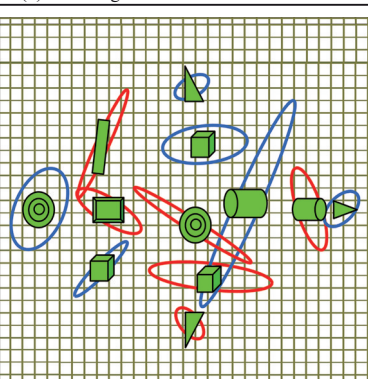
收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2021-10-19

*通信作者: 徐志明 email:zhimingxu@nudt.edu.cn

系统性，深入程度还不够。如果没有对双基地雷达目标电磁散射机理的正确认识，可能无法充分发挥双/多基地雷达的“四抗”优势，双基地 SAR 图像的解译、外辐射源雷达的目标检测、跟踪与识别将会面临瓶颈问题，因此，雷达目标双基地散射特性亟待深入研究^[6]。

雷达目标双基地散射特性与单基地雷达相比，参数维度更高，问题更加复杂。在散射截面积(RCS)方面，雷达目标双基地 RCS 较单基地 RCS 动态范围更大，起伏程度更加剧烈；在散射中心特性方面，雷达目标在双基地雷达体制下高阶散射现象更加明显；在极化特性方面，雷达目标的双基地散射矩阵不再满足互易性，极化信息处理难度又上一台阶。本文回顾了雷达目标双基地散射特性研究的关键技术和发展历程，如表 1 所示，按照“整体—局部—精细”的研究思路，系统地总结了雷达目标双基地 RCS 特性、双基地散射中心特性、双基地极化特性三个维度的研究现状，并分析了雷达目标双基地散射特性研究的发展趋势。

表 1 雷达目标散射特性与特征信息的对应关系

RCS characteristics			scattering center characteristics			polarization characteristics		
Each sample corresponds to integration over 200 ms-equivalent to radar operation in stare mode.								
								
(1) diameter estimation			(1) UAV scattering centers			(1) scattering center classification of sLICy		
								
(2) axial ratio estimation			(2) agni missile scattering centers			(2) airplane structure reconstruction		
①reflecting the target whole structure information			②reflecting the target partial structure information			③reflecting the target fine structure information		

1 雷达目标双基地 RCS 特性

1.1 单/双基地 RCS 等效原理

国内外对目标双基地 RCS 特性的研究起步很早。1965 年，Kell 教授从理论上推导出，当双基地角较小时，目标双基地 RCS 与在双基地角平分线上观测的单基地 RCS 的等效关系(Monostatic-Bistatic Equivalence Theorem, MBET)^[7]。MBET 从理论上建立了目标双基地 RCS 和双基地角平分线处单基地 RCS 之间的联系，提出了一种用单基地 RCS 对双基地 RCS 进行快速预估的方法。文献[6]、[8]从典型结构的双基地 RCS 出发，评估了 MBET 的准确性。并指出，随着目标结构的复杂度提高，满足 MBET 的双基地角将逐渐减小；当复杂目标的结构上存在多次散射、绕射、表面波等散射现象时，满足 MBET 的双基地角将限制在 5°~10°以内。

在高频区，根据目标的双基地 RCS 是否满足 MBET，可以将双基地 RCS 区域划分为三类：准单站 RCS 区，双基 RCS 区和前向散射区。文献[9]在 MBET 的理论基础上，研究了准单站 RCS 区双基地散射数据在波数域内的分布形式，为小双基地角条件下双基地 ISAR/SAR 成像奠定了基础^[10]。在双基地 RCS 区，由于复杂电磁散射现象，如多次散射、表面波等，而出现新的散射中心，以及由于遮挡效应导致原有散射中心的消失，双基地 RCS 不再满足 MBET。此外，双基地 RCS 区内散射中心要满足入射和散射方向均“可视”条件，相对于电磁波入射

方向或接收方向上的单基地雷达, 双基地散射中心要满足的条件增多, 从而导致散射中心数目的减少。特别是当某些大的散射中心因为遮挡而幅度衰减或消失时, 双基地 RCS 区内目标的角闪烁效应将大大降低^[11]。双基地角接近 180° 的区域就是前向散射区, 根据巴比涅原理, 目标在前向散射区的 RCS 为 $\sigma_F = 4\pi A^2/\lambda^2$, 其中 A 为目标的轮廓面积, λ 为波长^[12]。当双基地雷达功率受限时, 可以利用前向散射区增强雷达回波功率, 提高信噪比。

1.2 双基地 RCS 统计特性

双基地 RCS 统计特性主要通过电磁计算和实际测量数据来获得。如图 1 所示, 国内外很多单位开展了雷达目标双基地 RCS 暗室测量工作, 包括法国航空航天研究院、西班牙航空科技中心、法国联合微波资源中心等单位^[13-16]。作者所在团队国防科技大学 CEMEE 国家重点实验室搭建了雷达目标双基地雷达全极化散射测量系统。如图 2 所示, 该系统由暗室、转台、矢量网络分析仪、集成控制与数据处理单元四部分组成。

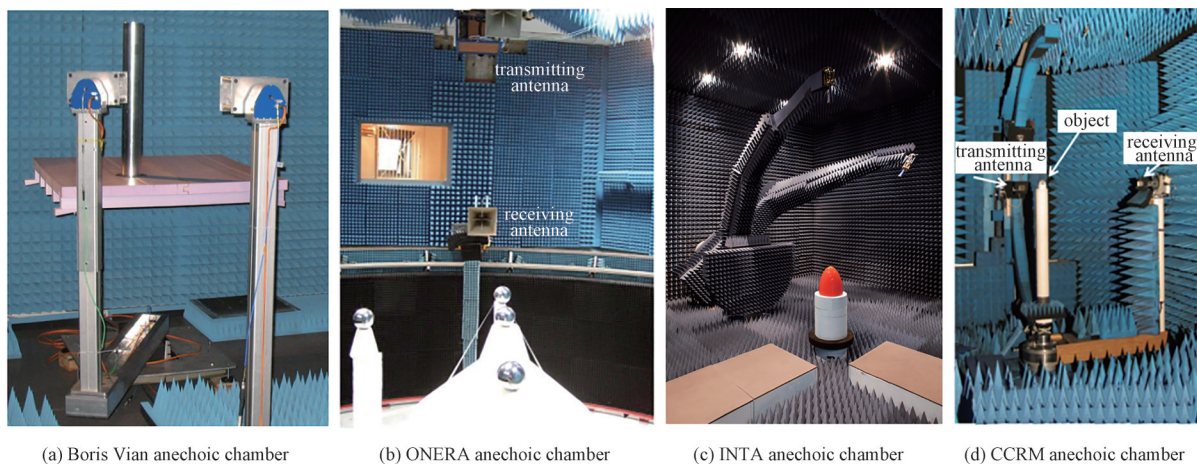


Fig.1 Anechoic chambers of bistatic RCS measurement

图 1 双基地 RCS 测量暗室

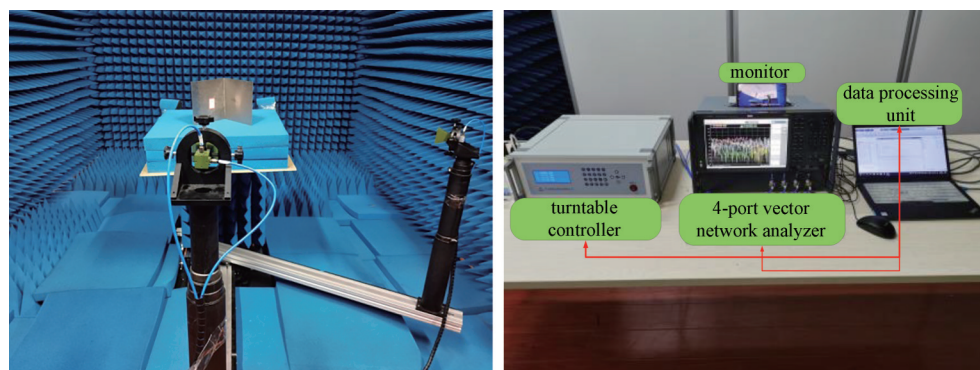


Fig.2 Experimental system for bistatic radar full-polarization scattering measurement

图 2 双基地雷达全极化散射测量实验系统(CEMEE)

雷达目标 RCS 统计特性主要包含三类:

- 1) 均值、标准差、标准偏度系数等 RCS 统计参数;
- 2) 卡方分布、对数正态分布、混合正态分布等 RCS 起伏分布模型;
- 3) 主瓣宽度、周期等 RCS 序列波形参数。

RCS 统计参数描述了目标 RCS 序列数值的位置、散布和分布特征, 可作为目标隐身设计的参考指标和目标分类的特征。RCS 起伏分布模型可用于目标 RCS 分布特性的研究, 以及拓展雷达检测理论^[17]。RCS 序列的周期、主瓣宽度等信息可以反映目标的运动和结构特征^[18]。

如图 3 所示, 作者以数字电视广播外辐射源雷达为背景, 采用统计参数, 直观描述了波音 737 飞机的双基地 RCS 统计特性^[19], 并指出四个极化通道双基地 RCS 具有相近的概率密度分布, 而单基地交叉极化通道 RCS 与主极化通道 RCS 概率密度分布不同, 主极化占优。文献[20]继续分析了双基地雷达与目标的几何位置关系对 RCS 特性的影响, 并指出双基地雷达与目标的几何位置关系在 RCS 特性中占据重要地位。王海军等人分析了数字电

视广播外辐射源雷达的目标和杂波分布特性,并用K分布拟合了城市杂波共极化分量和交叉极化分量的幅度分布^[21]。

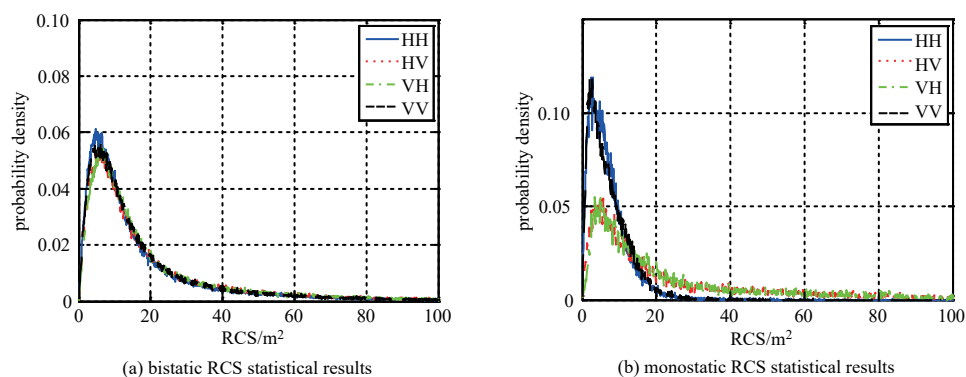


Fig.3 RCS statistical distribution of Boeing 737

图3 波音737飞机RCS统计分布

如图4所示,北京理工大学胡程等人基于实测的城市地杂波数据,对前向散射杂波的统计特性进行了分析,指出在风速不大的环境下杂波幅度的概率密度满足K分布;在强风环境下由于非均匀杂波的影响,杂波幅度的概率密度接近对数正态分布。利用高斯谱、指数谱、幂指数谱及高阶AR谱对杂波信号的功率谱进行了拟合,并结合广义匹配滤波理论实现了杂波的有效抑制和目标运动参数的精确估计^[22-23]。

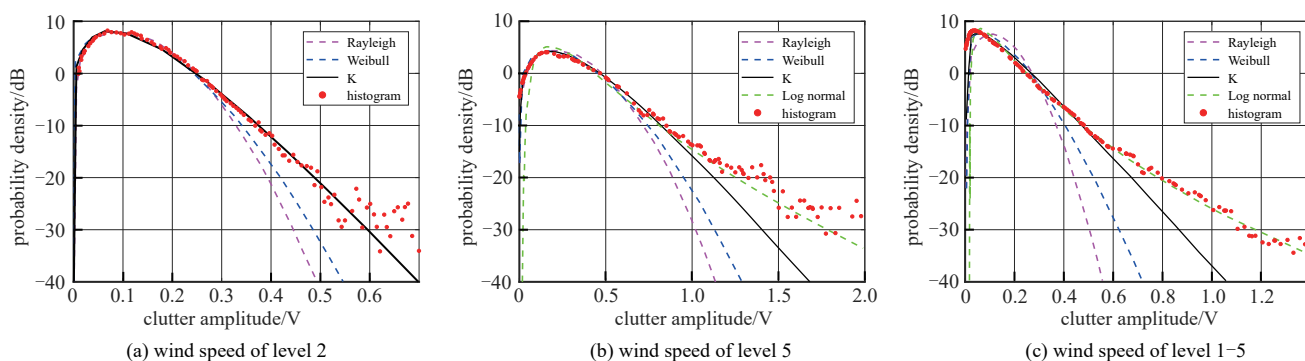


Fig.4 Probability density fitting of forward scattering amplitude for ground clutter

图4 地物杂波前向散射幅度概率密度^[23]

英国伦敦大学学院H D Griffiths教授团队利用NetRAD雷达系统长期进行不同风速和海况条件下的海杂波特性测量,通过K分布统计模型进行拟合,对比了单/双基地海杂波统计特性的差异,进一步分析了双基地海杂波统计特性与双基地角、极化的关系,指出双基地海杂波的海尖峰明显少于单基地海杂波^[24-25]。

相关研究已经证实,双基地雷达观测下,地物目标、人造目标、杂波等目标的双基地RCS统计特性,均具有区别于单基地雷达观测下的统计特性。双基地雷达的目标检测、杂波抑制等技术研究需要额外关注其中的差异性。

2 雷达目标双基地散射中心特性

散射中心理论已广泛应用于雷达目标成像与识别,双基地散射中心由于观测视角的多样性,与单基地散射中心特性差异很大,特别是双基地角增大时,会形成单基地雷达观测不到的现象,还有待于深入研究。

2.1 双基地散射中心类型

按照电磁散射机理的不同,散射中心通常可以分为五大类^[26]:镜面型散射中心、边缘型散射中心、尖顶型散射中心、多次反射型散射中心和表面波型散射中心。作者根据几何绕射理论中的等效电磁流法,明确了双基地雷达锥体目标底面边缘散射中心与双基地角平分线上单基地雷达观测的散射中心位置一致,由双基地角平分线和目标对称轴张成的平面与底面边缘的交点确定^[27]。随着目标姿态变化或入射电磁波和散射电磁波方向的变化,锥底散射中心将在底面边缘上连续滑动。北京理工大学盛新庆团队深入研究了锥体目标的双基地散射特性,

详细介绍了锥体目标表面爬行波、行波所形成的散射中心(如图 5 所示),指出大双基地角条件下,爬行波散射能够形成较强的散射中心,且在雷达图像和时频域中表现出显著的特征^[28]。

如图 6 所示,经过总结,锥体目标在双基地雷达模式下共存在 7 个散射中心,涵盖 4 种散射中心类型。对于其他复杂目标来说,双基地雷达观测下尖顶型、镜面型和边缘型散射中心在目标上的位置,可以按照双基地角平分线处单基地雷达的目标特性进行确定。对应于高阶散射的多次反射型和表面波型散射中心的电磁散射机理较为复杂,不能简单地根据上述“单基地等效原理”确定散射中心的位置。其中,表面波型散射中心在目标上的位置分布可以根据文献[29]中的研究思路进行分析。

2.2 双基地散射中心微动特性

目标微动客观存在,其引起的微动调制特性成为目标识别的关键。V. C. Chen 指出目标双基地微多普勒值往往小于角平分线处单基地雷达的微多普勒值,是其 $\cos(\beta/2)$ 倍, β 为双基地角^[30]。国防科技大学邹小海基于对锥体目标双基地散射中心位置分布的认识,建立了锥体目标双基地微动模型,并提出了相应的微多普勒曲线检测和特征提取方法^[31]。Hugh Griffiths 教授团队已经开发了两代双/多基地雷达系统 NetRAD 和 NeXtRAD,在人体^[32]、风力发电机^[33]、无人机^[34]等目标的双基地微多普勒测量方面取得了不少的研究成果,如图 7 所示,证明了双/多基地雷达观测获得的回波数据中包含的微多普勒信息比单基地雷达更加丰富。武汉大学电子信息学院万显荣教授团队搭建了比较成熟的 HF、UHF 频段的外辐射源雷达系统,开展了多旋翼无人机^[35]和直升机^[36]的微多普勒效应试验研究,为基于外辐射源雷达系统的目标分类和识别奠定了基础。

从图 7 可以看出,无人机、人体和风车的双基地微多普勒具有明显的“分布特征”,即不同时刻微多普勒在频率轴上展宽形成“条带竖线”。文献[37-38]讨论了局部型、分布型和滑动型散射中心的时频特征,上述“条带竖线”即对应于分布型散射中心的微多普勒。根据距离多普勒成像原理可知,分布型散射中心方位向上的延展,必然对应一段连续分布的多普勒,且该多普勒的频率范围与分布型散射中心的方位向长度是对应的。时频域内“条带竖线”的长度与胳膊、风力发电机和无人机叶片的长度一一对应,可以利用时频域内“条带竖线”的长度反演胳膊、风力发电机叶片等目标的长度,实现目标分类识别。

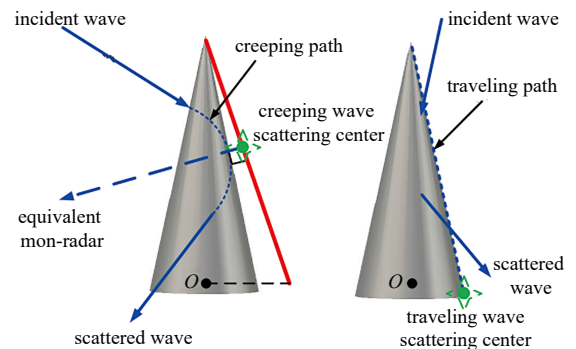


Fig.5 Surface wave scattering centers (creeping wave, traveling wave) of the cone target

图 5 锥体目标的表面波型(爬行波、行波)散射中心

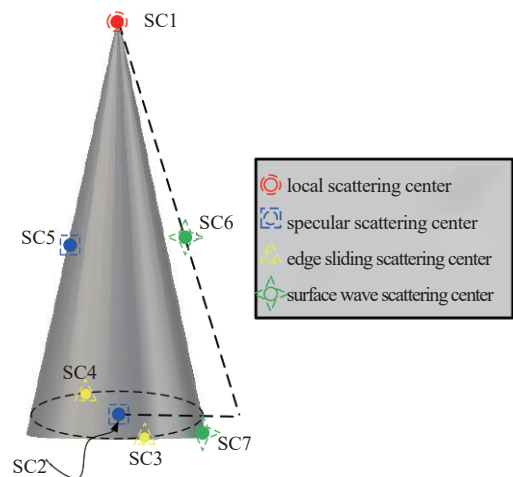


Fig.6 Types of scattering center of cone target in bistatic radar mode

图 6 双基地雷达模式下锥体目标的散射中心类型

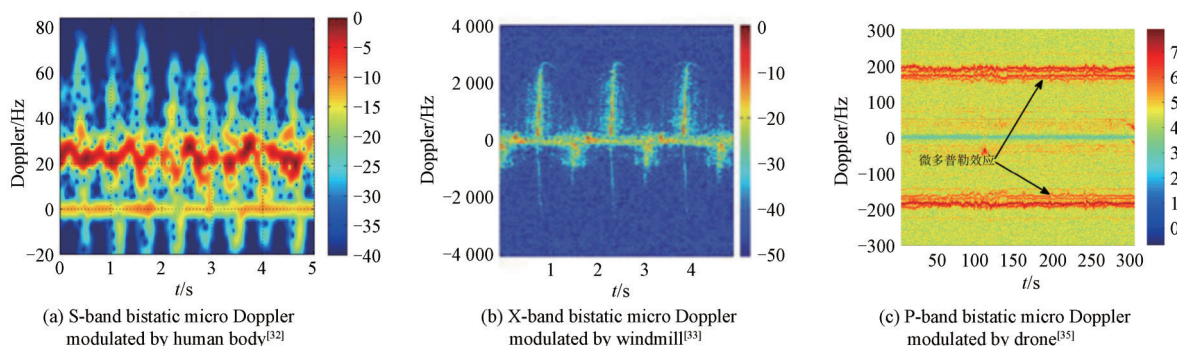


Fig.7 Time-frequency distribution of target bistatic micro-Doppler

图 7 目标双基地微多普勒时频分布

2.3 双基地散射中心图像特性

文献[39]对比了利用电磁仿真方法得到的单基地雷达二维图像与双基地雷达二维图像的区别,其中单基地雷达分别位于双基地雷达的接收机位置和双基地角平分线处。如图8所示,当目标仅存在一阶散射时,双基地雷达图像与角平分线处单基地雷达图像高度相似;当目标出现高阶散射时,两者在对应于产生高阶散射的目标结构位置(图8以绿色方框标注),雷达图像略有区别。上述现象与2.1节的分析一致,一阶散射的双基地散射中心如尖顶型、镜面型和边缘型散射中心可以等效为双基地角平分线处单基地雷达的散射中心;对高阶散射型散射中心如多次反射型和表面波型散射中心,上述等效原理失效。许多学者在研究双基地ISAR成像方法时,往往忽略目标实际的电磁散射特性,而是基于各向可见、各向同性的理性点散射模型,直接将双基地ISAR图像等效为角平分线处单基地雷达图像进行研究^[40-41]。

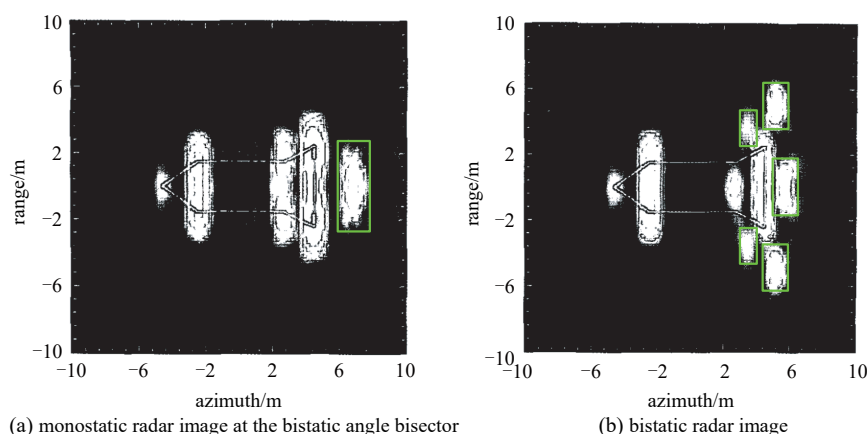


Fig.8 Monostatic and bistatic radar images of a missile model

图8 导弹模型单、双基地雷达图像^[39]

ISAR 成像的本质就是目标散射中心距离-多普勒的二维分辨^[42]。意大利比萨大学 Marco 教授和哈尔滨工业大学孙思博系统地指出,当目标的平移运动导致相干积累时间内双基地角改变时,散射中心的多普勒不仅与散射中心的方位向坐标有关,还与距离向坐标有关,因此造成了剪切失真;同时散射中心的多普勒随时间变化,造成了图像方位向散焦^[43-44]。当双基地雷达发射机或接收机与目标之间存在非平稳的旋转运动时,会造成散射中心多普勒额外的“时变性”,造成双基地 ISAR 图像方位向的散焦^[45-46]。此外,双基地雷达发射机和接收机之间的相位同步误差^[47],还会造成双基地雷达图像的目标偏移、分辨率下降、图像散焦等问题^[48]。

电子科技大学杨建宇教授团队多年来一直致力于机载双基 SAR 的理论、方法研究,以及试验样机的研制工作。先后获得了国内第一幅双基侧视 SAR 图像^[49]和国际第一幅机载双基前视 SAR 图像^[50]。杨建宇教授指出双基地 SAR 可以获得不同于单基地 SAR 的地物散射信息,例如在双基地 SAR 中角反射体不再是强散射体,较强的散射主要来自与双基地角平分线垂直的平面状地物所产生的镜面散射^[3,51];双基地 SAR 图像中,地物目标会出现两个“阴影”等。文献[52]详细分析了双基地 SAR 图像中不同张角二面角结构的散射特性,并基于几何光学法提出了通过设计双基地 SAR 几何构型来提高对二面角结构检测能力的方法。

综上,双基地雷达成像方法要尽可能地克服双基地雷达图像的失真、散焦、分辨率下降等问题,使得双基地雷达图像可以等效为角平分线处单基地雷达图像;从目标特性解译的角度,上述“单/双基地等效原理”基本成立,只有当目标散射机理较为复杂时,才需要利用电磁学理论进一步地分析。

3 雷达目标双基地极化特性

极化是电磁波在幅度、频率、相位之外又一信息测量维度,在雷达目标检测、分类识别、抗干扰等领域有巨大的应用价值^[53]。雷达极化学经过几十年的发展,逐渐形成理论体系,具备极化测量能力的雷达成为未来发展的主流趋势。

3.1 雷达目标双基地极化特性表征

G. Sinclair 最早提出极化散射矩阵 S 用来描述目标的变极化效应^[54],可表示为:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = e^{j\varphi_{HH}} \begin{bmatrix} |S_{HH}| & |S_{HV}| e^{j(\varphi_{HV} - \varphi_{HH})} \\ S_{VH} |e^{j(\varphi_{VH} - \varphi_{HH})}| & |S_{VV}| e^{j(\varphi_{VV} - \varphi_{HH})} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 S_{VH} 表示发射采用水平极化, 接收采用垂直极化时对应的复散射系数, 散射矩阵的其他元素依次类推。

单基地雷达的极化信息处理通常假设散射矩阵满足互易性即 $S_{HV} = S_{VH}$, 因此, 单基地雷达的散射矩阵可以由 3 个幅度项, 2 个相对相位项, 共 5 个参数来表征。忽略测量系统引入的误差和环境杂波与噪声, 互易性假设暗含了要满足以下条件: 1) 天线特性互易(即天线作为发射天线和接收天线时方向图等特性是一致的); 2) 雷达目标极化散射特性互易(即对于雷达目标而言, 当入射波为 H 极化和 V 极化时, V 极化和 H 极化散射波的特性是一致的, 后向散射情况下, 该特性通常由目标的材料决定^[55])。对于收发天线分置的双基地雷达系统来说, 条件 1) 就不满足, 所以双基地雷达目标的散射矩阵通常不满足互易性, 即 $S_{HV} \neq S_{VH}$ 。双基地雷达的散射矩阵的表征参数增加为 7 个, 4 个幅度项和 3 个相对相位项。

Mueller 矩阵、Kennaugh 矩阵分别从散射方程、接收电压方程两个角度定义了 Stokes 矢量极化表征形式下的电磁波散射过程。单基地情况下, Mueller 矩阵和 Kennaugh 矩阵均由 9 个元素构成, 且 9 个 Kennaugh 矩阵元素(后被称为 Huynen 参数)与雷达目标物理特征对应关系明确^[56]。双基地情况下, Mueller 矩阵、Kennaugh 矩阵不再满足对称性, 因此, 需要由 16 个参数表征^[57]。

每个极化通道复散射系数的二阶矩被用来表征雷达目标和环境的极化散射特性^[58], 将散射矩阵的每个元素看作随机变量, 协方差矩阵 $\mathbf{C}$ 衡量了每个变量之间的相关程度。区别于 $\mathbf{C}$ 矩阵, 相干矩阵 $\mathbf{T}$ 将散射矩阵在 Pauli 基下的分解系数看作随机变量, 描述了目标不同散射机理之间的联系。由于目标的散射机理通常属于奇次散射、二面角散射、体散射或螺旋体散射中的一种或是组合形式, 所以 $\mathbf{T}$ 矩阵可以很好地反映散射机理层面的目标特性。单基地雷达目标由于满足互易性, 所以 $\mathbf{T}$ 矩阵和 $\mathbf{C}$ 矩阵由 9 个参数来表征; 双基地情况下, $\mathbf{T}$ 矩阵和 $\mathbf{C}$ 矩阵需要 16 个参数来表征。

如表 2 所示, 双基地雷达极化特性表征矩阵($\mathbf{S}$ 矩阵、 $\mathbf{M}$ 矩阵、 $\mathbf{K}$ 矩阵、 $\mathbf{T}$ 矩阵、 $\mathbf{C}$ 矩阵)参数的维度普遍高于单基地雷达。

3.2 雷达目标双基地极化特性应用

目标分类识别问题一直是雷达领域关注的焦点。雷达目标的极化信息敏感于目标的结构、材料、尺寸等物理特征, 因此雷达极化信息中蕴含大量可供目标分类与识别的可分性特征量^[53]。经过几十年的发展, 单基地雷达目标极化特征提取方法已经较为成熟, 例如以 Huynen、Kennaugh 为代表的学者, 通过极化散射矩阵的变换和分解获得目标窄带“极化不变量”特征; 以 Cameron 等为代表的众多学者, 利用矩阵分解获得目标极化特征参数^[59]; 以王雪松教授为代表的学者, 提出宽带、超宽带雷达目标瞬态极化散射结构的统计特征^[60]。

双基地雷达目标极化特征提取的研究却一直发展十分缓慢, 目前仍处于“起步阶段”。法国航空航天研究院 Schnaider 将 Huynen 目标参数^[60]推广到散射矩阵不再对称的双基地雷达体制, 分析了 6 个双基地 Huynen 目标参数的物理含义, 为目标双基地散射极化特性解译奠定了基础^[61]。Schnaider 在文献[62]中将 Cameron 分解^[63]扩展到双基地雷达情况。文献[64]指出, 当电磁波的传播平面、目标对称平面和极化参考平面三个平面重合时, 目标的交叉极化响应为 0, 双基地散射矩阵为对角阵。其中, 电磁波的传播平面为电磁波入射方向和散射方向张成的平面; 目标对称平面顾名思义即目标关于该平面成平面对称; 极化参考平面, 相对于极化参考平面的几何关系, 垂直于该平面的极化基为水平极化基 H, 在平面内的极化基为垂直极化基 V。文献[65]在文献[64]的工作基础上, 分析了双基地角对双基地雷达极化散射的影响, 并利用极化参考平面的变换, 降低了球体双基地散射的交叉极化响应。

双基地雷达极化散射特性参数维度高于单基地雷达, 表明双基地极化信息反映的目标空间信息维度也高于单基地雷达。例如, 利用单基地雷达只能获取目标在 H-V 极化平面内的二维指向信息^[66], 收发分置的双基地雷达理论上可以获取目标的空间三维指向信息^[61]。

如图 9 所示, 依据文献[61]计算了细长金属圆柱体的双基地 Huynen 目标参数, 其中 θ_i 和 θ_s 分别为 Huynen 目标参数中的入射和散射定向角。由于 θ_i 和 θ_s 与极化目标的三维指向相关, 所以可以利用 θ_i 和 θ_s 反演目标空间中的三维指向。对于单基地雷达, 入射极化参考平面与散射极化参考平面重合, $\theta_i = \theta_s$, 所以只能估计极化目标的二维指向。从这一点可以看出利用极化信息, 收发分置的双基地雷达可以获得更多的目标信息, 体现了极化信息在双基地雷达中的优势。

表 2 单/双基地雷达目标极化特性表征矩阵参数维度对比
Table 2 Comparison of polarization characterization dimension for monostatic radar and bistatic radar

characterization matrix	monostatic	bistatic
sinclair matrix	5	7
coherent/covariance matrix	9	16
Mueller/Kennaugh matrix	9	16

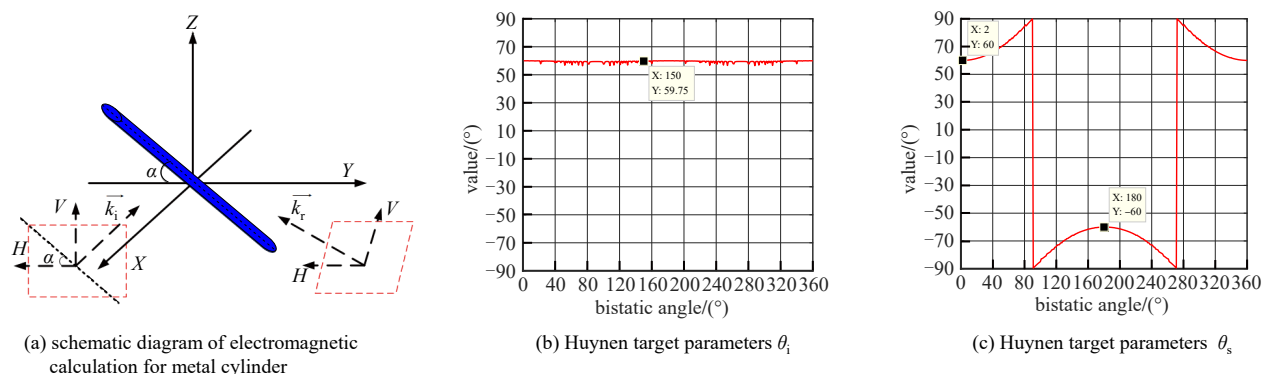


Fig.9 Bistatic Huynen target parameters of metal cylinder

图9 金属细长圆柱双基地Huynen目标参数

作者团队利用搭建的双基地雷达全极化散射测量实验系统，测量了金属铁丝竖直放置和倾斜 45° 放置两种情况下双基地角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的双基地极化散射矩阵，并估计了其三维姿态，验证了利用双基地极化信息估计线性目标三维姿态的技术可行性。实验场景以及三维姿态估计结果如图10所示。垂直放置的偶极子模型空间三维姿态参数空间幅度图如图10(b)所示。图中的最大值点即为三维姿态估计结果，即空间姿态俯仰角为 3° ，方位角为 209° 。由于垂直放置的偶极子模型空间姿态理论俯仰角为 0° ，理论方位角可以为任意值，所以仅从空间姿态俯仰角的角度来看，针对偶极子模型的空间姿态估计结果相对误差为3.3%。倾斜 45° 放置的偶极子模型空间三维姿态参数空间幅度图如图10(d)所示。图中的最大值点即为三维姿态估计结果，即空间姿态俯仰角为 47° ，方位角为 65° 。由于倾斜 45° 放置的偶极子模型空间姿态理论俯仰角为 45° ，理论方位角为 90° ，所以空间姿态俯仰角的估计结果相对误差为2.2%，空间姿态方位角的估计结果相对误差为6.9%。

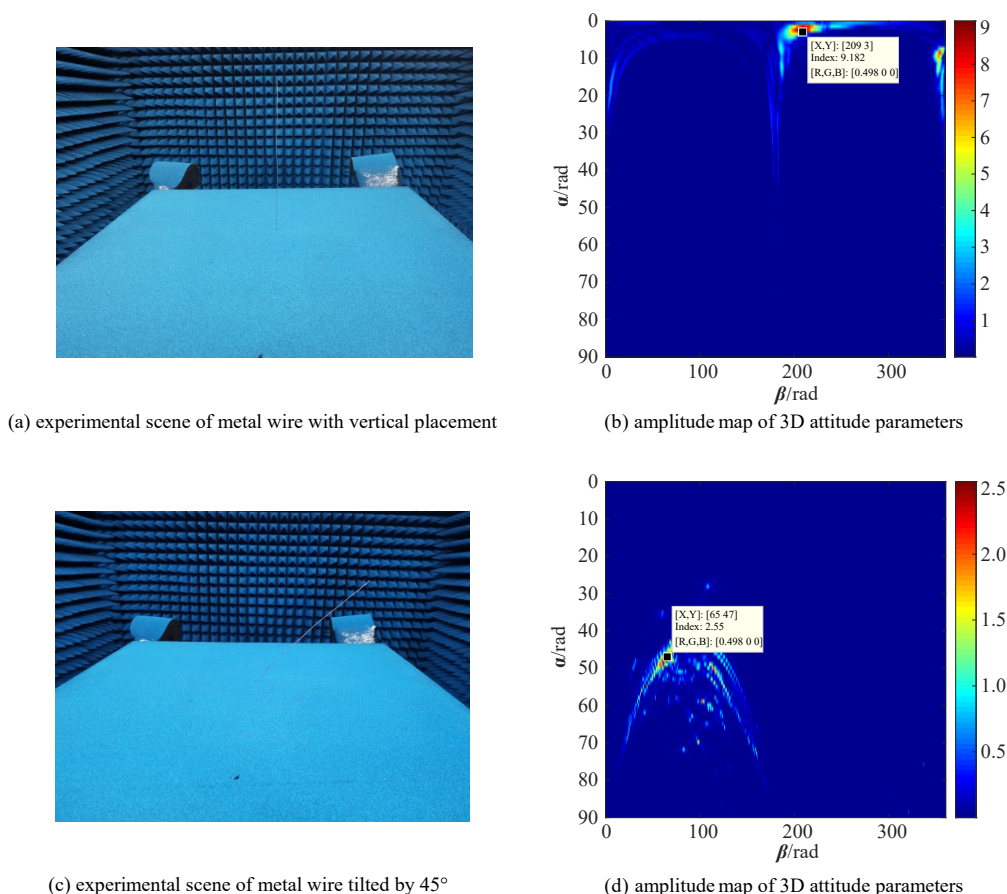


Fig.10 3D attitude estimation results for linear-type targets

图10 线性目标空间三维姿态估计结果

近几年,双基地雷达系统开始逐渐具备双极化或全极化测量能力。例如德国的 TanDEM-X 系统,可以获得双基地全极化 SAR 图像;英国伦敦大学学院 Hugh Griffiths 团队对只有单极化测量能力的 NetRAD(一发三收)分布式雷达系统进行改进,得到功率更大,同步性能更好,具备双极化测量能力的 NeXtRAD(一发三收)系统;万显荣教授团队将传统单极化外辐射源雷达改造升级,使其具备双极化测量能力,利用极化滤波技术将民航客机的检测性能提高 5 dB,无人机的检测性能提高 8 dB^[67-68]。上述研究均证实了双基地雷达目标极化信息在目标检测、杂波抑制方面的优势,日后为了充分挖掘极化信息在双基地雷达检测、识别方面的潜力,对双基地雷达目标极化特性的研究至关重要。

4 总结与展望

4.1 雷达目标双基地 RCS 特性

目前,国内外针对雷达目标双基地 RCS 统计特性的研究,主要还是借鉴单基地雷达的一些理论与方法。相关研究已经证实,双基地 RCS 具有区别于单基地 RCS 的统计特性,而其统计特性上的差异目前为止还没有被充分地揭示以及精确地“表征”。从统计参数、统计分布模型、RCS 波形参数三个角度,刻画地物目标、人造目标、杂波等目标类型的双基地 RCS 统计特性,是具有重要意义的基础研究课题。在此基础上,双基地 RCS 统计特性的认识,将在拓展双基地雷达目标检测理论、提高窄带双基地雷达系统的分类和识别能力等方面创造实用性价值。

双基地 RCS 特性的研究基础是“数据”。论文公开介绍的双基地 RCS 静态测量系统大多数来自国外单位,且测量数据均未共享。双基地 RCS 测量数据的缺乏,直接限制了国内对双基地雷达目标特性方面的研究。双基地雷达目标 RCS 暗室和外场测量,面临自由度高、定标和极化校准等一系列难题,是一个具备“广度”和“深度”的研究方向。未来以国内优势单位为主导,构建双基地雷达目标特性测量数据集,推动双基地雷达目标特性基础性研究,已成为迫切需求。

4.2 雷达目标双基地散射中心特性

雷达目标上“尖顶型”、“镜面型”、“边缘型”三种类型的散射中心,已经在单基地雷达中被充分验证。“表面波型散射中心”成为双基地雷达大双基地角条件下独特的散射现象,还需要深入研究。另外,雷达目标往往会存在耦合结构,以及多个目标距离较近而构成紧邻目标,在双基地雷达观测条件下,在耦合结构和紧邻目标上,由于电磁耦合而形成多次反射型散射中心,多次反射型散射中心可以反映目标结构之间或目标与目标之间是否接触、夹角大小等几何位置关系。而多次反射型散射中心对应的电磁散射机理,例如电磁波弹跳次数,传播路径,以及色散性都难以预估,导致目前缺少对多次反射型散射中心的研究手段。忽略电磁耦合的散射过程,从宏观上为多次反射型散射中心建立可以表征其散射场随电磁波频率、方位、位置演化规律的散射中心参数化模型,或许是未来的解决途径。

近年来,中科院丁赤飏院士和复旦大学金亚秋院士团队提出的微波视觉三维成像^[69]、武汉大学朱国强教授团队提出的散射中心模型正向建模思想^[70]等,都越来越强调“三维结构—散射中心—雷达回波”三者之间的映射关系,其中三维结构与散射中心之间的联系桥梁为电磁散射机理;散射中心与雷达回波之间的联系桥梁为数学模型。今后,针对双基地雷达,建立拟合度高、参数维度低,能充分表征电磁散射机理的双基地散射中心参数化模型,以及在视觉语义和散射机制约束条件下,利用提取的双基地散射中心反演目标三维结构的技术,将会在雷达成像、目标识别等领域提供新的解决方法与途径。

4.3 雷达目标双基地极化特性

双基地雷达目标极化特性表征矩阵参数多,极化散射特性空间维度高,极化信息中蕴含了更加丰富的目标信息。但是单基地雷达极化信息处理的理论与方法,不能直接用于双基地雷达,需要做进一步的拓展。双基地雷达目标极化信息处理的研究,势必会存在复杂度更高,考虑问题更多,数据获取更难等诸多问题。

双基地雷达极化基础理论已经有了基本的探索,然而在理论应用方面还很不成熟,这主要是长期受限于缺少成熟的双基地雷达极化测量系统。目前,外辐射源雷达系统和双基地极化 SAR 系统的技术发展方兴未艾,外辐射源雷达系统的杂波抑制和目标识别,双基地极化 SAR 中地物目标的解译,都对双基地雷达极化信息处理技术的发展有了迫切需求。通过双极化天线接收,外辐射源雷达系统可轻松获取双基地线性双极化或简缩极化散射信息,通过极化滤波、极化识别技术,可极大地提高外辐射源雷达系统的性能。因此,双基地雷达极化滤波和极化识别技术在外辐射源雷达中的应用具有广阔的前景。将单基地雷达中比较成熟的基于模型的极化分解方

法, 基于特征值、特征向量的极化分解方法, 基于散射矩阵的相干极化分解方法, 以及基于 Kennaugh 矩阵的极化分解方法等拓展到双基地雷达, 将会为双基地极化 SAR 系统注入活力, 提高对地物目标的解译能力。

参考文献:

- [1] GRIFFITHS H, KNOTT P, KOCH W, et al. Christian Hülsmeier: invention and demonstration of radar, 1904[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2019, 34(9): 56–60.
- [2] WILLIS N J, GRIFFITHS H D. Advances in bistatic radar[M]. Raleigh, North Carolina, USA: Scitech Publishing Incorporated, 2007.
- [3] 杨建宇. 双基地合成孔径雷达技术[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(4): 482–501. (YANG Jianyu. Bistatic synthetic aperture radar technology[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(4): 482–501.)
- [4] 曾涛. 双基地合成孔径雷达发展现状与趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 329–341. (ZENG Tao. Bistatic SAR: state of the art and development trend[J]. Journal of Radars, 2012, 1(4): 329–341.)
- [5] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 109–123. (WAN Xianrong. An overview on development of passive radar based on the low frequency band digital broadcasting and TV signals[J]. Journal of Radars, 2012, 1(2): 109–123.)
- [6] EIGEL R L, COLLINS P J, TERZUOLI A J, et al. Bistatic scattering characterization of complex objects[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2078–2092.
- [7] KELL R E. On the derivation of bistatic RCS from monostatic measurements[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8): 983–988.
- [8] BRADLEY C J, COLLINS P J, FALCONER D G, et al. Evaluation of a near-field monostatic-to-bistatic equivalence theorem[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(2): 449–457.
- [9] BUDDENDICK H, EIBERT T. Bistatic image formation from Shooting and Bouncing Rays simulated current distributions[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2011(119): 1–18.
- [10] CHAO-HSIUNG T, TAH-HSIUNG C. Improvement of quasi-monostatic frequency-swept microwave imaging of conducting objects using illumination diversity technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(1): 305–312.
- [11] ZHANG Huiyuan, GUO Liangshuai, LIANG Zichang, et al. Bi-static angular glint calculation on complex targets in near-regions via multilevel fast multipole algorithm[C]// 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium(PIERS). Shanghai, China: [s.n.], 2016: 1470–1473.
- [12] CHERNIAKOV M, ABDULLAH R S A R, JANCOVIC P, et al. Automatic ground target classification using forward scattering radar[J]. IEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation, 2006, 153(5): 427–437.
- [13] DAOUD F, SCHMITT F. Analysis of a bistatic Radar Cross Section measurement capability for the Boris Vian anechoic chamber[C]// IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). Antibes, France: [s.n.], 2014: 1–4.
- [14] BELLEZ S, ROUSSEL H, DAHON C, et al. Full polarimetric bistatic radar imaging experiments on sets of dielectric cylinders above a conductive circular plate[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 4164–4176.
- [15] EACOT-BOCANEGRA D, POVATOS-MARTINEZ D, PLAZA-GALLARDO B. Indoor measurement of bistatic high resolution range profiles of scale model aircraft targets[C]// European Radar Conference. Madrid, Spain: [s.n.], 2018: 174–177.
- [16] SALEH H, GEFFRIN J, TORTEL H. Bistatic scattering measurement on low permittivity spheroidal objects[C]// European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Paris, France: [s.n.], 2017: 59–262.
- [17] 张斌, 杨勇, 逯旺旺, 等. Ku 波段固定翼无人机全极化 RCS 统计特性研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(6): 41–47. (ZHANG Bin, YANG Yong, LU Wangwang, et al. Research on fully polarimetric RCS statistical characteristics of fixed-wing UAV in Ku band[J]. Modern Radar, 2020, 42(6): 41–47.)
- [18] LAMBOUR R, RAJAN N, MORGAN T, et al. Assessment of orbital debris size estimation from radar cross-section measurements[J]. Advances in Space Research, 2004(34): 1013–1020.
- [19] 艾小锋, 曾勇虎, 高磊, 等. 飞机目标全极化双基地散射特性研究[J]. 雷达学报, 2016, 5(6): 639–646. (AI Xiaofeng, ZENG Yonghu, GAO Lei, et al. Research on full-polarization bistatic scattering characteristics of aircraft[J]. Journal of Radars, 2016, 5(6): 639–646.)
- [20] 陈俊杰, 彭章友, 张钟浩. 被动雷达的目标散射特性和时间序列[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(6): 661–666. (CHEN Junjie, PENG Zhangyou, ZHANG Zhonghao. Target RCS fluctuation and time series in passive radar system[J]. Radar Science and Technology, 2018, 16(6): 661–666.)
- [21] 王海军, 郑光勇, 曾勇虎, 等. 基于双极化融合的外辐射源雷达实验分析[J]. 现代雷达, 2017, 39(10): 11–15, 20. (WANG Haijun, ZHENG Guangyong, ZENG Yonghu, et al. Experimental analysis on the passive bistatic radar based on dual-polarized integration

- technology[J]. *Modern Radar*, 2017,39(10):11–15,20.)
- [22] HU Cheng, LONG Teng, ZENG Tao. Statistic characteristic analysis of forward scattering surface clutter in bistatic radar[J]. *Science China(Information Sciences)*, 2010,53(12):2675–2686.
- [23] ZHANG C F, LIU C J, CHENG H, et al. Statistical analysis and simulation method of forward scattering clutter in bistatic radar[C]// *IET International Radar Conference*. Xi'an, China: [s.n.], 2013.
- [24] AL-ASHWAL W A, WOODBRIDGE K, GRIFFITHS H D Griffiths. Analysis of bistatic sea clutter-part: amplitude statistics[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014,50(2):1293–1303.
- [25] RITCHIE M, STOVE A, WOODBRIDGE K, et al. NetRAD: monostatic and bistatic sea clutter texture and Doppler spectra characterization at S-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016,54(9):5533–5543.
- [26] 周剑雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论与技术[D]. 长沙:国防科技大学, 2006. (ZHOU Jianxiong. Theory and technology on reconstructing 3D scattering centers of radar targets in optical region[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2006.)
- [27] 艾小锋. 双基地雷达弹道目标成像与特征提取方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2013. (AI Xiaofeng. Research on bistatic radar imaging and feature extraction of ballistic targets[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2006.)
- [28] 屈泉酉. 雷达目标散射中心模型及其应用[D]. 北京:北京理工大学, 2015. (QU Quanyou. Scattering center models of radar targets and their applications[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.)
- [29] CHEN V C, LI F, HO S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006,42(1):2–21.
- [30] CHEN V C, ROSIERS A D, LIPPS R. Bi-static ISAR range-Doppler imaging and resolution analysis[C]// *IEEE Radar Conference*. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2009:1–5.
- [31] 邹小海. 弹道中段目标双基地微动特性分析与特征提取[D]. 长沙:国防科技大学, 2014. (ZOU Xiaohai. Characteristics of micro-Doppler and feature extraction of midcourse ballistic target in bistatic radar[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2014.)
- [32] FIORANELLI F, RITCHIE M, GRIFFITHS H. Classification of unarmed/armed personnel using the NetRAD multistatic radar for micro-Doppler and singular value decomposition features[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015,12(9):1933–1937.
- [33] RITCHIE M, FIORANELLI F, BALLERI A, et al. Measurement and analysis of multiband bistatic and monostatic radar signatures of wind turbines[J]. *Electronics Letters*, 2015,51(14):1112–1113.
- [34] FIORANELLI F, RITCHIE M, GRIFFITHS H, et al. Classification of loaded/unloaded micro-drones using multistatic radar[J]. *Electronics Letters*, 2015,51(22):1813–1815.
- [35] 刘玉琪, 易建新, 万显荣, 等. 数字电视外辐射源雷达多旋翼无人机微多普勒效应实验研究[J]. *雷达学报*, 2018,7(5):585–592. (LIU Yuqi, YI Jianxin, WAN Xianrong, et al. Experimental research on micro-Doppler effect of multi-rotor drone with digital television based passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2018,7(5):585–592.)
- [36] 李宇倩, 易建新, 万显荣, 等. 外辐射源雷达直升机旋翼参数估计方法[J]. *雷达学报*, 2018,7(3):313–319. (LI Yuqian, YI Jianxin, WAN Xianrong, et al. Helicopter rotor parameter estimation method for passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2018,7(3):313–319.)
- [37] GUO K, QU Q, SHENG X. Geometry reconstruction based on attributes of scattering centers by using time-frequency representations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016,64(2):708–720.
- [38] ZHAO X, GUO K, SHENG X. Modifications on parametric models for distributed scattering centres on surfaces with arbitrary shapes[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019,13(12):2174–2182.
- [39] BURKHOLDER R J, GUPTA L J, JOHNSON J T. Comparison of monostatic and bistatic radar images[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003,45(3):41–50.
- [40] MARTORELLA M, PALMER J, HOMER J, et al. On bistatic inverse synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007,43(3):1125–1134.
- [41] MARTORELLA M, GATALDO D, BISTATICALLY S. Bistatically equivalent monostatic approximation for bistatic ISAR[C]// *IEEE Radar Conference*. Ottawa, Canada: IEEE, 2013:1–5.
- [42] 董健, 尚朝轩, 高梅国, 等. 双基地 ISAR 成像平面研究及目标回波模型修正[J]. *电子与信息学报*, 2010,32(8):1855–1862. (DONG Jian, SHAN Chaoxuan, GAO Meiguo, et al. The image plane analysis and echo model amendment of bistatic ISAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010,32(8):1855–1862.)
- [43] JIANG Y, SUN S, YEO T S, et al. Bistatic ISAR distortion and defocusing analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and*

- Electronic Systems, 2016,52(3):1168–1182.
- [44] CATALDO D, MARTORELLA M. Bistatic ISAR distortion mitigation via superresolution[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018,54(5):2143–2157.
- [45] SHI L, GUO B, HAN N, et al. Bistatic ISAR distortion mitigation of a space target via exploiting the orbital prior information[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019,13(7):1140–1148.
- [46] KANG B, BYU B, KIM K. Bistatic ISAR imaging for nonuniformly rotating targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019,55(4):1972–1988.
- [47] BEHNER S, RRUTER H. Synchronization and processing in the HITCHHIKER bistatic SAR experiment[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016,9(3):1028–1035.
- [48] KRIEGER G, YOUNIS M. Impact of oscillator noise in bistatic and multistatic SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006,3(3):424–428.
- [49] XIAN L, XIONG J, HUANG Y, et al. Research on airborne bistatic SAR squint imaging mode algorithm and experiment data processing[C]// 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Huangshan, China: [s.n.], 2007:18–621.
- [50] YANG J, HUANG Y, YANG H, et al. A first experiment of airborne bistatic forward-looking SAR-preliminary results[C]// 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS. Melbourne, Australia: IEEE, 2013:4202–4204.
- [51] 杨建宇. 雷达对地成像技术多向演化趋势与规律分析[J]. 雷达学报, 2019,8(6):669–692. (YANG Jianyu. Multi-directional evolution trend and law analysis of radar ground imaging technology[J]. Journal of Radars, 2019,8(6):669–692.)
- [52] AO D, LI Y, HU C, et al. Accurate analysis of target characteristic in bistatic SAR images: a dihedral corner reflectors case[J]. Sensors, 2018,18(24):1–26.
- [53] 王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望[J]. 雷达学报, 2016,5(2):119–131. (WANG Xuesong. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. Journal of Radars, 2016,5(2):119–131.)
- [54] SINCLAIR G. The transmission and reception of elliptically polarized waves[J]. Proceedings of the IRE, 1950,38(2):148–151. doi:10.1109/JRPROC.1950.230106.
- [55] CAMERON W L, LEUNG L K. Feature motivated polarization scattering matrix decomposition[C]// IEEE International Conference on Radar. Arlington, USA: IEEE, 1990:549–557.
- [56] GUISSARD A. Mueller and Kennaugh matrices in radar polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994,32(3):590–597.
- [57] TITIN-SCHNAIDER C. Polarimetric characterization of bistatic coherent mechanisms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(5):1535–1546.
- [58] TRAGL K. Polarimetric radar backscattering from reciprocal random targets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990,28(5):856–864.
- [59] CLOUDE S, POTTIER E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996,34(2):498–518.
- [60] 杨健, 曾亮, 马文婷, 等. 雷达目标极化散射特征提取的研究进展[J]. 电波科学学报, 2019,34(1):12–18. (YANG Jian, ZENG Liang, MA Wenting, et al. Recent advances on extraction of polarimetric scattering features of radar target[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019,34(1):12–18.)
- [61] TITIN-SCHNAIDER C. Physical meaning of bistatic polarimetric parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,48(5):2349–2356.
- [62] TITIN-SCHNAIDER C. Characterization and recognition of bistatic polarimetric mechanisms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013,51(3):1755–1774.
- [63] ROGERS G W, RAIS H, CAMERON W L. Polarimetric SAR signature detection using the cameron decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014,52(1):690–700.
- [64] HEATH G. Bistatic scattering reflection asymmetry, polarization reversal asymmetry, and polarization reversal reflection symmetry[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981,29(3):429–434.
- [65] TROUV É, NICOLAS, KOENIGUER E C, et al. Influence of geometrical configurations and polarization basis definitions on the analysis of bistatic polarimetric measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011,49(6):2238–2250.
- [66] HU C, LI W, WANG R, et al. Discrimination of parallel and perpendicular insects based on relative phase of scattering matrix eigenvalues[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020,58(6):3927–3940.
- [67] YI Y, WAN X, YI J, et al. Polarization diversity technology research in passive radar based on subcarrier processing[J]. IEEE Sensors Journal, 2019,19(5):1710–1719.

- [68] YI Y, WAN X, YI J, et al. Polarisation experimental research of passive radar based on digital television signal[J]. Electronics Letters, 2018, 54(6):385–387.
- [69] 丁赤飏, 仇晓兰, 徐丰, 等. 合成孔径雷达三维成像—从层析、阵列到微波视觉[J]. 雷达学报, 2019, 8(6):693–709. (DING Chibiao, QIU Xiaolan, XU Feng, et al. Synthetic aperture radar three-dimensional imaging—from TomoSAR and array InSAR to microwave vision[J]. Journal of Radars, 2019, 8(6):693–709.)
- [70] YHE Y, HE S, ZHANG Y, et al. A forward approach to establish parametric scattering center models for known complex radar targets applied to SAR ATR[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(12):6192–6205.

作者简介:

艾小锋(1983–), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为双/多基地雷达、雷达电子战建模与仿真. email: anxifu2001@163.com.

赵 锋(1978–), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估.

邱梦奇(1995–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估.

徐志明(1995–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为双基地雷达目标特性与特征提取.

肖顺平(1964–), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为雷达极化信息处理及应用、电子信息系统仿真建模评估.

(上接第 105 页)

作者简介:

郑雨晴(1998–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为双/多基地雷达目标探测与定位. email: zhengyuqing@hnu.edu.cn.

艾小锋(1983–), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为双/多基地雷达、雷达电子战建模与仿真.

徐志明(1995–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为双基地雷达目标特性与特征提取.

赵 锋(1978–), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估.

肖顺平(1964–), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为雷达极化信息处理及应用、电子信息系统仿真建模评估.