引用格式：杨建宇, 蒲巍, 毛德庆, 等. 雷达前视高分辨技术 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(5): 777-801.
Yang Jianyu, Pu Wei, Mao Deqing, et al. Radar forward-looking high-resolution technology[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(5): 777-801. (in Chinese)

雷达前视高分辨技术

杨建宇*，蒲　巍，毛德庆，李中余，张　寅，武俊杰，黄钰林

（电子科技大学信息与通信工程学院，成都 611731）

摘要：雷达前视高分辨技术可为运动平台提供正前方区域的精细化角度分辨能力，在精确打击、自主着陆、低空突防等军民领域具有重要应用价值与广阔前景。该文以空时变契合理论为统一框架，系统阐述雷达前视高分辨的物理基础与数学实质，并将前视高分辨技术划分为运动调制、辐射调制、复合调制三大类别，深入分析多普勒波束锐化、双基前视 SAR、扫描波束锐化、电磁涡旋雷达、随机辐射雷达等体制的实现机理与性能差异，形成完整的前视高分辨技术体系。最后，对雷达前视高分辨技术的未来发展方向进行了展望，以期为相关领域的研究人员提供参考。

关键词：雷达前视成像；雷达高分辨成像；前视成像技术；空时变契合
中图分类号：TN95　　**文献标志码：**A　　DOI: 10.12178/1001-0548.2026138

Radar forward-looking high-resolution technology

YANG Jianyu*, PU Wei, MAO Deqing, LI Zhongyu, ZHANG Yin, WU Junjie, and HUANG Yulin

(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Radar forward-looking high-resolution technology enables moving platforms to achieve fine angular resolution in the forward-looking area, offering significant application value and broad prospects in both military and civilian sectors, such as precision strikes, autonomous landing, and low-altitude penetration. By adopting the theory of spatiotemporal variability compatibility as a unified framework, this paper systematically elucidates the physical foundations and mathematical essence of radar forward-looking high-resolution imaging. It categorizes forward-looking high-resolution technologies into three main types: motion modulation, radiation modulation, and composite modulation, and deeply analyzes the implementation mechanisms and performance differences of various systems, including Doppler beam sharpening (DBS), bistatic forward-looking synthetic aperture radar (SAR), scanning beam sharpening (SBS), vortex electromagnetic radar (VER), and stochastic radiation radar (SRR), forming a complete forward-looking high-resolution technology system. Finally, the paper outlines future development directions for radar forward-looking high-resolution technology, aiming to provide a useful reference for researchers in the field.

Key words: radar forward-looking imaging; radar high resolution imaging; forward-looking imaging technology; spatiotemporal variability compatibility

雷达前视高分辨技术是一类面向平台运动正前方区域的高分辨探测技术，通过构建前视区域角度维空时变契合观测模式，突破经典衍射极限制约，实现雷达前视区域波束内邻近目标的角度精细分辨，在精确打击、自主着陆、低空突防等军民领域具有重要价值与广阔应用前景，是新一代高分辨率雷达技术的重要发展方向。

雷达工作波长和天线孔径（即天线尺寸）受多种因素制约，导致前视方向天线波束宽、角分辨率差，难以满足实际应用需求。传统单基地合成孔径雷达（synthetic aperture radar, SAR）能够在侧视、斜视区域角度向具备高分辨能力，本质来源于“波程空变性”契合“滑动时变性”，即空变性来源于电磁波在方位向形成的往返传播波程差；而时

收稿日期：2026−08−07
基金项目：国家自然科学基金（U25B200901, 62301131）
作者简介：杨建宇，博士，教授，主要从事雷达前视成像理论机理、关键方法与系统实现方面的研究。
*通信作者 E-mail: jyyang@uestc.edu.cn

变性则来源于平台带动等相位环在方位向产生的滑动。然而，在前视观测几何下，雷达平台的飞行方向恰好与天线波束指向重合，使得目标相对于雷达的径向速度变化极为缓慢，空间波形无法形成有效滑动，时变性严重缺失，无法实现前视区角度向高分辨。

针对雷达前视高分辨的机理瓶颈与技术难题，本文以空时变契合理论为统一框架，揭示前视高分辨的物理基础与数学实质。在此基础上，系统梳理运动调制、辐射调制与复合调制三类前视高分辨技术路线，分析多普勒波束锐化、双基前视 SAR、扫描波束锐化、电磁涡旋雷达、随机辐射雷达等体制的实现机理与性能差异，形成完整的前视高分辨技术体系。最后，本文对雷达前视高分辨技术的未来发展方向进行了展望，以期为相关领域的研究人员提供参考。

1 雷达前视高分辨的基础与实质

雷达通过发射电磁波，形成目标对电磁波的调制效应，实现目标信息在电磁波上的加载，再通过接收和处理回波，完成被加载信息的解调，提取出目标信息。因此，要实现雷达前视区高分辨成像，提升雷达角度维信息获取能力，就必须探明其调制加载的物理基础，认清其解调提取的数学实质[1]。

1.1 物理基础

以距离向为例，雷达通过发射宽带频率调制的信号实现距离向高分辨。在雷达发射机中，以快时间τ为变量的线性调频时间波形$s_R(\tau)$（指发射信号对应的基带信号，调频带宽为B，信号时宽为w_Γ，$Bw_\Gamma \gg 1$，称大时带积信号），从天线端出发，以光速c向四周传播，在特定的视线方向，转化为以距离为变量的空间波形$b(r;\tau)=ks_R(\tau-r/c)$；其中，空间波形是指雷达信号随空间位置（距离、角度、方位、俯仰）变化形成的幅相分布形态，k代表路–场转换因子，而τ作为参变量，代表传播过程的不同时刻，对应空间波形沿r轴的不同传播位置。

给定时刻$\tau=\tau_i$时，空间波形$b(r;\tau_i)$在r轴方向具有变化的空间频率，该空间波形在r轴方向呈现空间非均匀特征，简称波形空变性，或空变性；当$\tau_j\neq\tau_i$时，不同时刻的$b(r;\tau_j)$与$b(r;\tau_i)$呈现出明显差异，即$b(r;\tau)$在r轴上的空间分布形态具有时间差异性，简称波形时变性，或时变性。

随着时带积Bw_Γ减小，波形内距离分辨能力将相应减弱。极端情况时，调频带宽B减小为0，发射信号由线性调频信号退化为单载频信号，频率调制缺失，不能实现脉冲压缩，距离向高分辨能力也随之丧失。此时，$b(r;\tau)$呈现为均匀条纹状，空变性出现缺失。若空间波形$b(r;\tau)$不沿着r轴方向滑动传播，雷达就不能接收到时间波形$k_Rs_R(\tau-\tau_T)$，脉冲压缩和距离向高分辨也就无从谈起，此时，$b(r;\tau)$将不随快时间τ变化，时变性出现缺失。因此，空间波形$b(r;\tau)$空变性与时变性的契合，是距离向高分辨的物理基础，两者皆需，缺一不可，弱则不佳。

以角度向高分辨为例，扫描波束锐化（scanning beam sharpening, SBS）通过将波束扫描过程建模为矢量类卷积模型，再利用矢量类卷积反演方法，实现角度向高分辨。从物理基础上看，雷达波束沿角度向形成的空变的辐射条纹图$a(\theta;t)$，构造出了空间角度向高分辨所需的空变性，随着雷达空间辐射条纹的转动，不同时刻的空间辐射波形也产生差异，即当$t_j\neq t_i$时，则$a(\theta;t_j)\neq a(\theta;t_i)$，构造出了空间角度向高分辨所需的时变性。

涡旋电磁雷达（vortex electromagnetic radar, VER）通过对传统电磁波加载轨道角动量调制，使空间电磁波的相位波前呈现出螺旋形结构，利用逆投影算法实现角度向高分辨。从物理基础上讲，VER 也是利用了其辐射空间波形的空变性和时变性，实现沿角度向的高分辨成像。该雷达体制的空变性由涡旋形态的空间辐射波形产生，其时变性由沿时间不同模态的变化产生。

随机辐射雷达（stochastic radiation radar, SRR）通过对天线口面场分布的随机激励，产生形状随机的天线波束，再利用逆投影等算法实现角度向高分辨。SRR 也利用了其辐射空间波形的空变性和时变性，其空变性是由瞬态辐射激励产生，其时变性是由天线口面场激励沿时间的变化产生。

综上所述，对比角度向高分辨的上述不同系统体制，可以看出，虽然它们的技术原理看似不同，但其实它们都具有相同的物理基础：在所需分辨方向上，空间波形都同时形成了空变性和时变性。无论是距离向高分辨，还是角度向高分辨，其物理基础都是空间波形的空变性与时变性的契合。后续也将结合前视 SAR 系统空间波形的空变性和时变性，对雷达前视高分辨成像技术性能进行论述。

1.2 数学实质

雷达波束内角分辨的数学实质在于构建如下观

测方程：

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{N} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{Y}$表示回波矢量；$\boldsymbol{X}$为目标矢量，用以描述目标散射率的空间分布状况；$\boldsymbol{N}$为噪声与干扰矢量；$\boldsymbol{A}$为观测矩阵，由系统体制及相应参数所决定，其第 i 行对应于离散化后的空间波形$a(\theta;t_i)$，而θ为角度变量。

如图 1 左侧所示，式 (1) 观测方程是雷达发射电磁波、目标散射，雷达再接收电磁波过程的数学模型，目标散射实现了目标对电磁波的调制作用，在回波中加载了目标信息。而求解式 (1)，则相当于对回波矢量 $\boldsymbol{Y}$ 执行解调操作，从而提取出角度维的目标信息。

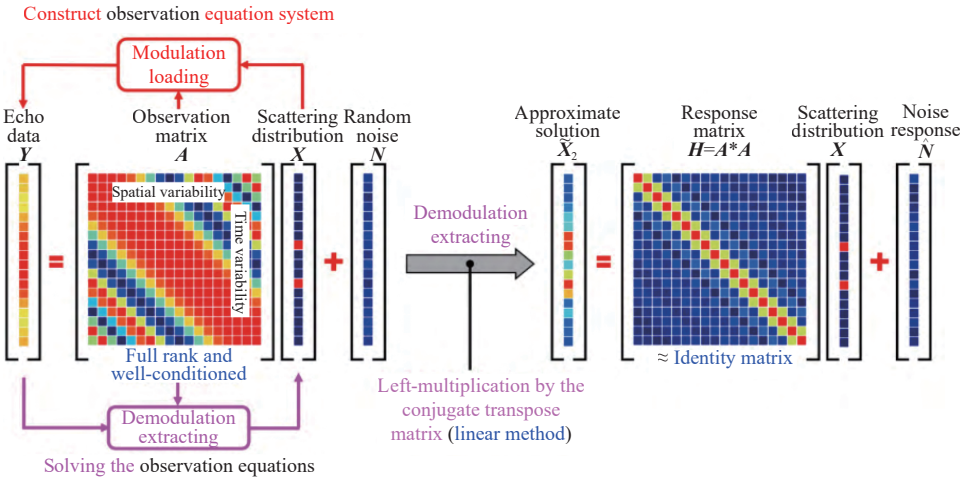


图 1　空时变性与观测方程组的构建和求解

不同的雷达波束内角分辨体制因观测方式不同，观测矩阵的数学特性有所区别，导致求解式 (1) 观测方程所采用的具体数学方法亦有区别。

在雷达波束内角分辨问题中，式 (1) 通常属于大规模代数方程组，在工程实践中难以借助直接矩阵求逆获得精确解 $\boldsymbol{X}$。若欲实现角度向高分辨，只能寻求快速数值计算方法，以获取近似解$\tilde{\boldsymbol{X}}$。

但近似解$\tilde{\boldsymbol{X}}$的精度受制于观测矩阵$\boldsymbol{A}$的特性以及所采用的求解算法。举例来说，若观测矩阵满秩却病态，则需借助非线性处理手段才能获得足够精确的近似解；而若矩阵满秩且良态，则线性处理方法即可提供满足精度要求的近似结果。

对于侧视 SAR 而言，观测矩阵$\boldsymbol{A}$的每一行向量均为具有空变特性的空间波形，具体表现为受天线方向图调制的线性调频函数。同时，各行向量之间呈现逐行平移的特征，对应着空间波形的滑动时变现象，如图 1 左侧所示。侧视 SAR 中采用的匹配滤波处理，等价于在式 (1) 两侧左乘共轭转置矩阵$\boldsymbol{A}^*$，从而获取精度较高的近似解：

$$\begin{aligned}\overline{\boldsymbol{X}}_2&=\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{A}^*(\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{N})=\\&\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{N}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{N}\end{aligned} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{A}$表示匹配滤波响应矩阵，其按序排列的行向量即为逐行平移空间波形的自相关函数。

对于 SBS 等体制，借助可用先验信息，并采用超线性卷积反演方法，通过优化迭代，可获得近似解，该过程可近似表达为：

$$\hat{\boldsymbol{X}}^{\gamma}=\boldsymbol{H}^{\gamma}(\boldsymbol{A},\boldsymbol{Y},\eta)\boldsymbol{X}+\boldsymbol{H}^{\gamma}(\boldsymbol{A},\boldsymbol{Y},\eta)\boldsymbol{N} \tag{3}$$

式中，γ为迭代次数；$\boldsymbol{H}^{\gamma}(\boldsymbol{A},\boldsymbol{Y},\eta)$表示随迭代进程变化的响应矩阵，其作用类似于$\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{A}$，且与观测矩阵$\boldsymbol{A}$、回波矢量$\boldsymbol{Y}$以及超线性求解方法的参数$\eta$密切相关。

对于不同的系统体制和观测矩阵，求解式 (1) 的数学方法不同，其分辨能力也不同。要解决波束内角分辨问题，不仅需要通过系统体制设计，在物理层面构建兼备空变与时变特性的观测模式，建立起可解的观测方程组，而且必须依据观测矩阵的属性，在数学层面选取恰当的处理方法，对观测方程组进行优化求解，方能获得满足精度要求的近似解，从而将角间隔小于波束宽度的邻近目标在角度向区分开。

1.3　分辨体制

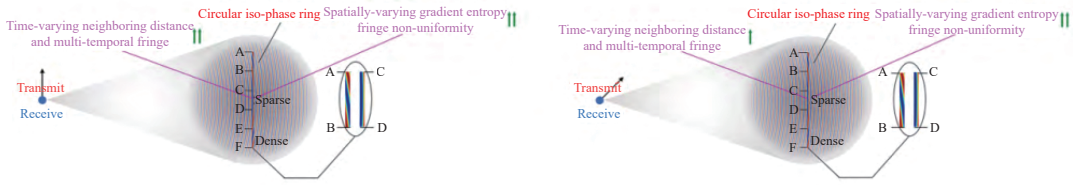
根据 1.1 节分析，要实现雷达波束内角分辨，必要条件是空间波形须具备空时变性。面向雷达前视高分辨应用需求，依据空时变性的来源差异，可

以将双基前视 SAR、SBS 等体制分为运动因素产生空时变的雷达前视高分辨体制、辐射因素产生空时变的雷达前视高分辨体制、复合因素产生空时变的雷达前视高分辨体制三大类别。

1.3.1 运动因素产生空时变的雷达前视高分辨体制

SAR 是实现角度向高分辨的一种重要手段，它的空变性源自空间波形沿方位向的非均匀分布，时变性源自平台带动空间波形沿方位向的滑动，其空时变性组合属于“波程空变性 + 滑动时变性”类别。

图 2a 所示单基侧视 SAR 中，雷达平台向前运动时，波束指向正侧视方向。空间波形 AB 与 CD 两段的条纹密度明显不同，空变性强。雷达平台运动时，AF 段观察到的衍射条纹变化明显，时变性强。

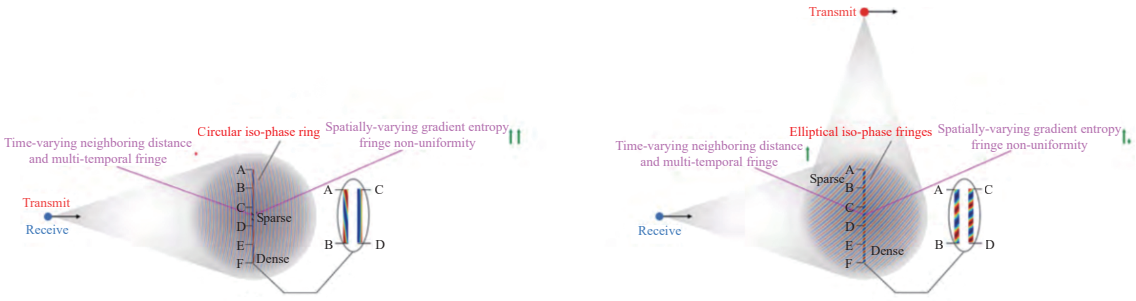


a. 单基侧视SAR　　b. 单基斜视SAR

图 2　空变性与时变性对比

图 2b 所示单基斜视 SAR 中，空变性与单基侧视 SAR 相同。但斜视照射导致平台运动的方位向投影速度减小，空间波形的时变性减小，角度向分辨能力下降。

单基斜视 SAR 的极端情况就是单基前视 SAR，如图 3a 为单基前视 SAR，也是单基斜视 SAR 的极端情况。虽然空变性仍然与单基侧视 SAR 相同，但平台运动的方位向投影速度归零，空间波形时变性消失，空时变契合度归零，导致单基 SAR 不能对前视区形成角度向分辨能力。



a. 单基前视SAR　　b. 双基前视SAR

图 3　空变性与时变性对比

如需对前视区域实现角度向高分辨，关键在于恢复衍射条纹沿方位向的滑动效应，从而重新生成必要的时变特性。为此，可采用收发分置方案，将雷达发射机和接收机分别安装于不同平台之上，如图 3b 所示，由此构成双基地前视 SAR 系统架构[2-4]。在收发分置的空间几何布局下，单基前视 SAR 的圆形等相位波前演变为椭圆形等相位波前，致使方位线 AF 内外两侧的条纹密度出现显著差异。当平台运动时，方位向的衍射条纹便会随时间推移而发生动态变化，从而有效引入时变性；同时，方位向的衍射条纹仍保留较强的空变属性，对比图 3b 中 AB 段与 EF 段的条纹疏密程度即可清楚观察到这一特点。由此可见，收发分置策略在构建时变性的过程中，并未显著削弱空变性，反而大幅提高了空时变契合度，进而使双基前视 SAR 在接收平台的前视方向上获得了角度向高分辨能力。借助空时变契合度的定量测度，不仅可以深刻揭示角度向高分辨的内在机理，还能为新体制和新方法的探索提供理论指引。

综上可知，单基斜/侧视 SAR 可实现运动平台斜/侧视向的二维高分辨成像，但在正前视区域受多普勒频率对称、多普勒带宽窄等特点影响，损失了正前视区方位高分辨成像所需的时变性，无法实现正前视区目标的方位高分辨成像。双基前视

SAR，通过平台分置、收发同步和协同运动补偿，补全了接收平台正前视方位高分辨所需的时变性，能够实现接收平台前视区二维米级高分辨成像。

1.3.2　辐射因素产生空时变的雷达前视高分辨体制

利用辐射因素产生空时变性的雷达体制，其核心特征在于通过设计天线口面的激励分布，主动控制不同角度方向的电磁辐射强度与相位，以此构建空间波形的角度维空变特性；再借助机械扫描或电控扫描等时变激励方式，使空间波形随时间变化，从而形成角度维的时变特性。由此，空变性与时变性在角度域上实现有效匹配，其组合模式可概括为“辐射空变性＋激励时变性”。这类体制的优势在于，空变性和时变性均由雷达自身主动调控，不再依赖平台的平移运动，也无需借助传播路径的波程差，因此可适用于静止或运动平台，且不受观测视向角的限制，具备全向超分辨潜力。典型代表包括 VER、SRR 和 SBS。

1）电磁涡旋雷达 VER

VER 通过发射携带轨道角动量的涡旋电磁波[5]，在距天线口径为 R 的观测平面上，形成沿方位角和俯仰角呈现螺旋状相位分布的辐射场，赋予空间波形空变性，同时借助波前方向的连续旋转构造出时变特性。基于这种空时变组合，可建立可解的观测方程组。尽管 VER 在远距离传输时面临波束中心凹陷、涡旋模式纯度退化等工程问题，但在近程探测等应用场景中仍具有实用价值。

2）随机辐射雷达 SRR

SRR 采用对天线阵面施加随机幅度、相位或频率的激励方式，在方位–俯仰二维角度上生成随机起伏的辐射场，实现空变性；并通过激励模式的快速随机切换，使辐射场随时间动态变化，获得时变性。结合已知的辐射场分布和接收回波，可构建可解的观测方程。虽然该体制形成的主波束增益低于均匀激励下的常规波束，导致回波信噪比较低，但适用于近程探测等场景。SRR 通常采用反演求逆类算法，对目标在方位角和俯仰角上的二维散射系数分布进行估计，进而实现角度向高分辨[6]。

3）扫描波束锐化雷达 SBS

SBS 利用天线方向图在角度维的自然非均匀性形成空变性，并通过电控波束扫描或机械转动改变波束指向，产生随时间变化的角度采样，即时变性。基于已知的天线方向图信息和回波测量数据，同样可构造出可解的观测方程组。由于 SBS 能够形成高增益主波束，其回波信噪比明显优于 VER 和 SRR，适合远程探测，在场面监视、地形测绘、编队目标分辨及前视成像等领域具有重要应用价值。考虑到 SBS 的空时变契合度弱于侧视或斜视 SAR，通常需要采用反演求逆算法来重建目标角度维散射系数分布，以实现波束内超分辨。此外，SBS 同样可装备于运动平台，获取前视区域的高分辨率图像，从而弥补单基 SAR 无法前视成像的固有缺陷。

综上可知，电磁涡旋雷达通过构建涡旋形状的辐射调制，随机辐射雷达通过构建随机空时变特性的辐射调制，均可不依赖平台和目标的相对运动，具备全视向成像能力，但由于破坏了传统雷达波束在空间中的相参积累能力，其仅适用于近场成像感知。扫描波束锐化雷达，通过波束扫描构建了角度维高分辨成像所需的空变性和时变性。但上述方法，在成像处理过程中，均须解决低秩观测矩阵引起的噪声放大问题，因此运算复杂度偏高。

1.3.3　复合因素产生空时变的雷达前视高分辨体制

前述两类空时变组合模式既可独立运用，也可加以融合，形成复合型体制，从而获得更强的角度向高分辨能力。以机载雷达为例，将“波程空变性＋滑动时变性”和“辐射空变性＋激励时变性”融合，即 SBS 与 SAR 体制相结合，可发展出 SBS+系统体制。该体制不仅具备 SAR 在侧视、斜视方向的高分辨成像能力，还能兼得 SBS 在前视区域的波束角分辨能力，实现优势互补。

综上所述，为了比较上述不同调制因素和技术体制的前视成像性能，表 1 中对比了运动调制雷达前视高分辨技术、辐射调制雷达前视高分辨技术和复合调制雷达前视高分辨成像技术的技术特点。

表 1　不同调制因素和技术体制前视成像性能对比

调制因素	技术体制	前视成像技术特点
运动调制雷达前视高分辨技术	单基大斜前视DBS	可实现大斜前视区（通常15°～60°范围）高倍率波束锐化比，但无法实现正前视区角度分辨率的提升
	单基大斜前视SAR	可实现大斜前视区（可达5°）米级高分辨成像，但无法实现正前视区方位分辨率的提升
	双基前视SAR	可实现接收站正前视区米级高分辨成像
辐射调制雷达前视高分辨技术	和差波束雷达前视高分辨	成像帧率高，可提升雷达正前视孤立目标角度维分辨率
	电磁涡旋雷达前视高分辨	可提升雷达平台全向近距目标角度维凝视分辨率

表 1 （续）

调制因素	技术体制	前视成像技术特点
辐射调制雷达前视高分辨技术	随机辐射雷达前视高分辨	可提升雷达平台全向近距目标角度维凝视分辨率
	扫描波束雷达前视高分辨	可提升雷达平台全向目标角度维分辨率
	波前调频雷达前视高分辨	可提升雷达平台全向近距目标角度维分辨率
复合调制雷达前视高分辨成像技术	复合调制雷达前视高分辨	充分利用辐射和运动调制信息，可实现雷达平台全角度向分辨率大幅提升

2 运动调制雷达前视高分辨技术

雷达平台运动会引起不同角度向目标传播产生不同的波程差，即波程空变性，随平台运动该波程差也产生快速变化，即滑动时变性。因此，平台运动可使雷达前视方向空间波形具备高分辨成像所需的空变性和时变性，多普勒波束锐化成像、单基大斜前视 SAR 成像、双基前视 SAR 成像等技术，是运动调制产生前视所需高分辨成像的代表性成果。

2.1 多普勒波束锐化大斜前视成像技术

多普勒波束锐化（Doppler beam sharpening, DBS）技术，也被称为非聚焦 SAR 成像技术，它利用大斜前视区不同方位向目标多普勒质心差异，实现目标方位分辨率的提升。雷达完成大斜前视方向成像过程中，通过脉冲压缩实现距离向的高分辨，再通过运动补偿实现回波的徙动校正，最后通过多普勒质心的投影实现方位分辨率的提升。该技术原理简单，计算复杂度较低，在机载、弹载等应用平台获得了广泛应用。

DBS 技术于 1951 年由 Carl Wiley 首次提出，其于 1952 年将该技术命名为 DOUSER（Doppler unbeamed search radar）[7]，并公布了该技术的数学原理和机载平台实现思路[8]。1952 年，Sherwin 和伊利诺伊大学团队也同步提出了提高雷达角度分辨率的方法[9]。1980 年后，DBS 技术进入工程应用与技术优化阶段，在多个版本的《雷达手册》中详细介绍了多款雷达系统均具备了 DBS 技术能力[10]。1998 年，机载雷达导论中给出了该技术的机理模型、多普勒质心计算、波束锐化比等核心过程，并给出了典型的机载飞行成像结果，如图 4 所示[11]。图 4 中 DBS 成像技术可大幅提升大斜前视区的角度维分辨能力，但在正前视区域存在探测盲区。2018 年，英国伯明翰大学 Daniel 团队将该技术应用于太赫兹雷达系统，验证了 DBS 技术对太赫兹雷达系统成像分辨率的提升[12]。2022 年，代尔夫特理工大学团队在 MIMO（multiple-input multiple-output）雷达系统中，采用多普勒质心模糊判决，实现了大斜前视区的高分辨成像[13]。2024 年，德国慕尼黑工业大学团队采用该技术实现对目标的三维高分辨成像[14]。

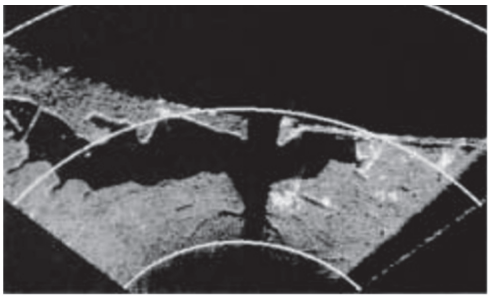
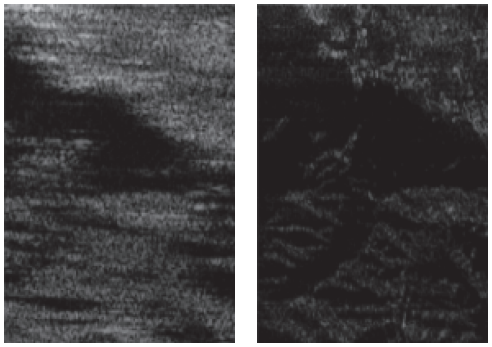


图 4 《机载雷达导论》中典型 DBS 成像结果

在国内，1988 年北京航空航天大学周荫清教授团队详细分析了 DBS 成像技术的原理，并给出了载机前方±15°～60°方位范围内的仿真成像结果[15]。1991 年，中国电科第 14 研究所张直中院士团队详细探讨了 DBS 理论和实际应用中的关键问题[16]。1997 年，电子科技大学朱万清教授团队进一步讨论了 DBS 技术在工程应用中的若干关键难题[17]。2000 年，北京航空航天大学毛士艺教授团队给出了机载雷达 DBS 实时成像结果[18]。2007 年，电子科技大学杨建宇教授、皮亦鸣教授团队给出了 DBS 技术的完整处理流程，并给出了采用谱估计方法实现超分辨率 DBS 成像的可能[19]。2011 年，北京理工大学龙腾院士团队提出了一种基于图像最小熵的多普勒质心估计方法，提升了 DBS 成像技术的成像质量[20]。2015 年，西安电子科技大学陈洪猛团队提出了一种孔径外推 DBS 超分辨成像方法，验证了超分辨谱估计方法对 DBS 成像性能的提升[21]。2018 年，电子科技大学杨建宇教授团队采用迭代自适应谱估计方法，验证了 DBS 超分辨成像技术在实测数据下的成像性能[22]，如图 5 所示。与图 5a 所示的实波束成像结果相比，图 5b 所示的 DBS 成像结果能够准确恢复大斜前视区域目标的纹理特征。2019 年，文献 [23] 提出了一种采用机载雷达正前视杂波脊实现 DBS 成像运动参数估计的方法，并完成了实测数据的 DBS 成像验证。



a. 实波束成像结果　　b. DBS成像结果

图 5　实波束成像结果与 DBS 成像结果对比[22]

2.2　单基大斜前视 SAR 成像技术

单基大斜前视 SAR，是指天线波束指向显著偏离正侧视方向，向平台飞行斜前方区域进行观测的 SAR 工作模式，该体制在导弹末制导、无人机隐蔽侦察等重点领域具有不可替代的战略应用价值。然而，随着波束大角度指向斜前视区，雷达回波面临极其严重的距离走动，目标多普勒中心和方位调频率表现出极强的方位空变性，对高分辨成像产生了极大限制。近年来，国内外学者针对单基大斜前视 SAR 的信号处理核心瓶颈，在精确斜距模型构建、空变性解耦合算法以及复杂机动轨迹补偿等方向取得了突破性进展。

国外在大斜视 SAR 成像领域的基础理论研究起步较早，主要集中于解决大斜视几何带来的二维耦合与空变性难题。早在 1994 年，德国宇航中心就提出了一种集成运动补偿的扩展 CS 算法，通过引入三次相位项，在机载 SAR 实测中有效处理了 30°斜视角的数据[24]。随后，加拿大不列颠哥伦比亚大学等机构进一步提出了非线性 CS（chirp scaling）方法，通过在发射脉冲或频域滤波中引入非线性调频分量，消除了二次距离压缩的距离依赖性[25]。针对大角度波束偏置带来的斜视传输函数距离依赖问题，意大利那不勒斯费德里科二世大学利用稳相原理系统推导了斜视几何传输函数，提出采用相位乘法配合修正的分数阶傅里叶变换进行距离依赖性补偿，有效扩展了宽角 SAR 算法在大斜视条件下的聚焦处理能力[26]。针对高斜视聚束模式 SAR，文献 [27] 通过修改 Stolt 映射改进了波数域算法，避免了耗时的插值过程，并利用高空长航时无人机的仿真点目标数据验证了其在远距离处方位分辨率的显著提升。此外，针对星载大斜视 SAR 的特殊性，文献 [28] 系统推导了多普勒中心与平台姿态的解析关系，明确了测绘带宽与方位带宽在大斜视条件下的基础极限。

在前斜视工作模式下，平台的不规则运动会引发严重的空变残余误差，高精度的运动补偿与高效插值是实现精确聚焦的关键。德国莱布尼茨汉诺威大学针对大斜视聚束 SAR 提出了一种二阶运动补偿算法，指出精确的距离相关运动误差补偿必须在垂直于波前传播的斜视方位方向上进行计算与消除[29]。针对大斜视距离迁移算法中自聚焦技术因点扩散函数斜视展宽而失效的问题，韩国釜庆大学与浦项科技大学提出了一种高效二维插值技术，在大气湍流导致的实际机动轨迹下成功实现了 PSF（point spread function）的精确聚焦[30]。

当面对极端非线性轨迹与大范围斜视角方位剧烈波动时，时域精确聚焦与反演成为近年来的研究热点。意大利国家研究委员会及那不勒斯帕特诺普大学系统研究了大气湍流干扰下机载 SAR 斜视角随方位向强烈变异的聚焦难题，提出了一种基于目标依赖（target-dependent）观测斜视角的时域后向投影聚焦算法，极大提升了多时序大斜视图像的干涉相干性[31]，如图 6 所示。在多星或多波束对地观测任务中，大斜视几何的引入也为多维形变反演开辟了新途径。德国宇航中心通过数学框架精细建模了大气边界层对流层延迟的空间相关性，证明了同步大斜视全测绘带差分测量能够在很大程度上消除对流层噪声[32]。在大斜视场景下的地面运动目标成像理论方面，文献 [33] 利用子孔径相位历史数据的幂级数展开，揭示了斜视几何引入的独特交叉项对目标散焦轮廓、位置偏移及自干扰边缘效应的影响机理。

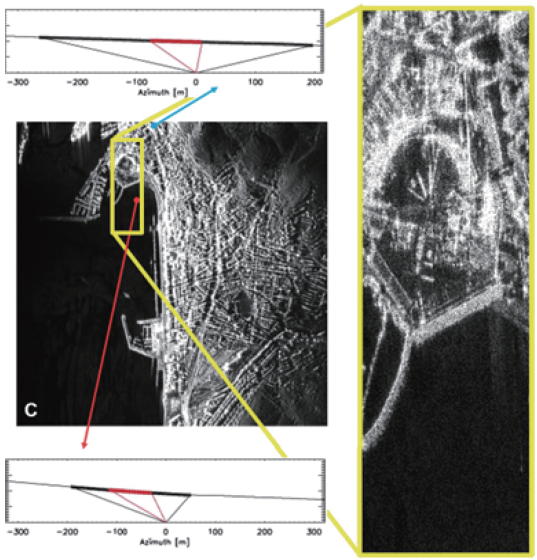


图 6　后向投影聚焦算法 SAR 成像结果[25]

与此同时，国内学者在相关领域也开展了深入探索。高精度的斜距模型是实现高分辨大斜视成像

的前提。针对中轨大斜视 SAR 空间几何复杂的特点，中国科学院电子学研究所提出了高级双曲线斜距方程，在长积分时间下获得了比传统双曲线模型更高的聚焦精度[34]；北京航空航天大学则针对超高分辨星载 SAR 引入等效雷达加速度，建立了修正等效斜距模型，为高阶成像算法奠定了基础[35]。上海交通大学采用非线性频率变标算法处理大斜视聚束 SAR 数据，通过残余视频相位去除与高阶距离–方位耦合处理，实现了大测绘带成像[36]。

在距离方位信号二维解耦以及方位空变处理方面，非线性变标（non-linear chirp scaling, NLCS）算法被广泛应用并不断演进。国防科技大学和南京理工大学相继提出了扩展 NLCS 算法，通过在二维频域执行块二次距离压缩补偿残余距离弯曲与高阶耦合项，并结合修正的方位 NLCS 均衡调频率，实现了弹载及高分辨大斜视数据的有效聚焦[37-38]。然而，传统 NLCS 算法的有效方位聚焦深度受限。为此，清华大学等团队提出了一种基于新距离–多普勒域插值和微扰函数的 NLCS 改进算法，消除了对中心斜距面的依赖，实现了地平面目标的精确聚焦[39]。电子科技大学雷达探测与成像团队针对高分辨大斜视条件下距离徙动和多普勒参数空变问题，将 Keystone 变换与方位扩展 NLCS 相结合，均衡空变多普勒中心和调频率，实现了大斜视 SAR 高分辨成像[40]。该团队进一步利用级数反演法推导二维点目标频谱，并提出二维频率解耦方法，对距离徙动及多普勒调制的距离、方位二维空变进行联合补偿，实现了复杂曲线轨迹条件下的大斜视 SAR 成像[41]。在此基础上，针对实际机动平台轨迹参数难以准确获取的问题，该团队进一步通过距离微扰、非线性 CS 与运动参数优化估计相结合，实现了空间空变距离徙动和方位调制的自适应补偿[42]。

此外，在实际应用中，机动平台（如导弹、无人机）的非匀速直线运动会急剧增加大斜视成像的复杂性。北京理工大学采用子孔径方法，在方位频域进行方位依赖的距离弯曲校正与聚焦参数均衡，利用 70°斜视角、1 m 分辨率的实测 SAR 数据验证了其机动平台成像能力[43]，如图 7 所示。高分辨率下，图 7 中所示的桥梁、大型建筑等目标清晰可辨。西安电子科技大学针对无人机高斜视平台，指出了波数域（Omega-K）成像中相位误差被 Stolt 映射放大的机理，并提出了斜视相位梯度自聚焦算法，通过实测数据证明了其在严重运动误差下的鲁棒性[44]。针对更为复杂的三维加速度高斜视场景，电子科技大学采用泰勒级数展开获取逼近的三维加速斜距模型，为满足末制导地形匹配的工程需求，还详细推导了斜距地距投影算法，通过实测结果充分验证了该算法在非线性飞行轨迹下的高精度成像优势[45]。

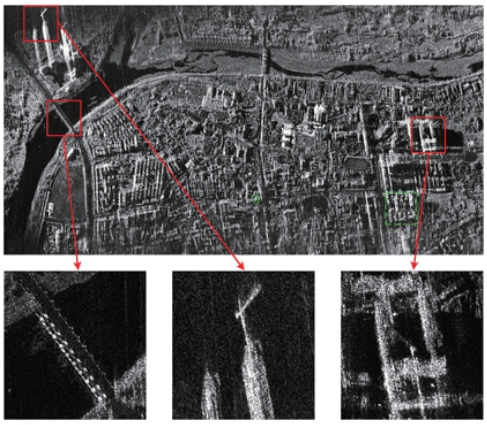


图 7 子孔径方法单基大斜视 SAR 成像结果[43]

2.3 双基前视 SAR 成像技术[46]

与单基体制相比，双基前视 SAR 将雷达发射机与接收机分置于不同平台，彻底打破了传统单基 SAR 无法前视成像的物理局限，能够对前视区域实现高分辨成像。然而，收发分置的几何构型引入了更为严重的距离–方位耦合、空时变特性以及成像结果的空间畸变，给高精度成像带来了严峻挑战。近年来，国内外学者围绕双基前视构型优化、成像算法等方面开展了系统性的研究。

国外方面，美国托永研究公司利用时延梯度与多普勒频率梯度算子，建立了双基 SAR 二维空间分辨率解析模型，并通过等分辨率等值线图直观揭示了接收机在前视多普勒分辨率中的主导作用[47]。瑞典布莱金厄理工学院的理论分析表明，通过联合优化双基基线位置与收发天线波束宽度，可对接收站雷达前视区域实现相干成像并有效抑制几何模糊[48]。在系统构型方面，面向星载发射、机载接收体制下的全球连续覆盖需求，意大利坎帕尼亚大学提出了一种混合星座设计方法，建立了空间轨道约束与前视覆盖扇区之间的映射关系[49]。

在成像算法研究中，为解决双基前视构型引入的多普勒频移及二维耦合，德国锡根大学基于双基点参考频谱，改进了传统的距离–多普勒算法，在二维频域引入参考斜距，有效消除了二次距离压缩中的空变分量[50]。对于收发平台速度矢量平移不变的特殊构型，德国弗劳恩霍夫高频物理与雷达技术研

究所（Fraunhofer, FHR）开发了双基距离走动算法，通过泰勒级数展开计算数值相位校正及重采样函数，并在其机载 X 波段 SAR 系统中得到了有效验证[51]；该机构还利用 TerraSAR-X 卫星作为空间辐射源、PAMIR 机载雷达作为后视接收机（等效验证前视几何），完成了星机双基前视 SAR 外场飞行试验，实证了该体制在飞机低能见度着陆导航中的巨大潜力[52]，如图 8 所示。图 8 中能够准确地辨识前视区地物信息和道路信息。针对前视双基聚束模式，韩国科学技术院通过等效旋转和平移接收机轨迹将其转化为侧视拓扑，并基于稳相原理修正了匹配滤波器与 Stolt 插值操作，成功将高精度的波数域算法拓展至前视双基应用中[53]。

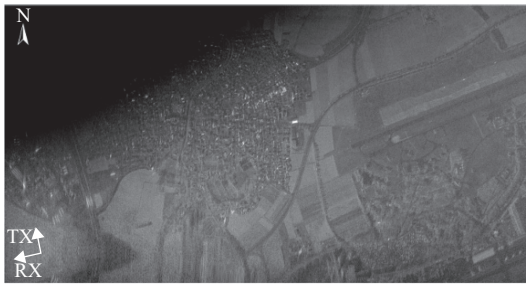


图 8　FHR 等效验证前视成像结果[52]

在构型设计方面，电子科技大学雷达探测与成像团队针对星机双多基 SAR 的前视成像需求，提出了基于波数谱分布的几何构型优化设计方案[54]，使系统能在极短的观测时间内获取聚焦良好、能量均衡的高质量前视图像，并完成了国内首次星机双基前视 SAR 成像试验[1]，如图 9 所示。图 9 中能够辨识不同区域的农田、道路和山区等区域。电子科技大学还自主开发了双基前视 SAR 综合仿真软件，集成了回波生成、成像处理和性能评估模块，大幅提升了系统论证与数据分析效率[55]。西安电子科技大学则剖析了任意几何配置下机载、弹载及混合平台双基前视 SAR 的核心成像参数空间变异规律，指出级数反演法在双基频谱精确表征中具有最广泛的构型适应性[56]。

在成像算法方面，中国科学院大学针对固定发射机与前视机载接收机这一典型构型，推导了二维分辨率解析表征，并发展了相应的距离−多普勒（range Doppler, RD）改进算法[57]。针对星机前视双基急剧增大的斜距非线性弯曲，电子科技大学提出了一种修正的两步距离弯曲校正方法，实现了强空变下的精确补偿[58]。针对弹载前视双基场景，南京理工大学提出将线性距离走动校正与方位扩展非线性 CS 结合，有效消除了调频率的方位依赖性[59]；同时，该校还针对双平台非等速场景，利用二阶 Keystone 变换与椭圆模型修正的 NLCS 算法，显著改善了边缘目标的聚焦质量[60]。

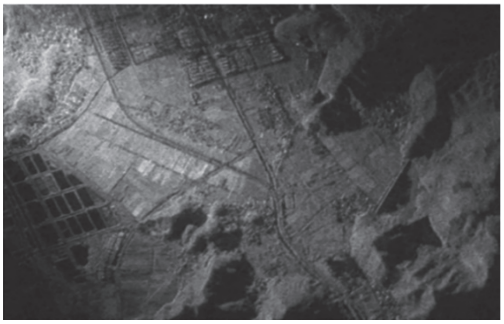


图 9　电子科技大学星机前视 SAR 成像试验[1]

针对高机动、高速复合场景下的参数强空变难题，华侨大学利用切比雪夫正交分解重构了非停走斜距方程，提出了双向重采样成像算法，有效解决了高机动速度与加速度引发的二维空间变异问题[61]。为了解决高速机动平台引发的脉冲传播期内平台高速位移问题，电子科技大学通过谱变换技术，配合基于隐函数定理推导出的闭式重聚焦滤波器，使极坐标格式算法的聚焦质量和运算效率获得了成倍提升[62]。此外，西安电子科技大学提出了基于通用频域方位信号建模的快速成像框架，在 RD 域推导出了保持冲激响应函数正交性的改进 NLCS 算法，极大扩展了有效测绘场景的边界[63]。2025 年哈尔滨工业大学提出了最小熵双基前视 SAR 二阶差分运动补偿方法，实现了高质量的二维聚集成像[64]。同时，电子科技大学在运动补偿成像方法[65-66]、智能化成像方法[67-68]、多基协同成像方法[69] 和散射利用成像方法[70] 等方面取得了突出进展。

在时域成像算法方面，后向投影（back projection, BP）算法是代表性算法，但其计算量较大。针对该问题，以及 BP 算法在非对称轨迹下的旁瓣畸变问题，北京理工大学在全空间非对称几何下推导出跨距离（cross-range）方向点扩散函数旁瓣的闭式方程，并通过仿真与实测数据进行了精确验证[71]。为了从根本上降低时域算法的计算复杂度，电子科技大学雷达探测与成像团队针对双基前视及高速机动平台构型，提出了一种基于波数域频谱拼接的高效快速后向投影算法[72]，有效避免了复杂的坐标系投影变换，在显著提升运算效率的同时保证了双基前视高精度成像。与此同时，西安电子科技大学针对任意几何和复杂构型下的双基前视 SAR 聚焦，

发展了基于直角坐标系的快速分解后向投影算法[73]。该方法采用两步频谱校正抑制频谱混叠，并进一步集成了数据驱动运动补偿技术，构建了高度稳健的直角坐标系快速时域处理框架。

3 辐射调制雷达前视分辨技术

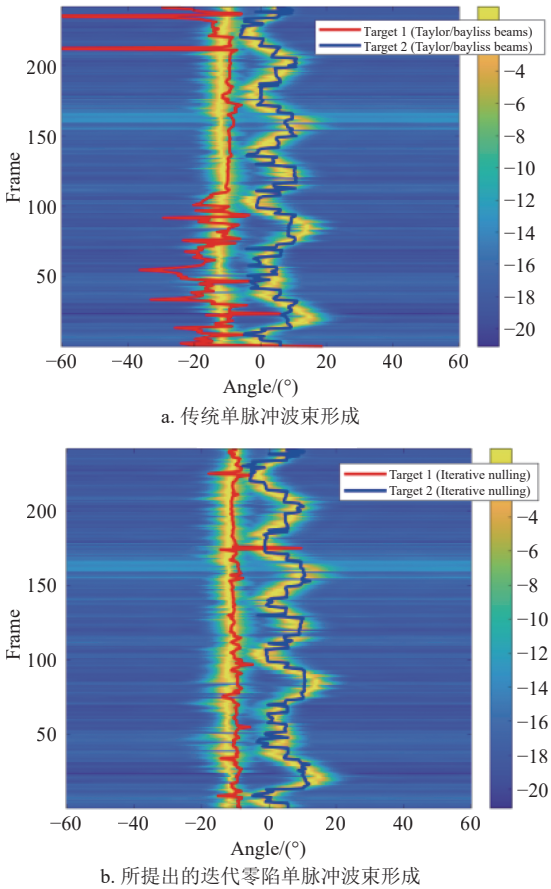
辐射调制雷达，是指通过雷达辐射空间波形的变化，产生辐射方向图的空变性和阵元激励的时变性，为角度向高分辨奠定了物理基础。其中，和差波束雷达、电磁涡旋雷达、随机辐射雷达、扫描波束雷达是辐射调制雷达前视分辨技术的典型代表。

3.1 和差波束雷达前视高分辨技术[74]

国外基于单脉冲技术的成像研究起步较早，总体呈现出从点目标检测到宽带成像，再到结构化建模与复杂运动处理的逐步演进路径。

早期研究主要集中于点目标检测与分辨。1997 年，纽约州立大学 Soumekh 等首次将单脉冲与沿轨 SAR 结合，实现前视运动目标检测与初步成像[75]。随后，Farina 等基于和通道方向图构建最大似然模型，实现单波束内多目标分辨，推动了扫描体制下的单脉冲成像研究发展[76]。2004 年，瑞典国防研究局 Axelsson 等进一步分析单脉冲与多普勒联合处理性能，验证了其在方位校正中的优势[77]。在此基础上，研究重点转向宽带条件下的参数估计问题。2005 年，康涅狄格大学 Zhang Xin 等针对宽带引起的能量扩散，提出多距离单元联合处理方法，提高了角度估计精度[78]。2007 年，比萨大学 Greco 等融合和差通道信息，实现目标复幅度、多普勒频率及角度的联合估计，为多参数建模奠定了理论基础[79]。

随着应用需求提升，目标建模由点目标向扩展目标发展。2012 年，德国 FGAN-FHR 研究所 Nickel 等提出广义单脉冲方法，实现扩展目标中心与延展方向估计[80]，并于 2013 年拓展至混合目标模型，增强了复杂场景适应能力[81]。与此同时，系统实现与三维成像能力同步推进。2016 年，新加坡国立大学 Huang Guanlong 等设计宽带双极化双单脉冲阵列天线并实现工程化制造[82]；2019 年，美国海军研究实验室 Raj 等通过多视角融合实现扫描体制下 ISAR（inverse synthetic aperture radar）三维成像[83]。近年来，关于单脉冲技术的研究进一步深入。2023 年，Rezaei 等针对传统单脉冲方法难以分辨波束内紧邻目标的问题，提出闭式解角度估计方法，在单快拍条件下实现未分辨目标的精确角度恢复[84]；2025 年，釜庆大学 Park 等基于 MIMO 系统，提出一种自适应单脉冲波束形成方法，有效提升了单脉冲体制在复杂场景中的分辨能力与鲁棒性[85]，结果如图 10 所示。



a. 传统单脉冲波束形成

b. 所提出的迭代零陷单脉冲波束形成

图 10 角度跟踪结果

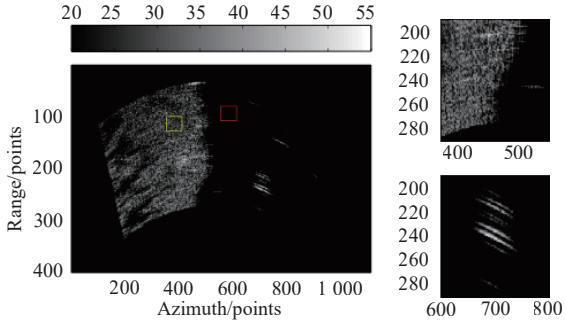
国内单脉冲雷达前视成像研究起步略晚于国外，但发展迅速，已形成从分辨到三维成像，再到多通道与复杂场景处理逐步演进的技术体系。

早期研究主要集中于超分辨建模与三维成像基础。1999 年，西安电子科技大学马长征等率先将超分辨方法引入单脉冲三维成像，有效提升成像质量并抑制角闪烁[86]。随后，针对舰船目标运动，进一步提出基于解调频的多普勒分离方法，实现了复杂目标的稳定三维成像[87]。2003 年，西安电子科技大学陈伯孝等系统分析了单脉冲三维成像原理及姿态变化影响，提出三维运动补偿方法，并指出其在末制导与目标识别中的应用潜力[88]；2007 年，西安电子科技大学徐辉等将单脉冲测角与 ISAR 成像融合，实现三维重建并验证了其在结构表征与抗干扰识别中的优势[89]。

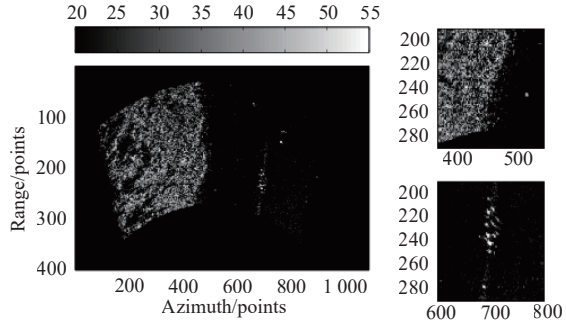
随后，研究逐步拓展至前视成像体制与工程实现。2010 年，南京航空航天大学吴迪等提出基于

和差波束测角的前视成像方法，实现波束内散射点精确定位与高分辨成像[90]；2013 年，北京遥感设备研究所 Zhang Xiaojing 等通过方位向连续扫描结合脉冲压缩提升方位分辨率，并通过实测数据验证了其优于传统实波束成像的性能[91]。

在多目标分辨与参数估计方面，研究进一步向复杂场景演进。2016 年，国防科技大学杨洋等引入最大似然估计，实现同分辨单元内多目标角度分离[92]；2019 年，国防科技大学庞博等结合贝叶斯自适应优化方法，实现多目标联合分辨与极化参数估计[93]；2021 年，国防科技大学李悦丽等利用和差通道多普勒梯度差异分离多目标，并结合调频 Z 变换提升测角精度与成像清晰度[94]，其结果如图 11 所示。



a. 实孔径成像结果



b. 基于重建多普勒估计的单脉冲成像结果

图 11　高分辨成像结果

近年来，研究重点转向复杂环境下的鲁棒建模与多维信息融合。2024 年，北京无线电测量研究所安强等提出面向大带宽与长时间积累的时变角度估计方法，提高了对机动目标的适应能力[95]；同年，湖南师范大学蔡飞等针对瑞利未分辨目标引入先验信息，提升多目标检测性能[96]；2026 年，国防科技大学田嘉豪等提出联合极化–角度分集的三通道单脉冲三维成像方法，通过优化斜投影策略有效抑制主瓣内非相干源干扰，在低信噪比及少快拍条件下仍实现稳健的目标解耦与三维重建[97]。

总体来看，国内研究已形成从超分辨建模、三维运动补偿到多通道联合处理与极化信息利用的系统化发展路径，展现出较强的工程应用潜力。

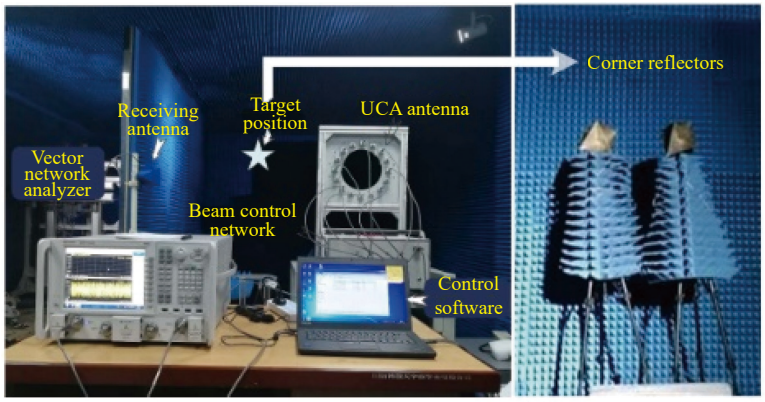
3.2　电磁涡旋雷达前视高分辨技术

涡旋电磁波携带轨道角动量（orbital angular momentum, OAM），其波前呈螺旋状结构，相位随方位角周期性变化。与传统平面波相比，涡旋波的回波中天然包含目标的方位角信息，使得雷达在无需平台与目标相对运动的条件下，即可实现前视与凝视场景下的角度向高分辨成像。

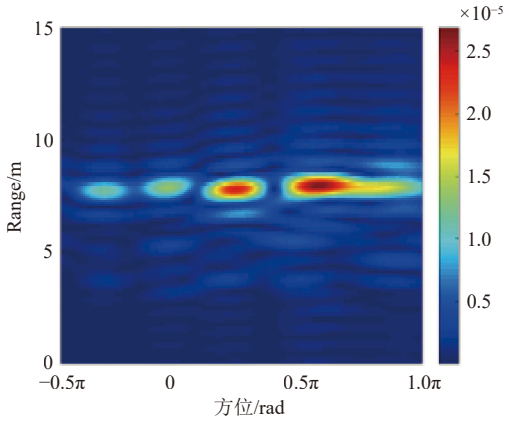
2013 年，国防科技大学将 OAM 引入微波雷达成像，建立方位角与模态数的傅里叶对偶关系[98]；同年，北京大学提出 OAM 衍射层析成像，但计算量大[99]。此后，国防科大进一步发展出 MISO（multiple-input single-output）、MIMO、SIMO（single-input multiple-output）这 3 种体制：MISO 结构简单但分辨率低；MIMO 可实现双倍模态但产生虚假点；SIMO 单次快拍成像但分辨率减半[100]。针对虚假点，国少卿等提出以分数阶 OAM 等效合成技术实现整数阶–分数阶模态融合，通过对整数阶 OAM 模态的线性组合，打破传统 π 周期性相位限制，消除大部分虚假散射点[101]。为同步提升成像效率与精度，国防科技大学刘红彦团队提出双模态互补照射方法，交替发射正负模态对，使成像时间缩短 50%，并通过暗室双角反试验验证了所提方法的有效性，具体如图 12 所示[102]。针对波束中空与旁瓣抑制，国防科技大学提出多环同心圆阵与切比雪夫加权优化[103]，以及被动涡旋成像架构[104]。此外，非均匀半圆环阵列设计可将阵元数量减半[105]，快速超分辨成像方法可通过两次发射实现等效多模态合成[106]。针对贝塞尔幅度调制，空军工程大学采用基于字典学习的抑制策略[107]，国防科技大学尝试采用分数阶模态联合重构技术[108] 以提升低信噪比下的 VER 成像鲁棒性。此外，南京航空航天大学潘时龙团队将微波光子引入涡旋电磁波雷达，并通过原理样机实验验证了前视场景下的成像能力，具体如图 13 所示[109]。

电磁涡旋成像算法主要分为谱估计与稀疏恢复两大类。2013 年，国防科技大学郭桂蓉团队采用逆投影算法实现了一维方位分辨[98]。此后，基于 FFT（fast Fourier transform）的双域联合成像、MUSIC（multiple signal classification）算法、AR（autoregressive）模型谱估计等方法相继被应用于涡旋成像及稀疏恢复方面，2016 年，研究人员建立了 Tikhonov 正则化的联合稀疏恢复框架[110]；随后，稀疏贝叶斯学习（sparse Bayesian learning, SBL）、变分贝叶斯推理、增强 SBL 等算法被用于处理噪声与网格失配问题，显著提升了抗噪性与分辨率。针对高维数据重构，Dice 正则化正交匹配追踪算

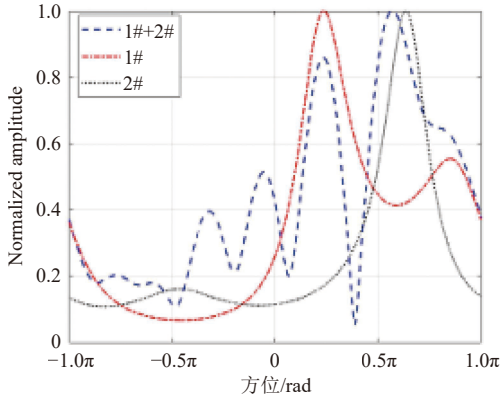
法在低计算量下实现了较好性能[111]。燕山大学史洪印团队在运动目标成像、弹载双基地 SAR 融合、电磁信息论超分辨及 OAM−位置复用等方面取得了系统性突破[112]。2023 年，国防科技大学提出了一种电磁涡旋雷达干涉重建成像方法，验证了提出方法的三维成像能力[113]。



a. 试验场景

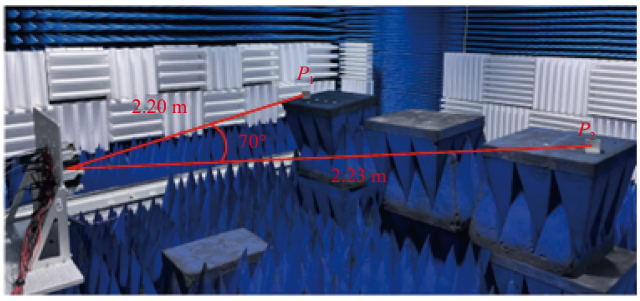


b. 成像结果

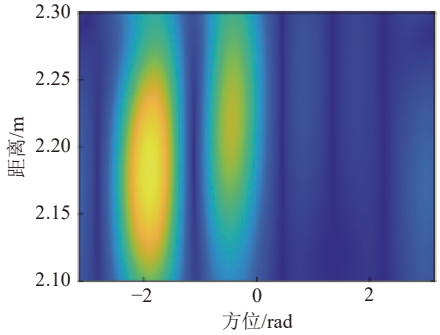


c. 成像结果剖面

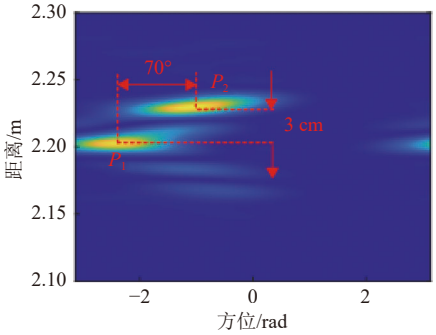
图 12 电磁涡旋暗室角反目标成像实验[102]



a. 双目标前视成像场景



b. 500 MHz 带宽二维成像结果



c. 8 GHz 带宽二维成像结果

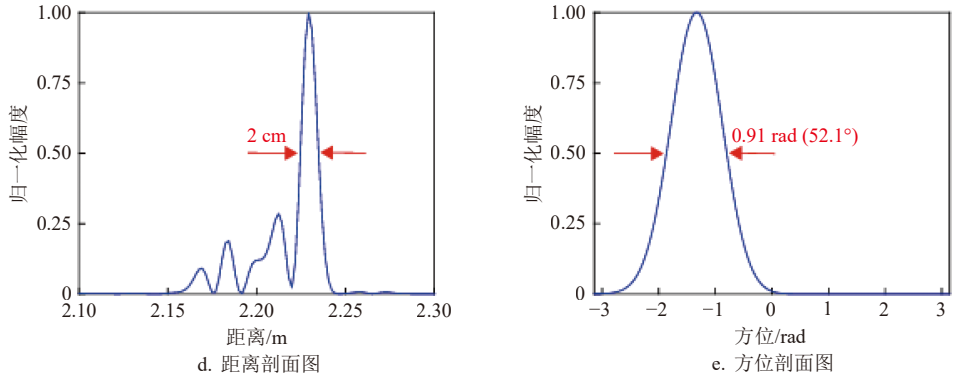


图 13　微波光子宽带电磁涡旋前视成像实验[109]

国外研究相对侧重涡旋波本身特性与通信应用。杜克大学利用超材料孔径编码实现了微波频段的二维/三维前视成像，并完成了人体目标毫米波成像，但其成像体制更接近随机辐射关联成像。意大利 Di Donato 团队采用波恩近似实现了涡旋波的二维层析成像[114]。总体而言，国外在涡旋雷达成像模型与算法方面的系统性研究较少，更多关注 OAM 通信与旋转多普勒检测。

3.3　随机辐射雷达前视高分辨技术

随机辐射雷达成像源于光学强度关联成像，其基本思想是通过对发射电磁场进行空时编码，构造具有空变和时变特性的非确定性辐射模式，并根据参考辐射场与目标回波之间的映射关系实现场景反演。该体制能够在有限物理孔径条件下获取更丰富的目标空间信息，在前视、凝视和快拍成像等方面具有显著优势，可应用于复杂环境前视探测、低空目标快速成像等场景。现有随机辐射雷达前视高分辨技术研究主要集中于成像反演方法、辐射场优化设计和系统试验验证 3 个方面。

在成像方法方面，中国科学技术大学王东进、郭圆月团队围绕正则化反演理论开展了系统研究，针对随机辐射成像模型中存在的病态性、噪声敏感性及离散网格失配等问题，提出了一系列稳健重建方法[115-117]。国防科技大学李东泽、周小利、查国峰等基于稀疏贝叶斯学习理论，重点研究了稀疏场景与扩展目标重建、运动目标速度估计以及阵列系统误差校正等问题[118-122]。西安电子科技大学邢孟道、全英汇等则将压缩感知理论引入随机辐射成像，通过利用目标场景的稀疏先验，提高了低信噪比条件下成像反演的稳定性与鲁棒性[123-124]。

在辐射场设计方面，中国科学技术大学王东进团队从辐射源参数设计出发，研究了辐射场的空时随机特性及其对成像性能的影响[125-126]。国防科技大学程永强团队以波前熵为优化准则，通过增强不同辐射模式之间的差异性，提高辐射场观测矩阵的有效秩，从而改善场景重建质量[127-128]。西安交通大学李蝶、朱士涛团队提出多波束扫描式辐射场设计方法，在提高空间分辨能力的同时，实现了对成像旁瓣的有效抑制[129-130]。

在试验验证方面，中国科学技术大学王东进团队于 2013 年完成外场点目标成像试验，获得了约 10 倍于实孔径的方位分辨能力[131]。2018—2021 年，国防科技大学王宏强、程永强团队采用随机频率调制体制，先后开展了地面角反射器、空中无人机和地面车辆等目标的外场试验，目标分辨能力超过实孔径约 11 倍[132]，如图 14 和图 15 所示。图 14 在 X 波段采用无人机挂载的两个角反完成了地对空试验验证，提出技术体制能够准确地分辨邻距的两个角反目标。图 15 在 W 波段采用车辆目标完成了对静止目标的成像验证，提出的方法能够大幅提升对车辆目标的成像能力。西安电子科技大学全英汇团队依托二维相控阵系统，通过子阵划分与随机移相构造二维随机辐射场，完成了多角反射器外场成像试验，方位分辨能力较实孔径提高约 4 倍[133]。此外，南京航空航天大学潘时龙团队将微波光子引入雷达关联成像中，并通过微波暗室多角反实验验证了其在前视场景下的高分辨成像能力[134]。

电磁超材料能够实现对电磁波幅度、相位等参量的自由调控。从 2013 年开始，杜克大学科研团队利用频率选择超材料表面构建了孔径编码雷达成像系统，相继实现了随机电磁调制二维[135]、三维[136] 前视成像。2017 年美国华盛顿大学科研团队利用多模块超材料收发阵列实现了对人体目标的三维前视高分辨成像[137]。此外，该团队还将基于超

材料天线的成像技术与运动成像相结合，利用超材料天线所形成的随机调制波束以及天线自身运动所形成的大孔径实现了三维前视成像[138]。

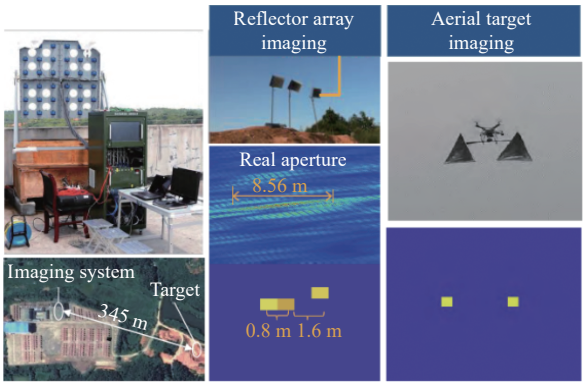


图 14 X 波段随机辐射点目标成像实验[132]

3.4 扫描波束雷达前视高分辨技术

扫描波束雷达前视超分辨成像技术在国外已有数十年的研究积累，技术路线呈现多元化发展特征，涵盖逆滤波、贝叶斯方法、谱估计以及深度学习等方向。

逆滤波技术在超分辨成像研究中较早受到关注。1988 年，美国洛克希德•马丁公司 Richards 基于卷积核频域因式分解提出迭代非相干超分辨方法[139]，实现了约 3 倍的角分辨率提升。1997 年，日本工业大学 Suzuki 将改进的维纳滤波方法应用于港口监视雷达系统[140]，验证了该技术的工程可行性。然而，逆滤波方法在低信噪比条件下易受噪声影响，限制了其实用性，如图 16 所示。

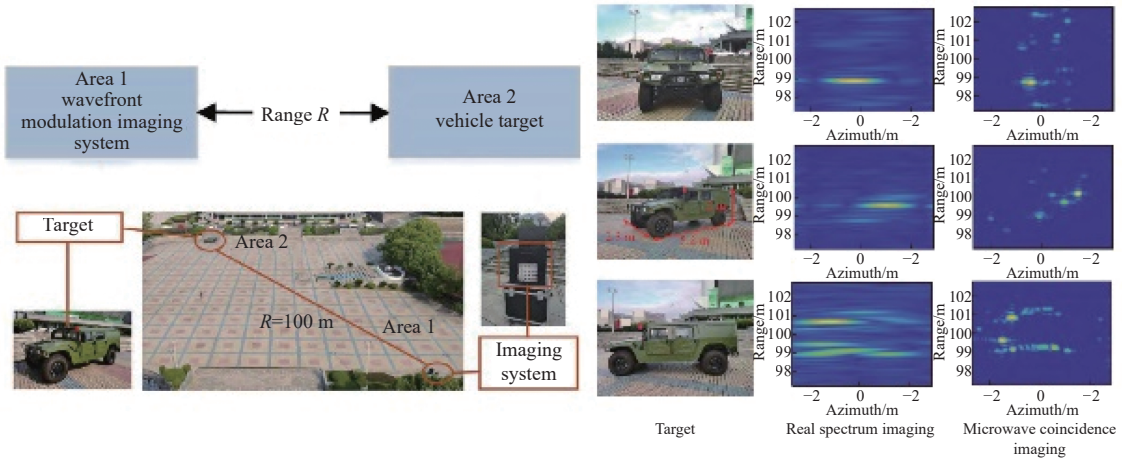


图 15 W 波段随机辐射车辆目标成像实验[132]

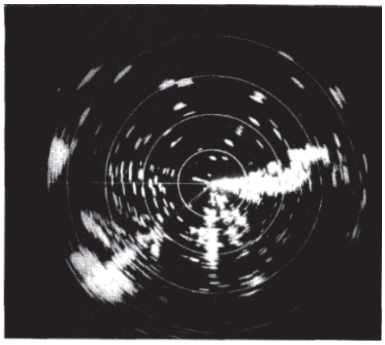
贝叶斯超分辨方法在统计框架下实现目标反演。其中最具代表性的是 Richardson 和 Lucy 于 1972 年分别独立提出的 Richardson-Lucy 方法[141]。该方法无需复杂的统计参数估计，在图像处理与计算机视觉领域得到广泛应用。

谱估计方法通过子空间分解或自适应波束形成实现超分辨。1997 年，美国空军实验室 Dropkin 等将多重信号分类方法与扫描技术相结合，提出了 Scan MUSIC 算法[142]，取得了 4 倍的超分辨效果。经典谱估计方法依赖大快拍数据，对于运动平台而言存在困难。为解决快拍数不足的问题，2009 年美国佛罗里达大学 Yardibi 等提出了迭代自适应方法（iterative adaptive approach, IAA）[143]，该方法在协方差拟合准则下进行迭代优化，能够在单快拍或少快拍条件下获得较好的超分辨性能。随后，瑞典乌普萨拉大学 Stoica 等提出了稀疏迭代协方差估计（sparse iterative covariance-based estimation, SPICE）方法[144]，获得了比 IAA 更稀疏的分辨结果，并进一步提出了基于加权 SPICE 的框架[145]，揭示了 IAA、SPICE 和迭代最小化稀疏学习（sparse learning via iterative minimization, SLIM）等迭代自适应类方法实现不同稀疏性水平的内在联系。

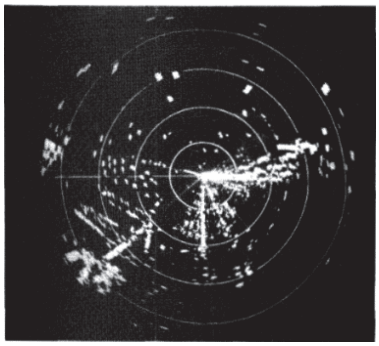
在实验验证方面，2000 年德国宇航局 Sutor 等提出的扇区增强视觉成像雷达系统在直升机平台开展了挂飞试验[146]，实测结果表明该系统能够有效提升前视方位分辨率。近年来，伊朗谢里夫理工大学 Karbasi 等将二维 SLIM 方法与共轭梯度算法相结合[147]，在保证角分辨精度的同时提升了运算效率。

我国在扫描波束雷达前视超分辨成像技术方面发展迅速，已形成从逆滤波到谱估计、贝叶斯框架再到深度学习的系统化发展路径。

早期研究主要集中在逆滤波方法。1993 年，南京电子技术研究所单荣光等基于维纳滤波提出了角超分辨方法[148]，并利用米波雷达实测数据验证了其有效性。同年，电子科技大学丁义元等提出了广义逆滤波方法[149]，有效改善了实孔径雷达的角分辨力。



a. 实波束结果



b. 超分辨处理结果

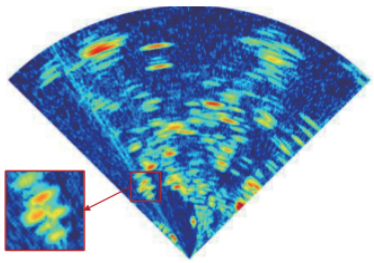
图 16　角度超分辨结果

随后，研究逐步拓展至谱估计与贝叶斯框架方法。电子科技大学张永超等将 IAA 方法引入雷达超分辨成像领域[150]，并基于快速迭代自适应方法提出了逆滤波超分辨成像算法[151]，利用 Toeplitz 矩阵结构降低了计算复杂度。国防科技大学李悦丽等提出了相干 IAA 方法[152]，通过利用运动平台的相位信息获得了更优的分辨性能。贝叶斯框架方面，电子科技大学 Zha Yuebo 等基于贝叶斯理论提出了解卷积算法[153]，该方法考虑了噪声的高斯分量和泊松分量，并利用拉普拉斯分布表征目标的稀疏特性。Tan Ke 等通过 I/Q 通道建模实现了最大似然超分辨[154]，并通过 X 波段雷达实测数据验证了其有效性。

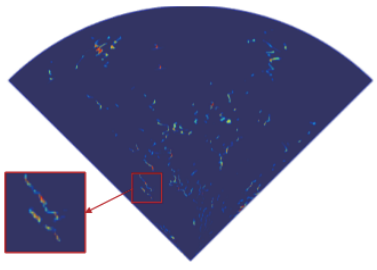
在正则化与稀疏重构方面，西安电子科技大学唐军奎针对小型运动平台，研究了 SISO（single-input single-output）和 MIMO 体制雷达的超分辨成像方法，提出了联合稀疏和低秩等改进方法[155]，提高了噪声稳健性。电子科技大学霍伟博等将 Tikhonov 与 TV（total variation）范数相结合[156]，通过自适应调节权重，抑制噪声的同时保持图像边缘结构。

针对空中目标成像，电子科技大学杨建宇团队将 IAA 方法扩展到二维[157]，实现了空中运动目标角分辨率的提升。2025 年，中国科学技术大学 Zhang Jianning 等提出了快速二维加权广义 SPICE 方法[158]，应用于雷达空中目标成像，并通过实测数据验证了该方法的有效性。

近年来，深度学习方法开始应用于雷达超分辨成像。2021 年，电子科技大学杨建宇团队提出了 IAA-Net 网络[159]，将传统迭代算法与深度学习相结合，在保证成像质量的同时提升了计算效率。2025 年，该团队还提出了 SBSR-Net（split Bregman superresolution network）框架[160]，实现了多类型参数学习的前视超分辨成像，取得了较好超分辨效果，其结果如图 17 所示。如图 17b 所示，超分辨成像处理后，邻距的船只目标能够被准确分辨。2026 年，南京航空航天大学提出了一种兼顾前视区域与斜视区域的大范围扫描成像方法，满足了大范围前视成像的需求[161]。同年，电子科技大学还提出了一种扫描雷达多特征分治超分辨成像方法，通过雷达回波数据中不同区域目标的幅度、相位等特点，实现了强杂波下稀疏目标的超分辨成像[162]。



a. 实波束结果



b. 超分辨处理结果

图 17　角超分辨结果

综上所述，国内在扫描波束雷达前视超分辨成像技术方面已形成了较为完整的理论体系和实验验证能力，在贝叶斯方法、稀疏重构[163]、迭代自适应方法[164] 以及深度学习方法[165] 等方向取得多项研

究成果。

3.5 波前调频雷达前视高分辨技术

波前调频雷达，又称频率分集阵列（frequency diverse array, FDA）雷达，通过在各阵元间引入微小固定频偏，使发射波束具有距离−角度−时间三维依赖特性，其方向图随观测距离周期性扫描与焦点漂移，天然携带目标的距离维信息。与传统相控阵相比，波前调频雷达回波中包含距离−方位角耦合特征，使雷达在前视无多普勒条件下，可借助距离−角度联合分辨缓解左右模糊难题，并为距离向与方位向的联合高分辨成像提供额外自由度。

均匀线性 FDA 存在严重的距离−角度耦合及周期栅瓣，导致前视成像模糊与主瓣分裂。针对这一问题，项喆等提出了距离−角度解耦波束形成准则，成功在指定区域获取了单峰波束[166]。与此同时，Wang Bo 等设计了三角函数、正弦函数及对数函数形式的非线性频偏，有效消除了距离−角度耦合，并在感兴趣距离处实现了点状聚焦[167-168]。在此基础上，空军工程大学与西安电子科技大学团队进一步发展了子阵 FDA 解耦综合与时变聚焦波束设计[169]。电子科技大学王文钦等系统阐述了非线性频偏 FDA 的波束特性及在前视探测中的应用机理，指出合理的频偏选取是避免周期模糊的关键[170-172]。此外，电子科技大学桂荣华对线性及对数频偏 FDA 的方向图特性、距离周期及聚焦性能进行了仿真验证[173]。

为了克服均匀 FDA 的周期模糊限制并提升前视成像质量，西安电子科技大学许京伟等建立了 FDA-MIMO 雷达发射−接收联合优化框架，在距离模糊与欺骗干扰抑制方面展现了显著优势[174-175]。该团队张梦迪等将 FDA 引入前视 SAR 领域，利用距离−角度依赖导向矢量区分模糊回波，并结合后向投影算法实现了无模糊前视成像，如图 18 所示[176]。针对高分辨宽测绘带需求，Wang Chenghao 等提出了基于 FDA 的距离模糊分辨方法[177]。西安电子科技大学兰岚等在 FDA-MIMO 系统中设计了收发联合波束形成方案，实现了前视成像中的精确置零与旁瓣抑制[178]。此外，该团队许京伟等针对 FDA-MIMO 雷达的前视距离模糊杂波抑制问题开展了深入的算法研究[179]。更进一步地，桂林电子科技大学申继发等建立了频率分集阵列前视 SAR 三维成像模型，对比分析了 BP 算法与压缩感知算法在前视三维场景中的成像效果[180-181]。

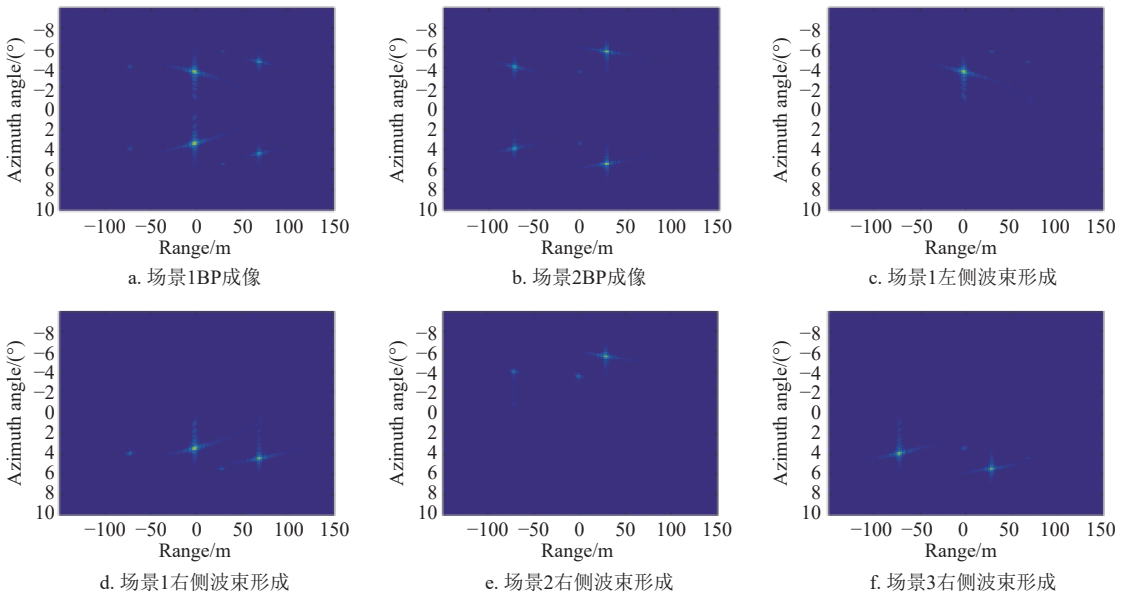


图 18 西安电子科技大学频率分集前视成像实验[176]

波前调频雷达前视成像算法主要依托距离−角度二维匹配滤波、时域 BP 及压缩感知重构。早期研究建立了 FDA 窄带信号距离−角度二维联合估计模型，随后 Capon、MUSIC 等谱估计方法被推广至 FDA 二维参数估计。陈小龙等提出了空间−距离−多普勒聚焦处理方法，进一步优化了信号聚焦效果[182]。在稀疏恢复方面，巩朋成等利用联合稀疏恢复框架及增强稀疏学习迭代方法（SLIM），实现了低信噪比下距离−角度超分辨成像，并能有效补偿模型网格失配带来的影响[183]。国外研究主要侧重 FDA 基础波束特性、STAP（space-time adaptive processing）杂波抑制及 MIMO-FDA 参数估计[184]，

但在 FDA 前视成像的系统实验报道相对较少，更多工作仍集中于波束形成理论与抗干扰应用。2026 年，国防科技大学提出了一种线性波前调制雷达前视三维成像方法，采用沿角度维的匹配滤波即可实现角度维分辨率的提升[185]。同年，西安电子科技大学提出了一种相干频率分集阵列雷达发射和差波束测角方法，该方法结合和差波束调制和频率分集调制，实现前视区目标的准确测角[186]。

4　复合调制雷达前视高分辨技术

复合调制雷达前视高分辨技术，是指联合利用雷达运动调制信息和辐射调制信息，通过相应的数学求解方法，实现雷达前视高分辨成像。该技术充分地利用了运动信息和辐射信息，可实现载机全方位向的高分辨成像。

2020 年，电子科技大学杨建宇教授团队，详细对比了不同成像模型的成像视场适用边界[187]。2025 年，该团队通过仿真试验，验证了高速平台下复合调制效应对雷达前视成像性能的影响[188]。2026 年，该团队还从雷达对目标信息获取的空时变机理出发，对比论述了复合调制对雷达前视高分辨成像的能力提升[1]。此外，2026 年，国防科技大学李永祯教授团队，探索了采用多通道雷达系统进行幅度相位联合调制，对雷达前视成像性能的提升[189]。

综上可以看出，围绕复合调制雷达前视高分辨技术的研究工作较少，该技术方向不仅结合了辐射调制和运动调制等信息，在成像处理方法中，也突破了传统匹配滤波方法的局限，采用逆散射重建的方式，提升了雷达前视高分辨成像性能。

5　总结与展望

本文从雷达前视高分辨技术所需的空时变契合理论出发，总结了雷达前视高分辨技术的成果与发展。主要结论如下。

1）不同雷达前视高分辨技术系统体制，都具有相同的物理基础：在所需分辨方向上，空间波形都同时形成了空变性和时变性，达到了空间波形的空变性与时变性的契合。

2）角度向高分辨，需要在物理层面构建兼备空变与时变特性的观测模式，建立起可解的观测方程组，还必须依据观测矩阵的属性，在数学层面选取恰当的处理方法。

3）围绕运动调制、辐射调制和复合调制雷达前视高分辨成像技术，国内外各单位已取得了丰硕的研究成果，但在满足不同应用需求时，需进一步的研究与探索。

围绕雷达前视高分辨技术，在机理创新、处理方法、理论极限和工程应用等方面的工作展望可总结如下。

1）探寻新的空变性和时变性组合，是提升雷达前视高分辨技术迭代升级的重要研究方向。依据空时变契合机理，雷达前视高分辨成像，须同时具备分辨方向上的空变性和时变性。从该机理出发，有助于探寻出新的体制机理，如探寻新的雷达辐射调制和运动调制组合，探寻量子感知与经典雷达技术的交叉融合，实现雷达前视区的新质高分辨成像，为雷达前视高分辨成像技术开辟新的道路。

2）研究先进的信号处理方法，是实现目标信息高分辨提取的重要手段。在体制机理创新的基础上，融合人工智能技术，构建智能化成像处理算法，搭建数据驱动与模型驱动相结合的混合算法框架，如网络化迭代展开成像、物理信息驱动智能成像、端到端一体化成像、生成式智能化成像等，实现雷达前视向高分辨成像，是雷达前视高分辨成像技术发展的重要趋势。

3）探讨雷达前视高分辨性能理论极限。雷达前视高分辨性能理论极限，是对比评估不同技术体制前视成像性能、指导前视雷达体制设计的重要标尺。国内外研究学者围绕雷达前视成像问题，提出了不同的技术体制，但在前视成像分辨性能理论极限的评估上仍存在不足。

4）推动工程实施与应用落地，是发挥雷达前视高分辨成像技术效能的重要一环。机载、弹载雷达前视高分辨成像，可为平台提供高分辨的前视区目标感知能力。但在车载、舰载和着陆器等新的应用场景和应用需求下，须解决工程实施中新的技术瓶颈，如动态强地/海杂波、非合作运动目标、平台机动高速等新的难题，在新的平台下保障雷达前视高分辨成像的性能，为不同应用平台提供稳健高质量的前视感知能力。

参 考 文 献

[1] 杨建宇, 毛德庆, 蒲巍, 等. 空时变契合度与雷达波束内角分辨[J]. 中国科学: 信息科学, 2026, 56(4): 986-1007.
Yang Jianyu, Mao Deqing, Pu Wei, et al. Spatiotemporal variability compatibility for angular resolving within radar beamwidth[J]. Sci Sin Inform, 2026, 56(4): 986-1007. (in Chinese)

[2] Yang Jianyu, Huang Yulin, Yang Haiguang, et al. A first

experiment of airborne bistatic forward-looking SAR-preliminary results[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne: IEEE, 2013: 4202-4204.

[3] 杨建宇. 双基合成孔径雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
Yang Jianyu. Bistatic synthetic aperture radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)

[4] 武俊杰, 孙稚超, 杨建宇, 等. 基于 GF-3 照射的星机双基 SAR 成像及试验验证[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(3): 241-247.
Wu Junjie, Sun Zhichao, Yang Jianyu, et al. Spaceborne airborne bistatic SAR using GF-3 illumination-technology and experiment[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(3): 241-247. (in Chinese)

[5] 刘康.电磁涡旋成像理论与方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
Liu Kang. Study on the theory and method of electromagnetic vortex imaging[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)

[6] Mao Deqing, Zhang Yin, Zhang Yongchao, et al. Stochastic radiation radar imaging based on the 2-D amplitude-phase orthogonal distribution array[C]//2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18). Oklahoma City: IEEE, 2018: 235-239.

[7] Love A. In memory of carl A. Wiley[J]. IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, 1985, 27(3): 17-18.

[8] Willey C A. Synthetic aperture radars[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, AES-21(3): 440-443.

[9] Sherwin C W, Ruina J P, Rawcliffe R D. Some early developments in synthetic aperture radar systems[J]. IRE Transactions on Military Electronics, 1962, MIL-6(2): 111-115.

[10] Daum F. Radar Handbook, 3rd Edition (M. I. Skolnik, Ed; 2008) [Book Review][J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2008, 23(5): 41.

[11] Stimson G W. Introduction to airborne radar[M]. Mendham: SciTech Pub. , 1998.

[12] Daniel L, Stove A, Hoare E, et al. Application of Doppler beam sharpening for azimuth refinement in prospective low-THz automotive radars[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(10): 1121-1130.

[13] Yuan Sen, Aubry P, Fioranelli F, et al. A novel approach to unambiguous Doppler beam sharpening for forward-looking MIMO radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(23): 23494-23506.

[14] Gudelj M, Meyer M, Tomforde S, et al. Doppler beam sharpening for 3D object detection[C]//Proceedings of the 2024 21st European Radar Conference (EuRAD). Paris: IEEE, 2024: 23-26.

[15] 周荫清. 机载脉冲多普勒雷达 DBS 技术[J]. 航空学报, 1988, 9(12): 574-581.
Zhou Yinqing. Doppler beam sharping technique for airborne pulse Doppler radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(12): 574-581. (in Chinese)

[16] 张直中. 多普勒波束锐化（DBS）理论和实践中若干问题的探讨[J]. 现代雷达, 1991, 13(2): 1-12.
Zhang Zhizhong. Discussion on some problems in the theory and practice of Doppler beam sharpening (DBS)[J]. Modern Radar, 1991, 13(2): 1-12. (in Chinese)

[17] 朱万清. 机载雷达脉冲多普勒波束锐化技术探讨[J]. 电讯技术, 1997(4): 10-14.
Zhu Wanqing. Airborne radar pulse Doppler beam sharping technology[J]. Telecommunication Engineering, 1997(4): 10-14. (in Chinese)

[18] 毛士艺, 李少洪, 黄永红, 等. 机载 PD 雷达 DBS 实时成像研究[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 32-34.
Mao Shiyi, Li Shaohong, Huang Yonghong, et al. Study of real time image by DBS on airborne PD radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 32-34. (in Chinese)

[19] 解向利. 机载火控雷达脉冲多普勒波束锐化成像研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
Xie Xiangli. Imaging study of airborne fire control radar pulse Doppler beam sharpening[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)

[20] Long Teng, Lu Zheng, Ding Zegang, et al. A DBS Doppler centroid estimation algorithm based on entropy minimization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3703-3712.

[21] Chen Hongmeng, Li Ming, Zhang Peng, et al. Resolution enhancement for Doppler beam sharpening imaging[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(7): 843-851.

[22] Mao Deqing, Zhang Yin, Zhang Yongchao, et al. Super-resolution Doppler beam sharpening method using fast iterative adaptive approach-based spectral estimation[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(1): 015020.

[23] Mao Deqing, Zhang Yongchao, Zhang Yin, et al. Doppler beam sharpening using estimated Doppler centroid based on edge detection and fitting[J]. IEEE Access, 2019, 7: 123604-123615.

[24] Moreira A, Huang Yonghong. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(5): 1029-1040.

[25] Davidson G W, Cumming I G, Ito M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(1): 121-133.

[26] Franceschetti G, Lanari R, Marzouk E S. A new two-dimensional squint mode SAR processor[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(2): 854-863.

[27] Vandewal M, Speck R, Süß H. Efficient and precise processing for squinted spotlight SAR through a modified Stolt mapping[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2006, 2007: 059704.

[28] Davidson G W, Cumming I. Signal properties of spaceborne squint-mode SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 611-617.

[29] Nguyen M P, Ammar S B. Second order motion compensation for squinted spotlight synthetic aperture radar[C]//Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on

Synthetic Aperture Radar (APSAR). Tsukuba: IEEE, 2013: 202-205.
[30] Park S H, Park J I, Kim K T. Motion compensation for squint mode spotlight SAR imaging using efficient 2D interpolation[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012, 128: 503-518.
[31] Berardino P, Natale A, Esposito C, et al. On the time-domain airborne SAR focusing in the presence of strong azimuth variations of the squint angle[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 5212818.
[32] Prats-Iraola P, Lopez-Dekker P, De Zan F, et al. Performance of 3-D surface deformation estimation for simultaneous squinted SAR acquisitions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(4): 2147-2158.
[33] Garren D A. Theory of two-dimensional signature morphology for arbitrarily moving surface targets in squinted spotlight synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9): 4997-5008.
[34] Huang Lijia, Qiu Xiaolan, Hu Donghui, et al. Focusing of medium-earth-orbit SAR with advanced nonlinear chirp scaling algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 500-508.
[35] Wang Pengbo, Liu Wei, Chen Jie, et al. A high-order imaging algorithm for high-resolution spaceborne SAR based on a modified equivalent squint range model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1225-1235.
[36] Jin Lihua, Liu Xingzhao. Nonlinear frequency scaling algorithm for high squint spotlight SAR data processing[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008, 2008: 657081.
[37] An Daoxiang, Huang Xiaotao, Jin Tian, et al. Extended nonlinear chirp scaling algorithm for high-resolution highly squint SAR data focusing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(9): 3595-3609.
[38] Chen Si, Zhao Huichang, Zhang Shuning, et al. An extended nonlinear chirp scaling algorithm for missile borne SAR imaging[J]. Signal Processing, 2014, 99: 58-68.
[39] Wang Yan, Li Jingwen, Xu Feng, et al. A new nonlinear chirp scaling algorithm for high-squint high-resolution SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(12): 2225-2229.
[40] Sun Zhichao, Wu Junjie, Li Zhongyu, et al. Highly squint SAR data focusing based on keystone transform and azimuth extended nonlinear chirp scaling[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 145-149.
[41] Wu Junjie, An Hongyang, Zhang Qianghui, et al. Two-dimensional frequency decoupling method for curved trajectory synthetic aperture radar imaging[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(7): 766-773.
[42] Pu Wei, Wu Junjie, Huang Yulin, et al. Squinted airborne synthetic aperture radar imaging with unknown curved trajectory[J]. Sensors, 2020, 20(21): 6026.
[43] Zeng Tao, Li Yinghe, Ding Zegang, et al. Subaperture approach based on azimuth-dependent range cell migration correction and azimuth focusing parameter equalization for maneuvering high-squint-mode SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(12): 6718-6734.
[44] Zhang Lei, Sheng Jialian, Xing Mengdao, et al. Wavenumber-domain autofocusing for highly squinted UAV SAR imagery[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 1574-1588.
[45] Huang Bang, Zhang Shunsheng, Wang Wenqin, et al. High-precision imaging algorithm for highly squinted SAR with 3D acceleration[J]. IEEE Access, 2019, 7: 130399-130409.
[46] 武俊杰, 杨建宇, 李中余, 等. 双基地 SAR 成像处理方法综述[J]. 雷达学报, 2025, 14(5): 1115-1141.
Wu Junjie, Yang Jianyu, Li Zhongyu, et al. Review of bistatic synthetic aperture radar imaging methods[J]. Journal of Radars, 2025, 14(5): 1115-1141. (in Chinese)
[47] Cardillo G P. On the use of the gradient to determine bistatic SAR resolution[C]//International Symposium on Antennas and Propagation Society, Merging Technologies for the 90's. Dallas: IEEE, 1990: 1032-1035.
[48] Vu V T, Pettersson M I. On bistatic forward-looking SAR imaging[C]//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City: IEEE, 2014: 3953-3956.
[49] Graziano M D, D'Errico M. Novel constellation design method for spaceborne/airborne bistatic SAR systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(3): 2082-2095.
[50] Wang R, Loffeld O, Nies H, et al. Image formation algorithm for bistatic forward-looking SAR[C]//2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu: IEEE, 2010: 4091-4094.
[51] Walterscheid I, Ender J H G, Brenner A R, et al. Bistatic SAR processing and experiments[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2710-2717.
[52] Espeter T, Walterscheid I, Klare J, et al. Bistatic forward-looking SAR: Results of a spaceborne-airborne experiment[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 765-768.
[53] Shin H S, Lim J T. Omega-k algorithm for airborne forward-looking bistatic spotlight SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 312-316.
[54] Mao Deqing, Zhang Yongchao, Pei Jifang, et al. Forward-looking geometric configuration optimization design for spaceborne-airborne multistatic synthetic aperture radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 8033-8047.
[55] Yuan Yu, Huang Yulin, Yang Jianyu. The simulation software of bistatic forward-looking SAR[C]//Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu: IEEE, 2011: 946-949.
[56] Meng Ziqiang, Li Yachao, Xing Mengdao, et al. Property

analysis of bistatic forward-looking SAR with arbitrary geometry[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(1): 111-127.

[57] Qiu Xiaolan, Hu Donghui, Ding Chibiao. Some reflections on bistatic SAR of forward-looking configuration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 735-739.

[58] Liu Zhe, Yang Jianyu, Zhang Xiaoling. Nonlinear RCM compensation method for spaceborne/airborne forward-looking bistatic SAR[C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver: IEEE, 2011: 4233-4236.

[59] Chen Si, Yuan Yue, Zhang Shuning, et al. A new imaging algorithm for forward-looking missile-borne bistatic SAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(4): 1543-1552.

[60] Liang Mu, Su Weimin, Gu Hong. Focusing high-resolution high forward-looking bistatic SAR with nonequal platform velocities based on keystone transform and modified nonlinear chirp scaling algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(3): 901-908.

[61] Zheng Zhiying, Tan Gewei, Jiang Dingyi. A bidirectional resampling imaging algorithm for high maneuvering bistatic forward-looking SAR based on Chebyshev orthogonal decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5211512.

[62] Zhang Qianghui, Wu Junjie, Li Zhongyu, et al. PFA for bistatic forward-looking SAR mounted on high-speed maneuvering platforms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(8): 6018-6036.

[63] Wang Xuanqi, Li Yachao, Song Xuan, et al. Fast universal azimuth signal modeling for maneuvering-platform BFSAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5215617.

[64] 钱光照, 王勇. 基于最小熵的双基前视 SAR 二阶差分运动补偿方法研究[J]. 信号处理, 2025, 41(6): 1055-1071.
Qian Guangzhao, Wang Yong. Research on BFSAR motion compensation with second-order difference method via minimum entropy[J]. Signal Processing, 2025, 41(6): 1055-1071. (in Chinese)

[65] Wu Junjie, Sun Zhichao, Li Zhongyu, et al. Focusing translational variant bistatic forward-looking SAR using keystone transform and extended nonlinear chirp scaling[J]. Remote Sensing, 2016, 8(10): 840.

[66] Wu Junjie, Li Zhongyu, Huang Yulin, et al. Focusing bistatic forward-looking SAR with stationary transmitter based on keystone transform and nonlinear chirp scaling[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 148-152.

[67] An Hongyang, Yang Jianyu, Xiao Yuping, et al. A learning Bayesian map framework for joint SAR imaging and target detection[J]. IEEE Transactions on Radar Systems, 2024, 2: 1214-1228.

[68] Wu Junjie, Sun Zhichao, Sun Huarui, et al. Mission-oriented feasible geometry parameter domain determination for bistatic SAR based on decision space partitioning framework[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2026, 64: 5208116.

[69] Mao Xinyu, Li Zhongyu, Yu Hai, et al. Multistatic SAR sequential imaging method using subaperture spatial spectrum fusion based on high-precision trajectory reconstruction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2026, 64: 5211417.

[70] Song Yue, Pu Wei, Huo Jiawei, et al. Model-driven deep adaptive parametric imaging for bistatic SAR under motion errors[EB/OL]. [2026-07-01]. https://ieeexplore.ieee.org/document/10504289.

[71] Zeng Dazhi, Zeng Tao, Hu Cheng, et al. Back-projection algorithm characteristic analysis in forward-looking bistatic SAR[C]//2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai: IEEE, 2006: 1-4.

[72] Sun Huarui, Sun Zhichao, Chen Tianfu, et al. An efficient backprojection algorithm based on wavenumber-domain spectral splicing for monostatic and bistatic SAR configurations[J]. Remote Sensing, 2022, 14(8): 1885.

[73] Li Yachao, Xu Gaotian, Zhou Song, et al. A novel CFFBP algorithm with noninterpolation image merging for bistatic forward-looking SAR focusing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5225916.

[74] 王勇, 刘禹锋. 单脉冲成像技术发展现状综述[J]. 雷达学报（中英文）, 2026, 15(1): 307-330.
Wang Yong, Liu Yufeng. A review of the current developments in monopulse imaging technology[J]. Journal of Radars, 2026, 15(1): 307-330. (in Chinese)

[75] Soumekh M. Moving target detection in foliage using along track monopulse synthetic aperture radar imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(8): 1148-1163.

[76] Farina A, Gini F, Greco M. DOA estimation by exploiting the amplitude modulation induced by antenna scanning[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1276-1286.

[77] Axelsson S R J. Position correction of moving targets in SAR imagery[C]//Proceedings of SPIE 5236, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques VI. Bellingham: SPIE, 2004: 80-92.

[78] Zhang Xin, Willett P K, Bar-Shalom Y. Monopulse radar detection and localization of multiple unresolved targets via joint bin processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(4): 1225-1236.

[79] Greco M, Gini F, Farina A. Joint use of sum and delta channels for multiple radar target DOA estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1146-1154.

[80] Chaumette E, Nickel U, Larzabal P. Detection and parameter estimation of extended targets using the generalized monopulse estimator[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(4): 3389-3417.

[81] Nickel U, Chaumette E, Larzabal P. Estimation of extended targets using the generalized monopulse estimator: Extension to a mixed target model[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(3): 2084-2096.

[82] Huang Guanlong, Zhou Shigang, Chio T H, et al. Wideband dual-polarized and dual-monopulse compact array for SAR system integration applications[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(8): 1203-1207.

[83] Raj R G, Rodenbeck C T, Beun J B, et al. 3D ISAR imaging algorithm based on amplitude monopulse processing at W band[C]//2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST). Waltham: IEEE, 2019: 1-6.

[84] Rezaei H, Sebt M A, Zarei N, et al. Closed-form angle estimation of unresolved targets in monopulse radar to counter the angular electronic attack[J]. IET Signal Processing, 2023, 17(4): e12203.

[85] Park H, Kim J, Park J, et al. High-resolution multi-target angle estimation for IoT-enabled drone detection using adaptive monopulse beamforming[J]. IEEE Access, 2026, 14: 2607-2618.

[86] 马长征, 张守宏. 超分辨在单脉冲雷达三维成像中的应用[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(3): 379-382.
Ma Changzheng, Zhang Shouhong. Applications of super-resolution signal processing on monopulse radar three dimensional imaging[J]. Journal of Xidian University, 1999, 26(3): 379-382. (in Chinese)

[87] 马长征, 张守宏. 舰船目标单脉冲雷达三维成像技术[J]. 电子科学学刊, 2000, 22(3): 385-391.
Ma Changzheng, Zhang Shouhong. Three-dimensional imaging technique of ship targets with monopulse radar[J]. Journal of Electronics, 2000, 22(3): 385-391. (in Chinese)

[88] 陈伯孝, 张守宏, 马长征. 单脉冲三维成像及其在末制导雷达中的应用[J]. 雷达科学与技术, 2003, 1(4): 205-209.
Chen Baixiao, Zhang Shouhong, Ma Changzheng. Monopulse radar 3-D imaging and its application in terminal guidance radar[J]. Radar Science and Technology, 2003, 1(4): 205-209. (in Chinese)

[89] Xu Hui, Qin Guodong, Zhang Lina. Monopulse radar 3-D imaging and application in terminal guidance radar[C]//Proceedings of SPIE 6786, MIPPR 2007: Automatic Target Recognition and Image Analysis; and Multispectral Image Acquisition. Wuhan: SPIE, 2007: 67865K.

[90] 吴迪, 朱岱寅, 朱兆达. 机载雷达单脉冲前视成像算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 462-469.
Wu Di, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. Research on nomopulse forward-looking imaging algorithm for airborne radar[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 462-469. (in Chinese)

[91] Zhang Xiaojing, He Min, He Zhiyi, et al. Research on mono-pulse forward-looking imaging airborne radar system[C]//IET International Radar Conference 2013. Xi'an: IET, 2013: D0191.

[92] Yang Yang, Li Yueli. A maximum likelihood extractor for forward-looking imaging of multiple unresolved targets in monopulse radar[C]//2016 CIE International Conference on Radar. Guangzhou: IEEE, 2016: 1-4.

[93] Pang Bo, Zhou Tao, Dai Dahai, et al. Polarization monopulse forward-looking imaging algorithm based on BADS optimization[C]//2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). Chongqing: IEEE, 2019: 1-5.

[94] 李悦丽, 马萌恩, 赵崇辉, 等. 基于单脉冲雷达和差通道多普勒估计的前视成像[J]. 雷达学报, 2021, 10(1): 131-142.
Li Yueli, Ma Meng'en, Zhao Chonghui, et al. Forward-looking imaging via Doppler estimates of sum-difference measurements in scanning monopulse radar[J]. Journal of Radars, 2021, 10(1): 131-142. (in Chinese)

[95] An Qiang, Yeh C, Lu Yaobing, et al. Time-varying angle estimation of multiple unresolved extended targets via monopulse radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(4): 4650-4667.

[96] Cai Fei. Unresolved Rayleigh targets detection for monopulse radar with knowledge of one target's DOA[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(6): 9411-9417.

[97] Tian Jiahao, Zhou Jianxiong, Wang Zhanling, et al. High-resolution 3D imaging of non-coherent sources for three-channel monopulse radar via joint polarimetric-angular diversity[J]. Remote Sensing, 2026, 18(11): 1699.

[98] 郭桂蓉, 胡卫东, 杜小勇. 基于电磁涡旋的雷达目标成像[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(6): 71-76.
Guo Guirong, Hu Weidong, Du Xiaoyong. Electromagnetic vortex based radar target imaging[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(6): 71-76. (in Chinese)

[99] Li Lianlin, Li Fang. Beating the Rayleigh limit: Orbital-angular-momentum-based super-resolution diffraction tomography[J]. Physical Review E, 2013, 88(3): 033205.

[100] Liu Kang, Cheng Yongqiang, Yang Zhaocheng, et al. Orbital-angular-momentum-based electromagnetic vortex imaging[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 711-714.

[101] Guo Shaoqing, He Zi, Fan Zhenhong, et al. CUCA based equivalent fractional order OAM mode for electromagnetic vortex imaging[J]. IEEE Access, 2020, 8: 91070-91075.

[102] Liu Hongyan, Liu Kang, Cheng Yongqiang, et al. Microwave vortex imaging based on dual coupled OAM beams[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(2): 806-815.

[103] Qin Yuliang, Liu Kang, Cheng Yongqiang, et al. Sidelobe suppression and beam collimation in the generation of vortex electromagnetic waves for radar imaging[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1289-1292.

[104] Liu Kang, Cheng Yongqiang, Li Xiang, et al. Passive OAM-based radar imaging with single-in-multiple-out mode[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(9): 840-842.

[105] 袁航, 罗迎, 陈怡君, 等. 基于反正弦圆环天线阵列的二维成像[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(6): 1487-1494.
Yuan Hang, Luo Ying, Chen Yijun, et al. Two-dimensional imaging algorithm for arcsine-based circular antenna array[J]. Journal of Beijing University of

Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(6): 1487-1494. (in Chinese)

[106] Wang Yunlai, Wang Yanzhe, Guo Zhongyi. OAM radar based fast super-resolution imaging[J]. Measurement, 2022, 189: 110600.

[107] Yuan Hang, Chen Yijun, Luo Ying, et al. A resolution-improved imaging algorithm based on uniform circular array[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(3): 461-465.

[108] Liu Hongyan, Wang Yu, Wang Jianqiu, et al. Electromagnetic vortex enhanced imaging using fractional OAM beams[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(6): 948-952.

[109] 孙冠群, 张方正, 潘时龙. 微波光子宽带涡旋电磁波雷达研究进展及应用[EB/OL]. [2026-07-01]. https://radars.ac.cn/article/doi/10.12000/JR25263.
Sun Guanqun, Zhang Fangzheng, Pan Shilong. Research advances and applications of microwave photonic broadband vortex electromagnetic wave radar[EB/OL]. [2026-07-01]. https://radars.ac.cn/article/doi/10.12000/JR25263. (in Chinese)

[110] Yuan Tiezhu, Liu Hongyan, Cheng Yongqiang, et al. Orbital-angular-momentum-based electromagnetic vortex imaging by least-squares method[C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE, 2016: 6645-6648.

[111] Zhao Hao, Wang Kaizhi. Orbital-angular-momentum-based radar imaging by dice regularized orthogonal matching pursuit[C]//2020 IEEE 5th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). Nanjing: IEEE, 2020: 446-450.

[112] 刘达. 基于涡旋电磁波的高分辨前视雷达成像技术研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2025.
Liu Da. Research on high-resolution forward-looking radar imaging technology based on vortex electromagnetic waves[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2025. (in Chinese)

[113] Wang Jianqiu, Liu Kang, Wang Yu, et al. A novel forward-looking target reconstruction method with electromagnetic vortex interferometry[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(12): 5428-5444.

[114] Pavone S C, Sorbello G, Di Donato L. On the orbital angular momentum incident fields in linearized microwave imaging[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1905.

[115] Guo Yuanyue, Wang Dongjin, He Xuezhi, et al. Super-resolution imaging method based on random radiation radar array[C]//2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques Proceedings. Manchester: IEEE, 2012: 1-6.

[116] 徐浩. 基于空间谱理论和时空两维随机辐射场的雷达成像研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
Xu Hao. The radar imaging based on space spectrum and temporal-spatial stochastic radiation field[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)

[117] 张海龙. 动目标微波凝视关联成像中稀疏重构技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
Zhang Hailong. Research on sparse reconstruction technology for microwave staring correlated imaging of moving target[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)

[118] 李东泽. 雷达关联成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.
Li Dongze. Radar coincidence imaging technique research[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)

[119] 周小利. 基于稀疏性的微波关联成像理论与方法[D].长沙: 国防科技大学, 2017.
Zhou Xiaoli. Theory and methods of sparsity-based microwave coincidence imaging[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)

[120] 查国峰. 运动目标微波关联成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.
Zha Guofeng. Microwave coincidence imaging technique research for moving target[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)

[121] Li Dongze, Li Xiang, Qin Yuliang, et al. Radar coincidence imaging: An instantaneous imaging technique with stochastic signals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(4): 2261-2277.

[122] Cheng Yongqiang, Zhou Xiaoli, Xu Xianwu, et al. Radar coincidence imaging with stochastic frequency modulated array[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(2): 414-427.

[123] Xue Min, Xing Mengdao, Gao Yuexin, et al. A high-resolution and robust microwave correlation imaging method based on URRF using MC-AAMPE algorithm[J]. Remote Sensing, 2024, 16(18): 3481.

[124] 张瑞, 全英汇, 朱圣棋, 等. 基于改进 OMP 算法的稀疏目标微波关联成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7): 1756-1765.
Zhang Rui, Quan Yinghui, Zhu Shengqi, et al. Microwave correlation imaging method based on improved OMP algorithm for sparse targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(7): 1756-1765. (in Chinese)

[125] 马远鹏. 基于时空两维随机辐射场的微波凝视关联成像初探[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
Ma Yuanpeng. Preliminary research on microwave staring correlated imaging based on temporal-spatial stochastic radiation fields[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)

[126] 张健霖. 微波凝视关联成像辐射源设计理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
Zhang Jianlin. Theotical research on radiation source design of microwave staring correlated imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)

[127] 曹凯程. 阵列雷达波前调制前视成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.
Cao Kaicheng. Research on array radar forward-looking imaging technique based on wavefront-modulating[D].

Changsha: National University of Defense Technology, 2022. (in Chinese)

[128] Lin Hang, Liu Hongyan, Cheng Yongqiang, et al. Microwave coincidence imaging with phase-coded stochastic radiation field[J]. Remote Sensing, 2024, 16(20): 3851.

[129] Li Die, Zhu Shitao, Zhang Ming, et al. Synthetic beam scanning and super-resolution coincidence imaging based on randomly excited antenna array[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-14.

[130] Li Die, Zhao Mengran, Nian Yiheng, et al. Sidelobe suppression of scanning synthetic beams based on coincidence imaging array radar[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(1): 695-700.

[131] Guo Yuanyue, He Xuezhi, Wang Dongjin. A novel super-resolution imaging method based on stochastic radiation radar array[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7): 074013.

[132] 程永强, 王宏强, 曹凯程, 等. 微波关联成像研究进展及展望 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12): 114-134.
Cheng Yongqiang, Wang Hongqiang, Cao Kaicheng, et al. Progress and prospect of microwave coincidence imaging(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(12): 114-134. (in Chinese)

[133] Quan Yinghui, Zhang Rui, Li Yachao, et al. Microwave correlation forward-looking super-resolution imaging based on compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(10): 8326-8337.

[134] Yu Xiaoyue, Xiong Qing, Zhang Fangzheng, et al. Photonics-based superresolution radar imaging with space-time-frequency coincidence processing[J]. IEEE Transactions on Radar Systems, 2026, 4: 1016-1024.

[135] Sleasman T, Boyarsk M, Imani M F, et al. Design considerations for a dynamic metamaterial aperture for computational imaging at microwave frequencies[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(6): 1098-1111.

[136] Hunt J, Gollub J, Driscoll T, et al. Metamaterial microwave holographic imaging system[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(10): 2109-2119.

[137] Gollub J N, Yurduseven O, Trofatter K P, et al. Large metasurface aperture for millimeter wave computational imaging at the human-scale[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42650.

[138] Pedross-Engel A, Watts C M, Smith D R, et al. Enhanced resolution stripmap mode using dynamic metasurface antennas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(7): 3764-3772.

[139] Richards M A. Iterative noncoherent angular superresolution (radar)[C]//Proceedings of the 1988 IEEE National Radar Conference. Ann Arbor: IEEE, 1988: 100-105.

[140] Suzuki T. Radar beamwidth reduction techniques[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1998, 13(5): 43-48.

[141] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(1): 55-59.

[142] Dropkin H, Ly C. Superresolution for scanning antenna[C]//Proceedings of the 1997 IEEE National Radar Conference. Syracuse: IEEE, 1997: 306-308.

[143] Yardibi T, Li Jian, Stoica P, et al. Source localization and sensing: A nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(1): 425-443.

[144] Stoica P, Babu P, Li Jian. SPICE: A sparse covariance-based estimation method for array processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(2): 629-638.

[145] Stoica P, Zachariah D, Li Jian. Weighted SPICE: A unifying approach for hyperparameter-free sparse estimation[J]. Digital Signal Processing, 2014, 33: 1-12.

[146] Sutor T, Buckreuss S, Wendler M, et al. Sector imaging radar for enhanced vision (SIREV): Theory and applications[C]//Proceedings of SPIE 4023, Enhanced and Synthetic Vision 2000. Orlando: SPIE, 2000: 292-298.

[147] Omati M M, Karbasi S M, Amini A. Elevating ISAR imaging resolution via 2-D SLIM[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(1): 940-950.

[148] 单荣光, 李士国, 朱力. 去卷积实现雷达方位超分辨[J]. 舰船电子对抗, 1994(1): 9-13.
Shan Rongguang, Li Shiguo, Zhu Li. Radar azimuth super-resolution using deconvolution[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 1994(1): 9-13. (in Chinese)

[149] 丁义元, 杨建宇, 张卫华, 等. 改进实孔径雷达角分辨力的广义逆滤波方法[J]. 电子学报, 1993, 21(9): 15-19.
Ding Yiyuan, Yang Jianyu, Zhang Weihua, et al. Improvement of angular resolution of real aperture radar via generalized inverse filtering[J]. Acta Electronica Sinica, 1993, 21(9): 15-19. (in Chinese)

[150] Zhang Yongchao, Li Wenchao, Zhang Yin, et al. A fast iterative adaptive approach for scanning radar angular superresolution[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(11): 5336-5345.

[151] Zhang Yongchao, Zhang Yin, Li Wenchao, et al. Super-resolution surface mapping for scanning radar: Inverse filtering based on the fast iterative adaptive approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(1): 127-144.

[152] Li Yueli, Liu Jianguo, Jiang Xiaoqing, et al. Angular superresol for signal model in coherent scanning radars[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3103-3116.

[153] Zha Yuebo, Huang Yulin, Sun Zhichao, et al. Bayesian deconvolution for angular super-resolution in forward-looking scanning radar[J]. Sensors, 2015, 15(3): 6924-6946.

[154] Tan Ke, Li Wenchao, Pei Jifang, et al. An I/Q-channel modeling maximum likelihood super-resolution imaging method for forward-looking scanning radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(6):

863-867.

[155] 唐军奎. 小型阵列雷达前视超分辨成像技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
Tang Junkui. Study on forward-looking super-resolution imaging technology of small array radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2023. (in Chinese)

[156] Huo Weibo, Tuo Xingyu, Zhang Yin, et al. Balanced Tikhonov and total variation deconvolution approach for radar forward-looking super-resolution imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 3505805.

[157] Luo Jiawei, Huang Yulin, Zhang Yongchao, et al. Two-dimensional angular super-resolution for airborne real aperture radar by fast conjugate gradient iterative adaptive approach[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(6): 9480-9500.

[158] Zhang Jianning, Qu Haiyou, Li Ruiyuan, et al. Fast 2D weighted generalized sparse iterative covariance-based estimation for scanning radar[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2025, 32: 2364-2368.

[159] 毛德庆, 杨建宇, 杨明杰, 等. IAA-Net: 一种实孔径扫描雷达迭代自适应角超分辨成像方法[J]. 雷达学报（中英文）, 2024, 13(5): 1073-1091.
Mao Deqing, Yang Jianyu, Yang Mingjie, et al. IAA-Net: An iterative adaptive approach for angular super-resolution imaging of real aperture scanning radar[J]. Journal of Radars, 2024, 13(5): 1073-1091. (in Chinese)

[160] Yang Mingjie, Mao Deqing, Jiao Lu, et al. SBSR-Net: Multitype parameters learning-based real aperture radar forward-looking superresolution imaging framework[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2026, 64: 5100814.

[161] 徐浩然, 吴迪, 王树文, 等. 一种机载雷达大范围前视扫描成像新方法[EB/0L]. [2026-07-01]. http://xdld.xml-journal.net/article/doi/10.16592/j.cnki.1004-7859.2025136.
Xu Haoran, Wu Di, Wang Shuwen, et al. A new method for large range forward scanning imaging of airborne radar[EB/0L]. [2026-07-01]. http://xdld.xml-journal.net/article/doi/10.16592/j.cnki.1004-7859.2025136. (in Chinese)

[162] Shen Jiahao, Mao Deqing, Yang Mingjie, et al. Super-resolution imaging of sparse sea surface targets by multifeature divide-and-conquer framework[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 5109915.

[163] Yang Jianyu, Chen Rui, Li Wenchao, et al. Angular ambiguity function and resolution analysis for multichannel radar forward-looking imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 5109213.

[164] 毛德庆. 机载雷达扫描波束超分辨成像方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Mao Deqing. Research on scanning beam super-resolution imaging methods for airborne radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)

[165] Yang Mingjie, Jiang Xinrui, Mao Deqing, et al. Data-driven MM-unrolling network: Radar super-resolution imaging with adaptive parameter learning[C]//2025 IEEE Radar Conference (RadarConf25). Krakow: IEEE, 2025: 734-739.

[166] 项喆, 陈伯孝. 频控阵距离角度解耦发射波束形成方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 212-219.
Xiang Zhe, Chen Baixiao. Range-angle decoupled transmit beamforming with frequency diverse array[J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 212-219. (in Chinese)

[167] Wang Bo, Xie Junwei, Zhang Jing, et al. Dot-shaped beamforming analysis of subarray-based sin-FDA[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019, 20(10): 1429-1444.

[168] Wang Wenqin, So H C, Shao Huaizong. Nonuniform frequency diverse array for range-angle imaging of targets[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2469-2476.

[169] Xu Yanhong, Shi Xiaowei, Xu Jingwei, et al. Range-angle-decoupled beampattern synthesis with subarray-based frequency diverse array[J]. Digital Signal Processing, 2017, 64: 49-59.

[170] 王文钦, 张顺生. 频控阵雷达技术研究进展综述[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 830-849.
Wang Wenqin, Zhang Shunsheng. Recent advances in frequency diverse array radar techniques[J]. Journal of Radars, 2022, 11(5): 830-849. (in Chinese)

[171] 王文钦, 邵怀宗, 陈慧. 频控阵雷达: 概念、原理与应用[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 1000-1011.
Wang Wenqin, Shao Huaizong, Chen Hui. Frequency diverse array radar: Concept, principle and application[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(4): 1000-1011. (in Chinese)

[172] Wang Wenqin. Overview of frequency diverse array in radar and navigation applications[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(6): 1001-1012.

[173] 桂荣华. 频控阵雷达自适应处理关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Gui Ronghua. Research on adaptive processing technology for frequency diverse array radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)

[174] Xu Jingwei, Liao Guisheng, Zhu Shengqi, et al. Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar[J]. Signal Processing, 2015, 113: 9-17.

[175] 许京伟, 兰岚, 朱圣棋, 等. 相干频率分集阵雷达匹配滤波器设计[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(8): 1720-1728.
Xu Jingwei, Lan Lan, Zhu Shengqi, et al. Design of matched filter for coherent FDA radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(8): 1720-1728. (in Chinese)

[176] Zhang Mengdi, Liao Guisheng, He Xiongpeng, et al. Unambiguous forward-looking SAR imaging on HSV-R using frequency diverse array[J]. Sensors, 2020, 20(4): 1169.

[177] Wang Chenghao, Xu Jingwei, Liao Guisheng, et al. A

range ambiguity resolution approach for high-resolution and wide-swath SAR imaging using frequency diverse array[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(2): 336-346.

[178] Lan Lan, Liao Guisheng, Xu Jingwei, et al. Transceive beamforming with accurate nulling in FDA-MIMO radar for imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(6): 4145-4159.

[179] 许京伟, 廖桂生. 前视阵 FDA-STAP 雷达距离模糊杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2015, 4(4): 386-392.
Xu Jingwei, Liao Guisheng. Range-ambiguous clutter suppression for forward-looking frequency diverse array space-time adaptive processing radar[J]. Journal of Radars, 2015, 4(4): 386-392. (in Chinese)

[180] 申继发. 频率分集阵列前视合成孔径雷达三维成像技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
Shen Jifa. Research on 3D imaging technology of frequency diversity array forward looking SAR[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2022. (in Chinese)

[181] 胡梦伊. 频率分集阵列三维合成孔径雷达成像技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
HU Mengyi. Research on three dimensional synthetic aperture radar imaging technology with frequency diverse array[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021. (in Chinese)

[182] 陈小龙, 陈宝欣, 黄勇, 等. 频控阵雷达空距频聚焦信号处理方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 183-193.
Chen Xiaolong, Chen Baoxin, Huang Yong, et al. Frequency diverse array radar signal processing via space-range-Doppler focus (SRDF) method[J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 183-193. (in Chinese)

[183] 巩朋成, 刘刚, 黄禾, 等. 频控阵 MIMO 雷达中基于稀疏迭代的多维信息联合估计方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 194-201.
Gong Pengcheng, Liu Gang, Huang He, et al. Multidimensional parameter estimation method based on sparse iteration in FDA-MIMO radar[J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 194-201. (in Chinese)

[184] Secmen M, Demir S, Hizal A, et al. Frequency diverse array antenna with periodic time modulated pattern in range and angle[C]//2007 IEEE Radar Conference. Waltham: IEEE, 2007: 427-430.

[185] 杨阳, 刘康, 程永强, 等. 基于线性波前调制的雷达前视三维成像方法研究[EB/OL]. [2026-07-01]. https://radars.ac.cn/article/doi/10.12000/JR25214.
Yang Yang, Liu Kang, Cheng Yongqiang, et al. Development of a radar forward-looking three-dimensional imaging method based on linear wavefront modulation[EB/OL]. [2026-07-01]. https://radars.ac.cn/article/doi/10.12000/JR25214. (in Chinese)

[186] 张军, 许京伟, 廖桂生, 等. 相干频率分集阵列雷达发射和差波束测角方法[EB/OL]. [2026-07-01]. https://link.cnki.net/urlid/11.2422.TN.20260601.1722.002.
Zhang Jun, Xu Jingwei, Liao Guisheng, et al. Transmit sum and difference beam of angle measurement method for coherent FDA radar[EB/OL]. [2026-07-01]. https://link.cnki.net/urlid/11.2422.TN.20260601.1722.002. (in Chinese)

[187] Mao Deqing, Zhang Yongchao, Zhu Junyu, et al. Imaging region bound of scanning radar angular super-resolution on motion platform[C]//2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20). Florence: IEEE, 2020: 1-5.

[188] Mao Deqing, Tuo Xingyu, Luo Jiawei, et al. Scanning radar forward-looking imaging under high-speed platform by accurate profile-phase deconvolution method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5107613.

[189] Liu Yibin, Luo Wang Shengbin, Wu Guoqing, et al. Exploiting source amplitude/phase modulation for multi-channel radar forward-looking imaging[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2026, 12: 891-904.

责任编辑　刘飞阳