低空目标探测中的多径处理技术综述

郑娜娥[①] 傅佳庆*[①] 齐 铖[②] 许京伟[③] 陈 松*[①] 岳嘉颖[①]

[①](信息工程大学 郑州 450000)

[②](军事科学院 北京 100093)

[③](西安电子科技大学 西安 710071)

摘要：随着低空经济、低空安防及无人机监管需求的持续增长，低空目标探测已成为雷达感知领域的重要研究方向。由于地面、建筑立面、植被及道路设施等散射体的存在，低空目标回波呈现出强多径、强相干与场景依赖性等复杂特性，给目标检测、参数估计、定位与跟踪带来了显著挑战。同时，多径传播也可作为补充观测信息，为非视距探测、低仰角测高、弱目标增强及协同感知提供新的信息维度与实现可能。该文系统综述了低空场景下的多径传播机理、典型信号模型及其对探测任务的影响，并在“面向任务的信息表征与决策”框架下梳理了相关研究进展。其中，多径抑制部分重点分析检测、参数估计、定位与跟踪中的典型性能退化问题；多径利用部分从能量聚焦与回波增强、几何约束下的参数反演与定位，以及信息融合驱动的持续感知3个层面，总结代表性技术路径。在此基础上，结合相关任务分析多输入多输出(MIMO)雷达的波形分集、虚拟孔径、多视角观测等体制特征对多径分离、参数估计、协同感知及资源优化的影响。最后，探讨了真实场景建模、任务驱动处理、物理先验与数据驱动融合、协同系统工程实现等未来研究方向。

关键词：低空目标探测；多径效应；多径抑制；多径利用；MIMO雷达；非视距探测

中图分类号：TN957 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-283X(2026)x-0001-19

DOI: 10.12000/JR26093 **CSTR**: 32380.14.JR26093

引用格式：郑娜娥, 傅佳庆, 齐铖, 等. 低空目标探测中的多径处理技术综述[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR26093.

Reference format: ZHENG Nae, FU Jiaqing, QI Cheng, *et al*. Review of multipath processing techniques in low-altitude target detection[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR26093.

Review of Multipath Processing Techniques in Low-altitude Target Detection

ZHENG Nae[①] FU Jiaqing*[①] QI Cheng[②] XU Jingwei[③]
CHEN Song*[①] YUE Jiaying[①]

[①](*Information Engineering University*, *Zhengzhou* 450000, *China*)

[②](*Academy of Military Science of the People's Liberation Army*, *Beijing* 100093, *China*)

[③](*Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

Abstract: With the continued growth of the low-altitude economy, rising demand for low-altitude security applications, and expanding regulations on unmanned aerial vehicles, low-altitude target detection has become an important research direction in radar sensing. Owing to the presence of scattering objects such as the

收稿日期：2026-05-15；改回日期：2026-09-24；网络出版：2026-10-15

*通信作者： 傅佳庆 fj_qing777@163.com； 陈松 wirelessmancs@163.com

*Corresponding Authors: FU Jiaqing, fj_qing777@163.com; CHEN Song, wirelessmancs@163.com

基金项目：国家自然科学基金(62422115)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62422115)

责任主编：郭世盛 Corresponding Editor: GUO Shisheng

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ground, building facades, vegetation, and road infrastructure, echoes from low-altitude targets are often characterized by strong multipath effects, high coherence among multipath components, and pronounced scene dependence. These characteristics pose significant challenges to target detection, parameter estimation, localization, and tracking. Meanwhile, multipath propagation can also be exploited as complementary observational information, providing new information dimensions and enabling potential solutions for non-line-of-sight detection, low-elevation height estimation, weak-target enhancement, and cooperative sensing. This paper systematically reviews the propagation mechanisms, representative signal models, and impacts of multipath in low-altitude scenarios, and organizes existing studies under a task-oriented framework of information representation and decision-making. Specifically, the discussion on multipath suppression focuses on typical performance degradation issues in detection, parameter estimation, localization, and tracking, whereas multipath exploitation is summarized from three aspects: energy focusing and echo enhancement, geometry-constrained parameter retrieval and localization, and information-fusion-driven persistent sensing. On this basis, the effects of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar characteristics—including waveform diversity, virtual aperture, and multi-view observations—on multipath separation, parameter estimation, cooperative sensing, and resource optimization are analyzed in conjunction with different sensing tasks. Finally, future research directions are discussed, including realistic scene modeling, task-driven processing, the integration of physical priors with data-driven methods, and the system-level implementation of cooperative sensing.

Key words: Low-altitude target detection; Multipath effect; Multipath suppression; Multipath exploitation; Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar; Non-Line-Of-Sight (NLOS) detection

1 引言

近年来，低空经济及低空安全感知需求快速增长，面向无人机等“低慢小”目标的探测已成为雷达感知领域的重要研究方向。与中高空目标相比，低空目标通常飞行高度低、雷达散射截面积小、机动性强，且常与建筑物、地/海面、植被和道路设施近距离耦合，导致传播环境显著偏离自由空间假设。在城市、园区及复杂地形等典型场景中，电磁波往往经直达、地面反射、建筑物镜面反射、边缘衍射及漫散射等多条路径传播并返回接收端，由此形成显著的多径效应[1,2]。上述目标特性与传播环境的双重复杂性，使得传统面向自由空间的雷达处理理论面临严峻挑战，亟须对低空多径的机理、影响及利用与抑制方法进行系统性梳理与认知。

长期以来，多径通常被视为低空目标探测中的不利因素：一方面，多径会造成目标能量起伏、鬼点、参数估计偏差与轨迹畸变，严重时甚至导致检测失效；另一方面，在低仰角条件下，直达波与反射波常呈高度相干状态，使传统角度估计、测高与定位方法性能显著下降[3]。然而，随着非视距(Non-Line-Of-Sight, NLOS)探测、分布式感知与智能波形设计等研究的推进，学界逐渐认识到：多径并非仅是干扰源，其携带的环境结构、传播几何与目标散射信息同样可转化为有价值的观测资源。

上述认识表明，多径的处理策略不能脱离具体任务和路径条件预先设定。对于目标检测，若非直达分量无法提供独立有效信息，反而形成冗余峰值、鬼点或统计失配，则更适合作为污染观测加以抑制；对于NLOS探测、低仰角参数反演以及遮挡条件下的持续感知，具有稳定能量、可解释几何关系或跨时刻一致性的非直达路径又可能构成有价值的补充观测。因此，低空多径处理的关键在于结合任务目标与路径属性评估不同传播分量的任务相关性，并据此确定其应作为干扰予以抑制，还是作为有效观测加以利用；对于路径归属或作用尚不确定的情况，则需先进行辨识、筛选或置信度评估[4–6]。

从已有综述看，相关研究已从不同侧面形成了较为系统的总结。Yang等人[2]面向海洋环境下的低空目标检测，重点讨论海杂波、多径散射以及二者共同作用条件下的雷达检测问题，其应用背景主要集中于海上低空场景。孔令讲等人[4]围绕多径利用雷达(Multipath Exploitation Radar, MER)，按照空中平台和地面平台梳理了城市遮蔽及NLOS条件下的目标检测、定位、成像等研究，重点在于非直达传播路径的信息利用。刘永祥等人[7]则以稀疏阵列多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达设计和参数估计为主线，对阵列设计、高分辨参数估计及相关处理方法进行了系统总结。上述工作分别从特定应用场景、多径利用机制或特定MIMO参数估计问题出发，为该领域研究奠定了重要基础，但对于低空复杂环境中“同一类多径为何在不同任务下具有不同信息价值”，以及如何结合路径可分辨性、几何可解释性、时序稳定性和系统体制，在检测、参数估计、定位与跟踪等不同任

务中判断多径的处理方向及其适用边界，仍缺少系统性的横向分析。

基于此，本文从任务驱动视角出发，将低空多径处理组织为“面向任务的信息表征与决策”问题。本文的主要综述增量在于建立一条贯穿传播、处理与决策环节的统一分析链路：首先表征不同传播路径的物理与统计属性；其次结合具体任务评估路径所能提供的信息价值；最后综合系统体制、场景先验及工程约束，确定相应的多径抑制或利用方向，并通过路径辨识、筛选和置信度评价等机制降低路径误判带来的处理风险。由此，对多径的判断不再仅依据视距(Line-Of-Sight, LOS)/非视距属性或路径能量强弱进行静态划分，而是进一步考察其在特定任务条件下是否提供有效信息、如何进入处理链路以及以何种方式参与最终决策。

按照上述任务驱动主线，本文首先分析低空场景中的多径传播机理、典型信号模型及其对不同探测任务的影响，并建立面向任务的多径处理机制。随后分别讨论目标检测、参数估计、定位与跟踪中的多径抑制方法及其适用条件，并从能量增益、几何约束和信息融合3个层面梳理多径利用技术。结合相关研究分析不同MIMO体制在路径分离、参数表征、多视角协同与资源优化中的作用[8–11]。最后围绕真实场景与统一评测、路径价值判定、物理先验与数据驱动融合以及分布式协同系统的工程约束等问题讨论未来研究方向。

2　低空目标探测中的多径问题

2.1　低空场景中的多径传播特性

低空目标探测中的多径问题，首先源于复杂环境下电磁传播路径的显著增多。不同于传统自由空间传播或单一地面反射假设，实际低空探测场景通常具有更复杂的散射结构。如图1，在城市街区、园区、山地丘陵以及道路周边等典型环境中，地面、建筑立面、屋顶边缘、树木植被以及道路附属设施等多类散射体共同参与电磁波传播过程，使回波形成机制明显复杂化。电磁波在传播过程中往往会经历镜面反射、边缘衍射、漫散射及多次反射等多种作用，从而形成复杂的多径传播现象[12–14]。

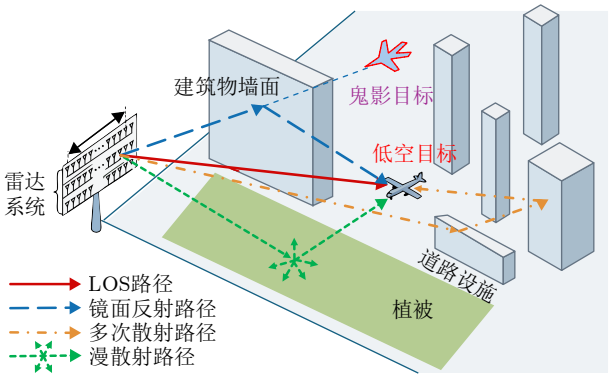

图 1 低空多径传播示意图

Fig. 1 Low-altitude multipath propagation scenario

从不同传播机制看，平整地面和建筑外立面通常会产生能量较强、相位相关性较高的镜面反射回波，是造成低空鬼点和低仰角估计偏差的重要来源[15]；建筑物转角、墙体边缘以及遮挡边界产生的衍射波，则可为非视距区域内目标提供额外的传播通道和观测机会[12,16,17]；而粗糙地表、植被及不规则构件引起的漫散射虽然单条路径能量相对较弱，但会增加背景回波的复杂度，并改变多径信号的统计分布特性[18]。因此，低空环境中的多径并非由单一反射机制主导，而是多种传播效应共同作用的结果。

除传播机制复杂外，低空场景还具有显著的几何耦合特征。由于目标飞行高度低、擦地角小，雷达、目标与散射体之间常处于近距离、强相关的几何构型之中，导致直达径与多径分量在时延、角度和多普勒等参数域上往往难以充分分离[19–23]。尤其在高楼密集的“城市峡谷”环境中，多次反射路径数量进一步增加，多径不再表现为单一附加回波，而是演化为多分量耦合、强相关且随时间、空间和频率共同变化的复合传播现象[13]。这使得低空多径问题呈现出路径类型多、相干性强、几何约束复杂以及场景依赖性显著等特点，也构成了后续多径抑制与多径利用方法设计的物理基础。

进一步研究表明，建筑物密度增加、立面高度升高以及测高仰角减小，都会显著加剧回波时延展宽和测距偏差；基于加权四路径的远场回波生成模型也进一步说明，在低空场景下，目标-环境耦合散射效应及多径传播结构应在建模阶段予以显式考虑[24,25]。因此，面向低空目标探测的多径研究，不能仅沿用理想化单反射假设，而应结合具体场景特征，对传播路径组成、散射体分布及几何关系进行更符合实际的描述。

2.2　典型信号多径模型

从综述层面看，低空多径信号通常可抽象为LOS分量、单次镜面反射分量、漫散射分量以及多次散射复合分量的叠加。若按任务需求进一步区分，还可从可分辨/不可分辨、多径相干/非相干、静态散射体/动态散射体等维度进行建模[18,26–28]。对于面向检测的研究，重点通常在于刻画多径对统计分布、信干噪比和虚警概率的影响，而对于面向估计与定位的研究，则更关注各路径的时延、角度、多普勒及其配对关系。在信号模型层面，近期

研究进一步从精细反射面介质调制、多散射中心等效以及起伏地形未知条件下的虚拟阵列重构等角度扩展了传统镜面反射模型，使低仰角到达方向(Direction Of Arrival, DOA)/高度估计和目标定位能够在较弱先验条件下完成[29–32]。这表明低空多径建模正由“单反射系数+理想平面”向“多散射中心-统计反射-几何约束联合建模”演进。

为便于对不同多径处理方法中的共性路径参数进行统一描述，以下选取窄带相参条件下的集中式MIMO雷达作为基准体制。设发射阵列和接收阵列分别包含M个与N个阵元，并发射相互正交的窄带波形。该基准模型主要用于表征不同传播路径的复幅度、时延、多普勒以及发射/接收角等共同参数，为后续多径检测、参数估计及路径处理方法的比较提供统一的参数描述。

结合低空目标问题的应用场景，通常作如下简化假设：

(1) 雷达工作于窄带相参体制，并满足阵列远场近似；

(2) 目标在一个相干处理时间(Coherent Processing Interval, CPI)内满足准匀速运动，各主导传播路径的时延、角度及多普勒参数在该时间尺度内近似稳定；

(3) 低空场景中的有效多径主要由直达径及少量占主导的非直达路径构成，而高阶复合散射和弱漫散射可并入杂波或等效扰动项；

(4) 当路径在时延、角度或多普勒维上可分辨时，采用显式多路径建模，否则将其影响吸收到等效复幅度中。

在上述设定下，以l表示传播路径索引，其中$l=0$表示LOS直达径，$l=1,2,\cdots,L$表示L条主导非直达路径，可包括镜面反射径、具有明确传播意义的衍射径以及少量强散射路径。第l条路径由复增益α_l、传播时延τ_l、多普勒频移$f_{\mathrm{D},l}$、发射离开角$\theta_{\mathrm{t},l}$和接收到达角$\theta_{\mathrm{r},l}$表征。其中，α_l表示除式中显式时延相位项外的等效复增益，综合反映路径传播损耗、反射/散射系数及其他附加相位效应。

在发射正交波形并完成匹配滤波后，第k个脉冲对应的MIMO阵列接收数据可统一写为

$$\boldsymbol{Y}(k)=\sum_{l=0}^{L}\alpha_l \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_c\tau_l}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{D},l}kT_{\mathrm{r}}}\boldsymbol{a}_{\mathrm{r}}(\theta_{\mathrm{r},l})\boldsymbol{a}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{T}}(\theta_{\mathrm{t},l})+\boldsymbol{W}(k) \tag{1}$$

其中，k为脉冲索引，f_{c}为载频，T_{r}为脉冲重复周期；$\boldsymbol{a}_{\mathrm{t}}(\cdot)$和$\boldsymbol{a}_{\mathrm{r}}(\cdot)$分别表示发射与接收导向矢量，$\boldsymbol{W}(k)$为噪声及未建模杂波项。若进一步对阵列数据进行矢量化，则可得到更适用于参数估计与检测分析的统一表达：

$$\boldsymbol{x}(k)=\mathrm{vec}(\boldsymbol{Y}(k))=\sum_{l=0}^{L}\alpha_l \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_c\tau_l}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{D},l}kT_{\mathrm{r}}}\cdot\boldsymbol{b}(\theta_{\mathrm{t},l},\theta_{\mathrm{r},l})+\boldsymbol{w}(k) \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{b}(\theta_{\mathrm{t},l},\theta_{\mathrm{r},l})=\boldsymbol{a}_{\mathrm{t}}(\theta_{\mathrm{t},l})\otimes\boldsymbol{a}_{\mathrm{r}}(\theta_{\mathrm{r},l})$表示虚拟阵列导向矢量，$\otimes$表示Kronecker积，$\boldsymbol{w}(k)=\mathrm{vec}(\boldsymbol{W}(k))$为对应扰动项的向量化形式。式(2)表明，雷达低空探测的多径本质上是不同传播路径在时延、多普勒、发射角和接收角等多维参数域上的叠加；而后续各类算法，无论是波束形成、子空间分解、压缩感知还是空时自适应处理，本质上都是围绕这些关键参数的分离、估计、抑制或利用展开。

式(1)和式(2)给出了窄带相参、集中式MIMO条件下的基准路径表示。在高距离分辨、超宽带(Ultra-WideBand, UWB)或调频连续波(Frequency-Modulated Continuous-Wave, FMCW)等宽带条件下，传播时延需要进一步在快时间、距离或拍频维中显式保留，不能仅等效为载频相位项。对于空间分散的分布式MIMO雷达，传播参数还与具体发射-接收节点对及双基地几何相关，需要在相应链路上分别描述时延、多普勒和角度关系。对于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)等平台运动成像体制，则还需显式考虑平台慢时间运动和场景散射分布。尽管观测形式随体制而异，复增益、时延、多普勒、角度、路径可分辨性和时空稳定性仍构成多径检测、估计、抑制与利用方法的主要分析维度。

2.3 多径对低空探测任务的影响

如表1所示，多径对低空目标探测的影响体现在检测、估计、定位和跟踪等多个层面，其作用首先表现为回波幅相、参数耦合关系和观测几何的变化，并进一步传导至具体任务性能。对于目标检测而言，多径回波与直达波的叠加会改变目标回波幅度和检测统计量分布，进而造成检测门限失配和虚警增加；当多径分量在距离-方位或速度-方位平面上形成稳定峰值时，系统还可能将其误判为真实目标，产生典型的多径鬼点[15,20,27,33,34]。在低信噪比条件下，弱小目标本就易被杂波掩盖，多径带来的随机相长/相消叠加会进一步放大检测结果的不确定性[35,36]。

对于参数估计与定位而言，低仰角场景下直达波与反射波角度差极小且高度相干，易使DOA估计、测高和角度-距离联合求解出现显著偏

表 1　多径对不同低空目标探测任务的影响及关键处理因素

Tab. 1　Multipath effects and key processing factors for different low-altitude target sensing tasks

任务类型	多径的主要作用形式	典型任务后果	处理时的关键判据
目标检测	改变目标回波幅相及检测统计量，并可能形成额外峰值	检测概率变化、门限失配、虚警或鬼点产生	多径分量与真实目标的相关性及其对检测统计量的净贡献
参数估计与低仰角测高	直达径与反射径相干叠加，引起角度、时延、多普勒等参数耦合	测角、测高及联合参数估计偏差	路径可分辨性、相干程度以及传播模型可辨识性
目标定位	非直达传播改变传播距离和观测方向，并可能形成附加传播几何	按LOS模型处理时产生定位偏差；具备可靠路径模型时可形成附加位置约束	路径几何可解释性及路径-目标配对可靠性
目标跟踪	多径量测随时间持续或消失，并进入数据关联和状态更新	虚假航迹、错误关联、状态跳变或观测连续性变化	跨帧稳定性、量测可关联性及其与目标运动状态的一致性

差[19,22,23,37–44]。传播环境存在遮挡时，若仅依赖LOS路径，距离或角度估计甚至可能失效；同时，脉冲时延展宽和多路径配对不确定性也会进一步降低定位精度[45–47]。对于目标跟踪而言，多径鬼点若在连续时刻保持较高相关性，容易诱发虚假航迹生成、真实航迹跳变以及数据关联混淆；在分布式系统中，节点间同步误差与多径耦合还可能导致观测配对错误和状态融合偏差[48–50]。因此，多径影响并不局限于单次量测误差，而会沿检测、估计与关联链路持续累积。

上述影响在不同任务中对应不同的处理重点。目标检测主要关注多径对检测统计量、虚警和目标可分性的影响，参数估计与低仰角测高主要关注路径相干和参数耦合。目标定位更依赖传播几何及路径配对关系，目标跟踪则进一步涉及跨时刻量测关联和状态递推。因此，多径处理不能脱离具体任务讨论，其关键判断因素也随任务层级而变化。表1对此进行了归纳[4,16,17,28,45,46,51–58]。

2.4　面向任务的多径处理机制

前述分析表明，检测、参数估计、定位和跟踪对传播路径信息具有不同要求。因此，多径处理的核心并不是依据LOS/NLOS或反射、衍射等传播类型直接给出固定策略，而是首先表征路径属性，再判断相关信息是否满足当前任务的处理要求。在此基础上，本文将低空多径处理概括为“任务与场景条件—路径属性表征—路径任务价值评价—处理方式选择”4个相互衔接的环节。

任务与场景条件决定路径信息所处的应用背景，包括检测、参数估计、定位和跟踪等任务目标，以及LOS/NLOS状态、环境结构、阵列和波形体制、单站或分布式布设等条件。在此基础上，需要进一步表征不同路径的关键属性。对于检测与参数估计，主要关注路径在时延、角度和多普勒等参数域中的可分辨性以及不同分量之间的相干程度；对于定位，还需判断传播路径与反射面、目标位置之间是否具有可靠的几何映射；对于连续跟踪和多节点融合，则进一步涉及路径的跨时刻稳定性和跨节点可配对性。

路径属性本身并不直接决定采用何种算法，还需要结合当前任务判断其信息是否有效。对于目标检测，应考察相关路径进入判决统计量后能否改善目标与背景之间的可分性；对于参数估计，应判断其是否能够提供可辨识的独立参数信息，或相反导致阵列流形和参数模型进一步耦合；对于定位，应考察额外路径是否能够转化为一致的传播几何约束；对于跟踪，则需要判断相关量测能否与真实目标保持稳定的跨帧关联。由此，多径的处理依据由单纯的传播类型判别进一步转化为面向具体任务的信息有效性判断。

根据上述判断，后续处理可归结为多径抑制(multipath suppression)和多径利用(multipath exploitation)两种基本方向。当相关非直达分量难以与真实目标建立可靠对应，或主要造成冗余峰值、参数耦合、统计失配和错误关联时，应通过路径辨识、滤波、协方差修正、参数解耦或量测处理降低其影响；当相关路径能够被可靠辨识或建模，并能够提供目标相关能量、独立参数信息、几何约束或持续观测时，则可将其纳入联合检测、参数反演、目标定位或信息融合过程。对于可靠性不足或暂时难以判定的路径，可先通过路径筛选、置信度评价和自适应加权降低错误处理风险。

除路径和任务条件外，处理方式还受到系统实现条件限制。集中式MIMO雷达的虚拟孔径和离开方向(Direction Of Departure, DOD)/DOA联合表征有利于提高路径区分能力；分布式MIMO雷达的多视角和空间分集可改善遮挡条件下的空间可观测性[59]。与此同时，环境先验、同步精度、通信带宽和计算资源也决定了理论上可辨识或可利用的路径能否稳定进入实际处理链路。这些体制自由度将在后续多径抑制与利用方法中结合具体任务进一步体现。处理结果还可用于更新后续时刻的路径置信度

或感知资源配置，使路径价值评价随任务状态和场景条件变化动态调整。上述任务条件、路径属性、信息有效性及处理方向之间的关系如图2所示。

按照上述逻辑，第3节集中讨论需要降低多径不利影响时的主要抑制技术，并分别分析检测、参数估计、定位与跟踪环节中的代表性方法；第4节则进一步讨论满足可靠利用条件的非直达路径如何转化为检测增益、参数与几何约束以及持续感知信息。后续两节均以2.4节中的任务要求和路径属性作为比较方法适用条件的主要依据。

3 面向低空目标探测的多径抑制技术

当多径相关分量难以形成可靠的任务信息，并主要造成鬼点、参数失配或错误量测时，需要降低其对后续处理的影响。由于多径在检测、参数估计、定位与跟踪中的作用环节不同，相应方法分别侧重于伪峰辨识与统计抑制、相干路径解耦以及量测关联和状态估计等问题。本节沿用上述任务划分，在梳理代表性研究的同时，重点比较不同方法所依赖的信息、先验条件及适用范围[8,26,28,60,61]。

3.1 面向目标检测的多径抑制技术

面向目标检测的多径抑制，核心在于抑制鬼点、减少虚警并提高弱小目标的可检测性。从接收端处理方式看，相关方法主要包括两类：一类利用角度、距离或速度等特征差异直接识别多径；另一类则通过协方差重构、杂波抑制和图像后处理等方式削弱多径分量。对于前者，频率分集阵(Frequency Diverse Array, FDA) MIMO雷达可利用发射频率分集引入的距离-角度耦合特征在联合域区分真实目标与多径分量，从而降低高阶多径导致的虚假峰值。相较于传统相控阵主要依赖接收角分辨的方式，该体制额外提供了可用于鬼点判别的距离维自由度[62]。稀疏MIMO雷达则可借助DOD/DOA差异实现一、二阶多径鬼点识别，无须精确场景先验[20]。在低仰角场景中，稀疏布阵综合脉冲孔径雷达(Synthetic Impulse and Aperture Radar, SIAR)及压缩感知方法能够利用高分辨角域信息分离目标与其镜像[21]。

对于复杂干扰背景下的检测问题，多径抑制常与欺骗干扰抑制、杂波抑制和图像去伪影结合进行。此时，问题往往不再是单纯识别某一条反射路径，而是抑制多径分量在复幅度α_l的起伏以及时延、多普勒叠加后所造成的统计失配和伪峰扩散。针对甚高频(Very High Frequency, VHF)频率分集MIMO雷达，已有研究通过广义多重信号分类(MUltiple SIgnal Classification, MUSIC)与匹配Capon重构协方差矩阵，实现多径鬼点与欺骗干扰虚警的同步抑制。其优势在于FDA与MIMO联合流形同时利用了频率分集和发射-接收观测维，相较于传统主要依赖后端统计抑制的方法，更容易在前端形成对鬼点和干扰的区分依据[33]。针对室内MIMO调频连续波雷达，多径可在速度-方位域中通过DOD/DOA差异进行识别，从而在不依赖反射几何先验的情况下削弱伪目标影响[63]。对于室内共址MIMO雷达，还可利用距离-多普勒图中的几何关系和霍夫变换完成多径鬼点识别[34]。在成像场景中，基于卷积神经网络的多径伪影过滤方法也被用于抑制断层图像中的虚假散射点或成像伪影，提高后续检测可靠性[64]。进一步地，知识辅助广义多径自适应检测器与可分辨多径自适应检测方法，通过引入环境先验或构建更贴合传播机理的统计模型，减轻异质杂波和训练样本失配对检测门限的影响[26,28]。

除接收端路径辨识与统计抑制外，部分研究进一步利用发射和空时处理自由度改善多径条件下的检测性能。稳健MIMO波形设计、收发资源联合分配以及软件定义雷达的发射波束控制，通过波形或资源优化提高未知多径条件下的输出信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)/信杂

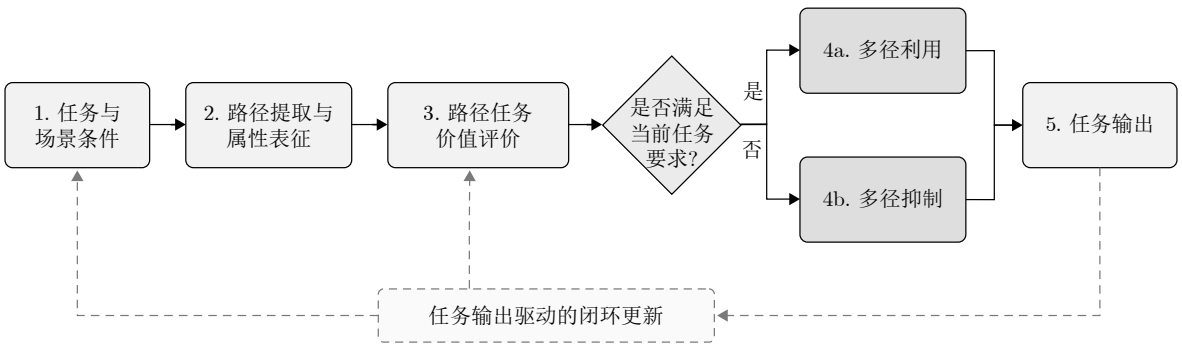

图 2 面向任务的低空多径处理机制框架

Fig. 2 Task-oriented framework for low-altitude multipath processing

噪比(Signal-to-Clutter-plus-Noise Ratio, SCNR)[60,61,65]。面向掠海或超低空弱小目标，稀疏恢复空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)、多分辨STAP以及基于深度学习的“广义目标”检测方法，则分别利用空时稀疏结构、多尺度杂波特征和数据驱动表征增强复杂背景中的检测鲁棒性[66–69]。

横向比较来看，检测阶段的多径抑制主要依赖3类信息基础。基于距离、角度、速度及DOD/DOA差异的显式辨识方法具有较强的物理可解释性，但要求真实目标与多径在至少一个参数维度上存在可区分结构。协方差重构、知识辅助检测和STAP类方法不必逐条解释传播路径，更适合多径与杂波共同存在的复杂背景，但其性能依赖训练样本和统计模型的可靠性。深度学习及发射端波形/资源优化方法能够利用高维特征或主动自由度处理复杂多径，却分别受到训练数据泛化能力和系统反馈/资源条件的约束。因此，各类方法的差异主要体现在所依赖的信息来源及实现条件，而不存在脱离路径可分辨性、背景统计稳定性和系统自由度的统一最优方案。

3.2 面向参数估计的多径抑制技术

参数估计层面的多径抑制主要应用于低仰角测角、测高以及角度-距离联合估计等任务，其目标是削弱直达波与反射波高度相干所带来的偏差和失配。就信号表征而言，这类问题的困难主要在于低仰角条件下不同路径对应的虚拟阵列导向矢量$\boldsymbol{b}(\theta_{\mathrm{t},l},\theta_{\mathrm{r},l})$往往高度相干，且复幅度$\alpha_l$、角度$\theta_{\mathrm{t},l}$和$\theta_{\mathrm{r},l}$与时延参数$\tau_l$相互耦合，导致传统测角和测高方法容易出现系统性偏差。现有方法一方面通过改进子空间算法、稀疏表示和张量分解来提高分辨能力，另一方面也通过阵列构型和波束空间变换来改善观测条件。比如，针对多输入多输出-正交频分复用(Multiple-Input Multiple-Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MIMO-OFDM)场景，可利用块稀疏贝叶斯学习实现极低仰角条件下的高分辨仰角估计[19]。在米波MIMO雷达中，基于空间平滑的传统旋转不变技术信号参数估计(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique, ESPRIT)方法能够缓解多径相干带来的估计退化[22]。基于特征博弈器的DOA估计算法提高了经典超分辨算法的估计性能[70]。复杂地形下的两步张量方法则通过高阶奇异值分解(Higher-Order Singular Value Decomposition, HOSVD)和稀疏贝叶斯学习(Sparse Bayesian Learning, SBL)/广义MUSIC联合处理实现更稳健的低仰角估计[38]。

阵列与波束空间优化是另一类重要思路。稀疏阵列、互质阵列和波束空间处理已被广泛用于低仰角测高和低仰角估计，通过提升有效孔径、降低维数或提高波束指向性来抑制多径影响[23,37,40–44]。例如，基于稀疏阵列和互质阵列的米波MIMO测高方法能在复杂地形和超低空条件下改善高度测量的稳定性，其体制优势在于可通过发射-接收联合构造更大的虚拟孔径，在物理阵元数受限条件下仍保持较高角度分辨力，这一点是传统相控阵难以同时兼顾的[40,41]。波束空间联合迭代、波束空间场景分类及降维改进最大似然算法(Refined Maximum Likelihood, RML)等方法，则通过波束域白化和维数压缩提高低仰角估计的精度与实时性[42–44]。此外，机载MIMO雷达中的数据融合DOA估计[71]以及无须精确传播环境先验的迭代测高方法[72]，也体现了参数估计中“先抑制偏差，再求高精度”的基本思路。

近年来，面向低空目标探测的参数估计呈现出“模型修正+稀疏/学习/超分辨求解”并行发展的趋势。精细反射模型下的SBL测高、低仰角估计、基于特征反演的深度神经网络测高、目标高度与多径衰减联合估计以及基于相关矩阵空间平滑的高度估计等研究表明，在复杂传播条件下结合模型修正与结构化求解有助于提高参数估计稳健性[30,73–76]。针对多散射中心与模型失配问题，等效散射中心建模及多孔径超分辨处理也被证明能够显著改善低空角度估计性能[29,31,77]。

综合现有研究，低仰角参数估计方法的主要差异在于对强相干和模型失配的处理方式。空间平滑、ESPRIT、稀疏表示及张量分解主要利用阵列与数据结构恢复可辨识参数，对精确场景几何依赖较弱，但在阵列流形误差、低信噪比或路径高度不可分辨时性能易退化。稀疏阵列、互质阵列和波束空间方法通过扩展有效孔径或改变数据表示改善低仰角估计条件，其收益同时受到阵列构型、计算复杂度和实时性约束。精细反射模型、学习型反演及多散射中心建模则直接针对传播模型误差进行修正，物理针对性更强，但对反射参数、环境先验或训练数据提出更高要求。因此，不同参数估计方法的适用边界主要由路径相干程度、阵列模型准确性、环境先验完备程度以及实时处理要求共同决定。

3.3 面向目标定位与跟踪的多径抑制技术

目标定位与目标跟踪在任务定义上并不相同：前者主要关注当前观测条件下的位置解算，后者还

需要利用跨帧量测进行状态递推与航迹维持。但在多径抑制问题中，两者均涉及错误路径配对、异常量测及其向后续状态处理的传播，因此本节从量测与状态处理层面对二者进行关联讨论。在这一处理层面，多径抑制的主要目标是避免鬼点和错误配对引起的定位偏差、虚假航迹、状态跳变及融合误差。与检测和参数估计相比，该问题更加依赖跨时刻、跨传感器的一致性约束，即在信号层完成路径辨识后，还需要在量测关联和状态更新中进一步限制错误信息传播。现有工作中，基于多径扩展投影的毫米波雷达室内目标跟踪方法通过随机矩阵模型表征目标几何形状，并结合多径识别结果抑制虚假轨迹生成[48]；多观测数据关联方法则通过显式建模多时刻、多路径量测之间的匹配关系，降低错误路径配对概率，从而提升定位结果的稳健性[45]。

在分布式系统中，多径抑制还需兼顾同步误差和异构观测的影响。针对非正交波形与同步误差并存的分布式MIMO雷达，已有研究通过相干检测器和混合检测器处理时延、频偏和相位偏差带来的互相干扰，从而改善后续量测质量[49]；针对一般分布式MIMO系统，鲁棒联合检测-估计框架则可结合聚类与配对机制，在存在同步误差时降低多径对多普勒-时延配对的破坏[50]。此外，在低仰角跟踪场景中，雷达-目标分配与波束资源调度可通过优化观测几何和量测质量，间接削弱多径导致的关联歧义与状态抖动[78,79]。

与单帧检测和参数估计相比，多径误差进入跟踪链路后会通过量测关联、状态更新和协方差传播持续累积。多径量测通常具有明显的非线性、非高斯及时变特征，其统计性质随目标-雷达-散射体几何关系和遮挡状态变化而改变。更重要的是，部分鬼点在连续时刻可能表现出一定的运动连续性，使其在短时间窗内难以仅凭运动学特征与真实目标区分。因此，跟踪阶段需要同时处理量测偏差、错误关联和模型失配，而不能仅依赖单帧量测清洗。

低仰角多径跟踪并非近年来才出现的问题。较早的单脉冲雷达研究已针对镜面反射与漫反射引起的角度偏差开展补偿与跟踪研究，将多径造成的量测误差显式纳入跟踪过程[80]。在此基础上，后续研究进一步从性能界和模型切换角度分析多径参数对状态估计的影响，面向城市多无人机的广义标签多伯努利(Generalized Labeled Multi-Bernoulli, GLMB)方法则进一步将复杂传播条件表现出的统计失配纳入多目标滤波过程[81]；后验克拉美罗界(Posterior Cramér-Rao Bound, PCRB)与交互式多模型(Interacting Multiple Model, IMM)方法表明，多径模型失配和状态转移不确定性会直接改变跟踪精度和稳定性[82]。从发展脉络看，该方向已经由早期的量测偏差补偿和多模型滤波，逐步扩展到复杂场景下的路径关联、模型失配识别和多目标状态估计。

从处理层级看，现有方法各有明确的适用条件。路径或量测级方法能够在错误观测进入滤波器之前进行辨识和筛除，物理解释较直接，但当鬼点与真实目标具有相近的短时运动特征时容易出现关联模糊。状态级滤波和模型切换方法能够利用跨帧运动一致性增强判别能力，但依赖状态模型、量测误差统计及模式转移假设的准确性。分布式联合检测、配对和资源调度方法可以利用多节点及观测几何降低单站歧义，但需要额外解决同步、通信和跨节点路径配对问题。由此，跟踪阶段的主要难点已由单纯的多径抑制扩展为路径辨识、量测关联与状态估计之间的协同处理。

4 面向低空目标探测的多径利用技术

在路径任务价值评价的基础上，多径利用的关键在于识别可靠非直达路径能够为当前任务提供何种增量信息。按照路径信息进入任务处理链路的方式，现有研究可归纳为3个层次：一是通过相干积累、统计融合或主动波形/传播环境调控，将附加传播能量转化为检测增益；二是利用时延、角度、多普勒以及反射/衍射几何形成额外参数约束，用于低仰角参数反演、测高与NLOS定位；三是将具有稳定关联关系的多路径、多时刻和多节点观测纳入状态估计与场景感知，以提高遮挡条件下的持续观测能力。NLOS探测可根据其所利用的信息形式归入能量增益或几何反演范畴，可重构智能反射面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)和认知波形则主要作为增强或主动塑造有利传播路径的系统实现手段。需要说明的是，多径利用的收益依赖于路径的可解释性、几何稳定性以及任务匹配度；在实际工程中，并非所有非直达路径都适合直接利用。

4.1 基于能量聚焦与回波增强的检测增益技术

基于能量聚焦与回波增强的多径利用，核心在于将原本分散于非直达路径中的回波能量转化为检测增益。其着力点通常不在于逐条分离所有路径，而在于通过对有利路径复幅度α_l的相干累积或稳健融合，提高有效回波在总观测中的占比。时间反转技术是其中最具代表性的方法之一：通过对回波进行时间反转和再发射，可在多径环境中实现能量聚焦，从而提高接收端输出信噪比(Signal-to-Noise

Ratio, SNR)和检测概率；在MIMO雷达体制下，时间反转还可结合多发多收观测维度进一步增强多径能量聚焦与目标检测能力[27,83–85]。对具有镜面反射特征的场景，若能正确建模直达波与反射波之间的关系，则多径甚至可以直接增强目标可检测性，而不必被完全视为干扰[15,86]。在部分均匀背景下的多径利用雷达研究中，目标回波被建模为直达波与多径分量的联合观测，并通过受限广义似然比检验(Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT)直接融合两者信息，提高了点目标检测性能[87]。

多径利用在非视距检测中体现得尤为明显。针对L形拐角和建筑遮挡场景，超宽带和毫米波雷达可依托反射和衍射路径实现绕角探测，从而突破单纯依赖LOS的限制[16,17,51,52,54,88]。在道路和城市环境的毫米波雷达研究中，多径点反演、雷达截面积(Radar Cross Section, RCS)与空间分布特征分析以及主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)杂波抑制等方法，均被用于在保留有用反射信息的同时提升NLOS检测与识别能力[89]。此外，在低空微小目标场景中，多径相关微多普勒特征还可作为目标特征表征与后续类别识别的补充信息[90,91]。

进一步地，检测增益类多径利用正在与波形设计、被动协同探测和智能环境调控深度融合。MIMO波形设计、时间反转波形协方差优化以及异质环境自适应波形设计，可围绕已知或统计意义上的多径结构主动增强有利路径回波。其关键在于MIMO体制具备波形分集和发射-接收联合设计能力，能够在发射端就对不同路径进行有选择的能量塑形，这与传统相控阵更多依赖接收端被动处理的方式存在明显区别[92–94]。在认知MIMO网络和分布式传感器网络中，面向低掠角或低空多目标检测的功率分配与协同优化，能够进一步提升多路径条件下的整体检测收益[95,96]。RIS辅助通感一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)-RIS辅助被动检测以及无源雷达参考信号重构，则把多径利用从“被动依赖自然反射”拓展到“主动塑形与辅助增强”的新阶段[97–99]。此外，FMCW-MIMO、分布式毫米波MIMO和相控阵MIMO(Phased Array-Multiple Input and Multiple Output, PA-MIMO)等体制在弱目标探测中也展现出整合散射能量、提升检测概率的优势[18,36,69,100–102]。

综合现有研究，检测增益类多径利用在信息获取方式上存在明显差异。时间反转、相干积累和联合GLRT主要利用目标相关路径之间的幅相或统计结构实现能量积累，其性能依赖有效路径在处理时间内具有足够稳定的传播关系。绕角探测、NLOS检测则依赖反射或衍射通道与真实目标之间能够建立较可靠的对应关系，在场景散射复杂或路径与杂波难以区分时容易出现虚警增大。波形优化、功率分配、RIS及其他主动调控方法进一步利用系统自由度增强有利传播分量，能够提高路径可控性，但同时要求一定的环境状态信息、反馈能力和资源调度条件。因此，检测任务中多径利用的有效性不仅取决于附加能量大小，还取决于传播稳定性、目标相关性以及为获得和控制这些路径所需的系统条件。

4.2 基于几何约束的参数反演与定位技术

基于几何约束的多径利用，核心是将可解释传播路径的时延、DOD/DOA及多普勒等观测转换为目标位置、高度或角度-距离联合估计中的附加约束。与3.2节主要针对强相干路径进行解耦和偏差抑制不同，此类方法首先辨识或建模非直达路径的传播关系，再利用其额外参数维度改善目标状态的可观测性。典型例子是低仰角目标的高度、仰角以及角度-距离联合估计。FDA-MIMO雷达可借助距离-角度耦合特性实现低仰角与距离的联合求解，为区分同向不同距或同距不同向目标提供了新的参数维度，这一能力来源于MIMO发射维与频率维的联合设计。相较于传统相控阵主要依赖角域分辨，FDA-MIMO在同向异距目标和多径分离方面具有更明显优势[37,103]，而降维处理与多目标参数解耦可将高维联合估计问题分解为低维子问题，在保持估计精度的同时降低计算复杂度。时间反转距离估计方法则利用多目标多路径回波的匹配关系，实现低仰角群目标的距离估计与配对[104]。张量分解技术通过设计高阶张量模型和快速实值张量传播子方法，实现高效DOA估计，进一步拓展了阵列构型的适配范围，降低了计算复杂度[105,106]。免搜索矩阵束算法则通过数据重构与多维参数快速求解避免了复杂的参数搜索过程，兼顾了估计精度与计算效率[107]。

在NLOS与遮挡场景中，多径几何关系更是位置反演的核心。多观测数据关联和多径辅助定位方法可通过反射路径重建目标位置，实现密集杂波环境中的目标定位[45,46]；绕角雷达和城市遮蔽环境中的目标定位方法则进一步利用L形建筑、墙角和立面的多路径结构完成目标参数反演[16,17,51,53,54,56,88,108]。此外，穿墙雷达及复杂壁参数不确定场景下的成像与定位研究，也体现了通过多径反演环境与目标参数的思路；其中，基于稀疏重构的多径利用成像方

法进一步说明，多径可由伪影来源转化为可参与成像反演的结构化信息[109,110]。

多径辅助参数反演的适用范围仍在持续扩展。超视距雷达可利用本地多径分量的多普勒特征改善目标高度估计分辨率，双基地MIMO波束空间最大似然方法则通过发射/接收两侧信息融合获得闭式高度估计[111,112]。对于起伏且先验未知的多径环境，结合原子范数最小化与交替方向乘子法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)求解的定位方法，进一步提高了阵列孔径利用率和求解稳健性[32]。同时，动态环境下基于稀疏贝叶斯学习的多径利用自适应波束形成，可通过显著路径辨识与协方差重构增强可解释几何约束，为参数反演提供更稳定的观测基础[113]。总体来看，几何约束类的多径利用，正由“利用单条反射路径”走向“利用多路径几何与统计结构联合反演”。

从约束形成方式看，现有方法可进一步分为3个层次。FDA-MIMO、多维参数联合估计、张量和矩阵束等方法主要通过增加距离-角度-收发维等观测维度提高路径和目标参数的可辨识性，其性能首先受到阵列模型和多维参数分离能力的限制。显式NLOS定位和多径辅助成像方法直接利用建筑立面、墙角或传播路径与目标之间的几何关系，物理解释最为直接，但对场景模型和路径配对误差较敏感。原子范数、稀疏贝叶斯学习等方法则试图在环境先验不完备时恢复有效路径或等效约束，能够降低对精确几何模型的依赖，但通常需要承担更高的优化求解与计算开销。因此，几何约束类多径利用的关键不在于增加路径数量，而在于获得可辨识、可配对且能够提供独立信息的有效约束。

4.3 基于信息融合的持续跟踪与环境感知技术

基于信息融合的多径利用强调将多路径、多时刻和多节点观测共同纳入状态估计与场景理解过程。对于持续跟踪任务，具有稳定关联关系的多径可在LOS不稳定或短时遮挡条件下提供补充观测，从而改善状态更新的连续性与稳健性。几何算术平均法通过分离目标与镜像仰角实现低空目标仰角跟踪[114]。与此同时，PCRB分析、IMM建模和GLMB滤波等相关研究表明，在将多径信息纳入持续跟踪过程中，还需要显式考虑传播条件变化及其引起的模型与统计失配[81,82]。

除持续跟踪外，多径信息还可与多站观测及成像结果融合，用于遮挡场景下的环境感知与非视距信息获取。基于多站协同显著路径筛选的多径利用成像方法通过在信号层和图像层联合抑制多径伪影，提高了非视距遮蔽目标的成像质量[55]。在低空无人机载合成孔径雷达三维成像中，多径模型、关键平面提取和可达域分析可进一步实现城市峡谷区域非视距目标的重定位与可视范围扩展[57,58]。对于分布式MIMO雷达，信号级融合、低比特量化传输及高度估计等研究则表明，多节点信息融合有助于在工程约束下提升状态估计与场景感知能力，相较于传统单站体制，这类方法更能利用多视角观测和空间分集维持遮挡条件下的路径可见性，并降低单一路径失效带来的性能波动[115–117]。

从信息组织层级看，持续感知中的多径利用可分为时间维、空间维和资源反馈3个层面。时序状态建模利用路径及目标运动在连续时刻的相关性维持状态更新，其有效性主要依赖路径的跨帧稳定性和量测关联可靠性。多站成像和分布式MIMO融合进一步利用节点间的空间互补性改善遮挡条件下的可观测范围，但需要满足基本的同步、几何配对和通信条件。认知波形选择则根据跟踪结果进一步反馈调整感知资源[118]，能够使路径利用由被动融合转向任务驱动的动态配置，但对闭环反馈时延和系统资源管理提出了更高要求。由此，信息融合型方法的关键并非简单增加观测数量，而是保证进入状态更新和场景感知过程的多径信息在时间、空间或任务反馈层面具有可靠的一致性。为便于从任务、雷达体制、处理方向及适用条件等维度进行横向比较，表2对前述代表性多径处理方法进行归纳。

5 挑战与展望

尽管低空多径处理已由单纯抑制逐步拓展至抑制与利用并重，但在真实场景适应、路径价值判定、物理信息融合以及分布式工程实现等方面仍存在若干共性问题。

(1) 真实场景与理想模型之间仍存在明显失配。

现有研究多基于静态散射体、有限阶反射、规则边界和理想同步条件展开，而实际低空环境中往往伴随移动散射体、非规则建筑结构、地/海面粗糙反射、遮挡状态变化和高阶复合多径，使得模型假设与外场观测之间存在偏差。更重要的是，当前缺少面向低空复杂场景的统一评测基准，尤其缺少同时包含原始雷达回波、目标真实轨迹、场景几何结构和路径级多径标注的开放数据集。这使得不同算法在多径抑制、多径利用和路径筛选方面难以进行可复现、可比较的验证。

(2) 路径任务价值仍缺少统一的量化判据。

不同传播路径对探测任务的作用取决于其所提供的信息形式及可靠程度。对于目标检测，路径价

表 2　面向不同低空探测任务的多径处理方法对比

Tab. 2　Comparison of multipath processing methods for different low-altitude sensing tasks

任务/场景	典型体制	处理方向	代表方法	关键依据与适用条件	主要特点
目标检测；LOS条件下多径鬼点或复杂背景	单站/共址MIMO	抑制	FDA-MIMO、稀疏MIMO鬼点辨识；协方差重构、知识辅助检测、STAP及学习方法	真实目标与多径在距离、角度、速度或DOD/DOA等维度具有可分辨结构，或背景统计与训练数据具有一定可靠性	可直接抑制鬼点和虚警，对复杂背景具有一定适应性；参数高度重叠、模型失配或跨场景泛化时性能易退化
弱目标/NLOS检测	单站/MIMO/协同系统	利用	时间反转、联合GLRT、绕角探测及多径特征利用	非直达路径与真实目标之间具有较可靠对应关系，目标相关附加能量及传播结构在处理时间内具有一定稳定性	可增强弱目标检测能力并拓展LOS之外的感知范围；路径不稳定或与杂波难以区分时可能增加虚警
低仰角测角与测高	单站/MIMO/稀疏阵列	抑制	ESPRIT、SBL、张量分解、稀疏/互质阵列及波束空间方法	阵列模型较可靠，目标与多径具有一定参数可辨识性，可利用阵列流形或多维参数结构进行解耦	可缓解强相干多径导致的参数估计退化；对阵列误差、模型失配及计算复杂度较敏感
参数反演与NLOS定位	单站/双基地/MIMO	利用	多维联合估计、几何反演、多径辅助定位及稀疏重构	时延、角度、多普勒及反射几何可解释或可恢复，路径来源及路径-目标配对关系较可靠	可引入附加几何和参数约束，改善遮挡条件下的可观测性；对路径配对、环境模型准确性及优化复杂度较敏感
目标跟踪	单站/多站	抑制	路径辨识、数据关联、状态级滤波及资源调度	多径量测与真实目标在跨帧运动一致性、量测统计或传播模型上存在可辨识差异	可降低错误关联、虚假航迹和状态跳变；当鬼点与真实目标短时运动特征接近时区分困难
持续跟踪与环境感知；LOS不稳定或遮挡	分布式MIMO/多节点/SAR	利用	时序状态建模、多站融合、NLOS成像及认知资源配置	多径具有稳定跨帧关联或跨节点互补性，并满足同步、几何配对和通信等基本条件	可提高遮挡环境下的观测连续性与空间覆盖能力；同步、通信、关联误差及实时性约束更加突出

值主要体现为其对检测统计量、目标可分性和虚警水平的影响；对于参数估计与定位，则进一步取决于参数可辨识性、传播几何可解释性及路径配对可靠性；对于目标跟踪，还需考虑路径的跨帧稳定性及其与真实目标状态的一致性。现有方法大多围绕特定任务和场景设计相应判据，不同任务之间缺少具有可比性的统一评价尺度，也难以根据场景和观测状态变化动态判断路径的有效性。因此，如何从任务收益出发建立可量化、可更新的路径价值评价方法，仍是任务驱动多径处理需要解决的关键问题。

(3) 物理先验与数据驱动方法的融合深度仍然不足。

数据驱动方法在多径伪影消除、路径辨识、目标分类和特征提取方面显示出潜力，但其性能高度依赖训练数据规模与场景覆盖度，在低空复杂环境下容易受到样本不足、标注困难和跨场景泛化能力弱的限制。与此同时，射线追踪、几何光学、阵列流形和运动学模型等物理先验虽然能够描述多径形成机制，但在很多学习方法中仍主要作为仿真工具或后验解释手段，尚未充分嵌入网络结构、损失函数或推理过程。因此，如何在保证物理一致性的同时提升学习模型的适应能力，仍是后续研究的重要难点。

(4) 分布式协同多径处理面临同步、通信和实时性约束。

多径利用若从单站扩展到分布式MIMO雷达或多节点协同感知，系统不仅需要判断单条路径是否具有利用价值，还需要解决跨节点路径配对、时间同步、相位一致性和通信传输问题。对于距离维融合，若雷达带宽为B，距离分辨率为$\Delta R = \mathrm{c}/(2B)$。若要求同步误差引入的距离偏差小于距离分辨率的十分之一，则时间同步误差需满足近似条件$\Delta t < 0.1/B$。例如，当$B = 100$ MHz, 500 MHz和1 GHz时，同步误差量级分别需小于约1.0 ns, 0.2 ns和0.1 ns。若进一步进行相干融合，要求更为严苛：当允许相位误差为10°时，10 GHz载频下时间误差需小于约2.8 ps，77 GHz载频下则需小于约0.36 ps。此外，若多节点直接回传原始同相/正交(In-phase/Quadrature, I/Q)数据，通信速率会随节点数、通道数和采样率快速增长，难以满足长期实时部署需求。因此，分布式低空多径处理不能只考虑算法性能，还必须同时考虑同步精度、通信带宽、边缘计算和资源调度等工程约束。

针对上述场景建模、路径判定、方法融合与系统实现问题，未来低空多径处理可从以下几个方面进一步推进。

(1) 构建低空多径开放数据集与数字孪生评测平台。

可围绕典型低空复杂场景建立开放、可复现的多径标注数据集。可优先构建4类数据集。一是面向城市建筑反射与NLOS探测的数据集，用于评估建筑立面、墙角和遮挡边界产生的反射/衍射路径。二是面向园区道路和低空无人机巡航的数据集，用于刻画车辆、行人、植被和道路设施等动态/

半动态散射体影响。三是面向近地低仰角和掠海强反射的数据集，用于评估低仰角强相干多径、海/地杂波耦合和弱目标检测性能。四是面向分布式雷达协同感知的数据集，用于研究跨节点路径配对、同步误差和多站融合问题。数据内容除原始I/Q回波、距离-多普勒图、距离-角度图、点迹和航迹外，还可包含目标真实轨迹、场景三维结构、LOS/NLOS状态、直达径/反射径/衍射径类型、反射体类别、反射阶数、鬼点位置和跨帧路径关联关系。在此基础上，可结合射线追踪仿真与外场实测数据建立数字孪生评测平台，为多径抑制、多径利用、NLOS探测和协同感知算法提供统一测试条件。

(2) 建立路径价值驱动的多径处理判据。

未来可尝试从任务收益角度对多径进行量化评价，而不是仅凭路径类型进行经验判断。对于检测任务，可采用固定虚警率下的检测概率增益、虚警变化和信杂噪比改善衡量路径价值；对于参数估计与定位任务，可利用Fisher信息矩阵、后验克拉美罗界或几何精度因子评估多径约束是否有效；对于跟踪任务，则可结合关联概率、新息一致性、状态协方差收敛和路径跨帧稳定性评估其持续观测价值。基于上述指标，可进一步将路径筛选、置信度评价和自适应加权与抑制和利用方向选择相结合，使多径处理由经验规则逐步转向任务收益驱动的路径级决策。

(3) 发展物理约束的数据驱动多径处理方法。

数据驱动方法在低空多径场景中的性能容易受到训练样本规模、场景差异和传播条件变化的影响，后续研究可进一步将射线追踪模型、几何反射模型、阵列流形和目标运动学等物理先验融入学习框架，形成兼具物理一致性和数据适应性的处理方法。一方面，可结合射线追踪仿真与外场实测数据，生成或补充路径时延、角度、多普勒、反射阶数、LOS/NLOS状态及鬼点等路径级信息，用于网络预训练、数据增强或弱监督学习，降低对大规模人工标注数据的依赖。另一方面，可将可微传播模型或参数化物理模型嵌入网络，使传播几何、路径连续性、阵列响应及能量衰减等物理关系直接参与模型训练和推理。此外，还可通过物理一致性约束限制网络输出，使预测结果与传播机理和场景几何保持合理一致，从而提高模型在低样本、场景变化及模型失配条件下的泛化能力。

(4) 构建同步与通信约束感知的分布式协同处理机制。

分布式MIMO雷达和多节点协同感知仍将是低空多径处理的重要发展方向，但其算法设计应与系统约束协同考虑。未来可根据任务需求选择不同融合层级：在同步条件较好且通信资源充足时，可开展原始回波级或协方差级融合；在同步和带宽受限时，则更适合采用点迹级、路径参数级或决策级融合。与此同时，可发展面向多径场景的在线同步误差校准、跨节点路径配对、显著路径筛选、低比特量化传输和边缘计算方法，减少对原始I/Q数据全量回传的依赖。进一步结合认知雷达、RIS和ISAC等新体制，可在资源调度、传播环境调控和感知通信一体化设计中主动塑造有利传播路径，从而推动多径处理由单点算法优化走向系统级协同优化。

6 结语

本文围绕低空目标探测中的多径处理技术，系统梳理了低空场景中的多径传播机理、典型信号模型及其对目标检测、参数估计、定位与跟踪等任务的影响，并在此基础上分别综述了多径抑制技术与多径利用技术的发展脉络。与单纯按照算法类别进行归纳不同，本文强调从任务目标、路径属性以及包括MIMO体制在内的系统条件出发理解多径作用，将低空多径处理归纳为面向任务的信息表征、路径价值判定和处理策略选择问题。总体来看，低空多径既可能造成鬼点、参数偏差和关联混淆，也可能在遮挡、低仰角、弱信号和协同感知场景中提供额外能量、几何约束和持续观测能力。因此，未来研究需要进一步突破真实场景建模、路径价值量化、物理先验与数据驱动融合以及分布式协同工程实现等关键问题，推动低空多径处理由单点算法优化走向面向复杂场景的系统级感知能力建设。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国务院, 中华人民共和国中央军事委员会. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2023(20): 6–16.
State Council of the People's Republic of China and Central Military Commission of the People's Republic of China. Interim regulations on flight management of unmanned aircraft[J]. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2023(20): 6–16.

[2] YANG Yong and YANG Boyu. Overview of radar detection methods for low altitude targets in marine environments[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2024, 35(1): 1–13. doi: 10.23919/JSEE.2024.

000026.

[3] 胡晓琴, 陈建文, 王永良. 米波雷达测高多径模型研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(4): 651–657. doi: 10.13443/j.cjors.2008.04.036.
HU Xiaoqin, CHEN Jianwen, and WANG Yongliang. Research on meter-wave radar height-finding multipath model[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(4): 651–657. doi: 10.13443/j.cjors.2008.04.036.

[4] 孔令讲, 郭世盛, 陈家辉, 等. 多径利用雷达目标探测技术综述与展望[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(1): 23–45. doi: 10.12000/JR23134.
KONG Lingjiang, GUO Shisheng, CHEN Jiahui, *et al*. Overview and prospects of multipath exploitation radar target detection technology[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(1): 23–45. doi: 10.12000/JR23134.

[5] KROLIK J L, FARRELL J, and STEINHARDT A. Exploiting multipath propagation for GMTI in urban environments[C]. 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, NY, USA, 2006: 4. doi: 10.1109/RADAR.2006.1631777.

[6] SETLUR P, AMIN M, and AHMAD F. Multipath model and exploitation in through-the-wall and urban radar sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 4021–4034. doi: 10.1109/TGRS.2011.2128331.

[7] 刘永祥, 师俊朋, 黎湘. 稀疏阵列MIMO雷达参数估计研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(8): 1560–1576. doi: 10.1360/SSI-2021-0209.
LIU Yongxiang, SHI Junpeng, and LI Xiang. Research progress on sparse array MIMO radar parameter estimation[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2022, 52(8): 1560–1576. doi: 10.1360/SSI-2021-0209.

[8] 齐铖, 谢军伟, 张浩为, 等. 基于防空目标探测与跟踪的雷达资源管理技术研究综述[J]. 信号处理, 2024, 40(11): 1972–1989. doi: 10.12466/xhcl.2024.11.004.
QI Cheng, XIE Junwei, ZHANG Haowei, *et al*. Review of radar resource management technology for air defense target detection and tracking[J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(11): 1972–1989. doi: 10.12466/xhcl.2024.11.004.

[9] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, *et al*. MIMO radar: An idea whose time has come[C]. 2004 IEEE Radar Conference, Philadelphia, PA, USA, 2004: 71–78. doi: 10.1109/NRC.2004.1316398.

[10] GUERCI J R, WICKS M C, BERGIN J S, *et al*. Theory and application of optimum and adaptive MIMO radar[C]. 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1–6. doi: 10.1109/RADAR.2008.4721122.

[11] 何子述, 程子扬, 李军, 等. 集中式MIMO雷达研究综述[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 805–829. doi: 10.12000/JR22128.
HE Zishu, CHENG Ziyang, LI Jun, *et al*. A survey of collocated MIMO radar[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(5): 805–829. doi: 10.12000/JR22128.

[12] LI Songlin, CUI Guolong, GUO Shisheng, *et al*. On the electromagnetic diffraction propagation model and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 884–895. doi: 10.1109/JSTARS.2020.2974529.

[13] LIN Yuqing, QIU Yuqing, LUO Yitong, *et al*. Viability of multipath exploitation in urban canyon: Range profiles analysis in Tomosar imaging[C]. 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024: 10902–10906. doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641147.

[14] JAGTAP S G and KUNTE A S. Novel approaches for target parameter extraction with eigenvalue thresholding and Dolph-Chebyshev windowing in Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar system[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2024, 37(16): e5912. doi: 10.1002/dac.5912.

[15] YANG Yong and WANG Xuesong. Enhanced radar detection in the presence of specular reflection using a single transmitting antenna and three receiving antennas[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(12): 3204. doi: 10.3390/rs15123204.

[16] THAI K P H, RABASTE O, BOSSE J, *et al*. Detection-localization algorithms in the Around-the-Corner radar problem[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(6): 2658–2673. doi: 10.1109/TAES.2019.2897031.

[17] GUO Shisheng, ZHAO Qingsong, CUI Guolong, *et al*. Behind corner targets location using small aperture millimeter wave radar in NLOS urban environment[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 460–470. doi: 10.1109/JSTARS.2020.2963924.

[18] LIANG Yuanyuan, WEN Gongjian, ZHU Lingxiao, *et al*. Target detection performance of distributed MIMO radar systems under nonideal conditions[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(2): 1951–1969. doi: 10.1109/TAES.2023.3344553.

[19] YOON Y S. Elevation angle estimation in a multipath environment using MIMO-OFDM signals[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(23): 4490. doi: 10.3390/rs16234490.

[20] LUO Haolan, ZHU Zhihao, JIANG Meiqiu, *et al*. An effective multipath ghost recognition method for sparse MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5111611. doi: 10.1109/TGRS.2023.3335454.

[21] POURJOULA M, KARBASI M, NAYEBI M M, *et al*. Resolving target and image in low altitude scenarios in synthetic impulse and aperture radars[J]. *Signal Processing*, 2025, 228: 109754. doi: 10.1016/j.sigpro.2024.109754.

[22] QIN Cong, ZHANG Qin, ZHENG Guimei, *et al*. Low angle estimation in MIMO radar based on unitary ESPRIT under spatial smoothing[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2024, 18(10): 1829–1836. doi: 10.1049/rsn2.12619.

[23] 刘旗, 郭瑞, 王佳佳, 等. 低仰角目标高精度波束空间DOA估计方法[J]. 雷达学报(中英文), 2026, 15(3): 860–875. doi: 10.12000/JR25173.

LIU Qi, GUO Rui, WANG Jiajia, *et al*. A high-accuracy beamspace DOA estimation method for low-elevation angle targets[J]. *Journal of Radars*, 2026, 15(3): 860–875. doi: 10.12000/JR25173.

[24] XIONG Jian, XIE Xin, GUAN Xujun, *et al*. Research on radio altimetry in urban environments based on electromagnetic simulation echo modeling technology[J]. *Sensors*, 2026, 26(6): 1932. doi: 10.3390/s26061932.

[25] WANG Zhaolong, TONG Chuangming, WANG Tong, *et al*. A new radar echo generation model for ultra-low altitude targets in far-field conditions[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2022, 2022: 5145743. doi: 10.1155/2022/5145743.

[26] CAO Chun, FAN Chongyi, WANG Jian, *et al*. The knowledge-aided generalized multipath adaptive detector[J]. *Signal Processing*, 2024, 220: 109468. doi: 10.1016/j.sigpro.2024.109468.

[27] XIONG Chao, FAN Chongyi, and HUANG Xiaotao. Multipath exploitation with time reversal waveform covariance matrix for SNR maximization[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3565. doi: 10.3390/rs12213565.

[28] CAO Chun, FAN Chongyi, DU Huagui, *et al*. Adaptive detection for resolvable multipath signal under heterogeneous clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2023, 17(1): 139–152. doi: 10.1049/rsn2.12330.

[29] MA Jianjun, LIU Hongwei, and MA Hui. Low-elevation target DOA estimation based on multi-scattering center equivalent model[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3533. doi: 10.3390/rs14153533.

[30] TANG Derui, ZHAO Yongbo, and ZHANG Shuaijie. Meter-wave radar height estimation based on sparse Bayesian learning under refined reflection model[J]. *Signal Processing*, 2026, 239: 110267. doi: 10.1016/j.sigpro.2025.110267.

[31] MA Jianjun, MA Hui, LIU Hongwei, *et al*. A novel DOA estimation for low-elevation target method based on multiscattering center equivalent model[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2023, 20: 3501605. doi: 10.1109/LGRS.2023.3242977.

[32] LV Fan, ZHANG Xiaokuan, LIU Yuan, *et al*. Target localization method via ANM-ADMM adapted to fluctuant multipath environment without prior knowledge[J]. *Signal Processing*, 2026, 244: 110527. doi: 10.1016/j.sigpro.2026.110527.

[33] LIU Yibin, WANG Chunyang, GONG Jian, *et al*. Robust suppression of deceptive jamming with VHF-FDA-MIMO radar under multipath effects[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 942. doi: 10.3390/rs14040942.

[34] FENG Ruoyu, DE GREEF E, RYKUNOV M, *et al*. Multipath ghost recognition for indoor MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5104610. doi: 10.1109/TGRS.2021.3109381.

[35] FU Zhenzhuo, FANG Yu, and WU Daoqing. Research on radar system compatibility and data processing of low-altitude small target detection[C]. 2024 4th International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science, Yanji, China, 2024: 543–547. doi: 10.1109/EIECS63941.2024.10800679.

[36] FANG Xin, ZHU Jing, HUANG Darong, *et al*. E^{2}DTF: An end-to-end detection and tracking framework for multiple micro-UAVs with FMCW-MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 2000916. doi: 10.1109/TGRS.2023.3262062.

[37] WANG Hongzhen, ZHENG Guimei, LIU Yibin, *et al*. Low elevation and range joint estimation method with metre wave frequency diverse array-multiple input multiple output radar based on sparse array[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2022, 16(7): 1176–1187. doi: 10.1049/rsn2.12252.

[38] 王佳佳, 郭瑞, 刘旗, 等. 复杂地形MIMO雷达低仰角估计方法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(10): 3691–3701. doi: 10.11999/JEIT250236.

WANG Jiajia, GUO Rui, LIU Qi, *et al*. Low elevation angle estimation method for MIMO radar in complex terrain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(10): 3691–3701. doi: 10.11999/JEIT250236.

[39] GUO Rui, PENG Xiangyu, TIAN Biao, *et al*. Low elevation target altitude measurement for ubiquitous radar based on known transmitted waveform and sparse representation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2022, 16(2): 346–355. doi: 10.1049/rsn2.12187.

[40] QIN Cong, ZHANG Qin, ZHENG Guimei, *et al*. Height measurement for meter-wave MIMO radar based on sparse array under multipath interference[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(22): 4331. doi: 10.3390/rs16224331.

[41] WANG Hongzhen, ZHENG Guimei, and SONG Yuwei. Height measurement method of monostatic metre wave multiple input multiple output radar based on coprime array[J]. *IET Signal Processing*, 2022, 16(4): 479–489. doi: 10.1049/sil2.12121.

[42] TANG Derui, ZHAO Yongbo, and ZHANG Shuaijie. A height estimation method based on a beamspace joint alternating iterative algorithm in MIMO radar[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2025, 26(9): 1742–1753. doi: 10.1631/fitee.2500030.

[43] CHEN Sheng, ZHAO Yongbo, HU Yili, *et al*. Beamspace scene classification algorithm for low-angle estimation in MIMO radar[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1917. doi: 10.3390/rs14081917.

[44] ZHAO Yongbo, PANG Xiaojiao, and CHEN Sheng. A reduced-dimension RML method for transmit beamspace-based MIMO radar[J]. *Digital Signal Processing*, 2021, 114: 103072. doi: 10.1016/j.dsp.2021.103072.

[45] DING Rui, WANG Zhuang, JIANG Libing, *et al*. A target localisation method with monostatic radar via multi-observation data association[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2023, 17(1): 99–116. doi: 10.1049/rsn2.12327.

[46] DING Rui, WANG Zhuang, JIANG Libing, *et al*. Radar target localization with multipath exploitation in dense clutter environments[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(4): 2032. doi: 10.3390/app13042032.

[47] 滕旭, 张林昌, 蒋忠涌. 高层建筑对脉冲多径时延展宽影响分析与建模[J]. 铁道学报, 1999, 21(4): 47–50. doi: 10.3321/j.issn:1001-8360.1999.04.012.

TENG Xu, ZHANG Linchang, and JIANG Zhongyong. Analyzing and modeling for the digital signal multipath propagation time delay spread suffered from huge buildings in a city in mobile communication system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1999, 21(4): 47–50. doi: 10.3321/j.issn:1001-8360.1999.04.012.

[48] 蒋美秋, 罗皓蓝, 郭世盛, 等. 基于多径扩展投影的毫米波雷达室内目标跟踪方法[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR25245.

JIANG Meiqiu, LUO Haolan, GUO Shisheng, *et al*. Indoor target tracking method for millimeter-wave radar based on multipath extension mapping[J]. *Journal of Radars*, inpress. doi: 10.12000/JR25245.

[49] LI Hongbin, WANG Fangzhou, ZENG Cengcang, *et al*. Signal detection in distributed MIMO radar with non-orthogonal waveforms and sync errors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 3671–3684. doi: 10.1109/TSP.2021.3087897.

[50] YANG Shixing, JAKOBSSON A, and YI Wei. Moving target detection using a distributed MIMO radar system with synchronization errors[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5107417. doi: 10.1109/TGRS.2023.3299233.

[51] 蒋留兵, 张泽, 车俐. 基于毫米波雷达的非视距目标探测和定位方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22(1): 5–13. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2024.01.002.

JIANG Liubing, ZHANG Ze, and CHE Li. Research on NLOS target detection and localization method based on millimeter wave radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2024, 22(1): 5–13. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2024.01.002.

[52] YANG Yiping, CHEN Chuan, JIA Yong, *et al*. Non-line-of-sight target detection based on dual-view observation with single-channel UWB radar[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4532. doi: 10.3390/rs14184532.

[53] WU Peilun, CHEN Jiahui, GUO Shisheng, *et al*. NLOS positioning for building layout and target based on association and hypothesis method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5101913. doi: 10.1109/TGRS.2023.3250831.

[54] YANG Xiaqing, FAN Shihao, GUO Shisheng, *et al*. NLOS target localization behind an L-shaped corner with an L-band UWB radar[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 31270–31286. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2973046.

[55] 刘永龙, 邹旺, 葛富超, 等. 基于多站协同显著路径筛选的多径利用雷达遮蔽目标成像方法[J]. 电讯技术, 2026, 66(3): 455–464. doi: 10.20079/j.issn.1001-893x.241214002.

LIU Yonglong, ZOU Wang, GE Fuchao, *et al*. Multipath exploitation radar imaging method for shadowed targets based on multi-station cooperative dominant path screening[J]. *Telecommunication Engineering*, 2026, 66(3): 455–464. doi: 10.20079/j.issn.1001-893x.241214002.

[56] ZHANG Wanyu, ZENG Xiaolu, YANG Yifei, *et al*. Rotor unmanned aerial vehicle localization in the building sheltered area based on millimetre-wave frequency-modulated continuous wave radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2024, 18(10): 1937–1951. doi: 10.1049/rsn2.12630.

[57] LIN Yuqing, QIU Xiaolan, LUO Yitong, *et al*. Multipath exploitation: Non-line-of-sight target relocation in Array-InSAR 3-D imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 4708414. doi: 10.1109/TGRS.2024.3463003.

[58] 林雨青, 仇晓兰, 彭凌霄, 等. 基于多径模型的建筑区SAR三维成像中非视距目标重定位方法[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(4): 777–790. doi: 10.12000/JR24057.

LIN Yuqing, QIU Xiaolan, PENG Lingxiao, *et al*. Non-line-of-sight target relocation by multipath model in SAR 3D urban area imaging[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(4): 777–790. doi: 10.12000/JR24057.

[59] HAIMOVICH A M, BLUM R S, and CIMINI L J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116–129. doi: 10.1109/MSP.2008.4408448.

[60] FAN Chongyi, XIE Zhuang, WANG Jian, *et al*. Robust MIMO waveform design in the presence of unknown mutipath return[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4356. doi: 10.3390/rs14174356.

[61] WANG Hongyan, ZHOU He, GUO Qinghua, *et al*. Joint allocation of transmit-receive resource for MIMO-STAP[J]. *Signal Processing*, 2023, 209: 109008. doi: 10.1016/j.sigpro.2023.109008.

[62] CHENG Jie, JIA Yizhen, WANG Wenqin, *et al*. Multipath identification and mitigation with FDA-MIMO radar[J]. *Digital Signal Processing*, 2026, 168: 105519. doi: 10.1016/j.dsp.2025.105519.

[63] PARK J K, PARK J H, and KIM K T. Multipath signal mitigation for indoor localization based on MIMO FMCW radar system[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(2): 2618–2629. doi: 10.1109/JIOT.2023.3292349.

[64] ESPOSITO G, CATAPANO I, LUDENO G, *et al*. A deep learning strategy for multipath ghosts filtering via microwave tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5100314. doi: 10.1109/TGRS.2023.3337893.

[65] CAI Lingping, QIAN Haonan, XING Linger, *et al*. A software-defined radar for low-altitude slow-moving small targets detection using transmit beam control[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(13): 3371. doi: 10.3390/rs15133371.

[66] WANG Zhaolong, ZHANG Xiaokuan, FENG Weike, *et al*. Multipath and deep learning-based detection of ultra-low moving targets above the sea[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(24): 4773. doi: 10.3390/rs16244773.

[67] LI Sijia, WANG Huake, LIAO Guisheng, *et al*. Robust sparse recovery-based STAP for clutter suppression under multipath effect in low-altitude environments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2026, 62: 3711–3720. doi: 10.1109/TAES.2025.3649187.

[68] LI Haodong, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al*. Multi-resolution STAP for enhanced ultra-low-altitude target detection[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4212. doi: 10.3390/rs13214212.

[69] WU Zeyang, PENG Yuexing, and WANG Wenbo. Deep learning-based unmanned aerial vehicle detection in the low altitude clutter background[J]. *IET Signal Processing*, 2022, 16(5): 588–600. doi: 10.1049/sil2.12133.

[70] 项厚宏, 王永良, 李雨曦, 等. 基于特征博弈预处理的多径抑制与高精度测角方法[J]. 雷达学报(中英文), 2025, 14(2): 269–279. doi: 10.12000/JR24215.
XIANG Houhong, WANG Yongliang, LI Yuxi, *et al*. Multipath suppression and high-precision angle measurement method based on feature game preprocessing[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(2): 269–279. doi: 10.12000/JR24215.

[71] HU Yili, ZHAO Yongbo, CHEN Sheng, *et al*. Direction of arrival estimation of airborne multiple-input multiple-output radar in multipath environment[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, 15(10): 1173–1180. doi: 10.1049/rsn2.12099.

[72] LIU Yuan and LIU Hongwei. Target height measurement under complex multipath interferences without exact knowledge on the propagation environment[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3099. doi: 10.3390/rs14133099.

[73] KWON D, KO H, HONG S, *et al*. Elevation estimation algorithm for low-altitude targets in multipath environment[J]. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 2024, 24(4): 341–349. doi: 10.26866/jees.2024.4.r.234.

[74] XIANG Houhong, CHEN Baixiao, YANG Minglei, *et al*. Altitude measurement based on characteristics reversal by deep neural network for VHF radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(1): 98–103. doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5121.

[75] CHEN Sheng, ZHAO Yongbo, HU Yili, *et al*. Target height and multipath attenuation joint estimation with complex scenarios for very high frequency radar[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2022, 23(6): 937–949. doi: 10.1631/FITEE.2100003.

[76] WANG Xianchao, WEI Yanping, LI Shaoyi, *et al*. Altitude measurement method of VHF radar based on spatial smoothing of correlation matrix[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 22211. doi: 10.1038/s41598-023-47294-3.

[77] PARK J and KIM E. Super-resolution processing for multiple aperture antenna to suppress multipath[J]. *Mathematics*, 2024, 12(20): 3186. doi: 10.3390/math12203186.

[78] ZHANG Haowei, LIU Haowei, FEI Taiyong, *et al*. An efficient radar-target assignment and power allocation strategy for low-angle tracking in the MIMO-multisite radar system[J]. *Signal Processing*, 2022, 200: 108645. doi: 10.1016/j.sigpro.2022.108645.

[79] ZHANG Haowei, LIU Weijian, and FEI Taiyong. Beam resource scheduling for a VHF-MIMO radar network in low-angle tracking[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(4): 423–441. doi: 10.1016/j.cja.2022.12.007.

[80] DAEIPOUR E, BLAIR W D, and BAR-SHALOM Y. Bias compensation and tracking with monopulse radars in the

presence of multi path[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(3): 863–882. doi: 10.1109/7.599258.

[81] FAN Mingyang, LIU Chaojie, JIA Jinsong, *et al*. Mismatch-indicator identification-enabled generalized labeled multi-Bernoulli filter for tracking multi-UAVs in urban environments[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2026, 175: 111958. doi: 10.1016/j.ast.2026.111958.

[82] HERNANDEZ M and FARINA A. PCRB and IMM for target tracking in the presence of specular multipath[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(3): 2437–2449. doi: 10.1109/TAES.2019.2948671.

[83] JIN Yuanwei, MOURA J M F, and O'DONOUGHUE N. Time reversal in multiple-input multiple-output radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 210–225. doi: 10.1109/JSTSP.2009.2038983.

[84] ZHANG Zhaoming, CHEN Baixiao, and YANG Minglei. Moving target detection based on time reversal in a multipath environment[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(5): 3221–3236. doi: 10.1109/TAES.2021.3074131.

[85] XU Lin, LI Yajun, WANG Pengfei, *et al*. High-frequency hybrid sky-surface wave radar target detection based on time reversal in sea clutter background[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(4): 10130–10148. doi: 10.1109/TAES.2025.3560944.

[86] ZHOU Hao, HU Guoping, SHI Junpeng, *et al*. Adaptive two-step Bayesian generalized likelihood ratio test algorithm for low-altitude detection[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2019, E102.B(3): 571–580. doi: 10.1587/transcom.2017ebp3418.

[87] YILMAZ S H G and HAYVACI H T. Multipath exploitation radar with adaptive detection in partially homogeneous environments[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(10): 1475–1482. doi: 10.1049/iet-rsn.2020.0059.

[88] LI Songlin, GUO Shisheng, CHEN Jiahui, *et al*. Multiple targets localization behind L-shaped corner via UWB radar[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(4): 3087–3100. doi: 10.1109/TVT.2021.3068266.

[89] 黄乾超. 毫米波雷达非视域目标多径探测方法研究[D]. [硕士论文], 桂林电子科技大学, 2024. doi: 10.27049/d.cnki.ggldc.2024.001576.

HUANG Qianchao. Research on multipath detection methods of non-line-of-sight targets with millimeter wave radar[D]. [Master dissertation], Guilin University of Electronic Technology, 2024. doi: 10.27049/d.cnki.ggldc.2024.001576.

[90] PASSAFIUME M, ROJHANI N, COLLODI G, *et al*. Modeling small UAV micro-Doppler signature using millimeter-wave FMCW radar[J]. *Electronics*, 2021, 10(6): 747. doi: 10.3390/electronics10060747.

[91] ZHANG Pengfei, LI Gang, HUO Chaoying, *et al*. Exploitation of multipath micro-Doppler signatures for drone classification[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(4): 586–592. doi: 10.1049/iet-rsn.2019.0105.

[92] XU Zhou, FAN Chongyi, and HUANG Xiaotao. MIMO radar waveform design for multipath exploitation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 5359–5371. doi: 10.1109/TSP.2021.3112042.

[93] YILMAZ S H G, ZARRO C, HAYVACI H T, *et al*. Adaptive waveform design with multipath exploitation radar in heterogeneous environments[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1628. doi: 10.3390/rs13091628.

[94] ZHENG Zixiang, ZHANG Yue, PENG Xiangyu, *et al*. MIMO radar waveform design for multipath exploitation using deep learning[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2747. doi: 10.3390/rs15112747.

[95] QI Cheng, XIE Junwei, ZHANG Haowei, *et al*. Optimizing low-grazing angle detection for maneuvering targets in cognitive MIMO radar networks: A Shapley value approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(3): 4977–4992. doi: 10.1109/TVT.2024.3496778.

[96] QI Cheng, ZHANG Haowei, XIE Junwei, *et al*. Cooperative game theoretic power allocation method to distributed MIMO radar sensor network for multitarget detection in low-altitude[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(6): 8731–8745. doi: 10.1109/JSEN.2024.3357891.

[97] ZHANG Shoushuo, XIAO Zichao, LIU Rang, *et al*. Multipath exploitation for fluctuating target detection in RIS-assisted ISAC systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(9): 2392–2396. doi: 10.1109/LWC.2024.3416453.

[98] XU Xueting, ZHOU Yang, LI Huiying, *et al*. RIS-aided passive detection for LSS targets: A GNSS multipath-assisted scheme[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(1): 34–51. doi: 10.1109/JSAC.2023.3322801.

[99] LIANG Haobo, FENG Yuan, ZHANG Yushi, *et al*. A segmented sliding window reference signal reconstruction method based on fuzzy C-Means[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(10): 1813. doi: 10.3390/rs16101813.

[100] AHMADI M, ALAEE-KERAHROODI M, BHAVANI SHANKAR M R, *et al*. Subspace-based detector for distributed mmwave MIMO radar sensors[C]. 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Rhodes Island, Greece, 2023: 1–5. doi: 10.1109/

ICASSP49357.2023.10095315.

[101] QI Cheng, XIE Junwei, ZHANG Haowei, *et al*. Research on detection performance of distributed PA-MIMO radar[C]. 2022 14th International Conference on Signal Processing Systems, Jiangsu, China, 2022: 156–161. doi: 10.1109/ICSPS58776.2022.00032.

[102] DEIANA D, KOSSEN A S, and VAN ROSSUM W L. Multipath exploitation in an urban environment using a MIMO surveillance radar[C]. 11th International Radar Symposium, Vilnius, Lithuania, 2010: 1–4.

[103] TIAN Xiang, CHEN Hui, HUANG Bang, *et al*. Fast parameter estimation algorithms for conformal FDA-MIMO radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(24): 30633–30641. doi: 10.1109/JSEN.2023.3325452.

[104] ZHANG Juan, FAN Hongbao, WANG Chenhong, *et al*. Distance estimation and pairing for low angle group targets based on radar time reversal[J]. *Digital Signal Processing*, 2020, 106: 102808. doi: 10.1016/j.dsp.2020.102808.

[105] XU Feng, MORENCY M W, and VOROBYOV S A. DOA estimation for transmit beamspace MIMO radar via tensor decomposition with Vandermonde factor matrix[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 2901–2917. doi: 10.1109/TSP.2022.3176092.

[106] GUO Yuehao, WANG Xianpeng, SHI Jinmei, *et al*. Fast real-valued tensor decomposition framework for parameter estimation in FDA-MIMO radar[J]. *Digital Signal Processing*, 2024, 145: 104309. doi: 10.1016/j.dsp.2023.104309.

[107] ZHENG Guimei, SONG Yuwei, LIU Yibin, *et al*. Search-free range and angle estimation for bistatic VHF-FDA-MIMO radar in complex terrain[J]. *Signal Processing*, 2023, 212: 109163. doi: 10.1016/j.sigpro.2023.109163.

[108] CHEN Jiahui, ZHANG Yang, GUO Shisheng, *et al*. Joint estimation of NLOS building layout and targets via sparsity-driven approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5114513. doi: 10.1109/TGRS.2022.3182429.

[109] SUN Yanpeng, CHEN Li, and QU Lele. Through-the-wall radar imaging algorithm for moving target under wall parameter uncertainties[J]. *IET Image Processing*, 2019, 13(11): 1903–1908. doi: 10.1049/iet-ipr.2018.5670.

[110] LEIGSNERING M, AHMAD F, AMIN M, *et al*. Multipath exploitation in through-the-wall radar imaging using sparse reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 920–939. doi: 10.1109/TAES.2013.120528.

[111] ZHANG Y, AHMED A, and HIMED B. Target altitude estimation in over-the-horizon radar[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 11260–11273. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3145023.

[112] CHEN Sheng, ZHAO Yongbo, HU Yili, *et al*. A beamspace maximum likelihood algorithm for target height estimation for a bistatic MIMO radar[J]. *Digital Signal Processing*, 2022, 122: 103330. doi: 10.1016/j.dsp.2021.103330.

[113] 陈梦蝶, 王桁, 杨乃俊, 等. 动态环境下基于稀疏贝叶斯学习的多径利用自适应波束形成[J]. 通信技术, 2025, 58(10): 1048–1054. doi: 10.3969/j.issn.1002-0802.2025.10.003.
CHEN Mengdie, WANG Heng, YANG Naijun, *et al*. Multipath utilization adaptive beamforming based on sparse Bayesian learning in dynamic environments[J]. *Communications Technology*, 2025, 58(10): 1048–1054. doi: 10.3969/j.issn.1002-0802.2025.10.003.

[114] SEBT M A, GOODARZI M, and DARVISHI H. Geometric arithmetic mean method for low altitude target elevation angle tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(5): 5111–5119. doi: 10.1109/TAES.2023.3248562.

[115] XIANG Yikun, XI Feng, and CHEN Shengyao. LiQuiD-MIMO radar: Distributed MIMO radar with low-bit quantization[C]. 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Rhodes Island, Greece, 2023: 1–5. doi: 10.1109/ICASSP49357.2023.10096939.

[116] CHEN Ruilin, GUO Shisheng, and CUI Guolong. A fast multi-target detection and localization method for distributed MIMO radar[C]. 2022 5th International Conference on Telecommunications and Communication Engineering, New York, USA, 2023: 89–94. doi: 10.1145/3577065.3577082.

[117] LIU Qi, GUO Rui, WANG Jiajia, *et al*. Signal-level fusion-based height estimation of low-elevation target for distributed radar[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 6508114. doi: 10.1109/TIM.2025.3593573.

[118] FENG Xiang, SUN Ping, ZHANG Lu, *et al*. Cognitive radar waveform selection for low-altitude maneuvering-target tracking: A robust information-aided fusion method[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(21): 3951. doi: 10.3390/rs16213951.

作 者 简 介

郑娜娥，副教授，主要研究方向为无线信号定位、MIMO雷达信号处理等。

傅佳庆，硕士生，主要研究方向为MIMO雷达、低空目标探测与多径信号处理。

齐　铖，助理研究员，主要研究方向为多传感器资源管理、智能筹划与任务调度等。

许京伟，教授，主要研究方向为波形分集阵列雷达、机/星/弹/舰载雷达信号处理技术、抗干扰/抗杂波、通感一体化理论技术等。

陈　松，副教授，主要研究方向为无人与反无人技术、认知通信技术。

岳嘉颖，讲师，主要研究方向为模式识别与信号处理等。

(责任编辑：于青)