

面向先验信息缺失的无人系统空域抗干扰方法研究

潘子豪 张邦宁 甄攀 朱博文 王宁 郭道省*

(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)

摘要: 无人智能系统在复杂电磁环境下的可靠通信是保障其自主任务能力的关键。尤其对于无人机这类典型的空中通信节点,其通信链路直接暴露于开放电磁空间,面临的干扰威胁尤为突出。然而,在实际应用中,由于对干扰特征、期望信号来向及多径传播等信息认知不足,导致传统空域抗干扰方法的性能严重下降。针对先验信息缺失场景,本文研究了一种面向无人系统空域抗干扰方法。具体而言,首先采用空间平滑算法对接收信号进行解相干处理,随后进行空间谱估计以检测出潜在入射信号的来向。然后,遍历估计的谱峰,采用协方差矩阵重构波束形成算法依次提取该方向的信号,实现混合信号的分离。最后,设计了一种基于频谱相似度和时延的信号类型识别方法,将分离的信号分别归类为干扰、直射和多径信号,并根据信号类型,在保留直射信号、抑制干扰的前提下,对多径信号进行选择合并或抑制等灵活处理。仿真实验验证了所提算法的可行性与有效性。结果表明,所提算法能够在先验信息缺失的条件下有效抑制干扰并灵活处理多径,改善了通信性能。

关键词: 无人系统;空域抗干扰;自适应波束形成;空间平滑

中图分类号: TN973.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)00-0001-10

DOI: 10.11999/JEIT260296

CSTR: 32379.14.JEIT260296

1 引言

无人系统在现代应急救援、公共安全、智能交通、物流配送等关键场景中发挥着日益重要的作用,其自主感知、智能决策与协同控制能力是实现高效任务执行的核心保障^[1-3]。同时,确保无人平台在复杂动态环境中的安全、可靠、连续运行,是无人智能技术的核心基础^[4,5]。在这些应用中,无人机常作为空中通信中继或任务载荷,承担信息回传与指令接收任务,其通信链路直接暴露于开放、非合作的电磁环境中,极易遭受有意或无意的压制性干扰,严重制约其感知、决策与控制闭环的稳定性^[6,7]。为保障干扰条件下无人机的稳定通信,需构建一套稳健可靠的抗干扰机制。其中,空域抗干扰技术是现代无线通信系统中提升抗干扰能力的关键途径,其基本原理是通过波束形成算法调整接收天线各阵元的加权系数,在期望信号方向形成主瓣,并在干扰方向形成零陷,从而实现了对干扰的抑制和期望信号的增强^[8,9]。

空域抗干扰中最具代表性的波束形成算法是J. Capon于1969年提出的最小方差无失真响应(minimum variance distortionless response, MVDR)波束形成^[10],也称为Capon波束形成。该方法能自适应匹配接收数据,在获取准确的干扰加噪声协方差矩阵(jamming-plus-noise covariance matrix, JNCM)和期望信号导向矢量的条件下,可实现最

优性能。然而,在实际中,由于对干扰信息认知不足,难以直接获取JNCM,通常采用样本协方差矩阵(sampled covariance matrix, SCM)代替,由此得到样本协方差矩阵求逆(sampled covariance matrix inversion, SMI)波束形成器。在观测样本有限的条件下,样本协方差矩阵与真实的数据协方差矩阵之间存在估计误差。为了提高波束形成在有限样本下的鲁棒性,BLAIR D.于1988年首次提出对角加载(Diagonal Loading, DL)的概念^[11],由此形成对角加载样本协方差矩阵求逆(Diagonal Loading Sample Covariance Matrix Inversion, LSMI)波束形成器^[12,13]。针对导向矢量失配问题,研究者通过设置导向矢量的不确定范围,作为波束优化的约束,来改善波束形成的性能^[14-17]。此外,还可以将期望信号导向矢量投影到干扰加噪声子空间以校正导向矢量失配^[18],改善波束输出性能。然而,上述方法都直接使用SCM没有消除期望信号的影响,在高信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)区域存在期望信号自消问题。Gu Y.^[19]于2012年提出了一种重构JNCM和估计期望信号导向矢量的波束形成框架,该方法首次实现了对理论最优输出信干噪比(signal to interference plus noise power ratio, SINR)的逼近^[20]。该类框架的核心在协方差矩阵重构(Covariance matrix reconstruction, CMR),主要可分为三类方法:基于空间谱积分的重构方法^[21-24],基于干扰功率和导向矢量估计的重构方法^[25-27]、以及去除期望信号分量的重构方法^[28,29]。在完成CMR后,接着对期望信号导向矢量进行估计或者校正。

收稿日期: 2026-xx-xx; 改回日期: 2026-06-29; 网络出版: 2026-07-13

*通信作者: 郭道省 xyzgfg@sina.com

上述工作均假设已具备期望信号来向的先验信息。当期望信号来向或参考信号缺失时,可以利用信号自身统计特征设计空域抗干扰的滤波系数,例如高阶累积量^[30]、循环平稳特性^[31]和恒模特性^[32]。近年来,研究人员引入信号分类与迁移学习,通过单天线数据预训练期望信号特征,在无需阵列校准和期望信号波达方向条件下实现期望信号接收与干扰抑制^[33]。此外,传播环境中未知的多径效应也会进一步增加空域抗干扰难度。在已知直射信号角度扇区先验信息条件下,多径可作为期望信号副本进行合并接收。文献^[34]通过构建多径来向不确定集,将空域滤波问题转化为最大-最小优化问题,实现多径合并接收。文献^[35]基于稀疏贝叶斯方法估计并识别多径信号波达方向,进而重构直射加多径协方差矩阵以及干扰加噪声协方差矩阵,实现干扰抑制与多径利用。进一步地,文献^[36,37]在直射路径未知条件下对多径利用接收方法进行了探索。然而,上述多径利用方法未对多径分量的时延、相位等参数进行精细化处理,合并后的信号难以直接支撑后续通信解调与译码。在无人智能系统的实际部署中,以无人机这类典型空中通信节点为例,其通信过程往往缺失期望信号来向先验信息,而干扰源的数量、方向以及传播过程中的多径效应均难以提前预知,导致现有波束形成干扰抑制方案失效。因此,本文提出了一个空域抗干扰框架,旨在消除现有方法对先验信息的依赖,有效解决现有方法在无人机通信中易失效的问题。该框架以接收混合信号为输入,首先通过空间平滑预处理与空间谱估计,自主检测所有入射信号的波达方向,进而采用遍历谱峰的机制,将每一谱峰对应方向依次作为假定期望信号来向,并实施基于CMR的波束形成,抑制其余方向信号与噪声,实现各信号分量的分离。在此基础上,引入信号类型识别环节,依据分

离后信号的特征对不同类型的信号实施差异化处理,在保留直射信号、抑制干扰的基础上,对多径信号进行灵活处理。

2 系统模型

如图1所示,本文研究场景聚焦于无人智能系统中无人机通信节点的抗干扰问题。在该场景中,无人机作为空中通信节点,接收地面发射机的期望信号,同时面临干扰攻击以及由建筑物遮挡与反射等引起的多径效应。无人机配备多天线接收系统,接收信号模型表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(l) &= \mathbf{x}_d(l) + \mathbf{x}_m(l) + \mathbf{x}_j(l) + \mathbf{n}(l) \\ &= \mathbf{a}(\theta_0)s_0(l) + \sum_{m=1}^M \mathbf{a}(\theta_m)s_l(l) + \sum_{j=1}^J \mathbf{a}(\theta_j)s_j(l) \\ &\quad + \mathbf{n}(l), l = 1, 2, \dots, L \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $s_0(l)$ 代表期望信号, $s_m(l)$ 代表第 m 条多径 $s_m(l) = \alpha_m s_0(l - \tau_m)$, α_m 为第 m 条多径的相关系数, τ_m 为多径时延, $s_j(l)$ 为第 j 个干扰信号, $\mathbf{a}(\theta)$ 为到达角 θ 的信号的导向矢量。为了能够完成通信信号解调,当干扰和多径加噪声协方差矩阵 $\mathbf{R}_{jm+n}$ 和期望信号导向矢量 $\mathbf{a}(\theta_0)$ 已知时,最优的空域抗干扰滤波系数为

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}_{jm+n}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{R}_{jm+n}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \quad (2)$$

3 基于协方差矩阵重构与信号识别的联合空域抗干扰方法

图2展示了所提空域抗干扰方法的流程,该流程包含三个主要步骤:首先,为处理可能相干的多径信号,对接收数据进行空间平滑处理后,采用Capon空间谱估计所有入射信号的来向。其次,遍历谱峰,通过CMR波束形成保留当前谱峰对应的

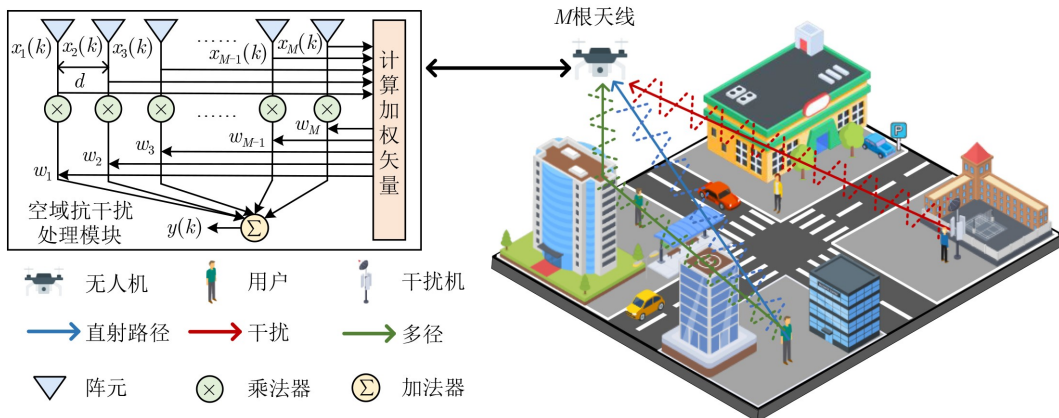


图1 系统模型

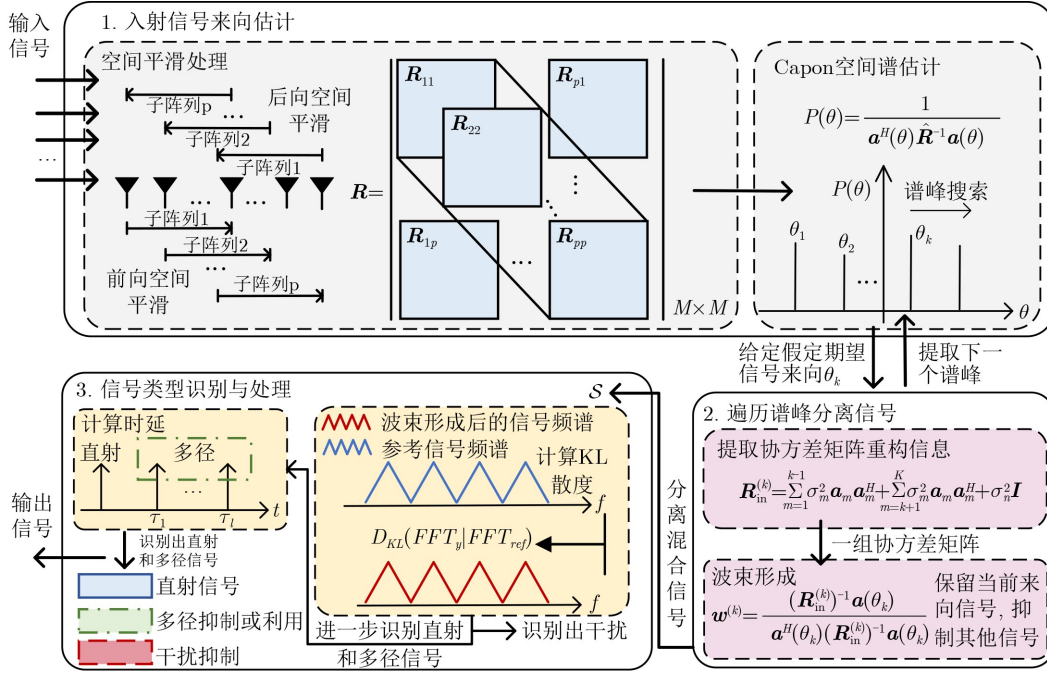


图2 方法流程图

信号、抑制其余来向信号，从而完成混合信号分离。最后，基于Kullback-Leibler(KL)散度和时延对分离后的信号进行类型识别，将其归类为直射信号、多径信号或干扰，并执行差异化处理策略。

3.1 入射信号来向估计

对于信号 $\mathbf{x}(l) = [x_1(l), x_2(l), \dots, x_M(l)] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ，将阵列划分为 P 个重叠子阵，则第 p 个子阵对应的信号为

$$\mathbf{x}_p(l) = [x_p(l), x_{p+1}(l), \dots, x_{p+N-1}(l)] \in \mathbb{C}^{N \times 1} \quad (3)$$

其中， $N = M - P + 1$ 是子阵列大小。定义前向空间平滑的协方差矩阵为

$$\hat{\mathbf{R}}_f = \frac{1}{LP} \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_p(l) \mathbf{x}_p^H(l) \quad (4)$$

类似的，当采用倒序子阵时，可以得到后向平滑协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_b = \mathbf{J} \hat{\mathbf{R}}_f^* \mathbf{J}$ 。其中， $\mathbf{J}$ 是元素为1的反对角矩阵。利用前向空间平滑和后向平滑协方差矩阵，前向后向平滑的协方差矩阵表达式为

$$\hat{\mathbf{R}} = (\hat{\mathbf{R}}_f + \hat{\mathbf{R}}_b) / 2 \quad (5)$$

对平滑后的协方差矩阵代入Capon空间谱，得到空间谱估计为

$$P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (6)$$

3.2 遍历谱峰分离信号

谱峰搜索后得到波达方向(Direction of arrival, DOA)估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_Q]$ ，包含了直射信

号、多径和干扰的来向。当 $\hat{\theta}_q$ 被当作直射信号来向，其他信号视作干扰时，重构名义JNCM $\hat{\mathbf{R}}_{jn}^{(q)}$ 的表达式为：

$$\hat{\mathbf{R}}_{jn}^{(q)} = \sum_{k=1}^{q-1} \sigma_k^2 \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k) + \sum_{k=q+1}^Q \sigma_k^2 \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (7)$$

遍历所有谱峰后，得到一组JNCM $\{\hat{\mathbf{R}}_{jn}^{(1)}, \hat{\mathbf{R}}_{jn}^{(2)}, \dots, \hat{\mathbf{R}}_{jn}^{(Q)}\}$ ，代入公式(2)可得 $\{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_Q\}$ 。将加权系数用于接收信号，将分离出一组信号集 $\{\hat{\mathbf{s}}_1, \dots, \hat{\mathbf{s}}_Q\}$ 。其中， $\hat{\mathbf{s}}_q = [\hat{s}_q(1), \hat{s}_q(2), \dots, \hat{s}_q(L)]$ ， $\hat{s}_q(l)$ 表达式为

$$\hat{s}_q(l) = \mathbf{w}_q^H \mathbf{x}(l), l = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

信号集 $\{\hat{\mathbf{s}}_1, \hat{\mathbf{s}}_2, \dots, \hat{\mathbf{s}}_Q\}$ 中包含了直射信号、多径和干扰，需要识别出这些信号的类型，执行不同的处理策略。

3.3 信号类型识别与处理

在合作通信中，发送信号的调制类型与成型滤波器等先验信息已知。通信信号(含直射与多径分量)与干扰、噪声的频谱差异显著，因此可利用频谱距离度量判别信号类型。基于此，依次对 $\{\hat{\mathbf{s}}_1, \hat{\mathbf{s}}_2, \dots, \hat{\mathbf{s}}_Q\}$ 信号做FFT变化得到一组频谱 $\{f_{\hat{\mathbf{s}}_1}, f_{\hat{\mathbf{s}}_2}, \dots, f_{\hat{\mathbf{s}}_Q}\}$ ，计算与参考频谱 f_{ref} 的KL散度得到一组距离值 $\{KL_1, KL_2, \dots, KL_Q\}$ 。其中，通信信号距离值通常较小，而干扰与噪声的距离值基本恒定，可设置阈值加以区分。本节设计如下流程：

(1) 当仅检测到单个谱峰时, 计算相似度, 如果不超过某个阈值, 则作为直射信号进行保留;

(2) 若存在多个谱峰, 将各KL散度升序排列, 计算相邻差值, 选取变化最大两点散度的均值作为阈值, 小于该阈值的判定为“直射和多径信号” $\{\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_{\bar{L}}\}$, 大于该阈值的归类为“干扰或噪声” $\{\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_{\bar{J}}\}$;

(3) 当筛选出来的“直射和多径信号”只有1个时, 可以将其直接作为直射信号, 一般来说直射信号要强于多径。因此, 可以认为没有可用的多径信号存在, 剩下的信号都作为干扰抑制;

(4) 当筛选的“直射和多径信号”大于1个时。以 $\bar{L} = 2$ 为例, 通过互相关估计 $\hat{s}_2$ 相比 $\hat{s}_1$ 的时延差 $\hat{\tau}$, 如果 $\hat{\tau} > 0$, 则判定 $\hat{s}_2$ 是 $\hat{s}_1$ 的时延副本, 则 $\hat{s}_1$ 作为直射信号, 而 $\hat{s}_2$ 视作多径信号; 反之亦然。当多径数目较多时, 两两对比并根据时延关系确定直射信号, 同时提取各多径的相对时延。

通过执行上述步骤, 混合信号将分离成直射信号 $\hat{s}_{LOS}$ 、多径信号 $\{\hat{s}_l\}_{l=1}^{\bar{L}-1}$ 和干扰(噪声) $\{\hat{s}_j\}_{j=1}^{\bar{J}}$ 。对于直射信号保留, 干扰(噪声)丢弃。而多径作为直射信号的副本, 可以采取抑制和利用两种处理策略:

(1) 多径抑制: 为了防止多径影响, 可以直接将其视作干扰进行抑制, 则空域滤波输出结果为 $\hat{s}_{LOS}$;

(2) 多径利用: 多径信号与直射信号间存在时延与相位差, 为有效利用多径, 在已完成信号分离和时延估计 $\hat{\tau}_l$ 的基础上, $\hat{s}_{LOS}$ 和 $\hat{s}_l$ 的相位差计算方法如下:

$$\hat{\varphi}_l = \arg \left(\frac{\hat{s}_{LOS}^H \hat{s}_l(t - \hat{\tau}_l)}{\|\hat{s}_{LOS}\|_2^2} \right) \quad (9)$$

随后, 对多径进行时延和相位联合对齐后合并, 表达式为:

$$\hat{s}_c = \hat{s}_{LOS} + \sum_{l=1}^{\bar{L}-1} e^{-j\hat{\varphi}_l} \hat{s}_l(t - \hat{\tau}_l) \quad (10)$$

此外, 当需要评估多径合并对SINR增益时, 在估计出直射信号 $\hat{s}_{LOS}$ 、多径信号 $\{\hat{s}_l\}_{l=1}^{\bar{L}-1}$, 对应的到达角为 $\hat{\theta}_{LOS}$ 和 $\{\hat{\theta}_l\}_{l=1}^{\bar{L}-1}$, $\hat{s}_l$ 相比直射信号 $\hat{s}_{LOS}$ 的时延为 $\hat{\tau}_l$ 后, 直射和多径信号的协方差矩阵重构如下:

$$\hat{R}_{dm} = \left(\mathbf{a}(\hat{\theta}_{LOS}) \hat{s}_{LOS} + \sum_{l=1}^{\bar{L}-1} \mathbf{a}(\hat{\theta}_l) \hat{s}_l(t - \hat{\tau}_l) \right) \cdot \left(\mathbf{a}(\hat{\theta}_{LOS}) \hat{s}_{LOS} + \sum_{l=1}^{\bar{L}-1} \mathbf{a}(\hat{\theta}_l) \hat{s}_l(t - \hat{\tau}_l) \right)^H \quad (11)$$

类似地, 利用分离出的干扰及其到达角重构JNCM $\hat{R}_{jn}$, 则空域滤波系数表示为

$$\mathbf{w} = \mathcal{P} \left\{ \hat{R}_{jn}^{-1} \hat{R}_{dm} \right\} \quad (12)$$

该空域滤波器系数用于计算输出SINR。综上所述, 所提空域抗干扰方法伪代码如下:

3.4 复杂度分析

所提方法的主要步骤包括空间平滑与Capon空间谱估计, 谱峰搜索并执行基于CMR的波束形成分离信号, 对分离信号执行FFT运算, KL散度对比以及多径相位时延对齐处理。具体地, 空间平滑涉及 P 个子阵列信号求协方差矩阵和平均, 复杂度分别为 $O(PN^2L)$ 和 $O(PN^2)$ 。Capon空间谱估计和谱峰搜索复杂度为 $O(M^3)O(ZM^2)$, 其中 Z 是

算法 1 所提自适应波束形成算法

Input: 接收序列 $\mathbf{x}(l), l = 1, 2, \dots, L$

1 利用公式(5)计算前向后向平滑协方差矩阵 $\hat{R}$

2 利用公式(6)计算Capon空间谱, 得到一组DOA估计值 $\hat{\theta} = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_Q]$

3 for $q = 1: Q$

4 挑选 $\hat{\theta}_q$ 并利用公式(7)重构JNCM $\hat{R}_{jn}^{(q)}$ 和公式(2)计算加权矢量 $\mathbf{w}_q$

5 将加权系数 $\mathbf{w}_q$ 用于接收信号, 得到分离信号 $\hat{s}_q(l) = \mathbf{w}_q^H \mathbf{x}(l), l = 1, \dots, L$

6 end

7 完成步骤3到6输出一组分离信号 $\{\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_Q\}$, 随后利用频谱相似度和信号间时延, 筛选出直射信号 $\hat{s}_{LOS}$ 、多径 $\{\hat{s}_l\}_{l=1}^{\bar{L}-1}$ 和干扰 $\{\hat{s}_j\}_{j=1}^{\bar{J}}$

8 if 执行多径抑制策略 $\mathbf{s}_{out} = \hat{s}_{LOS}$

9 else 估计多径时延 $\hat{\tau}_l$ 和相位差 $\hat{\varphi}_l$ $\mathbf{s}_{out} = \hat{s}_{LOS} + \sum_{l=1}^{\bar{L}-1} e^{-j\hat{\varphi}_l} \hat{s}_l(t - \hat{\tau}_l)$

10 end

Output: 输出信号 $\mathbf{s}_{out}$

空间谱采样点数。逐个谱峰执行CMR波束形成复杂度为 $O(QM^3)$, Q 为谱峰数。对于信号长度为 L 的 Q 个信号执行FFT运算为 $O(QL\log_2 L)$ 。计算KL散度复杂度为 $O(QL)$ 。多径时延和相位对齐涉及复杂度为 $O(LQ_\tau)$ 的时延差估计和 $O(L)$ 的相位估计, 其中 Q_τ 为时延采样点。

已知期望信号来向, 基于Capon空间谱的JNCM重构方法的复杂度为 $O(ZM^2, M^{3.5})$; 基于训练数据的方法主要复杂度为 $O(M^3)$ 矩阵求逆; 稀疏波束形成方法主要步骤为稀疏重构的与虚拟阵列映射, 复杂度为 $O((M' + M^2)^2 M^{2.5})$, 其中 M' 为虚拟阵元数目; 特征结构方法复杂度主要为 $O(M^3)$ 的特征值分解。

4 仿真分析

4.1 仿真环境

阵列为线性均匀阵列, 阵元间距为半波长, 阵元数目为10。入射信号包括直射信号DOA为 4.3° , 一条多径信号, DOA为 -16.2° , 两个干扰信号, DOA为 -30.4° 和 40.2° 。多径信号复增益参数 $\alpha e^{j\beta}$, 幅度 α 在0.5到1均匀分布, 相位 β 在0到 2π 之间均匀分布, 时延为两个符号周期。发射机传输的通信信号采用QPSK调制, 每符号采样点数为4, 符号速率为1000符号/秒。成形滤波器和匹配滤波器均采用平方根升余弦脉冲成形滤波器, 滚降系数为0.35, 滤波器跨度为10个符号周期。仿真参数如表1所示。

4.2 对比方法

为了突出所提方法的优势, 本文的对比方法包括: (1)已知期望信号来向与准确JNCM的最优波束形成, 作为性能可达的最优界限; (2)已知期望信号来向, 且干扰与期望信号空间角度区域可区分条件下的基于JNCM重构的波束形成; (3)基于可用干扰样本训练数据的波束形成方法, 可用样本数为10; (4)给定直射路径期望信号、识别并利用多

表 1 仿真参数

类型	参数	值
阵列天线	阵型	ULA
	阵元数目	10
	阵元间隔	半波长
	调制方式	QPSK
直射信号	每符号采样点数	4
	符号速率	1000符号/秒
	入射角	4.3°
	幅度	$U(0.5, 1)$
多径信号	相位	$U(0, 2\pi)$
	时延	2符号
	入射角	-16.2°
	类型	类噪声高斯干扰
干扰信号	入射角	-30.4° 和 40.2°

径信号的稀疏波束形成方法^[35]; (5)基于特征结构的波束形成, 将期望信号对应的特征矢量作为波束形成权矢量^[37]。

4.3 仿真结果

图3展示了仅存在多个干扰源(无多径)条件下不同方法的性能对比。图3(a)给出了干信比(Jamming-to-signal ratio, JSR)为5 dB时, 各波束形成器输出SINR随期望信号SNR的变化。图3(b)展示了SNR=0 dB时输出SINR随JSR的变化。所提方法的性能接近已知完备信息下的性能上界, 且性能几乎不随JSR变化, 表明其具有稳定的干扰抑制能力。

为了进一步关注空域抗干扰处理后的通信性能, 采用误差矢量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)和误码率(Bit Error Rate, BER)作为指标。黑色虚线为理论上QPSK解调性能。图4给出了不同波束形成处理后的QPSK误码率性能。从图中可以看出, 经过最优方案、基于已知期望信号来向的协方差矩阵重构方法处理后, 不仅能够顺利解调,

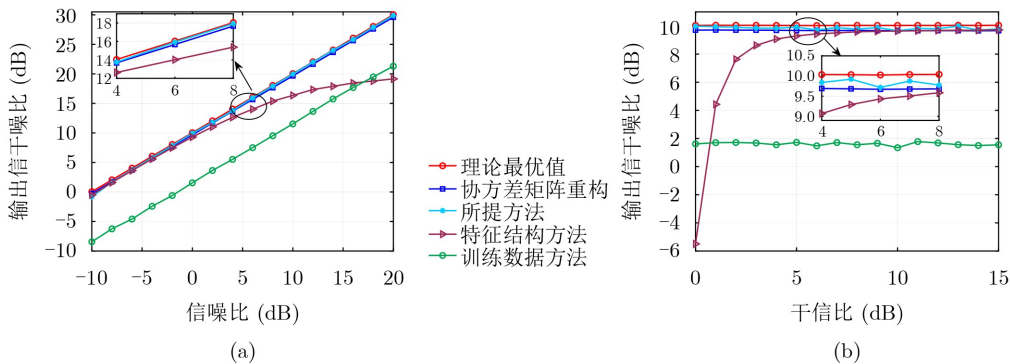


图 3 两个干扰源时不同波束形成的干扰抑制能力对比。(a)10阵元条件下, 固定JSR(5dB), 输出SINR随输入SNR变化。(b)固定SNR=0dB, 输出SINR随JSR的变化。

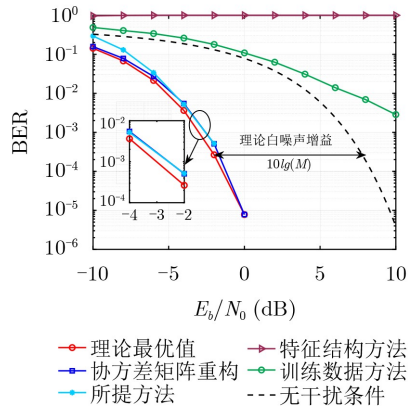


图4 多个干扰源条件下误码率随 E_b/N_0 变化趋势

还能够获得近 M 倍的白噪声增益。最后，图5展示了在 E_b/N_0 为10dB时的星座图，经过最优方法和所提方法处理后的信号星座图形状已经很接近理想的QPSK星座图，计算的EVM分别为-11.65 dB和-11.25 dB。而经过基于特征结构方法处理后的信号星座图有明显的偏移，EVM仅为2.35 dB，造成解调失败，与图4中的误码率表现一致。

图6展示了同时存在干扰和多径时不同方法的性能。图6(a)为10阵元条件下，功率层面上输出SINR曲线；图6(b)从解调的角度，考虑不同空域抗干扰处理后QPSK接收机的误码率性能；图6(c)是SNR=10 dB和符号数为100条件下的波束图；

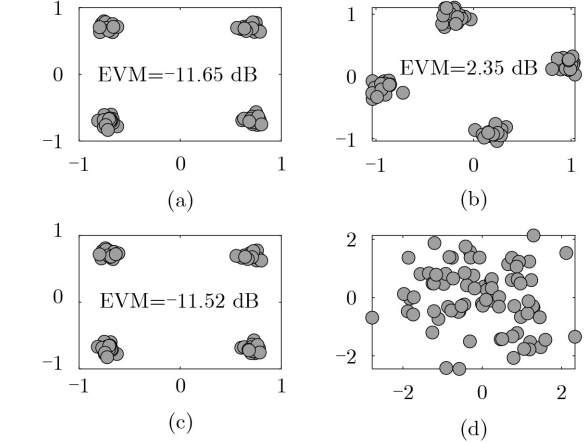


图5 在干扰环境下 $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ 时解调信号星座图的对比：
(a)理论最优处理。(b)基于特征结构的方法。(c)所提方法。(d)无干扰处理的传统接收。

图6(d)展示了 $E_b/N_0 = 10\text{ dB}$ 时对不同方法处理后的星座图。在图6(a)中，当把多径当作干扰抑制处理时，所提方法表现出和MVDR近乎重合的性能，在图6(c)中两种波束形成的波束图也近乎重合，都在干扰和多径上形成了窄而深的零陷。除了在低信噪比下，所提方法有约4 dB的性能损失。这和图6(b)中低 E_b/N_0 区域所提方法多径抑制和理论值有较大差距相吻合，这种差距随着 E_b/N_0 增加而逐渐缩小。对于利用多径策略，图6(a)可以发现多径利用后，输出SJNR可以大约再提升2 dB。从波束图

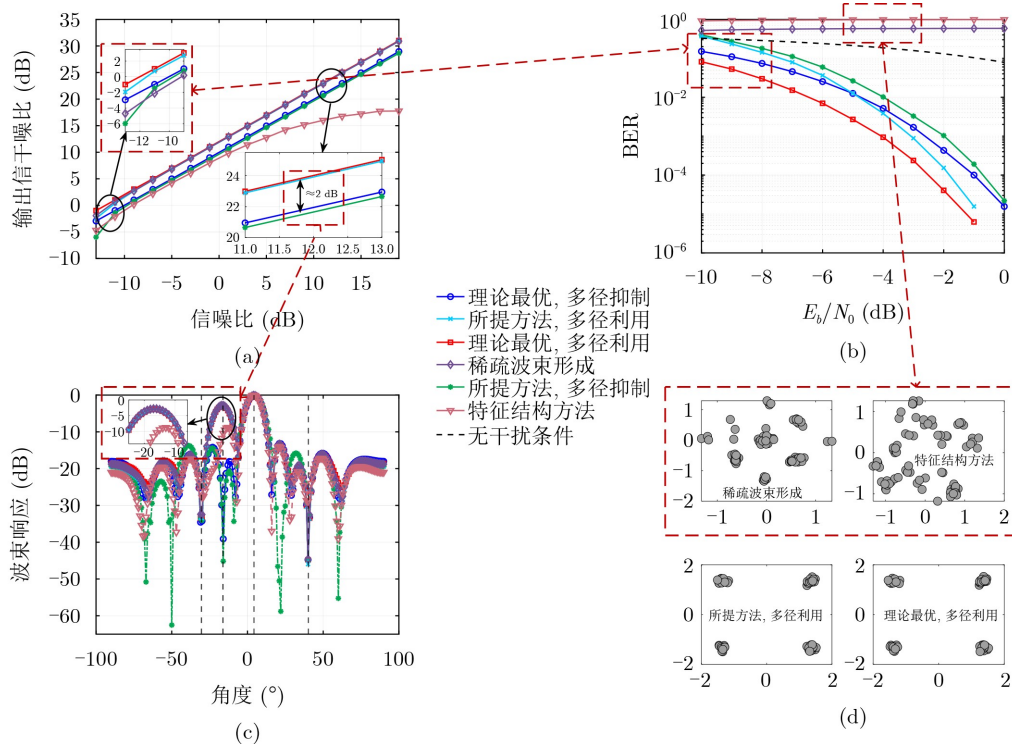


图6 干扰和多径条件下不同方法的性能。(a)不同方法输出SINR随SNR变化。(b)不同方法处理后QPSK误码率性能。(c)SNR=10dB条件下不同方法的波束图。(d) $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ 的星座图。

上看，他们都能在多径来向上形成一个几乎与主瓣类似的旁瓣。图6(b)从解调性能上进行了对比分析，与输出SJNR表现形式对应，其中特征结构方法解调失败与图6(d)中杂乱的星座图表现一致。如果信噪比较低，估计相位差和时延差存在明显误差，比相同条件下抑制多径的波束形成提升较小。这种现象随着信噪比增加得到改善，所提方法多径的误码率性能逐渐逼近理论值，并和抑制多径的处理策

略拉开差距。图6(d)展现了一致的结论，高 E_b/N_0 条件下，多径利用能够得到清晰可见的星座图。

图7展示了谱峰搜索过程中直射路径与多径信号对应谱峰的漏检率，以及信号类型识别中干扰、直射路径与多径信号的误分类率。在低 E_b/N_0 下检测率和分类率存在着显著的损失，这与低信噪比下输出SINR和BER表现一致。这表明所提空域抗干扰框架性能依赖于对信号来向的检测和类型识别。

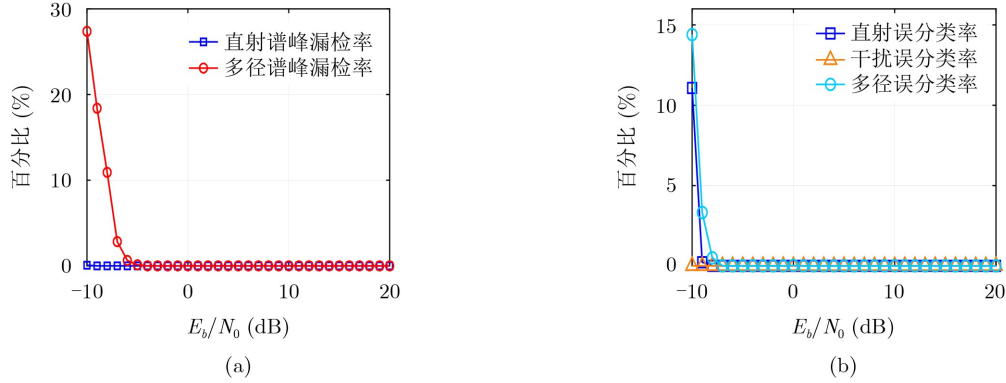


图 7 不同模块的性能。(a)谱峰搜索中直射路径和多径信号对应谱峰的漏检率。(b)信号类型识别中干扰、直射和多径信号的误分类率。

上述仿真都是基于完美阵列开展。图8以多径抑制策略为例，展示了JSR=5dB时幅相误差对所提方法的影响。其中，幅相误差下导向矢量的第 m 个元素表达式为 $a_m = (1 + \rho_m) e^{j(\frac{2\pi d}{\lambda}(m-1)\sin\theta + \varphi_m)}$ ，其中幅度误差和相位误差采用均匀分布建模，满足 $\rho_m \in [-\alpha, \alpha]$ 和 $\varphi_m \in [-\phi, \phi]$ 。结果表明，随着信噪比增加，所提方法的输出SINR与最优值之间的性能差距逐渐拉大，且该下降趋势随幅相误差的增大而愈发显著。原因在于高信噪比下干扰功率增强，进一步放大了幅相误差对协方差矩阵重构精度的不利影响。

5 结论

本文面向无人机通信中先验信息缺失的挑战，

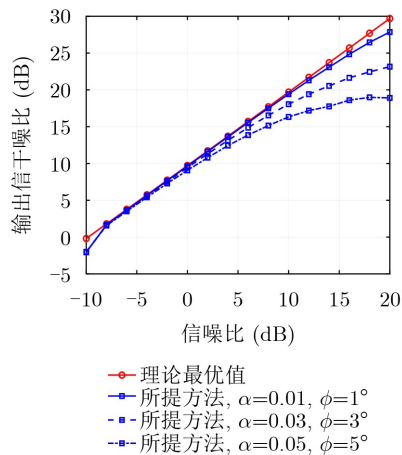


图 8 幅相误差条件下所提方法的性能

提出一种适用于少量先验信息条件的空域抗干扰方法。该方法仅利用接收到的混合数据，实现入射信号分离与类型识别，并基于识别结果执行差异化抑制或保留策略，可在保留直射信号、抑制干扰的基础上，灵活适配多径信号的抑制或利用策略。仿真结果从输出SINR和BER两个层面评估了所提方法的性能，证明了在干扰、期望信号及多径特性等先验信息不足时，所提方法仍能有效抑制干扰并实现可靠的信息传输。然而，所提框架以较高的计算复杂度换取对先验信息缺失的补偿，后续将优化其计算效率。此外，后续工作也将面向更复杂的无人系统应用场景，分析阵列扰动、智能干扰攻击和多种通信方式等非理想因素的影响，并进一步完善空域抗干扰方法。

参考文献

- [1] 孙长银, 袁心, 王远大, 等. 具身智能自主无人系统技术[J]. 自动化学报, 2025, 51(4): 762–777. doi: 10.16383/j.aas.c240456. SUN Changyin, YUAN Xin, WANG Yuanda, et al. Embodied intelligence autonomous unmanned systems technology[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(4): 762–777. doi: 10.16383/j.aas.c240456.
- [2] CHEN Xinyan, HU Peng, ZHU Zhongpan, et al. Virtual-real integration in unmanned systems: Emerging technologies, applications, and future trends[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2026, 23: 1231–1257. doi: 10.1109/TASE.2025.3644374.
- [3] KIM G S, PARK S, and JUNG S, et al. Integrated control,

- communication, and computing for mission-critical embedded unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2026, 62: 682–703. doi: [10.1109/TAES.2025.3622092](#).
- [4] WEI Xiaomin, MA Jianfeng, and SUN Cong. A survey on security of unmanned aerial vehicle systems: Attacks and countermeasures[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(21): 34826–34847. doi: [10.1109/JIOT.2024.3429111](#).
- [5] CAI Lingyi, WANG Jiacheng, ZHANG Ruichen, *et al.* Secure physical layer communications for low-altitude economy networking: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2026, 28: 2497–2530. doi: [10.1109/COMST.2025.3634768](#).
- [6] YANG Helin, LIN Kailong, XIAO Liang, *et al.* Energy harvesting UAV-RIS-assisted maritime communications based on deep reinforcement learning against jamming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 9854–9868. doi: [10.1109/TWC.2024.3367034](#).
- [7] ZHOU Jianwei, WANG Wenjie, and ZHANG Chenhao. A GNSS anti-jamming method in multi-UAV cooperative system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2026, 75(1): 535–547. doi: [10.1109/TVT.2025.3590138](#).
- [8] ELBIR A M, MISHRA K V, VOROBYOV S A, *et al.* Twenty-five years of advances in beamforming: From convex and nonconvex optimization to learning techniques[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2023, 40(4): 118–131. doi: [10.1109/MSP.2023.3262366](#).
- [9] LIU Wei, HAARDT M, GRECO M S, *et al.* Twenty-five years of sensor array and multichannel signal processing: A review of progress to date and potential research directions[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2023, 40(4): 80–91. doi: [10.1109/MSP.2023.3258060](#).
- [10] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1969, 57(8): 1408–1418. doi: [10.1109/PROC.1969.7278](#).
- [11] CARLSON B D. Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(4): 397–401. doi: [10.1109/7.7181](#).
- [12] HOSSAIN M S, MILFORD G N, REED M C, *et al.* Efficient robust broadband antenna array processor in the presence of look direction errors[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(2): 718–727. doi: [10.1109/TAP.2012.2225014](#).
- [13] ZHANG Ming, CHEN Xiaoming, and ZHANG Anxue. A simple tridiagonal loading method for robust adaptive beamforming[J]. *Signal Processing*, 2019, 157: 103–107. doi: [10.1016/j.sigpro.2018.11.019](#).
- [14] LI Jian, STOICA P, and WANG Zhisong. Doubly constrained robust capon beamformer[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(9): 2407–2423. doi: [10.1109/TSP.2004.831998](#).
- [15] HUANG Yongwei, ZHOU Mingkan, and VOROBYOV S A. New designs on MVDR robust adaptive beamforming based on optimal steering vector estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(14): 3624–3638. doi: [10.1109/TSP.2019.2918997](#).
- [16] ZHANG Xinyu, JIANG Weidong, HUO Kai, *et al.* Robust adaptive beamforming based on linearly modified atomic-norm minimization with target contaminated data[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 5138–5151. doi: [10.1109/TSP.2020.3021257](#).
- [17] HUANG Yongwei, FU Hao, VOROBYOV S A, *et al.* Robust adaptive beamforming via worst-case SINR maximization with nonconvex uncertainty sets[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2023, 71: 218–232. doi: [10.1109/TSP.2023.3240312](#).
- [18] HUANG Fei, SHENG Weixing, and MA Xiaofeng. Modified projection approach for robust adaptive array beamforming[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(7): 1758–1763. doi: [10.1016/j.sigpro.2012.01.015](#).
- [19] GU Yujie and LESHEM A. Robust adaptive beamforming based on interference covariance matrix reconstruction and steering vector estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(7): 3881–3885. doi: [10.1109/TSP.2012.2194289](#).
- [20] 周成伟, 郑航, 顾宇杰, 等. 互质阵列信号处理研究进展: 波达方向估计与自适应波束成形[J]. *雷达学报*, 2019, 8(5): 558–577. doi: [10.12000/JR19068](#).
- ZHOU Chengwei, ZHENG Hang, GU Yujie, *et al.* Research progress on coprime array signal processing: Direction-of-arrival estimation and adaptive beamforming[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(5): 558–577. doi: [10.12000/JR19068](#).
- [21] MOHAMMADZADEH S, NASCIMENTO V H, DE LAMARE R C, *et al.* Maximum entropy-based interference-plus-noise covariance matrix reconstruction for robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2020, 27: 845–849. doi: [10.1109/LSP.2020.2994527](#).
- [22] CHEN Peng, GAO Jingjie, and WANG Wei. Linear prediction-based covariance matrix reconstruction for robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 1848–1852. doi: [10.1109/LSP.2021.3111582](#).
- [23] LUO Tao, CHEN Peng, CAO Zhenxin, *et al.* URGLQ: An efficient covariance matrix reconstruction method for robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(5): 5634–5645. doi: [10.1109/TAES.2023.3263386](#).
- [24] MOHAMMADZADEH S, NASCIMENTO V H, DE LAMARE R C, *et al.* Jammer tracking based on efficient covariance matrix reconstruction with iterative spatial

- spectrum sampling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(6): 8681–8695. doi: [10.1109/TAES.2023.3307507](#).
- [25] ZHENG Zhi, ZHENG Yan, WANG Wenqin, *et al.* Covariance matrix reconstruction with interference steering vector and power estimation for robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(9): 8495–8503. doi: [10.1109/TVT.2018.2849646](#).
- [26] ZHENG Zhi, YANG Tong, WANG Wenqin, *et al.* Robust adaptive beamforming via simplified interference power estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(6): 3139–3152. doi: [10.1109/TAES.2019.2899796](#).
- [27] YANG Huichao, WANG Pengyu, and YE Zhongfu. Robust adaptive beamforming via covariance matrix reconstruction and interference power estimation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(10): 3394–3397. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3103208](#).
- [28] RUAN Hang and DE LAMARE R C. Robust adaptive beamforming using a low-complexity shrinkage-based mismatch estimation algorithm[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 21(1): 60–64. doi: [10.1109/LSP.2013.2290948](#).
- [29] RUAN Hang and DE LAMARE R C. Robust adaptive beamforming based on low-rank and cross-correlation techniques[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(15): 3919–3932. doi: [10.1109/TSP.2016.2550006](#).
- [30] WAX M and ANU Y. A least squares approach to blind beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(1): 231–234. doi: [10.1109/78.738261](#).
- [31] NAPOLITANO A. Generalizations of cyclostationarity: A new paradigm for signal processing for mobile communications, radar, and sonar[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 30(6): 53–63. doi: [10.1109/MSP.2013.2265101](#).
- [32] BHOTTO M Z A and BAJIĆ I V. Constant modulus blind adaptive beamforming based on unscented Kalman filtering[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(4): 474–478. doi: [10.1109/LSP.2014.2362932](#).
- [33] WENTZ M, CAPPER J, KURIEN B, *et al.* Blind beamforming via deep learning-based signal classification and transfer learning[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2026, 12: 1834–1847. doi: [10.1109/TCCN.2025.3598069](#).
- [34] XIE Zhuang, XU Zhou, HAN Sudan, *et al.* Max-min beamforming for multipath exploitation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(9): 2116–2120. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3188754](#).
- [35] CHENG Yun, LIU Tianpeng, SHI Junpeng, *et al.* Sparsity-based adaptive beamforming for non-uniform linear arrays in multipath environment[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(5): 6687–6699. doi: [10.1109/TVT.2023.3341417](#).
- [36] WANG Cheng and TANG Jun. Blind beamforming technique for reception of multipath coherent signals[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(7): 1453–1456. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2547873](#).
- [37] ZHANG Liang, LIAO Bin, HUANG Lei, *et al.* An eigendecomposition-based approach to blind beamforming in a multipath environment[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(2): 322–325. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2626365](#).
- 潘子豪：男，博士研究生，研究方向为无人机通信，阵列信号处理，自适应波束形成。
- 张邦宁：男，教授，研究方向为卫星通信，通信抗干扰。
- 甄攀：男，博士研究生，研究方向为无线环境地图，深度学习。
- 朱博文：男，硕士研究生，研究方向为无线环境地图，扩散模型。
- 王宁：男，硕士研究生，研究方向为阵列信号处理，自适应波束形成。
- 郭道省：男，教授，研究方向为无人机通信，卫星通信，频谱感知，阵列信号处理。

责任编辑：余蓉

Spatial-Domain Anti-Jamming for Unmanned Systems with Lacking Prior Information

PAN Zihao ZHANG Bangning ZHEN Pan ZHU Bowen
WANG Ning GUO Daoxing

(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract:

Objective Unmanned systems play an increasingly vital role in critical scenarios such as modern emergency response, public safety, intelligent transportation, and so on. Their autonomous perception, intelligent decision-

making, and collaborative control capabilities form the core guarantee for efficient task execution. Ensuring the safe, reliable, and continuous operation of unmanned platforms within complex environments constitutes the fundamental basis of unmanned intelligent technology. However, the communication links of unmanned systems are highly susceptible to exposure within open, non-cooperative electromagnetic environments, facing threats of intentional jamming or unintentional interference. Furthermore, communication processes may lack the information of the desired signal, jamming, as well as the multipath effect. This renders existing spatial-domain anti-jamming solutions ineffective, severely compromising the stability of perception, decision-making, and control feedback loops. Consequently, this paper proposes a spatial-domain anti-jamming framework designed to autonomously identify interference, preserve signals, and reconstruct communication links operating in the absence of prior information.

Methods The proposed spatial-domain anti-jamming method first employs a spatial smoothing algorithm for the received signal, followed by Capon spatial estimation to detect the direction of arrival (DOA) of incoming signals, where the spatial smoothing aims to decohere for the detection of the DOA for potential multipath signals. Subsequently, spectrum peaks are extracted based on the estimated Capon spatial spectrum, with each peak corresponding to an incident signal. To separate the mixed signals, all estimated peaks are traversed, and a covariance matrix reconstruction-based beamforming algorithm is employed to extract the signals associated with each peak, thereby achieving signal separation. Then, a signal-type identification method based on spectral similarity and time delay is proposed. The KL divergence is used to assess the similarity between each separated signal spectrum and the reference spectrum, with a threshold set to identify jamming. Subsequently, time delay is employed to distinguish direct-path and multipath signals among the remaining signals. Finally, different processing strategies are performed according to the identified signal type. Specifically, multipath signals may be treated as jamming to be suppressed or alternatively combined with a direct-path signal after time-delay alignment.

Results and Discussions By designing two cases, including jamming alone and jamming plus multipath, the performance of the proposed method is evaluated using metrics such as output signal-to-jamming-plus-noise ratio (SJNR), beam response, bit error rate (BER), and error vector magnitude (EVM). Simulation results demonstrate that the proposed method consistently maintains near-optimal SINR, which varies with SNR at a fixed SNR (Fig. 3a) and varies with JSR at a fixed SNR (Fig. 3b) under jamming. The time-domain waveform and frequency spectrum after the proposed method remain clearly discernible and consistent with the original signal (Fig. 4). The BER curve nearly overlaps with that of its after optimal processing (Fig. 5). Under $E_b/N_0 = 10\text{dB}$, the constellation diagram is clearly restored, achieving an EVM of -11.52 dB (Fig. 6). Under coexisting jamming and multipath conditions, the proposed method can flexibly handle multipath. Compared to suppression strategies, multipath utilization improves both the output SINR and BER (Fig. 7a and 7b). Beam patterns reveal that a lower secondary lobe forms in the multipath direction after multipath utilization (Fig. 7c).

Conclusions This paper proposes a spatial-domain anti-jamming framework for unmanned systems with lacking prior information. Only using the received mixed data, the proposed framework separates signals from different directions and identifies their types. Suppression or retention strategies are then applied based on these types. We finally achieve flexible handling of multipath signals while preserving the direct-path signal and suppressing jamming. Simulation results evaluated the performance of the proposed method in terms of output power and demodulation accuracy, demonstrating its ability to achieve effective jamming suppression and reliable information transmission even under limited prior knowledge regarding jamming, direct-path signal, and multipath characteristics. Future work will analyze the impact of array perturbations, more smart jamming, and coexisting communication modes on the proposal and extend it to increasingly complex unmanned system environments.

Key words: Unmanned Systems; Spatial-Domain Anti-Jamming; Adaptive Beamforming; Spatial Smoothing