

特邀文章

能信协同超材料理论及关键技术*

李 龙 马向进 韩家奇 张 松 王 鑫 刘海霞

(西安电子科技大学 超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室, 西安 710071)

摘 要: 能信协同超材料(Collaborative Power and Information Metamaterials, CPIM)是将电磁超材料与无线能量传输(Wireless Power Transfer, WPT)、无线能量收集(Wireless Energy Harvesting, WEH)和无线信息传输(Wireless Information Transfer, WIT)有机融合的前沿领域,旨在实现能量与信息的高效协同传输和控制。CPIM 器件凭借其灵活调控电磁波的能力和低成本、低能耗、轻量化的优点可以有效解决大量低功耗设备的供能问题,同时保证高质量的通信传输。将能量与信息的多重功能融合于可操控的超材料器件中,以实现更紧凑、高效的能信协同传输效应。针对 CPIM 的工作基本原理和广泛实用性的应用场景,文章围绕 WPT、WEH、WIT 三大核心部分进行深入讨论和分析,并阐述了 CPIM 器件的工作原理和设计方法。最后给出了 CPIM 在未来的潜在研究和应用方向。文章旨在为研究人员提供基于超材料的能信协同传输技术的趋势和应用分析,推动无线通信和能源系统向更高效、智能化的方向发展。

关键词: 能信协同, 超材料, 无线能量传输, 无线能量收集, 无线信息传输

Theory and Key Techniques of Collaborative Power and Information Metamaterials (CPIM)

LI Long, MA Xiang-jin, HAN Jia-qi, ZHANG Song, WANG Xin, LIU Hai-xia

(Key Laboratory of High-Speed Circuit Design and EMC, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Collaborative Power and Information Metamaterials (CPIM) is a cutting-edge field integrating electromagnetic metamaterials with Wireless Power Transfer (WPT), Wireless Energy Harvesting (WEH), and Wireless Information Transfer (WIT), aiming to achieve efficient collaborative transmission and control of energy and information. CPIM devices, with their ability to flexibly regulate electromagnetic waves and the advantages of low cost, low energy consumption, and low weight, can effectively solve the power supply problem of a large number of low-power devices while ensuring high-quality communication transmission. Integrating the multiple functions of energy and information into controllable metamaterial devices to achieve a more compact and efficient synergistic effect of power and information transmission. This article focuses on the basic principles and practical application scenarios of CPIM and conducts in-depth discussions and analysis around the three core parts of WPT, WEH, and WIT. It also elucidates the working principles and design methods of CPIM devices. Finally, potential future research and application directions of CPIM are provided. This review aims to provide researchers with insights into the trends and applications of metamaterial-based energy and information collaboration transmission technology, promote the development of wireless communications and energy systems towards more efficient and intelligent directions.

Key words: collaborative power and information, metamaterial, wireless power transfer, wireless energy harvesting, wireless information transfer

引 言

随着信息时代的快速发展,越来越多的无线智能设备(例如低功耗传感器网络、执行器和小型计算设备等)服务于人们的生活,但是同时也面临着

为这些设备提供能源供应以及可持续使用的难题。因此,通信界提出并全面讨论了能信协同(Collaborative Power and Information, CPI)的概念^[1-3]。实现 CPI 的核心技术主要包含无线能量传输(WPT)、无线能量采集(WEH)以及无线通信技术(WIT)。

* 收稿日期: 2023-09-09

基金项目: 国家自然科学基金信息超材料基础科学中心(62288101); 国家重点研发计划(2021YFA1401001); 陕西省重点研发计划(2021TD-07)

WPT 技术最早由尼古拉·特斯拉提出,由于其潜在的应用价值,被《技术评论》杂志评选为未来将给人类生产和生活方式带来重大变化的十大科学研究方向之一。目前 WPT 主要采用谐振式^[4]、微波和激光^[5]方式,其中微波无线能量传输(MWPT)相对于其他两种方式具有传输距离远、高功率和不易受环境的影响等优点。因此,采用 MWPT 方法是目前构建 SWIPT 网络的主要手段。值得注意的是,当采用 MWPT 时,与非辐射型 WPT 不同,应用接收设备来获取能量,并将射频功率转换为直流功率,这是通过 WEH 技术实现的^[6]。WEH 主要包括接收天线和后端整流电路,将涉及空间匹配的综合设计,使接收到的功率最大化^[7]。可以清楚地看到,现有的 WPT 和 WEH 技术主要采用典型的射频(RF)和天线微波技术。虽然同样以电磁波为载体的 WIT 历经几代发展在速率和容量方面取得了较大突破,但仍需要探索可与电磁能量相集成的新型通信方式。

电磁超材料作为由亚波长尺寸组成的人工微结构,具有自然界物质所不具备的电磁特性,可以采用灵活的方式调控电磁波,为观察物理世界提供了一种新的视角^[8]。WPT 和 WEH 领域的研究人员利用电磁超材料小尺寸、易集成和设计简单的优点来提高无线能量传输效率^[9]。东南大学崔铁军院士团队提出用数字编码来表征超材料的新思想,实现了第一个现场可编程超材料,创建了信息超材料新体系,可同时对电磁波和数字信息进行实时操控^[10-12]。西安电子科技大学李龙教授团队提出了一种基于 2-bit 可编程超表面的自适应智能 WPT 系统,该 WPT 系统可以在目标移动的情况下自适应地向接收机传输无线功率^[13]。在新一代的 WIT 系统中,当将空时编码(STC)技术应用于可编程超表面时,允许人们在不使用传统通信系统架构的情况下直接调制数字信号^[14-15]。WIT 领域进一步扩展了利用可编程超表面以改进通信信道。在这种应用场景下,可编程超表面被称为可重构智能表面(RIS)^[16]。此外,李龙教授团队提出基于电磁超材料的涡旋波通信系统^[17],为高速率无线通信提供可行的解决方案的同时,还具备干扰抑制强和安全通信的功能。

本文将阐述 CPI、WPT、WEH、WIT、超材料的概念和关系,提出能信协同超材料(CPIM)的新型架构和策略,介绍基于超材料的 WPT、WEH 以及 WIT 的硬件设计,并给出 CPIM 的系统策略。本文旨在为能信协同超材料研究奠定理论基础,并为未来 6G 无线通信万物智联系统提供关键技术支撑。

1 CPIM 策略

在通信领域中,根据 WPT 与 WIT 的结合方式,可以分为以下几种系统架构:同时无线信息和功率传输系统、无线供电通信系统、无线供电中继系统、无线供电反向散射通信系统等^[18]。从接收端的能量和信息处理考虑,能信协同系统可以采用时间切换、功率分裂以及天线切换等方案进行信息和能量的分离。本文针对物理层的 CPIM 实现,提出电磁视角下的 CPIM 系统。能信协同超材料的基本技术路径如图 1 所示。

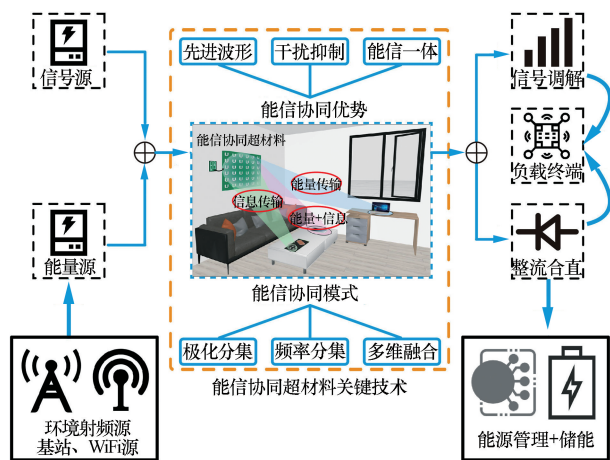


图1 能信协同超材料基本技术路径

1.1 基于频率分集的CPIM 系统

基于频率分集的 CPIM 系统需要发射阵列在共口径下工作于不同频率。超表面将有助于频率分集的 CPIM 系统的产生和应用。西安电子科技大学李龙教授团队提出了独立工作在 Ka 和 Ku 频段的反射型超表面^[19]如图 2 所示,通过频率选择表面来解除双频段之间的耦合,在 Ku 波段和 Ka 波段分别产生多波束多极化的高增益波束。利用不同频率下的物理信道进行能量与信息的独立同时传输。

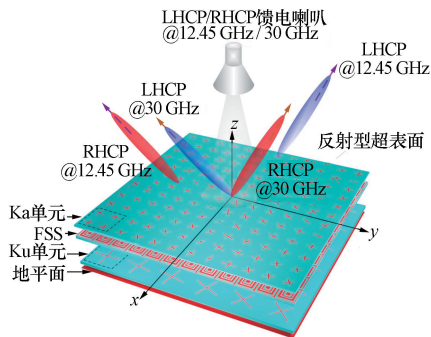


图2 双频分集反射型超表面

1.2 基于极化分集的CPIM 系统

为了抑制信息和能量之间的干扰,基于极化分

集的思想,2023 年朱利豪等人提出了一种新型的共口径双线极化 2-bit 可编程超表面结构^[20]。如图 3 所示,两个正交放置的偶极子,每个偶极子配备有两个 PIN 二极管和寄生贴片,用于实现各自极化方向上的 2-bit 相移。交叉结构被引入到元件中以确保高的交叉极化辨别(XPD)。通过分析+45°偏振入射下的反射系数和 XPD,实验表明图 3 所示的超材料单元最大插入损耗小于 2.5 dB,并且单元四种状态下的 XPD 都在 54 dB 以上。电磁响应验证了该结构是具有高效率和小串扰的双线极化超表面的优秀备选方案。为了进一步减少超表面的整体装置的剖面 and 增加超表面的集成度,光学中的全息原理被用于和超表面相结合来设计全息超表面。该超表面通过表面阻抗分布来调控表面波从而产生期望的漏波辐射。韩家奇等人将编码思想运用到全息超表面的设计中,设计的编码阻抗调制表面可产生双线极化或者双圆极化高增益波束^[21],如图 4 所示。该编码阻抗超表面结合了标量全息超表面和张量全息超表面的优点,具有设计简单和精确波束控制的优点,将应用于不同的 MWPT 中。

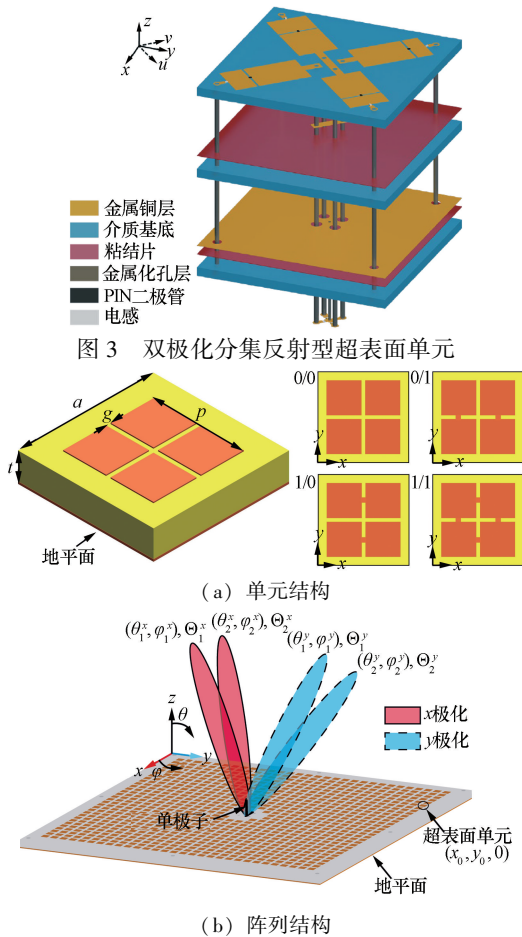


图 4 双极化分集全息超表面

1.3 多维度调控的CPIM 系统

为了进一步拓展超表面的功能和复用能力,越来越多的研究聚焦于单一设备在不同维度下的复用特性。如图 5 所示,刘光耀等人提出了一款具有多功能的频域-空间域可重构超表面^[22]。在频域中,通过调节两个 PIN 二极管的状态,所提出可重构超表面具有极化选择、频率可重构极化转换和极化可重构三种主要的功能。

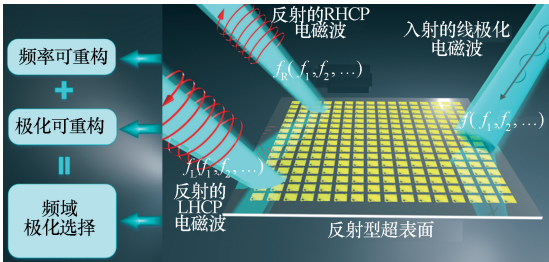


图 5 频域-空间域可重构超表面的调制策略

2 基于超材料/超表面的WPT

在天线近场的微波无线能量传输中,其目标大多位于天线的辐射近场区(菲涅尔区)。能量聚焦的方式因可以显著提高特定区域的场强,提高 WPT 的效率而被广泛研究。例如,文献[23]设计了一款反射型超表面(如图 6 所示)用于在菲涅尔区域产生能量聚焦,并分析了单馈源单焦点、单馈源双焦点、双馈源单焦点和双馈源双焦点四种情况下的能量聚焦效率,结果表明基于超表面的能量聚焦系统具有较高的传输效率(达到 70%)。该工作同时也分析了采用超表面产生能量聚焦的优势,相对于其他设备具有低成本、低剖面、设计简单和操作简单的优点,更有利于近场 MWPT。

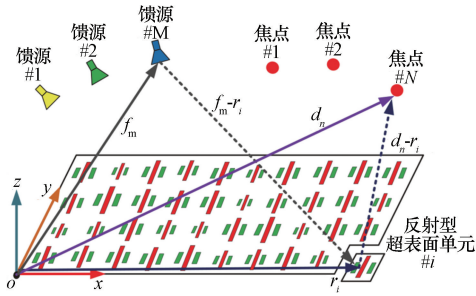


图 6 多馈源多聚焦 WPT 系统反射超表面

根据无线能量和信息自适应、智能化传输的需求,西安电子科技大学韩家奇等人提出了采用 2-bit 可编程超表面实现自适应智能无线能量传输系统^[13],如图 7 所示。该系统可根据充电目标的位置,实时改变能量聚焦位置,并可根据不同的功率需

求,为多目标提供不同功率比的能量。引入感知模块和算法后,该超表面可实现输出能量的智能控制和安全传输。该工作首次在自适应微波动态无线能量传输方面做了积极的尝试。

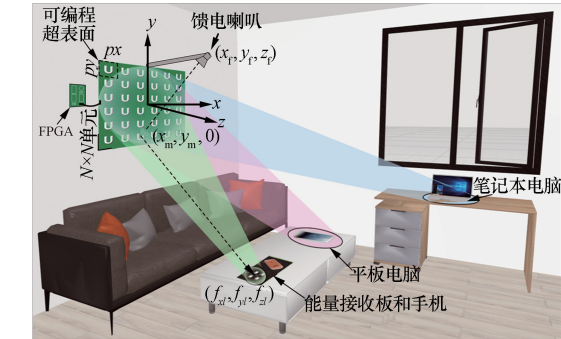


图 7 基于可编程超表面的自适应的智能近场充电系统

为了抑制微波在近场无线能量传输中的发散,提出无衍射波束用于近场 MWPT。无衍射波束是指波束在传播过程中波束宽度不发生展宽,能量不发生扩散。但是真正意义上的无衍射波束因为物理尺寸的限制无法在物理上实现,所以采用相似的设计思路和有限的天线孔径用于产生准无衍射波束。如图 8 所示,通过设计一个透射型超表面产生微波频段中的贝塞尔波束^[24]。由于贝塞尔波束的无衍射特性、自愈特性使其可被用于多目标无线能量传输。另一种被广泛研究的无衍射波束是 Airy 波束,它相对于贝塞尔波束来说不但具有无衍射和自愈的特性还具有独特的自加速特性,这表明 Airy 波束的轨迹是弯曲的,可以主动绕开障碍物用于无线能量传输^[25]。

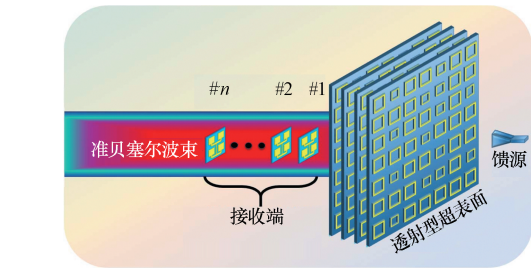


图 8 基于准贝塞尔光束的透射超表面多目标 WPT 系统

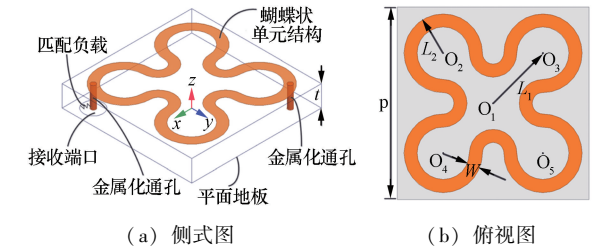
3 基于超材料/超表面的 WEH

3.1 接收超表面

用于无线能量收集 (WEH) 的装置无论是在近场还是在远场都需要精心的设计,以高效捕获和接收更多的射频能量。由于发射端和接收端之间空间环境因素以及空间来波的不确定性,需要所设计的能量接收端具有极化不敏感以及大角度接收特性,同时接收端还需要具有平面化、小型化和低剖面的特性。由亚

波长尺寸的单元组成的超表面被设计成能量接收端,可以同时满足上述能量接收端的要求。对于环境能量收集,由于空间微波频段的多样性,要求基于超表面的环境能量接收端除了满足上述接收端的要求,还需要具有宽频带、多频段和宽波束等特性。

图 9 所示为一种三频段、宽角度和极化不敏感的蝴蝶状接收超表面单元^[26],用于接收环境能量,其超表面阵列由 7×7 个单元组成,通过实验可以得到不同极化/不同角度的入射波在 0.9 GHz、2.6 GHz 和 5.7 GHz 时的能量收集效率分别为 90%、83% 和 81%。



性,且具有设计简单、更易于与其他系统进行集成的优点,更适合于智慧城市的大规模部署。由于超表面操纵电磁波的强大能力,多样的波形也将被用于无线通信。携带有轨道角动量的涡旋电磁波(OAM)是一种非平面波的传播方式且具有螺旋状的等相位面,这种潜在的技术为提高通信容量和频谱利用率提供了新的方向。超表面也可以用于基于 OAM 通信的接收解调,如图 11,超表面被用于发射和接收混合模态的 OAM 波束,并且实验结果表明混合模态的 OAM 波束可以被接收超表面解调为纯模态,为信息接收和解调提供了新的方式^[28]。

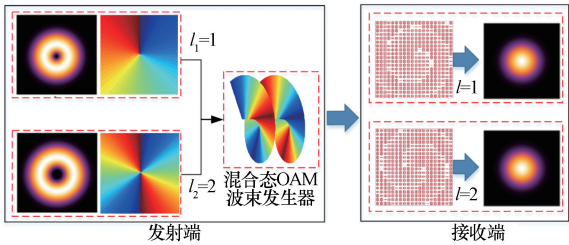


图 11 接收混合态 OAM 波束示意图

可编程超表面的快速发展也为 WIT 开创了新的模式和架构^[11-12]。如图 12 所示,王鑫等人设计了一款基于放大器的传输型空时编码超表面来实现电磁波的非线性、非互易控制^[29]。结果表明所提出的超表面可以实现谐波在空间和强度的灵活调控,提升传输信号的覆盖范围和电平。

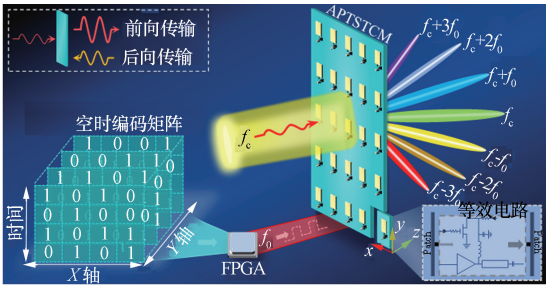


图 12 非线性、非互易透射型时空编码超表面

5 应用与展望

前文描述了使用先进的 CPIM 系统的新策略,包括整体解决方案、WPT 策略、WEH 超表面以及基于超材料的 WIT 实现方案。当将 WPT、WEH 以及 WIT 和超材料适当地统一融合时,即可实现一个可行的能信同传解决方案,助力自可持续 6G 网络的形成。现阶段能信同传的方案在具体的应用场景中还没得到有效的推广和落地。因此,在本节,根据现有的通信场景,提出并讨论 CPIM 系统未来的研究

方向。

5.1 无线能量与信息一体化系统

将本文提出的 WPT 和 WEH 技术相融合应用于全双工超材料,可实现无线信息和功率一体化调控平台,这是能信协同超材料的主要解决方案。与现有通信领域提出的 CPI 不同,无线信息和能量协同超材料/超表面方案依赖于数字可编程超材料技术。通过这种模式实现的信息调制和功率管理将在微波技术、天线传播和无线通信领域获得更多关注。

如图 13 所示为一款基于 2-bit 放大型超材料的无线能量与信息协同系统,利用其功率放大特性结合数字编码,将数字信息与电磁能量精确地发射给具有能量信息联合获取的物联网设备,建立高速信息流和高效能量流链路,最终形成操纵电磁空间全新范式。尽管 CPIM 原型设计和建模已经展现出了巨大的潜力,但对其的研究仍处于早期阶段。在可预见的未来,基于 CPIM 的电磁系统将会广泛地出现在日常生活中。

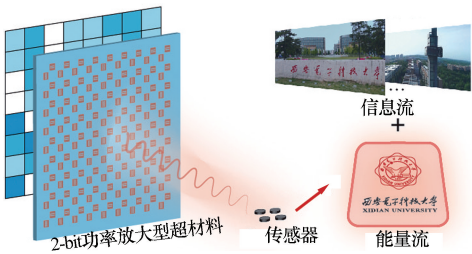


图 13 基于放大型超材料的无线能量与信息一体化系统

5.2 基站侧、中继侧和边缘侧CPIM

泛在 CPIM 层级架构方面,对于不同的工作场景,CPIM 应提供不同的功能。基于 CPIM 网络的三层架构包括基站侧、中继侧和边缘侧。在基站侧,除了移动网络接入之外,CPIM 基站还可以提供点对点、点对多点和特定区域的电磁能量覆盖服务。在中继侧,CPIM 可以作为中继器运行或改善无线信道。此外,中继器 CPIM 将无线功率重新分配给周围的物联网传感器或边缘侧 CPIM。需要强调的是,中继 CPIM 的主要能量由 CPIM 基站保证。在边缘侧,微瓦级设备配有低电平 CPIM,连接继电器 CPIM 并协调能量互连。这些不同层级的 CPIM 协同工作,形成了特色鲜明的 CPIM 无线系统。

6 总结

本文阐述了 CPIM 基本理论和关键技术方面的最新工作。以电磁超材料在 WIT、WPT 和 WEH 等技术方面的应用为出发点,构建了能信协同超材料

基本模型和系统方案。电磁超材料的出现显著提高了 WIT 系统的信息传输、接收、复用和处理能力,使无线通信系统更加智能和易于集成。同时,基于电磁超材料的 WPT 技术的实用性得到了显著提高。本文重点介绍了基于超材料的 WIT 和 WPT 技术及其在 CPIM 系统中的转换和集成方案,频率、极化、波型等维度的协同技术仍需要研究人员更为深入的研究和开发。

信息超材料的快速发展将在 CPI 中发挥至关重要的作用,如电磁波的产生和控制、电磁能量的集中和远距离传输、电磁能的接收和利用以及无线信息传输等。在 B5G/6G 无线通信时代,CPI 技术是多种现代通信网络中能源和信息传输的基础。CPI 作为一项划时代的技术,提出了许多令人感兴趣和具有挑战性的新研究课题,包括资源分配、通信和能源安全、环境保护、信息共享、可靠性架构等。我们希望本文介绍的技术将有助于 CPIM 中能源和信息协同传输新领域的研究,并为未来高效智能 CPIM 系统的设计和 implement 奠定基础。

参考文献

- [1] Perera T D, Jayakody D N K, Sharma S K, et al. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): recent advances and future challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20 (1): 264-302
- [2] Clerckx B, Zhang R, Schober R, et al. Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 37 (1): 4-33
- [3] Zhou X, Zhang R, Ho C K. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4754-4767
- [4] Zhang Z, Pang H, Georgiadis A, et al. Wireless power transfer-an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058
- [5] Rodenbeck C T. Microwave and millimeter wave power beaming [J]. IEEE Journal of Microwaves. 2021, 1(1): 229-259
- [6] Shinohara N. Trends in wireless power transfer: WPT technology for energy harvesting, millimeter-wave/THz rectennas, MIMO-WPT, and advances in near-field WPT applications [J]. IEEE Microwave Magazine, 2021, 22 (1): 46-59
- [7] 黄卡玛, 卢萍. 微波无线能量传输的空间匹配理论 [J]. 微波学报, 2020, 36(1): 25-31
Huang K M, Lu P. Space matching theory for microwave wireless power transmission [J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(1): 25-31
- [8] Cui T J, Smith D R, Liu R P. Metamaterials: theory, design, and applications [M]. Berlin: Springer Publishing Company, 2010
- [9] Zhou J, Zhang P, Han J, et al. Metamaterials and metasurfaces for wireless power transfer and energy harvesting [J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(1): 31-55
- [10] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials, and programmable metamaterials [J]. Light: Science & Applications, 2014, 3, e218
- [11] Zhao J, Yang X, Dai J Y, et al. Programmable time-domain digital coding metasurface for nonlinear harmonic manipulation and new wireless communication systems [J]. National Science Review, 2019, 6: 231-238
- [12] Cui T J, Liu S. Information metamaterials [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [13] Han J Q, Li L, Cui T J, et al. Adaptively smart wireless power transfer using 2-bit programmable metasurface [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69 (8): 8524-8534
- [14] Zhang L, Chen M Z, Tang W, et al. A wireless communication scheme based on space-and frequency-division multiplexing using digital metasurfaces [J]. Nature Electronics, 2021(4): 218-227
- [15] Zheng C M, Wankai T, Yan D J, et al. Accurate and broadband manipulations of harmonic amplitudes and phases to reach 256 QAM millimeter-wave wireless communications by time-domain digital coding metasurface [J]. National Science Review 2022, 9(1): 134
- [16] 马向进, 韩家奇, 乐舒瑶, 等. 可重构智能超表面设计及其无线通信系统应用 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(2): 258-268
Ma X J, Han J Q, Yue S Y, et al. Reconfigurable intelligent metasurface design and applications in wireless communication systems [J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(2): 258-268
- [17] 林屹峰, 单明明, 孔旭东, 等. 涡旋电磁波轨道角动量模态抗干扰性能分析 [J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 773-784
Lin Y F, Shan M M, Kong X D, et al. Orbital angular momentum anti-interference properties analysis of electromagnetic vortex wave [J]. Journal of Radars, 2021, 10 (5): 773-784
- [18] Tian S, Zhang X, Wang X, et al. Recent advances in

metamaterials for simultaneous wireless information and power transmission[J]. Nanophotonics, 2022, 11(9): 1697-1723

[19] Xu P, Li L, Li R, et al. Dual-circularly polarized spin-decoupled reflectarray with FSS-back for independent operating at Ku/Ka bands[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2021, 69(10): 7041-7046

[20] Zhu L, Han J, Li G, et al. A 2-bit programmable dual linearly-polarized metasurface structure element [A]. 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)[C], Florence, Italy, 2023

[21] Han J, Li L, Ma X, et al. A holographic metasurface based on orthogonally discrete unit-cell for flexible beam formation and polarization control [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, 2021, 20(10): 1893-1897

[22] Liu G Y, Li L, Han J Q, et al. Frequency-domain and spatial-domain reconfigurable metasurface[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(20): 23554-23564

[23] Yu S, Liu H, Li L. Design of near-field focused metasurface for high-efficient wireless power transfer with multifocus characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3993-4002

[24] Xue H. Multitarget wireless power transfer system using metasurface for quasi-Bessel beams with large half power beam length[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2022, 70(10): 4449-4462

[25] Zhang S, Hao H, Zhao S, et al. Generation and modulation of a two-dimensional Airy beam based on a holographic tensor metasurface [J]. Physical Review Applied, 2022, 18(6): 064085

[26] Zhang X, Liu H, Li L. Tri-band miniaturized wide-angle and polarization-insensitive metasurface for ambient energy harvesting [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(7): 071902

[27] Li L, Zhang X, Song C, et al. Compact dual-band, wide-angle, polarization-angle-independent rectifying metasurface for ambient energy harvesting and wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2021, 69(3): 1518-1528

[28] Yu S, Li L, Kou N. Generation, reception and separation of mixed-state orbital angular momentum vortex beams using metasurfaces[J]. Optical Material Express, 2017, 7

(9): 3312-3321

[29] Wang X. Amplification and manipulation of nonlinear electromagnetic waves and enhanced nonreciprocity using transmissive space-time-coding metasurface [J]. Advanced Science, 2022, 9: 2105960



李 龙 男,1977 年生,教授,博士生导师。超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室主任,国家级领军人才,陕西省杰出青年基金获得者,爱思唯尔中国高被引学者, IET Fellow。主要研究方向:智能超材料,超材料天线与微波器件,无线能量传输与收集,电磁兼容等。

E-mail: lilong@mail.xidian.edu.cn



马向进 男,1998 年生,博士生。主要研究方向:可编程超表面设计与应用,新体制超材料相控阵雷达,能信协同超材料等。



韩家奇 男,1991 年生,副教授,硕士生导师。主要研究方向:可编程超表面和信息超表面设计与应用,携能通信,微波计算成像等。



张 松 男,1996 年生,博士生。主要研究方向:超表面,微波无线能量传输。



王 鑫 男,1989 年生,博士生。主要研究方向:功率放大型超表面,微波携能通信。



刘海霞 女,1976 年生,副教授,硕士生导师。主要研究方向:可重构电磁超材料,场路协同理论与设计,新型天线与微波器件等。

E-mail: hxliu@xidian.edu.cn