

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2025.05.007

可增强回波信噪比的RIS辅助外辐射源 雷达信号处理算法

赵志欣, 李周章, 林应运, 陈远帅

(南昌大学信息工程学院, 江西南昌 330031)

摘要: 针对外辐射源雷达由于采用非合作照射源而导致的目标信噪比低、易被直达波和多径等干扰掩盖等目标探测难题, 本文研究可增强回波信噪比的可重构智能表面(RIS)辅助外辐射源雷达系统和相应的目标参数估计方法。在分析建立RIS辅助的外辐射源雷达系统模型和信号模型的基础上, 首先研究外辐射源雷达系统配置下RIS的设置方法, 建立以提升接收信号的信杂噪比(SCNR)和保证直达波接收功率为准则的RIS反射系数优化问题, 并理论推导RIS反射系数的全局最优解, 从根本上解决弱目标探测问题; 然后, 研究RIS辅助下外辐射源雷达的信号处理方法, 提出了一种基于时变RIS与稀疏重构的目标多参数估计方法, 可实现对目标时延、速度和方位等参数的同时估计; 最后实验验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 外辐射源雷达; 可重构智能表面; 目标多参数估计; 稀疏重构

中图分类号: TN958.97

文献标志码: A

文章编号: 1672-2337(2025)05-0529-11

引用格式: 赵志欣, 李周章, 林应运, 等. 可增强回波信噪比的RIS辅助外辐射源雷达信号处理算法[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(5): 529-539.

ZHAO Zhixin, LI Zhouzhang, LIN Yingyun, et al. RIS-Assisted Passive Radar Signal Processing Algorithm for Enhanced Echo Signal-to-Noise Ratio[J]. Radar Science and Technology, 2025, 23(5): 529-539.

RIS-Assisted Passive Radar Signal Processing Algorithm for Enhanced Echo Signal-to-Noise Ratio

ZHAO Zhixin, LI Zhouzhang, LIN Yingyun, CHEN Yuanshuai

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Aiming at the challenges of low target signal-to-noise ratio (SNR), susceptibility to direct wave and multipath interference, and other target detection problems arising from the use of non-cooperative illumination sources, this paper studies the reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted passive radar system which can enhance the echo SNR and the corresponding target parameter estimation method. On the basis of analyzing and establishing the RIS-assisted passive radar system and signal model, firstly, the RIS configuration within the passive radar framework is explored. The RIS reflection coefficient optimization problem is established to improve the signal-to-clutter-plus-noise ratio (SCNR) of the received signal and ensure the direct wave receiving power. The global optimal solution of the RIS reflection coefficient is deduced theoretically, and the problem of weak target detection is solved fundamentally. Then, the signal processing method for RIS-assisted passive radar is investigated, and a multi-parameter estimation method based on time-varying RIS and sparse reconstruction is proposed, which can estimate the target parameters such as time delay, velocity, and azimuth simultaneously. Experimental results demonstrate the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: passive radar; reconfigurable intelligent surface (RIS); target multi-parameter estimation; sparse reconstruction

0 引言

外辐射源雷达利用第三方数字广播电视信号

进行目标探测与跟踪, 具有良好的隐蔽性和抗干扰能力^[1]。然而, 实际应用中, 由于地面信号源对空辐射效率不足, 目标回波信号微弱, 易被直达波

收稿日期: 2025-01-27; 修回日期: 2025-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(No.62261036); 江西省自然科学基金(No.2022BAB202003)

和多径杂波淹没,即使在距离-多普勒(RD)谱中也难以区分。针对此问题,现有方法主要分为空域杂波抑制^[2-4]和基于稀疏表示的技术^[5-7],前者通过自适应滤波抑制干扰,后者利用稀疏优化估计目标参数。然而,这些方法仍然不能从根本上提升目标信噪比,限制了外辐射源雷达在复杂电磁环境下的综合探测性能。

可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)作为无线通信领域的新兴技术,通过动态调控表面反射特性提升信号质量与系统性能,展现出多场景应用潜力。文献[8]作为该领域的经典综述,系统梳理了RIS信号处理技术体系,涵盖基础理论、核心技术和前沿进展,为研究人员构建了完整理论框架。RIS通过其组成的众多低成本、低能耗的无源元件阵列,能够精准控制电磁波的传播方向,主动塑造和改善信号传播环境,从而在不增加额外发射功率的前提下,显著提升通信系统性能,但是它们主要集中在研究通信信道估计和RIS波束优化设计方法上^[9-10]。

近年来,RIS辅助雷达目标探测定位亦引发关注。文献[11]考虑了信号带宽、载波频率以及RIS、雷达和目标的大小和相对位置对雷达系统与RIS联合使用时的信号处理模型的影响,深入分析了这些因素如何直接影响系统的波束形成、成像分辨率以及信号捕获效率等关键参数,并就RIS在目标检测任务中的部署方案提供了初步建议。文献[12]将文献[11]中的研究进一步推广到多输入多输出雷达情况,得出了RIS应该靠近雷达收发器的结论。文献[13]针对雷达和期望目标之间不存在直接路径的情况,研究了基于目标反射功率参数均方误差最小的RIS反射相位矩阵优化设计方法,分析了RIS辅助雷达目标定位的性能优势。文献[14]提出了一种基于最大化目标接收信号平均信噪比(SNR)的RIS反射系数优化设计方法,提高了多输入多输出雷达的接收功率和目标探测性能。文献[15]研究了接收机波束和RIS反射相位矩阵的联合优化方法,以降低无源雷达的直达波路径干扰、增强目标回波的功率。但以上方法均未给出具体的信号处理或目标参数估计方法。文献[16]利用RIS辅助雷达进行车辆定位,提出了

基于接收信号信噪比(SINR)最大的RIS反射系数优化方法和基于原子范数最小化的目标方位估计方法。为降低文献[16]的方位估计计算复杂度,文献[17]研究了交替方向优化算法。以上方法虽然给出了一些目标方位的估计方法,但一方面未考虑直达波等多径杂波的影响,另一方面未同时考虑目标时延和多普勒等参数的估计问题。

因此,鉴于RIS技术在雷达检测与测量中改善信号质量、增强系统探测能力等方面具有的巨大潜力,本文将其应用到外辐射源雷达中以从根本上解决其面临的低信噪比目标探测问题,并考虑存在多径杂波的情况下从信号处理算法的角度研究RIS辅助下的外辐射源雷达系统设计和目标多参数估计方法。本文的主要内容如下:1)建立了RIS辅助外辐射源雷达的信号模型,并通过与常规外辐射源雷达信号模型的对比,指出其在信号处理上的差异;2)研究外辐射源雷达系统配置下RIS的设置方法,建立以提升接收信号信噪比(SCNR)为准则的RIS反射系数矢量优化问题,并理论推导RIS反射系数矢量的全局最优解,使达到对散射回波信号的增强与噪声以及干扰信号的有效抑制目的;3)研究RIS辅助下外辐射源雷达的信号处理方法,提出了一种基于时变RIS与稀疏重构的目标参数估计方法,可实现对目标时延、速度和方位等参数的同时估计。

1 系统模型

如图1所示,典型的外辐射源雷达系统一般由两个接收天线组成。第一通道被称为参考通道,它直接指向第三方信号源来接收直达波信号。该通道旨在提供外辐射源雷达在信号处理阶段需要使用的干净的传输信号。第二个通道被称为监测通道,它定向朝向外辐射源雷达要监测的区域,并从该区域收集目标反射的低功率信号。当监测通道的天线和参考通道的天线并置时,监测通道的接收信号可表示为

$$y_{\text{surv}}(t) = c_0 d(t) + \sum_{i=1}^{N_i} c_i^{c'} d(t - \tau_i^{c'}) + \sum_{q=1}^{N_q} c_q^{m'} d(t - \tau_q^{m'}) e^{j2\pi f_d t} + z(t) \quad (1)$$

式中: $d(t)$ 为直达波,它是发射信号的时延信号; N_i 和 N_q 分别为模拟的多径条数及目标个数; c_0, c_i^c 和 c_q^m 分别为直达波、第 i 条多径和第 q 个目标的复包络幅度; τ_i^c 和 τ_q^m 分别为第 i 条多径和第 q 个目标的时间延迟; f_q 为第 q 个目标的多普勒频移; $z(t)$ 为监测通道中的高斯白噪声。

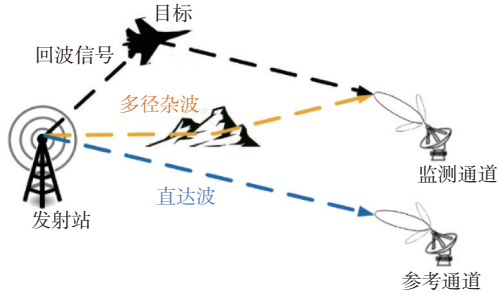


图1 常规的外辐射源雷达示意图

外辐射源雷达与主动雷达不同,要分别对监测通道回波 $y_{\text{surv}}(t)$ 和参考通道回波进行杂波抑制和直达波提取作为参考信号,即 $x_{\text{ref}}(t) = d(t)$,然后通过两通道回波的匹配滤波或基于稀疏表示理论来估计目标的距离(即时延 τ_q^m)和速度(即多普勒 f_q)。对于参考通道,要能保证直达波的功率以被提取作为参考信号;对于监测通道,由于面临复杂的电磁干扰,如地面广播电视信号的直达波和多径反射,导致目标回波的信噪比较低,因此目标会被杂波掩盖,这对于参数估计和目标探测带来不小的挑战。

为解决上述问题,本文将RIS引入外辐射源雷达系统中,研究可增强目标回波信噪比的RIS辅助外辐射源雷达系统设计和目标参数估计方法。与常规外辐射源雷达系统目标易被直达波或强多径掩盖不同,如图2所示的RIS辅助外辐射源雷达由于RIS的加入,一方面不仅为雷达系统提供了一个额外的信号路径,而且通过调整RIS反射单元改变信号的电磁特性,可达到在削弱杂波信号的同时加强目标回波的效果。因此,RIS辅助的雷达系统信号模型成分更复杂。另一方面,RIS辅助的外辐射源雷达系统在接收端不再有分别指向目标和发射站方向的两通道回波,而是仅拥有一个指向RIS方向的单通道回波,需要优化设计RIS参数使该单通道回波既能保证直达波的提取又使目标回波不

被掩盖,还需要能利用目标相对于RIS单元的空间特性差异实现目标时延、速度和方位信息的多参数同时估计。本文以ULA型RIS为例研究RIS辅助的外辐射源雷达系统的信号模型。

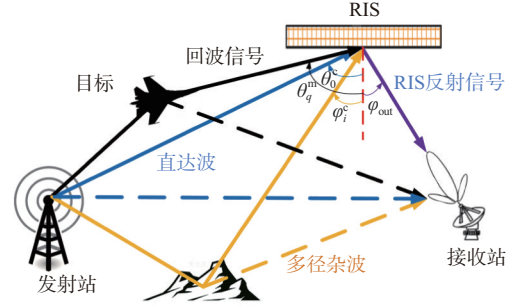


图2 RIS辅助的外辐射源雷达示意

首先需要注意的是,除了图1中常规的路径情况外,经过RIS的反射路径也成为RIS辅助外辐射源雷达系统信号传播的一部分。此外,由于多重反射信号的功率水平一般较低可以忽略,所以RIS辅助的外辐射源雷达系统得到的接收信号由发射站→RIS→接收站路径中的直达波 $d(t)$ 、发射站→障碍物→RIS→接收站路径中多径杂波、发射站→目标→RIS→接收站路径中的目标回波,以及发射站→接收站路径中的直达波 $d(t)$ 、发射站→障碍物→接收站路径中的多径杂波、发射站→目标→接收站路径中的目标回波与噪声组成。RIS辅助的外辐射源雷达系统得到的接收信号可表示为

$$y_{\text{surv}}(t) = \sum_{i=0}^{N_i} c_i^c \mathbf{a}_R^H(\varphi_{\text{out}}) \text{diag}(\mathbf{g}) \mathbf{a}_R(\theta_i^c) d(t - \tau_i^c) + \sum_{q=1}^{N_q} c_q^m \mathbf{a}_R^H(\varphi_{\text{out}}) \text{diag}(\mathbf{g}) \mathbf{a}_R(\theta_q^m) d(t - \tau_q^m) e^{i2\pi f_q t} + \sum_{i=0}^{N_i} c_i^{c'} d(t - \tau_i^{c'}) + \sum_{q=1}^{N_q} c_q^{m'} d(t - \tau_q^{m'}) e^{i2\pi f_q t} + z(t) \quad (2)$$

式中: N_i 和 N_q 分别为多径杂波和目标的数量; c_i^c, c_q^m 分别为通过RIS路径的第 i 条多径杂波和第 q 个目标的复包络幅度; τ_i^c, τ_q^m 分别为通过RIS路径的第 i 条多径杂波和第 q 个目标的时间延迟; $c_i^{c'}, c_q^{m'}$ 分别为没有通过RIS路径的第 i 条多径杂波和第 q 个目标的复包络幅度; $\tau_i^{c'}, \tau_q^{m'}$ 分别为没有通过RIS路径的第 i 条多径杂波和第 q 个目标的时间延迟; f_q 为第 q 个目标的多普勒频移; $\text{diag}(\mathbf{g})$ 表示RIS的相位

矩阵, $\text{diag}(\cdot)$ 是一个常见的数学函数, 通常用于构造对角矩阵或提取矩阵的对角线元素, 其中 $\mathbf{g} = [e^{j\varphi^{(1)}}, e^{j\varphi^{(2)}}, \dots, e^{j\varphi^{(M_n)}}]$ 为 RIS 的反射系数矢量, $\varphi^{(m_n)}$ 为反射系数的相位; $z(t)$ 为高斯白噪声。在所考虑的系统模型中, 角度的物理定义如下: 在从发射站到 RIS 的路径中, θ_i^c 和 θ_q^m 表示第 i 条多径杂波和第 q 个目标的入射信号与 RIS 法线的夹角; 在 RIS 到接收站的路径中, φ_{out} 表示反射信号与 RIS 法线的夹角; 那么 RIS 处阵列的导向矢量 $\mathbf{a}_R(\theta)$ 表示为 $\mathbf{a}_R(\theta) = \mathbf{f}(\theta, M_R)$, 其中

$$\mathbf{f}(\theta, M) = [1, e^{-j2\pi d \sin \theta / \lambda}, \dots, e^{-j2\pi(M-1)d \sin \theta / \lambda}]^T \quad (3)$$

式中, d 表示相邻阵元之间的距离, λ 表示信号波长, θ 表示信号的入射方向角, M 表示阵列的阵元数量, T 表示矩阵转置。

从接收信号 $y_{\text{surv}}(t)$ 的表达式中, 可以发现 RIS 辅助外辐射源雷达接收信号是由功率不同的各种信号组成的, 等号右边除噪声外的其他四项分别对应发射站 \rightarrow RIS \rightarrow 接收站路径中的多径杂波和发射站 \rightarrow 目标 \rightarrow RIS \rightarrow 接收站路径中的目标回波, 以及发射站 \rightarrow 接收站路径中的多径杂波和发射站 \rightarrow 目标 \rightarrow 接收站路径中的目标回波。由于 RIS 辅助外辐射源雷达的接收波束仅对准 RIS 反射方向, 因此式(2)第 1、2 项路径的回波功率会得到提升, 而可以忽略第 3、4 项路径, 即 $0 \approx c_i^c \approx c_q^m \ll c_q^c < c_i^c$ 。那么, 接收信号可被简化为

$$y_{\text{surv}}(t) = \sum_{i=0}^{N_i} c_i^c \mathbf{a}_R^c(\varphi_{\text{out}}) \text{diag}(\mathbf{g}) \mathbf{a}_R(\theta_i^c) d(t - \tau_i^c) + \sum_{q=1}^{N_q} c_q^m \mathbf{a}_R^m(\varphi_{\text{out}}) \text{diag}(\mathbf{g}) \mathbf{a}_R(\theta_q^m) d(t - \tau_q^m) e^{j2\pi f_c t} + z(t) = \sum_{i=0}^{N_i} c_i^c \mathbf{g} \mathbf{b}(\theta_i^c) d(t - \tau_i^c) + \sum_{q=1}^{N_q} c_q^m \mathbf{g} \mathbf{b}(\theta_q^m) \cdot d(t - \tau_q^m) e^{j2\pi f_c t} + z(t) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{b}(\theta) = \mathbf{a}_R^*(\varphi_{\text{out}}) \odot \mathbf{a}_R(\theta) = [1, e^{-j2\pi d(\sin \theta - \sin \varphi_{\text{out}}) / \lambda}, \dots, e^{-j2\pi(M_R-1)d(\sin \theta - \sin \varphi_{\text{out}}) / \lambda}]^T$, \odot 表示哈达玛乘积, 上标*表示取复数共轭。

针对直达波提取问题, 借助非合作照射源的数字调制, RIS 辅助外辐射源雷达系统同样可以通过解调再重构的方法提取直达波作为参考信号^[18]。

然而, 由式(4)可见, 虽然 RIS 辅助的外辐射源雷达接收信号同样视为由直达波、多径杂波、目标等路径回波组成, 但与一般外辐射源雷达各路径回波可认为是直达波经不同时延和多普勒频移的副本不同, RIS 辅助的外辐射源雷达接收信号的各路径回波在直达波经过时延和多普勒频移副本的基础上, 还调制了 RIS 的反射系数矢量 \mathbf{g} 。因此, 一方面可以通过优化设计 RIS 的反射系数矢量 \mathbf{g} 调整接收信号中各成分的功率, 以解决外辐射源雷达目标探测所面临的参考信号获取和目标信噪比过低而被杂波掩盖等问题; 另一方面需要注意与一般外辐射源雷达系统基于匹配滤波结果获取目标的时延和多普勒参数不同, 如果 RIS 的反射系数矢量是时变的, 则导致 RIS 辅助外辐射源雷达回波信号不能直接表示为直达波的不同时延或多普勒副本, 因而不能直接使用常规的匹配滤波处理或稀疏表示建模, 这直接影响了目标参数的获取过程。另外, 由式(4)可见, RIS 辅助外辐射源雷达因为只有对准 RIS 的波束指向, 不能通过常规接收天线阵列获取目标的方位信息, 因此只能通过利用第 q 个目标相对于 RIS 的方向差异来估计得到第 q 个目标相对于 RIS 的方位参数 θ_q^m 。

2 RIS 反射系数矢量的优化设计

从前文可知, 引入 RIS 主要是为了解决外辐射源雷达目标探测所面临的参考信号获取和目标信噪比过低而被杂波掩盖等问题, 本节首先研究以提升接收信号的 SCNR 和保证直达波接收功率为准则的 RIS 反射系数矢量优化问题。本节从信号模型出发, 推导得到接收信号的 SCNR 表达式, 进一步建立综合考虑直达波功率和目标信噪比的优化框架, 旨在通过调整 RIS 的反射系数矢量 \mathbf{g} 来优化接收信号的 SCNR 比值。

基于式(4)定义 $I_i(t) = c_i^c d(t - \tau_i^c)$, $Q_q(t) = c_q^m d(t - \tau_q^m) e^{j2\pi f_c t}$, 可得 $\mathbf{I}(t) = [I_1(t), I_2(t), \dots, I_{N_i}(t)]^T$, $\mathbf{Q}(t) = [Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_{N_q}(t)]^T$, 将接收到的信号简化为

$$y_{\text{surv}}(t) = \mathbf{g} \mathbf{b}(\theta_0^c) c_0^c d(t) + \mathbf{g} \mathbf{B}(\theta^c) \mathbf{I}(t) + \mathbf{g} \mathbf{B}(\theta^m) \mathbf{Q}(t) + z(t) \quad (5)$$

在这里定义 $\mathbf{B}(\theta^c) = [\mathbf{b}(\theta_1^c), \mathbf{b}(\theta_2^c), \dots, \mathbf{b}(\theta_{N_i}^c)]$, $\mathbf{B}(\theta^m) = [\mathbf{b}(\theta_1^m), \mathbf{b}(\theta_2^m), \dots, \mathbf{b}(\theta_{N_q}^m)]$ 。可见, 式(5)前三项分别

为直达波、多径杂波和目标。

由式(5)可得,接收信号的SCNR衡量的是有用信号与杂波和噪声的比值,它可以表示成关于RIS反射系数矢量 \mathbf{g} 的函数:

$$f(\mathbf{g}) = \frac{\xi \left\{ \left\| \mathbf{gB}(\theta^m) \mathbf{Q}(t) \right\|_2^2 \right\}}{\xi \left\{ \left\| \mathbf{gB}(\theta^c) \mathbf{I}(t) \right\|_2^2 \right\} + \xi \left\{ \left\| \mathbf{gB}(\theta_0^c) c_0^c d(t) \right\|_2^2 \right\} + \xi \left\{ \left\| z(t) \right\|_2^2 \right\}} \quad (6)$$

式中 $\xi\{\cdot\}$ 表示数学期望运算,根据 $\| \mathbf{A} \|_2^2 = \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{A}^H)$,其中 $\text{tr}\{\cdot\}$ 是矩阵的迹,可得

$$f(\mathbf{g}) = \frac{\text{tr}\{\mathbf{gB}(\theta^m) \mathbf{A} \mathbf{B}^H(\theta^m) \mathbf{g}^H\}}{\text{tr}\{\mathbf{gB}(\theta^c) \mathbf{\Omega} \mathbf{B}^H(\theta^c) \mathbf{g}^H\} + \left\| \mathbf{gB}(\theta_0^c) \right\|_2^2 \gamma c_0^c P_s + N\sigma_z^2} \quad (7)$$

式中, P_s 为发射信号的功率, $\mathbf{\Omega} = \gamma^2 P_s \text{diag}\{ |c_1^c|^2, |c_2^c|^2, \dots, |c_N^c|^2 \}$ 为多径信号的功率矩阵, $\mathbf{A} = \gamma^2 P_s \text{diag}\{ |c_1^m|^2, |c_2^m|^2, \dots, |c_N^m|^2 \}$ 为目标信号的功率矩阵, σ_z^2 为噪声的方差即噪声功率, N 为噪声采样点数。

因此,接收信号SCNR的提高问题就可以转化为在某些约束条件下RIS反射系数矢量 \mathbf{g} 的优化设计问题,即通过改变RIS的反射系数矢量 \mathbf{g} 实现接收信号所需的目标信噪比和杂波信噪比。接收信号的SCNR比值越高,目标信号越容易从干扰中被检测到,雷达性能越好。

在实际雷达系统中,目标和多径可以在任意方向,即多径方位 θ^c 和目标方位 θ^m 未知。然而,一般情况下,发射站到RIS的方位 θ_0^c 是已知的。因此,在RIS辅助外辐射源雷达系统中,为了提高接收信号的SCNR并确保直达波的接收功率,通常会通过设置调整因子 $\rho = 10^{(low - SNR_{\text{直达}})/10}$ 来降低来自发射站方向 θ_0^c 的功率。与此同时,为避免RIS过度抑制直达波,必须设定一个功率阈值下限 low ,以确保直达波在抑制后仍然保留一定的功率。根据以上要求制定如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{g}} & \left\| \mathbf{gB}(\theta_0^c) \right\|_2^2 \\ \text{s.t.} & \quad \left| \mathbf{g} \right| \leq 1 \\ & \left\| \mathbf{gB}(\theta_0^c) \right\|_2^2 \geq \rho \end{aligned} \quad (8)$$

因为

$$\left\| \mathbf{gB}(\theta_0^c) \right\|_2^2 = \text{tr}\{\mathbf{b}(\theta_0^c) \mathbf{b}^H(\theta_0^c) \mathbf{g}^H \mathbf{g}\} \quad (9)$$

优化问题可以近似为以下问题:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{G}'} & \text{tr}\{\mathbf{b}(\theta_0^c) \mathbf{b}^H(\theta_0^c) \mathbf{G}'\} \\ \text{s.t.} & \quad \mathbf{G}'_{m_R, m_R} = 1 \quad (m_R = 1, 2, \dots, M_R) \\ & \quad \mathbf{G}' \geq 0 \\ & \quad \mathbf{G}' \text{ 是一个厄米特矩阵} \\ & \quad \text{tr}\{\mathbf{b}(\theta_0^c) \mathbf{b}^H(\theta_0^c) \mathbf{G}'\} \geq \rho \end{aligned} \quad (10)$$

该优化问题更形式化地表达为一个半定规划(SDP)问题,通过凸优化cvx工具箱得到最优解 $\tilde{\mathbf{G}}$ 。由于 $\mathbf{G}' = \mathbf{g}^H \mathbf{g}$,为了得到最优的RIS反射系数矢量 $\tilde{\mathbf{g}}$,可以采用高斯随机化的方法^[16]。具体步骤如下:

通过特征值分解,可得

$$\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{U}^H \quad (11)$$

优化得到新的RIS的反射系数矢量:

$$\tilde{\mathbf{g}} = e^{j \text{ang}(\mathbf{U} \sqrt{\mathbf{\Sigma}} \boldsymbol{\varepsilon})} \quad (12)$$

式中, $\text{ang}(\cdot)$ 为变量的角度, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为随机生成的服从复高斯正态分布的向量,将 $\tilde{\mathbf{g}}$ 记为 \mathbf{g} 。

3 基于时变RIS与稀疏重构的目标多参数估计方法

如前文所述,RIS辅助的外辐射源雷达系统在信号处理方面与常规外辐射源雷达系统存在显著差异。本节提出了一种基于时变RIS与稀疏重构的目标多参数估计方法,它首先将信号按时隙划分,并通过优化设计使RIS反射系数在时隙内固定、时隙间变化,以此构造随时间变化的RIS系统。该方法通过主动配置RIS,充分利用目标相对于时隙间RIS的方位差异对系统维度进行了拓展,结合时隙内匹配滤波和时隙间空域稀疏优化的目标探测方法,可实现对目标时延、速度和方位的同时估计。

3.1 时隙划分和RIS动态配置

首先利用“解调-再调制”技术对接收信号进行重构,以获得参考信号。随后将参考信号和监测信号划分为 H 个时隙,采用第2节的优化方法得到每个时隙内RIS的反射系数矢量,但在不同时段间

是变化的。

通过随机产生 $L(L \gg H)$ 个随机向量 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_L$, 且 $\varepsilon_l (l = 1, 2, \dots, L)$ 服从均值为 0、方差为 $\tilde{\mathbf{G}}$ 的复高斯正态分布, 即 $\varepsilon \sim N(0, \tilde{\mathbf{G}})$; 优化得到 RIS 的反射系数矢量:

$$\tilde{\mathbf{g}}_l = e^{j \text{ang}(U \sqrt{\Sigma} \varepsilon_l)} \quad (13)$$

并对每一个向量 $\tilde{\mathbf{g}}_l$ 计算代价函数:

$$\beta_l = \left\| \tilde{\mathbf{G}} - \tilde{\mathbf{g}}_l^H \tilde{\mathbf{g}}_l \right\|_2 \quad (14)$$

最后, 选取使 β_l 最小所对应的 H 个随机向量, 得到 $\tilde{\mathbf{g}}_h$ 并记为 $\mathbf{g}_h (h = 1, \dots, H)$ 。进而可以将参考信号和接收信号分成 H 个时隙。

参考信号的第 h 个时隙表达形式为

$$x_h(k) = x_{\text{ref}}(k + hT_b) \text{rect}[(k - T_b/2)T_b] \quad (15)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, T_b, T_{\text{int}}$ 为数据总长度, T_b 为每段数据长度, T_b 和 T_{int} 的关系为 $T_b = T_{\text{int}}/H$ 。当 $-1/2 \leq x \leq 1/2$ 时, $\text{rect}(x)$ 为 1, 否则为 0。需要注意的是, 时隙划分时时隙长度 T_b 和段数 H 的选取与目标的特性有关, 一般应保证目标待估计参数在此期间保持平稳状态, T_b 越大对目标的速度分辨率越高, H 越大对目标的方位分辨率越高。

监测信号的第 h 个时隙可表示为

$$y_h(k) = y_{\text{surv}}(k + hT_b) \text{rect}\left(\frac{k - (T_b + \tau_{\text{max}})/2}{T_b + \tau_{\text{max}}}\right) \quad (16)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, T_b + \tau_{\text{max}}, \tau_{\text{max}}$ 为最大回波时延。此外, 外辐射源雷达的时隙化处理完全是接收端的行为, 因此无需对发射端的协议进行任何修改。

3.2 基于匹配滤波的时隙信号时延-多普勒谱图获取方法

将每个时隙内的参考信号和监测信号进行匹配滤波, 获取对应 H 个时隙的 RD 谱图, 第 h 个时隙的参考信号与接收信号进行二维匹配滤波可表示为

$$\psi_h(\tau, f_d) = \sum_{k=0}^{K-1} y_h(k) x_h^*(k - \tau) e^{-j2\pi f_d k/K} \quad (17)$$

式中, τ 为时延, f_d 为多普勒频移, $*$ 表示取复数共轭。若二维匹配滤波相关处理之后得到的 RD 谱中出现了尖峰, 则代表在这个位置存在目标, 并且该谱峰在 RD 谱中对应的时延和多普勒频率值就是目标信号相对直达波信号的到达时间差和多普

勒频率差。

将式(16)代入式(17)可表示为

$$\psi_h(\tau, f_d) = \mathbf{g}_h \sum_{i=0}^{N_i} \mathbf{b}(\theta_i^c) C_{i,h}(\tau, f_d) + \mathbf{g}_h \sum_{q=1}^{N_q} \mathbf{b}(\theta_q^m) \cdot E_{q,h}(\tau, f_d) + Z_h(\tau, f_d) \quad (18)$$

式中: $C_{i,h}(\tau, f_d) = \sum_{k=0}^{K-1} c_i^c d_h(k - \tau_i^c) d_h^*(k - \tau) e^{-j2\pi f_d k/K}$ 表示多径干扰相关后的复包络信息; $E_{q,h}(\tau, f_d) = \sum_{k=0}^{K-1} c_q^m d_h(k - \tau_q^m) e^{j2\pi f_d k/K} d_h^*(k - \tau) e^{-j2\pi f_d k/K}$ 表示目标回波相关后的复包络信息; $Z_h(\tau, f_d) = \sum_{k=0}^{K-1} z_h(k) d_h^*(k - \tau) e^{-j2\pi f_d k/K}$ 表示噪声相关后的结果信息。

3.3 时延-多普勒单元稀疏建模与方位估计的压缩感知求解

将目标可能出现的时延单元离散为 $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_d, \dots, \tau_D\}$ 共计 D 个网格, 多普勒频率的离散为 $\{-f_p, \dots, -f_p, \dots, 0, \dots, f_p, f_{p+1}, \dots, f_p\}$ 共计 $2P+1$ 个网格, 针对每个离散的 RD 单元上收集 H 个时隙的观测数据, 并将这些数据组合成一个向量。基于此构建特定 RD 单元数据的不同方位向空间域数据的稀疏模型, 采用压缩感知算法求解对应不同方位分量的稀疏系数。接着, 按方位归类数据生成 RD 图, 最终估计得到回波的时延、速度和方位值。把同一 RD 单元的 H 个时隙数据组成向量, 可以将式(18)写成向量形式, 时延-多普勒单元可表示为

$$\psi(\tau_d, f_p) = \mathbf{GBQ} + \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{g}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{g}_H \end{bmatrix} [\mathbf{b}(\theta_0^c), \mathbf{b}(\theta_1^c), \dots, \mathbf{b}(\theta_q^m)] + \begin{bmatrix} C_0(\tau_d, f_p) \\ C_1(\tau_d, f_p) \\ \vdots \\ E_q(\tau_d, f_p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1(\tau_d, f_p) \\ Z_2(\tau_d, f_p) \\ \vdots \\ Z_H(\tau_d, f_p) \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, $\psi(\tau_d, f_p) = [\psi_1(\tau_d, f_p), \psi_2(\tau_d, f_p), \dots, \psi_H(\tau_d, f_p)]^T, C_i(\tau_d, f_p) = \sum_{h=1}^H C_{i,h}(\tau_d, f_p)/H, E_q(\tau_d, f_p) = \sum_{h=1}^H E_{q,h}(\tau_d, f_p)/H$ 。不同时隙匹配滤波的复包络受随机噪声影响较小, 其整体近似为一个均值。

根据式(19)可知, 每个时延-多普勒单元向量

$\psi(\tau_d, f_p)$ 可以被建模为目标方位信号的 $\mathbf{b}(\theta^m)$ 和杂波方位信号 $\mathbf{b}(\theta^c)$ 的线性组合。由于在RIS辅助的外辐射源雷达真实场景的整个监视区域中目标和杂波数量很少,因此时延-多普勒单元向量 $\psi(\tau_d, f_p)$ 在空间域中是稀疏的,通过采用离散观测区间的方法将目标可能出现的角度方位离散为 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_d}, \dots, \theta_{N_d}\}$ 共 N_d 来构造稀疏字典,故基于空间域的稀疏表示模型为

$$\psi(\tau_d, f_p) = \mathbf{GD}\mathbf{X}(\tau_d, f_p) + \mathbf{Z} \quad (20)$$

式中, $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{M_R \times N_d}$ ($M_R \ll N_d$)是基于空间域的稀疏表示模型的稀疏字典,其列矢量为各个方向的导向矢量 $\mathbf{b}(\theta_n)$ 组成, θ_n 取值范围是 $[-90^\circ, 90^\circ]$, N_d 是构建稀疏字典 \mathbf{D} 时采用的角度采样数, $\mathbf{X}(\tau_d, f_p)$ 是当前时延-多普勒单元 $\psi(\tau_d, f_p)$ 内需要求解的各个方向信号的复幅度, \mathbf{G} 是时变RIS的测量矩阵。由于 $\psi(\tau_d, f_p)$ 中最多只有 $N_i + N_q + 1$ 个真实存在目标,仅占稀疏字典 \mathbf{D} 中设置的角度采样个数 N_d 中的一小部分,即 $\mathbf{X}(\tau_d, f_p)$ 中非零稀疏的个数远小于角度采样个数 N_d ,因此向量 $\mathbf{X}(\tau_d, f_p)$ 是一个稀疏向量。

通过将 $\mathbf{X}(\tau_d, f_p)$ 的稀疏性约束添加到式(20),将其转换为以下优化问题:

$$\min_{\mathbf{X}(\tau_d, f_p)} \|\psi(\tau_d, f_p) - \mathbf{GD}\mathbf{X}(\tau_d, f_p)\|_2^2 + \gamma \|\mathbf{X}(\tau_d, f_p)\|_1 \quad (21)$$

即可得到当前时延-多普勒单元 $\psi(\tau_d, f_p)$ 内包含的各个方向信号的复幅度 $\mathbf{X}(\tau_d, f_p)$,式中 γ 是一个常数。当各个时延-多普勒单元 $\psi(\tau_d, f_p)$ 内每个方位上的信号幅度 $\mathbf{X}(\tau_d, f_p)$ 都提取出来以后,需要按方位归类每个时延-多普勒单元,重构后得到各方位上的RD谱图。若在重构后方位RD谱图出现明显的尖峰,则确定在这个方位上的位置存在目标;并且该谱峰在RD谱中对应的时延和多普勒频率值就是目标信号相对直达波信号的到达时间差和多普勒频率差。

4 仿真与结果分析

本节分析了所提算法在仿真场景下的目标检测结果,并与传统的外辐射源雷达系统进行了比较,场景仿真参数如表1所示。为评估算法的目标

检测能力,本节设计了一个包含不同信噪比回波的多目标仿真场景,选用高频段正交频分复用(OFDM)信号作为发射信号。OFDM是一种多载波调制技术,可提高系统总数据传输速率,对多径效应和频率选择性衰落具有较强的适应能力,简化信号处理使其能利用FFT/IFFT降低计算复杂度。

表1 仿真参数

参数描述	参数值
RIS单元数 M_R	64
发射站到RIS法线的方向角 θ_0^i	-30
反射信号与RIS法线的方向角 φ_{out}	0
空间范围	$-90^\circ \sim 90^\circ$, 间隔为 1°
时延单元数	40
多普勒单元数	300
直达波下限 low/dB	35

为验证基于时变RIS的目标检测算法的有效性,仿真中设置了OFDM参数(工作频率150 MHz,带宽96 kHz,子载波总数256,有效子载波213,保护间隔64,载波频率间隔444.44 Hz,16-QAM调制)。时隙设计为每时隙包含300个OFDM符号,共32个时隙。

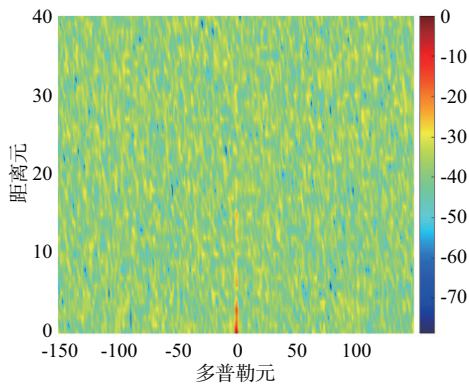
对于监测信号,仿真了9条多径杂波,相应的杂噪比(CNR)分别设置为:最强路径 $\text{CNR}=45$ dB,其他8条多径CNR对应取值为25 dB到10 dB、间隔为-2 dB;相应的时延取值为0~24距离元,间隔为3距离元;所有杂波路径相对RIS方位角取值为 -30° 到 10° ,间隔为 5° 。为了更直观地评估稀疏表示算法在实际情况下的目标检测能力,本节的接收信号中同时添加了具有不同参数的多个目标,如表2所示。此外,假设目标和杂波都是点散射的,并且噪声被建模为高斯白噪声。接下来分别从RIS对外辐射源雷达目标回波信噪比提升能力和目标多参数估计能力两方面进行方法验证和分析。

表2 仿真的目标参数

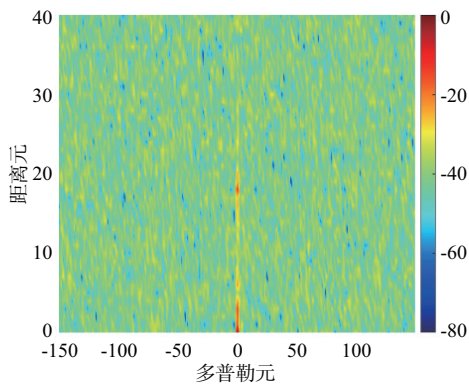
参数	目标			
	T1	T2	T3	T4
信噪比/dB	13	10	3	8
采样点延迟	10	13	8	15
多普勒频移/Hz	19	-37	-28	45
相对RIS方位/ $^\circ$	-54	-44	45	47

4.1 RIS 优化设计对外辐射源雷达目标回波信噪比的提升效果

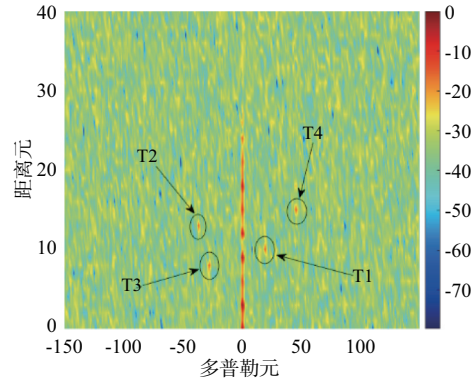
本节首先通过与无 RIS 的常规外辐射源雷达和基于随机优化反射系数的 RIS 辅助外辐射源雷达接收信号进行对比,分析了本文所提优化设计 RIS 对外辐射源雷达目标回波信噪比的提升性能,结果如图 3 所示。具体做法如下:首先依据表 2 所示的目标参数和所给的多径杂波参数,生成未添加 RIS 下的常规外辐射源雷达经过匹配滤波处理后的 RD 谱图,反映未经 RIS 优化时雷达对目标的检测能力,为后续的性能比较提供参考;然后,将本文第 2 节所提出的方法与随机 RIS 相位设计方案(每个 RIS 单元相位均匀分布在 $0\sim 2\pi$ 之间的随机方案)进行了比较,即通过分别采用所提的方法和随机方法对 RIS 反射系数矢量进行了优化,利用优化后的 RIS 反射系数矢量 \mathbf{g} 生成经过 RIS 优化后的接收信号,再将得到的接收信号与参考信号进行二维匹配滤波得到 RD 谱。



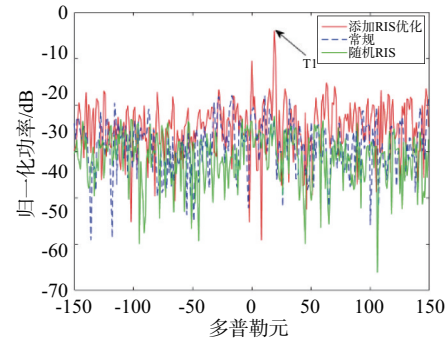
(a) 未添加 RIS 常规下获得的 RD 谱



(b) 添加随机 RIS 辅助获得的 RD 谱



(c) 添加本文方法优化 RIS 辅助获得的 RD 谱



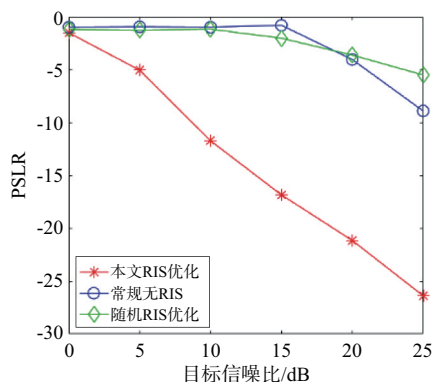
(d) 距离元为 10 的多普勒截面图

图 3 不同雷达系统在多目标场景下的检测结果

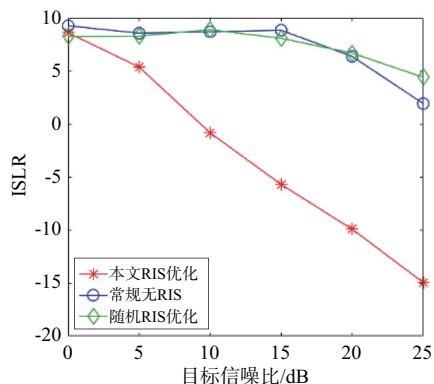
图 3 分别给出了接收信号在常规外辐射源雷达、随机 RIS 辅助外辐射源雷达、本文方法优化 RIS 辅助外辐射源雷达 3 种不同雷达系统经过信号处理后获得的 RD 谱,图 3(a)是未添加 RIS 的常规外辐射源雷达在没有使用任何杂波抑制方法情况下的 RD 谱,从图中可以看出,模拟的多目标完全被杂波掩盖,在 RD 谱上只能看到 CNR 非常强的零频多径杂波,可见未添加 RIS 的常规系统在多径干扰环境下的局限性,以及目标信号在低信噪比条件下的探测难度。图 3(b)和(c)分别是监测信号在使用添加随机 RIS 辅助的外辐射源雷达系统和添加 RIS 优化辅助的外辐射源雷达系统之后匹配滤波得到的 RD 谱。对比可见:添加本文方法优化 RIS 辅助的外辐射源雷达系统,在无需杂波抑制的情况下,由于极大地提高了目标的信噪比,使原本在常规外辐射源雷达中被杂波掩盖的目标成功地在 RD 谱中凸显了出来,4 个峰值与表 2 给定的目标参数一致。而图 3(c)添加本文方法优化 RIS 辅助获得的 RD 谱比图 3(b)添加随机 RIS 辅助获得

的RD谱目标检测效果更好,证明了本文所提RIS反射系数矢量优化方法提高目标回波信噪比的有效性。图3(d)给出了更直观的目标时延截面对比图。

接下来通过定量分析来比较不同处理方法下的目标探测性能,可以使用峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)^[19]进行评估。处理过程如下:添加一个具有不同信噪比的目标回波,将目标信噪比设置为0~25 dB,步长为5 dB,杂波环境的设置方式与多目标场景的杂波环境相同。在每个目标信噪比下,基于3个不同雷达系统的目标探测方法,分别执行100次蒙特卡罗仿真处理,最后得到不同目标信噪比下3个系统模型的PSLR和ISLR处理结果,如图4所示。从理论上来说,为了防止弱目标被强目标的副瓣掩盖,PSLR和ISLR越低,目标检测的性能越好。



(a) PSLR定量评估结果



(b) ISLR定量评估结果

图4 不同信噪比下3种系统的定量评估

从实验数据中可以明显看出,添加RIS优化的外辐射源雷达系统在PSLR和ISLR方面均优于未

添加RIS的常规外辐射源雷达系统和随机RIS辅助的外辐射源雷达系统。随着目标信噪比的提高,添加RIS优化的雷达系统的PSLR和ISLR值显著降低。这一趋势表明,RIS优化能够显著减少旁瓣对目标信号的干扰,提升目标检测的精度。具体而言,添加RIS优化的雷达系统不仅在低信噪比情况下表现出更好的旁瓣抑制能力,在高信噪比情况下,PSLR和ISLR值也持续降低,这表明RIS优化能够在广泛的信噪比范围内持续提升目标检测性能。相比之下,未添加RIS的雷达系统在PSLR和ISLR的改善上表现有限,而随机RIS优化虽然有所改进,但效果不及系统优化的RIS设计。这进一步验证了RIS优化对目标检测性能的提升作用。通过观察进一步发现,添加RIS优化的外辐射源雷达目标检测方法的PSLR和ISLR与目标信噪比成反比。当目标SNR依次增加5 dB时,相应的PSLR和ISLR均匀地减少约5 dB。总体上,分析结果与PSLR和ISLR的定义一致,这进一步说明了所提出算法的正确性。

4.2 时变RIS辅助外辐射源雷达的目标时延、多普勒与方位估计

图5展示了时变RIS辅助的外辐射源雷达在单接收通道下实现时延、多普勒和方位参数联合估计。目标具体参数见表2。首先,接收信号和参考信号被分段处理,通过匹配滤波获得每段的时延-多普勒数据。随后,将数据离散化为若干网格单元,并构建基于稀疏表示的RD单元数据模型。通过使用正交匹配追踪(OMP)算法处理数据向量,进而重构RD谱图。重构后的RD谱图中显著的谱峰值不仅确认了目标的存在,还提供了目标方位的精确信息。

在图5的多个子图中,除了目标回波方向RD谱图外,其他方向RD谱图没有出现显著的峰值,进一步排除了误检测的可能性。通过分析这些谱峰所对应的时延和多普勒频率值,可以精确地确定目标的位置及其相关参数。特别是图5(a)~(d)中重构后目标方位RD谱图峰值与目标的设定参数完全一致,验证了目标定位的准确性。图5(e)展示了稀疏重构后各方位和信号强度分析结果,

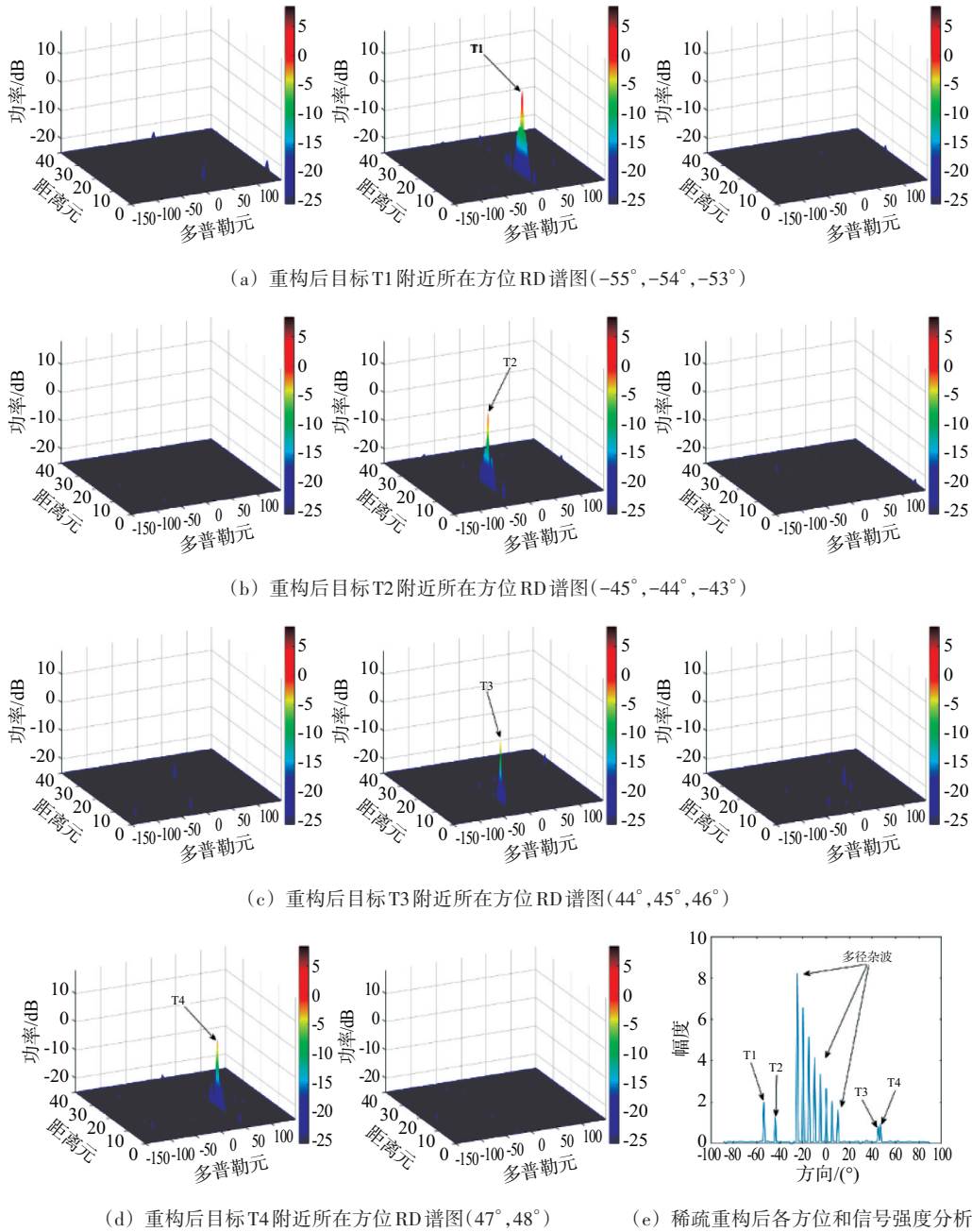


图5 目标方位域RD谱重构分布

可以看到经过信号积累处理后,时延-多普勒单元内的主要信号是目标的主瓣信号和若干强干扰副瓣信号。这一观测结果进一步确认了目标的精准定位和方位信息,展示了稀疏重构技术在从复杂背景中提取目标信号方面的强大能力。为了有效区分目标主瓣与干扰副瓣,可以通过分析各个方位的时延-多普勒图中的时延和多普勒频移来实现。目标主瓣通常具有明显的时延和多普勒频移

特征,而干扰副瓣则可能表现为在不同的时延和零多普勒频移上分布的干扰峰值。通过这种方式可以有效分离主瓣信号与副瓣干扰,从而提升目标检测的准确性。

因此,本文提出的基于时变RIS辅助的辐射源雷达信号处理算法在单接收通道条件下,能够准确实现目标的时延、速度和方位估计。该算法通过详细的数据处理流程和OMP算法,提供了有效

的目标检测方法。在实际应用中,可以优化算法处理流程,通过添加杂波抑制处理,进一步提高目标检测的准确性和鲁棒性。

5 结束语

本文建立了一个基于RIS辅助外辐射源雷达目标定位的综合框架,包括RIS相位设计和多目标参数估计的信号处理方法。首先,提出了一种RIS反射系数矢量优化方法,旨在提升接收信号SCNR并确保直达波信号的接收功率。通过与随机优化方法的对比,证明了该方法能够有效减少直达波路径干扰,同时增加目标回波的反射功率,使目标回波在接收信号中无需杂波抑制即可清晰呈现。接下来,针对单接收通道下目标参数(如时延、速度和方位)估计的问题,提出了一种基于时变RIS与稀疏重构的信号处理方法。该方法通过将接收信号分段处理,并设计随时变的RIS反射系数,充分利用目标与RIS之间的方位差异,并结合基于稀疏优化的目标检测方法,实现了多目标参数的同时估计。仿真结果验证了所提方法的可行性,展示了其准确估计目标时延、速度和方位信息的能力。

参考文献:

- [1] 万显荣,易建新,占伟杰,等.基于多照射源的被动雷达研究进展与发展趋势[J].雷达学报,2020,9(6):939-958.
- [2] 赵志欣,朱斯航,徐超,等.DRM外辐射源雷达多普勒扩展杂波抑制算法研究[J].现代雷达,2017,39(5):46-49.
- [3] SUN Quande, SHAN Tao, FENG Yuan, et al. A Frequency Domain Clutter Suppression Approach for Passive Radar [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(9):14916-14929.
- [4] ATTALAH M A, LAROUCSI T, GINI F, et al. Range-Doppler Fast Block LMS Algorithm for a DVB-T-Based Passive Bistatic Radar [J]. Signal, Image and Video Processing, 2019, 13(1):27-34.
- [5] 孙全德,单涛,赵娟,等.基于压缩感知的外辐射源雷达目标参数估计方法[J].北京理工大学学报,2023,43(12):1298-1307.
- [6] ZHAO Zhixin, CAO Yulong, WANG Yuhao, et al. Transmitted - Signal - Free Target Information Extraction for OFDM - Based Passive Radar with Time - Varying Sparse Model [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20:3503405.
- [7] NIKAEIN H, ZEFREH R G, GAZOR S. Target Detection and Interference Cancellation in Passive Radar Sensors via Group - Sparse Regression [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(18):21484-21492.
- [8] PAN Cunhua, ZHOU Gui, ZHI Kangda, et al. An Overview of Signal Processing Techniques for RIS/IRS - Aided Wireless Systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2022, 16(5):883-917.
- [9] BASAR E. Reconfigurable Intelligent Surface - Based Index Modulation: A New Beyond MIMO Paradigm For 6G [J]. IEEE Trans on Communications, 2020, 68(5):3187-3196.
- [10] HONG Sheng, PAN Cunhua, REN Hong, et al. Robust Transmission Design for Intelligent Reflecting Surface - Aided Secure Communication Systems with Imperfect Cascaded CSI [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2021, 20(4):2487-2501.
- [11] BUZZI S, GROSSI E, LOPS M, et al. Radar Target Detection Aided By Reconfigurable Intelligent Surfaces [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021, 28:1315-1319.
- [12] BUZZI S, GROSSI E, LOPS M, et al. Foundations of MIMO Radar Detection Aided by Reconfigurable Intelligent Surfaces [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2022, 70:1749-1763.
- [13] ESMAEILBEIG Z, MISHRA K V, SOLTANALIAN M. IRS - Aided Radar: Enhanced Target Parameter Estimation via Intelligent Reflecting Surfaces [C]//2022 IEEE 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, Trondheim, Norway: IEEE, 2022:286-290.
- [14] LU Wei, DENG Bin, FANG Qiqing, et al. Intelligent Reflecting Surface - Enhanced Target Detection in MIMO Radar [J]. IEEE Sensors Letters, 2021, 5(2):7000304.
- [15] 邹鲲,杨宾锋,来磊,等.IRS辅助的无源双基地雷达直达波干扰抑制[J].雷达科学与技术,2023,21(5):482-488.
- [16] CHEN Zhimin, CHEN Peng, GUO Ziyu, et al. A RIS - Based Vehicle DOA Estimation Method with Integrated Sensing and Communication System [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(6):5554-5566.
- [17] CHEN Peng, CHEN Zhimin, MIAO Pu, et al. RIS - ADMM: A RIS and ADMM - Based Passive and Sparse Sensing Method with Interference Removal (下转第550页)

- 播外辐射源雷达网航迹起始算法[J]. 雷达学报, 2024, 13(3):601-612.
- [3] ZUO Liao, WANG Jun, CHEN Gang. Doppler Ambiguity Analysis and Suppression for LTE-Based Passive Bistatic Radars [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(8):1140-1152.
- [4] 李中余, 黄川, 武俊杰, 等. 基于GNSS的无源雷达海面目标检测技术综述[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(4):404-416.
- [5] WANG Yasen, BAO Qinglong, WANG Dinghe, et al. An Experimental Study of Passive Bistatic Radar Using Uncooperative Radar as a Transmitter [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(9):1868-1872.
- [6] 邹俊杰, 程丰, 万显荣. 外源雷达空时联合恒虚警检测分析与实验[J]. 雷达科学与技术, 2022, 20(4):415-420.
- [7] 沈显照, 杨鹏程. 一种频域脉冲最小均方误差杂波对消算法[J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(2):151-156.
- [8] COLONE F, O'HAGAN D W, LOMBARDO P, et al. A Multistage Processing Algorithm for Disturbance Removal and Target Detection in Passive Bistatic Radar [J]. *IEEE Trans on Aerospace & Electronic Systems*, 2009, 45(2):698-722.
- [9] 张坚, 万显荣, 刘玉琪. 外辐射源雷达滑窗扩展相消算法并行实现[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(2):115-119.
- [10] NITZBERG R. Clutter Map CFAR Analysis [J]. *IEEE Trans on Aerospace & Electronic Systems*, 1986, 22(4):419-421.
- [11] 彭泽肖, 郝洪民, 胡伟东, 等. 杂波背景下多普勒测速雷达信号处理算法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(21):122-129.
- [12] TAN D K P, LESTURGIE M, SUN H B, et al. Random Range Sidelobes Analysis and Suppression in Airborne Passive Radar [C]// *IET International Conference on Radar Systems*, Glasgow, UK: [s.n.], 2012:559-563.
- [13] 秦天慈, 王中训, 黄勇, 等. 雷达恒虚警目标检测处理技术综述[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(3):1-11.
- [14] YANG Wei, ZHANG Liang, YANG Liru, et al. A General Evaluation System for Optimal Selection Performance of Radar Clutter Model [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2023, 34(6):1520-1525.
- [15] KIM B, JIN Y, BAE J, et al. Efficient Clutter Cancellation Algorithm Based on a Suppressed Clutter Map for FMCW Radar Systems [J]. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 2023, 23(5):449-451.
- [16] 洪伟, 马艳艳, 程义. 基于杂波分布特性的恒虚警率检测器设计[J]. 舰船电子对抗, 2023, 46(4):89-93.
- [17] 王蓓. 基于杂波图的恒虚警处理技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [18] 贾创. 复杂背景下雷达恒虚警检测算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [19] 贲广利. 线性调频信号参数估计方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2022.
- 作者简介:**
梁师源 男, 硕士研究生, 主要研究方向为自动目标识别。
潘嘉蒙 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷达信号处理。
鲍庆龙 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理。
肖怀铁 男, 博士, 教授, 主要研究方向为自动目标识别。
- (上接第539页)
- [J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(4):867-871.
- [18] 张勋, 万显荣, 易建新, 等. 基于最优杂波抑制的外辐射源雷达参考信号可信重构[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(11):3193-3200.
- [19] LELLOUCH G, MISHRA A K, INGGS M. Design of OFDM Radar Pulses Using Genetic Algorithm Based Techniques [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(4):1953-1966.
- 作者简介:**
赵志欣 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为外辐射源雷达、雷达信号处理。
李周章 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新体制外辐射源雷达信号处理。
林应运 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新体制外辐射源雷达信号处理。
陈远帅 男, 硕士研究生, 主要研究方向为外辐射源雷达信号处理。