

文章编号: 2095-4980(2021)04-0642-06

## 基于液晶的太赫兹反射式波束扫描天线

高浩宇<sup>1</sup>, 殷明君<sup>1</sup>, 储修军<sup>1</sup>, 高盛<sup>1</sup>, 赵子龙<sup>2</sup>, 杨军<sup>\*1</sup>, 尹治平<sup>1</sup>, 邓光晟<sup>1</sup>

(1.合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009; 2.电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

**摘要:** 提出了一种基于液晶的太赫兹电控反射式移相器及其构成的波束扫描阵列天线。通过采用液晶调控的开槽结构移相器, 解决了液晶调控过程中谐振层覆盖面不足造成的液晶取向不均、边缘效应和饱和电压增大等问题。设计了工作在 380 GHz 三开槽的移相器, 对谐振频点的表面电流分布和谐振频点进行了仿真分析。数值计算结果表明当液晶相对介电常数在 2.47~3.26 范围内变化, 377~392 GHz 频率范围内移相器能够实现 360° 的相移。采用三开槽结构反射相移单元, 设计了工作于 380 GHz 的电控波束扫描阵列天线, 实现了 30° 范围内的一维波束扫描, 主瓣增益大于 20 dBi。

**关键词:** 太赫兹; 反射式移相器; 可重构天线; 液晶; 电控

**中图分类号:** TN823

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020699

## Terahertz reflective beam scanning antenna based on liquid crystal

GAO Haoyu<sup>1</sup>, YIN Mingjun<sup>1</sup>, CHU Xiujun<sup>1</sup>, GAO Sheng<sup>1</sup>, ZHAO Zilong<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>\*1</sup>,  
YIN Zhiping<sup>1</sup>, DENG Guangsheng<sup>1</sup>

(1.Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China;

2.Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** A terahertz electrically controlled reflective phase shifter based on liquid crystal is proposed as well as its beam scanning array antenna. By using the slotted structure, the problems of uneven orientation, edge effect and increased saturation voltage due to the insufficient coverage of resonant layer in the process of liquid crystal regulation can be solved. A phase shifter with three slots at 380 GHz is designed, and the surface current distribution and resonance frequency points are simulated. The numerical results show that the phase shifter can achieve 360° phase shift in 377–392 GHz when the relative dielectric constant of liquid crystal changes in 2.47–3.26. An electronically controlled beam scanning array antenna operating at 380 GHz is designed by using a reflective phase-shifting unit with three slots. One dimensional beam scanning within 30° is realized, and the main lobe gain is greater than 20 dBi.

**Keywords:** terahertz; reflective phase shifter; reconfigurable antenna; Liquid Crystal(LC); electronically controlled

太赫兹频段(0.1~10 THz)的科学与应用技术在过去 20 年中飞速发展<sup>[1-3]</sup>。太赫兹技术逐渐由基础科学研究进入到实际应用当中, 例如医学成像、安全检查、通信、制造、智能城市交通以及无损检测等<sup>[4-6]</sup>。天线是太赫兹通信、探测、成像等系统的关键组件, 高增益、多波束、波束扫描或多波束合成对于许多系统都至关重要。可重构反射阵列天线可以通过调整阵列单元, 实现对反射波波束的控制和扫描, 由于其制造难度低、增益高、质量轻、低剖面等诸多优势在太赫兹频段得到广泛研究应用<sup>[7-9]</sup>。

液晶作为一种电控可调材料, 从微波、毫米波到光波段都有着广泛的应用, 液晶工作于太赫兹频段时依然具有优异的介电可调性能, 存在巨大的开发潜力和应用价值<sup>[10-11]</sup>。近年来许多科研人员采用液晶材料设计工作在太赫兹频段的移相器与其所构成的反射阵列天线。HU W 等人在 2008 年提出了一种工作在 102~130 GHz 的基

收稿日期: 2020-12-15; 修回日期: 2021-01-29

基金项目: 电子信息控制重点实验室基金资助项目(20190800147)

\*通信作者: 杨军 email:junyang@hfut.edu.cn

于液晶的移相器<sup>[12]</sup>。采用方形贴片的谐振单元作为反射阵列天线的移相器，通过施加 10 V 的调控电压，工作频段内损耗值在 4.5~6.4 dB 之间，反射波最大相移达到了 165°，并在 2009 年设计实现了扫描角度为 5°的反射阵列天线<sup>[13]</sup>。为了扩大移相器的相位可调量和频带范围，Gerardo Perez-Palomino 等提出了一种三个偶极子结构的多谐移相单元，采用多谐结构使移相器相位可调范围增大。移相器的宽带和相位可调性能在 3 GHz、35 GHz、140 GHz 频率处进行了实验验证，实验证明所设计的多谐结构最大可调相位大于 360°，并采用多谐移相器设计并实现了扫描角度为 55°、副瓣电平低于 -13 dB 的反射阵列天线<sup>[14]</sup>。

基于液晶的调控器件中谐振贴片层覆盖面不足会引起一系列问题。如反射式移相器的贴片电极覆盖面不足，偏置电场的不均匀造成液晶层中不同区域的液晶分子偏转角度，导致设计误差大，器件可调范围变小。Gerardo Perez-Palomino 等提出了一种分区域仿真模型<sup>[15]</sup>，将液晶层分为 3 个工作区域对液晶分子非均匀偏转进行仿真，提高仿真精确度，并用实验进行了验证。WANG Lei 等在 2017 年提出了一种采用石墨烯作为连接电极的基于液晶可调吸波体<sup>[16]</sup>，多孔石墨烯对 THz 波透过率在 87% 以上，该谐振结构表明，将多孔石墨烯全面覆盖后，可在大范围对液晶控制电极，改善了液晶分子偏转不均匀影响。但对于基于液晶的移相器，多孔石墨烯对 THz 波的吸收将会造成器件损耗增加。

传统偶极子结构对液晶层的覆盖面不足，液晶分子偏转不均匀，造成液晶介电可调范围下降、器件响应时间增加以及饱和电压增加等一系列性能的劣化。采用开槽结构的移相单元可以提高液晶取向均匀性，降低反射贴片的边缘效应和饱和电压<sup>[17]</sup>。为提高工作带宽和相移范围，本文设计了一种采用三开槽结构的基于液晶的移相单元，分析了三开槽结构的原理，并通过仿真验证了开槽结构的优异特性。基于此单元设计了反射式相控阵列天线。结果表明当液晶相对介电常数在 2.47~3.26 范围内变化时，在 377~392 GHz 频率范围内所设计移相器产生相位变化超过 360°。设计的工作于 380 GHz 的电控波束扫描可重构阵列天线实现了 30°范围内的一维波束扫描，且主瓣增益大于 20 dBi。

## 1 基于液晶的反射式移相器结构

### 1.1 液晶移相器的调控原理

工作在微波、太赫兹波段的液晶反射阵列天线延续了在可见光波段时液晶盒的调控方式。将贴片和接地面作为施加偏置电压的电极，使电极之间的液晶层中产生偏置电场。由于液晶分子方向受外加偏压和取向层共同作用，通过控制偏置电压，调整液晶层内偏置电场的场强，实现液晶的等效介电常数调控。

向列型液晶是一种各向异性材料，液晶分子的长轴取向不同时，会有不同的相对介电常数。基于液晶的反射式移相单元的切面构成如图 1 所示。反射单元由两层石英层平行放置作为基板，并通过聚苯乙烯微粒控制石英层的间距，两层石英层内表面分别是刻蚀金属谐振层与反射层，在金属表面涂布聚酰亚胺(polyimide)取向层，通过摩擦取向来控制液晶分子的初始排布方向。采用毛细现象将液晶灌入所设计的液晶盒后，液晶分子的长轴会平行于摩擦方向分布，定义此时的液晶介电常数为  $\epsilon_{\perp}$ 。在金属谐振层与金属接地平面上施加偏置电压后，液晶分子会受到取向层以及电场的共同作用力。随着施加的偏置电压提高，取向层作用力的影响力逐渐减小，施加一定偏置电压后液晶分子近似平行于电场分布，此时的电压称为此结构的饱和电压  $U_s$ ，定义此时的液晶层等效介电常数为  $\epsilon_{//}$ 。通过将偏置电压在 0 与  $U_{th}$  之间变化，使液晶层的介电常数在  $\epsilon_{\perp}$  和  $\epsilon_{//}$  之间连续变化，实现移相单元工作频点与反射相位的连续调控。

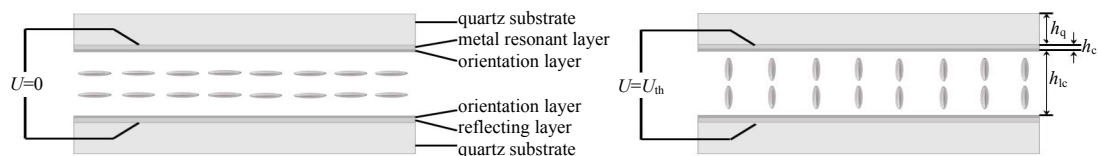


Fig.1 Working principle of reflective phase shifter based on liquid crystal  
图 1 基于液晶的反射式移相器工作原理

### 1.2 三开槽结构的移相器

对于可重构反射式阵列天线的移相单元，应当保证反射的最大相移实现 360°。单谐振结构通常难以实现，所以采用多谐结构用于提高最大相移和工作带宽。多谐单元常通过两个或多个不同尺寸结构排布并产生不同的谐振频点，不同工作频点连续分布实现对带宽的扩展。设计基于液晶移相单元时，传统的偶极子结构存在大量的无覆盖区域，使得液晶层中的电场分布不均匀，液晶层中产生的静电场在谐振结构边缘处场强降低，造成调

控性能劣化。由于结构之间的电流耦合，多谐振结构在单谐振结构平移拓展后还需要对尺寸进行调整，开槽结构相对于传统偶极子结构具有更为严重的电流耦合现象，为此设计了三开槽结构来实现双谐振性能。设计的三开槽结构金属谐振层覆盖了 80%以上区域，使液晶分子分布更均匀，可提高器件的响应速度，降低饱和电压。如图 2 所示，谐振结构由 3 个不同宽度、长度的开槽平行排布构成，并由上下的开槽线分割不同行单元。3 个开槽结构尺寸如表 1 所示，其中开槽 1 和开槽 2 的间距为 15  $\mu\text{m}$ ，开槽 2 和开槽 3 的间距为 25  $\mu\text{m}$ 。

仿真采用常用的液晶材料 GT3-23001<sup>[18]</sup>，液晶厚度  $\epsilon_{\perp}=3.26, \tan\delta_{\perp}=0.02, \epsilon_{\parallel}=2.47, \tan\delta_{\parallel}=0.03$ ；接地层与谐振层采用厚度  $h_c=500 \text{ nm}$ ，电导率  $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$  的铜层；由于聚酰亚胺取向层厚度小于 50 nm 仿真时不进行考虑；石英层厚度  $h_q=500 \text{ nm}$ ，相对介电常数  $\epsilon=3.75, \tan\delta_{\perp}=0.0004$ 。入射电磁波为电场方向垂直于开槽宽边的线极化波，采用频域有限元算法计算得到的反射损耗和相位如图 3 所示，谐振单元产生了两个谐振频点  $f_1, f_2$ 。当液晶的介电常数在 2.47~3.26 之间变换时，谐振频点  $f_1$  和  $f_2$  分别由 391 GHz, 404 GHz 移动至 362.4 GHz, 378 GHz，并在 377~392 GHz 的频率范围内产生了超过 360° 相位变化。

表 1 谐振尺寸结构

Table1 Resonant dimension structure	
parameter	structure size/ $\mu\text{m}$
$X, X_1, X_2, X_3$	370, 30, 30, 10
$Y, Y_1, Y_2, Y_3$	330, 180, 170, 160
$H_g$	20

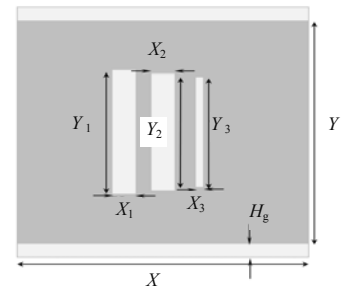


Fig.2 Structure of three slots  
图 2 三开槽结构图

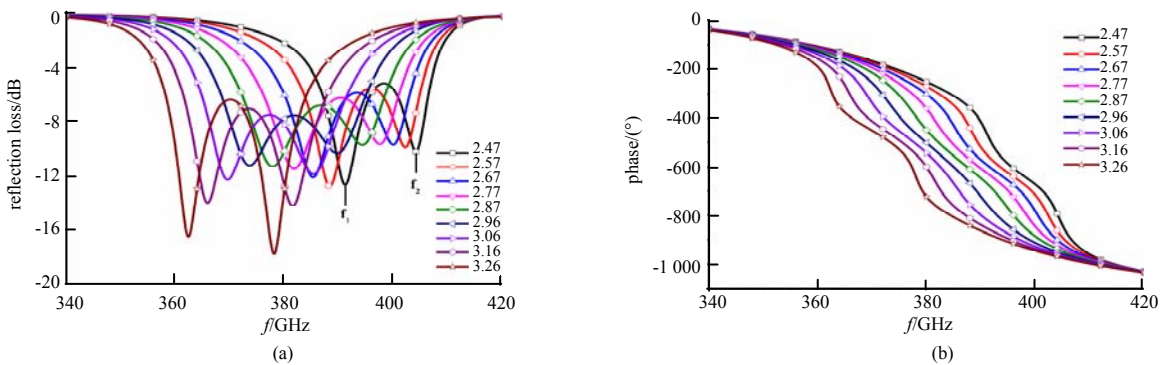


Fig.3 (a) Simulated reflection coefficient of three slotted phase shifter; (b) phase change of three slotted phase shifter  
图 3 (a)三开槽移相位器仿真反射系数; (b)三开槽移相位器相位变化

## 2 结构特性仿真分析

为了分析该结构的性能，对施加外部偏压时的偏置电场以及太赫兹波入射时谐振频点处结构的电流分布进行了仿真。

### 2.1 驱动电场分布计算

开槽结构同偶极子结构相比的优势在于，扩大了谐振层金属覆盖面积，在通过谐振层施加外部偏压时，使液晶层内电场分布更均匀，降低饱和电压，提高响应速度。将谐振层电压设为 10 V，接地层电压设为 0 V，仿真的液晶层中静电场分布情况如图 4 所示，其中开槽处最小电场为最大电场的 60%。通过仿真可知，三开槽结构同样避免了边缘电场影响，可有效提高调制速度，降低饱和和调制电压。

### 2.2 谐振点电流分析

为了对尺寸进行优化，分析了谐振频点处的表面电流分布。当液晶层的相对介电常数为 2.6，谐振频点  $f_1$  在 387.1 GHz 处，谐振频点  $f_2$  在 401.4 GHz 处的表面电流分布分别如图 5(a)、5(b)所示。可以看到当谐振频点在  $f_1$  时电流主要分布在第 1、2 槽处；在  $f_2$  时，三个开槽处均有较大电流分布。因此开槽 1、2 将共同影响谐振频点  $f_1, f_2$ ，而开槽 3 主要影响谐振频点  $f_1$ ，对  $f_2$  影响较小。对结构尺寸的优化仿真验证了这一特性，将第三开槽的宽边  $Y_3$  设为变量时， $\pm 5 \mu\text{m}$  内变化仿真如图 6 所示。谐振频点  $f_2$  由 401.8 GHz 移动至 401 GHz，反射衰减由 -12.8 dB 变为 -11.8 dB，而谐振频点  $f_1$  由 388.8 GHz 移动为 385.4 GHz，反射衰减由 -9.9 dB 变为 -18.6 dB，

这为后续的优化仿真过程提供了帮助。

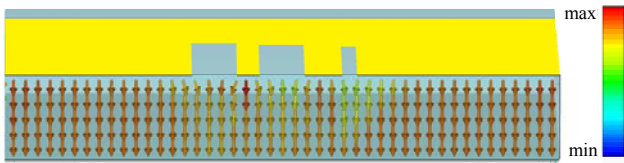
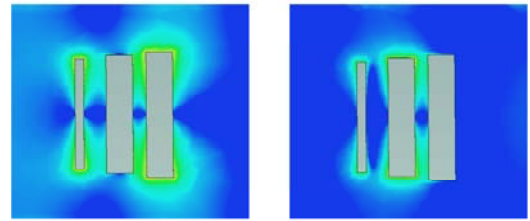


Fig.4 Distribution of electrostatic field in liquid crystal layer  
图 4 液晶层中的静电场分布



(a)  $f=387.1$  GHz (b)  $f=401.4$  GHz  
Fig.5 Surface current distribution  
图 5 表面电流分布图

### 3 反射阵列天线

#### 3.1 平面反射阵列天线设计原理

反射阵列天线由馈电天线与反射阵列面组成，通过调整反射阵列上每个单元的反射相位对入射波的相位进行补偿，将天线近场入射的球面波合成为波束集中的反射波。一个馈源相位中心在  $O$  的反射阵列天线如图 7 所示，可重构反射阵列天线通过控制反射面中每个或每行反射单元的补偿相位，使等相位面法方向改变。通过调整反射阵列中每个单元的相位，改变反射波等相位面的位置实现对不同方向的辐射。

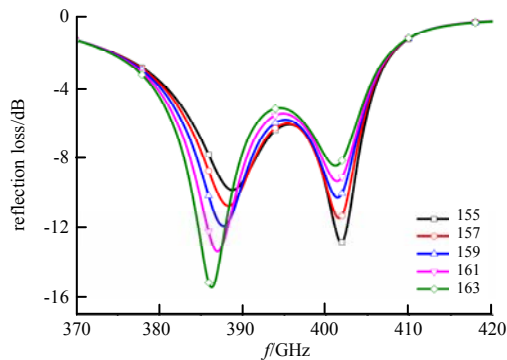


Fig.6 Simulation of Y3 dimension of resonant layer with three slots  
图 6 三开槽结构谐振层参数 Y3 尺寸仿真

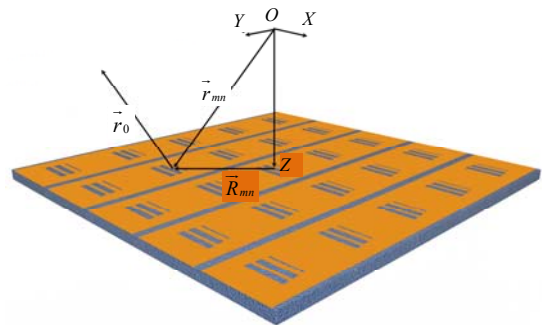


Fig.7 Reflective array antenna of external feed  
图 7 外部馈源反射阵列天线

反射阵列单元相位计算如式(1)所示：

$$k_0(|\vec{r}_{mn}| - \vec{R}_{mn} \cdot \vec{r}_0) - 2\pi N = \Delta\phi_{mn} \quad (1)$$

式中： $k_0$  是自由空间波数； $\vec{r}_{mn}$  是第  $mn$  个单元的位置矢量； $\vec{R}_{mn}$  是第  $mn$  个单元相对于焦点  $(0,0,f)$  的位置矢量； $f$  是焦距； $\vec{r}_0$  是需要反射的方向； $\Delta\phi_{mn}$  是第  $mn$  个单元入射波与反射波之间的相位差。

#### 3.2 基于液晶的可重构反射阵列天线

所设计的反射阵列天线由 VID 公司的商用菱形喇叭馈源与三开槽结构反射面组成。通过调整在每行移相单元中施加的特定调控电压，实现对不同行单元的相位线性控制。为了减小仿真的运算量，提高仿真精确度，分别仿真馈源天线和阵列反射面，然后将馈源方向图导入阵列反射面进行仿真。VID 喇叭天线剖面结构如图 8 所示，天线由 WR2.2 标准波导和菱形渐变开口组成<sup>[19]</sup>，其中长度 Length 为 36 mm，口径为 3.6 mm，菱形天线由左右两部分拼接而成。

对喇叭天线  $E$  面和  $H$  面的方向图仿真如图 9 所示，由于采用菱形对称结构的喇叭口， $E$  面和  $H$  面方向图主瓣几乎完全一致。天线最大增益为 23.3 dBi，波束的 3 dB 带宽为  $12.6^\circ$ ，10 dB 带宽

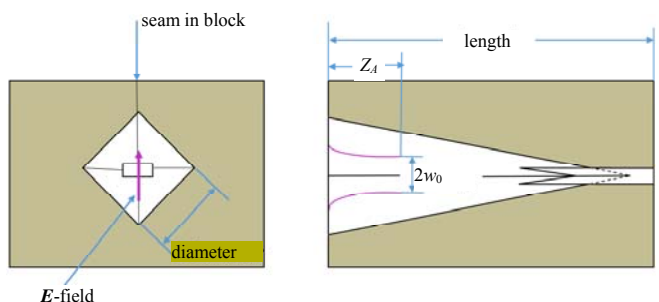


Fig.8 Structure diagram of the VID horn antenna  
图 8 喇叭天线的结构图



为  $22.25^\circ$ 。在 320~400 GHz 频率范围内  $S_{11}$  低于  $-30$  dB。

基于液晶三开槽结构移相单元 380 GHz 处液晶介电常数与相位变化关系如图 10 所示。阵列天线反射面由  $30 \times 30$  三开槽结构构成, 反射面大小为  $10.1 \text{ mm} \times 10.1 \text{ mm}$ , 喇叭天线与阵列反射面之间距离为  $28.55 \text{ mm}$ 。采用公式(1)计算每个单元所需的相位补偿, 并通过液晶相对介电常数与相位的对应关系进行转换, 得到不同辐射方向下所需要的液晶介电常数。计算得到了如图 11 所示的 4 个天线  $E$  面辐射方向图,  $0^\circ$  方向时最大增益为  $24.42 \text{ dBi}$ , 相对于 VID 喇叭天线最大增益增加了  $0.9 \text{ dBi}$ ;  $3 \text{ dB}$  带宽为  $8^\circ$ , 相比 VID 喇叭天线方向更加集中。在  $30^\circ$  反射角时增益下降  $2 \text{ dBi}$ , 随着扫描角度的增加最大副瓣变化为  $16 \text{ dBi}$ 。因此, 所设计的基于液晶可重构反射阵列天线在  $30^\circ$  范围内具有连续扫描性能。

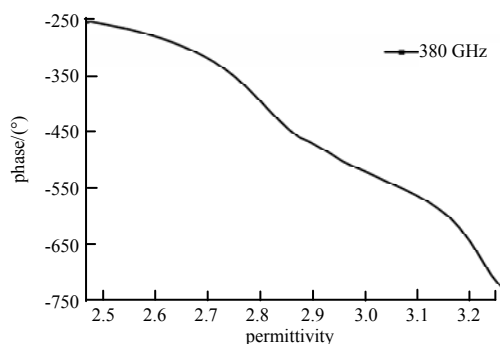


Fig.10 Phase shift unit phase versus relative dielectric constant of liquid crystal

图 10 移相单元相位随液晶相对介电常数变化图

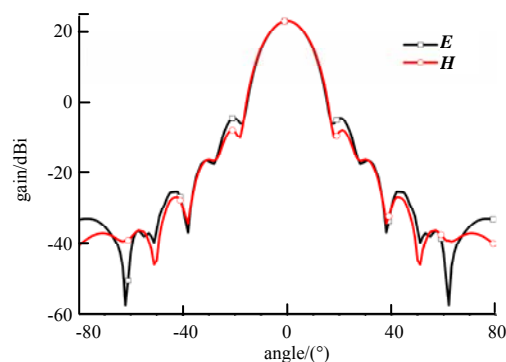


Fig.9  $E$  plane and  $H$  plane farfield pattern of the horn antenna at 380 GHz

图 9 工作于 380 GHz 处 VID 喇叭天线仿真  $E$  面和  $H$  面仿真方向图

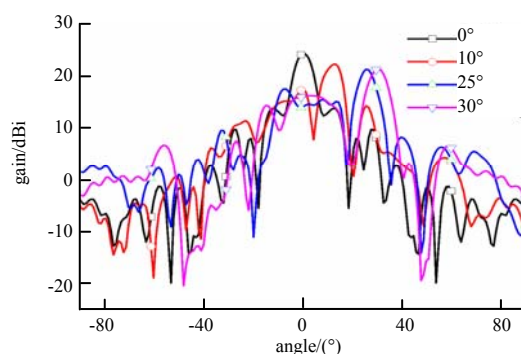


Fig.11 Horizontal scanning pattern of reflector array antenna

图 11 反射阵列天线水平扫描方向图

## 4 结论

为拓展基于液晶的移相器工作带宽和相移范围, 设计了一种特用于液晶调控的三开槽结构移相器, 解决了液晶调控过程中谐振层覆盖面不足造成的液晶取向不均、边缘效应和饱和电压增大等问题。仿真证明当液晶相对介电常数在  $2.47\sim 3.26$  范围内变化时, 在  $377\sim 392 \text{ GHz}$  频率范围内所设计移相器产生相位变化超过  $360^\circ$ 。对谐振频点的表面电流分布进行了仿真, 分析了开槽结构尺寸对谐振频点的影响。对移相单元液晶层的静电场仿真, 验证了所提出结构的调控特性。采用设计的基于液晶的三开槽结构移相器作为相移单元, 设计了一款工作于  $380 \text{ GHz}$  的电控波束扫描可重构阵列天线, 实现了  $30^\circ$  范围内的一维波束扫描, 且主瓣增益大于  $20 \text{ dBi}$ 。

## 参考文献:

- [1] RAJ A B, MAJUMDER A K. Historical perspective of free space optical communications: from the early dates to today's developments[J]. IET Communications, 2019,13(16):2405-2419.
- [2] KARIM M R, YANG X, SHAFIQUE M F. On chip antenna measurement: a survey of challenges and recent trends[J]. IEEE Access, 2018(6):20320-20333.
- [3] 邓彬, 陈硕, 罗成高, 等. 太赫兹孔径编码成像研究综述[J]. 红外与毫米波学报, 2017,36(3):302-310. (DENG Bin, CHEN Shuo, LUO Chenggao, et al. Review of terahertz coded-aperture imaging[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017,36(3):302-310.)
- [4] ZHAO J, CHU W, GUO L, et al. Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air[J]. Scientific Reports, 2014,4(3880). DOI:10.1038/srep03880.
- [5] 成彬彬, 李慧萍, 安健飞, 等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):843-848. (CHENG Binbin, LI Huiping, AN Jianfei, et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):843-848.)
- [6] RAHMAN A, RAHMAN A K, RAO B. Early detection of skin cancer via terahertz spectral profiling and 3D imaging[J].

- Biosensors and Bioelectronics, 2016(82):64–70.
- [ 7 ] GAEBLER A, MOESSINGER A, GOELDEN F, et al. Liquid crystal-reconfigurable antenna concepts for space applications at microwave and millimeter waves[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2009(876989). DOI:10.1155/2009/876989.
- [ 8 ] MA S, WANG P Y, MENG F Y, et al. Electronically controlled beam steering leaky wave antenna in nematic liquid crystal technology[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020,6(30). DOI:10.1002/mmce.22188.
- [ 9 ] CHE B, MENG F, LYU Y, et al. Reconfigurable dual-band metamaterial antenna based on liquid crystals[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018,51(18):185102. DOI:10.1088/1361-6463/aab755.
- [10] 王磊, 肖芮文, 葛士军, 等. 太赫兹液晶材料与器件研究进展[J]. 物理学报, 2019,68(8):7–20. (WANG Lei, XIAO Ruiwen, GE Shijun, et al. Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices[J]. Acta Physica Sinica, 2019,68(8):7–20.)
- [11] 冀允允, 范飞, 于建平, 等. 太赫兹液晶可调谐功能器件[J]. 中国激光, 2019,46(6):58–71. (JI Yunyun, FAN Fei, YU Jianping, et al. Terahertz tunable devices based on liquid crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019,46(6):58–71.)
- [12] HU W, IMAIL M Y, CAHILL R, et al. Tunable liquid crystal reflectarray patch element[J]. Electronics Letters, 2006,42(9):509–511.
- [13] HU W, ARREBOLA M, CAHILL R, et al. 94 GHz dual-reflector antenna with reflectarray subreflector[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009,57(10):3043–3050.
- [14] 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.
- [15] PEREZ-PALOMINO G, FLORENCIO R, ENCINAR J A, et al. Accurate and efficient modeling to calculate the voltage dependence of liquid crystal-based reflectarray cells[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(5):2659–2668.
- [16] WANG L, GE S, HU W, et al. Tunable reflective liquid crystal terahertz waveplates[J]. Optical Materials Express, 2017,7(6):20–23.
- [17] SHENG Gao, JUN Yang, PENG Wang, et al. Tunable liquid crystal based phase shifter with a slot unit cell for reconfigurable reflectarrays in F-band[J]. Applied Science, 2018(8):25–28.
- [18] 葛忆, 夏天雨, 杨军, 等. 太赫兹液晶反射阵列移相单元的设计与分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(2):187–191. (GE Yi, XIA Tianyu, YANG Jun, et al. Design and analysis of Liquid Crystal-based reflectarray phase shifting cells in THz band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):187–191.)
- [19] JOHANSSON J F, WHYBORN N D. The diagonal horn as a sub-millimeter wave antenna[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992,40(5):795–800.

#### 作者简介:

**高浩宇**(1998–), 女, 安徽省亳州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹调控器件 .email: Gaohaoyu5611@163.com.

**储修军**(1995–), 男, 安徽省六安市人, 硕士, 主要研究方向为太赫兹调控器件.

**杨 军**(1978–), 男, 安徽省淮南市人, 博士, 主要研究方向为微波太赫兹器件及应用研究.

**邓光晟**(1982–), 男, 重庆市人, 博士, 主要研究方向为微波器件及太赫兹技术.

**殷明君**(1997–), 男, 合肥市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹天线.

**赵子龙**(1991–), 男, 湖北省洪湖市人, 硕士, 主要研究方向为阵列信号处理.

**尹志平**(1980–), 男, 湖南省常宁市人, 博士, 主要研究方向为微波成像算法、遥感信息处理、太赫兹天线与器件, 以及雷达系统.