

## 基于电磁表面的阵列天线及应用概述

周嵩林<sup>1</sup>, 唐隽文<sup>2</sup>, 刘罗颢<sup>1</sup>, 吴优<sup>1</sup>, 刘长昊<sup>1</sup>, 金一飞<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 许慎恒<sup>1</sup>, 李懋坤<sup>1</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

**摘要:** 基于电磁表面的阵列天线是目前电磁学领域研究的前沿之一, 基于此, 对电磁表面阵列天线的早期发展、研究现状和应用情况进行了简要的汇总和介绍。首先, 总结了电磁表面早期的发展历程。其次, 汇总了电磁表面阵列当前的研究现状, 包括可重构设计、宽带、太赫兹和多极化等。再次, 给出了电磁表面阵列天线在通信、雷达、电磁环境调控等系统层面的最新应用。最后, 对电磁表面阵列天线未来可能的研究方向进行了展望。

**关键词:** 电磁表面; 超表面; 界面电磁学; 反射/透射阵; 可重构智能表面

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022225

## Review of array antenna and its application based on electromagnetic surface

ZHOU Songlin<sup>1</sup>, TANG Junwen<sup>2</sup>, LIU Luohao<sup>1</sup>, WU You<sup>1</sup>, LIU Changhao<sup>1</sup>,  
JIN Yifei<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, XU Shenheng<sup>1</sup>, LI Maokun<sup>1</sup>

1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China

**Abstract:** Array antennas based on electromagnetic surface is a frontier in the field of electromagnetic, based on this, the development, research status and applications of electromagnetic surface array antennas were summarized. First, the early development of electromagnetic surface was introduced. Then, the current research status of electromagnetic surface array was summarized, including reconfigurable design, broadband, terahertz, multi-polarization, etc. Subsequently, some applications in communication, radar and electromagnetic environment regulation were presented. Finally, the possible research directions of electromagnetic surface array antenna were expected.

**Keywords:** electromagnetic surface, metasurface, surface electromagnetic, reflectarray/transmitarray, reconfigurable intelligent surface

### 0 引言

超材料是指人工设计的具有天然材料所不具有的特殊物理性质的材料, 是近几年的热门研究方向之一。当超材料在某方向上的尺寸趋近于 0, 成为二维材料时, 也被称为超表面。相比三维超材料, 超表面更有利于分析、设计和加工, 是目前超材料相关研究的主流内容。

不同于声学表面、力学表面等其他超表面, 电磁表面主要研究超表面对电磁场表现出的调控能

力, 在电磁学领域备受关注。近些年, 随着技术的发展和工艺的进步, 电磁表面为天线设计, 尤其是阵列天线的设计带来了全新的思路和方法。基于人工电磁表面的阵列天线能够极大地降低阵列的结构复杂度、重量以及成本, 为通信、雷达等领域提供新一代硬件基础。

本文对电磁表面阵列天线进行了总结和介绍。首先介绍了其早期的发展和界面电磁理论; 然后基于可重构电磁表面阵列天线, 讨论了当前的一些研究前沿; 随后给出了几个电磁表面阵列天线在系统

层面的应用实例；最后对电磁表面阵列天线未来的发展进行了展望。

### 1 电磁表面阵列天线简介与早期发展

电磁表面阵列天线是指借助电磁表面的特殊物理性质，对空间入射电磁波进行接收、调控和发射的器件。这一概念的前身是 20 世纪中期提出的以频率选择表面为代表的人工电磁表面<sup>[1]</sup>和以波导口反射阵为代表的反射阵天线<sup>[2]</sup>。在印制电路板 (PCB, printed circuit board) 天线加工工艺成熟后，二者迅速结合并发展成基于微带结构的电磁表面阵列天线。本节将介绍早期人工电磁表面、界面电磁学理论以及不可重构的电磁表面阵列天线。

#### 1.1 人工电磁表面

电磁波在物体表面的反射、折射特性一直是人们感兴趣的一个研究方向。早在 17 世纪，荷兰物理学家 Snellius<sup>[3]</sup>针对光的反射和折射特性提出了折射定律。随后，在自然材料表面的各种电磁现象，如全反射、全透射等，逐渐被学者发现。

为了更进一步地调控电磁波在物体表面的响应，20 世纪 50 年代，有学者提出使用周期性排布的平面结构对空间中的电磁波进行响应，该结构被称为频率选择表面<sup>[1]</sup>。频率选择表面可以使某些频段内的电磁波透射，而其他频段的电磁波则会被反射，因此表现出空间滤波器的特性。随后几十年中，出现了多种基于周期结构的电磁表面，其中具有代表性的是人工磁导体<sup>[4]</sup>，也称电磁带隙结构<sup>[5]</sup>。

#### 1.2 界面电磁学理论

在人工电磁表面发展至一定程度后，为了更加系统地描述各种表面上不同的电磁现象，研究者提出了界面电磁学理论。类比零维的电路理论、一维

的传输线理论以及三维的麦克斯韦经典电磁理论，界面电磁学关注一维和三维之间未进行充分系统研究的区域，即二维表面上的电磁理论，如图 1 所示。目前，界面电磁学仍是一个新兴的学科，其中尚有大量的内容等待发掘和完善。

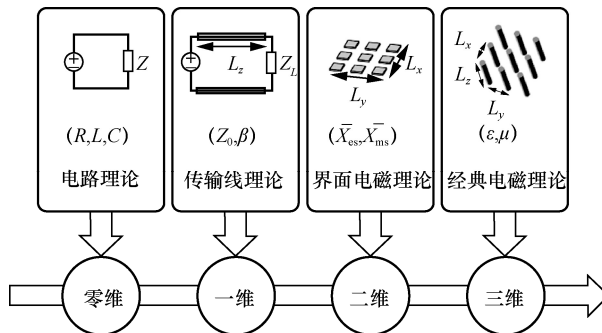


图 1 界面电磁学的学科定位

界面电磁学理论中一个重要的研究方向就是基于电磁表面的新型高增益阵列天线。此类天线一般由电磁表面和馈电系统两部分组成，采用不同的工作模式、相位控制、口面形式、馈电方式等，可以组合出针对各种应用的不同天线系统，如图 2 所示。

#### 1.3 不可重构的电磁表面阵列天线

早期的电磁表面阵列天线多为不可重构的固定波束阵列天线。它不需要集成额外的馈电和控制电路，设计流程较简单，在波束稳定性、辐射效率和对复杂环境的耐受力方面都具有很好的表现。根据电磁波在表面上的作用方式，可以分为反射阵天线和透射阵天线。

对反射电磁波进行调控的天线称为反射阵天线。反射阵天线单元一般由金属地板、介质板、贴片和通孔组成。其中，金属地板可以抑制单元的背

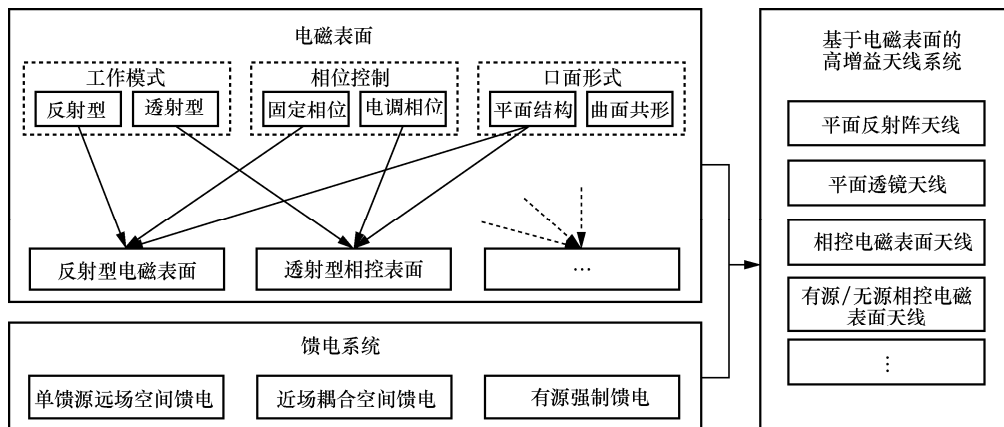


图 2 基于电磁表面的新型高增益阵列天线分类

向辐射, 使透射系数几乎为 0。不可重构反射阵天线一般通过几何变化实现相位控制, 例如, 改变单元的大小<sup>[6]</sup>、形状或旋转角度<sup>[7]</sup>等, 如图 3(a) 所示。

对透射电磁波进行调控的天线称为透射阵天线。相比反射阵天线, 透射阵天线的突出优势是没有馈源遮挡, 劣势则是透射带来的损耗更大。透射阵天线根据入射波和出射波之间转换的原理不同, 可以分为收发式<sup>[8]</sup>和层叠耦合式<sup>[9]</sup>2 种, 分别如图 3(b)和图 3(c)所示。

## 2 电磁表面阵列天线研究现状

不可重构电磁表面阵列天线只能在空间域对电磁波进行调制, 而在时间域, 表面的电磁特性是恒定不变的。为了实现波束成形和波束扫描, 需要在时间上也能对电磁波进行调制。本节首先介绍可重构电磁表面阵列天线, 包括连续相位(模拟)电磁表面和离散相位(数字)电磁表面, 然后介绍可重构电磁表面阵列天线在宽带、太赫兹、多极化等方面的前沿结果。

### 2.1 可重构电磁表面阵列天线

可重构电磁表面阵列天线可以通过重构单元的电磁结构实现对单元相位的调控, 从而实现波束扫描。一般对单元的反射或透射相位进行调控, 包括机械控制调相<sup>[10-11]</sup>、可变材料调相<sup>[12-13]</sup>和集成固态电子器件调相<sup>[14-19]</sup>。其中, 集成固态电子器件的调相方式相较于前 2 种调相方式具有响应速度快、损耗低等特点, 因此被广泛用于反射式和透射式的可重构电磁表面阵列天线设计。本节将分别介绍使用集成固态电子器件在电磁表面阵列天线中实现连续或离散的相位调控的方法。

### 2.1.1 连续相位电磁表面的调控

连续相位电磁表面的调控一般需要使用变容二极管实现, 一些设计也同时使用了 PIN 二极管<sup>[14-15]</sup>。使用连续相位设计可以规避相位量化误差造成的辐射性能恶化, 但其工作频率相对较低, 同时复杂的单元结构和偏置电路使单元损耗较大, 一定程度上造成了辐射效率的下降, 因此研究者一直致力于如何降低单元损耗。

Trampler 等<sup>[14]</sup>提出了一个双谐振的反射式结构单元, 单元加载 4 个变容二极管可以实现超过 360°的调相范围, 如图 4(a)所示。Tang 等<sup>[15]</sup>提出了一个透射式的收发结构单元, 如图 4(b)所示。加载在发射贴片上的 2 个 PIN 二极管用于控制电流方向, 基于电流反转原理实现 180°相位差。此外, 结合一个加载 3 个变容二极管的模拟移相器提供 180°连续相位, 因此单元可以实现 360°范围的连续相位调控。

### 2.1.2 离散相位电磁表面的调控

离散相位电磁表面的调控一般借助 PIN 二极管和射频微机电系统(MEMS, micro-electro mechanical system)开关等性能参数稳定、功耗低、截止频率较高的开关器件, 实现对单元相位的 1 bit 或 2 bit 量化。使用离散相位设计的单元相比连续相位设计的单元结构更简单, 损耗更低, 但是会受相位量化误差的影响。根据计算, 进行 1 bit 相位量化后, 阵列天线的辐射增益会遭受 3~4 dB 的损失, 旁瓣电平也会急剧升高, 特别是在波束扫描时旁瓣性能恶化更明显。而将相位量化精度提升至 2 bit 时, 增益损失降低到约 1 dB, 旁瓣性能也得到大幅改善<sup>[20-21]</sup>。因此 2 bit 相位量化是一个折中的量化精度。

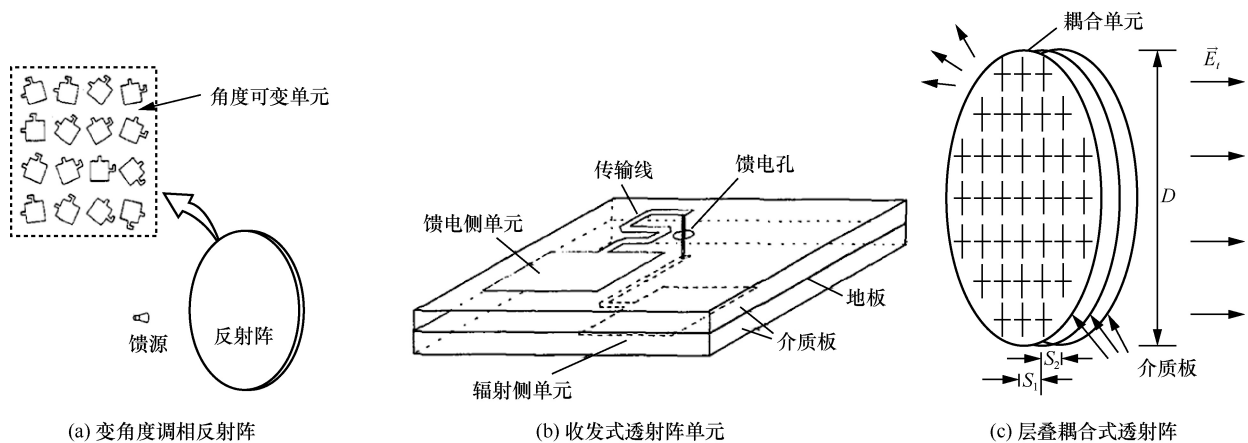


图 3 早期电磁表面阵列天线或单元

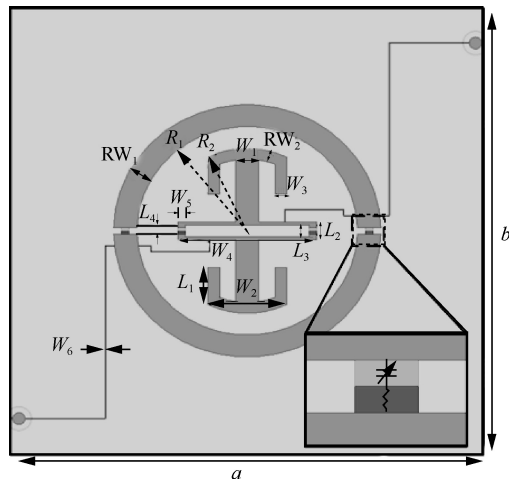
1 bit 相位量化设计的一个经典结构是边缘加载 PIN 二极管的微带贴片单元。Xu 等<sup>[16]</sup>在此基础上提出了一个双线极化的反射式 1 bit 单元，如图 5(a)所示。单元加载 2 个 PIN 二极管，在 12.5 GHz 的  $x$  极化方向和 14.25 GHz 的  $y$  极化方向上均可实现 1 bit 相位调控。1 bit 的相位调控由 PIN 二极管的通断改变辐射贴片的等效电路长度来实现。

另一种 1 bit 量化设计通过极化转换电流反转实现。Luo 等<sup>[17]</sup>提出了一个宽带透射式 1 bit 单元，单元结构如图 5(b)所示，单元基于极化旋转结构设计，顶层和底层的金属栅网用于接收和辐射电磁波，中间层的 2 个正交放置的极化器分别加载一个 PIN 二极管用于移相和极化转换。当 2 个 PIN 二极管中的一个导通时，对应的极化器工作，使极化偏转；当另一个导通时，同样产生极化偏转，但转极化后的

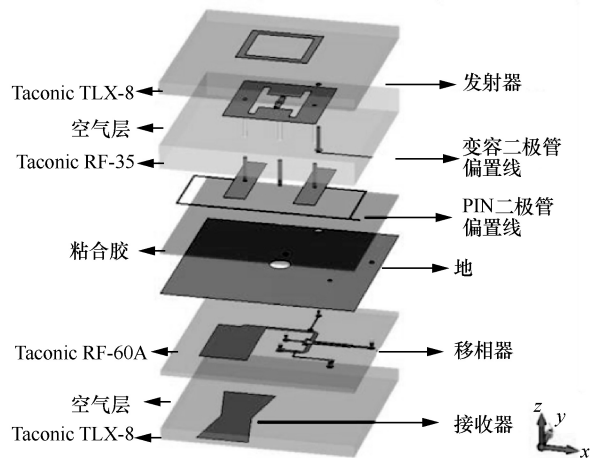
电场相位恰好相反，从而实现宽带的 180°相位差。

2 bit 相位量化由于结构更复杂，需要进行巧妙的设计，因此相关的工作较少。2020 年，Diaby 等<sup>[18]</sup>提出了一个透射式的 2 bit 单线极化单元，单元结构如图 6(a)所示。它由六层金属和五层介质组成，加载了 4 个 PIN 二极管。180°相移通过加载在接收 O 形槽贴片上的 2 个 PIN 二极管来实现；另外 2 个 PIN 二极管加载在传输贴片上，该贴片包含一条延迟线，以实现额外的 0°/90°相位切换，最终实现 2 bit 相位调控。

2022 年，Zhang 等<sup>[19]</sup>提出了如图 6(b)所示的反射式 2 bit 单元，单元包括极化转换层和反射层两部分，共加载了 6 个 MEMS 射频开关来实现 2 bit 相位调控，其中，极化转换层实现 90°/-90°相位控制，反射层实现 0°/90°相位控制。

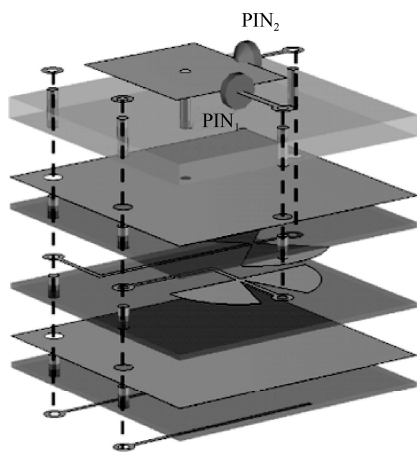


(a) 反射式结构单元

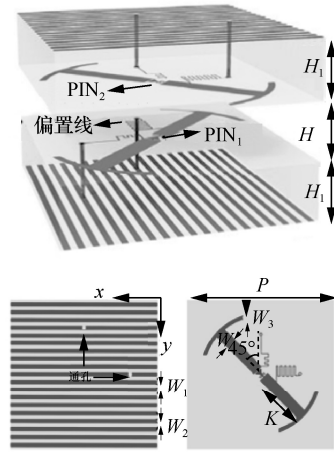


(b) 透射式的收发结构单元

图 4 连续相位单元结构



(a) 双线极化的反射式 1 bit 单元



(b) 宽带透射式 1 bit 单元

图 5 1 bit 相位量化单元结构

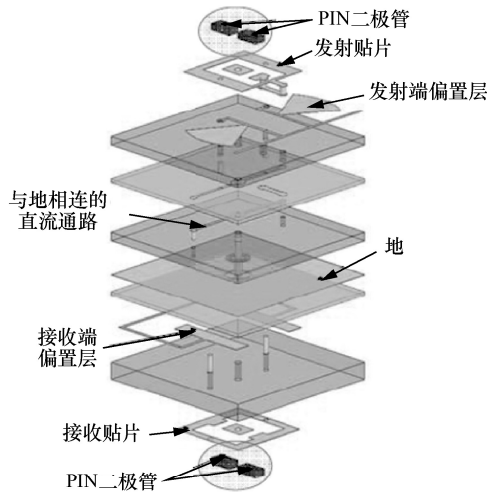
### 2.2 宽带电磁表面阵列天线

由于可重构电磁表面阵列单元大多使用贴片式辐射结构，具有天然的窄带特性，其工作带宽受到很大制约。为了获得宽带的工作特性，可采用的方法包括多层堆叠、极化转换、增强单元间耦合等。

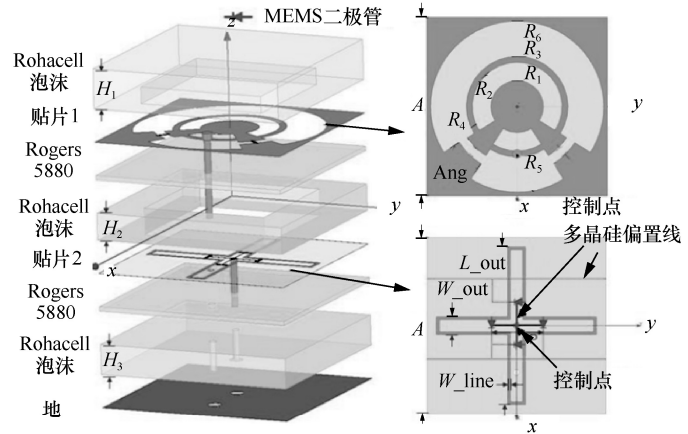
Xi 等<sup>[22]</sup>提出了添加寄生贴片层形成堆叠微带结

构以提高电磁表面阵列带宽的方法，通过在原单元上方添加无源的寄生贴片，能够有效拓展带宽，如图 7(a)所示。最终组成了一个 16×16 的 1 bit 可重构反射阵天线，1 dB 增益带宽达到 15.4%。

Zhou 等<sup>[23]</sup>提出的双层贴片反射阵同样采用了多层堆叠结构来拓宽带宽，如图 7(b)所示。与文

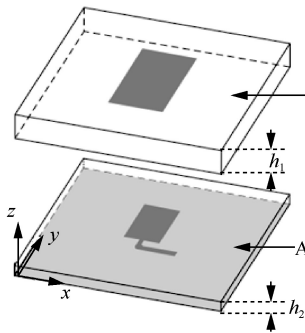


(a) 透射式 2 bit 单线极化单元

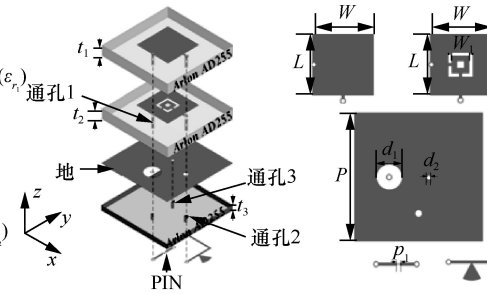


(b) 反射式 2 bit 单元

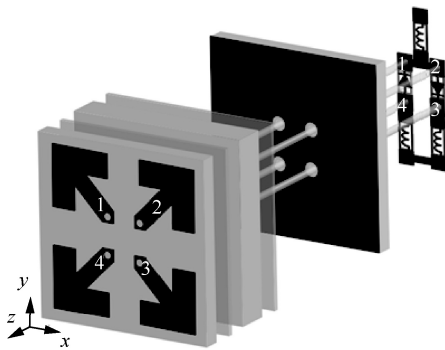
图 6 2 bit 离散相位单元结构



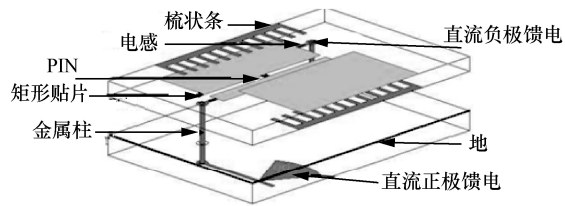
(a) 无源层叠寄生贴片型



(b) 层叠 PIN 二极管加载贴片型



(c) 极化转换型



(d) 紧耦合型

图 7 宽带电磁表面阵列天线

献[22]的不同之处在于,该工作两层谐振结构上均加载了有源的 PIN 二极管,通过更复杂的控制结构获得了更宽的增益带宽。最终组成  $16 \times 16$  的阵列天线后达到了 22.5% 的 1 dB 增益带宽。

采用极化转换、电流反转思路实现的单元,一般拥有更宽的移相带宽,可以提高整个阵列的增益带宽。使用此方法的一个最新结果是 Luyen 等[24]利用极化转换方法设计的宽带反射阵,如图 7(c)所示。通过控制 2 个 PIN 管通断使 1 和 3、2 和 4 分别连通作为 2 种单元状态,2 种状态在极化转换之后的电流方向相反,因此两者之间具有很稳定的相移曲线,能够在 8~12 GHz 内保持  $180^\circ$  的相位差。最后组成  $16 \times 16$  的反射阵天线,3 dB 增益带宽超过 30%。

Mu 等[25]在 2021 年提出了一种新的使用紧耦合法拓宽反射阵带宽的方法。通过在相邻单元间添加锯齿状结构以增强耦合,能够获得更加稳定的移相曲线,并借此获得更宽的移相带宽,如图 7(d)所示。最终组成了  $18 \times 12$  大小的阵列,3 dB 增益带宽为 40%。

宽带电磁表面阵列天线带宽对比如表 1 所示。

表 1 宽带电磁表面阵列天线带宽对比

工作	设计思路	阵列增益带宽
文献[22]	层叠寄生贴片	15.4% (1 dB)
文献[23]	层叠 PIN 二极管加载贴片	22.5% (1 dB)
文献[24]	极化转换	30% (3 dB)
文献[25]	紧耦合	40% (3 dB)

### 2.3 太赫兹电磁表面阵列天线

基于界面电磁理论的电磁表面阵列天线设计方法,理论上可以在任何频带内设计电磁表面阵列天线。然而,在太赫兹频段,由于天线结构尺寸小、损耗大,因此对天线设计和加工,以及开关器件的性能提出了新的挑战。为了解决上述挑战,人们利用新的工艺、新的开关来设计太赫兹频段的电磁表面阵列天线。

2018 年, Zhang 等[26]使用高电子迁移率晶体管 (HEMT, high electron mobility transistor) 器件实现了太赫兹频段的相位调制,如图 8(a)所示。通过利用微纳加工工艺,制备了半导体异质结开关,通过施加不同电压,控制 HEMT 器件中二维电子气浓度,从而控制器件电流,调整天线表面对入射波的响应,最终在 0.35 THz 频点对入射电磁波实现了  $137^\circ$  的相移。同年,他们利用二氧化钒 ( $\text{VO}_2$ ) 对温度的响应特性实现了太赫兹空间相位调制[27]。通过激光照射电磁

表面,以改变二氧化钒器件的温度,使二氧化钒实现相变,从而改变天线谐振状态,最终在 0.6 THz 处实现了  $138^\circ$  的相移,并能获得 55 GHz 的带宽。

2019 年, Xu 等[28]基于 HEMT 器件工艺,设计了一款所有单元可独立相控的太赫兹反射阵天线。仿真表明,该天线可在 0.3 THz 处实现  $180^\circ$  相移,并可以实现  $60^\circ$  大角度扫描。

2020 年, Venkatesh 等[29]利用互补金属氧化物半导体 (CMOS, complementary metal oxide semiconductor) 工艺实现了单元独立可控的太赫兹可重构透射阵,如图 8(b)所示。他们利用标准 65 nm CMOS 工艺,加工了 576 单元的阵列。每个单元上集成 8 个 CMOS 器件,可在 0.3 THz 处实现  $\pm 30^\circ$  动态波束成形,动态切换速率可达到 5 GHz。

2022 年, Monroe 等[30]实现了一套工作在 265 GHz 的  $98 \times 98$  单元超大规模 CMOS 反射阵雷达,如图 8(c)所示。该设计使用了先进的 22 nm FinFET 工艺,可以加工低损耗移相器。同时,利用 CMOS 工艺在阵列中集成移位寄存器和存储器等控制电路,实现了快速波束切换和雷达扫描成像应用。

除了 CMOS 工艺,研究者还在其他工艺和开关器件上进行了积极探索,例如, GaAs 肖特基二极管[31]、相变材料 (PCM, phase change material)[32]、石墨烯[33]等,验证了这些材料和器件在太赫兹可重构电磁表面阵列天线上的应用潜力。

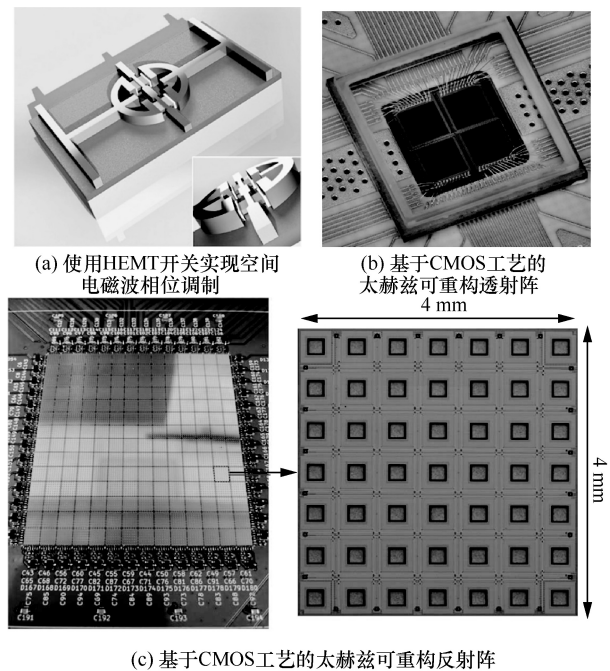


图 8 太赫兹电磁表面阵列天线

### 2.4 多极化电磁表面阵列天线

极化也是电磁波的重要特性之一。除一般的线极化和圆极化以外，通过合适的单元设计，电磁表面阵列天线能够实现双极化、全极化、双圆极化等多种极化方式。

双线极化方面的研究在几年前就已经成熟，基本的工作原理大同小异。例如，Moghadas 等<sup>[34]</sup>早在 2015 年就提出用加载 MEMS 开关的十字槽单元实现双频双极化反射单元。通过加载在 2 个垂直槽上的多个 MEMS 开关对垂直和水平 2 个极化分量分别进行相位调节，实现了垂直和水平极化独立的相位响应。2.1.2 节中提到的文献[16]是较新的一项双极化相关的工作。

双圆极化的相关研究则较为滞后，目前绝大部分结果都仅为不可重构阵列。例如，一些研究中使用线-圆极化转换器<sup>[35]</sup>、后级 3 dB 电桥<sup>[36]</sup>等进行多层之间的极化分离后，再进行独立的相位调控。最新的一项工作借助相位延迟线和动态相位补偿技术，实现了一个宽带的双圆极化反射单元，如图 9(a)所示，但仍然是不可重构的，无法进行波束扫描<sup>[37]</sup>。

2021 年，Baladi 等<sup>[38]</sup>首次实现了可重构的双圆极化单元，并且在组阵后实现了波束扫描，如图 9(b)所示。采用交错布阵的思路，在 2 个不同尺寸且都加载了 4 个变容二极管的单元上实现了异频双圆极化，是目前唯一实现了双圆极化波束扫描的电磁表面阵列天线。其局限是仅能够在 2 个不同频段实现双圆极化独立波束扫描，无法做到同频独立。

### 3 电磁表面阵列天线的应用场景

电磁表面阵列天线所具有的低重量、低成本和低剖面等优势，使其在通信、雷达等领域中有广泛的应用。本节从通信系统、雷达系统以及电磁环境调控 3 个方面讨论电磁表面阵列天线的应用场景。

#### 3.1 通信系统

电磁表面阵列天线可以直接作为卫星发射天线，由于其具有的低剖面和低重量的特性，十分适于卫星通信。文献[39]提出了如图 10(a)所示的一种紧凑型四簇宽带圆极化连续旋转电磁表面阵列天线阵列，用于 C 波段卫星通信。这项工作使用了带有 S 形电磁表面阵列天线单元的连续旋转馈电网络，有效增强了轴比带宽。文献[40]综合上文提到的连续相位调控与宽带设计两大热点问题，提出了如图 10(b)所示的基于变容二极管的连续相位调控的由蘑菇单元构成的可重构反射式电磁表面阵列天线，具有超宽带特性，可用于 X 波段和 Ku 波段卫星通信。

对电磁表面单元状态进行实时编程控制并传输数字信息，称为可编程电磁表面，采用可编程电磁表面能实现一种新型的无线发射机结构<sup>[41]</sup>。此类发射机不再需要滤波器、宽带混频器或宽带功率放大器等器件，大大降低了整机复杂度，是实现经济高效的无线通信系统的一种很有前景的硬件结构。2019 年，Tang 等<sup>[42]</sup>基于 8×32 单元的可编程超表面实现了 8PSK 发射机，在 4.25 GHz 频点实现 6.144 Mbit/s 的

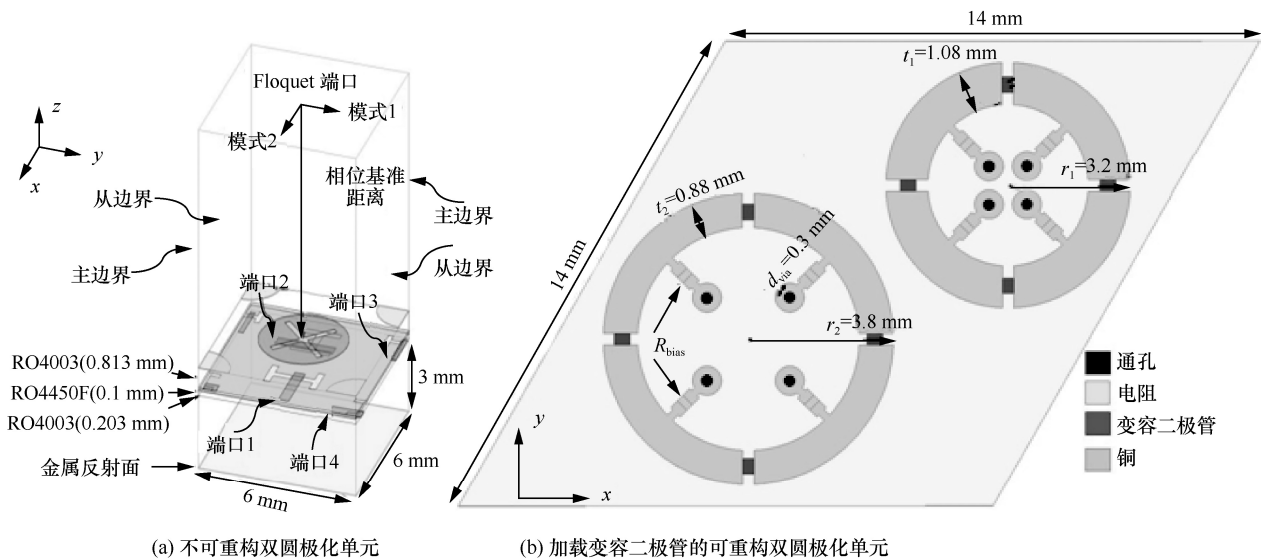


图 9 双圆极化电磁表面阵列天线

传输速率,如图 10(c)所示。此外,使用可编程相控阵进行时空编码,可以进行空分复用,将多个信道的信息同时传递给不同用户,而不需要进行数模转换和混合处理<sup>[43]</sup>。

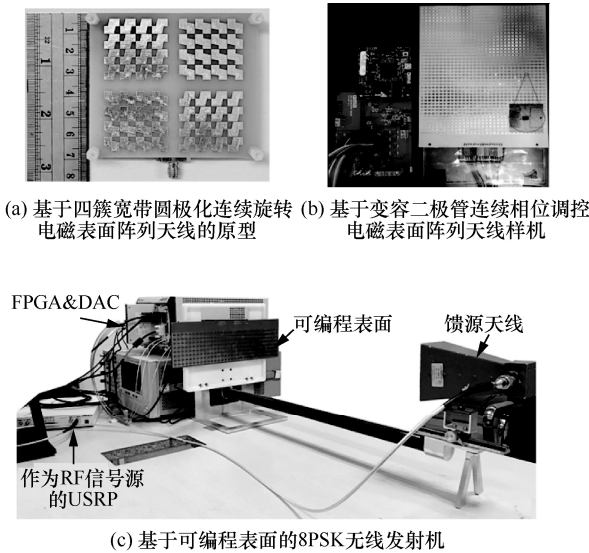


图 10 通信系统中的电磁表面阵列天线

### 3.2 雷达系统

雷达系统通过发射无线电波,并利用反射的回波生成远距离目标的图像。为了获得更远的探测距离和更高的分辨率,需要使用大尺寸高增益的阵列天线。传统的相控阵通常需要昂贵的有源射频组件,其尺寸、重量、功率等问题以及高昂的成本令人望而却步。可重构电磁表面阵列天线在雷达中的应用包括远场(如汽车防撞、无人机监视等)和近场(穿墙成像)系统。

文献[44-45]提出了一种工作在 92~96 GHz 的可重构电磁表面阵列天线,仅利用普通的 PCB 加工工艺及加工精度要求,通过合理的单元设计,就可以控制 PIN 二极管实现电流翻转,能轻便地、低成本地在 W 波段保证稳定的 180°调相效果。更进一步地,通过输入合适的空间编码,相控电磁表面阵列天线可以形成具有不同指向的波束。这种具有空间波束扫描能力的透射型相控电磁表面阵列天线可以用作雷达系统的接收天线,如图 11(a)所示。

2.3 节中提到了文献[30]提出的一款基于硅基 22 nm 工艺设计制作的应用在 260 GHz 的 1 bit 太赫兹相控电磁表面,其应用也是作为反射阵雷达,如

图 11(b)所示。除了硅基太赫兹电磁表面上的一些前沿设计外,在系统后端还充分发挥了硅基集成电路的特色,设计内存存储,将雷达扫描与频率扫描所需要的所有控制文件存储进内存,仅需要输入少量信息即可自主生成波束,大大降低了走线复杂度。

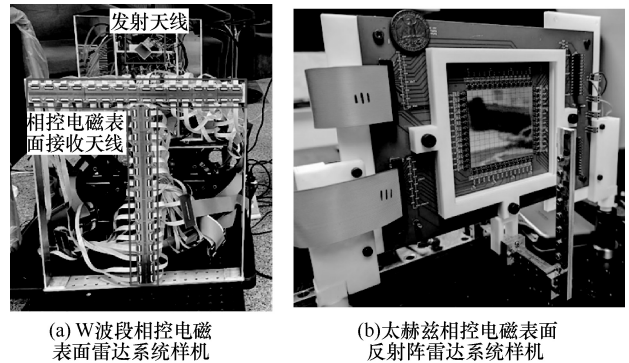


图 11 雷达系统中的电磁表面阵列天线

### 3.3 电磁环境调控

对于电磁环境,尤其是电磁信道的改变和控制,是电磁表面近几年在通信领域新的应用方向,其硬件结构与电磁表面阵列天线基本一致,相关研究者称其为可重构智能表面(RIS, reconfigurable intelligent surface)。通过将 RIS 放置在信道中,改变电磁波传播特性,能够有效提高信道容量。

2019 年, Hougne 等<sup>[46]</sup>使用放置在随机环境中的可重构电磁表面,能够调整信道的无序性,并为不同的无线信道添加完美正交性。他们展示了在拥有 3×3 个系统的室内环境中的增强无线图像传输,通过调整无序性,使独立信道数从 2 个增强到最高的 3 个。

2021 年, Elmoossallamy 等<sup>[47]</sup>针对上行多用户情景,提出可以通过最大化 RIS 增强信道的有效秩和最大化最小奇异值的方法,对 RIS 相移进行优化,从而提升其信道增强能力。结果表明,即使优化后 RIS 的直接传播仅贡献了接收功率的一小部分,线性接收机的速率也显著提高了。

## 4 电磁表面阵列天线的未来发展趋势

结合上述介绍的一些研究与应用可以发现,电磁表面阵列天线的研究与应用可根据频率划分为 2 个部分。1) 在微波、毫米波频段,电磁表面阵列天线已经有了大量的研究结果,并已经应用于通信、雷达等相关领域,另外还衍生出一种新的信道调控方法。2) 在太赫兹频段,受限于器件、工艺等诸多因素,电磁表面阵列天线目前仅有的几个研究结果,

都还处于从零到一、从无到有的探索阶段。

因此, 电磁表面阵列天线未来在微波、毫米波频段的发展会与系统应用领域结合得更加紧密。以实际应用为驱动, 研究功能更加完备、工作指标更加突出的电磁表面阵列天线; 或是利用可重构电磁表面本身的数字化调控优势, 进一步提高数字化程度, 研究以可编程时空调制电磁表面为硬件基础的新型发射机、可重构智能表面等。

在太赫兹领域, 电磁表面的发展有 3 个关键问题亟待解决。首先, 受限于太赫兹固态器件的非理想开关条件, 电磁表面对太赫兹频段电磁波的调控机理尚不清楚; 其次, 受限于芯片材料和工艺, 太赫兹电磁表面单元的设计自由度少、辐射效率低; 最后, 相关的一些加工工艺(如 GaN 工艺、CMOS 工艺、异构集成工艺等)还缺乏研究和规范化。研究上述问题需要电磁理论、半导体器件、微纳集成工艺等多个领域的学科交叉和协同创新, 具有更高的挑战性, 但同时也拥有广阔的发展空间。

## 5 结束语

本文对电磁表面阵列天线进行了一个整体的介绍。从传统的频率选择表面, 到早期的不可重构电磁表面阵列天线, 再到可重构电磁表面阵列天线相关的最新研究, 最后到各系统中的应用, 从一个相对全面的视角建立了对电磁表面阵列天线的整体认知。

针对电磁表面阵列天线的最新研究进展, 本文总结了电磁表面阵列天线在可重构、宽带、太赫兹和多极化等方面的最新研究进展。在系统应用层面, 本文也给出了电磁表面阵列天线在通信系统、雷达系统以及电磁环境控制中的一些应用。同时, 对电磁表面阵列天线未来的发展进行了展望。

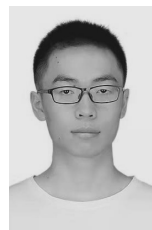
总体来说, 基于人工电磁表面的阵列天线这一领域在未来还有广泛的研究内容和广阔的应用前景, 期待越来越多的研究者共同参与到这一新兴领域的探索中来。

## 参考文献:

- [1] SARABANDI K, BEHDAD N. A frequency selective surface with miniaturized elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(5): 1239-1245.
- [2] BERRY D, MALECH R, KENNEDY W. The reflectarray antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1963, 11(6): 645-651.
- [3] KWAN A, DUDLEY J, LANTZ E. Who really discovered Snell's law? [J]. *Physics World*, 2002, 15(4): 64.
- [4] FERESIDIS A P, GOUSSETIS G, WANG S H, et al. Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(1): 209-215.
- [5] YANG F, RAHMAT-SAMII Y. *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [6] ENCINAR J A. Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(10): 1403-1410.
- [7] HUANG J, POGORZELSKI R J. A Ka-band microstrip reflectarray with elements having variable rotation angles[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, 46(5): 650-656.
- [8] MCGRATH D. Planar three-dimensional constrained lenses[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(1): 46-50.
- [9] DATTHANASOMBAT S, PRATA A, ARNARO L R, et al. Layered lens antennas[C]//*Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Piscataway: IEEE Press, 2001: 777-780.
- [10] YANG X, XU S H, YANG F, 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.
- [11] YANG X, XU S H, YANG F, et al. A mechanically reconfigurable reflectarray with slotted patches of tunable height[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(4): 555-558.
- [12] CARRASCO E, TAMAGNONE M, PERRUISSEAU-CARRIER J. Tunable graphene-based reflectarray element for reconfigurable beams[C]//*Proceedings of 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1779-1782.
- [13] PEREZ-PALOMINO G, BARBA M, ENCINAR J A, et al. Design and demonstration of an electronically scanned reflectarray antenna at 100 GHz using multiresonant cells based on liquid crystals[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(8): 3722-3727.
- [14] TRAMPLER M E, LOVATO R E, GONG X. Dual-resonance continuously beam-scanning X-band reflectarray antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(8): 6080-6087.
- [15] TANG J W, XU S H, YANG F, et al. Design and measurement of a reconfigurable transmitarray antenna with compact varactor-based phase shifters[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(10): 1998-2002.
- [16] XU H J, XU S H, YANG F, et al. Design and experiment of a dual-band 1 bit reconfigurable reflectarray antenna with independent large-angle beam scanning capability[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(11): 1896-1900.
- [17] LUO C W, ZHAO G, JIAO Y C, et al. Wideband 1 bit reconfigurable transmitarray antenna based on polarization rotation element[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(5): 798-802.
- [18] DIABY F, CLEMENTE A, SAULEAU R, et al. 2 bit reconfigurable unit-cell and electronically steerable transmitarray at  $\text{SKaS}$ -band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(6): 5003-5008.
- [19] ZHANG Q S, ZHANG M T, SHI X W, et al. A low-profile

- beam-steering reflectarray with integrated leaky-wave feed and 2-bit phase resolution for ka-band SatCom[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 1884-1894.
- [20] WU B, SUTINJO A, POTTER M E, et al. On the selection of the number of bits to control a dynamic digital MEMS reflectarray[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2008, 7: 183-186.
- [21] YANG H H, YANG F, XU S H, et al. A study of phase quantization effects for reconfigurable reflectarray antennas[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 302-305.
- [22] XI B, XIAO Y, ZHU K Q, et al. 1-bit wideband reconfigurable reflectarray design in ku-band[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 4340-4348.
- [23] ZHOU S G, ZHAO G, XU H, et al. A wideband 1-bit reconfigurable reflectarray antenna at ku-band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(3): 566-570.
- [24] LUYEN H, ZHANG Z T, BOOSKE J H, et al. Wideband, beam-steerable reflectarray antennas exploiting electronically reconfigurable polarization-rotating phase shifters[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(6): 4414-4425.
- [25] MU Y J, WANG X Y, HUANG M L, et al. Ultra-wideband 1bit reconfigurable reflectarray based on tight coupling method[C]//*Proceedings of 2021 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-3.
- [26] ZHANG Y X, ZHAO Y C, LIANG S X, et al. Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(1): 153-170.
- [27] ZHAO Y C, ZHANG Y X, SHI Q W, et al. Dynamic photoinduced controlling of the large phase shift of terahertz waves via vanadium dioxide coupling nanostructures[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3040-3050.
- [28] XU H J, XU S H, YANG F, et al. Design of a terahertz reconfigurable reflectarray with individually controlled 1-bit phasing elements[C]//*Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 309-310.
- [29] VENKATESH S, LU X Y, SAEIDI H, et al. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(12): 785-793.
- [30] MONROE N M, DOGIAMIS G C, STINGEL R, et al. Electronic THz pencil beam forming and 2D steering for high angular-resolution operation: a 98-unit 265GHz CMOS reflectarray with in-unit digital beam shaping and squint correction[C]//*Proceedings of 2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-3.
- [31] CHEN H T, PADILLA W J, ZIDE J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [32] LIN Q W, WONG H, HUITEMA L, et al. Coding metasurfaces with reconfiguration capabilities based on optical activation of phase-change materials for terahertz beam manipulations[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(1): 2101699.
- [33] LI Q S, CAI X D, LIU T, et al. Gate-tuned graphene meta-devices for dynamically controlling terahertz wavefronts[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(9): 2085-2096.
- [34] MOGHADAS H, DANESHMAND M, MOUSAVI P, et al. Monolithic-integrated MEMS-tunable reflective cell for Ku-band mobile satellite two-way connectivity[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1384-1392.
- [35] NASERI P, RIEL M, DEMERS Y, et al. A dual-band dual-circularly polarized reflectarray for K/Ka-band space applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(6): 4627-4637.
- [36] LUO Q, GAO S, LI W T, et al. Multibeam dual-circularly polarized reflectarray for connected and autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3574-3585.
- [37] TONG X F, JIANG Z H, LI Y, et al. Dual-wideband dual-circularly-polarized shared-aperture reflectarrays with a single functional substrate for K-/Ka-band applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(7): 5404-5417.
- [38] BALADI E, XU M Y, FARIA N, et al. Dual-band circularly polarized fully reconfigurable reflectarray antenna for satellite applications in the ku-band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(12): 8387-8396.
- [39] SUPREEYATITIKUL N, TORRUNGRUENG D, PHONGCHAROE-NPANICH C. Quadri-cluster broadband circularly-polarized sequentially-rotated metasurface-based antenna array for C-band satellite communications[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 67015-67027.
- [40] ROTSHILD D, ABRAMOVICH A. Ultra-wideband reconfigurable X-band and Ku-band metasurface beam-steerable reflector for satellite communications[J]. *Electronics*, 2021, 10(17): 2165.
- [41] CUI T J, LIU S, BAI G D, et al. Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface[J]. *Research*, 2019(1): 1205-1216.
- [42] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(7): 417-420.
- [43] ZHANG L, CHEN M Z, TANG W K, et al. A wireless communication scheme based on space- and frequency-division multiplexing using digital metasurfaces[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(3): 218-227.
- [44] PAN X T, YANG F, XU S H, et al. W-band electronic focus-scanning by a reconfigurable transmitarray for millimeter-wave imaging applications[J]. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2020, 35(5): 580-586.
- [45] 吴优, 息荣艳, 潘笑天, 等. 基于相控电磁表面的 W 波段雷达系统研究[J]. *雷达学报*, 2021, 10(2): 281-287.
- WU Y, XI R Y, PAN X T, et al. Research on a phased electromagnetic surface-based W-band radar system[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 281-287.
- [46] HOUGNE P D, FINK M, LEROSEY G. Optimally diverse communication channels in disordered environments with tuned randomness[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(1): 36-41.
- [47] ELMOSSALLAMY M A, ZHANG H L, SULTAN R, et al. On spatial multiplexing using reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(2): 226-230.

## [作者简介]



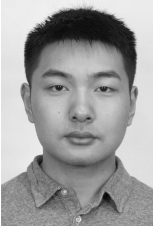
周嵩林 (1998—), 男, 四川彭州人, 清华大学博士生, 主要研究方向为界面电磁学理论、可重构反射阵天线。



唐隽文（1995- ），女，湖南永州人，博士，中国科学院空天信息创新研究院助理研究员，主要研究方向为天线理论、可重构天线、阵列天线等。



金一飞（1999- ），男，湖北武汉人，清华大学博士生，主要研究方向为界面电磁学、可重构反射阵天线技术等。



杨帆（1975- ），男，湖北武汉人，博士，清华大学教授，主要研究方向为天线、界面电磁学、计算电磁学、应用电磁系统。



吴优（1994- ），男，安徽安庆人，清华大学博士生，主要研究方向为可重构天线、太赫兹天线等。



许慎恒（1978- ），男，江苏苏州人，博士，清华大学副研究员，主要研究方向为新型应用系统中的高增益天线设计、人工电磁结构、电磁场与天线理论、优化算法研究和应用。



刘长昊（1998- ），男，重庆人，清华大学博士生，主要研究方向为界面电磁学的理论与应用、可重构电磁表面。



李懋坤（1979- ），男，辽宁锦州人，博士，清华大学副教授，主要研究方向为电磁场理论与计算电磁学，特别是电磁建模与数据反演快速算法及其在地球物理、生物医学等领域的应用。