

## 可增强信号覆盖范围的放大型信息超表面设计

吴利杰<sup>1,2</sup>, 杨汉卿<sup>1,2</sup>, 程强<sup>1,2,3</sup>, 崔铁军<sup>1,2,3</sup>

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096;  
3. 东南大学移动信息通信与安全前沿科学中心, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 传统信息超表面能对电磁波的幅度和相位做出动态调控, 在无线中继中控制电磁波的传播方向, 但并不能放大入射波的能量, 因此这类超表面的工作距离受限, 往往要通过较大的阵面面积来实现信号盲区的有效覆盖。为解决这一问题, 提出了一种放大型信息超表面, 并通过仿真验证了该信息超表面在 2.7~3.1 GHz 的宽带范围内具有 2 bit 的相位调制特性和信号放大能力。同时, 通过引入功率分配和功率合成网络, 使 8 个超表面单元组成一个 1×8 的阵列且只需使用一个放大器, 以减少放大器的数量, 从而降低硬件成本和系统能耗。仿真结果表明, 所提出的放大型信息超表面阵列在宽带范围内同时实现了波束成形和信号能量放大, 可应用于基于信息超表面的新型无线中继系统中, 为增强无线信号覆盖和减小超表面阵面尺寸提供了一种全新的解决方案。

**关键词:** 信息超表面; 无线中继系统; 放大型信息超表面; 信号放大

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022143

## Design of amplifying information metasurface for enhancing signal coverage

WU Lijie<sup>1,2</sup>, YANG Hanqing<sup>1,2</sup>, CHENG Qiang<sup>1,2,3</sup>, CUI Tiejun<sup>1,2,3</sup>

1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China

3. Frontiers Science Center for Mobile Information Communication and Security, Southeast University, Nanjing 210096, China

**Abstract:** Traditional information metasurfaces can be used in wireless relay systems to control the propagation direction of electromagnetic waves due to their capability to control the amplitude and phase. However, owing to the lack of signal amplification function, these metasurfaces have a limited operating distance. Thus, a large size of metasurfaces is usually demanded to realize the signal coverage of dead zones. To solve this problem, an amplifying information metasurface was designed to realize the 2 bit phase manipulation and signal amplification function within the broad band from 2.7 to 3.1 GHz. Furthermore, a power dividing and combining network was introduced to combine the 1×8 metasurface elements into an array with only one amplifier, which greatly reduced the number of amplifiers, the hardware cost, and the power consumption. The simulation results indicate that the array can realize beamforming and signal amplification over a broad band. Therefore, the proposed amplifying information metasurface array may find important applications in wireless relay systems and provide a new solution to enhancing the signal coverage and reducing the size of the metasurface array.

**Keywords:** information metasurface, wireless relay system, amplifying information metasurface, signal amplifying

收稿日期: 2022-07-29; 修回日期: 2022-10-10

通信作者: 崔铁军, tjcui@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.6228810001, No.61731010, No.62201139, No.62225108); 嵩山实验室基金资助项目 (纳入河南省重大科技专项管理体系) (No.221100211300-02, No.221100211300-03); 江苏省前沿科技攻关基础研究基金资助项目 (No.BK20212002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2242022k30004, No.2242022R10185)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.6228810001, No.61731010, No.62201139, No.62225108), The Program of Song Shan Laboratory (Included in the Management of Major Science and Program of Henan Province) (No.221100211300-02, No.221100211300-03), The Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu Province (No.BK20212002), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2242022k30004, No.2242022R10185)

## 0 引言

在过去的几年中,随着 5G 移动通信网络的部署及快速发展,人们逐渐将注意力转移到 6G 移动通信网络的开发上。随着物联网技术的快速发展,无处不在的无线连接将逐渐成为现实,这对 6G 移动通信网络的系统容量提出了更高的要求。同时,随着接入设备逐渐变多,如何增强小区内信号覆盖强度,提供更高的通信质量以及解决因越来越多的终端接入而带来的不可忽视的能耗问题,也成为迫切需要解决的问题。

在现有的 6G 技术方案中,超大规模天线系统可以利用高增益的阵列天线来增强小区内的信号覆盖强度,然而由于建筑物、植物等遮挡物的存在,在整个小区范围内依然会存在传输受阻的信号盲区,从而影响用户的流畅体验。为了解决这个问题,一种典型的方案是在小区内信号较差的位置引入中继设备来增强信号的覆盖范围以及提高用户的通信质量,以提供可靠的通信服务。但是面向未来 6G 移动通信的毫米波中继设备存在价格高昂、架构复杂、能耗高等缺点,无法适应 6G 移动通信系统的需求。因此,信息超表面凭借其独特的低成本、低能耗和简单架构的特点得到了广泛的关注。

传统超表面由大量精心设计的无源电磁单元在二维平面上按照周期或非周期特性排列而成<sup>[1]</sup>。不同于传统超表面,信息超表面在单元设计上引入 PIN (positive-intrinsic-negative) 二极管、变容二极管等可控元件,同时集成现场可编程门阵列、微控制单元等处理器,从而实现对空间电磁波智能的实时调控,形成幅度、相位、极化和频率可调谐的电磁场<sup>[2-11]</sup>。这种对电磁波出色的调控能力使信息超表面在无线通信领域也开始发挥着重要作用<sup>[12-24]</sup>。近些年来,不少研究专注于利用信息超表面作为一种新型无线中继,通过将其布置在室外或者室内环境,并结合已有的收发机实现对无线信道的联合优化,从而对无线信道环境进行重塑,提高信噪比,增大信号覆盖范围<sup>[25-32]</sup>,为未来 6G 移动通信系统提供简单高效的无线中继能力。基于信息超材料的新型无线中继系统如图 1 所示。当用户和信号之间的直接链路被树木遮挡时,信号可以通过在室外墙壁上的信息超表面反射。在这个过程中,人们可以通过控制超表面阵列的相位来使无线信号沿着所需方向中继,从而为无线通信系统提供补充链路和提高信号质量。

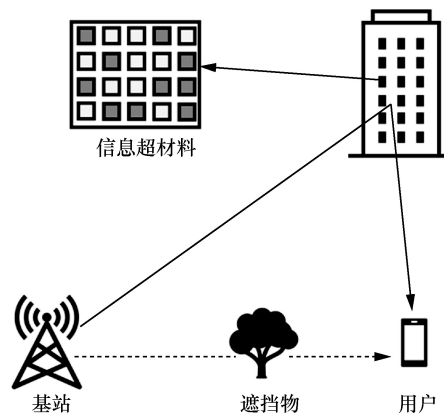


图 1 基于信息超材料的新型无线中继系统

但是,目前用于构造无线中继系统的信息超表面大多数不具有信号放大能力,这就大大地限制了其作用距离。在实际应用中,基于信息超表面的无线中继通信路径往往比正常的通信路径更长,这就导致了更多的路径损耗。为解决这一问题,人们通常会采用更大的信息超表面阵列来提高阵面增益,以保证信号强度,但是这又导致了更高的硬件成本。若所使用的超表面单元具有信号放大能力,则有希望解决这一难题。文献[33]提出了一种基于放大型超表面的单输入多输出系统的理论模型,并且通过数值仿真的方法验证了该系统优异的工作性能。文献[34]提出了一种放大型超表面单元的设计方法,但是该超表面中每个单元后面都带有放大电路,结构较复杂和庞大且成本较高,限制了其在实际系统中的应用。

在此前放大型反射阵列天线的设计中,研究者通过在贴片天线单元上加加载放大器,有效地增强了天线阵列的增益<sup>[35-37]</sup>。他们将这种设计思路拓展到了超表面,通过加载简单放大器元件或者复杂放大器电路来控制散射波束以实现非互易效应<sup>[38-39]</sup>、反射波增强<sup>[40-42]</sup>、非线性特性<sup>[43-45]</sup>,乃至构建可编程衍射神经网络<sup>[46]</sup>等功能。但上述放大型反射阵列天线或超表面只能工作在窄带,甚至不具备动态的相位调制能力。更重要的是,以上多数设计中,通常每个单元都要加载一个放大器,这就导致了更高的硬件成本和功率消耗。这些缺陷大大地限制了它们在通信领域的应用,尤其是在要求低能耗、低成本、大带宽的新型无线中继系统中。

为了解决以上问题,本文提出了一种在宽带内可以实现能量放大功能和 2 bit 相位调制能力的放大型信息超表面单元结构。同时,通过引入功率合

成和功率分配网络, 一个  $1 \times 8$  的超表面阵列只需加载单个放大器, 就可以在完成反射波束有效成形的同时实现超过 10 dB 的信号能量放大效果。这种设计大大地减少了超表面的阵面面积和放大器的数量, 从而可以降低基于信息超表面的无线中继系统的硬件成本。

相比于一般的有源中继收发天线分离、微波链路复杂和有源器件较多的设计, 本文提出的放大型信息超表面采用收发阵列一体化的设计, 且该结构中仅包含二极管和单个放大器件, 具有架构简单、微波链路少的特点, 可以有效地减小系统成本和能耗。而且, 本文提出的放大型信息超表面在具备了信号放大能力的同时, 还兼顾了传统信息超表面通过低成本可控元件实现波束动态调控的特点, 这是一般的有源中继所无法做到的。综上所述, 若引入放大型信息超表面, 在如图 1 所示的工作场景中, 相比于传统的信息超表面, 它可以提供更大的信号强度, 从而增大信号的覆盖范围。同时, 相比于一般有源中继, 放大型超表面能以更低的成本和能耗实现波束的动态调控和信号能量的放大。

本文的主要工作介绍如下。

1) 设计具有宽带特性的反射式 2 bit 放大型信息超表面的单元结构。已有的放大型超表面结构无法在宽带范围内同时实现能量的放大和相位的动态调节。本文给出了一种新的结构设计, 使信息超表面在一个宽带的范围内同时实现了 2 bit 调相和能量放大的效果。

2) 以减小能耗和降低成本为目标, 引入了功率合成和功率分配网络, 将所设计的超表面单元进行组阵, 在保证超表面工作性能不恶化的情况下, 大大地减少了放大器的使用, 使其更加符合实际应用。

3) 仿真结合理论计算验证了该宽带放大型信息超表面组阵后的工作性能。结果表明, 本文提出的放大型信息超表面能够有效地实现反射波束成形和信号能量放大的效果, 大大地提升了阵面的增益, 可以实现无线信号的覆盖增强, 同时具有低成本、低能耗的优点。

## 1 单元结构

本节介绍一种具有宽带特性的反射式 2 bit 放大型信息超表面单元结构的设计。该 2 bit 信息超

表面主要由一个 1 bit 的信息超表面结构和一个可以在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  这 2 种相位状态切换的移相器组合而成。在加载放大器后, 该信息超表面单元在一个相对较宽的频带内可以实现 2 bit 的相位调制和能量放大。

### 1.1 1 bit 单元结构设计

1 bit 单元结构的三维视图如图 2(a)所示, 其主要由辐射贴片层、微带缝隙层和金属背板层构成。最上方的辐射贴片层由顶部的金属辐射贴片和其下方的 FR4 介质构成, 其俯视图如图 2(b)所示, 其中的金属辐射贴片沿  $x$  方向和  $y$  方向的尺寸 ( $a_x$  和  $a_y$ ) 均为 30.87 mm, 而 FR4 介质的厚度为 1 mm, 其相对介电常数  $\epsilon_r=2.2$ , 损耗角正切  $\tan \delta=0.025$ 。中间的微带缝隙层由金属缝隙层、金属微带线层和两者之间的 Rogers 4350B 介质构成, 其俯视图如图 2(c)所示, 其中, Rogers 4350B 介质的厚度为 0.762 mm, 相对介电常数  $\epsilon_r=2.2$ , 损耗角正切  $\tan \delta=0.0037$ 。最底部的金属背板层被放置在距离微带缝隙层 30 mm 的下方来避免微带缝隙层所产生的背向辐射, 同时可以提高结构的整体效率。同样地, 辐射贴片层也被置于距离微带缝隙层 9 mm 的上方以实现两层之间较好的阻抗匹配。该结构三层之间都由空气介质填充, 层与层之间在后续的设计加工中可以通过螺钉结构连接在一起。

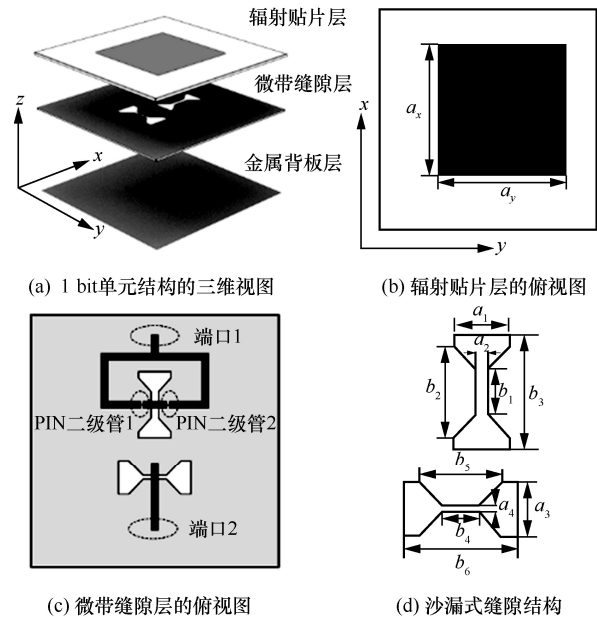


图 2 1 bit 信息超表面的单元结构

该 1 bit 信息超表面的工作机理如下。上方的金属贴片被用来接收  $x$  极化的信号, 信号能量

由金属贴片耦合到微带缝隙层的缝隙并进一步耦合到该缝隙对应的微带线上, 只需将图 2(c) 的端口 1 和端口 2 使用微带线进一步连接起来, 然后在该微带线上加载放大器就可以实现信号能量的放大。经过放大后的信号可以从端口 1 所对应的微带线上进一步耦合到相对应的缝隙, 最后通过上方的金属贴片以  $y$  极化的方式重新辐射出去。

在这个过程中, 反射波的 1 bit 相位调制主要通过端口 1 所对应的微带路径上的 PIN 二极管不同的通断状态来实现调控。如图 2(c) 所示, 当 PIN 二极管 1 呈导通状态、PIN 二极管 2 呈断开状态时, 信号能量从端口 1 进入, 随后沿着左侧的微带路径耦合到缝隙上; 相反, 当 PIN 二极管 1 呈断开状态、PIN 二极管 2 呈导通状态时, 信号能量从端口 1 进入, 随后沿着右侧的微带路径耦合到缝隙上。这样一来, 在这 2 种不同的 PIN 二极管的通断状态下, 信号的能量正好实现了一个反相的状态。而且由于这是几何结构上的一种对称特性, 因此这种反相的状态可以保持在一个比较宽的频带内。同时, 为了使这种缝隙耦合的贴片式单元具有一个较大的工作带宽, 本文设计了一种沙漏式的缝隙结构, 如图 2(d) 所示。该结构可以在一个较宽的频率范围内提高金属贴片和缝隙之间的阻抗匹配程度, 并在两者之间实现更好的能量耦合<sup>[47-49]</sup>。

2 个沙漏式缝隙结构的相关参数如下:  $a_1=7.80$  mm,  $a_2=1.80$  mm,  $a_3=7.95$  mm,  $a_4=0.95$  mm;  $b_1=6.25$  mm,  $b_2=12.80$  mm,  $b_3=8.50$  mm,  $b_4=5.70$  mm,  $b_5=12.55$  mm,  $b_6=17.60$  mm。在该结构中, 微带线的宽度被设置为 1.65 mm, 这使其在 3 GHz 时具有  $50 \Omega$  的特征阻抗, 从而可以与加载在微带线结构上的放大器实现一个良好的阻抗匹配。

按照以上设计, 本文利用全波仿真软件 CST Microwave Studio 2016 对该结构的两端口  $S$  参数进行了仿真, 结果如图 3 所示。从图 3(a) 和图 3(b) 中可以看到, 在 2 种不同的相位状态下, 端口 1 和端口 2 的反射系数在 2.7~3.2 GHz 内都保持小于 -10 dB 的状态, 2 种状态的相位差则保持在  $176^\circ \sim 180^\circ$ , 这表明该 1 bit 信息超表面单元可以在一个较宽的频带内实现较好的反射效率和相位调制。除此之外, 从图 3(a) 的  $S_{21}$  曲线和图 3(b) 的  $S_{12}$  曲线可以看出, 在工作频带内, 由于端口 1 和端口 2 是交叉极化的, 因此它们之间保持着大

于 40 dB 的隔离度。这样的高隔离度设计可以保证后续在加载放大器时其对应的电路可以实现较好的稳定性<sup>[36]</sup>。

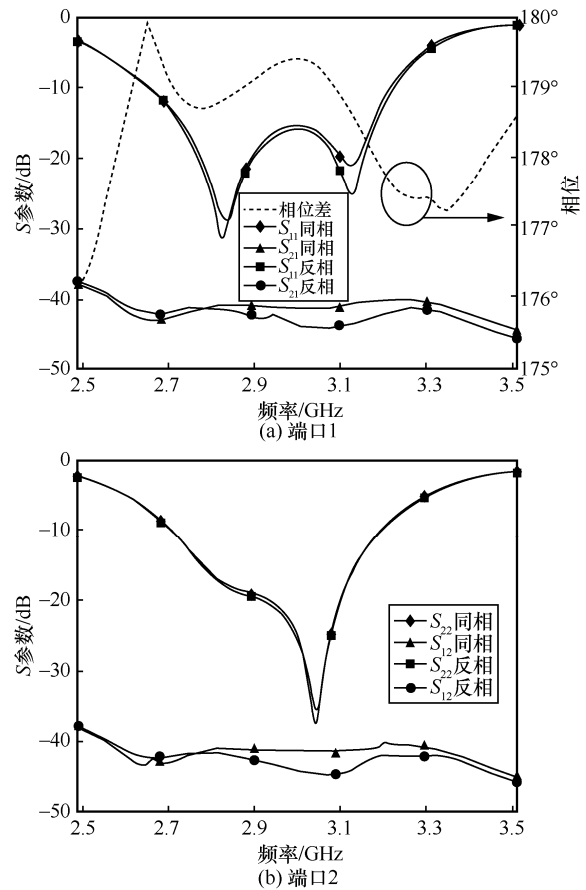


图 3 不同状态时的相位差及端口 1 和端口 2 的  $S$  参数

## 1.2 $0^\circ/90^\circ$ 移相器设计

在 1.1 节中, 一个具有 1 bit 相位调制功能的反射式信息超表面已经被成功设计并得到了仿真的验证。本节的主要内容是设计一种  $0^\circ$  和  $90^\circ$  可以切换的移相器, 该移相器可以加载在此前的 1 bit 单元中, 从而实现 2 bit 的相位调制功能。

传统的开关线型移相器需要用 4 个开关控制电路状态来切换相移, 其成本较高, 且开关控制的 2 个微带传输路径之间需要隔开较远的距离, 以实现较好的隔离, 来避免耦合所造成的衰减和相位误差, 这就导致该传统结构具有较大的尺寸。为了克服以上问题, 本节采用了一种小型化、低成本的  $0^\circ/90^\circ$  开关线型移相器, 其整体结构如图 4 所示。该移相器整体印制在厚度为 0.762 mm 的 Rogers 4350B 介质上, 以便后续集成到已有的 1 bit 信息超表面单元上。

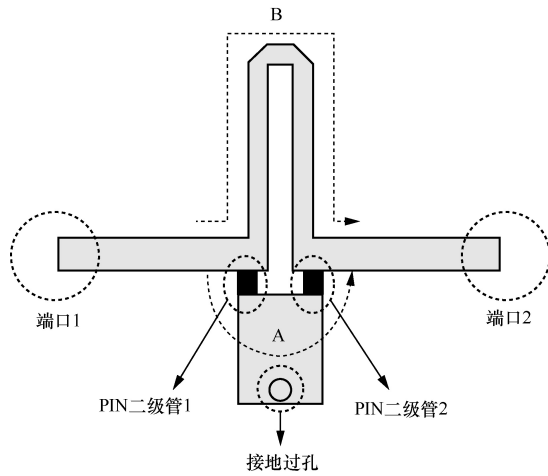


图 4 0°/90°移相器结构

该移相器主要通过控制 PIN 二极管的通断状态来实现 0°和 90°的相位状态的切换,其工作机理介绍如下。当 PIN 二极管 1 和 PIN 二极管 2 呈断开状态时,信号从端口 1 沿着路径 B 抵达端口 2;当 PIN 二极管 1 和 PIN 二极管 2 呈导通状态时,信号从端口 1 沿着路径 A 抵达端口 2。通过精心设计路径 B 上的两段弯折传输线的长度及其之间的缝隙宽度、路径 A 所经过的金属贴片的大小,该结构可以很容易地实现由于传输路径长短所造成的 90°相位差,同时大大地减小了移相器的尺寸。

本文利用全波仿真的方法对移相器端口 1 和端口 2 的 S 参数进行了分析,以验证该移相器设计的可行性,仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,在 2.7~3.2 GHz 的频率范围内,移相器在 2 种不同状态下的传输损耗均小于 1 dB,且端口 1 的反射系数均小于 -10 dB,同时其带内的相位差变化约为 80°~100°。因此,本文所设计的移相器具有小型化、低成本、低损耗和相移性能良好的特性。

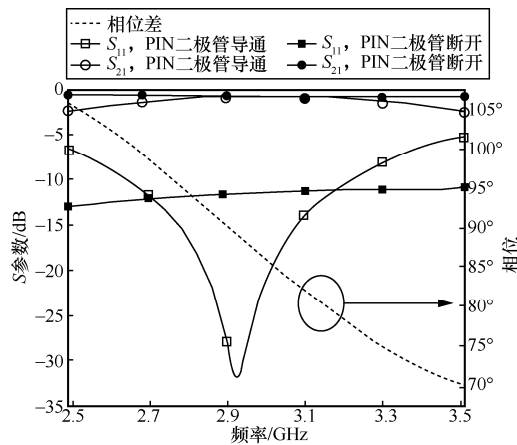


图 5 0°/90°移相器端口的 S 参数

### 1.3 2 bit 单元结构设计

结合 1.1 节和 1.2 节的设计,本节主要是将此前的 1 bit 单元结构和 0°/90°移相器结合起来以实现一个具有 2 bit 相位调制功能的单元结构,同时探索该结构在未加载放大器以及加载放大器之后的综合性能。

该 2 bit 放大型信息超表面的单元结构整体依然与图 2(a)中的 1 bit 信息超表面的单元结构一样,同样由辐射贴片层、微带缝隙层和金属背板层构成,整体单元尺寸没有发生变化,且辐射贴片层的金属贴片大小以及微带缝隙层的金属缝隙结构都没有改变,唯一不同于 1 bit 信息超表面单元的是其在微带缝隙层中的微带线结构进行了调整,调整后的结构如图 6 所示。从图 6 中可以看到,相比于图 2(c),现结构在原来端口 1 的微带路径后添加了 1.2 节设计的 0°/90°移相器结构。按照目前的设计,该单元可以接收 x 极化的信号,并将其通过一个放大器进行信号能量放大,随后以 y 极化的方式将信号辐射出去且所辐射的 y 极化信号具有 2 bit 的相位调制能力。该单元结构的主要工作机制同 1.1 节所述,其主要通过顶层的辐射贴片接收 x 极化信号,然后能量被耦合到金属缝隙上并进一步耦合到对应的微带路径上,通过放大器后,经过放大的信号通过微带线耦合到另一金属缝隙进而以 y 极化的形式经辐射贴片辐射出去。

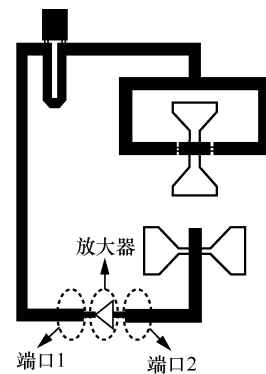


图 6 2 bit 单元结构的微带缝隙层的俯视图

为分析该 2 bit 单元结构的相位调制特性,本文首先在不加载放大器的情况下,利用全波仿真的方法,通过激励端口 1 并且在结构上方添加电场探针,可以得到该结构在 4 种不同状态下的相位。在设计中,本文通常将其中一种状态定义为 S<sub>0</sub>,其他状态的相位按照 S<sub>0</sub>的相位进行归一化,由此就可以得到

如图 7 所示的不同状态下的相位。从图 7 中可以看到，在 2.7~3.2 GHz 的工作范围内，状态  $S_1 \sim S_3$  的相位分别为  $85^\circ \sim 95^\circ$ 、 $170^\circ \sim 175^\circ$  和  $-110^\circ \sim -95^\circ$ ，这体现了该放大型信息超表面单元在一个较宽频带内具有良好的 2 bit 的相位调制能力，这种宽带的相位调制能力是传统的信息超表面所不具备的。

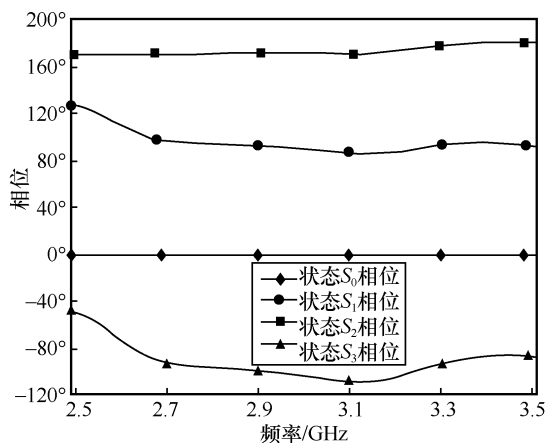


图 7 2 bit 结构在不同状态下的相位

传统的信息超表面多采用单谐振式的结构设计<sup>[9-12]</sup>，通过调节谐振的频点来实现相位的调制，这就导致了它们只能在一个较窄带的范围内实现相位调制能力。不同于这样的设计，本文采用了接收再辐射的单元设计形式，通过合理设计接收和发射单元并结合宽带的 1 bit 相位调制结构以及  $0^\circ/90^\circ$  移相器，最终实现了如上文所述的宽带的 2 bit 相位调制能力。

考虑该 2 bit 单元结构在未加载放大器时的工作特性，即利用全波仿真软件对端口 1 和端口 2 的  $S$  参数进行仿真，2 个端口在不同的相位调制状态下的  $S$  参数的仿真结果如图 8 所示。从图 8 中可以看到，在 4 种不同的相位状态下，端口 2 的反射系数  $S_{22}$  在 2.7~3.2 GHz 都保持小于  $-10$  dB 的状态，而端口 1 的反射系数  $S_{11}$  在 3.1 GHz 之后超过  $-10$  dB，这是因为所添加的移相器单元结构与缝隙之间的结构产生了一定的耦合，但是其在 2.7~3.1 GHz 内依然保持小于  $-10$  dB 的状态。除此之外，从图 8(a) 的  $S_{21}$  和图 8(b) 的  $S_{12}$  曲线可以看出，相比于 1 bit 单元的情况，端口 1 和端口 2 之间的隔离度有所恶化，但是依然大于 30 dB，这保证了端口 1 和端口 2 之间加载的放大器可以正常工作。

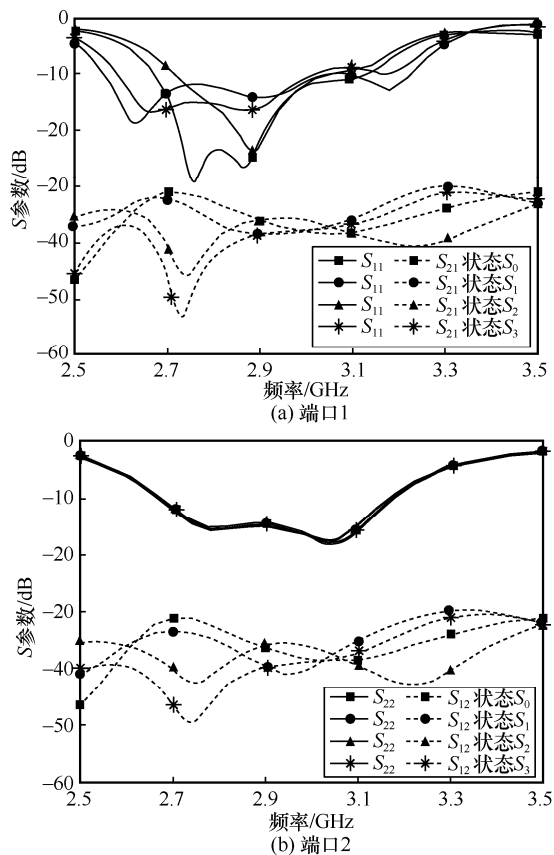


图 8 2 个端口在不同的相位调制状态下的  $S$  参数的仿真结果

综上所述，本节所设计的 2 bit 单元具有良好的相位调制能力且在各个相位状态下也能保持较好的工作状态，如图 6 所示，其只需要在该结构的端口 1 和端口 2 之间加载一个放大器，即可实现信号的放大功能。下面本文将研究该 2 bit 信息超表面单元在加载放大器下的工作状态，首先在实际设计中，本文选用 LEE-39+ 作为所需的放大器，它可以在 2.7~3.2 GHz 内提供  $17.5 \sim 18.5$  dB 的增益，同时具有良好的温度稳定性、低噪声特性和低能耗特性。

本文所设计的 2 bit 放大型信息超表面在正入射的情况下的工作特性如图 9 所示，其中， $R_{x-y}$  表示该单元接收  $x$  极化波而反射  $y$  极化波的转化效率，在 4 种不同的相位情况下，该结构在未加载放大器且选择直接用微带线连接端口 1 和端口 2 时，可以在 2.7~3.1 GHz 的频带内保持大概  $-5$  dB 的反射效率。在加载了放大器后，该结构可以在 2.7~3.1 GHz 保持着至少 10 dB 的增益，这意味着反射后的  $y$  极化波的能量是原先入射的  $x$  极化波的 10 倍以上。

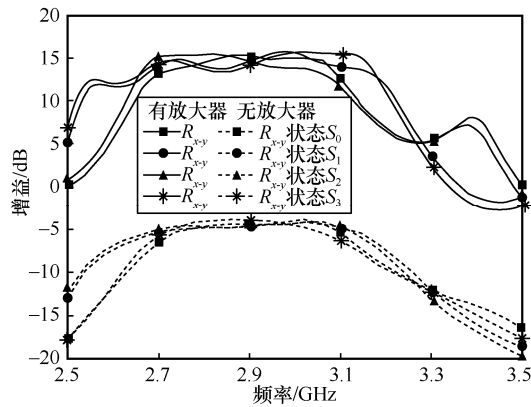


图 9 2 bit 放大型信息超表面在正入射的情况下的工作特性

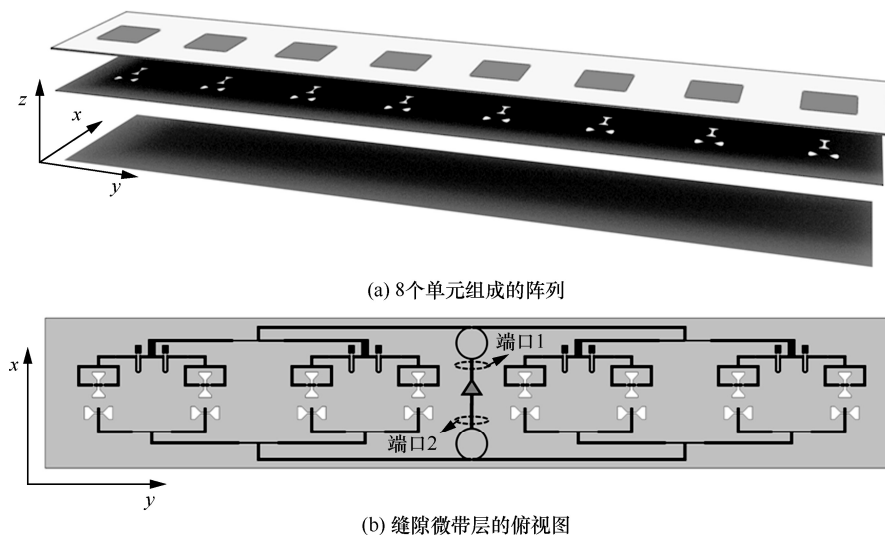
综上所述，该放大型信息超表面单元可以在 2.7~3.1 GHz 的频率范围内（即相对工作带宽为 13.7%）同时实现 2 bit 的相位调制能力和信号能量放大功能。这种宽带范围内的相位调制能力和信号能量放大功能是此前的放大型超表面所不具备的<sup>[38-42]</sup>。

## 2 组阵结构

如第 1 节所述，本文提出的放大型信息超表面具有良好的相位调制能力和优异的信号能量放大功能。但是在该设计中，每个超表面单元都要单独加载一个放大器，当进行实际组阵时，这样的设计结构会使实际阵面需要加载大量的放大器，毫无疑问会大大地增加整体阵列的成本和能耗。同样，已有的放大型超表面设计也有着相同的问题。许多超表面单元都需要单独加载一个放大器<sup>[38, 40-41]</sup>，有的单元甚至需要加载 2 个<sup>[39]</sup>。相比于其所带来的信号能量放大的效果，过高的成本和能耗让这样的设计

有些得不偿失。为了解决这个问题，文献[50]考虑采用多个超表面单元组阵使用一个放大器的方法，并从理论上验证了该方法有利于提高放大型超表面的能量效率，但是该文献中并未提出超表面单元组阵的实际物理结构及探讨其组阵后的实际物理性能。文献[42]通过引入了功率合成网络和功率分配网络的设计，将 4 个放大型超表面单元组成了 2×2 的子阵，使其共用一个放大器以节约成本和降低能耗。但是在该设计中，研究者并未在超表面单元上引入相位调制结构，这就导致所述的放大型超表面单元并不具备相位调控能力，所形成的超表面阵面并不能对波束实现动态调控。需要指出的是，文献[42]的组阵形式即使具备相位调制能力，也会因为其不合理的子阵设计导致波束扫描过程中产生不可避免的栅瓣。为了解决上述问题，本节也通过引入了功率合成和功率分配网络的设计，将 8 个单元进行 1×8 形式的组阵，使其仅使用一个放大器。这样的组阵设计在大大减少放大器使用的同时避免了波束扫描过程中栅瓣的影响。接下来，本文通过仿真验证了该阵列可以实现对反射波束的灵活调控和信号能量放大的效果。

8 个单元组成的阵列如图 10(a)所示，其由单元沿 y 方向进行组阵而构成，同时为了给图 10(b)所示的金属微带层上所引入的功率分配网络和功率合成网络留出空间，整体的单元尺寸沿 x 方向进行了一些拓展，其余结构的尺寸和原来一样保持不变。该阵列的工作机理如下。首先顶部的辐射贴片层接收 x 极化的电磁波信号，经过金属缝隙层耦合到各个单



(a) 8个单元组成的阵列

(b) 缝隙微带层的俯视图

图 10 8 个单元组成的阵列的和缝隙微带层的俯视图

元所对应的微带线上，信号能量经由功率合成网络至端口 2。然后信号能量通过放大器后得到放大，放大后的信号通过端口 1 经功率分配网络进入各个单元的微带路径上。最后通过金属缝隙层进一步耦合到辐射贴片层，辐射出  $y$  极化的电磁波信号。这样的设计大大地减少了放大器的使用，降低了放大型信息超表面的成本和能耗。

放大型信息超表面单元进行如图 10 所示的组阵之后，可以通过调制各个单元的相位状态来实现反射波束成形。本文利用全波仿真的方法，在平面波垂直入射的情况下，对所组成的阵列的反射波束的情况进行仿真，当控制 8 个单元的编码状态分别为 0-0-0-0-0-0-0-0、3-2-2-1-1-0-0-0、1-0-3-2-1-0-3-2 和 3-1-0-3-1-0-3-2（其中，0、1、2、3 分别指单元的状态  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ）时，阵列可以使反射波束偏向  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $30^\circ$  的位置。同理，只要将编码顺序反向，阵列则可以使反射波束偏向  $0^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $-20^\circ$  和  $-30^\circ$  的位置。通过控制阵列上的单元呈现不同的编码状态，在 3 GHz 时超表面阵列的水平面扫描角情况如图 11 所示。从图 11 中可以看到，在不同的编码序列下，本文所设计的信息超表面阵列可以将反射波束的出射角度在水平面上从  $-30^\circ$  调节到  $30^\circ$ 。同时，相比于未加载放大器的超表面，该放大型超表面还可以使反射波束的能量相比于入射时得到了 10 dB 的放大。

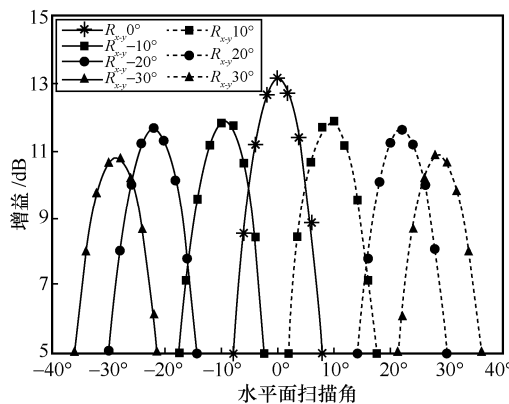


图 11 3 GHz 时超表面阵列的水平面扫描角

不同扫描角下阵列的增益如图 12 所示。从图 12 中可以看到，当控制反射波束在  $0^\circ$  方向上反射时，阵列在 2.7~3.1 GHz 的频率范围内都可以实现 10 dB 的反射能量放大的效果。当控制反射波束在其他角度方向上反射时，阵列在工作频率范围内的放大效果相比于  $0^\circ$  时会变得差一些。这是因为在波束进行水平面扫描角时，阵列中的单元需要处于

不同编码状态，这样会使单元之间产生更大的耦合，从而导致整体的能量放大效果的恶化。总体来说，该阵列在垂直入射的情况下对反射的电磁波进行了很好的波束成形和能量放大的效果，同时还减少了放大器的使用，降低了成本和能耗。

为了表明本文提出的放大型信息超表面阵列结构的宽带的信号放大能力和相位调制能力以及低成本的特性，本文列举了其他传统信息超表面单元和部分放大型信息超表面单元的工作来进行对比，如表 1 所示。从表 1 中可以看出，相比于其他超表面单元的工作，本文在一个宽带的范围内兼顾了相位调制能力和信号能量放大效果，而且相比于其他放大型信息超表面，本文大大减少了放大器的使用，很大程度上降低了硬件成本和系统能耗。

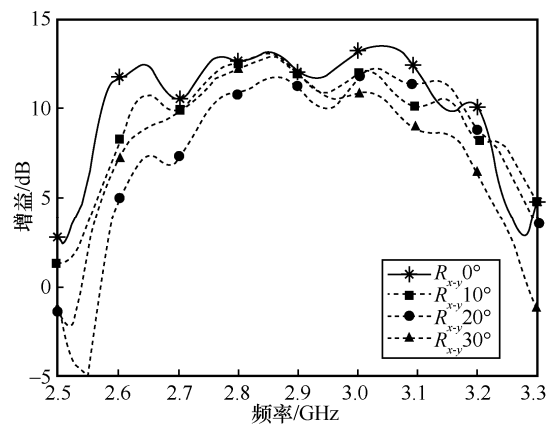


图 12 不同扫描角下阵列的增益

表 1 不同信息超表面的性能对比

相关工作	工作带宽	调相能力	放大效果	放大器数量
文献[9]	<5.0%	2 bit	无	无
文献[10]	<5.0%	2 bit	无	无
文献[11]	7.7%	2 bit	无	无
文献[12]	<5.0%	2 bit	无	无
文献[38]	8.2%	无	0~10 dB	1 个/单元
文献[39]	<5%	无	0~20 dB	2 个/单元
文献[40]	5.5%	无	0~6 dB	1 个/单元
文献[41]	6.8%	无	0~20 dB	1 个/单元
文献[42]	18.2%	无	0~12 dB	$\frac{1}{4}$ 个/单元
本文工作	13.7%	2 bit	0~13 dB	$\frac{1}{8}$ 个/单元

### 3 结束语

本文针对信息超表面应用于无线中继系统时信号覆盖范围有限的问题，设计了一种具有电磁能量放

大功能的反射式 2 bit 放大型信息超表面单元。该放大型超表面单元可以在 2.7~3.1 GHz 的宽带范围内同时实现 2 bit 的相位调制和 10 dB 以上的信号能量放大效果。同时, 本文在将单元进行组阵的情况下, 通过引入功率合成和功率分配网络来减少放大器的使用, 以实现降低成本和能耗的作用。由超表面单元所组成的阵列的仿真结果表明, 本文所设计的放大型超表面阵列可以有效地实现反射波束成形和信号能量放大。

需要指出的是, 本文旨在提出一种放大型信息超表面及其阵列的设计思路, 作为原有信息超表面的延拓。本文通过选择 2.7~3.1 GHz 的频段验证了本文所提出的放大型信息超表面在宽带范围内的放大以及相位调制能力。在后续的实际应用中, 可以根据实际的通信频段的需求, 合理地设计所需要的放大型信息超表面, 从而使其仅在自身系统的频带内工作, 避免对其他系统的干扰和恶化以及对公共电磁环境的影响。

综上所述, 基于本文的设计思路, 还可以设计相关的放大型信息超表面来应用到基于信息超表面的新型无线中继系统中, 为增大无线信号覆盖范围提供一种新的解决方案。

#### 参考文献:

- [1] YU N F, 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.
- [2] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [3] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(15): 3644-3668.
- [4] ZHANG L, CHEN X Q, LIU S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4334.
- [5] ZHANG L, WU R Y, BAI G D, et al. Transmission-reflection-integrated multifunctional coding metasurface for full-space controls of electromagnetic waves[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(33): 1802205.
- [6] DAI J Y, ZHAO J, CHENG Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 90.
- [7] GAO X, YANG W L, MA H F, et al. A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6086-6095.
- [8] ZHANG L, CHEN X Q, SHAO R W, et al. Breaking reciprocity with space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(41): 1904069.
- [9] MA Q, BAI G D, JING H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 98.
- [10] DAI J Y, YANG J, TANG W K, et al. Arbitrary manipulations of dual harmonics and their wave behaviors based on space-time-coding digital metasurface[J]. *Applied Physics Reviews*, 2020, 7(4): 041408.
- [11] KE J C, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Linear and nonlinear polarization syntheses and their programmable controls based on anisotropic time-domain digital coding metasurface[J]. *Small Structures*, 2021, 2(1): 2000060.
- [12] DAI J Y, TANG W K, ZHAO J, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900044.
- [13] TANG W K, CHEN M Z, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: new paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 180-187.
- [14] 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.
- [15] DAI J Y, TANG W K, YANG L X, et al. Realization of multi-modulation schemes for wireless communication by time-domain digital coding metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1618-1627.
- [16] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: system design, analysis, and implementation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2683-2699.
- [17] HAN Y, LI X, TANG W K, et al. Dual-polarized RIS-assisted mobile communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(1): 591-606.
- [18] CHEN M Z, TANG W K, DAI J Y, 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*, 2021, 9(1): 31-41.
- [19] 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.
- [20] HUANG C X, ZHANG J J, CHENG Q, et al. Polarization modulation for wireless communications based on metasurfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(36): 2103379.
- [21] DAI J Y, TANG W K, CHEN M Z, et al. Wireless communication based on information metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(3): 1493-1510.
- [22] CHEN X Y, KE J C, TANG W K, et al. Design and implementation of MIMO transmission based on dual-polarized reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(10): 2155-2159.
- [23] CUI T J, LIU S, BAI G D, et al. Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface[J]. *Research*, 2019, 2019: 2584509.
- [24] 梁竟程, 陈伟聪, 程强, 等. 基于信息超表面的无线通信(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 324-339.
- [25] LIANG J C, CHEN W C, CHENG Q, et al. Wireless communications based on information metasurfaces(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 324-339.
- [26] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106-112.
- [27] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [28] WANG P L, FANG J, YUAN X J, et al. Intelligent reflecting sur-

- face-assisted millimeter wave communications: joint active and passive precoding design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14960-14973.
- [28] HAN Y, TANG W K, JIN S, et al. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8238-8242.
- [29] WU Q Q, ZHANG R. Weighted sum power maximization for intelligent reflecting surface aided SWIPT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 586-590.
- [30] XU Y J, XIE H, WU Q Q, et al. Robust max-min energy efficiency for RIS-aided HetNets with distortion noises[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(2): 1457-1471.
- [31] 徐勇军, 高正念, 王茜竹, 等. 基于智能反射面辅助的无线供电通信网络鲁棒能效最大化算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2317-2324.
- XU Y J, GAO Z N, WANG Q Z, et al. Robust energy efficiency maximization algorithm for intelligent reflecting surface-aided wireless powered-communication networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(7): 2317-2324.
- [32] 黎赛, 杨亮, 崔琪楣, 等. RIS 辅助的混合 RF/THz 系统性能分析[J]. 通信学报, 2022, 43(1): 49-58.
- LI S, YANG L, CUI Q M, et al. Performance analysis of RIS-assisted mixed RF/THz system[J]. Journal on Communications, 2022, 43(1): 49-58.
- [33] LONG R Z, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 4962-4975.
- [34] ZHANG Z J, DAI L L, CHEN X B, et al. Active RIS vs. Passive RIS: which will prevail in 6G[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2103.15154, 2021.
- [35] BIALKOWSKI M E, ROBINSON A W, SONG H J. Design, development, and testing of X-band amplifying reflectarrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(8): 1065-1076.
- [36] KISHOR K K, HUM S V. An amplifying reconfigurable reflectarray antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 197-205.
- [37] YANG X, XU S H, YANG F, et al. A distributed power-amplifying reflectarray antenna for EIRP boost applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2742-2745.
- [38] WANG X, HAN J Q, TIAN S C, et al. Amplification and manipulation of nonlinear electromagnetic waves and enhanced nonreciprocity using transmissive space-time-coding metasurface[J]. Advanced Science, 2022, 9(11): 2105960.
- [39] MA Q, CHEN L, JING H B, et al. Controllable and programmable nonreciprocity based on detachable digital coding metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(24): 1901285.
- [40] QIU T S, JIA Y X, WANG J F, et al. Controllable reflection-enhancement metasurfaces via amplification excitation of transistor circuit[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(3): 1477-1482.
- [41] TARAVATI S, ELEFTHERIADES G V. Full-duplex reflective beamsteering metasurface featuring magnetless nonreciprocal amplification[J]. Nature Communications, 2021, 12: 4414.
- [42] WU L J, LOU K, KE J C, et al. A wideband amplifying reconfigurable intelligent surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(11): 10623-10631.
- [43] LUO Z J, WANG Q, ZHANG X G, et al. Intensity-dependent metasurface with digitally reconfigurable distribution of nonlinearity[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(19): 1900792.
- [44] LUO Z J, CHEN M Z, WANG Z X, et al. Digital nonlinear metasurface with customizable nonreciprocity[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(49): 1906635.
- [45] LUO Z J, REN X Y, ZHOU L, et al. A high-performance nonlinear metasurface for spatial-wave absorption[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(16): 2109544.
- [46] LIU C, MA Q, LUO Z J, et al. A programmable diffractive deep neural network based on a digital-coding metasurface array[J]. Nature Electronics, 2022, 5(2): 113-122.
- [47] BILGIC M M, YEGIN K. Wideband high-gain aperture coupled antenna for ku band phased-array systems[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55(6): 1291-1295.
- [48] KUMAR G, RAY K P. Broadband microstrip antennas: artech house[R]. 2003.
- [49] PAULA I L D, LEMEY S, BOSMAN D, et al. Cost-effective high-performance air-filled SIW antenna array for the global 5G 26 GHz and 28 GHz bands[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(2): 194-198.
- [50] LIU K Z, ZHANG Z J, DAI L L, et al. Active reconfigurable intelligent surface: fully-connected or sub-connected?[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(1): 167-171.

## [作者简介]



吴利杰 (1997-), 男, 浙江丽水人, 东南大学博士生, 主要研究方向为信息超表面、可重构智能超表面等。



杨汉卿 (1998-), 男, 江苏盐城人, 东南大学博士生, 主要研究方向为信息超表面、可重构超表面等。



程强 (1979-), 男, 安徽黄山人, 博士, 东南大学教授, 主要研究方向为电磁超材料和信息超材料。



崔铁军 (1965-), 男, 河北承德人, 博士, 中国科学院院士, 东南大学教授, 主要研究方向为计算电磁学、智能电磁计算、电磁超材料和信息超材料等。