

可重构电磁超表面及其应用研究进展

杨欢欢*^① 曹祥玉*^① 高军^① 李桐^① 李思佳^① 丛丽丽^① 赵霞^②

^①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

^②(78111部队 成都 610031)

摘 要: 可重构电磁超表面是电磁超表面领域广受关注的热点方向。将可控器件/材料引入超表面设计, 可重构超表面的电磁调控性能可以实时灵活动态控制。这极大丰富了超表面的功能, 有力推动了超表面由理论设计向工程应用突破。近年来该团队持续关注电磁超表面的最新发展, 围绕微波频段的可重构超表面, 从理论、技术与应用3个层面开展探索研究。该文首先梳理了国内外在该领域的研究历程, 然后从可重构超表面对电磁波的幅度、相位和极化特性调控及其应用等方面着手, 综述了该团队在该领域的研究成果, 并给出对未来工作的展望。

关键词: 电磁超表面; 可重构; 电磁调控; 天线; 涡旋波

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)02-0206-14

DOI: 10.12000/JR20137

引用格式: 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 可重构电磁超表面及其应用研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 206-219. doi: 10.12000/JR20137.

Reference format: YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Recent advances in reconfigurable metasurfaces and their applications[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 206-219. doi: 10.12000/JR20137.

Recent Advances in Reconfigurable Metasurfaces and Their Applications

YANG Huanhuan*^① CAO Xiangyu*^① GAO Jun^① LI Tong^① LI Sijia^①
CONG Lili^① ZHAO Xia^②

^①(Telecommunication Engineering Institute AFEU, Xi'an 710077, China)

^②(Unit 78111 of PLA, Chengdu 610031, China)

Abstract: Recently, reconfigurable metasurfaces have attracted intense attention in the field of electromagnetic metasurfaces. Compared with other metasurfaces, reconfigurable metasurfaces that uses steerable devices or materials to control the electromagnetic wave in real time are more versatile and show great promise in engineering applications. Our team has continuously explored advances of reconfigurable metasurfaces and also studied the microwave region from the perspectives of theory, technique and applications. This study reviews the research history of reconfigurable metasurfaces and summarizes some of our previous works, including a study on the amplitude, phase and polarization modulation of electromagnetic waves and their applications. Finally, the study discusses future challenges and possibilities for reconfigurable metasurfaces.

Key words: Electromagnetic metasurface; Reconfigurable; Electromagnetic control; Antenna; Vortex beam

收稿日期: 2020-11-01; 改回日期: 2021-01-19; 网络出版: 2021-02-22

*通信作者: 杨欢欢 jianye8901@126.com; 曹祥玉 xiangyucaokdy@163.com

*Corresponding Author: YANG Huanhuan, jianye8901@126.com; CAO Xiangyu, xiangyucaokdy@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671464, 61701523, 61801508), 陕西省自然科学基金(2019JQ-103, 2020JM-350), 陕西省青年人才托举计划(20200108), 博士后创新人才支持计划(BX20180375), 中国博士后科学基金面上项目(2019M653960)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671464, 61701523, 61801508), The Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2019JQ-103, 2020JM-350), Young Talents Support Program of Shaanxi Province (20200108), Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (BX20180375), Postdoctoral Science Foundation of China (2019M653960)

责任编辑: 李廉林 Corresponding Editor: LI Lianlin

1 引言

电磁超表面被视为电磁超材料的二维形式，它可以在表面处对电磁波的特性有效调控，从而突破自然材料表面的Snell定律限制，实现各种奇异的电磁现象^[1,2]。2011年，美国哈佛大学Yu等人^[3]在*Science*发文首次提出超表面的概念，介绍了利用超表面实现对连续光波的调控，并将光波在超表面的反射和折射规律归纳为广义Snell定律。与三维的超材料相比，超表面的亚波长厚度，使其可以采用光刻、印刷等大规模生产方式制备，也可直接和电路集成应用，这些突出优势极大激发了研究人员的兴趣。起初，超表面的研究集中在无源设计，一旦制备完成后，其功能是固定的，这在某种程度上限制了其适用范围。2014年，东南大学Cui等人^[4]和美国宾夕法尼亚大学Giovam paola等人^[5]相互独立地提出数字超材料的概念。与Giovam paola等人相比，崔铁军^[6]利用数字编码代替等效媒质描述超材料，并首次提出可编程超材料的概念，构建了超材料研究的新体系。他们还利用可编程超表面实现了微波频段对平面波的动态调控，可调谐超表面随之进入研究人员的视线并得到了迅速发展。

“可重构”一词源于计算机领域，其本意是指通过电子器件控制计算电路，在不改变电路结构的前提下实现多种可控的功能。物理学家将这一概念引入超表面领域，用可重构超表面描述具有多种可调性能的超表面。区别于早期的性能固定超表面，可重构超表面的性能可以灵活调节，这立刻吸引了众人的广泛关注。截至目前，可重构超表面的研究主要集中于3个层面：可重构单元设计与优化、可重构超表面功能与实现、基于可重构超表面的系统构建与验证。

高性能的单元是可重构超表面设计的基础和关键。以反射型超表面为例，图1给出了单元实现可重构的3种主要方式：改变谐振频率、改变传输线长度、改变旋转角度。在这3种方式的基础上可以衍生出各式各样的结构设计^[7-13]。可重构单元设计与优化的难点主要在于如何将可重构技术与超表面巧妙结合以获得需要的高性能。如在电控可重构单元中，如何选择电子器件类型与数量^[14]、电子器件在单元中的位置设计^[15]、电子器件的偏置结构加载^[16]、如何提高可重构性能(高吸波率/低损耗、宽带宽)^[7,17,18]和如何拓展可重构的性能维度(双极化、多功能)^[19-21]等。

利用可重构单元组成表面，可以获得多种电磁功能的捷变调控。早在2003年，Sievenpiper等人^[22]通过整列控制超表面单元，获得相位梯度，实

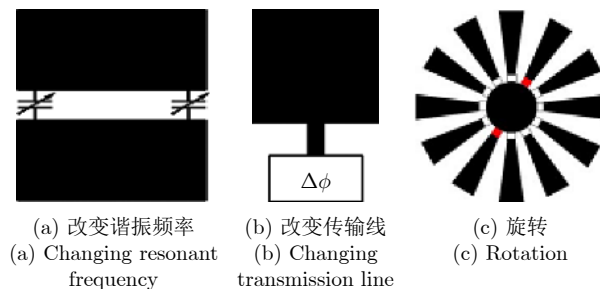


图1 反射型超表面单元可重构的主要方式

Fig. 1 Reconfigurable methods of reflective metasurfaces

现了反射波束在 $\pm 40^\circ$ 内二维扫描。后来，人们发现对每个单元独立控制可以获得很多重构的先进性能，实现诸如空间波束赋形^[23,24]、新型相控阵^[25-28]、全息成像^[29,30]、涡旋波复用^[31]甚至是多种功能的一体化^[32]等。2016年，Cui等人^[33]利用可重构超表面进行信息熵操作及数字卷积和加法，实现了对电磁波和数字信息的同时调控。近两年，从时间、空间和时域、频域维度研究时空编码超表面^[34]和非线性超表面^[35]使得可重构超表面的研究有了新的突破。

随着可重构超表面研究的深入，可重构超表面实时调控电磁波的能力不断丰富。这使得人们不禁思考：基于可重构超表面的系统设计能否代替传统的无线通信系统？2017年，采用1比特可重构超表面实现的实时动态可调微波全息成像系统成功实现^[30]。2019年，基于可重构超表面的无线数字传输系统研制成功^[36]。与经典的无线传输系统相比，这类传输系统不再需要数模转换等中间过程，而是直接将信息加载到超表面上进行辐射，极大简化了发射机的架构^[37]。同年，基于可重构超表面的可认知超表面系统也被报道^[38]，这将摆脱超表面控制对人工的依赖，实现智能化，加速人工智能时代的到来。

作为可重构超表面研究团队家族中的一员，空军工程大学曹祥玉教授领导的课题组从2006年起就持续关注超材料的最新进展，并开展了大量探索研究。2010年以来，团队将可重构概念和超表面技术有机结合，开展微波频段的可重构电磁超表面研究，取得了一些有益成果。本文在介绍国内外可重构超表面研究现状的基础上，以该团队的研究成果作为案例进行综述，从一个侧面见证可重构超表面的研究与发展历程，并分析了可重构超表面未来的发展方向。

2 可重构超表面的实现技术

实现超表面可重构的技术可分为机械方式和电控方式两大类。

机械方式是通过机械改变超表面物理结构，从

而获得电磁性能变化。常见的机械方式主要包括单元旋转^[26]和高度平移^[39]。由于实施简单,机械方式是实现可重构较早的一种方式,但由于重构速度慢、空间受限、控制复杂、精度易受机械误差影响,机械方式并未受到太多重视。近些年,随着电控机械控制器件的发展,采用直线执行器、微马达等控制超表面单元重新引起人们的关注。尤其机械方式特有的不增加单元损耗、线性度好等特点在工程上很受青睐。

电控方式通过电控器件或电控材料实现超表面性能的重构。与机械方式相比,电控方式具有响应速度快、集成度高、设计灵活等突出优点,也是可重构超表面近些年的主要实现方式^[40,41]。表1总结了文献中常用的电控可重构实现技术。其中,常用的集总电子元件主要包括PIN二极管、压控/变容二极管和基于MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)的开关/二极管。PIN二极管可以作为微波开关^[42],采用 N 个PIN二极管的超表面单元其重构状态往往不超过 2^N 个;而压控/变容二极管在外加不同电压时,其PN结反偏结电容会发生连续变化,可实现超表面的连续重构状态^[43]。尽管这两种集总元件技术成熟、应用广泛、响应时间快,但其在微波高频段损耗较大。MEMS技术的发展则可克服这一不足。MEMS是利用微机械技术将机械构件、驱动部件、电控系统集成成为一个单元的微型系统,基于MEMS制作的开关/变容管^[44,45]损耗几乎可忽略、功耗低、线性度好、工作频带宽,但受技术成熟度、成本等限制,其大规模应用仍然十分有限。功能材料也是实现超表面可重构的研究热点之一^[46-50],尤其在频率相对较高的毫米波频段,以功能材料作为超表面的介质,通过外加电压改变介质的等效电参数,可连续调整超表面的性能。

3 可重构超表面的电磁调控特性

电磁波可以用其振幅、相位和极化等特征量描述。当电磁波照射到可重构超表面上时,其与超表面发生作用,可以重构其振幅、相位、极化等特性。

3.1 吸波可重构超表面

吸波材料应用非常广泛。分析表明,如果吸波材料的吸波率超过90%,可以实现雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)减缩10 dB以上^[51]。近几年雷达隐身技术的迅猛发展对吸波材料提出了新的需求和挑战。研究具有“薄、轻、宽、强”特点的吸波材料成为科学家孜孜追求的目标。超表面天生具有薄、轻的结构特点,非常契合新一代吸波材料的要求。2008年,Landy等人^[52]提出并利用超表面实现了微波频段电磁波的近乎完美吸收。这类吸波体利用电谐振耦合空间波的电场能量、磁谐振耦合空间波的磁场能量,两者同时作用并结合介质损耗可实现99%的吸波率。这一成果极大鼓舞了研究人员,但超表面常伴的窄带特点也限制了吸波带宽。

2012年,本团队^[53]提出利用分形结构的自相似性,在Hilbert超表面结构中焊接2个二极管,通过单片机控制二极管的开关状态,完成对吸波频段的调控,设计的结构如图2所示。经测试,该吸波体在二极管闭合时的中心工作频率为4.72 GHz,断开时的中心频率为5.32 GHz,实现了由二极管开关控制吸波频段的切换(如图3)。由于该设计中采用的二极管只有开、关两个状态,得到的强吸波频率只能在两个区间内重构。为了进一步拓展吸波频率带宽,我们在单元中集成连续可调的变容二极管,设计了如图4所示的吸波超构表面^[54]。同时,为了提高吸波率,采用电阻和二极管并联的方式集成在单元结构中。图5的结果表明,该结构整体厚度为6 mm,吸波带宽覆盖0.68~2.13 GHz,与文献^[7]

表 1 电控可重构实现技术

Tab. 1 Technologies for the implementation of electronic control reconfigurability

参数	集总元件			功能材料		
	PIN二极管	压控/变容二极管	射频MEMS	液晶	石墨烯	砷化镓
技术成熟度	+	+	0	0	-	-
偏置复杂度	-	-	+	0	+	-
控制	数字(1 V)	模拟(0~30 V)	数字(60 V)	模拟	模拟	模拟
成本	+	+	0	0	0	-
损耗(微波)	-	-	+	-	-	-
功耗	-	+	+	0	+	-
速度	+(ns)	+(ns)	0(ms)	-	+	-
线性度	0	-	+	0	-	-
可用度	商用	商用	多数需定制	特殊设备	-	-

注: +: 好; 0: 中; -: 差。

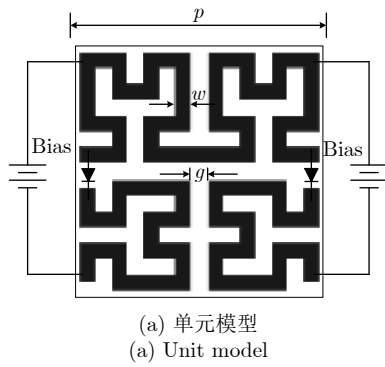


图2 电可控Hilbert吸波可重构超表面

Fig. 2 Electronic controllable Hilbert metasurface absorber

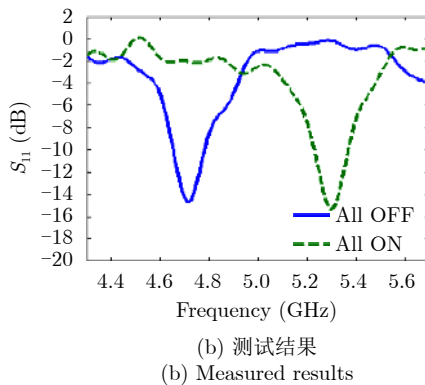
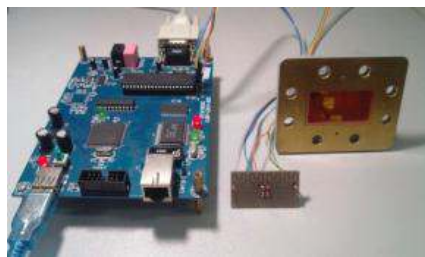


图3 电可控Hilbert吸波可重构超表面反射系数
Fig. 3 Reflectivity of the reconfigurable Hilbert metasurface absorber

相比，采用这种渐变结构后，总厚度减小1.8 mm，带宽拓展了10.9%。

3.2 相位可重构超表面

相位是电磁波矢量特性的重要表征。相位调控超表面可以对电磁波的波形灵活控制，其在辐射和

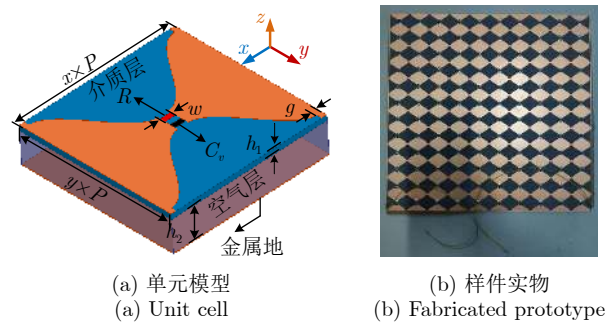


图4 电可控宽带吸波可重构超表面^[54]

Fig. 4 Electronic controllable broadband reconfigurable absorber^[54]

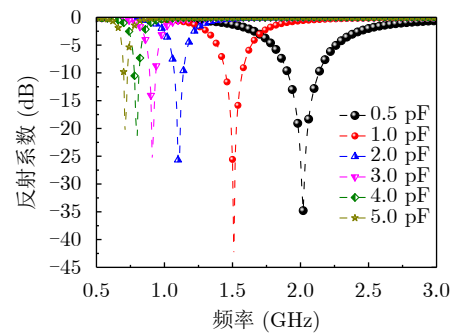


图5 电可控宽带吸波可重构超表面反射系数

Fig. 5 Reflectivity of the reconfigurable absorber

散射问题中都有广泛的应用。国内外对于相位可重构超表面的研究相对较多。本团队在反射和透射型相位可重构超表面研究方面也都做了一些探索。

2015年，我们利用PIN二极管设计实现了如图6所示的一种工作在Ku波段的超薄1比特相位可重构单元^[16]，并采用印刷微带线设计了具有分布参数的馈电结构。当外加电压控制二极管导通或截止时，该结构呈现出180°的反射相位差。与文献^[55,56]相比，该结构具有超薄、简单易行、控制方便的特点。大量研究表明，相位可重构超表面设计中往往存在两个限制：一是带宽窄，二是损耗高。为了拓展带宽，我们进一步分析了上述超表面的谐振工作模式，通过把多个模式结合起来，仅用1个PIN管就实现了双频相位可重构单元，且证实了适当改变结构参数可以独立调控两个相位重构频率^[57]。为了减小损耗，我们设计了图7所示的1比特相位可重构单元，通过加载集总电容改变二极管处的强电流分布，该单元可以在8.45~12.60 GHz范围内实现重构相位差180°±30°，同时不同状态所对应的幅度损耗均小于0.75 dB^[58]。更进一步，为了同时兼顾宽带和低损耗，我们将MEMS技术用于超表面，设计的新型单元结构如图8所示，采用渐变贴片和增加印有贴片的覆盖层后，该结构的1比特相位重构频带为7.0~21.5 GHz，带宽达112%，

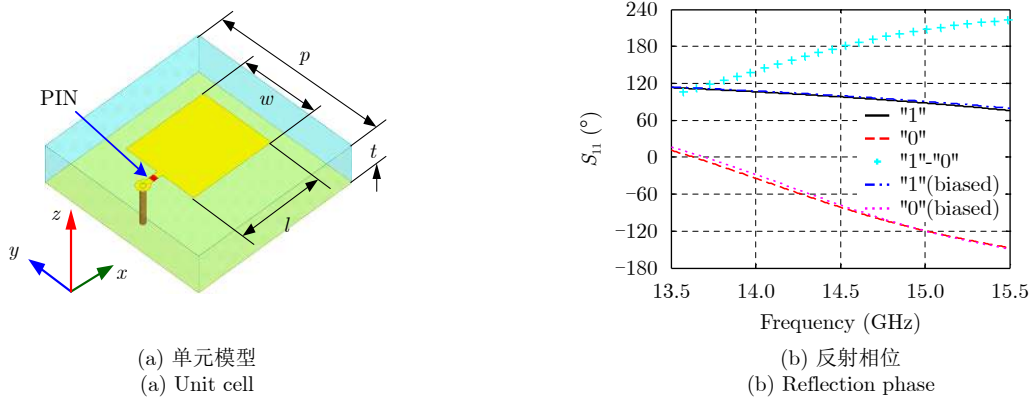


图 6 1比特相位可重构超表面

Fig. 6 1-bit phase-reconfigurable metasurface

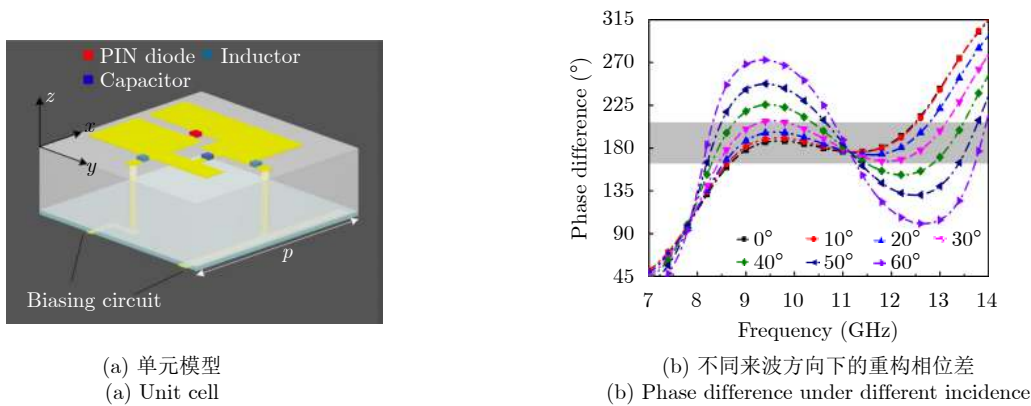


图 7 低损耗相位可重构超表面

Fig. 7 Phase reconfigurable metasurface with low loss

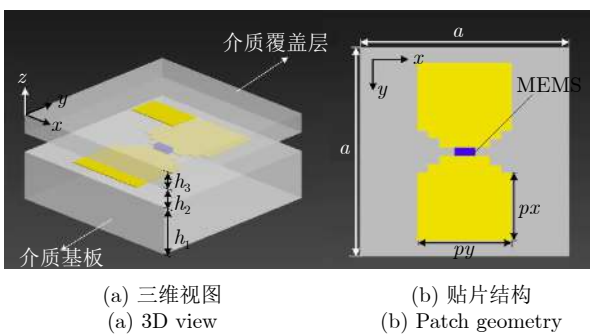


图 8 超宽带低损耗相位可重构超表面结构

Fig. 8 Ultra-wideband and low-loss phase reconfigurable metasurface

且反射损耗小于0.05 dB^[59]。针对近来特别关注的P和L频段超表面设计，我们从等效电路的角度分析了如何拓展可重构人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)的带宽，指出并联加载有源器件更有利于小型化和宽带工作，为宽带紧凑型超表面快速设计提供了方法借鉴，并设计了可以覆盖P和L频段的双极化可重构AMC^[60]。

除上述反射型相位可重构超表面之外，我们以

正六边形介质为透射型超表面的单元基底，通过在印刷金属片间集成MEMS开关，得到了低损耗紧凑型1比特相位单元^[61]，其对电磁波的透射结果如图9所示。为了实现对电磁波的全空间调控，我们设计了图10(a)所示的多层结构，当分别用外加电压控制第2层和第4层表面集成的PIN二极管时，该超表面实现了图10(b)所示的透射或反射相位可重构^[62]，相较于文献^[63]，在获得可重构性能的同时还提高了带宽。

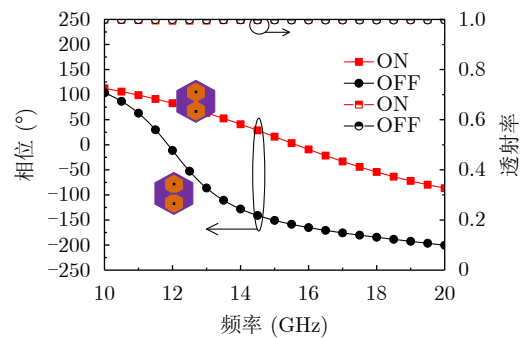


图 9 低损耗紧凑型1比特可重构超表面

Fig. 9 Compact 1 bit reconfigurable metasurface with low loss

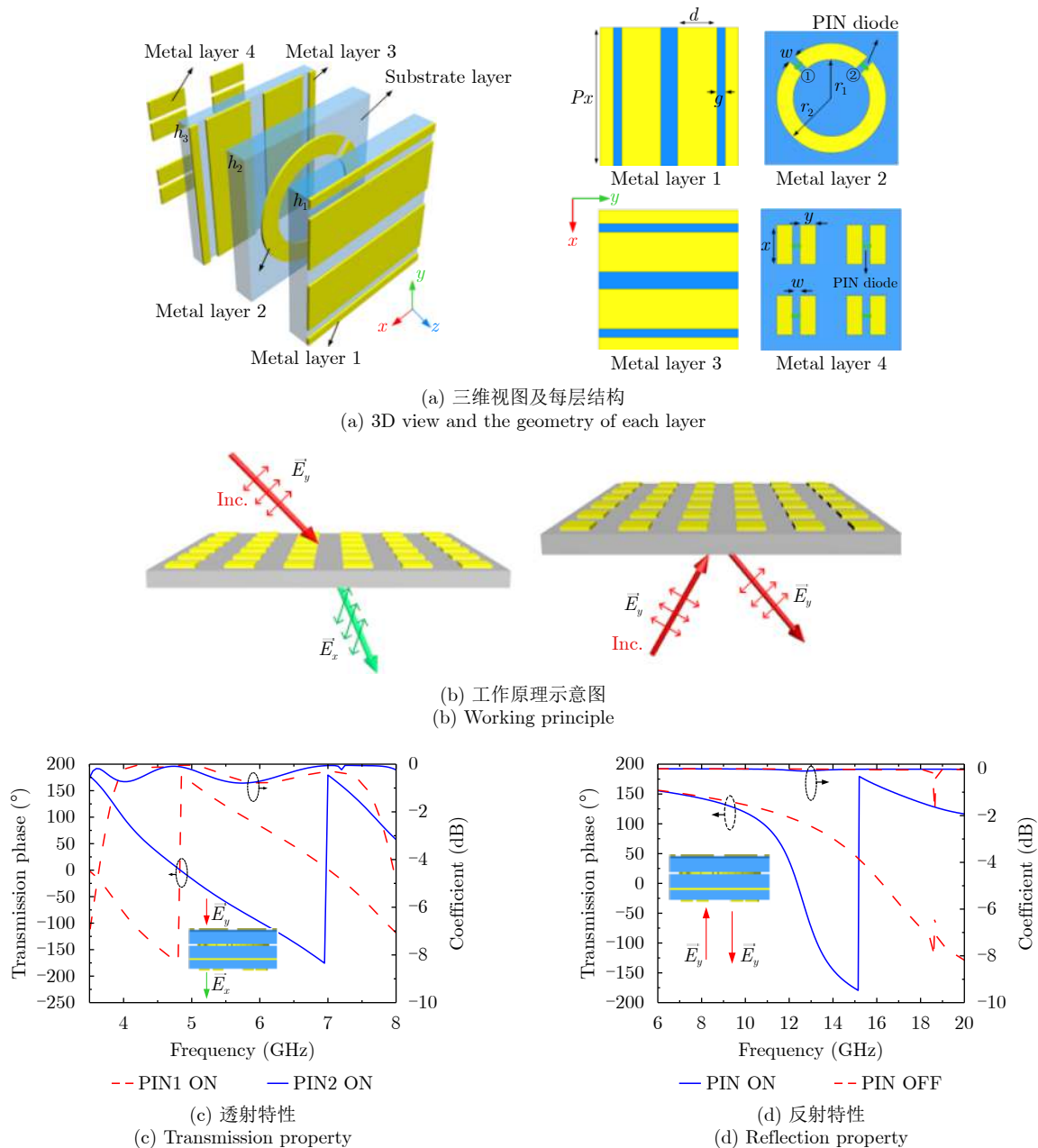


图 10 全空间相位可重构超表面
Fig. 10 Entire-space phase reconfigurable metasurface

3.3 极化可重构超表面

极化是电磁波最具特色的特征量。如图11所示，2016年，我们验证了当平面波以特定极化角照射1比特相位可重构超表面时，反射波的线极化可以在正交或者保持不变之间重构^[32]。为了拓展极化重构的带宽，我们进一步设计了图12所示的超表面^[64]，其由单层介质组成，单元中集成型号为RM-SW200HP的MEMS开关，当MEMS开关导通时，该超表面在7.78~14.10 GHz内反射波极化与入射波正交，且极化转化率大于0.8，相对带宽为57.7%，而MEMS开关闭合时，反射波极化保持不变。

以图12所示线-线极化可重构超表面为基础，通过对结构的深入细致分析，优化得到了如图13所示的多极化可重构超表面^[65]，在相同线极化波入射的条件下，随着MEMS开关由导通到断开，实现了在交叉线极化波反射和右旋圆极化波反射之间的切换，对应的频带分别为7.93~12.42 GHz (44.1%)和8.07~10.77 GHz (28.6%)。如图14，采用PIN二极管技术和多层结构，我们提出了一种新颖的设计^[66]，使多极化可重构超表面的带宽进一步拓展，当二极管截止时，在7.6~23.6 GHz (102.5%)范围内，线极化的入射波以圆极化波反射，当二极管导

通时, 在6.5~19.9 GHz (101.5%)线极化的入射波以正交极化反射。此外, 我们还尝试用MEMS开关将相邻单元直接相连, 并结合多层技术, 在获得宽带的同时, 还实现了结构的紧凑设计, 提出的单元如图15所示^[67], 其正交极化反射的带宽达122.7%,

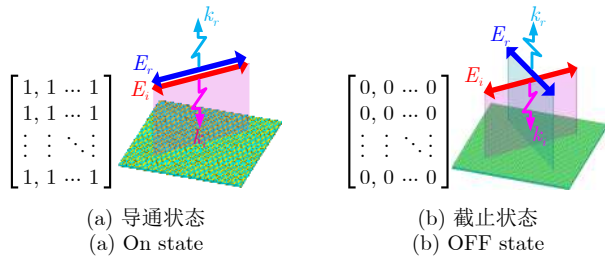


图 11 X频段超表面编码状态与极化可重构性能

Fig. 11 Coding matrix and polarization reconfigurable properties of the X-band metasurface

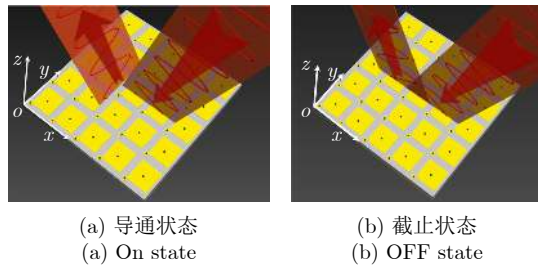


图 12 宽带线-线极化可重构超表面及其功能

Fig. 12 Wideband linear-to-linear polarization reconfigurable metasurface and its properties

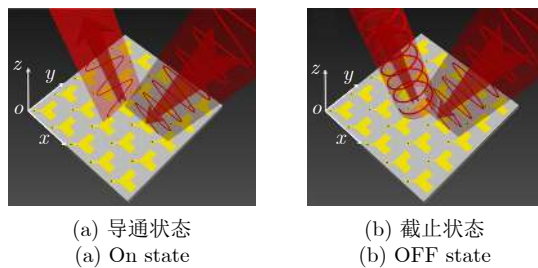


图 13 宽带多极化可重构超表面及其功能

Fig. 13 Wideband multi-polarization reconfigurable metasurface and its properties

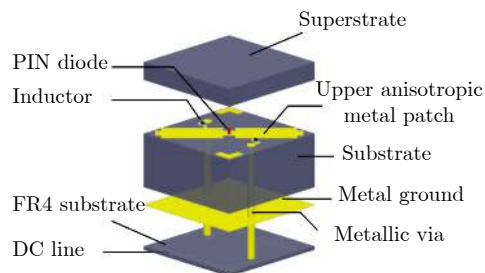
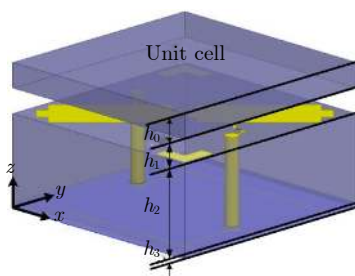


图 14 超宽带多极化可重构超表面单元

Fig. 14 Ultra-wideband multi-polarization reconfigurable metasurface unit cell

圆极化反射的带宽达123.0%, 且两种极化重构的频带基本一致, 这些性能是目前公开报道中最优的。

4 可重构超表面的应用

4.1 波束可重构

从宏观结构上看, 超表面最大的特点是由多个单元沿横向周期或准周期排列, 这与阵列天线的形状类似。因此, 研究人员甚至在超表面的概念被正式提出之前, 就开始思考能否利用超表面实现阵列天线的性能, 由此得到的一类高增益天线被命名为反射阵列或透射阵列。

2013年开始, 我们和清华大学合作, 在国内较早开始利用相位可重构超表面设计波束扫描阵列, 并成功研制了国内首部电控反射阵列天线样机^[28]。如图16所示, 该阵列仅用1比特单元实现了 $\pm 50^\circ$ 波束扫描, 工作带宽为11.75~13.25 GHz, 经过对单元和阵面的优化, 该阵列的口面效率提升至17.9%, 是已报道小口径1比特阵列中效率最高的设计, 此外, 我们还利用搭建的测试系统实测了由单片机控制的波束切换速度为12 μ s。2015年, 我们率先研制出国际上首个大口径双频波束扫描阵列^[57], 如图17(a), 图17(b)所示, 该阵列采用阵面切割拼接技术, 由5个 5×40 子阵拼接而成, 通过FPGA对每个单元实时独立控制。有趣的是, 我们在阵面背后设计与单元一一对应的LED灯, 以帮助调试、判断每个单元上二极管的工作状态, 这一方法后来被很多团队借鉴。图17(c)、图17(d)给出了该阵列的实测双频扫描波束。除聚焦波束之外, 我们还充分挖掘该阵列的强大波束重构能力, 验证了其可以实现宽波束、多波束、和差波束、赋形波束^[40], 对平面波还可以形成多种赋形散射波束等^[32], 如图17(e)所示。这些研究展现了相控阵的低成本化和智能隐身的光明前景。

4.2 RCS减缩

RCS是表征目标雷达隐身能力的重要指标。随着电子对抗技术的快速发展, 如何减小目标的RCS成为工程实践特别是军事实践牵引出的热点问

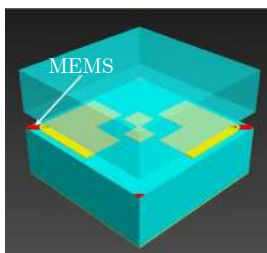


图 15 超宽带紧凑型多极化可重构超表面单元

Fig. 15 Ultra-wideband multi-polarization compact reconfigurable metasurface unit cell

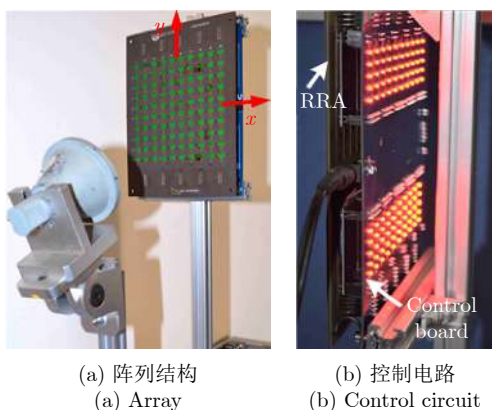
(a) 阵列结构
(a) Array(b) 控制电路
(b) Control circuit

图 16 10×10电控反射阵列天线

Fig. 16 Electronic controllable 10×10 reflectarray antenna

题。将超表面这一学科前沿用于解决RCS减缩这一工程问题是我们团队的一个创新思路。而更深入的研究也使我们认识到，仅仅依靠固定超表面的吸波、波束空间再分布能力实现RCS减缩往往会带来新问题，如发热易被红外设备探测、散射波束易被双基地雷达发现等。

针对该问题，2017年我们提出智能隐身超表面的概念，并与天线概念相结合，设计了图18所示的动态隐身超表面天线^[68]，该天线单元中集成有可控的变容二极管，将该天线与智能处理板相连接，就可实现对照射雷达波的跳频吸收或波束捷变。新近的工程实践表明，P和L等较低频段的隐身成为新的短板和难点。为此，我们提出了图19(a)所示的新型超表面单元结构^[69]，通过控制该单元中的变容二极管，整个阵列分别实现了0.90~2.19 GHz的可调辐射和0.86~1.82 GHz的动态隐身，而其剖面厚度仅有0.028λ，目前公开报道中尚未见到此类设计。

4.3 涡旋场产生

轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)涡旋电磁场作为一种潜力极大的通信手段，有望在很大程度上缓解现今频谱资源紧张、频段拥挤的问题。此外，其在成像、雷达探测等领域也有较大应用价值。我们团队研究了利用可重构电磁超表面产生多个模态涡旋场的可行性^[70]，系统总结了

基于可重构超表面的OAM涡旋场产生方法，揭示了平面波激励下1比特超表面产生OAM涡旋场的独特对称性^[71,72]，并利用1比特反射型和透射型超表面，制作了涡旋场产生样机，实测证实了涡旋场的性能^[61,73]。如图20(a)为利用1比特反射型调相超表面制作的样机实物，图20(b)为测试得到的对应涡旋场相位。

5 总结与展望

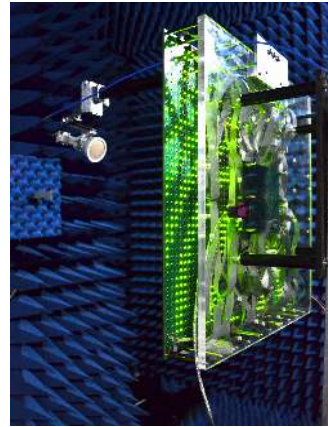
可重构技术为超表面的发展提供了新的驱动力。当下，可重构超表面的研究正如火如荼地开展。本文首先从总体上梳理了可重构超表面的发展历程及国内外的研究现状，并以空军工程大学曹祥玉教授团队为点，总结了其在可重构超表面及其应用领域所做的一些工作，主要包括吸波、相位、极化可重构超表面，及可重构超表面在阵列天线波束重构、RCS减缩及涡旋场产生方面的典型应用。限于篇幅，很多研究内容没有详细展开，具体细节可参阅参考文献。

可重构超表面作为超表面向可控、智能化、系统化发展的一个关键阶段，其前景不可估量。后续可以在以下3个方面作更深入的探索：

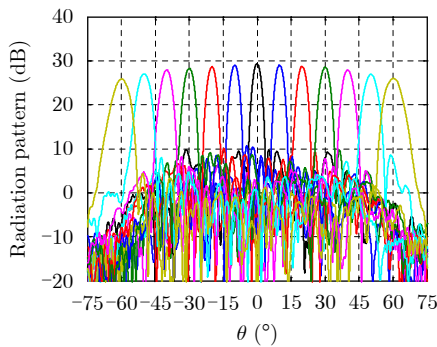
一是高性能的可重构超表面单元设计。目前，可重构超表面单元的研究仍面临诸多问题。从频域上看，已有研究主要集中在微波频段，且以S-X频段为主，未来的研究可朝超低频段(如P波段)和较高频段(红外、毫米波段、光波段)发展。对于低频，其设计的挑战主要在于如何获得较低的剖面；对于高频，表1中的实现方式适用性变差，因此，如何实现高频的可重构也是一个难点，也许可以结合新材料的发展找到突破。另外，谐振型超表面的可重构频带仍较窄，研究非谐振/准谐振型可重构超表面是值得探索的领域。此外，可重构超表面的非线性特性现已在前沿科学和无线通信等领域起到重要的作用，而目前对非线性效应研究刚刚起步，这涉及超表面结构自身和电子器件的非线性，其理论研究和物理实现都非常具有挑战性，将时域响应和非线性效应结合研究也为可重构超表面开辟了新的探索路线。从幅度上看，目前常用的PIN/变容二极管在较高的X频段时，其损耗急剧增大，这也给单元插入损耗的优化增加了难点。尽管MEMS技术为解决该问题带来了希望，其成本、成熟度等仍有待突破，因此如何降低插入损耗是非损耗性可重构超表面研究的课题。从性能上看，单一的可重构已无法满足未来多变的需求，实现对全空间电磁波的频率、幅度、相位和极化调控势在必行，但如何避免或利用多维度性能间的耦合效应实现想要的多性能可重构是单元设计的关键。



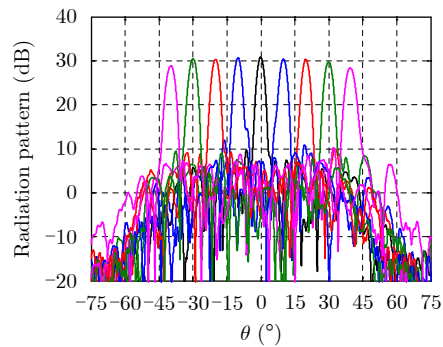
(a) 阵面和FPGA控制板
(a) Array aperture and FPGA control board



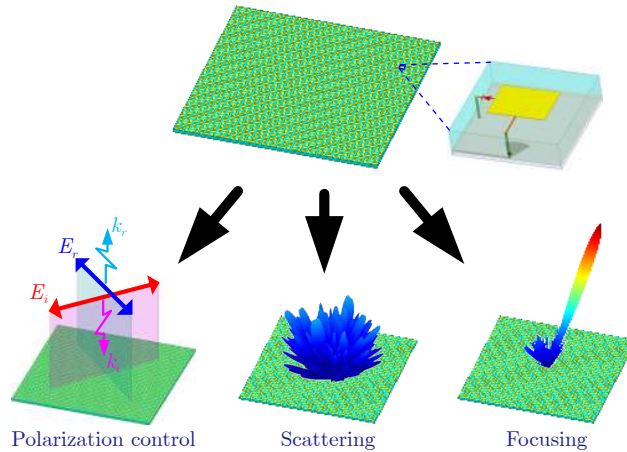
(b) 天线阵后视图
(b) Back view



(c) 11.1 GHz扫描波束
(c) Scanning beams at 11.1 GHz



(d) 14.3 GHz扫描波束
(d) Scanning beams at 14.3 GHz



(e) 多种波束的动态控制功能
(e) Flexible beams and functionalities

图 17 40×40双频电控阵列天线

Fig. 17 Electronic controllable dual-frequency 40×40 array

二是可重构超表面功能的进一步挖掘与丰富。目前的研究大致集中于两个方面：一方面，单一功能不断提升和多个功能的复合。如实现极化重构的频带宽度不断拓展或极化转换率不断提升、对不同方向电磁波的反射和透射相位灵活调控等。展望未来，可重构超表面还有一些新的未知功能需要我们继续挖掘。另一方面，器件和电

路不断集成化、小型化，如何在有限的表面上集成更多的可重构功能？如何将控制电路和可重构超表面一体化设计？这些都值得进一步思考。此外，如何将深度学习为代表的人工智能和可重构超表面技术有机融合，实现可重构超表面的智能感知、自主学习、自适应调节乃至智慧交互都值得深入研究。

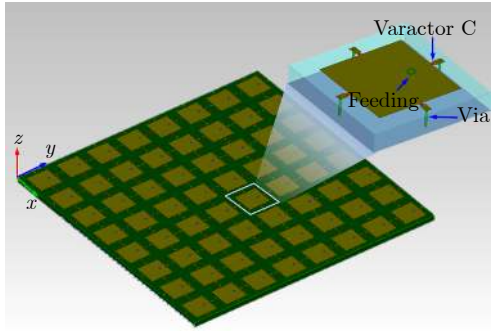
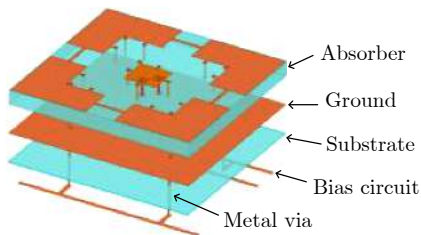


图 18 动态隐身超表面天线

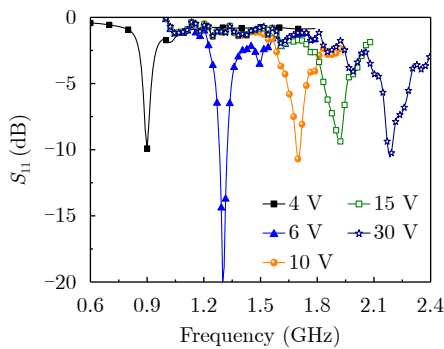
Fig. 18 Dynamic stealth metasurface antenna



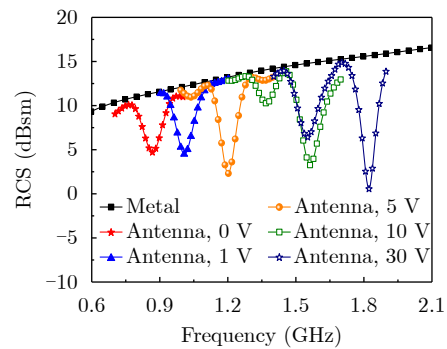
(a) 单元结构示意图
(a) Unit cell



(b) 样机实物
(b) Fabricated prototype



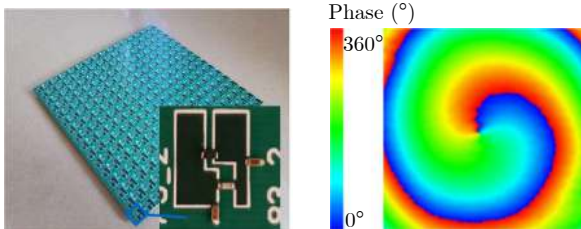
(c) 实测天线阵反射系数
(c) Measured reflection coefficients



(d) 实测RCS
(d) Measured RCS

图 19 低频动态隐身超表面天线

Fig. 19 Dynamic stealth metasurface antenna at low frequency



(a) 样机实物
(a) Fabricated prototype (b) 涡旋场相位
(b) Phase for vortex field

图 20 16×16可重构超表面及产生的涡旋场

Fig. 20 16×16 reconfigurable metasurface and the generated vortex field

参 考 文 献

[1] 孙树林, 何琼, 周磊. 电磁超表面[J]. 物理, 2015, 44(6):

三是基于可重构超表面的系统完善与应用。近3年, 微波全息成像系统、无线信息传输系统、认知超表面系统相继研制成功。它们打破了传统的通信架构, 明显简化信息传输的系统构成, 使得信息传输的效率和智能化水平进一步提升。这些突破性的创新成果给可重构超表面的研究加入了助推剂。我们有理由相信运用可重构超表面可以搭建更多新架构的信息系统。未来对这一领域展开深入研究, 并与工程实践相结合, 必将从理论和应用两个维度推动可重构超表面向持续深入和广泛实用快速进步!

366–376. doi: [10.7693/wl20150603](https://doi.org/10.7693/wl20150603).
 SUN Shulin, HE Qiong, and ZHOU Lei. Electromagnetic metasurfaces[J]. *Physics*, 2015, 44(6): 366–376. doi: [10.7693/wl20150603](https://doi.org/10.7693/wl20150603).
 [2] 汪国平. 超材料与超表面介绍[J]. 光学与光电技术, 2020, 18(5): 5–9. doi: [10.19519/j.cnki.1672-3392.2020.05.002](https://doi.org/10.19519/j.cnki.1672-3392.2020.05.002).
 WANG Guoping. Introduction to metamaterials and metasurfaces[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2020, 18(5): 5–9. doi: [10.19519/j.cnki.1672-3392.2020.05.002](https://doi.org/10.19519/j.cnki.1672-3392.2020.05.002).
 [3] YU Nanfang, 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. doi: [10.1126/science.1210713](https://doi.org/10.1126/science.1210713).
 [4] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, *et al.* Coding

- metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [5] GIOVAMPAOLA C D and ENGHETA N. Digital metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(12): 1115–1121. doi: [10.1038/nmat4082](https://doi.org/10.1038/nmat4082).
- [6] 崔铁军. 电磁超材料—从等效媒质到现场可编程系统[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(10): 1427–1461. doi: [10.1360/SSI-2020-0123](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0123).
- CUI Tiejun. Electromagnetic metamaterials—from effective media to field programmable systems[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(10): 1427–1461. doi: [10.1360/SSI-2020-0123](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0123).
- [7] XU Wenhua, HE Yun, KONG Peng, *et al.* An ultra-thin broadband active frequency selective surface absorber for ultrahigh-frequency applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(18): 184903. doi: [10.1063/1.4934683](https://doi.org/10.1063/1.4934683).
- [8] ZHU Bo O, ZHAO Junming, and FENG Yijun. Active impedance metasurface with full 360 reflection phase tuning[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3059. doi: [10.1038/srep03059](https://doi.org/10.1038/srep03059).
- [9] CHEN Ke, FENG Yijun, MONTICONE F, *et al.* A reconfigurable active Huygens' metalens[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(17): 1606422. doi: [10.1002/adma.201606422](https://doi.org/10.1002/adma.201606422).
- [10] MA Xiaoliang, PAN Wenbo, HUANG Cheng, *et al.* An active metamaterial for polarization manipulating[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(10): 945–949. doi: [10.1002/adom.201400212](https://doi.org/10.1002/adom.201400212).
- [11] HUANG Cheng, ZHANG Changlei, YANG Jianing, *et al.* Reconfigurable metasurface for multifunctional control of electromagnetic waves[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(22): 1700485. doi: [10.1002/adom.201700485](https://doi.org/10.1002/adom.201700485).
- [12] XU Hexiu, MA Shaojie, LUO Weijie, *et al.* Aberration-free and functionality-switchable meta-lenses based on tunable metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(19): 193506. doi: [10.1063/1.4967438](https://doi.org/10.1063/1.4967438).
- [13] WANG Jiayun, YANG Rongcao, MA Runbo, *et al.* Reconfigurable multifunctional metasurface for broadband polarization conversion and perfect absorption[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 105815–105823. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3000042](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000042).
- [14] COSTA F, MONORCHIO A, and VASTANTE G P. Tunable high-impedance surface with a reduced number of varactors[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 11–13. doi: [10.1109/LAWP.2011.2107723](https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2107723).
- [15] BRAY M G, BAYRAKTAR Z, and WERNER D H. GA optimized ultra-thin tunable EBG AMC surfaces[C]. 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, USA, 2006: 3–8.
- [16] 杨欢欢, 杨帆, 许慎恒, 等. Ku波段编码式电控超薄周期单元设计与验证[J]. *物理学报*, 2016, 65(5): 054102. doi: [10.7498/aps.65.054102](https://doi.org/10.7498/aps.65.054102).
- YANG Huanhuan, YANG Fan, XU Shenheng, *et al.* Design and verification of an electronically controllable ultrathin coding periodic element in Ku band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(5): 054102. doi: [10.7498/aps.65.054102](https://doi.org/10.7498/aps.65.054102).
- [17] CHEN Weiting, YANG Kuangyu, WANG C M, *et al.* High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 225–230. doi: [10.1021/nl403811d](https://doi.org/10.1021/nl403811d).
- [18] 周仕浩, 房欣宇, 李猛猛, 等. S/X双频带吸波实时可调的吸波器[J]. *物理学报*, 2020, 69(20): 204101. doi: [10.7498/aps.69.20200606](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200606).
- ZHOU Shihao, FANG Xinyu, LI Mengmeng, *et al.* S/X dual-band real-time modulated frequency selective surface based absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(20): 204101. doi: [10.7498/aps.69.20200606](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200606).
- [19] DING Yuxuan, LI Mengyao, SU Jianxun, *et al.* Ultrawideband frequency-selective absorber designed with an adjustable and highly selective notch[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, . doi: [10.1109/TAP.2020.3026889](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3026889).
- [20] LI You, LI Huangyan, WANG Yunwen, *et al.* A novel switchable absorber/linear converter based on active metasurface and its application[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(11): 7688–7693. doi: [10.1109/TAP.2020.2980301](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2980301).
- [21] YANG Huanhuan, YANG Fan, XU Shenheng, *et al.* A 1-bit multi-polarization reflectarray element for reconfigurable large-aperture antennas[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 581–584. doi: [10.1109/LAWP.2016.2590478](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2590478).
- [22] SIEVENPIPER D F, SCHAFFNER J H, SONG H J, *et al.* Two-dimensional beam steering using an electrically tunable impedance surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(10): 2713–2722. doi: [10.1109/TAP.2003.817558](https://doi.org/10.1109/TAP.2003.817558).
- [23] HU W, ISMAIL M Y, CAHILL R, *et al.* Electronically reconfigurable monopulse reflectarray antenna with liquid crystal substrate[C]. The 2nd European Conference on Antennas and Propagation, Edinburgh, UK, 2007.
- [24] LUO Xinyao, GUO Wenlong, CHEN Ke, *et al.* Active cylindrical metasurface with spatial reconfigurability for tunable backward scattering reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, in press. doi: [10.1109/TAP.2020.3037728](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3037728).
- [25] 杨帆, 许慎恒, 刘骁, 等. 基于界面电磁学的新型相控阵天

- 线[J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 256–265. doi: [10.13443/j.cjors.2018052401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2018052401).
- YANG Fan, XU Shenheng, LIU Xiao, *et al.* Novel phased array antennas based on surface electromagnetics[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2018, 33(3): 256–265. doi: [10.13443/j.cjors.2018052401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2018052401).
- [26] YANG Xue, XU Shenheng, YANG Fan, *et al.* A broadband high-efficiency reconfigurable reflectarray antenna using mechanically rotational elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(8): 3959–3966. doi: [10.1109/TAP.2017.2708079](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2708079).
- [27] YANG Xue, XU Shenheng, YANG Fan, *et al.* A mechanically reconfigurable reflectarray with slotted patches of tunable height[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(4): 555–558. doi: [10.1109/LAWP.2018.2802701](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2802701).
- [28] YANG Huanhuan, YANG Fan, XU Shenheng, *et al.* A 1-bit 10×10 reconfigurable reflectarray antenna: Design, optimization, and experiment[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(6): 2246–2254. doi: [10.1109/TAP.2016.2550178](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2550178).
- [29] LI Lianlin, SHUANG Ya, MA Qian, *et al.* Intelligent metasurface imager and recognizer[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 97.
- [30] LI Lianlin, CUI Tiejun, JI Wei, *et al.* Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 197. doi: [10.1038/s41467-017-00164-9](https://doi.org/10.1038/s41467-017-00164-9).
- [31] WANG Ling, YANG Yang, LI Shufang, *et al.* Terahertz reconfigurable metasurface for dynamic non-diffractive orbital angular momentum beams using vanadium dioxide[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 4600712.
- [32] YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, YANG Fan, *et al.* A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35692. doi: [10.1038/srep35692](https://doi.org/10.1038/srep35692).
- [33] CUI Tiejun, LIU Shuo, and LI Lianlin. Information entropy of coding metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5: e16172.
- [34] ZHANG Lei, CHEN Xiaoqing, LIU Shuo, *et al.* Space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4334. doi: [10.1038/s41467-018-06802-0](https://doi.org/10.1038/s41467-018-06802-0).
- [35] LUO Zhangjie, WANG Qiang, ZHANG Xinge, *et al.* Intensity - dependent metasurface with digitally reconfigurable distribution of nonlinearity[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(19): 1900792. doi: [10.1002/adom.201900792](https://doi.org/10.1002/adom.201900792).
- [36] WAN Xiang, ZHANG Qian, CHEN Tianyi, *et al.* Multichannel direct transmissions of near-field information[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 60.
- [37] DAI Junyan, TANG Wankai, ZHAO Jie, *et al.* Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900044. doi: [10.1002/admt.201900044](https://doi.org/10.1002/admt.201900044).
- [38] MA Qian, BAI Guodong, JING Hongbo, *et al.* Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 98.
- [39] DÍAZ-RUBIO A, TORRENT D, CARBONELL J, *et al.* Extraordinary absorption by a thin dielectric slab backed with a metasurface[J]. *Physical Review B*, 2014, 89(24): 245123. doi: [10.1103/PhysRevB.89.245123](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.245123).
- [40] 杨欢欢. 新型电磁表面及其可重构阵列天线应用研究[D]. [博士学位论文], 空军工程大学, 2016.
- YANG Huanhuan. Research on novel electromagnetic surface and reconfigurable reflectarrays[D]. [Ph.D. dissertation], Air Force Engineering University, 2016.
- [41] HUM S V and PERRUISSEAU-CARRIER J. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(1): 183–198. doi: [10.1109/TAP.2013.2287296](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2287296).
- [42] AL-NUAIMI M K T, HE Yejun, and HONG Wei. Design of 1-bit coding engineered reflectors for EM-wave shaping and RCS modifications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 75422–75428. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2883721](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883721).
- [43] VENNARI F, COSTANZO S, and DI MASSA G. Design and validation of a reconfigurable single varactor-tuned reflectarray[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(2): 635–645. doi: [10.1109/TAP.2012.2226229](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2226229).
- [44] 范小龙. 基于MEMS开关的有源可重构频率选择表面的研究与设计[D]. [硕士学位论文], 南京理工大学, 2014.
- FAN Xiaolong. Research and design of active reconfigurable frequency selective surface based on MEMS switches[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [45] OLOUMI D, MOGHADAS H, and MOUSAVI P. Dual-band orthogonally-polarized slotted-Lozenge reflective unit cell tuned by MEMS varactor[C]. The 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, USA, 2012.
- [46] HUANG Xianjun, ZHANG Xiao, HU Zhirun, *et al.* Design of broadband and tunable terahertz absorbers based on graphene metasurface: Equivalent circuit model approach[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, 9(4): 307–312. doi: [10.1049/iet-map.2014.0152](https://doi.org/10.1049/iet-map.2014.0152).
- [47] TORABI E S, FALLAHI A, and YAHAGHI A.

- Evolutionary optimization of graphene-metal metasurfaces for tunable broadband terahertz absorption[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(3): 1464–1467. doi: [10.1109/TAP.2016.2647580](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2647580).
- [48] ZENG Chao, LIU Xueming, and WANG Guoxi. Electrically tunable graphene plasmonic quasicrystal metasurfaces for transformation optics[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5763.
- [49] SAVO S, SHREKENHAMER D, and PADILLA W J. Liquid crystal metamaterial absorber spatial light modulator for THz applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(3): 275–279. doi: [10.1002/adom.201300384](https://doi.org/10.1002/adom.201300384).
- [50] VASIĆ B, ISIĆ G, BECCHERELLI R, *et al.* Tunable beam steering at terahertz frequencies using reconfigurable metasurfaces coupled with liquid crystals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 7701609.
- [51] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 基于电磁谐振分离的宽带低雷达截面超材料吸波体[J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 214101. doi: [10.7498/aps.62.214101](https://doi.org/10.7498/aps.62.214101).
- YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Broadband low-RCS metamaterial absorber based on electromagnetic resonance separation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(21): 214101. doi: [10.7498/aps.62.214101](https://doi.org/10.7498/aps.62.214101).
- [52] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402. doi: [10.1103/PhysRevLett.100.207402](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402).
- [53] 马嘉俊. 基于分形人工电磁材料吸波特性的阵列天线隐身技术研究[D]. 空军工程大学, 2014.
- MA Jiajun. Radar cross section reduction of antenna array based on the absorption of fractal metamaterial[D]. Air Force Engineering University, 2014.
- [54] ZHANG Guowen, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* An ultra-thin low-frequency tunable metamaterial absorber based on lumped element[J]. *Radioengineering*, 2019, 28(3): 579–584.
- [55] CARRASCO E, BARBA M, and ENCINAR J A. X-band reflectarray antenna with switching-beam using PIN diodes and gathered elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(12): 5700–5708. doi: [10.1109/TAP.2012.2208612](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2208612).
- [56] MONTORI S, CACCIAMANI F, GATTI R V, *et al.* A transportable reflectarray antenna for satellite Ku-band emergency communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1393–1407. doi: [10.1109/TAP.2015.2398128](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2398128).
- [57] YANG Huanhuan, YANG Fan, CAO Xiangyu, *et al.* A 1600-element dual-frequency electronically reconfigurable reflectarray at X/Ku-band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 3024–3032. doi: [10.1109/TAP.2017.2694703](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2694703).
- [58] TIAN Jianghao, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Design of a low loss and broadband active element of reconfigurable reflectarray antennas[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(10): 4104–4114. doi: [10.1364/OME.9.004104](https://doi.org/10.1364/OME.9.004104).
- [59] 田江浩. 基于可重构技术的反射型多功能超表面特性研究[D]. [硕士论文], 空军工程大学, 2019.
- TIAN Jianghao. Research on reflective multi-functional metasurface based on reconfigurable technology[D]. [Master dissertation], Air Force Engineering University, 2019.
- [60] LI Tong, YANG Huanhuan, LI Qi, *et al.* Dual-polarised and ultra-thin broadband AAMCs for both P and L bands applications[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, 13(2): 185–189. doi: [10.1049/iet-map.2018.5151](https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5151).
- [61] 吕世奇. 基于数字电磁超表面涡旋电磁波的优化技术研究[D]. [硕士论文], 空军工程大学, 2019.
- Lǚ Shiqi. Research on optimization of vortex electromagnetic waves based on digital electromagnetic metasurface[D]. [Master dissertation], Air Force Engineering University, 2019.
- [62] ZHANG Chen, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* Multifunction tunable metasurface for entire-space electromagnetic wave manipulation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 3301–3306. doi: [10.1109/TAP.2019.2929438](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2929438).
- [63] CAI Tong, WANG Guangming, TANG Shiwei, *et al.* High-efficiency and full-space manipulation of electromagnetic wave fronts with metasurfaces[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(3): 034033. doi: [10.1103/PhysRevApplied.8.034033](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.034033).
- [64] 于惠存, 曹祥玉, 高军, 等. 一种宽带可重构反射型极化旋转表面[J]. *物理学报*, 2018, 67(22): 224101. doi: [10.7498/aps.67.20181041](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181041).
- YU Huicun, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Broadband reconfigurable reflective polarization convertor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(22): 224101. doi: [10.7498/aps.67.20181041](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181041).
- [65] YU Huicun, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Design of a wideband and reconfigurable polarization converter using a manipulable metasurface[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(11): 3373–3381. doi: [10.1364/OME.8.003373](https://doi.org/10.1364/OME.8.003373).
- [66] TIAN Jianghao, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* A reconfigurable ultra-wideband polarization converter based on metasurface incorporated with PIN diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(13): 135105. doi: [10.1063/1.5067383](https://doi.org/10.1063/1.5067383).
- [67] GUO Zexu, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* A novel reconfigurable metasurface with coincident and ultra-wideband LTL and LTC polarization conversion functions[J]. *Radio Engineering*, 2019, 28(4): 696–702.

- [68] LI Tong, YANG Huanhuan, LI Qi, *et al.* Active metasurface for broadband radiation and integrated low radar cross section[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(3): 1161–1172. doi: [10.1364/OME.9.001161](https://doi.org/10.1364/OME.9.001161).
- [69] 韩江枫. 电磁超表面幅相特性调控及应用研究[D]. [博士学位论文], 空军工程大学, 2020.
HAN Jiangfeng. Research on amplitude and phase characteristics of metasurfaces and its applications[D]. [Ph. D. dissertation], Air Force Engineering University, 2020.
- [70] ZHANG Di, CAO Xiangyu, YANG Huanhuan, *et al.* Multiple OAM vortex beams generation using 1-bit metasurface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24804–24815. doi: [10.1364/OE.26.024804](https://doi.org/10.1364/OE.26.024804).
- [71] ZHANG Di, CAO Xiangyu, YANG Huanhuan, *et al.* Radiation performance synthesis for OAM vortex wave generated by reflective metasurface[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 28691–28701. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2839099](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839099).
- [72] ZHANG Di, CAO Xiangyu, YANG Huanhuan, *et al.* Aperture efficiency and mode constituent analysis for OAM vortex beam generated by digital metasurface[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(3): 034204. doi: [10.1088/1674-1056/28/3/034204](https://doi.org/10.1088/1674-1056/28/3/034204).
- [73] 张迪. 新型数字电磁表面技术及其在涡旋电磁场中的应用研究[D]. [博士学位论文], 空军工程大学, 2019.
ZHANG Di. Research on novel digital electromagnetic metasurface and its application in vortex electromagnetic field[D]. [Ph. D. dissertation], Air Force Engineering University, 2019.

作者简介



杨欢欢(1989–), 男, 河南驻马店人, 博士后, 副教授、硕士生导师。空军工程大学与清华大学联合培养博士生, 2016年获博士学位, 现担任空军工程大学信息与导航学院副教授。主要研究方向为相控阵天线、新型天线设计、人工电磁结构等, 目前已发表论文50多篇。

E-mail: jianye8901@126.com



曹祥玉(1964–), 女, 河南南阳人, 教授、博士生导师。1999年在空军工程大学获博士学位, 现担任空军工程大学信息与导航学院教授。主要研究方向为天线与电磁兼容、人工电磁材料、计算电磁学等, 目前已发表论文300多篇。

E-mail: xiangyucaokdy@163.com



高 军(1962–), 男, 青海西宁人, 教授、硕士生导师。1987年在空军工程大学获硕士学位, 现担任空军工程大学信息与导航学院教授。主要研究方向为电磁超材料及其应用、高增益天线等, 目前已发表论文100多篇。

E-mail: gjgj9694@sina.com



李 桐(1988–), 女, 陕西西安人, 博士后, 副教授。2015年获西安电子科技大学博士学位, 现担任空军工程大学信息与导航学院副教授。主要研究方向为可重构天线、可重构超表面、天线RCS减缩技术等。

E-mail: tongli8811@sina.com



李思佳(1987–), 男, 陕西西安人, 博士后, 副教授、硕士生导师。2015年获空军工程大学博士学位, 现担任空军工程大学信息与导航学院副教授。主要研究方向为人工电磁结构、天线RCS减缩技术等。

E-mail: lsj051@126.com



丛丽丽(1991–), 女, 山东文登人, 博士, 讲师。2015年获空军工程大学博士学位, 现担任空军工程大学信息与导航学院讲师。主要研究方向为天线RCS减缩技术、新型电磁超表面等。