

可编程超表面实现双极化独立多波束反射阵天线设计

张娜, 陈克*, 王逊凡, 赵健民, 赵俊明, 冯一军

(南京大学电子科学与工程学院, 南京, 210023)

摘要 多波束反射阵天线因其制备简单、成本低、波束调控灵活等优势而备受关注。基于极化复用的可编程超表面提出了一种双极化通道独立波束动态调控的多波束反射阵天线设计方法,并结合方向图快速计算与优化算法,实现了快速的编码序列优化与方向图预测。理论分析与全波仿真分析结果显示,反射阵天线在双极化通道下具有良好的辐射性能,主瓣辐射方向与理论计算结果一致。作为实验验证,加工了实物样件并在标准微波暗室中进行了测试。测试结果与仿真分析结果吻合良好,证明独立波束调控的双极化反射阵天线具有多通道电磁波辐射能力,有望应用于无线通信与多目标雷达系统中。

关键词 可编程超表面;双极化通道;反射阵天线;多波束天线

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.03.002

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)03-0010-07

A Dual-Polarized Independent Multi-Beam Reflectedarray Design Based on Programmable Coding Metasurface

ZHANG Na, CHEN Ke*, WANG Xunfan, ZHAO Jianmin, ZHAO Junming, FENG Yijun
(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract Being simple in preparation, low at the costs, and flexible in beam control, multi-beam reflected array is very popular. In this paper, a design method of dual-channel independent multi-beam reflected array is proposed based on the polarization multiplexing meta-surface, and radiation pattern fast prediction is utilized together in combination with the algorithm to calculate optimal phase configuration. Specifically, the independent dual- and the multi-beam manipulations in dual-polarization are analyzed theoretically, and simulated by the electromagnetic software. The reflected array presents good radiation performance, consisting with the simulations especially in main lobe. As an experimental verification, a prototype is fabricated and tested in a standard microwave anechoic chamber, and the measured results are in accord with the simulations. The proposed reflected array has promising ability to generate the arbitrary and independent multi-beams, largely enhancing the information capacity of the meta surfaces, offering untapped potentials in wireless communication systems and multi-target radar systems. Being simple in preparation, low at the costs, and flexible in beam control.

Key words programmable coding metasurface; dual-polarized; reflected array; multi-beam antenna

收稿日期: 2022-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(62271243, 62071215)

作者简介: 张娜(1991—),女,山东潍坊人,特聘副研究员,博士,研究方向为可编程超表面与反射阵天线。E-mail: nazh@nju.edu.cn

通信作者: 陈克(1990—),男,江苏镇江人,副教授,博士,研究方向为人工电磁材料及其新型电磁器件。E-mail: ke.chen@nju.edu.cn

引用格式: 张娜,陈克,王逊凡,等. 可编程超表面实现双极化独立多波束反射阵天线设计[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3): 10-16.
ZHANG Na, CHEN Ke, WANG Xunfan, et al. A Dual-Polarized Independent Multi-Beam Reflectedarray Design Based on Programmable Coding Metasurface[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 10-16.

超表面作为一种二维形式的人工复合电磁材料,由于其具有自然材料所不具有的许多独特电磁特性而受到广泛关注^[1-3]。通过在电磁波入射分界面上引入场的不连续性可以实现对电磁波幅度、相位、极化、频率等固有性质的复杂调控^[4-7],并基于这种实现方式产生了许多奇异的物理现象和新颖的超表面器件,如异常折射^[8]、聚焦透镜^[9-10]、全息成像^[11-12]、隐身斗篷^[13-14]以及涡旋波束产生^[15-17]等。

近些年,随着超表面技术的不断发展,超表面进一步融入到了天线的设计之中,它在天线设计中发挥越来越重要的作用,不再仅仅作为辅助性功能层来改善天线性能,例如作为天线的辐射口面等直接参与天线辐射。这也对超表面远场电磁波束调控提出了更高的设计要求。传统的多波束天线主要有透镜式、反射面式和相控阵式 3 种^[18]。透镜式和反射面式的基本原理是通过在焦点附近放置单个或多个馈源,并通过控制馈源的激励幅度和相位来实现多波束;相控式多波束天线则由多个辐射阵元排列组成,通过馈电网络精确控制阵元的激励幅度和相位形成动态波束赋形。传统的多波束天线尽管可以利用复杂的馈电网络等实现灵活的波束数目与波束角度调控,但是结构复杂、造价高,同时具有体积较大的问题,不利于小型化平面化设计。与之相比,基于超表面实现的多波束反射阵天线则借助超表面低剖面的结构优势,同时兼具重量轻、体积小、成本低、易集成等优点,因此波束调控方式更灵活^[19]。但是,目前大多数现有的多波束反射阵天线主要由无源超表面单元组成,即单元电磁响应固定、功能固定,无法满足用户的动态波束调控需求,因而限制了其在实际中的应用。

编码超表面的提出为实现有源形式的超表面提供了一种新的工作机制^[20]。由于编码超表面基本单元的电磁特性采用二进制数字来表征,且可通过数字电平 0 和 1 来进行调控,因此可将预先设计的二进制编码序列输入到现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)中,通过外部控制电路实时地调控电磁波传播,形成可编程超表面^[21-23]。在环境复杂化、功能多样化的发展需求之下,单一的功能无法满足人们日益增长的需求,能够实现多通道传输的电磁波复用技术逐渐成为超表面的研究热点之一,因此多功能/多维度复用的超表面应运而生^[23-24]。这其中,极化复用作为一种典型的实现方式,它利用不同极化通道作为独立的信息传输通道,进一步增加了信道容量,也为利用超表面实现多维联合调控提供了新的设计自由度^[25-27]。但是,极化通道的增加意味着电可调元件将引入更多

的损耗以及更复杂的馈电网络设计。因此,如何合理设计馈电网络,实现高效率、低极化串扰的可编程极化复用超表面一直是该领域研究的难点之一。

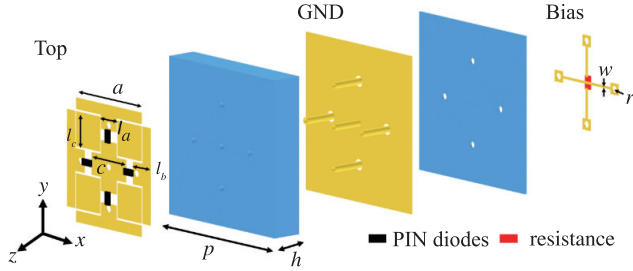
本文通过在谐振结构中加载 PIN 二极管的方式设计了一种极化复用可编程超表面单元,并结合空间多波束理论分析,提出了一种双通道多波束有源反射阵天线的设计方法,可在两个极化通道下实现独立、动态的多波束电磁波调控。作为功能验证,利用 FPGA 硬件系统动态控制反射阵天线的工作状态,分别在 x 极化与 y 极化通道下实现了独立的动态双波束辐射。在此基础上,利用该天线在 2 个极化通道下实现了灵活、任意的动态多波束产生。最后,作为实验验证,对样品进行了加工与测试。测试结果与仿真结果吻合良好,进一步验证了所设计反射阵天线在双通道下的独立多波束调控能力。这种双极化通道独立产生多波束的反射阵天线可以有效增加信息传输通道,提高信道容量,因此在卫星通信、电子对抗、多目标雷达系统等领域具有良好的应用前景。

1 单元设计

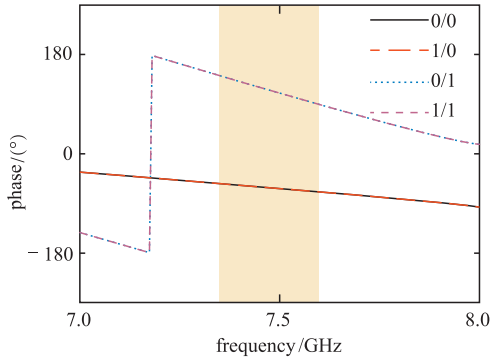
为实现双极化通道多波束反射阵天线,首先利用耶路撒冷十字型拓扑结构设计了如图 1 所示的编码超表面单元。单元由 3 层金属 2 层介质基板压合而成,顶层金属结构(Top)呈中心旋转对称,结构 x 方向与 y 方向分别加载 2 个 PIN 二极管以实现独立的动态相位调制。PIN 二极管的负极直接连接到单元结构的地板为第 2 层金属结构(GND),正极则通过金属化过孔连接到底部的馈电层(Bias)。底层馈电网络设计时, x 方向 PIN 二极管与 y 方向 PIN 二极管分别连通到不同的直流馈电电极,实现双极化通道独立馈电。

在结构设计基础上,利用电磁仿真软件 CST 对单元结构进行了全波电磁仿真分析。单元结构周向(xy 平面)采用周期性边界条件,纵向(z 方向)设为开放边界条件。二极管型号为 SMP1320-079LF,仿真分析时利用等效电路模型模拟其开关状态,进而通过精细的谐振单元结构优化来构造 1 比特编码单元。具体地,当二极管工作于“ON”状态时,等效为电阻与电感的串联形式, $R=0.5\ \Omega$, $L=0.7\ \text{nH}$;当二极管工作于“OFF”状态时,等效为 $L=0.5\ \text{nH}$, $C=0.24\ \text{pF}$ 。综合考虑仿真结果以及样品制备要求,最终得出如下的单元结构参数:单周期 $p=16\ \text{mm}$,上层介质基板厚度 $h=3.8\ \text{mm}$,金属通孔半径 $r=0.2\ \text{mm}$,以及其他结构参数 $a=8.6\ \text{mm}$, $l_a=2\ \text{mm}$, $l_b=2.25$

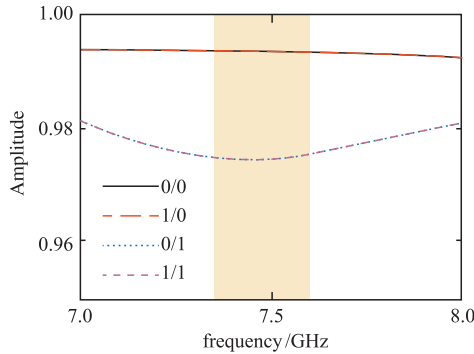
mm, $l_c = 3.1$ mm, $c = 4.5$ mm, $w = 0.2$ mm。金属结构选用电导率为 5.8×10^7 S/m 的铜, 2 层介质基板均选用相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ 的聚四氟乙烯(F4B), 损耗角正切 $\tan\delta = 0.001$ 。



(a) 编码超表面单元结构



(b) 编码超表面单元反射相位曲线



(c) 编码超表面单元反射幅度曲线

图 1 编码超表面单元相关参数

为分析单元的双极化相位调制特性, 在此定义“0/0”、“0/1”、“1/0”与“1/1”4 种基本编码单元, 分别表征 $0^\circ/0^\circ$ 、 $0^\circ/180^\circ$ 、 $180^\circ/0^\circ$ 与 $180^\circ/180^\circ$ 的反射相位。斜杠“/”前后分别代表 x 极化与 y 极化状态下单元的编码状态与反射相位。值得注意的是, 0° 和 180° 是单元的归一化反射相位值, 并不代表单元的绝对反射相位。事实上, 只要“0”、“1”2 种编码单元间相位差满足 180° 即可实现良好的 1-比特编码超表面。经过参数优化后, 单元的反射特性曲线如图 1(b)~(c) 所示。在工作频点 7.45 GHz 处, “1”、“0”2 种码元相位差近似满足 180° , 且反射幅度均大于 0.96, 能够实现高效的 1-比特编码调控, 其中阴影填充区域即为单元的工作带宽, 此时相位差满足 $180^\circ \pm 20^\circ$ 。在此相差范围内, 编码超表面均能够保

持良好的工作性能。同时, 单元反射特性曲线显示, 在特定极化状态下(x/y 极化), 其单元相位变化情况只与本方向上(x/y 方向) PIN 二极管的变化状态相关, 正交方向上 PIN 二极管开关状态的切换并不影响其相位调制, 即所设计单元能够实现 x 极化与 y 极化通道下的独立相位调制。

2 理论计算

超表面对电磁波的灵活调控, 其本质是利用单元结构与电磁波的相互作用来实现周期或非周期的阵列, 即通过不同的拓扑单元结构以及特定的空间排布方式来实现不同的电磁功能。当超表面上的相位/幅度分布固定后, 通过阵列天线理论或傅里叶变换等, 即可推算出等效的远场辐射特性。同样地, 针对特定的远场辐射场分布, 通过理论计算, 也能逆推出超表面应具有相位/幅度分布。本文基于极化复用可编程超表面单元, 结合天线阵理论进行了快速的方向图计算, 并在方向图计算过程中进一步利用遗传算法进行编码序列优化, 实现了独立动态的多波束反射阵天线设计。

假设超表面由排列在 xoy 平面上的 $M \times N$ 个单元组成, 坐标中心位于阵面的几何中心, 并由标准开口波导天线(BJ84)作为馈源实现中心馈电。为实现定向波束辐射(θ_b, φ_b), 第 (i, j) 超表面单元的相位需满足^[28]:

$$\varphi_{ij} = k_0 (|\mathbf{r}_{ij} - \mathbf{S}| - \mathbf{r}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{m}}) \quad (1)$$

式中: k_0 为自由空间的传播常数; $\mathbf{r}_{ij}$ 和 $\mathbf{S}$ 分别为第 (i, j) 单元和馈源的位置矢量; $\hat{\mathbf{m}}$ 代表波束辐射方向上的单位矢量。在 1-比特单波束赋形的基础上, 进一步利用场叠加原理进行独立多波束调控, 此时口径面上的相位分布满足^[29]:

$$\varphi^{ij} = \arg\left(\sum_{q=1}^N e^{-j\varphi_q^{ij}}\right) + \Delta\varphi \quad (2)$$

式中: φ_q^{ij} 为产生第 q 个波束所需的连续相位。这里 $\Delta\varphi$ 定义为初始相位, 是一个常量, 可作为优化的参量以提高天线的性能。在具体的计算过程中, 为实现 1-比特编码超表面设计, 需先对式(2)所实现的连续相位进行离散化处理。但离散化过程中, 不同的初始相位参量 $\Delta\varphi$ 可能导致完全不同的相位分布。由此, 引入了相位优化算法, 以期获取最佳的相位分布, 提高天线的辐射性能。在具体的优化过程中, 首先采用随机函数产生初始种群, 为超表面口径面上的相位分布赋予不同的初始相位参量, 以期通过优化初始相位值来实现编码序列优化, 获得均匀且高效的波束辐射。产生初始种群后, 选择合适的适应度函数, 结合天线阵

理论进行快速方向图计算,并与适应度函数进行对比判断;若满足条件,可直接输出编码序列并计算相应的辐射方向图;若不满足条件,则对当前种群施加选择、交叉、变异等一系列遗传操作来产生新一代种群(新一代种群数目与初始种群数目相同),并逐步使种群进化到包含最优近似解的状态。作为设计示例,针对如图2(a)所示的优化目标,首先基于式(2)计算口径面上的连续相位分布,随后对其进行1-比特离散化

处理,并进行编码序列优化;在此过程中,为进一步提高方向图快速计算的准确性,利用馈源方向图提取获得真实口径面上的幅度与相位信息(如图2(b)~(c)所示),并代入优化程序。最终优化得到的编码序列与相应的辐射方向图分别如图2(d)~(e)所示:与设计目标一致,反射阵天线在 $(20^\circ, 180^\circ)$ 和 $(30^\circ, 0^\circ)$ 产生了2个非对称的独立波束,且具有较低的副瓣,验证了设计方法的可行性。

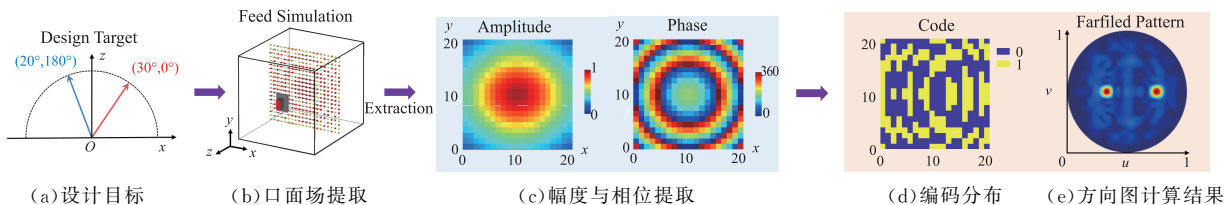


图2 多波束反射阵天线设计过程。

3 仿真分析与实验验证

基于以上理论分析,进行了双极化多波束反射阵天线设计,并基于真实单元结构对超表面进行了全波电磁仿真分析。为体现反射阵天线功能的多样性,在2个极化通道下设计了不同的波束辐射功能。 x 极化通道下的设计目标如图3(a)所示:保持 $-x$ 方向上的波束固定不动, $+x$ 方向上的波束以 10° 为间隔进行扫描。按照上节所提到的优化算法进行编码序列优化,并将提取到的最优相位分布联合 CST 进行阵面全波电磁仿真分析,分析其基于真实单元结构的阵面远场辐射特性。全波电磁仿真分析结果分别如图3(b)~(d)所示,与理论分析一致,反射阵天线在 $\varphi=0^\circ$ 切面上实现了单角度方向的波束扫描, $-x$ 方向上的波束几乎保持不变。与 x 极化下超表面在 xoz 平面内实现非对称双波束扫描功能类似,利用该双极化反射阵天线实现了在 y 极化下 yoz 平面内的对称双波束扫描功能,并给出了其在相应平面内的二维远场方向图仿真分析结果,如图3(e)~(h)所示。对应的相位编码信息如图3(i)~(j)所示。值得注意的是,设计过程中对 x 极化与 y 极化通道是同时进行编码的,即图3(i)~(j)所示编码同时加载到2个独立的极化通道。全波电磁仿真分析结果显示,反射阵天线在2个极化通道下的编码序列互不影响,这更进一步从功能角度验证了所设计超表面单元的极化独立特性。

在此基础上,为了进一步体现功能多样性,利用该超表面在2个极化通道下实现了灵活的任意多波束产生,如图4所示。首先,基于上述优化程序,分别在2个极化通道下进行了三波束产生。波束辐射方向 (θ, φ) 分别设计在 $(30^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 180^\circ)$, $(30^\circ$,

$0^\circ)$ 和 $(20^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(30^\circ, 0^\circ)$ 。图4(a)~(b)分别为 x 极化通道下和 y 极化通道下对应的编码信息。基于真实的超表面单元,利用全波仿真软件得到了超表面在 uv 平面内的二维远场方向图(图4(c)~(d))。仿真结果显示,波束的主瓣方向分别在 $(31^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 180^\circ)$, $(29^\circ, 0^\circ)$ 和 $(20^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(29^\circ, 0^\circ)$,与预设结果基本吻合,即该反射阵天线实现了双通道下的三波束设计。

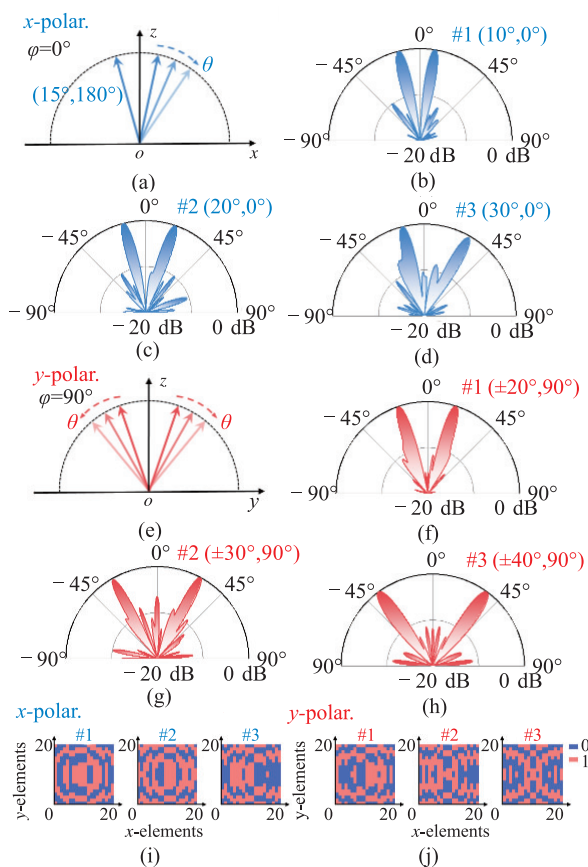


图3 反射阵天线远场方向图与相应相位编码

为更进一步探索三波束设计的灵活性,基于编码序列优化,将三波束的主瓣分别设计在 $(19^\circ, 0^\circ)$,

$(19^\circ, 180^\circ)$, $(19^\circ, 270^\circ)$ 和 $(30^\circ, 0^\circ)$, $(30^\circ, 270^\circ)$, $(30^\circ, 45^\circ)$ 。相应的相位编码信息与 uv 平面远场方向图仿真结果如图 4(e)~(h)所示,此时三波束主瓣增益相差不大且无明显副瓣,具有较好的辐射性能。图 4(a)、(e)为 x 极化通道下的编码信息,图 4(b)、(f)为 y 极化通道下的编码信息。图 4(c)、(d)、(g)、(h)为对应的 uv 平面远场方向图仿真结果,波束辐射方向 (θ, φ) 图 4(c)为 $(30^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 180^\circ)$, $(30^\circ, 0^\circ)$, 图 4(d)为 $(20^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(30^\circ, 0^\circ)$, 图 4(g)为 $(19^\circ, 180^\circ)$, $(19^\circ, 270^\circ)$, $(19^\circ, 0^\circ)$, 图 4(h)为 $(30^\circ, 270^\circ)$, $(20^\circ, 0^\circ)$, $(30^\circ, 45^\circ)$ 。作为验证,这里仅给出了超表面在半空间内的任意三波束设计。事实上,通过合理的扩大阵元数目,结合优化算法,可利用超表面在上半空间进行任意独立的多波束动态调控。

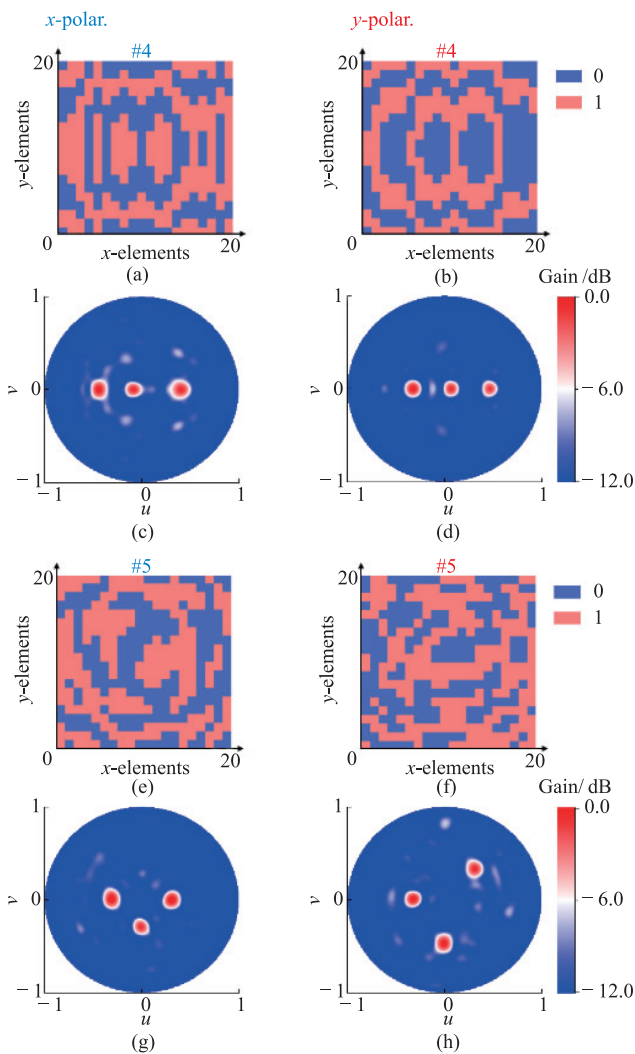


图4 反射阵天线相位编码与远场方向图

作为实验验证,利用平面印刷电路板技术进行了样品加工并在标准微波暗室中进行了测试分析,测试装置以及加工样品如图 5 所示。为实现极化独立电磁调控,馈电网络设计时, x 方向 PIN 二极管

与 y 方向 PIN 二极管分别通过直流馈电线连接到不同的直流馈电网络,并与 FPGA 硬件控制系统相结合实现可编程控制。具体地,天线工作时,通过直流馈电网络与 FPGA 硬件控制系统相连接,利用计算机向控制电路发送可实现不同电磁功能的二进制编码信息,并将其映射到控制电路 I/O 输出口上,实时、动态地改变可编程超表面单元中加载电可调元件的工作状态,从而实现对单元反射相位的实时调控,进而实现空间电磁波束扫描。

所设计阵面由 20×20 个基本编码单元组成。为增加设计自由度,超表面每个单元的电磁响应均动态可调,且可工作于双极化状态下。因此,共采用 16 块 FPGA (ALTERA Cyclone IV) 提供 800 路的独立电压调控。FPGA 型号为 AX301,由 50 MHz 有源晶振提供稳定的时钟源,最快可实现 20 ns 的编码切换速度,完全满足双通道反射阵天线的设计需求。此外,为了体现超表面的双通道独立工作特性,测试过程中, x 和 y 极化通道均同时连接到控制电路进行现场可编程设计。

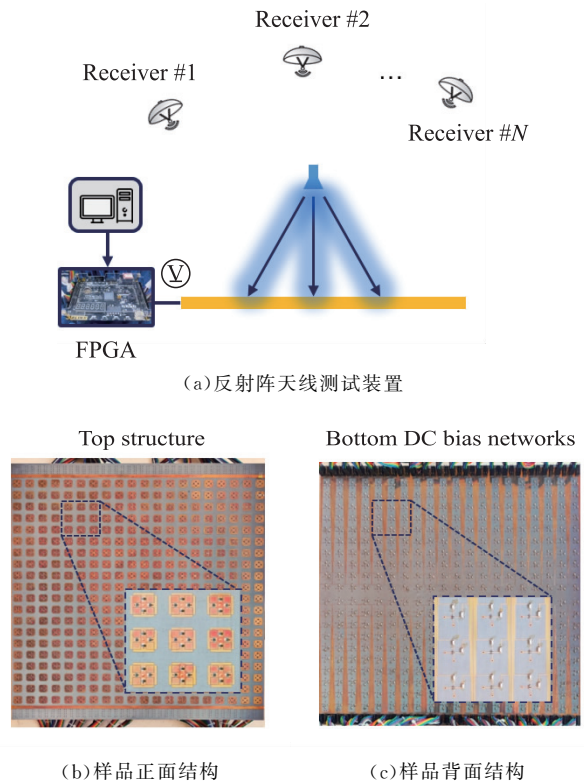


图5 测试装置及加工样品

随后,测试样品的远场辐射特性。采用图 5(a)所示测试装置,样品照片见图 5(b)~(c)。首先,对图 3 所示双极化通道下的任意双波束扫描结果分别进行了实验验证,测试结果分别见图 6(a)~(c)与图 6(e)~(g),与仿真分析结果(图 3(b)~(d)与图 3(f)~(h))一一对应。通过编码切换,超表面在两个极化通道下分别实现了非对称/对称双波束扫描

功能,且在不同辐射角度下波束辐射功率基本相当。为进一步验证该反射阵天线的波束调控能力,在任意双波束测试的基础上,还对图4(c)~(d)中设计的非对称三波束进行了测试。如图6(d)、(h)所示,测试结果与仿真结果(图4(c)~(d))相对应。尽管

由于加工精度以及焊接等原因旁瓣区域存在一定的测试误差,但实测的天线整体辐射性能基本与仿真分析结果一致,充分验证了该反射阵天线多波束动态赋形的功能有效性。

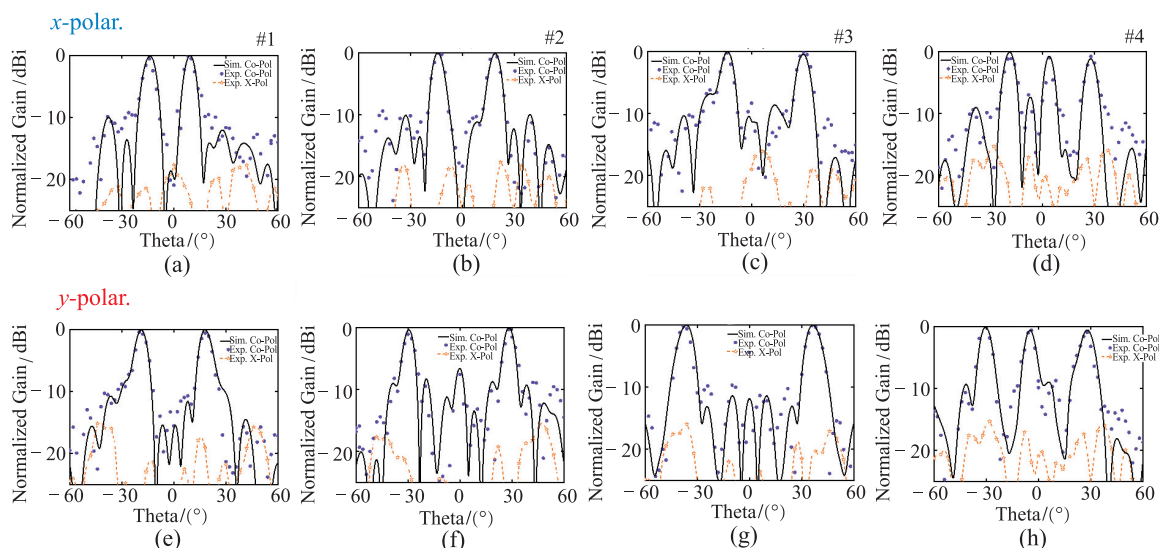


图6 反射阵天线在双极化通道下的远场方向图测试结果

4 结语

本文基于电可调 PIN 二极管设计了一种高效的极化复用超表面单元,并结合阵列方向图分析方法与优化算法,提出并验证了双通道任意多波束反射阵天线。该超表面由 20×20 个基本编码单元组成,每个单元均具有双极化相位独立可调特性,通过合理设计直流馈电网络并与直流控制电路相连,利用计算机实时改变控制电路的输出电压以实现编码单元电可调元件的状态切换进而实现电磁功能的切换。通过编码优化,实现了对称双波束、非对称双波束产生,并且在有限阵面尺寸下实现了多波束动态调控。仿真分析表明超表面的辐射波束主瓣增益均匀、副瓣较低,具有较好的定向性。测试结果与仿真分析结果吻合良好,证明了该反射阵天线在双极化通道下良好的波束调控能力。这种独立动态多波束调控的反射阵天线有利于增加信道容量,在动态信号传输、卫星以及无线通信系统中都具有较大的应用潜力。

参考文献

- [1] PFEIFFER C, GRBIC A. Bianisotropic Metasurfaces for Optimal Polarization Control: Analysis and Synthesis [J]. *Physical Review Applied*, 2014, 2(4): 044011.
- [2] GLYBOVSKI S B, TRETYAKOV S A, BELOV P

A, et al. Metasurfaces: From Microwaves to Visible [J]. *Physics Reports*, 2016, 634: 1-72.

- [3] LUO X G. Subwavelength Artificial Structures: Opening a New Era for Engineering Optics [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(4): e1804680.
- [4] LIU L X, ZHANG X Q, KENNEY M, et al. Broadband Metasurfaces with Simultaneous Control of Phase and Amplitude [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5031-5036.
- [5] LIU S, CUI T J, XU Q, et al. Anisotropic Coding Metamaterials and Their Powerful Manipulation of Differently Polarized Terahertz Waves [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(5): e16076.
- [6] YAN L B, ZHU W M, KARIM M F, et al. Arbitrary and Independent Polarization Control in situ via a Single Metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(21): 1800728.
- [7] ZHANG X H, PU M B, GUO Y H, et al. Colorful Metahologram with Independently Controlled Images in Transmission and Reflection Spaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(22): 1809145.
- [8] YU N F, GENEVE P, KATS M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [9] RUBIN N A, DAVERSA G, CHEVALIER P, et al. Matrix Fourier Optics Enables a Compact Full-Stokes Polarization Camera [J]. *Science*, 2019, 365(6448): eaax1839.

- [10] CHEN K, FENG Y J, MONTICONE F, et al. A Reconfigurable Active Huygens' Metalens[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(17): 1606422.
- [11] CHEN W T, YANG K Y, WANG C M, et al. High-Efficiency Broadband Meta-Hologram with Polarization-Controlled Dual Images[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 225-230.
- [12] HUANG L L, CHEN X Z, MÜHLENBERND H, et al. Three-Dimensional Optical Holography Using a Plasmonic Metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [13] YANG J N, HUANG C, WU X Y, et al. Dual-Wavelength Carpet Cloak Using Ultrathin Metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(14): 1800073.
- [14] NI X J, WONG Z J, MREJEN M, et al. An Ultrathin Invisibility Skin Cloak for Visible Light[J]. *Science*, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [15] DING G W, CHEN K, LUO X Y, et al. Dual-Helicity Decoupled Coding Metasurface for Independent Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4): 044043.
- [16] LIU W W, LI Z C, LI Z, et al. Energy-Tailorable Spin-Selective Multifunctional Metasurfaces with Full Fourier Components [J]. *Advanced Materials*, 2019: 1901729.
- [17] YANG J, ZHANG C, MA H F, et al. Generation of Radio Vortex Beams with Designable Polarization Using Anisotropic Frequency Selective Surface[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(20): 203501.
- [18] 谢崇进, 王华芝. 卫星多波束天线综述[J]. *中国空间科学技术*, 1995, 15(5): 37-44.
- [19] XU H X, CAI T, ZHUANG Y Q, et al. Dual-Mode Transmissive Metasurface and Its Applications in Multibeam Transmitarray[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(4): 1797-1806.
- [20] 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.
- [21] CHEN K, ZHANG N, DING G W, et al. Active Anisotropic Coding Metasurface with Independent Real-Time Reconfigurability for Dual Polarized Waves [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(2): 1900930.
- [22] DELLA GIOVAMPAOLA C, ENGHETA N. Digital Metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(12): 1115-1121.
- [23] ZHANG N, CHEN K, ZHENG Y L, et al. Programmable Coding Metasurface for Dual-Band Independent Real-Time Beam Control[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2020, 10(1): 20-28.
- [24] 许河秀, 王彦朝, 王朝辉, 等. 基于多元信息的多功能电磁集成超表面研究进展[J]. *雷达学报*, 2021, 10(2): 191-205.
- [25] DEVLIN R C, AMBROSIO A, RUBIN N A, et al. Arbitrary Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion of Light [J]. *Science*, 2017, 358(6365): 896-901.
- [26] PFEIFFER C, GRBIC A. Bianisotropic Metasurfaces for Optimal Polarization Control: Analysis and Synthesis [J]. *Physical Review Applied*, 2014, 2(4): 044011.
- [27] CAI T, TANG S W, WANG G M, et al. High-Performance Bifunctional Metasurfaces in Transmission and Reflection Geometries[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(2): 1600506.
- [28] GUTIÉRREZ C E, PALLUCCHINI L. Reflection and Refraction Problems for Metasurfaces Related to Monge-Ampère Equations[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(9): 1523-1531.
- [29] NAYERI P, YANG F, ELSHERBENI A Z. Design and Experiment of a Single-Feed Quad-Beam Reflectarray Antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(2): 1166-1171.

(编辑:徐楠楠)