



智能反射表面辅助的多目标通感定位方法

张淦霖, 张冬晨, 董江波, 林任超, 李文祺, 孙思臻

(中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080)

摘 要: 随着5G通信技术的快速发展, 通信与感知的深度融合(通感技术)在智能交通、应急救援、工业物联网等领域展现出了重要的应用潜力。然而, 在复杂环境下, 信号传播的不确定性、多目标场景中的信号干扰等问题, 严重限制了高精度定位的实现。为此, 提出了一种基于智能反射表面(IRS)的通感定位方法, 通过结合IRS的信号调控能力, 实现了多目标信号的有效分离, 提升了定位精度。针对多目标定位中的干扰问题, 设计了一种动态配置优化算法, 用以提高信号调控效率并增强定位的稳健性。实验结果表明, 所提出的通感定位方法在多目标场景下具有显著的定位精度和鲁棒性, 为5G网络环境下高精度通信感知融合技术提供了一种创新性解决方案。

关键词: 通感一体化; 多目标定位; 智能反射表面; 多目标干扰

中图分类号: TN926

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025307

0 引言

随着5G通信技术的迅速发展, 其在智慧城市^[1]、工业物联网^[2]、低空无人系统^[3]和智能交通^[4]等领域展现出了广阔的应用前景。凭借更高的频谱利用效率、更大的带宽灵活性以及更低的通信时延, 5G网络能够实现超高速的数据传输和毫秒级响应。同时, 依托先进的信号处理技术和密集的基站部署, 5G网络在复杂环境中展现出更强的空间分辨能力和目标感知性能, 为高精度定位提供了坚实的技术基础。

虽然现有的目标感知技术(如基于视觉^[5]、雷达^[6]或超声波^[7]的系统)已在某些特定场景中取得了较高的检测精度, 但仍存在明显的应用局限性。视觉技术依赖光照条件, 在弱光、遮挡或动态环境中性能会大幅下降; 雷达技术尽管具有

较强的抗干扰能力和高精度检测性能, 但昂贵的硬件成本限制了其大规模应用; 超声波技术因传播距离短且易受环境噪声干扰, 难以满足复杂场景下的多目标检测需求。相比之下, 5G网络凭借其广泛的信号覆盖面积、灵活的部署能力和较低的边际成本, 为多目标检测与定位提供了一种更高效且经济的解决方案。通过信号处理技术, 5G网络能够无缝整合到现有通信基础设施中, 实现对目标的高精度感知与定位^[8-9]。然而, 5G信号在实际应用中仍面临传播路径复杂、多目标信号混叠以及动态环境自适应等技术瓶颈, 这些问题限制了其性能的充分发挥, 亟须探索创新的技术路径以实现突破。

近年来, 智能反射表面(IRS)^[10]的出现为5G通感一体化提供了一种全新的技术方向。IRS由大量可控反射单元组成, 这些单元能够通过精



确调节入射信号的相位和幅度,动态改变信号的传播特性,从而实现目标信号的增强和干扰信号的抑制。相比传统的信号处理技术,IRS以其低功耗、易部署和灵活配置的特点,为复杂环境下的信号调控提供了全新的可能性。将IRS引入5G网络,可以在不改变原有网络架构的前提下,显著提升信号传播的可控性和目标检测性能。然而,IRS的实际应用仍面临诸多技术难题。例如,如何高效协同IRS与5G信号,以适应复杂场景的动态信道变化;如何设计动态优化策略,使IRS能够实时调整反射单元配置以应对目标和环境变化;在多目标场景中,如何解决近远场效应导致的信号强弱失衡问题,以最大化目标检测的精度和鲁棒性。

针对上述挑战,本文提出了一种基于IRS的通感定位方法,通过联合优化IRS配置和5G信号处理技术,突破现有多目标检测系统的性能瓶颈。具体而言,本文首先针对复杂场景中5G信号的多径传播问题,提出了一种基于IRS相位优化的动态信号调控方法,以实现目标信号的方向性增强。其次,为了解决目标间信号耦合问题,本文设计了一种基于旁瓣抑制的IRS反射配置优化策略,通过增强远距离目标信号和抑制近距离目标干扰,实现多目标信号的高效分离与精准定位。最后,为验证所提出方法的有效性,本文设计了一系列多目标场景下的仿真实验。实验结果表明,基于IRS的通感定位方法在复杂环境中显著提升了目标信号的分离能力和定位精度。与传统方法相比,本文提出的方案能够更高效地挖掘5G网络的潜力,为多目标检测与定位技术的发展提供了理论支持与实践指导。

1 理论基础

基于IRS的5G多目标信号传播示意图如图1所示,本文研究一个典型的多目标场景,该场景包括一个发射端、一个接收端以及一个智能反射

表面。在该系统中,发射端发送信号,信号经由多条路径传播后到达接收端,包括直达路径、经过IRS反射的路径以及由目标引起的反射路径。IRS安装在建筑物表面,其主要功能是通过动态调控信号传播路径,辅助系统检测并定位多个目标的具体位置。发射信号在传播过程中会受到目标反射以及环境多径效应的影响。其中,环境多径主要由建筑物、地面等固定反射体引起。为简化分析,本文假定目标主要在二维平面(即地面)内移动。假设场景中存在 K 个目标。在该系统中,IRS通过调整其反射单元的相位对信号传播路径进行优化,以增强有用信号并抑制无关干扰。发射端到IRS、IRS到目标、目标到接收端的路径被设计为主要反射路径。基于上述假设,接收端接收到的信号 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{1 \times R}$ 表示为:

$$\mathbf{Y} = \left(\mathbf{g}_0 + \sum_{j=1}^K (\mathbf{G}_{\text{TR}}^j + \mathbf{G}_{\text{TLR}}^j) \right) \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{s}$ 是发射信号; $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_R)$ 表示接收端的复高斯噪声; $\mathbf{g}_0$ 表示与目标无关的直达路径信号,包括发射端到接收端的直达信号以及由静态反射体引起的信号。具体路径增益表达式为:

$$\mathbf{G}_{\text{TR}}^{j,r} = g_{0,\text{TR}}^{j,r} \cdot h_{\text{TR}}^j \cdot e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_{\text{TR}}^j} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_{\text{RO}}^{j,r}} \quad (2)$$

$$\mathbf{G}_{\text{TLR}}^{j,r} = g_{0,\text{TLR}}^{j,r} \cdot h_{\text{TL}}^j \mathbf{Q} h_{\text{LR}}^j \cdot e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (d_{\text{TL}}^{j,m} + d_{\text{LR}}^{j,m} + d_{\text{RO}}^{j,r})} \quad (3)$$

其中, λ 表示信号波长, d_{TR}^j 是发射端到目标 j 的距离, $d_{\text{TL}}^{j,m}$ 是发射端到IRS第 m 个单元的距离, $d_{\text{LR}}^{j,m}$ 是IRS第 m 个单元到目标 j 的距离, $d_{\text{RO}}^{j,r}$ 是目标 j 到接收端的第 r 个天线的距离, $g_{0,\text{TR}}^{j,r}$ 和 $g_{0,\text{TLR}}^{j,r}$ 是路径的增益因子, h_{TR}^j 、 h_{TL}^j 和 h_{LR}^j 表示路径的复增益。

IRS的反射特性由相位矢量 $\mathbf{q}$ 决定,其反射矩阵 $\mathbf{Q}$ 定义为 $\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{q})$ 。在实际系统中,IRS的相位调整受到量化位数的限制,假设每个单元具有 L 个量化状态,其反射系数可表示为:

$$r(l) = e^{j \frac{2\pi l}{L}}, l \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (4)$$

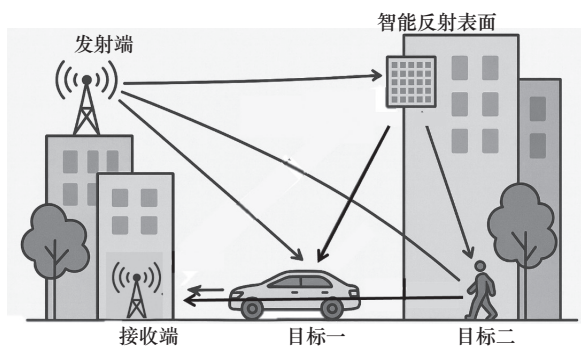


图1 基于IRS的5G多目标信号传播示意图

优化相位矢量 $\mathbf{q}$ ，理论上系统能够有效增强目标反射路径的信号强度，同时抑制干扰信号，从而实现对多目标的高精度检测与定位。

2 研究方法

本节首先研究如何消除环境多径的影响，在此基础上，进一步研究如何处理多目标场景中的干扰问题，以提高定位精度。

为了估计目标位置，需要从接收到的复合信号中提取由目标反射的动态信号。然而，发射端的直达路径信号及来自静态反射体（如建筑物表面和地面）的反射信号通常强于目标反射信号，这可能导致被动定位失败。因此，可利用目标反射信号随时间变化的特性来区分静态干扰信号和动态反射信号。静态干扰信号保持不变，而目标信号会因目标移动而发生动态变化。首先，采集无目标状态下的接收信号 $\mathbf{Y}_0$ 作为静态干扰信号的基准：

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{g}_0 \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n}_0 \quad (5)$$

其中， $\mathbf{g}_0$ 表示静态信号的复增益， $\mathbf{n}_0$ 为噪声项。在实际定位中，将接收到的信号 $\mathbf{Y}$ 与静态信号 $\mathbf{Y}_0$ 相减，可以消除静态干扰信号，仅保留动态反射分量：

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0 = (\mathbf{G}_{\text{TR}} + \mathbf{G}_{\text{TLR}}) \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n}' \quad (6)$$

其中， $\mathbf{n}' \sim \mathcal{CN}(0, 2\sigma^2 \mathbf{I}_R)$ 是相减后的噪声分量。经过上述处理，动态反射信号被提取出来，可用于

后续目标位置的估计。

在多目标场景中，主要的挑战是近场干扰问题。当目标之间距离较近时，较强的目标反射信号可能掩盖较弱目标的信号，导致弱目标难以被准确定位。为了解决这一问题，提出了一种基于旁瓣抑制的算法，通过优化 IRS 的相位矢量 $\mathbf{q}_{x_b, y_b}$ ，对目标区域 (x_b, y_b) 进行波束扫描，从而增强目标反射路径的信号强度，同时抑制其他区域的干扰信号。

对于第一目标（反射信号最强目标）的定位，由于此时未检测到其他目标且其他目标的干扰信号弱于第一目标，此时 IRS 的相位优化问题可表示为：

$$\max_{\mathbf{q}_{x_b, y_b}} \left| \mathbf{w}_{x_b, y_b} (\mathbf{g}_{\text{TR}} + \mathbf{g}_{\text{TL}} \mathbf{Q}_{x_b, y_b} \mathbf{g}_{\text{LR}}) \right| \quad (7)$$

其中， $\mathbf{Q}_{x_b, y_b} = \text{diag}(\mathbf{q}_{x_b, y_b})$ ，且 $|\mathbf{q}_{x_b, y_b}^m| = 1, \forall m = 1, \dots, M$ 。

分析求解可以得到目标区域的最优解：

$$\mathbf{q}_{x_b, y_b}^{*, m} = \frac{2\pi}{\lambda} (d_{\text{TL}}^m + d_{\text{LR}}^m - d_{\text{TR}}), \forall m = 1, \dots, M \quad (8)$$

将待测区域平面离散为 B 个小区，并利用 IRS 对每个区域进行波束扫描，可以估计目标的位置：

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \max_{x_b, y_b} |Y(x_b, y_b)| \quad (9)$$

在定位当前目标后，需要将该目标信号从接收信号中消除。接下来具体介绍如何消除已检测目标的信号。对于已定位得到的 N 个目标，其信号对接收端的干扰可建模为：

$$\mathbf{s}_d = \sum_{n=1}^N \mathbf{G}_{\text{TR}}^n + \mathbf{G}_{\text{TLR}}^n \quad (10)$$

为了定位新的目标，需要最小化已定位目标干扰信号的能量，同时优化当前目标区域的信号强度。优化目标可表示为：

$$\min_{\Delta \mathbf{q}} \|\mathbf{s}_d\|^2 \quad (11)$$

其中， $\Delta \mathbf{q}$ 是 IRS 的相位扰动向量，用于调整反射



配置。优化过程中需要满足以下约束。

- 每个 IRS 单元的相位变化限制：
 $\text{angle}(\Delta q^m) \leq \phi_{\max}, \forall m=1, \dots, M。$
- 反射相位的物理约束： $|q_0^m \Delta q^m| = 1, \forall m=1, \dots, M。$

对 Δq 进行一阶线性化近似，可得到：

$$\mathbf{s}_d \approx \mathbf{G}_D \cdot \Delta \mathbf{q} + \mathbf{G}_d \quad (12)$$

其中， $\mathbf{G}_D = \mathbf{G}_{TL} \cdot \text{diag}(\mathbf{G}_{LR})$ 是干扰路径的增益矩阵； $\mathbf{h}_d = \mathbf{G}_{TR}$ 是目标路径的增益向量。上述优化目标可以重构为：

$$\min_{\Delta \mathbf{q}} \|\mathbf{G}_D \cdot \Delta \mathbf{q} + \mathbf{G}_d\|^2 \quad (13)$$

由于该问题属于非凸优化问题，为了便于求解，可以将其转化为矩阵形式的二次规划问题：

$$\min_{\mathbf{V}} \text{tr}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) \quad (14)$$

其中， $\mathbf{B} = [\Delta \mathbf{q}; \mathbf{x}] [\Delta \mathbf{q}; \mathbf{x}]^H$ 是半正定矩阵， $\mathbf{x}$ 为求解二次规划问题引入的额外变量； $\mathbf{A}$ 是由路径增益矩阵构成的目标矩阵； $\mathbf{V}$ 为约束条件，是半正定矩阵，且其秩为 1。通过松弛 $\text{rank}(\mathbf{V})=1$ 的约束，可以使用半正定松弛（SDR）方法进行求解。最后通过特征值分解，选择特征值最大的特征向量作为优化结果。

完整的多目标定位算法流程如下。

- (1) 初始化 IRS 的反射相位 $\mathbf{q}_0$ ，扫描候选目标区域，到达第一目标位置。
- (2) 计算 $\Delta \mathbf{q}$ 最小化已检测目标的信号能量。
- (3) 计算 IRS 相位偏移 $\mathbf{q} = \mathbf{q}_0 \Delta \mathbf{q}$ ，对目标区域再次扫描，得到目标位置。
- (4) 重复步骤 2、步骤 3，直至所有目标被定位。

该算法结合动态优化与干扰剔除策略，利用 IRS 的波束成形能力逐步增强目标信号并抑制干扰。通过半定松弛方法简化求解，算法在复杂场景中展现出良好的鲁棒性和适应性，为多目标定位提供了高精度解决方案。

3 方案结果分析与讨论

本节通过仿真实验验证了所提算法在多目标场景下的性能表现。实验环境设置为一个 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ 的待测空间，具体参数如下。假设 IRS 中心坐标为 $(3, 3, 3.5)$ ，IRS 的单元间距为 0.062 m ，接近信号波长的一半，以避免栅瓣效应。发射基站位于 $(3, 3, 3)$ ，接收端放置在 $(6, 0, 0)$ 。信号频率设置为 2.4 GHz 。所有信道的路径损耗采用以下模型计算： $\rho(d) = \rho_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-\alpha}$ ，其中 $\rho_0 = -20 \text{ dB}$ 是参考距离 $d_0 = 1 \text{ m}$ 处的路径损耗， d 为链路距离， α 为路径损耗指数。实验中，路径损耗指数设置为：发射机到目标的路径为 $\alpha_{TO} = 3.6$ ，发射机到 IRS 的路径为 $\alpha_{TL} = 2.2$ ，IRS 到目标的路径为 $\alpha_{LO} = 2.2$ ，目标到接收机的路径为 $\alpha_{OR} = 3.6$ 。接收机的噪声为均值为 0、方差为 -80 dBm 的高斯噪声。

为了验证所提算法在多目标信号分离方面的能力，本文比较了 3 种不同算法的性能：无旁瓣抑制优化、最大化信噪比（SINR）优化以及所提出的旁瓣抑制算法。无旁瓣抑制优化通过波束赋形设计 IRS 的反射码本，仅增强待测目标信号，而不抑制其他目标的干扰；最大化信噪比优化方法以最大化目标位置的信噪比为目标，优化问题定义为：

$$\max_{\mathbf{q}} \frac{\left| \mathbf{w}^* \mathbf{h}_{OR} (\mathbf{h}_{TO} + \mathbf{h}_{LO} \mathbf{Q} \mathbf{h}_{TL}) \right|^2}{\sum_{n=1}^N \left| \mathbf{w}^* \mathbf{h}_{OR} (\mathbf{h}_{TO}^n + \mathbf{h}_{LO}^n \mathbf{Q} \mathbf{h}_{TL}^n) \right|^2 + 2\sigma^2} \quad (15)$$

其中，分子表示目标位置的信号能量，分母表示干扰信号与噪声的总能量。所提出的旁瓣抑制算法通过逐步消除已定位目标的干扰信号，提升未定位目标的精度。

在三目标场景下，图 2 展示了不同算法对远处目标（第 2 个目标和第 3 个目标）的定位误差。由于 3 种算法对最近目标的定位方法相同，

因此仅对远处目标进行比较。对于第2个目标,如图2(a)所示,当发射功率较低时,旁瓣抑制算法的定位误差显著小于其他两种方法。这表明,旁瓣抑制策略能够有效减少近场干扰对目标信号的影响。当发射功率增加时,各算法的定位误差均有所降低,但旁瓣抑制算法的性能仍然优于其他方法。对于第3个目标,如图2(b)所示,对于信号反射最弱的目标,未采用旁瓣抑制的两种方法难以准确定位,定位误差始终较大。而所提算法通过显著降低干扰信号能量,成功提升了目标信号的强度,定位误差在高发射功率下小于10 cm。这一结果验证了所提算法在弱目标定位中的强大能力。

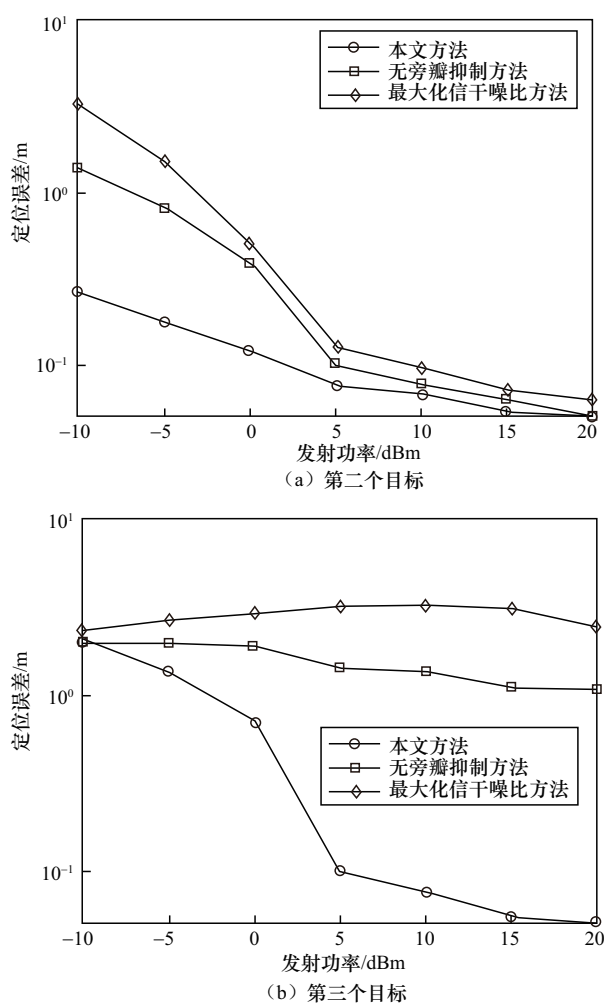


图2 不同算法对位置较远的两个目标定位误差比较

为进一步分析旁瓣抑制算法对干扰信号的抑制效果,图3将3种算法的波束模式映射到二维平面,并比较了干扰点(2.22,3)处的旁瓣能量。对于无旁瓣抑制方法,如图3(a)所示,干扰点处的旁瓣能量最高,对远距离目标的定位干扰尤为明显;对于最大化信噪比优化方法,如图3(b)所示,干扰点的旁瓣能量有所降低,但其他位置的旁瓣能量增加,同时主瓣幅度减弱,导致目标信号的能量下降;而对于本文所提旁瓣抑制算法,如图3(c)所示,在干扰点的旁瓣能量降低了约13 dB,同时主瓣形状几乎未受影响,目标信号强度得以保持。这一结果表明,所提算法在抑制旁瓣干扰的同时,能够有效保留目标信号的强度与方向性。

综上所述,本文所提旁瓣抑制算法通过动态优化 IRS 的反射相位和逐步剔除干扰信号的策略,不仅显著增强了目标信号的强度,还有效抑制了多目标场景中的干扰信号,为复杂场景下的高精度定位提供了可靠的技术支撑。实验结果表明,该算法在多目标定位场景中具有显著优势。首先,在高精度定位方面,所提算法通过动态优化显著降低了远处目标的定位误差,尤其在信号较弱的目标定位中表现尤为突出,能够实现亚米级甚至更高精度的定位效果。其次,在干扰抑制能力上,该算法能够有效降低干扰点的旁瓣能量,同时避免了其他方法中主瓣能量下降的问题,既确保了目标信号强度的完整性,也提升了方向性。最后,在鲁棒性和适应性方面,所提算法能够在信号较弱的目标和干扰较强的场景下保持稳定,展现出良好的适应性和广泛的工程应用潜力。

尽管所提算法在实验中表现出优异性能,但其仍存在计算复杂度较高的问题。由于算法需要逐步优化 IRS 的反射相位,并对每个目标区域进行动态更新,这在目标数量较多或场景规模较大时,可能会带来较高的计算开销,限制了其在实

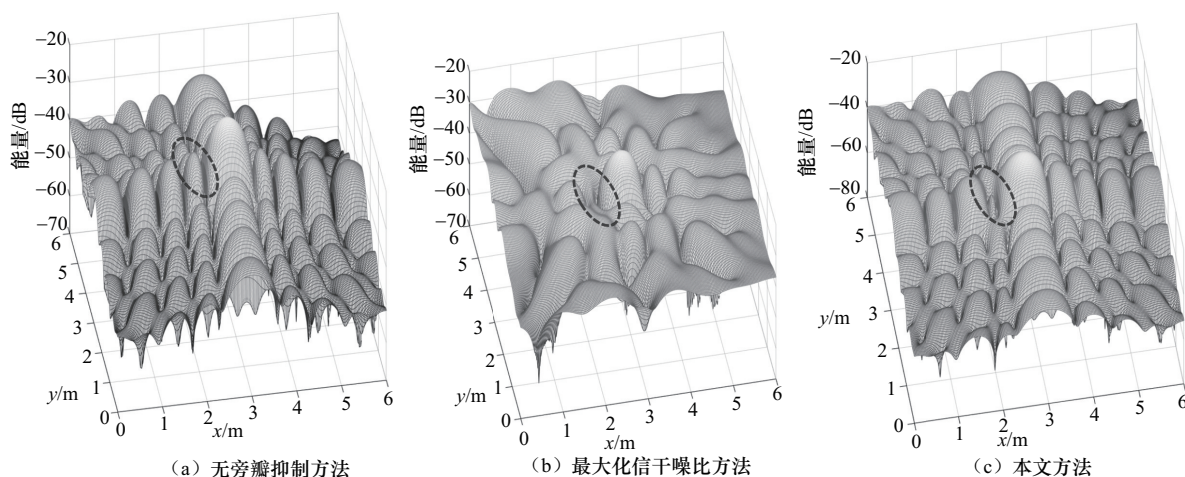


图3 不同算法对旁瓣抑制的性能比较结果

时性要求高的应用中的直接部署。这种高计算复杂度不仅对硬件性能提出了较高的要求,还对实际应用的响应速度带来一定挑战。

为进一步提升算法性能和工程实用性,未来研究可以从以下几个方向展开。首先,可探索基于机器学习的IRS配置策略,通过离线训练和在线快速推断,显著降低算法的计算开销。此外,可以研究分布式优化方法,将大型场景划分为多个子区域并行处理,从而降低计算时延并提升实时性能。最后,结合IRS硬件的实际特性(如有限相位量化精度或硬件噪声),对算法模型进行调整和优化,以提升算法的硬件适配能力和工程实现可能性。

总体而言,所提旁瓣抑制算法不仅为多目标定位提供了创新性的技术解决方案,还为未来6G通感融合系统的研究与应用奠定了坚实基础。通过优化算法复杂度和扩展应用场景,该算法有望在智能通信、自动驾驶、智慧城市等领域实现广泛部署,为复杂环境下的高精度感知提供更强大的技术支持和经济价值。

4 结束语

在多目标感知定位场景中,对于5G通感系统而言,不同目标间的信号分离与提取是一项极

具挑战性的任务。本文提出了一种基于智能反射表面辅助的通感技术,通过优化IRS的反射相位,实现了对多目标间干扰信号的有效抑制,进而完成了多目标位置的高精度提取。仿真实验表明,所提算法在多目标场景中能够实现亚米级的定位精度,展现出了优异的性能。该算法的成功验证了其在未来6G通感系统中应用的可行性与有效性,为多目标高精度感知与定位提供了重要的技术支撑。

参考文献:

- [1] 李光. 5G通信技术在智慧城市中的应用[J]. 智能城市应用, 2023, 6(8): 22-24.
- [2] 柴浩轩, 金曦, 许驰, 等. 面向工业物联网的5G机器学习研究综述. 信息与控制, 2023, 52(3): 257-276.
- [3] 钟剑峰, 王红军. 基于5G和无人机智能组网的应急通信技术[J]. 电讯技术, 2020, 60(11): 7.
- [4] Ahmed A A, Malebary S J, Ali W, et al. Smart traffic shaping based on distributed reinforcement learning for multimedia streaming over 5G-VANET communication technology[J]. Mathematics, 2023, 11(3): 700.
- [5] 孟浩, 程康. 基于SIFT特征点的双目视觉定位[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009(6): 5.
- [6] Godrich H, Haimovich A M, Blum R S. Target localization accuracy gain in MIMO radar-based systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(6): 2783-2803.
- [7] 王富东. 超声波定位系统的原理与应用[J]. 自动化与仪表, 1998(3): 15-17.

- [8] 张千坤, 陈任翔, 钟志刚, 等. 基于 5G 通感一体化的车辆成像跟踪方法[J]. 邮电设计技术, 2023(10): 33-39.
- [9] Zhang Z, Ren H, Pan C, et al. Target localization in cooperative ISAC systems: a scheme based on 5G NR OFDM signals[J]. Communications, IEEE Transactions on, 2025, 73(5): 3562-3578.
- [10] 蔡幻茜, 孙国皓, 宁召柯, 等. 智能反射表面辅助无线信能同传系统中波束成形算法设计[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(12): 116-122.

[作者简介]

张淦霖 (1997-), 男, 博士, 中国移动通信集团设计院有限公司通讯系统与设备研究所研究专员, 主要研究方向为通信感知一体化。

张冬晨 (1981-), 男, 博士, 中国移动通信集团设计院

有限公司通讯系统与设备研究所所长, 主要研究方向为移动网络规划、网络优化和自主组网技术。

董江波 (1978-), 女, 博士, 中国移动通信集团设计院有限公司通讯系统与设备研究所专业副总师, 主要研究方向为数字孪生。

林任超 (1989-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司通讯系统与设备研究所资深咨询设计师, 主要研究方向为基站硬件架构。

李文祺 (1989-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司通讯系统与设备研究所资深开发专员, 主要研究方向为频谱工程。

孙思濂 (2000-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司通讯系统与设备研究所助理开发专员, 主要研究方向为通信设备硬件设计。