



专题：6G 智能超表面

面向6G的智能反射面辅助电磁隐身： 最新进展与未来展望

马甜甜¹, 郑倍雄¹, 熊雪², 张瑞³

- (1. 华南理工大学微电子学院, 广东 广州 511442;
2. 华南理工大学未来技术学院, 广东 广州 511442;
3. 香港中文大学(深圳)理工学院, 广东 深圳 518172)

摘 要: 无线技术的蓬勃发展推动了现代战争的高度信息化, 开启了电子对抗的新篇章。随着先进雷达技术的不断革新, 导弹、飞机等武器装备的生存能力面临前所未有的挑战。电磁隐身技术的发展和有效应用能够显著提高武器的生存能力, 成为国防技术发展的重要方向。然而, 传统电磁隐身技术往往受实际条件的限制, 无法满足现代化战争对隐身作战的需求。为了应对这一挑战, 提出智能反射面 (intelligent reflecting surface, IRS) 辅助电磁隐身技术, 利用智能反射面抑制或重定向反射信号, 实现自适应的透明式或欺骗式电磁隐身。为了充分挖掘智能反射面在电磁隐身领域中的广阔应用前景, 讨论了智能反射面辅助电磁隐身系统的基本原理、系统模型、设计挑战和潜在的研究方向, 旨在为未来电磁隐身技术的发展提供方向性的指导。

关键词: 电磁隐身技术; 智能反射面; 电子对抗; 自适应信号处理

中图分类号: TP929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024188

Intelligent reflecting surface-enabled electromagnetic stealth for 6G: recent advances and future prospects

MA Tiantian¹, ZHENG Beixiong¹, XIONG Xue², ZHANG Rui³

1. School of Microelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China
2. School of Future Technology, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China
3. School of Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen, Shenzhen 518172, China

收稿日期: 2024-05-30; 修回日期: 2024-07-10

通信作者: 郑倍雄, bxzheng@scut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62201214, No.62331022); 广东省基础与应用基础研究重大项目 (No.2023B0303000001); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目 (No.2023A151011753); 深圳市高等院校稳定支持计划 (No.20220817144726001); 深圳大数据院基金资助项目 (No.J00120230006); 中央高校优秀青年团队项目 (No.2023ZYGXZR106)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62201214, No.62331022), The Guangdong Major Project of Basic and Applied Basic Research of China (No.2023B0303000001), The Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province of China (No. 2023A151011753), The Shenzhen Stable Research Program of Higher Education of China (No. 20220817144726001), The Shenzhen Big Data Research Institute Foundation (No.J00120230006), The Outstanding Youth Team Project of the Central Universities (No.2023ZYGXZR106)



Abstract: The rapid development of wireless technology has driven a high level of informatization in modern warfare, opening a new era in electronic countermeasures (ECM). With the continuous innovation of advanced radar technology, the survival capability of weapons and equipment such as missiles and aircraft is facing unprecedented challenges. The development and application of electromagnetic stealth technology can effectively enhance the survivability of modern weapons, which becomes a crucial direction for military technology development. However, traditional electromagnetic stealth technologies are often constrained by practical conditions and fail to meet the stealth requirements of military operations. To address this issue, intelligent reflecting surface (IRS)-enabled electromagnetic stealth technology was proposed. This technology utilized IRS to suppress or redirect reflected signals, thus achieving adaptive transparent or deceptive electromagnetic stealth. To fully explore the great potential of IRS in the field of electromagnetic stealth, the basic principles, system models, design challenges, and open issues of IRS-enabled electromagnetic stealth were discussed, aiming to provide directional guidance for the future development of electromagnetic stealth technology.

Key words: electromagnetic stealth technology, IRS, electronic countermeasure, adaptive signal processing

0 引言

随着无线技术的不断演进, 6G 展望了一个普惠智能、万物智联的高度数字化社会。为了实现这一美好愿景, 未来的无线网络需要同时支持海量通信和感知终端设备的连接, 并近乎实时地处理海量数据, 以满足全息通信、感官互联、数字孪生、全域覆盖等 6G 潜在应用场景的需求^[1-2]。然而, 6G 的沉浸式、智慧化、全域化发展趋势导致大量敏感通信和感知设备暴露于开放的无线环境中, 显著增加了它们遭受安全威胁的可能性。特别是在实际应用中, 重要设备的空间位置、移动方向和速度等物理特征常常面临被未授权雷达探测的风险, 从而导致设备携带的商业机密或个人隐私等敏感信息被泄露, 这给下一代无线网络的信息安全带来了巨大的风险与隐患。除了 6G 的商用场景, 通信和感知安全问题在军事场景下同样是下一代无线技术研究的关注焦点。随着军事高精尖技术的迅猛发展, 各国探测、跟踪技术日益先进, 这对导弹、战斗机等武器的生存能力构成严重威胁, 也对重要军事设备的隐蔽性提出了更加苛刻的要求。因此, 如何有效保障敏感通感设备和军用设备的安全成为维护国家安全的重要课题。为了应对这一挑战, 电磁隐身技术应运而生, 成为国内外众多研究团队的重点攻

关方向^[3-6]。

电磁隐身的本质是通过各种手段降低目标的雷达散射截面 (radar cross-section, RCS), 使敌方雷达无法准确探测到目标的回波信号, 从而无法发现和识别目标。实现电磁隐身主要通过两种途径: 一种是最大限度地吸收或抑制目标散射的雷达回波, 以降低目标在雷达探测过程中的可见性, 即透明式隐身^[3-4]; 另一种是生成模拟真实目标的欺骗信号误导雷达系统, 使其无法做出正确判断, 即欺骗式隐身^[5-6]。然而, 传统的透明式电磁隐身技术依赖于目标的外形设计或吸波材料涂层的应用, 受到目标的气动性能、材料的涂层厚度、雷达探测信号的入射角度等各种因素的限制, 难以满足现代战场隐身作战需求或适应复杂多变的雷达探测模式。此外, 传统欺骗式电磁隐身技术通过干扰发射机 (jammer) 等有源设备主动发射欺骗信号, 不仅成本高昂, 而且由于电磁波的广播特性, 存在暴露目标真实方向的潜在风险。因此, 面对日益复杂的现代雷达探测技术, 传统电磁隐身技术将难以满足未来的商用和军用需求, 未来需要开发更加高效、智能的电磁隐身技术以应对复杂化和多样化的安全挑战。

近年来, 可编程电磁超表面技术的突破性进展推动了智能反射面 (intelligent reflecting surface, IRS)/智能超表面的迅猛发展^[7]。智能反射

面,是一项面向下一代无线网络的颠覆性技术,能够以经济、高效的方式构建智能且可重构的无线环境^[8-10]。本质上,智能反射面是由大量可独立控制的无源反射单元组成的二维表面,这些单元能够以可编程的方式实时调控入射信号的电磁参数,如幅度和相位,从而重塑电磁波的传播信道,满足定制化的需求。因此,通过对反射单元的精确控制,智能反射面不仅能根据特定需求主动增强信号的传输,还具备波束转向和干扰消除等功能,有望作为传统电磁隐身技术的补充,为未来高性能且多功能化的电磁隐身技术开辟新范式,从而为智慧海洋、智慧边防、智慧城市等场景注入新活力。智能反射面辅助电磁隐身的未来应用场景如图1所示,在图1所展示的场景中,目标搭载的智能反射面能够灵活高效地实现无人机、战斗机等设备在雷达探测下的“隐身”效果,从而降低无人机航线等商业机密或战斗机物理特征等军事机密被非法探测的风险,为6G赋能的低空经济、电子对抗等应用提供有力的安全保障。为了深入挖掘智能反射面在未来电磁隐身领域的巨大潜力,本文将讨论智能反射面辅助电磁隐身系统的基本原理、系统模型、设计挑战以及相应的解决方案,以期后续开展智能可控电磁隐身

技术研究提供方向性指引。

1 智能反射面辅助电磁隐身技术

传统的电磁隐身技术依赖于外形设计、吸波材料或干扰发射机的应用,成本高昂且隐身效果受限于特定场景。为了克服传统隐身技术隐身范围小、适用频段窄和自适应能力弱等瓶颈,智能反射面凭借其实时调控电磁传播环境的能力,有望作为吸波材料涂层的重要补充手段,赋予电磁隐身智能、精准的自适应调控能力,从而为电磁隐身领域带来革命性的突破。下文将深入讨论智能反射面辅助电磁隐身技术的基本原理和智能反射面反射设计。

1.1 基本原理

智能反射面辅助电磁隐身技术的核心在于通过对智能反射面信号反射模式的精细化和动态化操控,抵消或伪装目标散射至敌方雷达的回波信号,从而降低目标的雷达散射截面积,使得目标在雷达探测范围内实现“隐身”^[11-15]。与传统的电磁隐身技术相比,智能反射面在时间、空间、频率等维度为电磁隐身系统的设计赋予了新的自由度,为未来电磁隐身技术向智能化、多功能化方向发展提供了新的可能性。具体而言,智能反

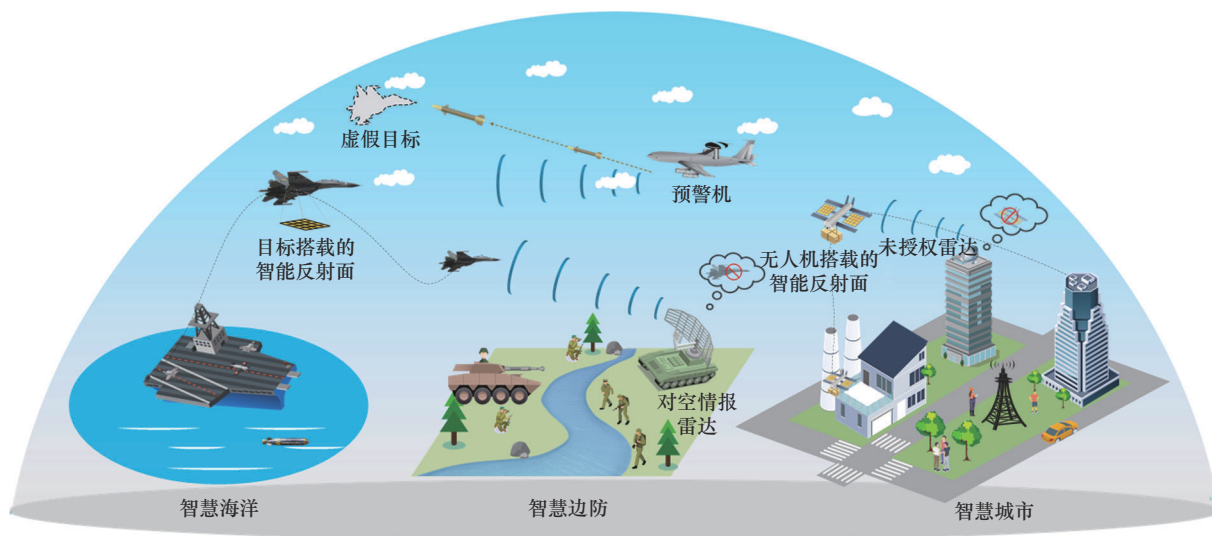


图1 智能反射面辅助电磁隐身的未来应用场景



射面辅助电磁隐身系统拥有以下优势。

- 自适应控制能力：智能反射面可以通过软件编程的手段，根据不同的雷达探测模式或目标的空间位置实时调整反射模式，使隐身系统灵活地适应快速变化的无线环境，从而确保隐身性能的稳定^[8]。
- 多频率和多角度调控范围：通过联合优化多个频率和方向上的反射系数，智能反射面可以有效地抵消不同的探测频率或方向角度上潜在的雷达回波信号，从而实现更大范围的隐身^[11]。
- 低成本和可扩展性：智能反射面具有轻量化和共形几何的优势^[9]，部署成本更低、扩展性更好。此外，由于其无源特性，系统不需要额外的射频链路，显著降低了功耗和硬件成本。
- 灵活的集成能力：智能反射面与现有的无线技术拥有出色的兼容性，能够作为强有力的辅助工具，在保持其他性能的同时无缝集成到现有的电磁隐身系统中^[10]。

本文设计了一种基于目标搭载智能反射面的电磁隐身系统，其中智能反射面由 N 个无源反射

单元组成，并配备了少量感知单元用于环境信息的感知。智能反射面采用均匀平面阵列（uniform planar array, UPA），其反射向量表示为 $\theta=[\theta_1, \dots, \theta_N]^T$ ，其中， θ_n 为智能反射面第 n 个单元的反射系数， $n=1, \dots, N$ 。定义雷达与目标、目标与散射体、散射体与雷达之间的等效信道分别为 $G_{R \rightarrow T}$ 、 $h_{T \rightarrow C}$ 和 $h_{C \rightarrow R}$ 。通过对智能反射面的反射向量 θ 进行优化设计，系统可以实现透明式或欺骗式电磁隐身，从而有效躲避或误导雷达的探测。在透明式电磁隐身系统中，通过智能反射面动态调整信号的反射模式，利用信号的相干抵消机制最大限度地抑制/消除返回雷达的回波信号，降低雷达的探测概率，实现透明式隐身^[11-12]。在此基础上，欺骗式电磁隐身系统充分利用目标周围的散射体，通过智能反射面将反射的信号重定向至周围散射体，从而生成模拟目标的虚假信号，造成雷达的误判，实现欺骗式隐身^[15]。智能反射面辅助透明式/欺骗式隐身系统如图2所示。

为了达到理想的隐身效果，智能反射面辅助电磁隐身系统由两种基本模式交替协同工作：一种是为了进行精准雷达侦察的感知模式，另一种是为了实现透明式或欺骗式电磁隐身的反射模

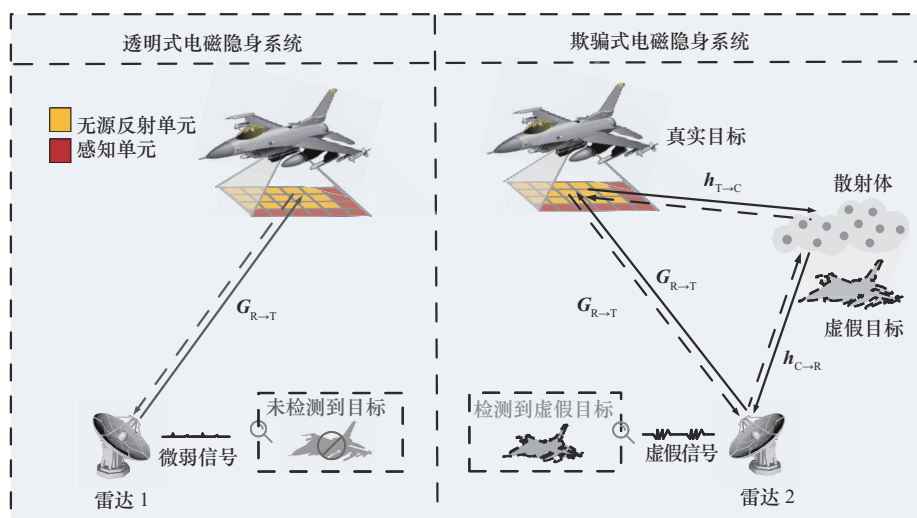


图2 智能反射面辅助透明式/欺骗式隐身系统

式。具体而言,智能反射面辅助电磁隐身系统首先工作在感知模式下,结合先进的感知估计算法,通过安装在智能反射面的感知单元提取环境信息,包括雷达探测信号的到达角(angle of arrival, AOA)和路径增益等。在反射模式下,智能反射面基于上一阶段估计的信息对其反射系数进行相应调整,从而最小化目标的雷达散射截面积,实现最优的电磁隐身效果。

1.2 智能反射面反射设计

雷达能否准确无误地探测到目标或估计目标的来波方向,在很大程度上取决于来自目标方向的雷达接收信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)。当从目标反射回雷达的电磁波能量减少时,雷达的接收信噪比将显著降低,进而影响雷达对目标的探测概率,一旦接收信噪比降至雷达探测的阈值以下,雷达系统将无法有效区分回波信号与环境噪声,从而无法探测到目标。因此,在电磁隐身系统中,可以使用雷达的接收信噪比作为性能指标,以评估电磁隐身技术对抗雷达探测的有效性^[11]。

考虑图2所示的透明式电磁隐身系统中,给定雷达1与目标之间的信道信息 $\mathbf{G}$,雷达1接收的回波信号信噪比可表示为 $\text{SNR}(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{G})$ 。为了有效抑制目标反射回雷达1的回波信号,以躲避雷达1的探测,实现透明式电磁隐身,对智能反射面的反射系数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 建立如下优化模型。

$$(P1): \min_{\boldsymbol{\theta}} \text{SNR}(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{G}) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad |\theta_n| = 1, \forall n = 1, \dots, N \quad (2)$$

同样地,在欺骗式电磁隐身系统中,给定雷达2与目标之间的信道信息 $\mathbf{G}$ 、目标与散射体之间的信道信息 $\mathbf{h}_T$ 以及散射体与雷达之间的信道信息 $\mathbf{h}_C$,则雷达2接收的来自目标方向的回波信号信噪比为 $\text{SNR}_T(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{G}, \mathbf{h}_T, \mathbf{h}_C)$,来自散射体方向的回波信号信噪比为 $\text{SNR}_C(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{G}, \mathbf{h}_T, \mathbf{h}_C)$ 。为了使真实的目标“隐身”,同时误导雷达探测到虚假的“目

标”,系统需要精准调控以降低目标方向的回波信号信噪比 SNR_T 至最低限度,即雷达探测的信噪比阈值,同时尽可能增强散射体方向的回波信号信噪比 SNR_C ,从而实现欺骗式隐身。值得注意的是,实现理想欺骗效果的前提是确保真实目标的全面隐身,否则即使达到了理想的欺骗效果,如果目标方向的回波信噪比超出雷达探测阈值,目标的实际位置依然存在暴露的风险。为了实现这一目的,对智能反射面反射向量 $\boldsymbol{\theta}$ 建立如下优化模型。

$$(P2): \max_{\boldsymbol{\theta}} \text{SNR}_C(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{G}, \mathbf{h}_T, \mathbf{h}_C) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \text{SNR}_T(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{G}, \mathbf{h}_T, \mathbf{h}_C) \leq \gamma \quad (4)$$

$$|\theta_n| = 1, \forall n = 1, \dots, N \quad (5)$$

其中, γ 表示雷达探测的信噪比阈值。当雷达接收信号的信噪比低于 γ 时,雷达无法探测到目标。

在求解优化问题(P1)与(P2)的过程中,由于智能反射面通常包含大量反射单元,且每个单元都受到式(2)与式(5)中的恒模约束条件的约束,这些优化问题是复杂的非凸优化问题,难以直接进行求解。为了克服这一难题,通常可以采用半正定松弛(semidefinite relaxation, SDR)技术来放松非凸约束条件,从而为问题的求解提供一条可行的路径^[12]。然而,面对复杂多变的雷达探测环境,高复杂度的设计方案会导致智能反射面无法及时调整反射模式,从而带来不可避免的性能损失。因此,对于(P1)与(P2)的优化问题,还需要寻找低复杂度的求解方案。

2 智能反射面辅助电磁隐身技术的设计挑战与未来方向

尽管智能反射面辅助电磁隐身技术拥有不可低估的潜力,但在实际设计与应用阶段仍面临着对灵活高机动隐身目标建模难、复杂电磁环境下雷达信息侦察难、快速时变的雷达探测环境下实时更新难等一系列问题和挑战。本文将对电磁隐



身系统的模型建立、雷达侦察方案、智能反射面反射设计，以及系统部署架构中的设计挑战进行深入讨论，提出前瞻性的解决方案并指出未来的研究方向。

2.1 系统建模与性能分析

精准的系统模型与性能分析是实现智能可控电磁隐身的理论基础，对后续的环境信息感知方案设计和智能反射面反射模式设计具有重要的指导意义。然而，现有研究工作大多聚焦于智能反射面在无线通信领域中的特定应用，可扩展性有限，难以直接推广至智能反射面辅助的电磁隐身系统中。此外，隐身目标在执行高机动的作战任务时，其高移动性将导致快速变化的多普勒扩展（Doppler spread）以及非平稳衰落，这些复杂的信道特征为精确的信道建模和分析带来了严峻的挑战^[16]。因此，目前在复杂雷达探测场景下的智能反射面辅助电磁隐身系统仍缺乏普适的信道模型和系统架构，亟待未来进行深入的研究与探索。在智能反射面辅助电磁隐身系统中，智能反射面通常作为吸波材料涂层的补充，能够协同实现理想的电磁隐身效果。因此，如何对系统中的吸波材料及其隐身性能进行精确、合理的建模和表征，以确保后续智能反射面实时感知与反射设计的实际可行性，从而最大化整体的隐身性能，也是系统模型建立与性能分析中存在的难题之一。综合而言，如何建立符合实际的目标、智能反射面和雷达系统之间的电磁传播模型，精确地表征反射信号和时变信道模型，并由此揭示关键系统参数对削弱雷达探测性能（如探测概率、分辨率、散射截面积等）的影响，成为未来智能反射面辅助电磁隐身系统设计中的重要研究方向。

2.2 实时感知方案设计

实时、精确的环境信息对智能反射面的反射设计至关重要。然而，智能反射面的无源反射单元数量庞大且缺乏处理基带信号的能力，无法直接对雷达侦察环境进行感知。为了克服这一困

难，电磁隐身系统在目标表面嵌入用于雷达侦察的感知阵列，利用其收集环境信息，如敌方雷达数量，以及来自雷达和周围散射体的到达角和路径增益。在此基础上，可以利用成熟的到达角估计算法，如多信号分类（multiple signal classification, MUSIC）算法来获得来波方向信息^[17]，也可以利用最大似然或最小二乘估计方法进一步估计路径增益^[9]。然而，在高度动态和复杂的现代战场中，传统的感知与估计方法难以应对高机动的隐身目标引发的快速时变信道，这为获得实时、精确的环境信息带来了严峻的挑战。为了解决这一难题，可以采用逐块更新的思想，即在每个足够短的时间块内，利用基于压缩感知（compressed sensing, CS）和深度学习（deep learning, DL）的高效信号处理方法更新感知的环境信息^[18-19]。然而，这种方案需要频繁地进行环境感知和估计，不仅实现成本高，并且难以规避环境信息过时的问题。因此，为了在节约成本的同时获取高度实时的信息，可以采用自适应预测更新的思想，基于目标移动轨迹的先验信息，利用先进的信道预测/跟踪方法进行自适应动态更新。当目标的运动发生剧烈变动，或者估计/预测误差随时间累积时，这些信道跟踪方法将不可避免地引入显著的误差，从而影响后续智能反射面反射设计的隐身效果。因此，需要进一步校准估计的环境信息，以保持系统的持续性和可靠性。简而言之，未来的智能电磁隐身系统仍需要不断探索低成本、高分辨率的感知估计和跟踪方案，以实现理想的电磁隐身性能。

2.3 实时高效的反射优化设计

高性能的智能反射面反射优化设计是智能反射面辅助电磁隐身系统的核心。面对不同的雷达探测场景，智能反射面设计的关注点与设计策略不尽相同。在高移动的场景下，无线信道的快速时变极大地限制了智能反射面反射模式的更新时间，从而对智能反射面反射设计算法的实时性提

出了更高的要求。因此,探索低复杂度的反射设计优化算法是未来电磁隐身系统设计面临的重要挑战之一。为了降低算法的复杂度,图3展示了两种低复杂度的智能反射面反射设计方案。一种有效的解决方案是以离线的方式预先计算不同来波方向下的最优智能反射面反射系数,并将其存储在智能反射面的控制器中,构成反射优化设计的离线数据库。基于预先计算的数据库,智能反射面可以根据感知的到达角信息实时动态地调整其信号反射模式。此外,在构建离线数据库的过程中,可以采用监督学习(supervised learning, SL)等人工智能算法获得从任何给定到达角信息到最优反射系数的近似映射,以提升数据库的准确性。另一种解决思路是利用卡尔曼滤波(Kalman filtering, KF)等低复杂度的自适应算法,基于历史训练数据和先验信息,以极低的成本与极短的响应时间对智能反射面的反射系数进行实时的预测更新。

然而,当未授权区域内雷达的确切位置未知时,由于缺乏精确的雷达侦察信息,上述反射设计方法面临巨大的挑战。为了克服这一困难,可以根据实际需要建立特定的雷达信号屏蔽区域,

利用空间滤波器的设计思想,使该区域内反射的回波信号被有效地减弱或重定向,屏蔽指定的未授权区域。此外,智能反射面的反射优化设计高度依赖于感知单元对环境信息的精确估计,而在非理想的实际场景下,环境信息的获取和估计往往伴随一定的误差,从而影响智能反射面的实际调控效果。因此,探索高鲁棒性、低复杂度、自适应能力强的智能反射面设计方案是实现未来智能化、自主化电磁隐身系统的重要途径。

2.4 部署策略与一体化集成

感知阵列和智能反射面的部署架构和集成策略是影响环境侦察能力和目标隐身性能的关键系统性因素。在不同的探测场景中,雷达的数量和分布、目标的结构和运动特性对隐身系统的环境感知精度和实时调控能力提出了不同的要求。对于感知阵列而言,不同的阵列形式拥有不同的感知精度^[9],常见感知阵列部署方式如图4所示,包括均匀平面阵列、L形阵列、十字形阵列等。对于特定形式的感知阵列,增加感知单元的数量可以提高感知分辨率,但也伴随着硬件成本和信号处理复杂度的增加。因此,在选择最优的感知阵列部署方式以满足特定环境感知需求时,如何

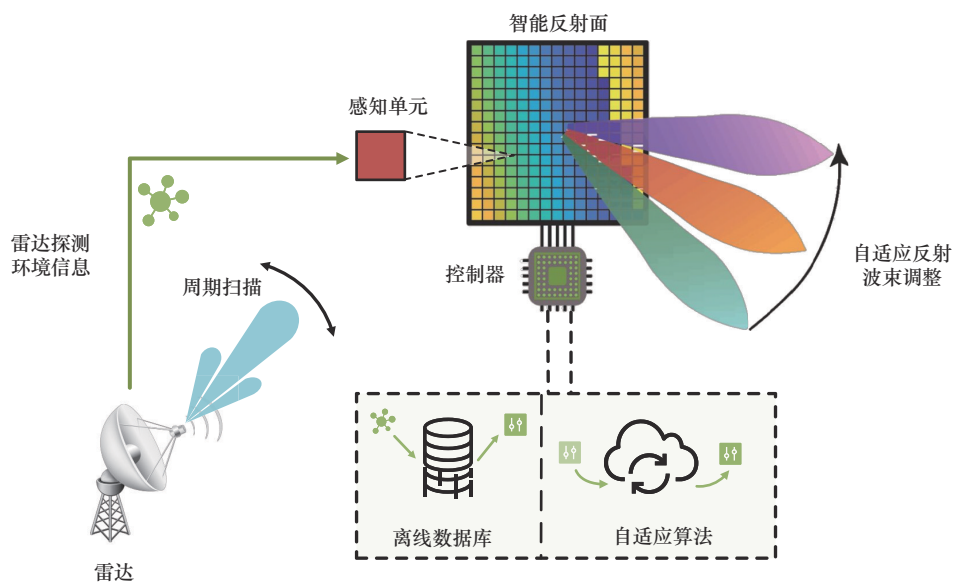


图3 低复杂度的智能反射面反射设计方案



在感知性能与系统成本之间取得平衡成为一个亟待解决的重要难题。

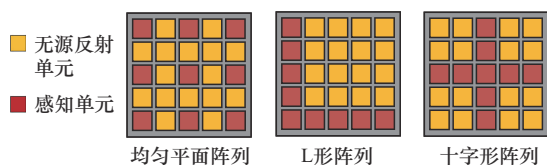


图4 常见感知阵列部署方式

同样地,智能反射面不同的部署方式也会对电磁隐身系统的整体成本、调控能力和覆盖范围产生影响,如何在这些因素之间取得平衡成为设计智能反射面部署策略的重要考量之一^[20]。在智能反射面辅助电磁隐身系统中,常用的部署方式是在目标表面安装智能反射面,通过精确调整智能反射面的反射模式抵消或重定向入射至目标表面的雷达探测信号。此外,为了充分挖掘智能反射面在电磁隐身中的潜力,需要协同优化软硬件设计和部署架构,以实现可控隐身系统的高度一体化集成,从而确保在复杂电磁环境中实现实时、精准的隐身效果。总而言之,根据特定的探测环境和系统需求制订合适的部署策略和软硬件一体化集成方案,对于实现最优的智能反射面辅助电磁隐身系统全局性能至关重要,这为提高复杂环境中电磁隐身系统的有效性提供了新的研究方向。

3 结束语

智能反射面凭借其卓越的实时调控能力和自适应能力,能够有效应对日益复杂的雷达探测场景,成为构建未来智能电磁隐身系统的关键组成部分。本文深入探讨了基于智能反射面的智能电磁隐身技术,并讨论了其未来的发展方向。首先,本文介绍了智能反射面在透明式电磁隐身和欺骗式电磁隐身系统中的应用,阐明了它们的基本原理,并强调了其相较于传统技术的优势。随后,本文探讨了智能电磁隐身

技术所面临的主要设计挑战,提出了富有前景的解决方案并指出潜在的研究方向。在智能反射面的助力下,未来的电磁隐身技术将拥有实时响应、自适应调整的能力,从而推动安全、可靠的未来无线网络的构建与发展。在商用领域,该技术对实现无人机隐私安全与重要设备的电磁防护具有重要作用,有望在未来6G赋能下推动低空经济的蓬勃发展;在军用领域,该技术可有效提高导弹等高新武器的生存、空防和纵深打击能力,在陆、海、空立体化信息化战争中具有极其重要的意义。

参考文献:

- [1] MAHMOOD N H, ALVES H, LÓPEZ O A, et al. Six key features of machine type communication in 6G[C]//Proceedings of the 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [2] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景, 挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies[J]. Science China: Information Sciences, 2019, 49(8): 963-987.
- [3] 夏新仁. 隐身技术发展现状与趋势[J]. 中国航天, 2002(1): 40-44.
XIA X R. The development of stealth technology[J]. Aerospace China, 2002(1): 40-44.
- [4] AHMAD H, TARIQ A, SHEHZAD A, et al. Stealth technology: methods and composite materials—a review[J]. Polymer Composites, 2019, 40(12): 4457-4472.
- [5] FANG X Y, LI M M, LI S Y, et al. Diverse frequency time modulation for passive false target spoofing: design and experiment[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(3): 1932-1942.
- [6] DU C, CONG Y L, ZHANG L, et al. A practical deceptive jamming method based on vulnerable location awareness adversarial attack for radar HRRP target recognition[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2022, 17: 2410-2424.
- [7] 张磊, 陈晓晴, 郑熠宁, 等. 电磁超表面与信息超表面[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 817-828.
ZHANG L, CHEN X Q, ZHENG Y N, et al. Electromagnetic metasurfaces and information metasurfaces[J]. Chinese Journal

- of Radio Science, 2021, 36(6): 817-828.
- [8] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [9] ZHENG B X, YOU C S, MEI W D, et al. A survey on channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 1035-1071.
- [10] WU Q Q, ZHENG B X, YOU C S, et al. Intelligent surfaces empowered wireless network: recent advances and the road to 6G[J]. arXiv preprint arXiv:2312.16918, 2023.
- [11] ZHENG B X, XIONG X, TANG J, et al. Intelligent reflecting surface-aided electromagnetic stealth against radar detection[J]. arXiv preprint, arXiv:2312.01940, 2023.
- [12] XIONG X, ZHENG B X, SWINDLEHURST A L, et al. A new intelligent reflecting surface-aided electromagnetic stealth strategy[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(5): 1498-1502.
- [13] SHAO X D, ZHANG R. Target-mounted intelligent reflecting surface for secure wireless sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, PP(99): 1.
- [14] ZHENG B X, XIONG X, MA T T, et al. Intelligent reflecting surface-enabled anti-detection for secure sensing and communications[J]. arXiv preprint, arXiv:2404.08366, 2024.
- [15] WANG H Z, ZHENG B X, SHAO X D, et al. Intelligent reflecting surface-aided radar spoofing[J]. arXiv preprint, arXiv:2405.06951, 2024.
- [16] WU J X, FAN P Z. A survey on high mobility wireless communications: challenges, opportunities and solutions[J]. IEEE Access, 2016, 4: 450-476.
- [17] PAN C H, ZHOU G, ZHI K D, 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.
- [18] BERGER C R, WANG Z H, HUANG J Z, et al. Application of compressive sensing to sparse channel estimation[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(11): 164-174.
- [19] SOLTANI M, POURAHMADI V, MIRZAEI A, et al. Deep learning-based channel estimation[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 652-655.
- [20] ZHENG B X, YOU C S, ZHANG R. Double-IRS assisted multi-user MIMO: cooperative passive beamforming design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7): 4513-4526.

[作者简介]



马甜甜 (2002-), 女, 华南理工大学微电子学院博士生, 主要研究方向为 5G/6G 无线通信、智能反射面、智能可控电磁隐身技术。



郑倍雄 (1990-), 男, 博士, 华南理工大学微电子学院副教授、博士生导师, 主要研究方向为 5G/6G 无线通信、信号处理与最优化方法、智能反射面、卫星通信和海事通信、大规模天线技术和毫米波通信、通感一体化、智能可控电磁隐身技术。



熊雪 (1996-), 女, 华南理工大学未来技术学院博士生, 主要研究方向为 5G/6G 无线通信、信号处理与最优化方法、智能反射面、通感一体化、智能可控电磁隐身技术。



张瑞 (1976-), 男, 香港中文大学(深圳)理工学院校长学勤讲座教授, 新加坡工程院院士, IEEE Fellow, 主要研究方向为智能通信、无人机/卫星通信、无线信能同传、智能反射面、可重构 MIMO。