

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417468

## 毫米波动态调谐反射面天线研究\*

张辉<sup>1</sup> 陈宝权<sup>1,2,3</sup> 汪业龙<sup>2,3,4</sup> 祁峰<sup>2,3,4</sup>(1. 沈阳建筑大学电气与控制工程学院 沈阳 110168; 2. 辽宁省太赫兹成像与感知重点实验室 沈阳 110169;  
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室 沈阳 110169; 4. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110169)

**摘要:** 可重构宽带元件因其在无线通信系统中的关键性作用而具有深远意义,设计一种结构简单的宽带 1-bit 单元仍具有挑战性。该可重构单元基于极化转换原理,通过控制 PIN 二极管的通断状态,将入射波偏振态旋转 $\pm 90^\circ$ ,实现双极化调控与精确的 $180^\circ$ 相移。单元工作在 25.58~31.87 GHz,相对带宽为 21.9%,交叉极化反射系数均大于 $-2$  dB。同时,具有良好的角度稳定性能,斜入射角可达 $30^\circ$ 。建立口径尺寸为 $70\text{mm}\times 70\text{mm}$ 的相位可重构反射阵列,在 30 GHz 处,增益为 20.6 dB,并实现 $\pm 60^\circ$ 的全空间波束扫描功能。这一宽频带内可调谐设计可应用于无线通信、雷达探测等领域。

**关键词:** 极化转换;可重构;波束扫描;广角

中图分类号: TN82 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

## Investigation of millimeter wave dynamic tuning reflector antennas

Zhang Hui<sup>1</sup> Chen Baoquan<sup>1,2,3</sup> Wang Yelong<sup>2,3,4</sup> Qi Feng<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Key Laboratory of Terahertz Imaging and Sensing, Liaoning Province, Shenyang 110169, China; 3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 4. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;)

**Abstract:** Reconfigurable wideband components play an important role in wireless communication systems, however, designing a straightforward wideband 1-bit unit remains a significant challenge. This design is based on the principle of polarization conversion. By controlling the on-off state of the PIN diodes, the polarization of the incident wave is rotated by  $\pm 90^\circ$ , provide dual-polarization regulation and a  $180^\circ$  phase shift. The unit operates from 25.58 to 31.87 GHz, with a relative bandwidth of 21.9% and the cross-polarization reflection coefficient is greater than  $-2$  dB. Meanwhile, the unit demonstrates excellent angular stability, supporting an oblique incidence angle of up to  $30^\circ$ . Utilize this unit to construct a phase-reconfigurable reflectarray with an aperture size of  $70\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ . The gain is 20.6 dB at 30 GHz, which can realize  $\pm 60^\circ$  full-space beam scanning capability. This wideband tunable design can be utilized in wireless communication, radar detection, and other fields.

**Keywords:** polarization conversion; reconfigurable; beam scanning; wide angle

## 0 引言

可重构反射阵天线因其高增益与波束可控性,在雷达和无线通信中引发了广泛的关注。在通信与雷达应用中经常需要进行极化转换提高无线通信链路的效率,而传统的极化转换是基于法拉第效应的晶体实现,这类设备往往有体积较大、频带窄等缺点,而超表面的出现使得其在微型化、低损耗方向得以突破,因此,受到了不少研究者的青

睐<sup>[1]</sup>。为进一步提升通信系统的容量与信号质量,避免极化失配引起性能损耗<sup>[2]</sup>,并提高雷达系统的目标检测与跟踪精度,设计的超表面天线需要考虑其双极化特性。此外,电磁波往往以一定角度入射到超表面上,这就需要超表面具备对入射波角度不敏感的特性。

为解决传统超表面天线一旦制备后其电磁响应无法动态调控的问题,崔铁军<sup>[3]</sup>提出通过数字编码方式利用大量可调电磁单元实现对电磁波的精确控制,并结合智能算法

收稿日期:2024-11-27

\* 基金项目:沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC220523)、中国科学院沈阳自动化研究所基础研究计划(2022JC2G04)项目资助

对编码单元进行排序<sup>[4]</sup>,实现更符合当前电磁环境条件下的传播特性。现阶段的可重构相位单元多数使用谐振方法<sup>[5]</sup>,仍具有带宽窄、频率低等缺点。因此,从实际应用场景出发,具备双极化、宽带的可重构超表面天线展现出更为广泛的应用前景。

近年来,人们通过各种技术对超表面单元进行调谐,如液晶<sup>[6]</sup>、变容二极管<sup>[7]</sup>等,实现对单元相位的连续可调谐,但也存在成本高、损耗大以及控制复杂等缺点。另一种方式是引入相位离散化取代连续相位变化,实际应用中,常使用响应灵敏的射频开关作为调谐器件,通过 FPGA 或单片机对每个单元进行独立调控,实现强大的波束重构功能<sup>[8]</sup>。更多的相位状态数量会带来更好的增益与波束扫描能力,但随之而来的是单元设计和控制电路复杂程度的提升,所以,1 bit 相位量化方案在实际应用场景中具有极大的研究价值。Liu 等<sup>[9]</sup>基于三端口网络等效性在理论上分析了各类 1 bit 可重构单元所需的最少 PIN 二极管开关数量。文献[10]基于极化旋转设计一种双极化调控的发射阵列,具备低损耗的波束扫描能力,但是,扫描范围只有 $\pm 40^\circ$ ,且随着频率升高,传输幅度显著下降。文献[11]提出一种宽角度波束扫描的圆极化可重构折叠反射器天线,基于极化转化技术,在 7.5~9.5 GHz 频率范围内,能够为波束扫描提供稳定的相位调控,且具备良好的角度稳定性,入射角可达 $45^\circ$ ,但是波束扫描损耗超过 4 dB。文献[12]设计了一种耶路撒冷缝隙结构的超表面单元,实现了双极化波的独立调控,并且在 $0\sim+50^\circ$ 的波束扫描范围内,增益损耗小于 3 dB。然而,该单元结构的传输效率较低。Nadi 等<sup>[13]</sup>在三层周期结构的 O 形槽单元上嵌入两颗反向二极管,以此构建的反射阵列具备较高孔径效率,但是,其局限性也比较明显,该单元仅在 6 GHz 处表现出较强的反射能力,并且为有效控制二极管的通断,引入了两条偏置线,使得整个天线系统的馈电网络部分更为复杂化。文献[14]所提出的 1 bit 单元的主体结构为两个矩形金属贴片组成,通过二极管将二者相连接,单元在 7~10 GHz 范围内的反射相位差在 $180^\circ\pm 5^\circ$ ,表现出较好的相位精度,但是无法进行不同极化波的独立调控。文献[15]在矩形微带贴片的正交方向上集成 PIN 二极管,基于极化正交性实现双频相位调控。但是,单元只在两个单一频点处实现 $180^\circ$ 相位差,并且,受馈源遮挡的影响,在某些扫描角度下性能有所下降,导致天线在不同方向的信号覆盖并不对称。Lee 等<sup>[16]</sup>设计了一种基于小型化环形贴片的 1 bit 广角可重构反射阵列,实现了 $\pm 60^\circ$ 高指向性的二维波束扫描,同样,在 H 面上因馈源遮挡,导致在一些波束偏转角度下的增益损耗增加,且只能在 10.1 GHz 处实现 1 bit 相移。

综合当前研究现状来看,难以将双极化相位调控与角度稳定性实现高效融合设计,导致宽频带相位调控性能较差,在实际复杂的电磁环境应用中仍具有一定的局限性。

本文针对当前 1 bit 可重构阵列的技术缺陷,提出一种

具备双极化调控的宽频带高效的可重构反射阵列,以数字化方式在二维平面上实现大角度低损耗的波束扫描。所提出的可调谐单元基于镜像设计的偏振转换原理,在单元上集成 4 颗二极管,在 25.58~31.87 GHz 内具有较高的传输效率,最小插入损耗仅为 0.31 dB,并获得精确的 $180^\circ$ 相位差。在斜入射 $30^\circ$ 范围内,具备良好的角度稳定性。所提出的动态调谐反射面天线为无线通信、雷达探测领域提供了一种新的调谐辐射技术选择。

## 1 可重构单元工作原理分析

极化转换主要是由于单元结构的各向异性几何形状与各分量之间的相互作用实现,可通过琼斯矩阵进行表征描述。对于反射式超表面单元而言,透射率可视为完全为零,只需考虑入射场与反射场部分。电磁波极化可由其正交分量进行表示,通过对入射波与反射波的同极化分量及交叉极化分量进行对比,确定单元的极化转换性能。对于超表面单元来说,线偏振态的入射场与反射场可以通过 Jones 矩阵  $R$  描述其电磁特性,反射 Jones 矩阵  $R$  为:

$$R = \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $R_{xx} = |E_{xr}|/|E_{xi}|$ 、 $R_{yy} = |E_{yr}|/|E_{yi}|$  为同极化反射系数, $R_{xy} = |E_{xr}|/|E_{yi}|$ 、 $R_{yx} = |E_{yr}|/|E_{xi}|$  为交叉极化反射系数,  $|E_{xr}|$  与  $|E_{yr}|$  分别为水平、垂直反射场,  $|E_{xi}|$  与  $|E_{yi}|$  分别为水平、垂直入射场。

假设电磁波在  $y$  方向上沿着  $z$  轴负方向线性偏振,入射到可重构单元表面上,如图 1 所示,入射波的电场矢量可表示为:

$$\vec{E}_i = |E_{yi}| e^{-j\varphi_i} \vec{e}_y \quad (2)$$

式中: $|E_{yi}|$  为入射线性偏振的振幅,下标  $i$  表述入射电场,下标  $y$  表示电场矢量分量。

入射极化波经超表面单元表面反射后,可通过  $x-y$  坐标系的正交分量来表示对应的旋转极化反射波,表示为式(3)。

$$\vec{E}_r = |E_{yi}| (R_{xy} e^{-j\varphi_x} \vec{e}_x + R_{yy} e^{-j\varphi_y} \vec{e}_y) \quad (3)$$

式中: $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$  为  $x$  极化和  $y$  极化的反射相位。

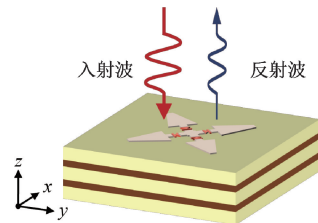


图 1 线性偏转示意图

Fig. 1 Linear polarization deflection diagram

为了更为方便的了解分析单元结构在不同二极管通断状态下的电磁响应,将  $x-y$  坐标系逆时针旋转 $45^\circ$ 后得到  $u-v$  坐标系,如图 2 所示,虚线区域表示为该对角线上的二

极管处于截止状态。

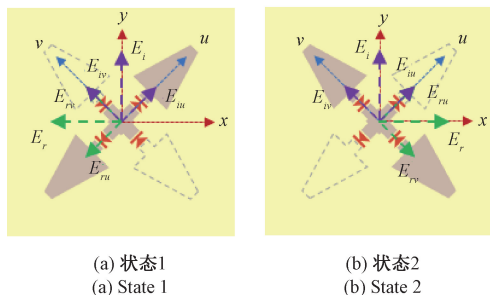


图 2 极化转换原理

Fig. 2 Polarization conversion principle

将  $y$  极化入射场分解为两个正交的  $u-v$  分量上, 可得到:

$$\vec{E}_i = \begin{bmatrix} E_{yi} / \sqrt{2} \\ E_{xi} / \sqrt{2} \end{bmatrix} = E_{yi} / \sqrt{2} (\vec{u} + \vec{v}) \quad (4)$$

同理, 将反射场分解到  $u-v$  坐标系上, 得到:

$$\vec{E}_r = \begin{bmatrix} R_{uu} & R_{uv} \\ R_{vu} & R_{vv} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{ui} \\ E_{vi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于单元结构在该坐标系上是镜像对称的, 则  $|R_{uv}| = |R_{vu}| = 0$ , 从而可得到相应的反射波为:

$$\vec{E}_r = \frac{E_{yi}}{2} [\vec{x} (|R_{uu}| e^{j\varphi_{uu}} - |R_{vv}| e^{j\varphi_{vv}}) + \vec{y} (|R_{uu}| e^{j\varphi_{uu}} + |R_{vv}| e^{j\varphi_{vv}})] \quad (6)$$

由式(3)与(6)对比, 可得出  $x-y$  坐标系与  $u-v$  坐标系上反射系数之间的关系, 当满足  $|R_{uu}| = |R_{vv}| = 1$ ,  $\Delta\varphi = \pm\pi$  时, 可得图 2(b) 状态下的交叉极化波:

$$\vec{E}_r = E_{xi} / \sqrt{2} (\vec{u} - \vec{v}) \quad (7)$$

此时,  $y$  极化入射波将被旋转  $90^\circ$  变为  $x$  极化反射波。由于单元的两种工作状态是镜像对称的, 如图 2(a) 所示, 对于状态 1 而言, 将反射波偏转相对于入射波偏振旋转  $-90^\circ$ , 同理,  $x$  极化入射波也将被旋转为  $y$  极化反射波, 从而实现同极化波向交叉极化波转换。基于上述原理, 状态 1 下的单元与状态 2 下的单元将分别产生一个相反方向的交叉极化反射电场矢量, 从而实现精确的  $180^\circ$  相移。

## 2 1 bit 可重构单元设计

在前面所阐述的相关理论基础之上, 进行单元结构设计。可重构单元结构如图 3 所示, 周期为  $5 \text{ mm}$  ( $\approx \lambda/2$ )。

如图 3(a) 拓扑视图所示, 单元组成部分为: 两组沿  $45^\circ$  与  $-45^\circ$  对角线分布的梯形辐射贴片、金属地和偏置线以及 3 层基板构成。其中, 对应的金属层结构如图 3(b) 所示, 梯形金属贴片、金属地以及 4 组金属短路过孔共同组成磁电偶极子, 水平方向的金属贴片作为电偶极子工作, 四组排列紧密的金属短路过孔替代垂直金属壁, 并与连接贴片处的缝隙共同作为磁偶极子工作<sup>[17]</sup>。介质基板为 Rogers

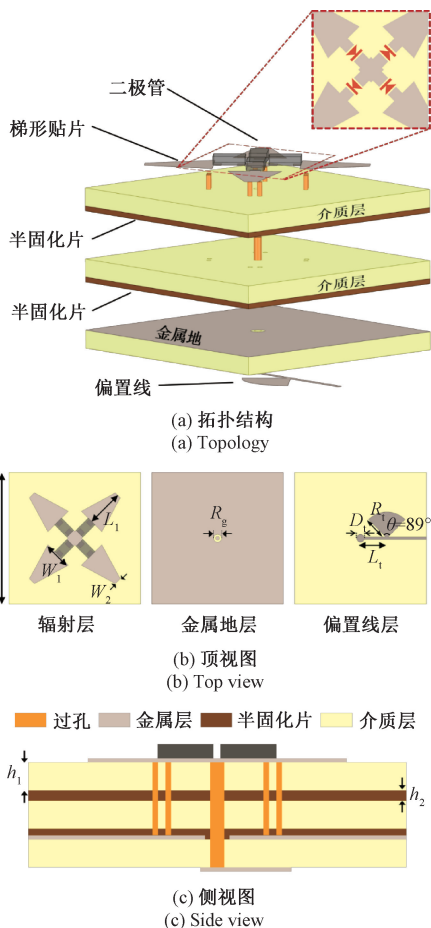


图 3 可重构单元结构

Fig. 3 Schematic of the reconfigurable element

RO3003 ( $\epsilon_r = 3$ ,  $\tan \delta = 0.0013$ ), 厚度为  $0.375 \text{ mm}$ , 通过厚度为  $0.102 \text{ mm}$  的粘结膜 Rogers 4450F ( $\epsilon_r = 3.52$ ,  $\tan \delta = 0.004$ ) 粘结在一起。单元的层叠顺序如图 3(c) 所示。

PIN 二极管型号为 MACOM 公司的 MA4AGP907, 如图 4 所示, 在  $30 \text{ GHz}$  频率下, 二极管的等效电路模型被建立为:  $R_{on} = 4.2 \Omega$ ,  $L_{on} = 0.05 \text{ nH}$ ,  $R_{off} = 300 \text{ k}\Omega$ ,  $C_{off} = 42 \text{ fF}$ <sup>[18]</sup>。每对金属贴片均通过 PIN 二极管与单元中心的交叉焊盘相连接, 并在每个金属贴片上设有独立焊盘以便于加工焊接。梯形金属贴片通过短路过孔接地, 偏置电压通过中心垂直金属通孔进行供应, 实现二极管的通断控制。二极管的安装方向如图 3(a) 中二极管放大图所示, 每组二极管的安装方向相反, 在适当的偏置电压下, 总有一组二极管处于导通状态, 另一组处于截止状态。为了避免微波能量泄露, 采用四分之一波长的扇形枝节以滤除来自偏置线的射频信号。可重构单元的详细尺寸参数汇总于表 1。

根据有限元仿真软件对本文所提出的设计进行模拟仿真验证。图 5 为  $x-y$  坐标系下同极化分量与交叉极化分量的反射系数。从图 5 可以看到, 在  $25.58 \sim 31.87 \text{ GHz}$  范围内, 交叉极化分量均不低于  $-1 \text{ dB}$ , 单元相对带宽为

21.9%，在 29.23 GHz，插入损耗最低为 0.31 dB。在 25.47~31.35 GHz 范围内，同极化反射分量均不高于 -10 dB，这表明入射的电磁波能量大部分以交叉极化波的形式被反射。数据结果显示，所提出的设计在该频段内具备对  $x$  与  $y$  极化波独立调控的能力。

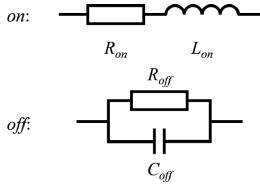


图 4 MA4AGP907 等效电路模型

Fig. 4 MA4AGP907 equivalent circuit model

表 1 几何参数及其取值

Table 1 Geometric parameters and their values

mm					
参数	数值	参数	数值	参数	数值
$P$	5.000	$W_1$	1.102	$L_1$	1.414
$W_2$	0.269	$D_t$	0.300	$L_t$	1.100
$R_t$	1.050	$h_1$	0.375	$h_2$	0.102
$R_g$	0.150				

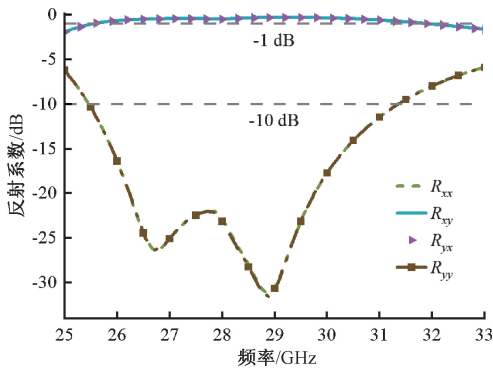
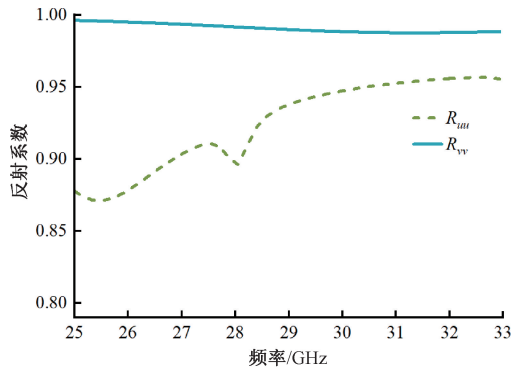


图 5  $x, y$  极化入射波的同极化与交叉极化反射系数

Fig. 5 Reflection coefficients of the co- and cross polarized of  $x$  and  $y$  polarization incident waves

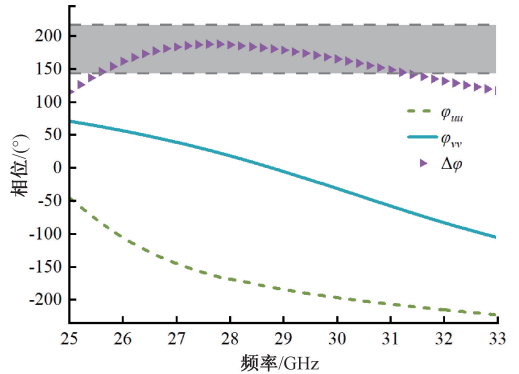
所设计的超表面单元极化转换特性可通过式(4)~(7)来解释。图 6(a)、(b)分别显示了在  $u$ - $v$  坐标系下反射系数的幅度和相位。在整个工作频段内， $u$  方向分量与  $v$  方向分量都表现出很强的反射能力，并且在 25.48~31.33 GHz 频率范围内，基本上满足了  $|R_{uu}| = |R_{vv}| \approx 1, \Delta\varphi = 180^\circ \pm 37^\circ$  的条件，从而实现高效率且宽带的极化转换。从图 6(b)中可以发现  $u, v$  相位差分量  $\Delta\varphi = 180^\circ \pm 37^\circ$  的带宽恰好与图 5 中同极化分量低于 -10 dB 的带宽相重合。

可重构单元的交叉极化相位能够借助对不同单元状态的选择而实现改变。通过对单元结构的几何参数予以微调，促使反射波极化方向相较于入射波极化旋转  $\pm 90^\circ$ [19]，从而使交叉极化的反射相位达成稳定的  $180^\circ$  相移。图 7 展



(a) 同极化分量反射系数

(a) Reflection coefficient of co-polarized component



(b) 同极化分量相位及相位差

(b) Co-polarized component phase and phase difference

图 6  $u, v$  分量同极化反射系数

Fig. 6 Co polarized reflection coefficient for  $u$  and  $v$  component

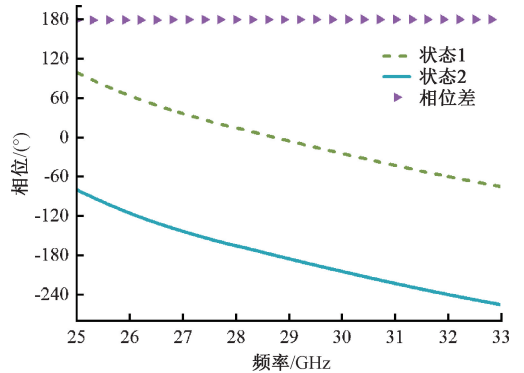


图 7 不同工作状态下的交叉极化反射相位

Fig. 7 Cross polarized reflection phase under different working states

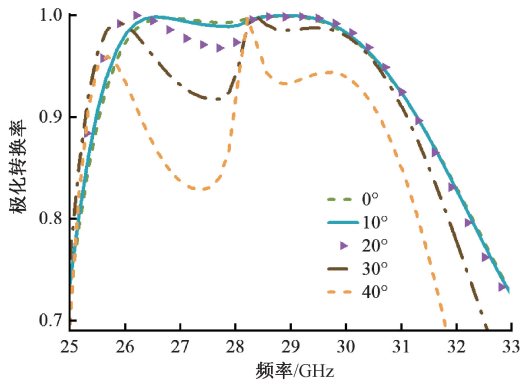
示了不同工作状态下的单元交叉极化反射相位及相位差结果。能够发现，可重构单元在 25~33 GHz 宽频范围内获得可靠的  $180^\circ$  相位差，相位量化误差均不大于  $1^\circ$ 。这一特性使得单元非常适合应用于宽带 1 bit 移相器的设计中，有助于减轻因 1 bit 可重构阵列相位离散化带来的量化误差，使得主瓣波束展宽，波束旁瓣电平增加，导致增益下降，天线的抗干扰能力降低，并影响可重构阵列的波束指向性，因此在特定的电磁环境下，稳定的相移能够实现波束的灵活切换，提升电磁系统性能。

为了评估可重构单元的极化转换效率,需要计算单元的极化转化率(polarization conversion rate, PCR),定义为:

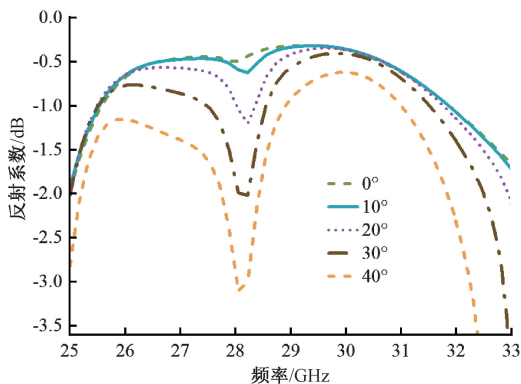
$$PCR = \frac{R_{xy}^2}{R_{xy}^2 + R_{yy}^2} \quad (8)$$

由于在实际的工程应用环境中,需要充分考虑到电磁波以广角形式入射的情况,如图 8 所示,进一步分析了单元结构在不同斜入射角度下的角度稳定性。

图 8(a)详细展示了单元在  $y$  极化入射下,不同斜入射角度下的极化转换性能与交叉极化反射系数结果。当电磁波垂直入射单元时( $\theta=0^\circ$ ),可以发现,在 26.69 GHz 与 28.89 GHz 谐振频率下,单元的极化转换效率为 100%, $y$  极化入射波完全被转换为  $x$  极化反射波。斜入射角度为  $30^\circ$  时,在 25.3~31.2 GHz 的宽频范围内,保持大于 90% 的极化转换效率。当入射角度增加到  $40^\circ$  时,由于斜入射角度增大,导致单元的电磁谐振能力减弱,使得在部分频段范围内的极化转化率下降,但是,仍保持 80% 以上的极化转化率。图 8(b)给出了单元在不同斜入射角度下的交叉极化反射系数,在  $40^\circ$  斜入射角度下,反射系数损耗不高于 3.1 dB,在 30 GHz 频率处,最大损耗仅为 0.62 dB。由此可以说明所提出的单元结构设计具备良好的角度稳定性。



(a) 斜入射下的极化转化率  
(a) Polarization conversion rate under oblique incidence

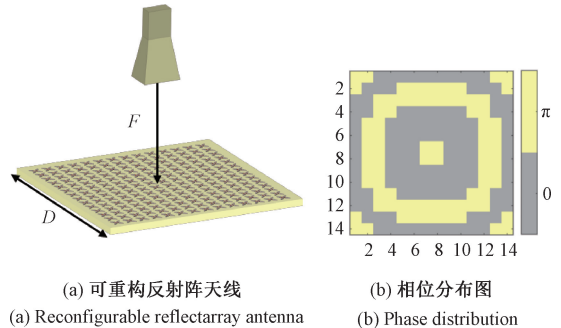


(b) 斜入射下的交叉极化反射系数  
(b) Cross polarized reflection coefficient under oblique incidence

图 8 斜入射下的极化转化率与交叉极化反射系数  
Fig. 8 Polarization conversion rate and cross polarized reflection coefficient under oblique incidence

### 3 可重构反射面天线设计

为进一步验证单元的潜在应用,探索天线阵列的波束指向性能,构建一个 1 bit 可重构反射式超表面天线阵列,并使用有限元模拟软件对其进行全波仿真。如图 9(a)所示,所提出的反射阵天线由  $14 \times 14$  个单元组成,尺寸为  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。选用 10 dB 标准增益的线极化喇叭天线作为馈源,指向反射阵中心位置。通过综合考虑照明效率与溢出效率,将焦距比( $F/D$ )设为 0.64。确定整体天线结构后,对阵列孔径上所需要的 1 bit 相位进行补偿,波束指向为( $\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$ )的阵列相位分布如图 9(b)所示,从而得到预期的天线阵列辐射特性。



(a) 可重构反射阵天线

(a) Reconfigurable reflectarray antenna

(b) 相位分布图

(b) Phase distribution

图 9 1 bit 可重构天线结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of 1-bit reconfigurable antenna structure

如图 10 所示,对波束指向为( $\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$ )的同极化与交叉极化分量的方向图进行仿真对比。

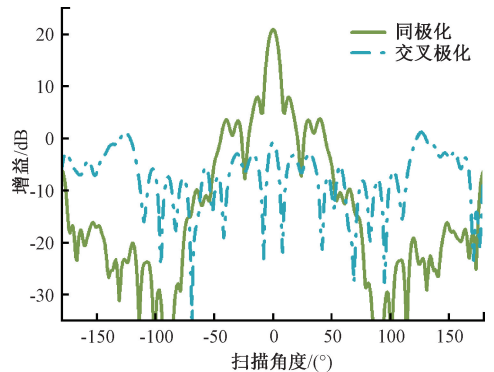


图 10 同极化与交叉极化分量的辐射方向图

Fig. 10 Radiation patterns of co-and cross polarized components

可以发现,同极化分量的副瓣电平约为  $-13 \text{ dB}$ ,交叉极化分量比同极化分量低约 20 dB 以上,表现出良好的交叉极化隔离度。对所设计的反射阵天线的波束扫描性能进行仿真与实验,测试天线的波束扫描特性系统装置如图 11 所示。基于近场条件下,波导探头与反射阵天线的距离  $D=25\lambda$ ,测试系统的工作频率为 30 GHz。

在 30 GHz 频率下,以  $15^\circ$  为步长,在两个平面内( $\varphi=0^\circ, \varphi=90^\circ$ )进行波束扫描,两个平面下不同波束扫描角度的相位分布图分别如图 12(a)~(h)与图 13(a)~(h)所示。

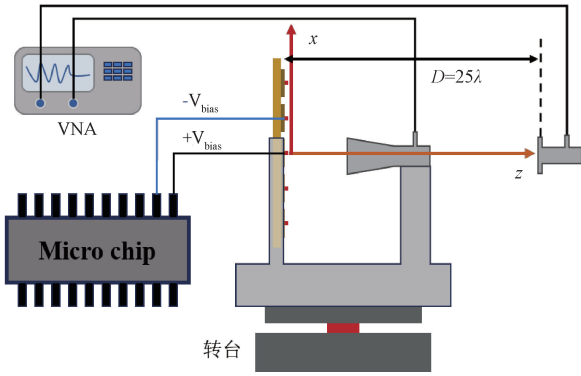
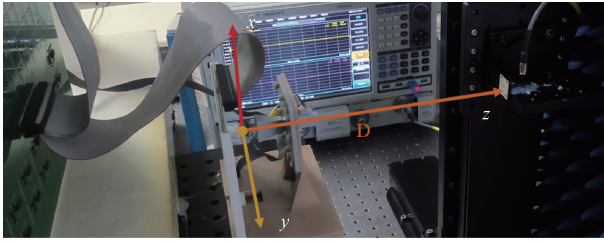


图 11 系统实验装置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of system experimental setup

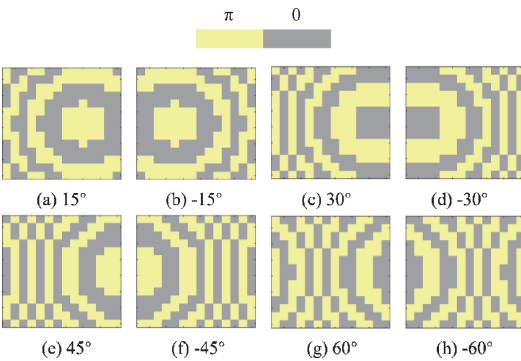


图 12  $\varphi=0^\circ$  平面内不同扫描角度的相位分布

Fig. 12 Phase distribution of different scanning angles in the  $\varphi=0^\circ$  plane

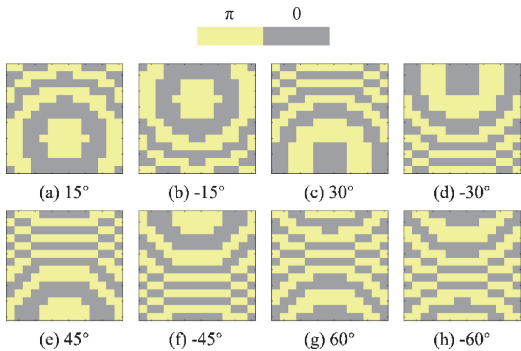


图 13  $\varphi=90^\circ$  平面内不同扫描角度的相位分布

Fig. 13 Phase distribution of different scanning angles in the  $\varphi=90^\circ$  plane

E 面方向图与 H 面方向图结果如图 14 与 15 所示。可以发现,在  $\theta = -60^\circ$  到  $\theta = +60^\circ$  这一扫描范围内,主波束方向被

较好的定义在指定波束偏转角度上。

E 面不同主波束指向角度分别为  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 46^\circ, 57.5^\circ, -16^\circ, -30^\circ, -46^\circ, -57.5^\circ$ ,最大波束扫描损耗为 1.9 dB。H 面不同主波束指向角度分别为  $0^\circ, 16^\circ, 30^\circ, 46^\circ, 57.3^\circ, -15.4^\circ, -30^\circ, -46^\circ, -57.2^\circ$ ,最大波束扫描损耗为 2.9 dB。测试结果表明,所设计的天线阵列具备良好的二维波束控制能力,在 E 面与 H 面上的波束扫描角度误差控制在  $\pm 2.8^\circ$  以内。可以看出仿真与测试结果具有较高的吻合度。

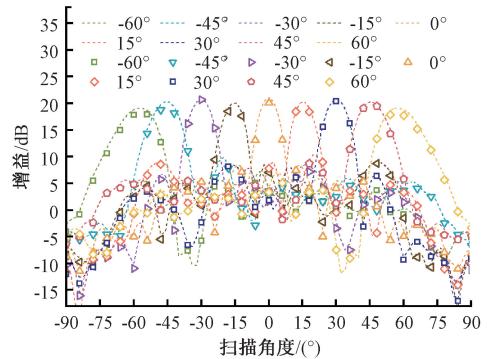


图 14  $\varphi=0^\circ$  平面内的波束扫描。仿真:虚线,测试:散点

Fig. 14 Beam scanning in the  $\varphi=0^\circ$  plane.

Simulation: dashed line, Measurement: scattered points

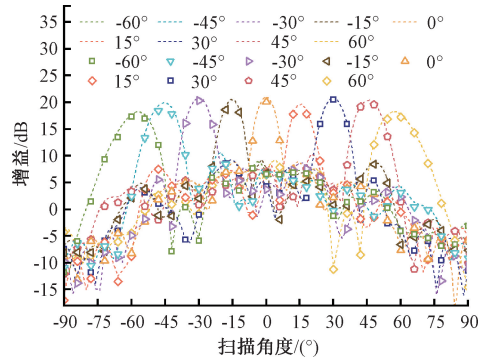


图 15  $\varphi=90^\circ$  平面内的波束扫描。仿真:虚线,测试:散点

Fig. 15 Beam scanning in the  $\varphi=90^\circ$  plane.

Simulation: dashed line, Measurement: scattered points

表 2 是本文所提出的工作与近 5 年同领域 1 bit 电子可重构阵列的对比情况。在工作频段、斜入射角度、相位误差、峰值增益、扫描范围、极化方式以及扫描损耗等多个方面进行详细比较。相较于文献[10]、[12]的工作,本文的工作具有更宽的扫描角度。与文献[11]、[14]的设计相比较,所提出的设计具备双极化独立调控且低损耗的波束扫描能力。对比于文献[15]、[16],具备更宽频率范围的低相位量化误差,且能够实现广角低损耗的双极化波束调控。相比之下,本文提出的工作展现出良好的综合性能,在宽频范围内表现出优异的极化调控能力,凭借着良好的斜入射性能与低量化误差,保证所提出的反射阵天线在全空间范围内实现低损耗,  $\pm 60^\circ$  的波束扫描。

表 2 所提出的设计与同领域最新研究工作的比较

Table 2 Comparison between the proposed design and the latest research in the same field

设计	工作频段/GHz	斜入射角度	相位误差	峰值增益/dB	扫描范围	极化方式	扫描损耗/dB*
文献[10]	4~6	30°	<1°	16.8	±40°(2D)	Dual-LP	2.3
文献[11]	8.9~9.3	45°	<1°	18.8	±50°(2D)	CP	4.4
文献[12]	2.98~4.6	N.A.	<1°	17.5	0~+50°	Dual-LP	<3
文献[14]	7~10	N.A.	±5°	24.92	±60°(2D)	LP	<4
文献[15]	12.5/14.25	N.A.	30.6°	22.3/22.5	-60°~-15°(2D)	X-P/Y-P	4.5
文献[16]	9.85	N.A.	N.A.	17.14	±60°(2D)	LP	7
本研究	<b>25.58~31.87</b>	<b>30°</b>	<b>&lt;1°</b>	<b>20.6</b>	<b>±60°(2D)</b>	<b>Dual-LP</b>	<b>2.9</b>

\* :在最大波束偏转角度下的增益损耗。

## 4 结 论

本文提出一种多层介质基板层叠而成的宽带高效超表面单元,表现出卓越的极化波调控能力。在工作频率范围内,反射交叉极化分量的损耗均低于 1 dB,同时实现精确稳定的 180°相移。当斜入射角度增加到 40°时,仍保持良好的极化转换效率。基于此单元,设计一种广角波束扫描的可重构反射阵天线。测试结果表明,所提出的天线阵列在 E-H 面上能够实现±60°、低损耗、高指向的连续波束扫描功能。因此,本文所提出的可重构反射阵天线在无线通信、雷达探测等领域具有较大的应用潜力。

## 参考文献

- [1] 王哲飞,张晋滔,陈鹏飞,等.工作频率可重构的多层超表面设计[J].电子测量技术,2024,47(7):28-33.  
WANG ZH F, ZHANG J T, CHEN P F, et al. Multi-layer meta-surface design with reconfigurable operating frequency [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(7): 28-33.
- [2] 王丽黎,王新庄,张衡,等.加载极化扭转人工磁导体的双频圆极化天线[J].电子测量与仪器学报,2023,37(9):33-40.  
WANG L L, WANG X ZH, ZHANG H, et al. Dual-frequency circularly polarized antenna loaded with polarized torsion artificial magnetic conductor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 33-40.
- [3] 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.  
CUI T J. Electromagnetic metamaterials——from effective media to field programmable systems [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(10): 1427-1461.
- [4] XU J SH, LIU W W, SONG ZH Y. Terahertz dynamic beam steering based on graphene coding

metasurfaces[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4): 1-9.

- [5] ZHANG H, CHEN X X, WANG ZH L, et al. A 1-bit electronically reconfigurable reflectarray antenna in X band[J]. IEEE Access, 2019, 7: 66567-66575.
- [6] LI K, WANG J W, CAI W F, et al. Electrically switchable structural colors based on liquid-crystal-overlaid aluminum anisotropic nanoaperture arrays[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 31913-31924.
- [7] TANG J W, XU SH 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.
- [8] 李伟,李祺,高杨.基于 PIN 二极管设计的一种进行波束扫描的超表面天线[J].电子测量技术,2022,45(24):1-8.  
LI W, LI Q, GAO Y. Metasurface antenna design based on PIN diodes for beam scanning[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(24): 1-8.
- [9] LIU CH H, WU Y, YANG F, et al. Is it possible to design a 1-bit reconfigurable transmitarray element with a single switch? [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 22(4): 829-833.
- [10] LUO CH W, ZHAO G, JIAO Y CH, 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.
- [11] GAO X, QI J CH, LAN F, et al. 1-bit metasurface-based beam-scanning circularly polarized folded reflector antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 23(2): 638-642.
- [12] 朱利豪,郑哲,韩家奇,等.双线极化宽带 1-bit 可编程智能超表面设计[J].无线电通信技术,2024,50(2): 373-380.

- ZHU L H, ZHENG ZH, HAN J Q, et al. Design of dual polarization broadband 1-bit reconfigurable intelligent surface [J]. Radio Communications Technology, 2024, 50(2): 373-380.
- [13] NADI M, SEDIGHY S H, CHELDAVI A. Multimode OAM beam generation through 1-bit programmable metasurface antenna [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 15603.
- [14] 于瑞涛,符道临,熊伟,等. 基于智能超表面的二维相扫天线[J]. 无线电通信技术, 2024, 50(2): 386-391.
- YU R T, FU D L, XIONG W, et al. Two-dimensional phase-scan antenna based on RIS [J]. Radio Communications Technology, 2024, 50(2): 386-391.
- [15] XU H J, XU SH 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.
- [16] LEE S G, NAM Y H, KIM Y J, et al. A wide-angle and high-efficiency reconfigurable reflectarray antenna based on a miniaturized radiating element [J]. IEEE Access, 2022, 10: 103223-103229.
- [17] ZHANG Q, WANG J, YU H L, et al. Computational microwave imaging with a 1-bit phase reconfigurable transmitarray [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(12): 7004-7017.
- [18] PALMA L D. Reconfigurable transmitarray antennas at millimeter-wave frequencies [D]. Rennes: Université de Rennes, 2015.
- [19] 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.

### 作者简介

张辉(通信作者), 硕士, 副教授, 主要研究方向为电磁场与微波技术、图像处理。

E-mail: zhanghui11.11@163.com

陈宝权, 硕士研究生, 主要研究方向为可重构超表面天线设计。

E-mail: cbq\_sjz22330@163.com

汪业龙, 博士, 副研究员, 主要研究方向为微波天线, 新型相控阵辐射表面、电磁涡旋辐射及成像, 网栅频率选择表面。

E-mail: wangyelong@sia.cn

祁峰, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹成像。

E-mail: qifeng@sia.cn