

面向雷达智能隐身的有源超表面研究进展

王东姝, 刘同豪*, 汪刘应*, 刘顾, 陈海青, 陈孟州, 葛超群, 王龙, 王滨,
许可俊

(火箭军工程大学智剑实验室, 陕西西安 710025)

摘要: 新兴的有源超表面具备体积小、重量轻、易集成等优势, 在武器雷达智能隐身中具有重要的应用前景。基于此, 文章围绕当前武器装备的雷达智能隐身需求, 阐明了有源超表面在电磁波调控的方法途径和性能优势, 梳理了各类有源超表面的发展历程, 总结了面向雷达智能隐身的有源超表面的研究现状和未来发展方向, 为有源超表面在武器装备雷达智能隐身中的广泛应用提供相关理论依据及设计参考。

关 键 词: 有源超表面; 雷达智能隐身; 吸波; 散射; 电磁波幅相调控

中图分类号: O43

文献标识码: A

Research progress of active metasurface for intelligent radar stealth

WANG Dong-Shu, LIU Tong-Hao*, WANG Liu-Ying*, LIU Gu, CHEN Hai-Qing,
CHEN Meng-Zhong, GE Chao-Qun, WANG Long, WANG Bin, XU Ke-Jun
(Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: The new active metasurface has the advantages of small size, lightweight and easy integration, so it has an important application prospect in weapon radar intelligent stealth. Based on this, focusing on the requirements of radar intelligent stealth for current weapons and equipment, this paper expounds the methods, approaches and performance advantages of active metasurface in electromagnetic wave regulation, reviews the development history of various active metasurface, and summarizes the research status and future development direction of active metasurface for radar intelligent stealth. It provides the relevant theoretical basis and design reference for the wide application of active metasurface in intelligent stealth of weapon equipment radar.

Key words: active metasurface, radar intelligent stealth, absorbing wave, scattering, amplitude-phase regulation of electromagnetic wave

引言

随着探测识别技术飞速发展, 如何提高武器装备的隐蔽性成为各国军事研究重点之一。隐身技术作为传统伪装技术的一种应用和延伸, 可以通过抑制或者控制被探测目标的特征信号, 降低目标被发现、识别、追踪以及摧毁的概率^[1]。根据探测威胁频段的不同, 隐身探测技术大致可分为雷达隐身技术、红外隐身技术和可见光隐身技术等。在雷达隐

身技术方面, 目前主要通过优化武器装备的外形以实现定向散射, 或使用涂覆吸波材料以增强其吸收特性, 从而降低雷达散射截面(Radar cross section, 简称 RCS), 以达到隐身效果。利用自然材料来实现雷达隐身通常具有成本低、资源丰富等优点, 但受环境影响较大且电磁调控能力较弱, 亟需研制新材料提升现有材料的隐身性能。因此, 雷达隐身技术仍无法适应复杂电磁环境、目标动态变化大、材料隐身性能有限以及信号处理难等多重挑战。超材

收稿日期: 2024-11-06, 修回日期: 2024-12-29

Received date: 2024-11-06, Revised date: 2024-12-29

基金项目: 陕西省科协青年人才托举计划项目(20240129), 国家资助博士后研究人员计划(GZC20242285)

Foundation items: Supported Young Talent Fund of Association for Science and Technology in Shaanxi (20240129), the Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (GZC20242285)

作者简介(Biography): 王东姝(2000—), 女, 陕西汉中人, 火箭军工程大学硕士生, 主要研究领域为电磁超表面及电磁调控技术, E-mail: wangdongshu2023@163. com

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: liutonghaor@163. com; lywangxa@163. com

料,作为一类具有超常物理特性的人工复合材料,为隐身技术提供了新的可能性。

超材料通常是指一系列由亚波长结构单元构成的,具有天然材料所不具备的超常电磁、力学、热学、声学等物理特性的人工复合材料或结构^[2-18]。超材料这一概念由美国德州大学的R. M. Walser教授于2001年首先提出^[19],其英文名称“Metamaterials”一词中的前缀“Meta”在拉丁语中有“超出”的含义,表明超材料具有自然材料所不具备的物理特性,但它所存在的厚度大、成本高、不易集成等缺点阻碍了其实际应用。超表面作为超材料的二维形式,完美继承超材料出色的电磁调控能力,且同时具有厚度小、损耗低和制作简单等优势,在电磁隐身、无线通信和探测传感等领域实现广泛应用,迅速成为超材料领域的热门研究对象之一。

早期的超表面一旦设计和制造完成,电磁性能随之固定,这严重制约了其在智能设备中广泛应用,也正因如此,可重构超表面应运而生。可重构超表面能够动态调控电磁波的幅值、相位和极化等电磁特性,实时地生成各种所需的电磁功能。根据调谐机制的不同,可重构超表面可分为电调谐可重构超表面、热调谐可重构超表面、机械调谐可重构超表面、光调谐可重构超表面和化学调谐可重构超表面。加载PIN二极管、变容二极管等有源器件的有源超表面因其调谐速度快和制备工艺简单等优势,在雷达智能隐身领域展现出了重要的研究价值和良好的应用前景^[19-20]。有源超表面技术通过精确控制单元的电磁响应,实现了对电磁波幅值、相位、极化等特性的动态调整,以适应不断变化的环境需求。这种技术突破了传统材料的局限性,如厚度大和成本高昂,同时也进一步提升了动态隐身效果。通过与先进的信号处理技术相结合,有源超表面简化了电磁波的调控过程,增强了系统的适应性、灵活性和整体性能,为雷达智能隐身领域提供了一种创新的解决方案。作为一种人工电磁结构,有源超表面能够通过施加外部控制信号于有源器件,根据输入信号的相位和幅值等特性调整其电磁性能,从而动态调控电磁波。尽管如此,有源超表面的设计和实现仍面临一系列技术挑战。首先,必须确保在宽频带和宽角域内维持稳定的性能,这要求设计出高效的反馈机制,以便在环境动态变化时能够迅速响应并实现预定功能。其次,提升集成化和能效也是关键的技术挑战,研究如何在保持低能耗的同时

实现高效的电磁调节,是当前研究的重点之一。本文基于有源超表面实现雷达智能隐身的不同机理,分别介绍了吸波动态可调超表面、散射动态可调超表面、吸-散一体动态可调超表面以及具有感知和决策功能的智能隐身超表面的研究进展,总结了当前研究中有源超表面的内在机理、设计方法和实现效果,分析了当前研究中存在的关键问题和未来的发展方向,为面向雷达智能隐身的有源超表面设计和应用提供参考。

1 超表面概述

各类电磁器件的快速更新换代使得自然材料固有的电磁特性逐渐难以满足人们对电磁波灵活调控的需求,研究人员逐渐开始利用人工结构材料调控电磁波。1968年,前苏联科学家V. G. Veselago在理论层面提出了具有负磁导率和负介电常数的材料^[21],因为电磁波在此类材料中传播时电场、磁场和波矢之间遵循左手定则,该材料被命名为左手材料。1996年,英国帝国理工学院的J. B. Pendry等人利用金属细线阵列结构首次实现了具有负介电常数的新型材料^[22]。1999年,该团队再次通过开口谐振环的设计实现了负相对磁导率的新型材料^[23]。2000年,美国加州大学的D. R. Smith团队将金属线和开口谐振环组合后,设计出了具有负折射率的左手材料并进行了实验验证^[24]。2001年,美国德州大学的R. M. Walser教授首次提出超材料这一概念。超材料因其独特电磁性能在隐身斗篷^[25-26]、超透镜^[27]、吸波器^[28-29]等电磁器件中显现出巨大潜能。虽然超材料拥有优异的电磁性能,但其存在的损耗高、体积大和加工难等缺点使其难以真正应用于实际,而作为超材料的二维形式,更为简洁高效的超表面吸引了越来越多研究者的关注。

超表面是指一系列由亚波长结构单元在二维平面内按照特定的规律排布而成的人工功能结构,是超材料的拓展和延伸^[30-40]。超表面单元的几何结构和空间排列方式可以根据所需电磁功能进行精确设计,从而实现对电磁波的幅值、相位、极化和角动量等参量的灵活调控。超表面引起学术界的广泛关注是始于2011年,美国哈佛大学F. Capasso教授团队提出了“广义斯涅耳定律”^[41],该团队所设计的超表面可实现电磁波的异常透射与异常反射,所设计的天线及仿真结果如图1(a)所示。2012年,该团队利用具有双曲面型相位分布超表面实现了波束聚焦的效果^[42],如图1(b)所示。同年,复旦大学

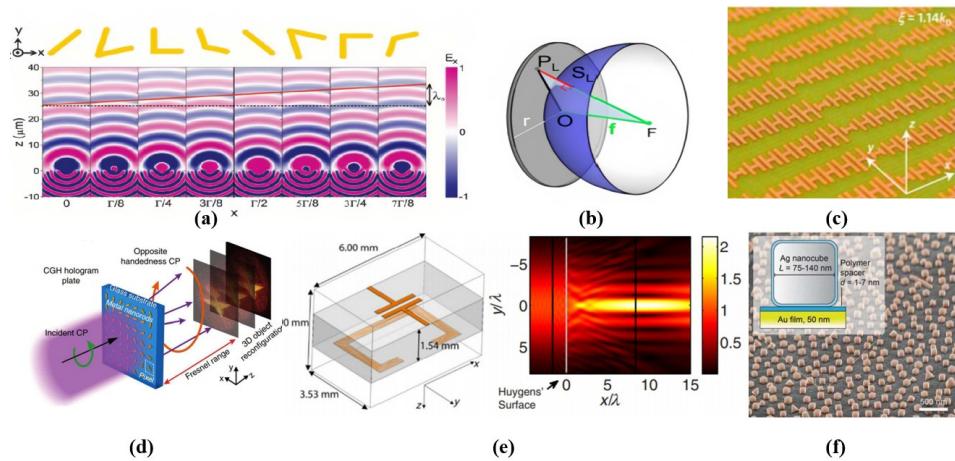


图1 超表面发展历程代表性成果:(a)8种“V”形天线及其仿真的波前^[41];(b)基于双曲面型相位分布超表面的光学透镜示意图^[42];(c)相位梯度超表面^[43];(d)基于透射型超表面的三维全息成像器示意图^[44];(e)惠更斯超表面单元以及所实现的高斯波束到贝塞尔波束的变换^[45];(f)光波段的完美吸波器^[46]

Fig. 1 Representative achievements in the development of metasurfaces: (a) eight types of V-shaped antennas and their simulated wavefront^[41]; (b) schematic diagram of optical lens based on hyperbolic phase distribution metasurface^[42]; (c) phase gradient metasurface^[43]; (d) schematic diagram of a three-dimensional holographic imager based on a transmissive metasurface^[44]; (e) huygens metasurface element and the transformation from Gaussian beam to Bessel beam achieved^[45]; (f) the perfect absorber for optical bands^[46]

周磊团队所设计的相位梯度超表面成功将自由空间波耦合成表面波^[43],如图1(c)所示。2013年,张霜团队基于几何相位原理设计出能在圆极化波入射下生成三维全息图像的超表面^[44],如图1(d)所示。受电磁学中的惠更斯原理启示,密歇根大学教授Grbic团队提出“惠更斯超表面”概念^[45],其通过设计惠更斯超表面中结构的电磁谐振实现了对电磁波透射幅值和相位的灵活调控,如图1(e)所示。2015年,Mikkelsen团队提出了一种光波段的完美吸收超表面,在650nm波段实现近100%的完美吸收^[46],如图1(f)所示。

随着信息化与数字化浪潮的迅猛推进,传统物理层属性的超表面亟需深化与数字信息领域的交融,以拓宽其在信息科学及诸多相关领域的应用边界,促进技术的广泛实践与深入探索^[47-48]。2014年,Engheta团队提出了“数字化超材料”的理念^[49],超材料的离散化结构设计方法也随之提出,但是此类方法仍旧局限于等效媒介参数的数字化。同年,东南大学崔铁军团队创造性提出数字编码超表面的概念^[50],如图2(a)与(b)所示,该方法通过二进制数字编码映射超表面单元的相位响应,构建了超表面与特定编码序列的对应关系。此类超表面通过定制编码序列,可灵活调控超表面的电磁性能,实现数字化表征。此举不仅促进了超表面物理与信息领

域的融合,还显著优化了超表面的设计流程。在崔铁军教授提出编码超材料的同时,“现场可编程超材料”这一重要理念被提出^[50]。在超表面单元结构中加载PIN二极管,通过改变偏置电压从而控制PIN二极管的开关状态,实现对超表面电磁响应的动态调控,如图2(c)与(d)所示。2018年,该团队进一步推出了时空可编程超表面^[51-52],该超表面可同时在时间域和空间域实现对电磁波的调控,其中,时间编码能将信息分散于多个谐波频率,而空间编码则赋予了对各谐波方向特性的精细调控。时空可编程超表面的出现,为电磁波操纵引入了前所未有的灵活性,展现出在无线通信、雷达隐身等前沿领域中的广泛应用潜力^[53-55]。

近年来,超表面朝着智能化的方向快速发展,在智能感知、智能伪装和智能通信等方面取得了一系列卓越的成果。2016年,中国工程院罗章杰团队研究变容二极管阻抗表面的吸收调谐机理,提出基于嵌入式变容二极管耗散行为的有源超表面^[56],如图3(a)所示,其吸收率对入射波功率有着很强的依赖性,在1.64 GHz时吸收率从0.65增加至0.94,且在低功率时吸收率仍可达0.6。2019年,崔铁军团队提出了一种集成陀螺仪传感器的可编程超表面^[57],可根据超表面自身的探测系统感知姿态并自适应调节电磁波的散射,如图3(b)所示。同年,该

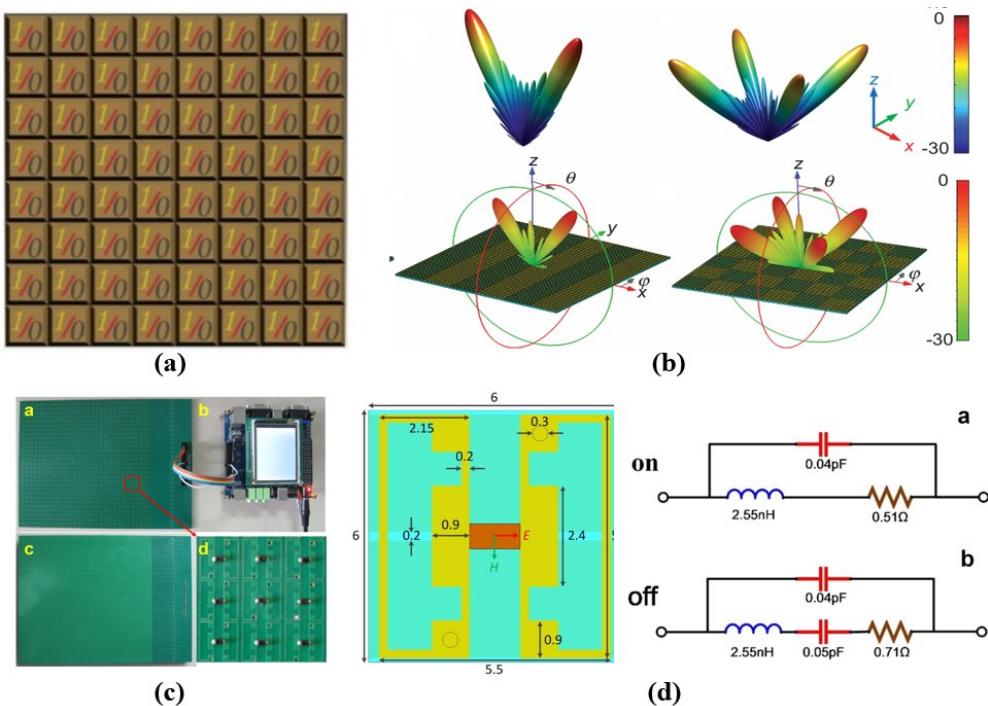


图2 数字编码与现场可编程超表面:(a)1-bit编码超表面的数字化阵面图^[50];(b)1-bit编码超表面散射场仿真结果^[50];(c)1-bit编码超表面样品^[50];(d)1-bit编码超表面单元及PIN二极管等效电路^[50]

Fig. 2 Digital coding and field-programmable metasurfaces (a) digital array diagram of 1-bit coding metasurface^[50]; (b) simulated scattering results of 1-bit coding metasurface field^[50]; (c) 1-bit coding metasurface sample^[50]; (d) unit of 1-bit coding metasurface and equivalent circuit of PIN diode^[50]

团队提出一种非线性可重构的强度依赖反射型超表面^[58],如图3(c)所示。该超表面集成了一个变容二极管和一个有源微波功率检测电路,通过加载微波功率传感器实现功率依赖的吸收性能。浙江大学陈红胜团队还提出了类脑超表面的概念,借助深度学习,在感知无线信道信息后可使超表面快速实现自主排布,进而完成对无线信道的二次管理。

2 吸波动态可调超表面研究进展

传统吸波材料能够将入射电磁波能量转换为其他形式的能量,吸收电磁波能量可大幅减弱电磁波反射。但传统吸波材料在吸收电磁波时,其性能通常是固定且不可调的,这限制了其在复杂多变环境中的应用。而吸波动态可调超表面弥补这一缺陷,通过改变超表面的结构或材料特性,可以实时调节对电磁波的吸收能力,实现吸波动态可调。这种特性使得吸波动态可调超表面在通信、隐身等领域具有广泛的应用前景,能够更好地适应复杂多变的电磁环境^[59-63]。

2020年,上海大学肖诗逸团队利用耦合模理论设计了可动态调控电磁波透射和吸收的有源超表面,该超表面通过在顶层与底层分别加载二极管,

实现了偏置电压独立控制,如图4(a)所示,可实现从完美透射到完美吸收态的灵活转变^[64]。同年,山西大学王佳云等人设计了一种功能可切换的有源超表面,如图4(b)所示,在雪花形金属结构和双L形金属结构中嵌入PIN二极管和集总电阻,通过控制二极管的偏置电压,实现完美吸收和极化转换的切换^[65]。2021年,东南大学崔铁军团队提出一种有源超表面,如图4(c)所示,其可以实时控制从全透射到全反射再到完全吸收,并在宽频带内独立地动态操控正交线极化波的反射波束^[66]。上述吸波动态可调超表面能够实现电磁波吸收的灵活切换为实现雷达智能隐身防护提供了切实可行的理论和方法。

现阶段吸波超表面已达到近乎“完美”吸收,但通常吸波带宽较窄甚至只能在单一频点吸波。为了解决上述问题,研究人员提出了一系列吸波频带动态可调的超表面设计方案。2017年,韩国中央大学Lee等人将PIN二极管与芯片电阻相结合,设计出一种具有宽带吸收特性的有源超表面^[67],如图4(d)所示。该设计通过调控PIN二极管的开关状态,实现了在8.45–9.3 GHz及9.2–10.45 GHz频段内

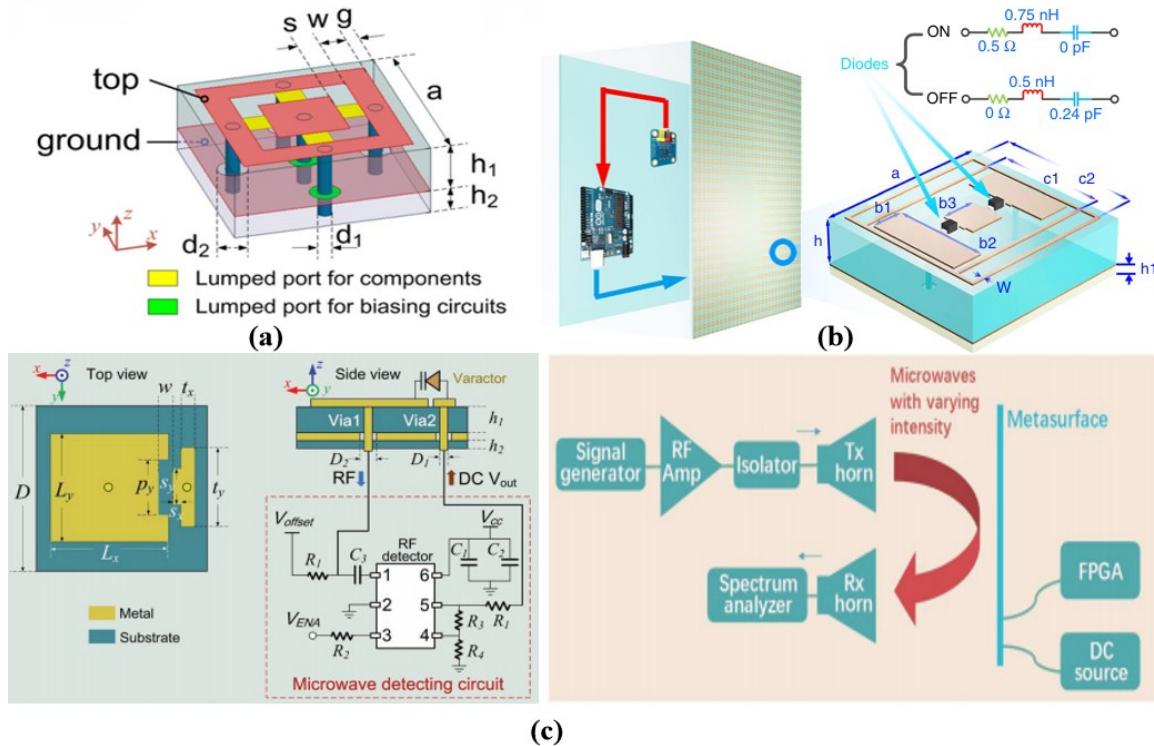


图3 有源超表面动态调控进展:(a)蘑菇状结构单元结构几何形状^[56];(b)集成陀螺仪传感器的智能超表面^[57];(c)超表面的单元的俯视图和侧视图,非线性测量系统连接的示意图^[58]

Fig. 3 Advances in dynamic regulation of active metasurfaces: (a) the geometry of the mushroom-like unit cell^[56]; (b) intelligent metasurface with integrated gyroscope sensor^[57]; (c) top and side views of the unit particle of the metasurface, sketch of the nonlinear measurement system connections^[58]

切换的高效吸收,两频段均展现出高达90%的吸收性能。2020年,新加坡南洋大学Fang等人将有源吸收器与无源蜂窝结构相结合设计出一种宽带吸波有源超表面^[68]。该设计通过调整二极管的偏置电压进而达到调节超表面吸波强度及其工作频段的目的,展现了卓越的调控性能。除了宽频吸波性能之外,吸波动态可调超表面的极化不敏感和入射角稳定性同样至关重要。华中科技大学江建军团队利用PIN二极管的动态阻抗调控能力,巧妙设计出具备各向异性特性的吸波有源超表面,其在30°至50°斜入射角下在5.1–6.0 GHz频段内,均展现出低于-10 dB的电磁波反射率,同时,该设计通过调整PIN二极管的工作状态,能够灵活调节谐振频率与工作带宽^[69]。2021年,Deepanshu Sahu等人通过改变石墨烯化学势设计出吸波可调超表面,该超表面在1.4 THz带宽内吸收率高于96%,且具备极化不敏感和入射角度稳定性^[70]。2022年,空军工程大学冯奎胜等人将变容二极管和PIN二极管集成于超表面,如图4(e)所示,该超表面通过调节二极管偏置

电压实现在频带范围4.57–8.51 GHz内电磁波吸收的动态可调,且具有宽入射角度不敏感性^[71–72]。同年,亚里士多德大学A. Pitilakis等人实验验证了一种多功能超表面架构,将可变负载连在背板后,实现表面阻抗的重塑,展示了斜入射、宽带极化转换和波束的完美吸收^[73]。近年来,吸波超表面研究取得显著进展,具备动态调控电磁波透射和吸收的能力。超表面通过集成有源器件实现宽频带、高效吸波等特性,并展现出良好极化不敏感性和一定的入射角稳定性。尽管吸波性能接近完美,且吸波带宽相对较宽,但均为多层有源超表面结构,可以向单层超表面宽频吸波进行研究或进一步拓宽频带,体现有源超表面体积小、电磁性能好等优势。

3 散射动态可调超表面研究进展

武器装备可通过设计外形的手段将电磁波定向散射到特定方向,从而实现隐身。超表面可通过调整相位分布调控电磁波散射方向,而散射动态可调超表面则能够动态改变其相位分布实现对电磁波散射方向的实时调控,进而实现动态隐身。基于

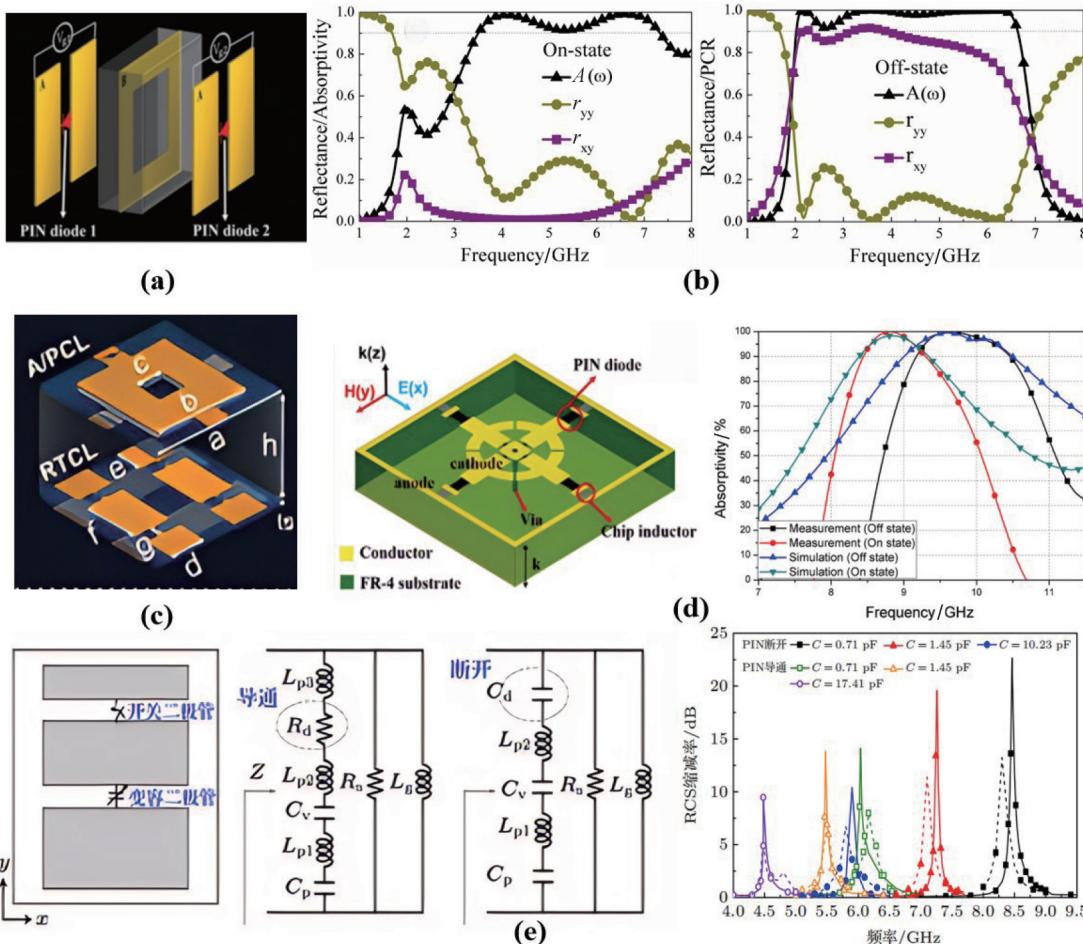


图4 (a) 偏置电压如何独立应用的方案^[64]; (b) 所有的二极管都处于开启状态和所有二极管都处于关闭状态仿真结果^[65]; (c) 可重构超表面的示意图^[66]; (d) 吸波超表面单元形状, 吸收率测量和仿真结果^[67]; (e) 超宽带有源超表面单元, 开关导通及断开时的等效电路模型, 仿真与实测的 RCS 减缩曲线 (实线, 仿真结果; 虚线, 实测结果)^[71-72]

Fig. 4 (a) Scheme of how the bias voltages are applied independently^[64]; (b) simulation results for all the diodes are in on-state and all the diodes are in off-state^[65]; (c) the sketch of the proposed reconfigurable metasurface^[66]; (d) geometry of the proposed absorber unit cell, measured and simulated absorptivity of the proposed absorber^[67]; (e) ultra-wideband active metasurface absorber, equivalent circuit model of PIN diode at ON state and OFF state, simulated and measured monostatic RCS reduction. (Solid lines, simulated results; dashed lines, measured results)^[71-72]

阵列理论和广义斯涅尔定律等理论的有源超表面相位可编程超表面可以通过漫反射和异常反射来降低 RCS 进而达到隐身目的^[74-76]。

2020 年, 崔铁军团队设计了一种双通道有源超表面^[77], 该超表面单元具有特殊设计的金属图案, 并在 x 方向和 y 方向分别集成两个变容二极管, 如图 5(a) 所示通过改变电容值实现对 x 极化和 y 极化电磁波反射相位的独立控制, 并具有独立控制接口, 可实时对线极化进行独立编程, 能够实现多个复杂电磁功能。2021 年, 同济大学童美松等人提出一种加载变容二极管的宽带有源超表面^[78], 与集成 PIN 二极管相比, 变容二极管的加载使得相位更易连续

调控。所设计的超表面单元结构与等效电路如图 5 (b) 所示, 其可在相对带宽约为 12% 的光纤工作频段内实现 0° ~ 360° 的可调传输相位范围, 同时保持传输幅值在 0.8 以上, 在波束形成方面具有良好的潜力。2022 年, 桂林科技大学曹卫平等设计了一种单层透射型有源超表面^[79], 如图 5(c) 所示, 其通过控制 PIN 二极管的偏置电压, 使超表面单元产生 1bit 的相位差, 通过相位编码的超表面可以实现双波束偏转与大角度的单波束与多波束扫描^[79]。但单层超表面偏置网络影响其工作性能其工作带宽较窄, 为解决此类问题。该团队又提出了多层传输型有源超表面, 如图 5(d) 所示。该超表面由五层结

构构成,每层加载一个变容二极管,最终实现1bit相位,改变超表面的编码状态,实现多波束扫描性能。同年,萨里大学Mohsen Khalily团队提出了一种等效电路模型,通过测试单元的特性来解析评价单元的性能,并构造了一种有源反射超表面^[80],根据变容调谐二极管的参数,把所需电容值转换为对应的电压数值,实现对各个反射单元的控制,从而改变反射相位。2023年,魁北克大学的Ahmed F等人设计了一种结构^[81],能够同时实现频率可重构和相位控制,该结构构成的相位梯度有源超表面在1.8~2.3 GHz和2.95~3.9 GHz频率范围内实现了波束扫描和分裂功能。

为进一步提升散射动态可调超表面的极化不敏感特性,一些可适用于不同极化入射波的散射动态可调超表面被相继提出^[82]。2023年,国防科技大学赵胜辉等人提出一种有源超表面作为实现宽带可调谐减小RCS的手段,如图6(a)所示。该超表面单元可在正交线极化波入射下实现1bit相位动态调控,通过改变超表面的相位分布可灵活调控超表面的后向散射强度,并且具有较好的入射角度稳定性^[83]。2024年,东南大学曹婉婉等人提出一种有源超表面,如图6(b)所示。其可独立实现正交线极化波反射下1bit相位动态调控,具有30°以内的斜入射角稳定性与灵活的双波束调节能力^[84]。同年,崔铁

军团队提出了一种加载PIN二极管的45°对称结构单元,如图6(c)所示,在7~11.1 GHz的频率范围内实现对任意线极化波和圆极化波的1bit相位动态调控,实现反射波在任意极化波入射的光束偏转^[85]。与此同时,作者所在团队也在电磁波散射方面做了许多探索,并设计了一系列散射超表面。为了实现对电磁波散射的动态调控,团队设计了一款伞形有源超表面,如图6(d)所示,该超表面可对左旋圆极化同极化反射波、右旋圆极化同极化反射波、x极化同极化反射波、y极化同极化反射波、x极化交叉极化反射波和y极化交叉极化反射波独立实现1bit相位动态调控。此外,团队基于有源超表面构造了一款表面波辐射器,并且为了高效地激发本征态表面波,设计了金属馈电端口,最终在宽频带内实现了六个通道中独立且可动态切换的电磁功能。这一创新设计充分利用了超表面的独特物理特性,通过调控超表面单元的物理参数和阵列排布方式,实现了对电磁波传播方向、极化方向和传输模式的灵活控制^[86~87]。现有散射动态可调超表面能够灵活调控电磁波的相位从而适应不同需求,但大多数存在只能适应单一或两个正交极化态,缺乏全极化状态下的动态调控,可以向全极化方向发展,以便适应更多场景。

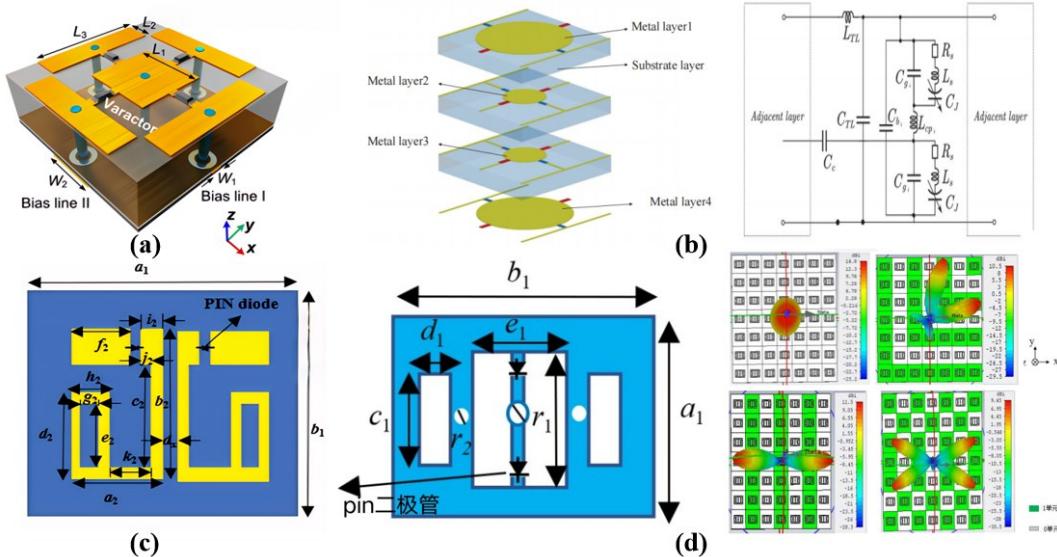


图5 (a)超表面单元^[77];(b)所提出的超表面单元结构,两层不同金属贴片的传输模型的等效电路^[78];(c)超表面单元结构^[79];(d)多层传输型超表面单元,远场辐射方向图^[79]

Fig. 5 (a) Metasurface's meta-atom^[77]; (b) structure of the proposed metasurface's meta-atom, equivalent circuit of transmission model of two different layers of metal patch^[78]; (c) structure of metasurface's meta-atom^[79]; (d) multi layer transmission type metasurface's meta-atom, far-field radiation pattern^[79]

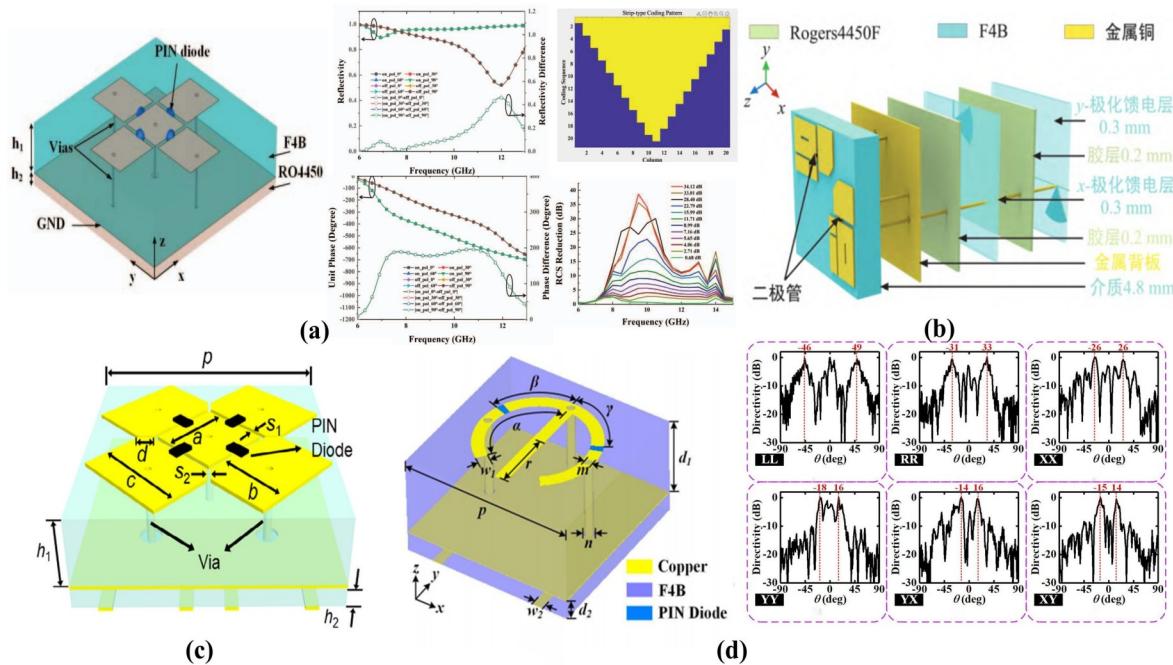


图 6 (a) 双极化宽带超表面单元、单元反射率、单位相位差仿真结果、不同编码模式下的宽带可调谐 RCS 缩减的仿真结果^[83];(b)1-bit 相位动态调控超表面单元^[84];(c)45°对称超表面单元^[85];(d)伞状超表面单元,不同通道测试的归一化远场方向图^[86-87]

Fig. 6 (a) Broadband dual polarized metasurface's meta-atom, the simulated results of unit cell reflectivity、unit phase and phase difference, the simulated regulated of wideband tunable RCS reduction with diffifferent coding patterns^[83];(b) 1-bit phase modulation of metasurface's unit cell^[84];(c) 45° symmetric metasurface's meta-atom^[85];(d) umbrella shaped metasurface's meta-atom , the measured normalized far-field scattering patterns in different channels^[86-87]

4 吸-散一体动态可调超表面研究进展

现有大多数超表面只能实现电磁波吸收或电磁波散射的动态控制,尽管其展现出良好的设计自由度和电磁波操控能力,但随着现有武器装备智能隐身需求的日益提升,对于隐身性能要求越来越高,可同时动态调控电磁波吸收和散射的吸-散一体动态可调超表面受到了研究人员越来越多的关注。通过设计吸-散一体动态可调超表面以减低 RCS,为解决新型雷达探测天线的电磁隐身与高效辐射等问题拓展了新的思路。

2018 年, 毕尔肯大学 Balci O 等人通过将石墨烯集成于超表面^[88],有效控制电磁波幅值和相位,产生所需电磁响应以实现自适应伪装。2021 年, 南丹麦大学的 Sergey I. Bozhevolnyi 等人开发了一种电驱动的动态 MEMS-OMS 平台^[89],该平台实现了对反射光的可控相位和幅值调制,这一技术为实现复杂的动态二维波前操控提供了一种灵活的解决方案。

同年, 国防科技大学袁方等人提出一种单层幅相同调的超表面^[90],如图 7(a)所示,通过改变十字贴片尺寸调节超表面单元的吸波工作频带,将不同吸波频段的超表面单元合理排布,并进行宽带范围内的反射幅值与反射相位设计,最终在 6.10~12.15 GHz 与 4.3~14.2 GHz 频带内实现 RCS 缩减。此外,该超表面具有较好的柔性可贴合于圆柱上,并在 4~12 GHz 下实现 RCS 缩减,为新型隐身材料的设计提供了新的思路。2022 年, 崔铁军团队提出一种幅相同调超表面^[91],单元结构如图 7(b)所示,通过调整加载于超表面的 PIN 二极管的偏置电压,实现独立控制反射电磁波的相位与幅值。实验表明,该超表面在 8~13 GHz 频带内可实现独立的多位幅值编码和 1 位相位编码,且可抑制散射波束的旁瓣,产生任意大小的衍射波。南京大学陈平等人提出一种吸-散一体的宽带 RCS 缩减超表面^[92],如图 7(c)所示。该超表面通过旋转双层单元结构产生 180°相位差进

而实现电磁波散射,同时改变电阻膜阻值实现电磁波吸收。结果证明,该超表面能够在电磁波垂直入射下于3.1~12.9 GHz的频带内反射率低-10 dB,并且在30°斜入射时仍能保持良好的性能。2023年,崔铁军团队利用2 bit幅相联合编码方案设计了具有任意能量占比的多波束幅相同调超表面^[93],单元结构如图7(d)所示。该设计方案有效降低了超表面设计难度,为超表面的远场辐射散射调控提供了新方法。同年,该团队还设计了一种基于变形十字结构的新型各向同性幅相同调超表面,如图7(e)所示,通过改变所加载的贴片电阻阻值和调整金属臂形状,实现对两个正交线极化反射分量的幅相响应的独立调控^[93]。最终实现对不同极化反射波的偏折角度和反射强度独立调控,并实现涡旋波辐射和RCS缩减等电磁功能。与此同时,作者所在的团队也在幅相同调方面做了许多探索,并设计了一系列吸-散一体动态可调超表面。团队基于圆极化解耦设计提出了多通道幅相同调超表面^[94],其通过改变贴片电阻阻值,和调整单元结构圆心角与旋转角,实现对左旋圆极化波和右旋圆极化波的幅值和相位的独立调控,如图7(f)所示。团队基于该超表面构造了一款双通道全息成像器,能够在9.0~11.0 GHz的宽频带内实现预期的成像效果。

2024年,新加坡科技与设计大学L. Wu团队提出了一个多目标优化框架来实现吸-散一体超表面的灵活设计^[95]。该超表面概念说明如图8(a)所示,采用了多目标逆设计,自动引入吸收和散射,使吸收和散射单元阵列分布得到精确设计。最终在8.27~21.2 GHz范围内实现了超过20 dB的散射场减少,同时具有良好的极化稳定性和角度不敏感性。同年,南京大学冯一军团队设计了一种三模有源超表面,如图8(b)所示,通过控制加载的PIN二极管的开关状态,实现从宽带电磁波吸收到宽角度范围内的高效反向反射的动态过渡,进而实现多种电磁散射特性的动态转换。最终该超表面实现低可探测模式下宽频带散射缩减,高可探测模式下背向散射大幅增加,两种模式调制编码信息三种工作模式^[96]。吸-散一体动态可调超表面^[97~99]研究较少,可亟待研究人员进一步研究。当前研究的吸-散一体有源超表面,通过PIN二极管实现了在单一极化下同时且独立控制吸收和散射,这突破了传统依赖于单元旋转来调整散射的技术。引入有源元件不仅增强了对电磁波的调控能力,还提高了灵活性。未

来,该技术有望向多极化方向发展,以满足更复杂多变的隐身技术需求。

5 智能隐身超表面研究进展

上述吸波动态可调超表面、散射动态可调超表面和吸-散一体动态可调超表面尽管能够动态调控电磁波实现动态隐身,但其仍然依赖于人的主观判断和手动操控,无法实现自适应隐身,难以满足武器装备智能化隐身的实际需求,智能隐身超表面应运而生。智能隐身超表面可自主感知外部环境信息,通过智能算法进行判断并执行决策,从而可根据环境的变化实现自适应隐身。智能隐身超表面在装备隐身领域展现出极大的应用潜力,引起了研究人员的广泛关注。

为实现对不同极化电磁波的智能调控,研究人员设计了一系列超表面。2020年,崔铁军团队又设计了两种有源超表面单元^[100],即传感单元与执行单元,分别用于识别入射波与调控反射波的操作,如图9(a)所示。在不同极化入射下,传感单元能够识别入射功率水平,并将数据传输到微控制器进行数字化,现场可编程逻辑门阵列能够根据特定的极化来独立地确定编码模式,并驱动执行单元来实现所需的散射场。2022年,该团队提出一种非线性有源超表面^[101],非线性模块由一个接收天线和两个检测电路组成,检测电路分别用于x和y极化检测,如图9(b)所示。实验证明该超表面输入阻抗受入射强度控制,入射功率密度在法向方向上为0.02~0.63 mW cm⁻²时吸收范围为23~96%及以上,吸收率为30~70%范围内相对带宽为12.3%,且具有入射角度稳定性。2024年,成都信息工程大学杜国宏等人提出了一种智能超表面^[102],其由可识别正交线极化波和正交圆极化波的识别天线、反馈组件构成闭环系统,如图9(c)所示。实验表明,该超表面可对正交线圆极化入射波的不同极化状态进行自适应动态调控,并具有漫反射、异常反射和涡旋波生成等电磁功能。

2020年,浙江大学钱超等人提出了一种智能隐身框架^[103],如图10(a)所示,自适应隐身于动态变化的背景环境。该团队建立电磁仿真模型,通过揭示隐身的瞬时响应机制验证其可行性,搭建电磁环境探测器和实验控制系统,设计智能电磁隐身超表面,实验采集数据进行深度学习训练。此外,一些集成射频传感器、摄像头等传感器件的智能隐身超表面被相继提出。2022年,崔铁军团队提出频率识

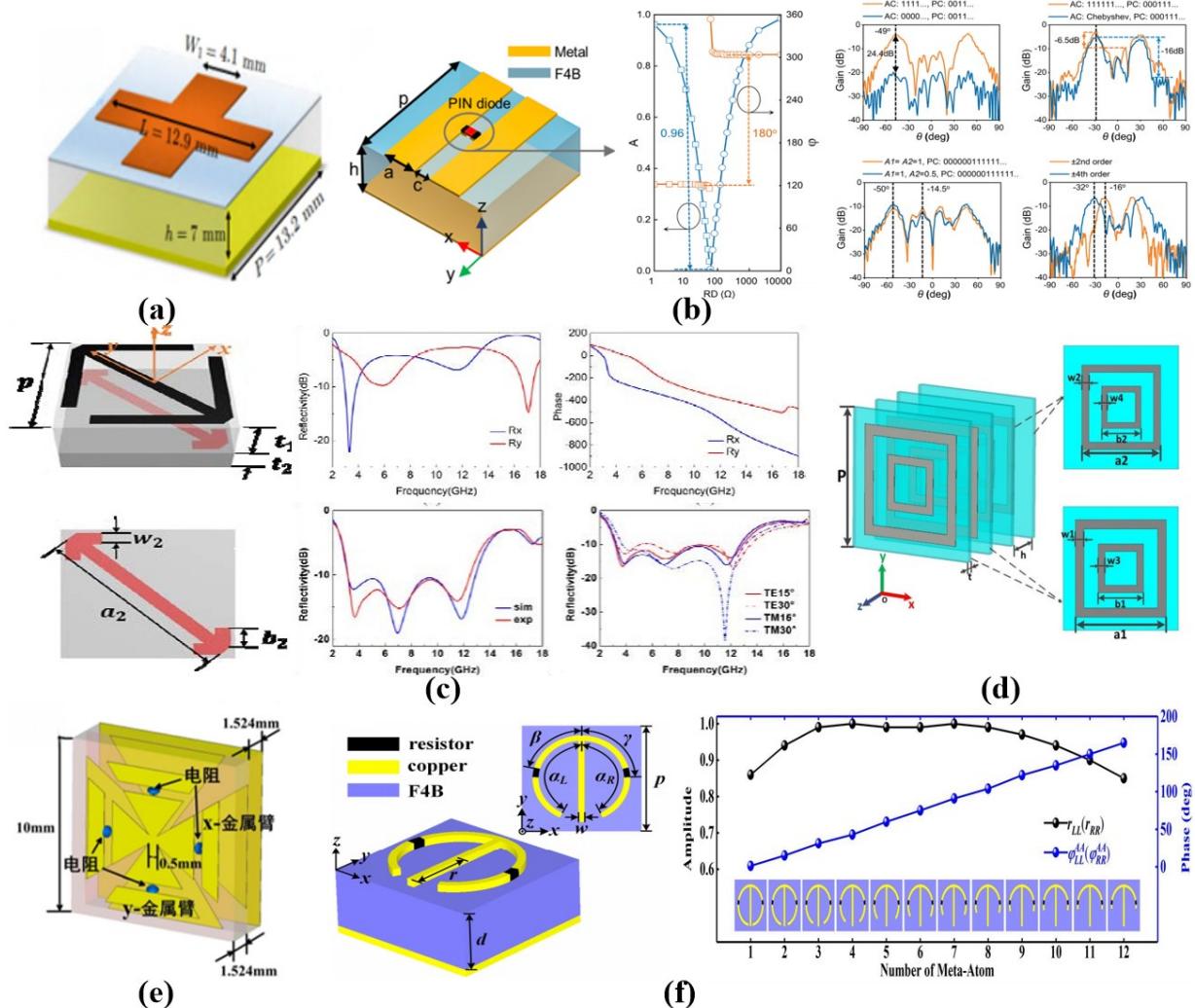


图7 (a)单层柔性超表面单元^[90];(b)超表面单元,10 GHz下从1 Ω 到10 000 Ω 时单元的反射幅值和相位仿真结果,四种不同的幅值-相位联合编码序列测量的超表面的二维远场辐射模式^[91];(c)双层箭头超表面单元结构,单元相位和幅值仿真结果,实测与仿真结果对比结果^[92];(d)超表面单元^[93];(e)超表面单元^[93];(f)超表面单元及其在10.0 GHz频率的工作幅值相位的仿真结果^[94]

Fig. 7 (a) Single layer flexible metasurface's meta-atom^[90]; (b) metasurface's meta-atom, simulated reflection amplitude and phase of unit element when the RD changes from $1\ \Omega$ to $10\ 000\ \Omega$ at 10 GHz, measured 2D far-field radiation patterns of the metasurface with four different amplitude-phase joint coding sequences^[91]; (c) double layer arrow metasurface's meta-atom, simulated reflection amplitude and phase of unit cell, comparison of measurement and simulation results^[92]; (d) metasurface's meta-atom^[93]; (e) metasurface's meta-atom^[93]; (f) metasurface's meta-atom, simulated reflection amplitude and phase of metasurface at a frequency of 10.0 GHz^[94]

别智能超表面^[104]，如图 10(b)所示，其通过实时射频传感器与自适应反馈系统，具备较高电磁环境识别与自适应控制能力，实现不同频率下的电磁波精准操控。实验证明，该超表面能以高分辨率识别不同频率入射波，并自适应实现操纵，无需人工干预。同年，该团队设计了一款适用于全极化和宽频带的隐身斗篷^[105]，如图 10(c)所示，该超表面利用移动所产生的多普勒效应对物体进行自适应实时隐身。

2022年,浙江大学钱超等人提出可用于动态识别与“光影成像”的智能超表面^[106],如图10(d)所示。该团队提出的一种三维物体识别策略,成功实现了光学图像捕获与处理,并利用深度学习对超表面进行优化,实现了自主感知动态图像并实时处理图像实现“光影成像”。同年,空军工程大学王甲富团队提出了一种基于电磁超表面的变色龙类智能伪装框架。该框架将动力感知器集成到一个超表面^[107]。通

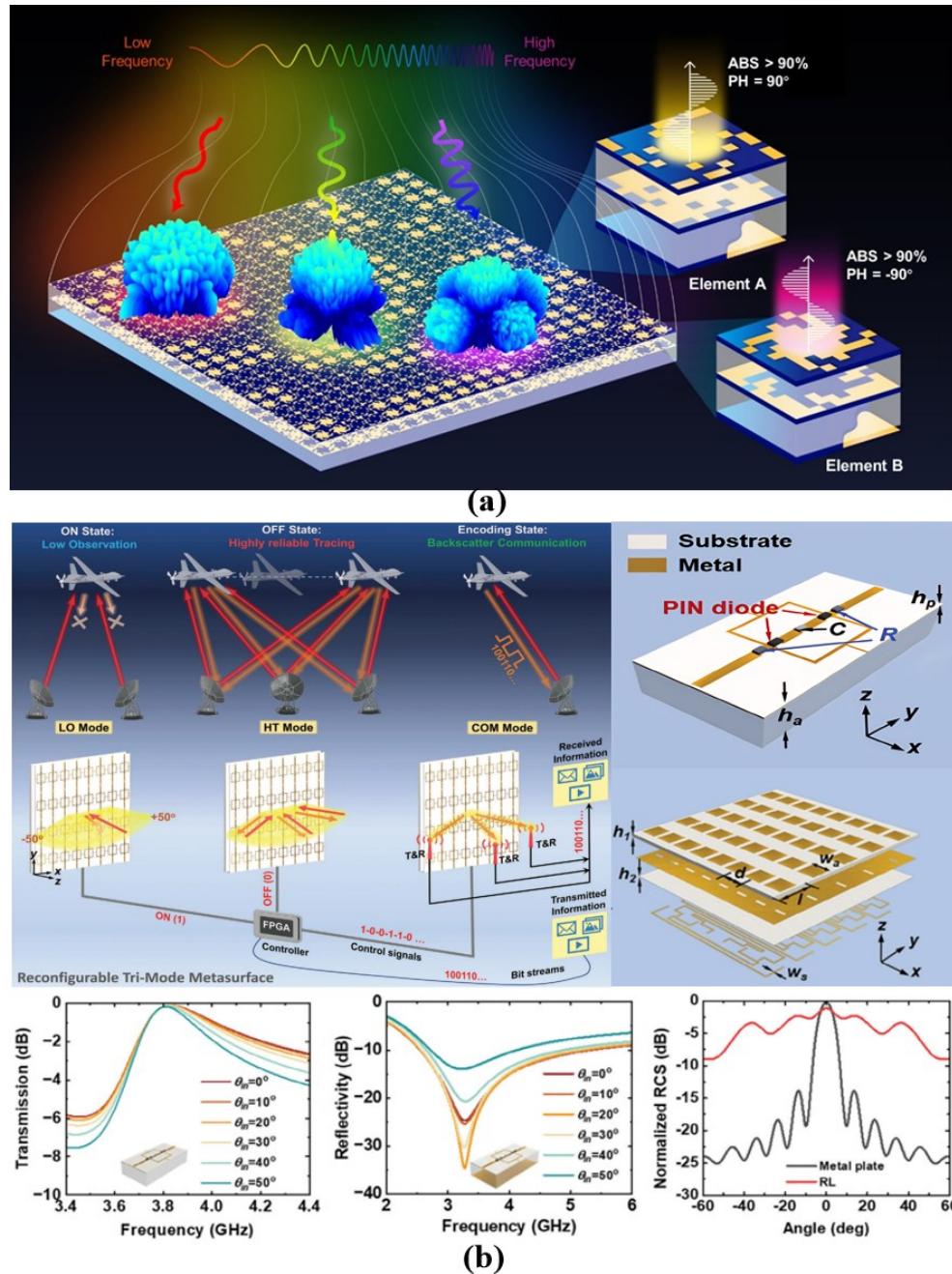


图8 (a)所提出的扩散-吸收混合超表面的概念说明反相吸收单元^[95]; (b)可重构三模式超表面的概念说明及其在无人机飞行任务中的潜在应用及所提出的超表面单元结构,仿真结果:当所有加载的PIN二极管都处于OFF状态时,该单元在不同入射角下的传输性能仿真,当所有加载的PIN二极管都处于ON状态时,该单元在不同入射角下的吸收性能,该单元与相等大小的金属板进行单站RCS比较图^[96]

Fig. 8 (a) Conceptual illustration of the proposed diffusion - absorption hybrid metasurfaces and anti-phase absorptive metasurface cell^[95]; (b) the conceptual illustration of the reconfigurable tri-mode metasurface and its potential application in UAV flight missions and proposed metasurface unit cell, the simulation results: the simulated transmission performance of the SRL meta-atom under different incident angles when all loaded PIN diodes are in the OFF state, the simulated absorption performance of the SRL meta-atom under different incident angles when all loaded PIN diodes are in the ON state, the simulated monostatic RCS of the designed RL compared to that of the metal plate with equal size^[96]

过目标识别改变光谱的变色龙智能伪装超表面系统示意图如图10(e)所示。该设计利用迁移学习识

别目标及环境变化,基于瑞利-索姆菲尔德理论分解图像,并通过集成变容二极管控制反射光谱,成

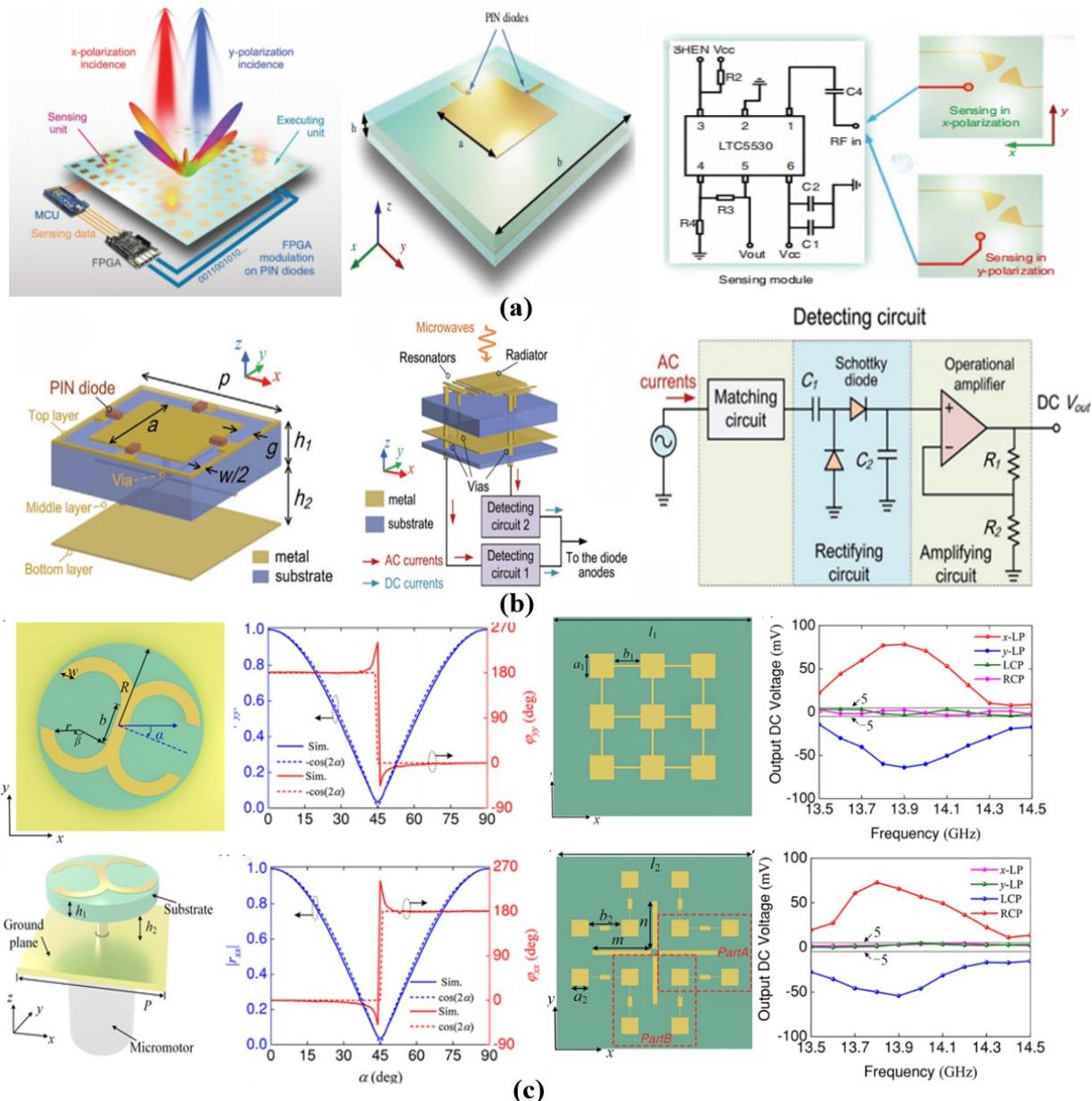


图9 (a)所提出的智能传感超表面的原理图,设计的用于感知和执行目标的数字编码元件,x和y极化传感单元的传感机制^[100];(b)吸收超表面单元、传感天线和以下检测电路的三维视图、在仿真的检测电路的原理图模型^[101];(c)超表面单元,反射系数 r_{xx} 和 r_{yy} 的幅值和相位作为参数 α 在14 GHz时的函数,入射极化检测的传感模块及测量的输出直流电压^[102]

Fig. 9 (a) The schematic of the presented smart sensing metasurface, the designed digital coding elements for sensing and executing targets, the sensing mechanism of the sensing unit for the x-polarization and y-polarization^[100]; (b) 3D view of the absorbing meta-atom, 3D view of the sensing antenna and the following detecting circuits, the schematic model of the detecting circuit simulated in ADS^[101]; (c) the proposed meta-atom, amplitude and phase of the reflected coefficient r_{xx} and r_{yy} as functions of parameter α at 14 GHz, Sensing module for the incident polarization detection, and measured output DC voltages^[102]

功合成了新的虚拟全息图,有望在智能电磁操作、伪装及无线通信中广泛应用。同年,浙江大学陈红胜团队构造了一套智能幻觉系统^[108],如图10(f)所示,集成探测器进行目标的探测识别,探测所得信息输入深度学习模块中可进行超表面的逆向设计,

最终使得输出电磁与所处环境电磁场相似,从而达到智能隐身。2024年,该团队提出了基于随机进化的海陆空智能自适应隐身系统^[109],如图10(g)所示,该系统以深度学习为超表面算法驱动,时空调制为超表面物理基础,搭建感知-决策-执行隐身

系统,使无人机隐身于不同背景环境,解决了有源超表面的调控有限、逆向设计存在非唯一解、神经网络输入不完整等难题。同年,崔铁军团队设计了一种可同时实现智能感知和波束赋形的智能超表面^[110],如图10(h)所示,无需外部传感器,其自身可作为功率检测器进行识别,并根据所识别信息改变超表面的编码矩阵实现自适应波束赋形。同年,哈尔滨工业大学陆振刚团队提出一种集成氧化钒图形于金属网格结构单元的智能超表面^[111],如图10(i)所示。该超表面控制图形相变实现不同电磁功能,同时与作为传感器的透明宽带微带天线集成,再结合功率传感和反馈控制模块构成闭环系统。

最终实现,自我感知环境电磁波功率,并自适应切换相应的电磁波功能,且在可见光-红外波段拥有80%以上的透光率。智能超表面通过集成识别和执行模块实现了自适应隐身,但多模块设计导致体积增加和设计难度加大。因此,未来的研究方向将集中于开发集识别与执行功能于一体的智能超表面,旨在实现更紧凑、高效的自适应隐身技术,以克服当前设计的局限性。

6 总结与展望

有源超表面可通过控制超表面上的有源器件实现对电磁波的幅值、相位、极化等参数的动态调控。其可通过实时调整自身电磁特性,以适应不同

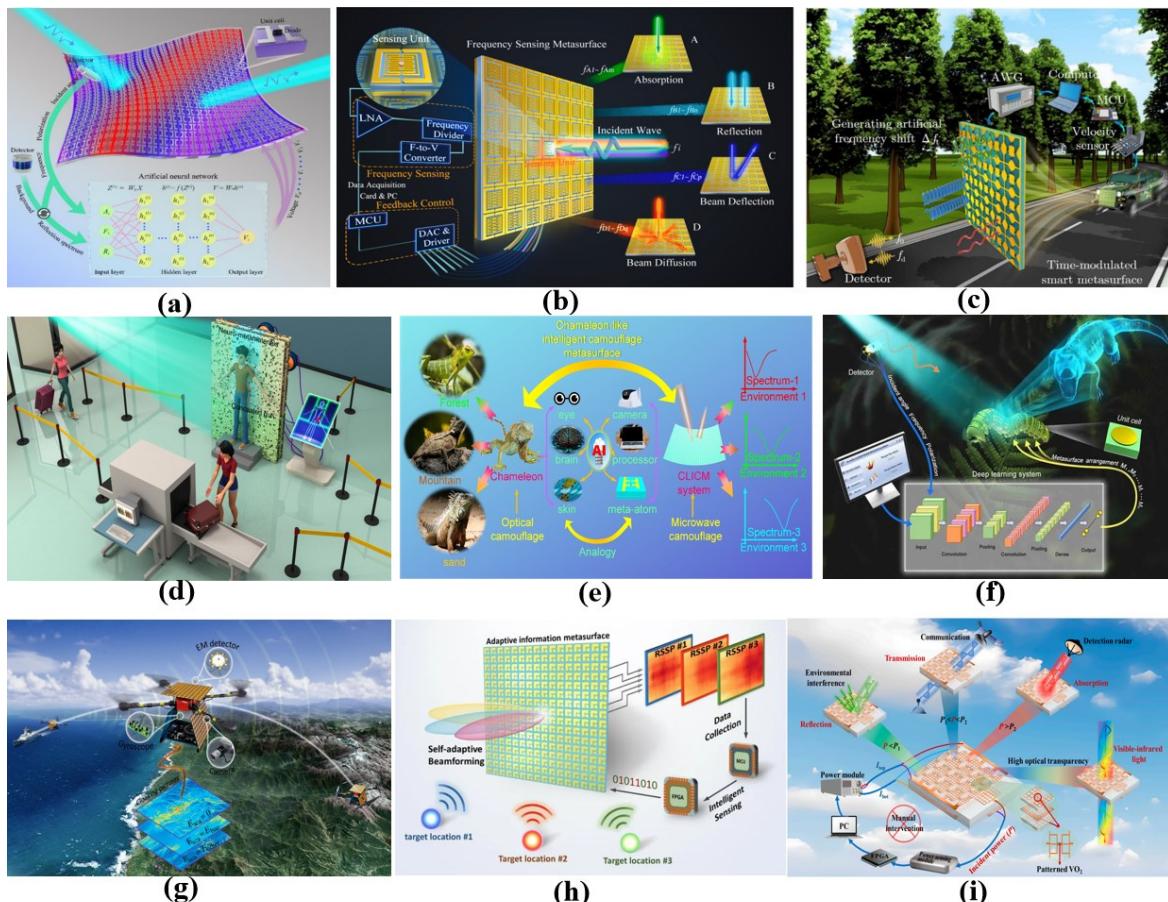


图10 (a)智能隐身示意图^[103];(b)电磁反射光谱自适应精确控制的频率自适应智能超表面示意图^[104];(c)智能多普勒斗篷的示意图^[105];(d)神经超表面在安全检查系统中的说明性应用^[106];(e)通过目标识别改变光谱的变色龙智能伪装超表面系统示意图^[107];(f)智能视错觉的全球超表面设计示意图^[108];(g)自主航空两栖隐形斗篷示意图^[109];(h)信息超表面的示意图^[110];(i)光学透明智能超表面示意图^[111]

Fig. 10 (a) Schematic diagram of intelligent stealth^[103]; (b) schematic of the frequency-adaptive intelligent metasurface for self-adaptively precise control of spatial EM reflection spectrum^[104]; (c) schematic of smart Doppler cloak^[105]; (d) illustrative usage of neuro-metamaterials in a security inspection system^[106]; (e) schematic diagram of chameleon-like intelligent camouflage metasurface system which can alter the spectra by target recognition^[107]; (f) schematic of the global metasurface design for intelligent optical illusion^[108]; (g) schematic of autonomous aeroamphibious invisibility cloak^[109]; (h) diagram illustration of the proposed information metasurface^[110]; (i) schematic diagram of optically transparent intelligent metasurface^[111]

的电磁战场环境,产生与周围环境相似的雷达特性,从而实现雷达智能隐身,并且具备小体积、高可调性、易集成等优势,在武器装备的雷达智能隐身领域具有极大应用前景。基于此,本文主要介绍了吸波动态可调超表面、散射动态可调超表面、吸-散一体动态可调超表面与智能隐身超表面当前研究现状与发展趋势。吸波动态可调超表面能高效吸收电磁波,减少反射,散射超表面则通过调控电磁波相位,实现散射场的灵活控制,而吸-散一体超表面则结合了两者的优势,既能实现电磁波的吸收,又能对电磁波进行散射调控。然而上述有源超表面虽具有较强的电磁调控能力,但是都需要人工操作调整,并且缺乏自主感知环境并调整的能力,这极大地限制了其实际应用。而新兴的智能隐身超表面能够实时感知所处环境变化,自主进行判断,借助机器学习等智能算法调整超表面的幅相分布,从而实现自适应隐身。然而,随着雷达探测识别技术的不断发展,有源超表面的雷达智能隐身性能也需要全方位提升,未来亟需在以下几个方向取得突破:

1. 高性能化:未来这些器件应具有更快的响应速度、更低的功耗和更高的可靠性,以实现对电磁波更精确的调控。高性能化不单单要对幅值、相位与极化等多性能同时独立调控,且对于宽带性能、极化不敏感性、入射角度稳定性等提出更高的要求。

2. 多功能化:未来超表面要兼具多功能为一体,不局限于单一的隐身功能,要集成更多功能,如探测、识别、执行和反馈等,从而形成一个智能化的系统。雷达隐身超表面的多功能化是未来发展重要趋势,将为实现更加智能化的隐身系统提供有利的技术支撑。

3. 智能化:随着人工智能技术的不断发展,将智能化设计技术应用于雷达隐身超表面中,可以实现更高效的电磁波调控。通过机器学习等智能算法,实现对有源超表面结构参数和幅相分布的快速优化设计,提升有源超表面的隐身性能。

4. 集成化:随着隐身超表面向着智能化方向发展,超表面的集成化则成了未来发展的重要趋势之一,集成化的发展可进一步提升其应用场景。将各类探测装置、决策装置集成在有源超表面中,有效提升设备小型化优势。

5. 柔性化:现有有源超表面局限于平面,无法

贴合于外形多样化的武器装备,有源超表面的柔性化性能提升成为重要发展趋势之一。超表面的柔性化有效拓宽应用领域,尤其在军事领域中,采用柔性材料能够适用于武器装备复杂曲面结构,实现共形隐身有源超表面。

6. 多频谱兼容化:在实现雷达智能隐身的同时,能够同时实现可见光、红外、激光等多频谱兼容隐身,有效拓宽应用场景。有源超表面的多频谱兼容在提升系统灵活性、拓宽应用领域、增强系统性能、推动技术创新以及应对复杂环境等方面具有重要意义。

总之,有源超表面具有可调性强、体积小、加工易等优势,在雷达智能隐身领域有应用前景和潜力。未来,随着有源超表面向着高性能化、智能化、多功能化、集成化等方向发展,有望在武器装备实现广泛应用,切实有效地提升武器装备的生存和突防能力。

References

- [1] Kim S H, Lee S Y, Zhang Y, et al. Carbon-based radar absorbing materials toward stealth technologies [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(32): 2303104.
- [2] Jiang J W, Wang Y Z. Metamaterial invisibility of a corner target with proportional integral active control [J]. *Mech. Mater.*, 2024, 189: 104883.
- [3] Preety N H, Mohsin A S M. Graphene metamaterial (GMM) based dual mode, tunable, and broadband THz absorber with triple circular split ring structure [J]. *Heliyon*, 2024, 10(18): 104883.
- [4] Verma A, Meena O P. Design and analysis of a compact ultrathin penta-band metamaterial absorber [J]. *Sādhanā*, 2023, 48(4): 285.
- [5] Ma H, Zhang W, Sun T, et al. High sensitivity and high figure of merit graphene mid-infrared multi-band tunable metamaterial perfect absorber [J]. *Surf. Interfaces*, 2024, 54: 105137.
- [6] Anzai H, Inoue S, Tokizane Y, et al. Triple-coupled normal mode splitting in Fabry-Pérot microcavity contained rectangular hole magnetic metamaterials in THz region [J]. *Photonics Nanostruct. Fundam. Appl.*, 2024, 62: 101313.
- [7] Hakim M L, Islam M T, Alam T, et al. Physical analysis of high refractive index metamaterial-based radiation aggregation engineering of planar dipole antenna for gain enhancement of mm-wave applications [J]. *Sci. Rep.*, 2024, 14(1): 22074.
- [8] Ma Y B. Design and application research of new metamaterial functional devices [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
(马岩冰.新型超材料功能器件设计与应用研究[D].成都:电子科技大学,2014.)
- [9] Hussein H, Atasoy F, Elwi T A. Miniaturized antenna array-based novel metamaterial technology for reconfigurable

- MIMO systems[J]. Sensors, 2023, 23(13): 5871.
- [10] Brunet T, Leng J, Mondain-monval o. Soft acoustic metamaterials[J]. Science, 2013, 342(5685): 323–324.
- [11] Sharma N, Singh H S, Khanna R, et al. Design a metamaterial based applicator for hyperthermia cancer treatment [J]. Biomed. Signal Process. Control, 2025, 99: 106826.
- [12] Qu S B, Wang J F, Ma H, et al. Metamaterial design and its application in stealth technology[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1–9.
(屈绍波, 王甲富, 马华, 等. 超材料设计及其在隐身技术中的应用)[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1–9.
- [13] Pang Y Q. Theoretical and design research on electromagnetic absorbing metamaterials [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
(庞永强. 电磁吸波超材料理论与设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013).
- [14] Jiang X, Liang B, Li R Q, et al. Ultra-broad band absorption by acoustic metamaterials [J]. Appl. Phys. Lett., 2014, 105: 243505.
- [15] Gatt R, Mizzi L, Azzopardi J I, et al. Hierarchical auxetic mechanical metamaterials[J]. Sci. Rep., 2015, 5: 8395.
- [16] Wang W H, Wang L, Wang L Y, et al. Research progress on absorbing metamaterials based on different material systems[J]. Rare Met Mater Eng, 2024, 53(3): 856–869.
(王文豪, 王龙, 汪刘应, 等. 基于不同材料体系的吸波超材料研究进展[J]. 稀有金属材料与工程), 2024, 53(03): 856–869.
- [17] Monticone F, Alù A. Metamaterial, plasmonic and nanophotonic devices [J]. Rep. Prog. Phys., 2017, 80 (3) : 036401.
- [18] Yin X, Zhu H, Guo H, et al. Hyperbolic metamaterial devices for wavefront manipulation [J]. Laser Photonics Rev., 2017, 13(1): 1800081.
- [19] Tan X, Gu W, Tao Z, et al. Carbon-based materials for radar-infrared compatible stealth technology [J]. Chem. Eng. J., 2025, 1(1): 160168.
- [20] Holloway C L, Dienstfrey A, Kuester E F, et al. A discussion on the interpretation and characterization of meta-films/metasurfaces: The two-dimensional equivalent of metamaterials[J]. Metamaterials, 2009. 3: 100–112
- [21] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Sov. Phys. Usp., 1968, 10(4): 509–514.
- [22] Pendry J B, Holden A, Stewart W, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Phys. Rev. Lett., 1996, 76(25): 4773.
- [23] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 1999. 47: 2075–2084
- [24] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77–79.
- [25] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. Science, 2006, 314(5801): 977–980.
- [26] Yang Y, Zhang B, Li E, et al. Towards omnidirectional, large scale, full polarization, and broadband practical invisibility cloaks: challenges and progress [J]. EPJ Appl. Metamater., 2014, 1: 7.
- [27] Wang Y, Peng M, Cheng W, et al. Controllable multi-trap optical tweezers based on low-loss optical phase transition and superlenses[J]. Acta Phys. Sin., 2023, 72(2): 292–303.
(王焱, 彭妙, 程伟, 等. 基于低损光学相变和超透镜的可控多阱光镊[J]. 物理学报), 2023, 72(02): 292–303.
- [28] Zhou X, Ding F, Cheng H, et al. Wideband water-based switchable metasurface absorber/reflector [J]. Opt. Commun., 2024, 573: 130983.
- [29] Wang C L, Bai S, Zhao P Y, et al. Metasurface-assisted low-frequency performance enhancement of ultra-broadband honeycomb absorber based on carbon nanotubes [J]. Nano Res., 2024, 17(9): 8542–8551.
- [30] Holloway C. L, Kuester E F, Gordon J, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. IEEE Antennas Propag. Mag., 2012, 54(2): 10–35.
- [31] Zhao Y, Liu X, Alù A. Recent advances on optical metasurfaces[J]. J. Opt., 2014, 16(12): 123001.
- [32] Luo X. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces [J]. Sci. China Phys. Mech. Astron., 2015, 58(9): 1–18.
- [33] Walia S, Shah C M, Gurturk P, et al. Flexible metasurfaces and metamaterials: A review of materials and fabrication processes at micro- and nano-scales [J]. Appl. Phys. Rev., 2015, 2: 011303.
- [34] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, et al. Metasurfaces: From microwaves to visible[J]. Phys. Rep., 2016, 634(24): 1–72.
- [35] Zhang L, Mei S, Huang K, et al. Advances in full control of electromagnetic waves with metasurfaces [J]. Adv. Opt. Mater., 2016, 4(6): 818–833.
- [36] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: Physics and applications[J]. Rep. Prog. Phys., 2016, 79 (7): 076401.
- [37] Al-Naib I, Withayachumankul W. Recent progress in terahertz metasurfaces [J]. J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 2017, 38(9): 1067–1084.
- [38] Hsiao H H, Chu C H, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces [J]. Small Methods, 2017, 1(4) : 1600064.
- [39] Ding F, Pors A, Bozhevolnyi S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications [J]. Rep. Prog. Phys., 2018, 81: 026401.
- [40] Sun S, He Q, Hao J, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications [J]. Adv. Opt. Photon., 2019, 11(2): 380.
- [41] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333–337.
- [42] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces [J]. Nano Lett., 2012, 12(9): 4932–4936.
- [43] Sun S, He Q, Xiao S, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. Nat. Mater., 2012, 11(5): 426–431.
- [44] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface

- [J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4: 2808.
- [45] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: Tailoring wave fronts with reflectionless sheets [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110(19): 197401.
- [46] Akselrod G M, Huang J, Hoang T B, et al. Large-area metasurface perfect absorbers from visible to near-infrared [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27: 8028–8034.
- [47] Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion [J]. *Nano Lett.*, 2017, 17(3): 1819–1824.
- [48] Sun S, Yang K-Y, Wang C-M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces [J]. *Nano Lett.*, 2012, 12: 6223–6229.
- [49] Della Giovampaola C, Engheta N. Digital metamaterials [J]. *Nat. Mater.*, 2014, 13(12): 1115–1121.
- [50] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light Sci. Appl.*, 2014, 3(10): e218.
- [51] Zhang L, Chen X, Liu S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9: 4334.
- [52] Dai J, Zhao J, Cheng Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a timedomain digital coding metasurface [J]. *Light Sci. Appl.*, 2018, 7: 90.
- [53] Wang J W, Li K, Cheng M, et al. Research progress and applications of dynamically tunable metasurfaces [J]. *Opto-Electron Eng.*, 2023, 50(8): 64–85.
(王家伟, 李珂, 成茗, 等. 动态可调谐超表面的研究进展与应用 [J]. 光电工程), 2023, 50(08): 64–85.
- [54] Zhang S Z. Research on orbital angular momentum multiplexed beam generation based on space-time-modulated metasurfaces [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
(张思哲. 基于时空调制超表面的轨道角动量综合复用波束生成研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2023).
- [55] Huang S Q, Liu C, Chen H, et al. Reflective ground clutter simulator based on space-time-coding metasurface [C]// Chinese Institute of Electronics. Proceedings of the 18th National Conference on Radio Wave Propagation. Nanjing: Institute of Electromagnetic Space Science and Technology, Southeast University; State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, 2023: 5.
(黄思齐, 刘彻, 陈晖, 等. 基于时空编码超表面的反射式地杂波模拟器 [C]// 中国电子学会. 第十八届全国电波传播年会论文集. 东南大学电磁空间科学与技术研究院; 东南大学毫米波全国重点实验室, 2023: 5).
- [56] Luo Z, Long J, Chen X, et al. Electrically tunable metasurface absorber based on dissipating behavior of embedded varactors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(7).
- [57] Ma Q, Bai G D, Jing H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions [J]. *Light Sci. Appl.*, 2019, 8(1): 98.
- [58] Luo Z, Wang Q, Zhang X G, et al. Intensity-dependent metasurface with digitally reconfigurable distribution of nonlinearity [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(19): 1900792.
- [59] He Q T. Electromagnetic regulation mechanism and design method of low-RCS metasurface [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
(何清婷. 低 RCS 超表面电磁调控机理及设计方法 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024).
- [60] Shi P F, Ma X Y, Xiang C, et al. Topology optimization design of metasurface with dual-channel retro-reflection and specular reflection of controllable amplitude [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2023, 72(24): 211–219.
(史鹏飞, 马馨莹, 向川, 等. 幅值可控的逆反射和镜像反射双通道超表面结构拓扑优化设计 [J]. 物理学报), 2023, 72(24): 211–219.
- [61] He Q Q. Digital Huygens metasurfaces and their applications [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023.
(何庆奇. 数字化惠更斯超表面及其应用 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2023).
- [62] Zhang Z Y. Design and application of broadband polarization-converting metasurface [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
(张子育. 宽带极化转换超表面设计及其应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023).
- [63] Zhang N L. Optimal design of broadband coded acoustic metasurface [D]. Qingdao: Qingdao University, 2023.
(张娜莉. 宽带编码声学超构表面的优化设计 [D]. 青岛: 青岛大学, 2023).
- [64] Li Y, Lin J, Guo H, et al. A tunable metasurface with switchable functionalities: from perfect transparency to perfect absorption [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(6): 1901548.
- [65] Wang J, Zhao Y, Yang R. A function-switchable broadband absorber/polarization converter based on an active metasurface [C]// 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMWT). IEEE, 2020: 1–3.
- [66] Wang H L, Ma H F, Chen M, et al. A reconfigurable multifunctional metasurface for full-space control of electromagnetic waves [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(25): 2100275.
- [67] Lee D, Jeong H, Lim S. Electronically switchable broadband metamaterial absorber [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1): 4891.
- [68] Fang J, Huang J, Gou Y, et al. Research on broadband tunable metamaterial absorber based on PIN diode [J]. *Optik*, 2020, 200: 163171.
- [69] Zhang Y, Miao L, Guo S, et al. A broadband tunable frequency selective surface absorber for oblique incidence applications [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, 53(5): 055105.
- [70] Sahu D, Panwar R. Design strategy for graphene metasurface wideband tunable THz absorber [C]// 2021 International Conference on Control, Automation, Power and Signal Processing (CAPS). IEEE, 2021: 1–3.
- [71] Feng K S, Li N, Li T. Ultra-thin ultra-wideband tunable radar absorber based on hybrid integration of active devices [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2022, 71(3): 113–120.
(冯奎胜, 李娜, 李桐. 有源器件混合集成的超薄超宽带可调雷达吸波体 [J]. 物理学报), 2022, 71(03): 113–120.
- [72] Ma Z Y P, Jiang C, Liu Y Q, et al. Double-layer metasurface complementary-enhanced wideband wide-angle composite absorber [J]. *Acta Electron. Sin.*, 2024, 52(8):

- 2668–2678.
(麻哲义培,姜超,刘妍琼,等.双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体[J].电子学报),2024,52(08):2668–2678.
- [73] Pitilakis A, Seckel M, Tasolamprou A C, et al. Multifunctional metasurface architecture for amplitude, polarization and wave-front control [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2022, 17 (6): 064060.
- [74] Liu Y, Bai A, Qiu Y, et al. A dual-path generative adversarial network-based inverse design method for broadband RCS reduction metasurface element patterns [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2024, 182: 108466.
- [75] Alahmed Albasry F, Ozturk G, Hasar U C, et al. Ultra-thin metasurface polarization converter with linear and circular polarization features for RCS applications [J]. *Arab. J. Sci. Eng.*, 2024: 1–11.
- [76] Zhang T, Ren J, Yang Y, et al. Ultra-wideband low-RCS and gain enhanced phase gradient metasurface-based antenna using characteristic mode analysis [J]. *AEU–Int. J. Electron. Commun.*, 2024: 155370.
- [77] Zhang X G, Yu Q, Jiang W X, et al. Polarization-controlled dual-programmable metasurfaces [J]. *Adv. Sci.*, 2020, 7(11): 1903382.
- [78] Wang J R, Zhang Y J, Tong M S. A broadband metasurface with voltage-controlled transmission Phase [C]//2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC–URSI Radio Science Meeting (APS/URSI). IEEE, 2021: 1229–1230.
- [79] Qin H M. Research and design of active metasurface antenna based on phase control [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2023.
(秦红梅.基于相位调控的有源超表面天线研究与设计 [D].柳州:桂林电子科技大学,2023).
- [80] Araghi A, Khalily M, Safaei M, et al. Reconfigurable intelligent surface (RIS) in the sub-6 GHz band: Design, implementation, and real-world demonstration [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 2646–2655.
- [81] Ahmed F, Hassan T, Melouki N, et al. A multi-bit and frequency-reconfigurable reflecting surface for RIS applications [J]. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2023, 23 (2): 653–657.
- [82] Liu T, Meng Y, Ma H, et al. Generating diverse functionalities simultaneously and independently for arbitrary linear polarized illumination enabled by a chiral transmission-reflection-selective bifunctional metasurface [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(5): 7124–7136.
- [83] Zhao S, Pang X, Men W, et al. Wideband dual-polarized programmable metasurface for tunable RCS reduction [C]// 2023 3rd International Conference on Frontiers of Electronics, Information and Computation Technologies (IC-FEICT). IEEE, 2023: 414–418.
- [84] Cao W W, Zhang J W, Wu L J, et al. A dual-polarized 1-bit phase-controlled intelligent metasurface [J]. *Radio Commun Technol*, 2024, 50(2): 381–385.
(曹婉婉,张俊伟,吴利杰,等.一种双极化1-bit相位调控智能超表面[J].无线电通信技术),2024, 50(02): 381–385.
- [85] Liu W, Dai J Y, Zhang Y M, et al. Wideband polarization-insensitive 1-bit phase manipulations with co-and cross-polarized conversions for LP and CP waves [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024: 2400049.
- [86] Liu T, Meng Y, Wang J, et al. Six-channel programmable coding metasurface simultaneously for orthogonal circular and linear polarizations [J]. *Photonics Res.*, 2023, 11(6): 1047–1056.
- [87] Liu T, Li W, Meng Y, et al. Six-mode orbital angular momentum generator enabled by helicity-assisted full-space metasurface with flexible manipulation of phase, polarization, and spatial information [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(8): 2102638.
- [88] Balcı O, Kakenov N, Karademir E, et al. Electrically switchable metadevices via graphene [J]. *Sci. Adv.*, 2018, 4(1): eaao1749.
- [89] Meng C, Thrane P C V, Ding F, et al. Dynamic piezoelectric MEMS-based optical metasurfaces [J]. *Sci. Adv.*, 2021, 7(26): eabg5639.
- [90] Yuan F, Mao R Q, Gao M, et al. Metasurface design for absorption–cancellation RCS reduction with amplitude–phase coherence [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2022, 71 (8): 96–105.
(袁方,毛瑞祺,高冕,等.幅相同调的吸波-对消雷达散射截面缩减超表面设计[J].物理学报),2022, 71(08): 96–105.
- [91] Wang H L, Zhang Y K, Zhang T Y, et al. Broadband and programmable amplitude–phase–joint–coding information metasurface [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14 (25): 29431–29440.
- [92] Wang Y J, Fu Y F, Zhou F K, et al. A broadband RCS-reduction metasurface with integrated absorption and diffusion [C]// Chinese Institute of Electronics. Proceedings of 2021 National Microwave & Millimeter-Wave Conference (Vol. 2). Nanjing: School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, 2021: 3.
(王颖杰,傅宇峰,周方坤,等.一种吸散一体的宽带雷达散射截面缩减超表面设计[C]//中国电子学会.2021年全国微波毫米波会议论文集(下册).南京:南京大学电子科学与工程学院,2021:3).
- [93] Chen T Y. Design of amplitude–phase modulated metasurface and its application in antenna radiation control [D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
(陈天一.幅相调制超表面设计及其在天线辐射调控中的应用[D].南京:东南大学,2023).
- [94] Liu T, Meng Y, Wang J, et al. Dual-channel surface waves directional radiation with customizable intensity and switchable pattern [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(30): 37026–37037.
- [95] Song Z, Zhang R, Min P, et al. Inverse design of diffusion–absorption hybrid metasurfaces [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(11): 2300280.
- [96] Ning J, Zheng Y, Wang S, et al. Reconfigurable tri-mode metasurface for broadband low observation, wide-range tracing, and backscatter communication [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(15): 2304879.
- [97] Wang H L, Zhang Y K, Zhang T Y, et al. Broadband and programmable amplitude–phase–joint–coding information metasurface [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14 (25): 29431–29440.
- [98] Li H P, Wang G M, Liang J G, et al. Main- and side-

- lobe control of antennas using amplitude-phase-coherent metasurface [C]// Chinese Institute of Electronics. Proceedings of 2017 National Antenna Annual Conference (Vol. 1). Xi'an: Air & Missile Defense College, Air Force Engineering University, 2017: 3.
(李海鹏,王光明,梁建刚,等.基于幅相同时调超表面的天线主副瓣控制研究[C]//中国电子学会.2017年全国天线年会论文集(上册).空军工程大学防空反导学院,2017:3.)
- [99] Liu L, Zhang X, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(29): 5031–5036.
- [100] Ma Q, Hong Q R, Gao X X, et al. Smart sensing metasurface with self-defined functions in dual polarizations [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3271–3278.
- [101] Luo Z, Ren X, Zhou L, et al. A high-performance nonlinear metasurface for spatial-wave absorption [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(16): 2109544.
- [102] Li X, Xu R, Sun X, et al. Broadband intelligent programmable metasurface with polarization-modulated self-adaptive electromagnetic functionality switching [J]. *Photonics Res.*, 2024, 12(7): 1395–1409.
- [103] Qian C. Experimental study of intelligent electromagnetic invisibility cloaking and superscattering [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
(钱超.智能电磁隐身和超散射的实验研究[D].杭州:浙江大学,2020.)
- [104] Wang H P, Li Y B, Li H, et al. Intelligent metasurface with frequency recognition for adaptive manipulation of electromagnetic wave [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(7): 1401–1411.
- [105] Zhang X G, Sun Y L, Yu Q, et al. Smart doppler cloak operating in broad band and full polarizations [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(17): 2007966.
- [106] Qian C, Wang Z, Qian H, et al. Dynamic recognition and mirage using neuro-metamaterials [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 2694.
- [107] Zhu R, Wang J, Sui S, et al. Chameleon-like intelligent camouflage metasurface [J]. *Mater. Des.*, 2023, 235: 112422.
- [108] Jia Y, Qian C, Fan Z, et al. In situ customized illusion enabled by global metasurface reconstruction [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(19): 2109331.
- [109] Qian C, Jia Y, Wang Z, et al. Autonomous aeroamphibious invisibility cloak with stochastic-evolution learning [J]. *Adv. Photonics*, 2024, 6(1): 016001.
- [110] Jiang R Z, Ma Q, Gu Z, et al. Simultaneously intelligent sensing and beamforming based on an adaptive information metasurface [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(7): 2306181.
- [111] Xia C, Lu Z, Zhang Y, et al. Broadband High Optical Transparent Intelligent Metasurface for Adaptive Electromagnetic Wave Manipulation [J]. *Research*, 2024, 7: 0334.