

文章编号 1004-924X(2017)01-0065-08

## 堆叠型太赫兹通信透镜天线设计

潘武, 曾威\*, 张俊, 余璇

(重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

**摘要:** 为了提高太赫兹通信天线的增益和定向性, 提出了“井”字堆叠型透镜天线。该透镜天线工作在太赫兹第一大气传播窗口内, 由初级馈源天线和透镜两部分构成。设计了角锥喇叭天线作为透镜天线的初级馈源; 根据菲涅耳-基尔霍夫衍射理论和傍轴近似条件设计了“井”字堆叠型透镜用于聚焦太赫兹波, 并分析了透镜结构在平面波入射时的聚焦场分布。利用控制变量法分析了透镜天线的全波周期和焦距比等结构参数对其远场辐射性能的影响。对所设计的透镜天线进行了实物加工和测试。实验结果表明: “井”字堆叠型透镜天线的加工和组装工艺简便, 具有对称的辐射模式, 在 320~380 GHz 的工作频段内的增益高于 26.4 dB, 3 dB 主瓣宽度低于 4.8°, 基本满足太赫兹通信系统对天线的高增益和强定向性等要求。

**关键词:** 太赫兹通信; 菲涅耳-基尔霍夫衍射理论; 透镜天线; 角锥喇叭天线; 远场辐射模式

**中图分类号:** TN929.1; TN822.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0065

## Design of multilayer stacked terahertz communication lens antenna

PAN Wu, ZENG Wei\*, ZHANG Jun, YU Xuan

(College of Photoelectric Engineering, Chongqing University of Posts and  
Telecommunications, Chongqing 400065, China)

\* Corresponding author, E-mail: vlad\_zehn@163.com

**Abstract:** In order to improve the gain and directionality of terahertz communication antenna, a cross-like rings stacked lens antenna was proposed in terahertz atmospheric transmission I window. The lens antenna was consisted of a diagonal horn antenna and a multilayer stacked lens. The diagonal horn antenna was adopted as the primary feed and the multilayer comprised cross-like rings. Far field characteristics of the lens antenna was studied by using Fresnel-Kirchhoff diffraction theory and paraxial approximation. Furthermore, the effects of the full-wave period and the focus diameter ratio on radiation characteristics were analyzed by using variable-controlling approach. The proposed lens antenna was fabricated and experimentally tested. The results show that the proposed lens antenna has common processing methods and axisymmetric radiation patterns. The gain is over 26.4 dB and the 3 dB main lobe beamwidth is lower than 4.8° throughout the whole operation bandwidth from 320 to 380 GHz. The good focusing characteristics and great directionality indicate that the designed lens antenna is qualified for applications in THz wireless communication systems.

收稿日期: 2016-06-06; 修订日期: 2016-08-01.

基金项目: 重庆邮电大学新方向培育计划资助项目 (No. A2014-116); 重庆市“121”科技支撑示范工程资助项目 (No. cstc2014zktjccx BX0065)

**Key words:** terahertz communication; Fresnel-Kirchhoff diffraction theory; lens antenna; diagonal horn antenna; far field characteristics

## 1 引言

太赫兹 (THz) 波频率<sup>[1]</sup>为 0.1~10 THz, 该频段位于高频无线电向远红外光过渡的区域。近年来, 随着激光技术<sup>[2]</sup>和探测技术<sup>[3]</sup>的发展, 太赫兹技术逐渐兴起。相比于其他频段的电磁波, 太赫兹波频率高, 非常适合作为宽带信息载体, 目前已经实现载波频率为 140 GHz、传输速率达到 10 Gb/s 的无线通信<sup>[4]</sup>, 因此太赫兹无线通信系统具有广泛的应用前景。

天线是任何无线通信系统中不可或缺的组成部分, 太赫兹天线的研究对太赫兹无线通信系统的发展起着极大的推动作用。在实际应用中, 由于太赫兹波在大气中自由传播时的吸收损耗十分严重, 太赫兹波通常用于点对点的无线通信系统, 因此要求太赫兹通信天线具有高增益和很好的定向性。近年来, 椭半球透镜<sup>[5]</sup>、圆柱透镜<sup>[6]</sup>和菲涅耳波带片<sup>[7]</sup>等光学元件广泛应用于太赫兹波的聚焦。2013 年, Xu<sup>[8]</sup>等人提出了一种工作频段为 260~280 GHz 的背腔式菲涅耳透镜天线, 采用低温共烧陶瓷的方法, 使用由金属材料隔开的两层介质, 在最底层介质衬底的背面开孔, 在两层介质之间形成圆形腔以提高天线的孔径效率。该天线在 270 GHz 处的增益为 20 dBi, 3 dB 主瓣宽度为 15°。2014 年, Singh<sup>[9]</sup>等人提出了一种相位修正型菲涅耳透镜天线。该天线的工作频率为 26~34 GHz, 透镜表面由很多小矩形槽构成的连续矩形单元组成, 在 30 GHz 处的增益为 22.1 dB, 3 dB 主瓣宽度为 22.1°。2016 年, Zhang<sup>[10]</sup>提出了一种工作频率为 10 GHz 的菲涅耳透镜天线。该天线由同心圆环构成, 由波导进行馈电, 采用 3D 打印中的熔融沉积成型 (FDM) 技术, 使用 ABS 树脂进行了透镜加工, 其增益为 18 dBi, 3 dB 主瓣宽度为 24°。目前, 适用于太赫兹波段的透镜天线种类仍然较少, 且其聚焦性能和方向性也亟需进一步的提高, 以满足太赫兹无线通信系统的要求。

为了进一步提高太赫兹天线的聚焦性能和方

向性, 本文提出了一种“井”字堆叠型太赫兹透镜天线。该天线由两部分组成: 角锥喇叭天线作为初级馈源; “井”字堆叠型透镜用于聚焦喇叭天线辐射的太赫兹波。根据菲涅耳-基尔霍夫衍射理论和傍轴近似条件分析了透镜天线的聚焦场分布, 研究了其远场辐射性能, 并讨论了全波周期和焦径比对天线远场辐射性能的影响。实验证明“井”字堆叠型太赫兹透镜天线的聚焦性能好、方向性强, 同时具有结构刚性强、灵活度高、工艺简便、成本低等特点。

## 2 透镜结构的聚焦场分布

根据太赫兹大气吸收损耗模型, 透镜天线工作在太赫兹第一大气传播窗口内, 中心工作频率为 350 GHz, 工作频段为 320~380 GHz。

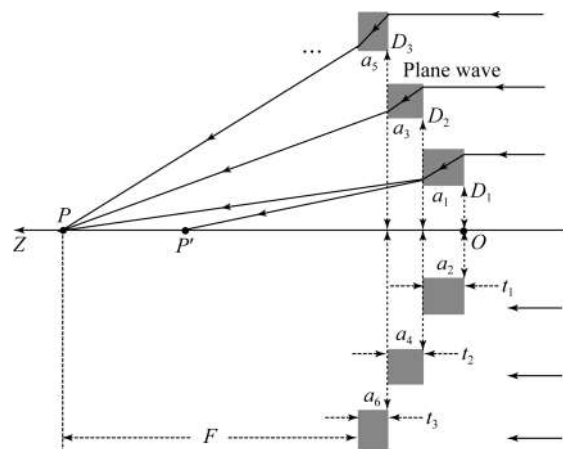


图 1 “井”字堆叠型透镜结构截面图

Fig. 1 Section view of cross-like rings stacked lens

如图 1 所示为透镜结构示意图。它由若干个“井”字形环 (图示为 3 个) 中心对齐紧密堆叠而成。一束平面波沿着 Z 轴照射透镜, 经折射后入射平面波变成球面波并聚焦于透镜的各个焦点上, 其中 P 点为主焦点。利用菲涅耳-基尔霍夫衍射理论分析透镜在 Z 轴上的聚焦场。简便起见, 首先分析单个圆形环的聚焦场分布, 如图 2 所示; 之后再根据傍轴近似条件<sup>[11]</sup>对圆形环和“井”字形环进行拟合。

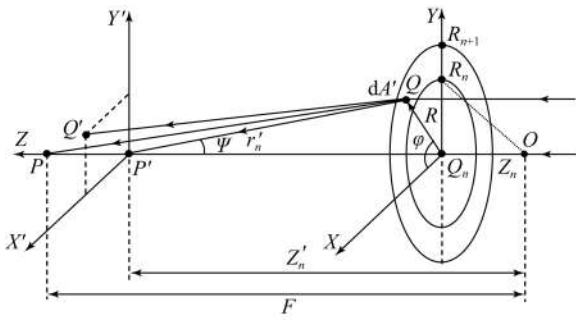


图 2 单个圆环的聚焦场分布

Fig. 2 Focusing action of single annular ring

圆形孔径上的一个单元  $dA'$  在  $Z$  轴上任一点

$$E_n(r'_n) = \frac{j}{\lambda} E_0(Z'_n) e^{-j\Delta\Phi_n} \int_0^{2\pi} \int_{R_n}^{R_{n+1}} H(\varphi) \frac{e^{-j\beta r'_n}}{r'_n} R dR d\varphi \quad (2)$$

整个孔径在空间内任一点  $Q'(X', Y', Z')$  处

$$E_n(\rho'_n) = \frac{j}{\lambda} E_0(Z'_n) e^{-j\Delta\Phi_n} \int_0^{2\pi} \int_{R_n}^{R_{n+1}} H(\varphi) \frac{e^{-j\beta \rho'_n}}{\rho'_n} R dR d\varphi \quad (3)$$

其中惠更斯源函数为:

$$H(\varphi) = (1 + \cos \varphi) / 2, \quad (4)$$

$$\cos \varphi = (Z'_n - Z_n) / \rho'_n. \quad (5)$$

孔径上某一单元  $dA'$  与  $Q'$  之间的距离为:

$$\rho'_n(X', Y', Z', R, \varphi) = \sqrt{(X' - R \cos \varphi)^2 + (Y' - R \sin \varphi)^2 + (Z'_n - Z_n)^2}. \quad (6)$$

根据式(3)可进一步得到  $n$  ( $n$  为正整数) 个孔径在空间内任一点  $Q'$  处的聚焦场分布, 即:

$$E(X', Y', Z') = \sum_n E_n(\rho'_n). \quad (7)$$

平面波经过  $n$  层的透镜结构后沿着  $Z$  轴 ( $X'=Y'=0$ ) 的聚焦场的强度分布函数为:

$$I_F(Z') = [E(Z') / E_0(Z')]^2. \quad (8)$$

在透镜主焦点  $P$  处 ( $X'=Y'=0, Z'=F$ ) 的聚焦场强度以 dB 为单位可表示为:

$$I_F(F) = 20 \log [E(F) / E_0(F)]. \quad (9)$$

根据给定的中心工作波长  $\lambda = 857.1 \mu\text{m}$  和焦距  $F = 30 \text{ mm}$ , 圆形孔径的半径  $R_n$  与厚度  $\omega_n$ <sup>[13]</sup> 分别为:

$$R_n = \sqrt{2\Lambda(n)F + \Lambda^2(n)}, \quad (10)$$

$$\omega_n = R_{n+1} - R_n, \quad (11)$$

其中:  $\Lambda(n) = n\lambda/2$ , 为半波函数。

当  $F \gg n_{\text{max}}\lambda$  时, 根据傍轴近似条件, 式(10)可近似为:

$$R_n = \sqrt{nF\lambda}. \quad (12)$$

$P'$  处产生的聚焦场  $dE_n$ <sup>[12]</sup> 为:

$$dE_n(r'_n) = \frac{j}{\lambda} E_0(Z'_n) e^{-j\Delta\Phi_n} H(\varphi) \frac{e^{-j\beta r'_n}}{r'_n} dA, \quad (1)$$

其中:  $r'_n = \sqrt{(Z'_n - Z_n)^2 + R^2}$ , 是孔径上一点  $Q$  与点  $P'$  之间的距离;  $H(\varphi) = (1 + \cos \varphi) / 2$ , 为惠更斯源函数;  $E_0(Z'_n) = E_0 e^{-j\beta Z'_n}$ , 为不放置透镜时点  $P$  处平面波的场;  $\Delta\Phi_n = \beta[Z_n + \omega(\sqrt{\epsilon} - 1)]$ , 为平面波经过孔径后产生的相移;  $\beta = 2\pi/\lambda$ , 为自由空间的相位函数。

根据式(1)可得整个圆形孔径在  $Z$  轴上点  $P'$  处产生的聚焦场  $E_n(r'_n)$  为:

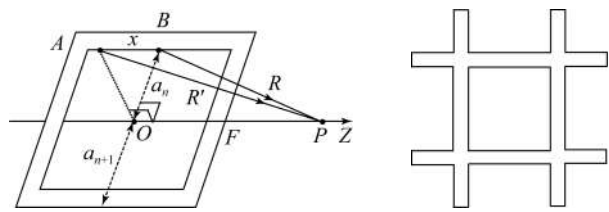
产生的聚焦场分布可以表示为:

图 3(a) 所示为方形孔径的聚焦情况, 式(12)

可用于描述方形环的边心距, 即  $a_n = \sqrt{nF\lambda}$ 。从图中可以看出, 经过方形孔径, 从不同位置发出的射线在到达主焦点  $P$  处时存在光程差, 如分别从  $A, B$  两点出射的射线之间存在的光程差为:

$$\Delta = R' - R = x^2 / 2F. \quad (13)$$

根据式(13)可以看出, 从方形孔径的 4 个顶点处出射的射线与其他射线之间的光程差最大, 所产生的相位差会对孔径的聚焦性能产生不利影响, 因此这里延长方形孔径的四条边, 形成“井”字形环来补偿这一相位差<sup>[14]</sup>, 如图 3(b) 所示。



(a) 单个方形环的聚焦场分布 (b) “井”字形环  
(a) Focusing action of single square ring (b) Cross-like ring

图 3 方形环和“井”字形环

Fig. 3 Square ring and cross-like ring

### 3 透镜天线的结构设计

#### 3.1 初级馈源天线

采用如图 4 所示的角锥喇叭天线作为初级馈源, 其主要结构参数为  $W = 8.5 \text{ mm}$ ,  $H = 7.3 \text{ mm}$ ,  $L = 46 \text{ mm}$ ,  $d = 4.6 \text{ mm}$ 。根据 WR-2.8 标准波导得其波导部分尺寸为  $\omega = 0.71 \text{ mm}$ ,  $h = 0.355 \text{ mm}$ 。

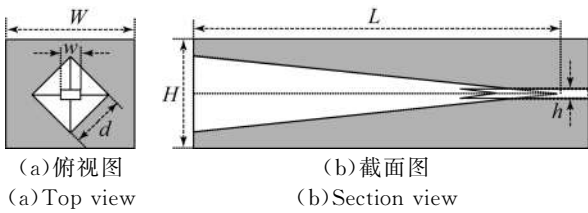


图 4 角锥喇叭天线示意图

Fig. 4 Sketch of diagonal horn antenna

图 5(a)所示为角锥喇叭天线在 350 GHz 处,  $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  且  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$  时的三维及二维增益分布。喇叭天线具有对称的辐射模式和较为尖锐的主瓣。图 5(b)所示为角锥喇叭天线的扫频增益曲线,在整个工作频率范围内增益均高于 23.8 dB 且呈现平稳上升的趋势,最大增益 25.2 dB 出现在 380 GHz 频率点处。由图 5(c)所示曲线可以看出,角锥喇叭天线的 3 dB 主瓣宽度呈平稳下降的趋势,变化为  $11.9^\circ \sim 10^\circ$ ,具有良好的定向性。

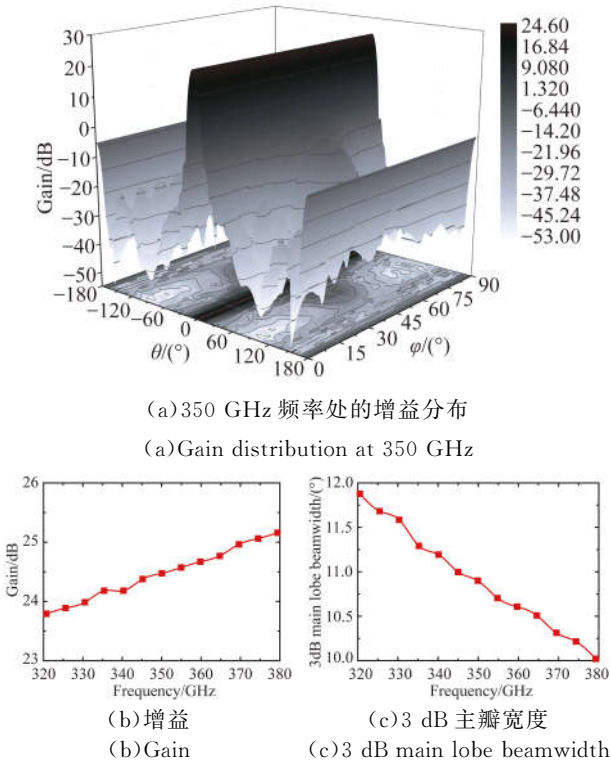


图 5 角锥喇叭天线的远场辐射性能

Fig. 5 Far field characteristics of diagonal horn antenna

### 3.2 “井”字形堆叠透镜天线

基于图 3(b)所示的“井”字形堆叠型透镜,本文设计了由 4 个“井”字形环按照中心对齐并紧贴堆

叠而成的透镜结构,如图 6 所示,环材料为纯铜。透镜放置在角锥喇叭天线前  $D=F=30$  mm 处,两者中心对齐。根据式(11)~式(12)可得透镜结构的尺寸参数,如表 1 所示。4 个环(Ring 1~Ring 4)的厚度分别为 2.10,1.36,1.08 和 0.82 mm。

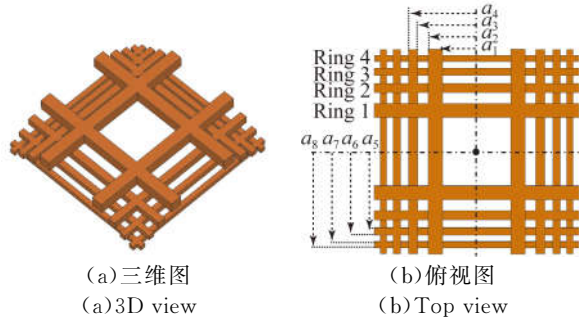


图 6 “井”字形堆叠透镜示意图

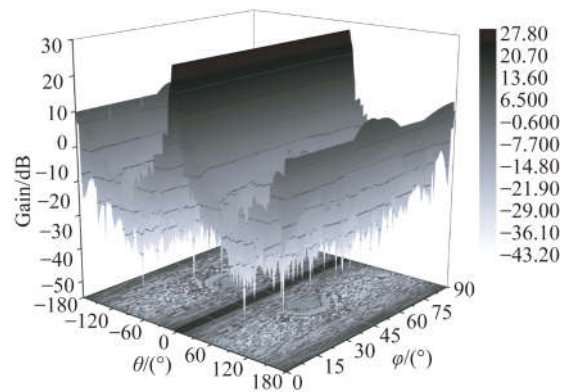
Fig. 6 Sketch of cross-like rings stacked lens

表 1 透镜结构参数

Tab. 1 Structure parameters of stacked lens (mm)

参数	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
大小	5.1	7.2	8.8	10.1	11.3	12.4	13.4	14.3

图 7(a)所示为透镜天线在 350 GHz 处,  $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  且  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$  时的三维及二维增益分布。与初级馈源相比,其主瓣更加尖锐。由图 7(b)可知,透镜天线在整个工作频率范围内的增益高于 27.1 dB,最大增益值 28.4 dB 出现在 380 GHz 处。由图 7(c)可知,透镜天线在整个工作频段内 3 dB 主瓣宽度为  $4.3^\circ \sim 5.4^\circ$ ,能量辐射更为集中。上述结果说明,该透镜天线具有良好的聚焦特性和定向性,基本满足太赫兹通信系统的要求。



(a) 350 GHz 频率处的增益分布

(a) Gain distribution at 350 GHz

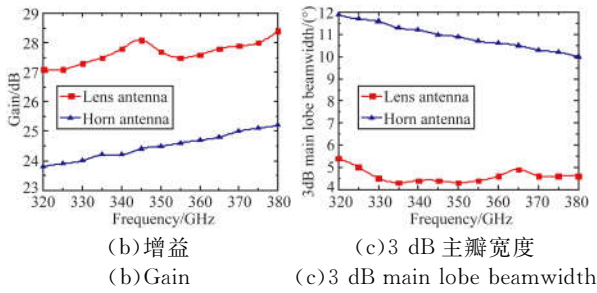


图 7 透镜天线的远场辐射性能

Fig. 7 Far field characteristics of lens antenna

### 3.3 透镜天线的结构特性

根据透镜结构可知,全波周期  $p$  是影响透镜天线远场辐射性能的重要因素。此外,该透镜具有多焦点的特性,因此其焦距比  $k(k=F/D)$  也会对透镜天线的辐射产生影响。

#### 3.3.1 全波周期

首先分析全波周期  $p$  对透镜天线辐射性能的影响。保持透镜天线焦距比  $k=1$ ,对比全波周期  $p=3,4,5,6$  的条件下透镜天线的远场辐射特性,结果如图 8 所示。

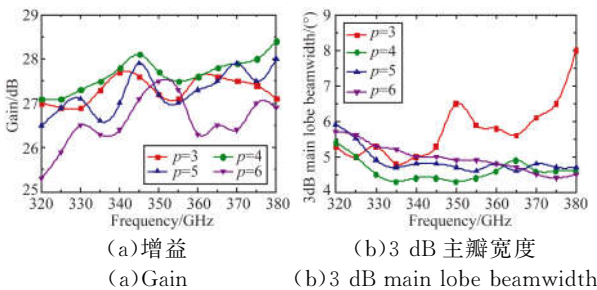


图 8 不同全波周期条件下透镜天线的远场辐射性能

Fig. 8 Far field radiation characteristics of lens antennas with different full-wave periods

由图 8 可知,当全波周期为 4 时,透镜天线在整个工作频段内的增益始终保持最高,其 3dB 主瓣宽度曲线变化最稳定且在工作频率范围内平均值最小。上述结果说明:当透镜天线的焦距比恒定,全波周期为 4 时可获得最佳的透镜远场辐射性能。

#### 3.3.2 焦距比

基于 3.3.1 节的结论,保持透镜天线的全波周期为 4,对比焦距比  $k=1,2,3$  的条件下透镜天

线的远场辐射特性,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,透镜天线在焦距比为 1 时,在整个工作频段内其聚焦增益始终最高,3 dB 主瓣宽度始终最小。由此说明:在全波周期恒定时,透镜天线在焦距比为 1 时能够获得最佳的远场辐射模式。

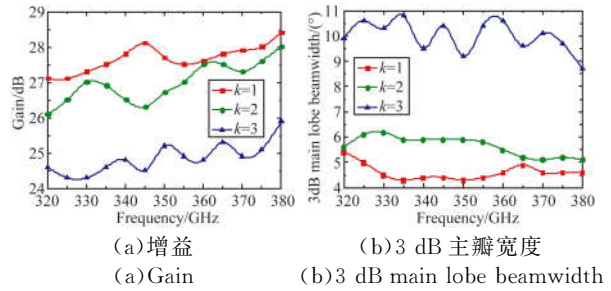


图 9 不同焦距比条件下透镜天线的远场辐射性能

Fig. 9 Far field radiation characteristics of lens antennas with different focus diameter ratios

## 4 测试与结果

### 4.1 实物加工与测试

图 10 为所设计透镜的实物,由短脉冲激光切割而成,材料为纯铜(Cu)。由于特氟龙(Teflon)材料在太赫兹第一大气传播窗口内具有较高的透过率,因此使用主要成分为特氟龙的表面贴装(SMT)专用胶对透镜结构的 4 个环进行组装。

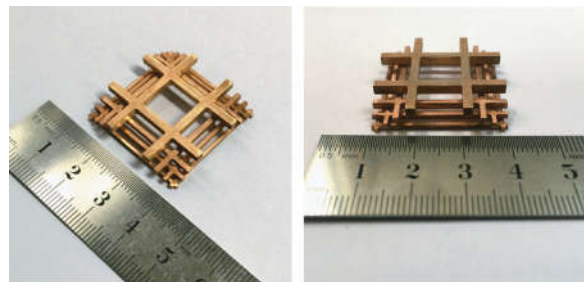


图 10 “井”字形堆叠透镜实物

Fig. 10 Photos of cross-like rings stacked lens

图 11 所示为透镜天线测试场景示意图。角锥喇叭天线作为透镜天线的初级馈源,放置在透镜后  $D=F=30\text{ mm}$  处。

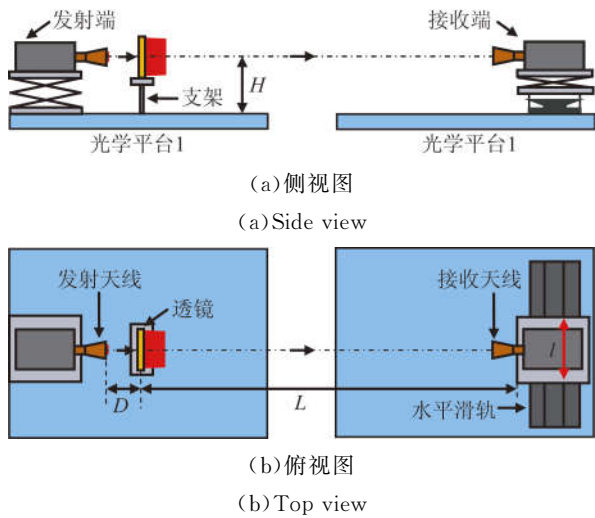


图 11 透镜天线测试场景示意图

Fig. 11 Sketch of experimental set-up for lens antenna test

发射端如图 12(a) 所示, 太赫兹源由电源、20 GHz 微波信号源、16×倍频器模块、5 GHz 信号源及混频器等组成, 向发射天线进行馈电。频率为 20 GHz 的微波信号经 16×倍频模块后得 320 GHz 的太赫兹信号, 给该太赫兹信号加载  $N \times 5$  GHz ( $N=0, 1, 2, \dots, 12$ ) 的上变频信号, 从

而实现 320~380 GHz 的扫频(分别为 320, 325, 330, ..., 375 和 380 GHz 共 13 个频率点)。

如图 12(b) 所示, 接收端由电源、20 GHz 微波信号源、16×倍频器模块、混频器及矢量网络分析仪组成。与接收端相同, 频率为 20 GHz 的微波信号经 16×倍频器模块后得到 320 GHz 的太赫兹信号。该太赫兹信号与接收天线接收到的信号进行混频, 得到频率为  $N \times 5$  GHz ( $N=0, 1, 2, \dots, 12$ ) 的低频微波信号。该低频信号输入矢量网络分析仪中即可得到不同频点上透镜天线的增益值。接收端可在水平滑轨上进行移动。发射天线、透镜和接收天线 3 者的口径中心在同一条水平直线上, 与光学实验平台的间距  $H=20$  cm。透镜与接收天线之间的距离  $L$  应满足透镜天线的远场辐射条件<sup>[15]</sup>, 即:

$$L=2R^2/\lambda_{\min}=4.7\text{ m}, \quad (14)$$

其中:  $R$  是透镜结构的最大口径尺寸。为了保证在 320~380 GHz 工作频率内所有的太赫兹波都能够满足透镜天线的远场辐射条件,  $\lambda_{\min}$  为最大工作频率 380 GHz 所对应的波长。

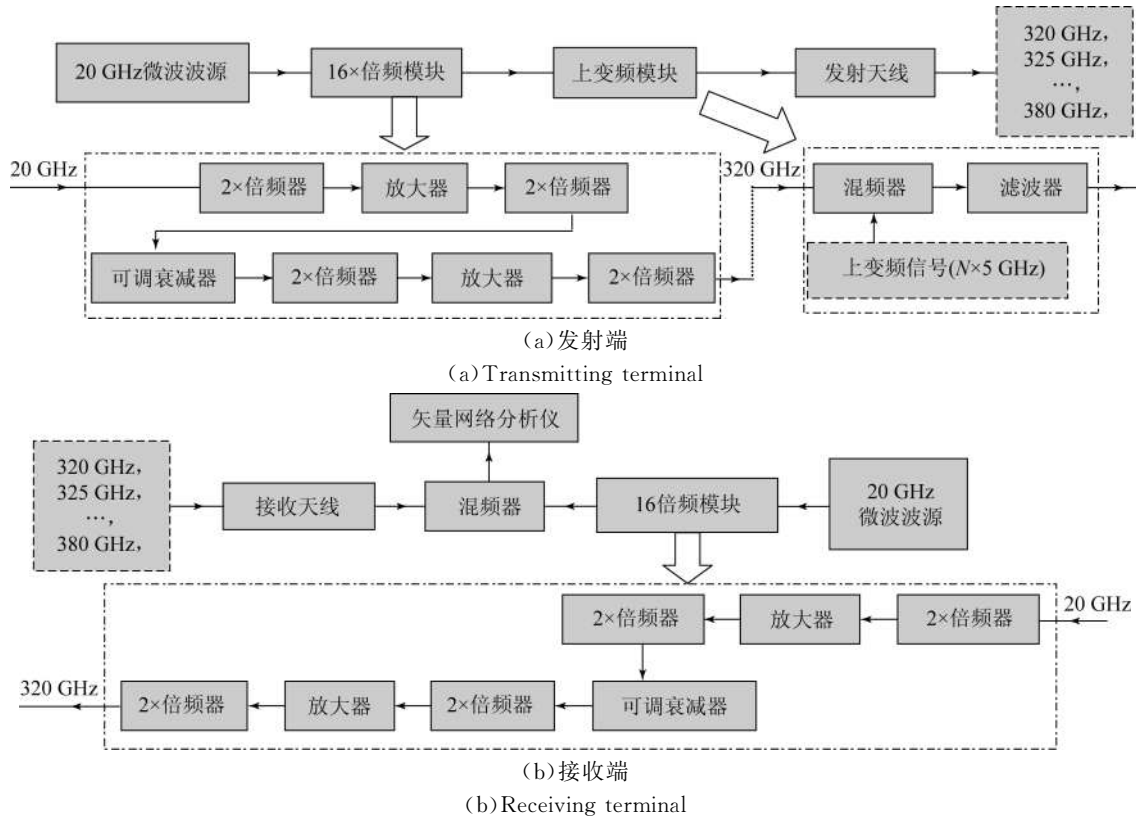


图 12 发射端及接收端结构示意图

Fig. 12 Sketch of transmitting and receiving terminals

如图 13 所示,在测试过程中,接收端应当以  $\Delta\theta$  为角度步长,以透镜结构口径中心为圆心作圆周运动,并在每个位置点处进行扫频。但由于  $L$  较大,接收端的圆周运动难以实现,而当  $\theta=7^\circ$  时,  $\Delta=r-L=7.5\times 10^{-3}L$ ,与  $L$  相比可以忽略不计。因此可以在  $-7^\circ\leq\theta\leq 7^\circ$  (该范围包含了角锥喇叭天线和透镜天线的主瓣)内使接收端在滑轨上进行水平位移来近似圆周运动,圆周运动的角度步长  $\Delta\theta$  所对应的水平位移步长为  $\Delta l=L\tan\theta$ 。

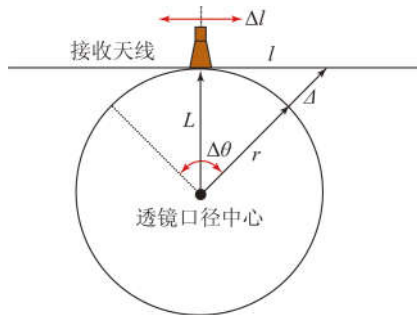


图 13 测量天线远场时接收端的移动

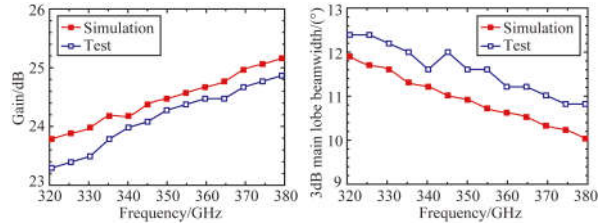
Fig. 13 Movements of receiver unit during test

在天线 3 dB 主瓣宽度的实际测试过程中,以  $\Delta\theta = 0.2^\circ$  为角度步长,根据  $\Delta l=L\tan\theta$  即可求得接收端在水平滑轨上的具体位置。在每个角度近似对应的水平位置上进行扫频,在相同频率下,天线增益下降 3 dB 的位置所对应的角度即为天线在该频点处的 3 dB 主瓣半宽度。

### 4.2 测试结果

基于前面所述实验方案,角锥喇叭天线和透镜天线的测试结果分别如图 14 和图 15 所示。角锥喇叭天线的实测增益在 23.8~24.9 dB,略低于仿真结果,增益曲线变化趋势与仿真曲线基本相同。角锥喇叭天线的 3 dB 主瓣宽度在  $10.8^\circ\sim 12.4^\circ$  变化,除个别频点外,3 dB 主瓣宽度的大小和曲线变化趋势与仿真结果基本吻合。对于透镜天线,实测增益曲线与仿真曲线相比有波动,但增益值在 26.4~28.1 dB,与仿真结果十分接近。由图 15(b) 可以看到,透镜天线的实测 3 dB 主瓣宽度低于仿真结果,其主要原因是在测试过程中接收端采用水平位移来近似圆周运动,导致在测试透镜天线在不同  $\theta$  角处的增益时,接收天线的

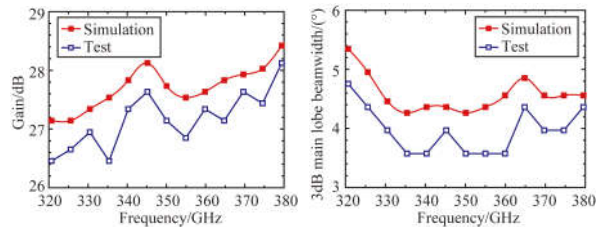
最大接收方向没有正对透镜天线的口径中心,进而导致在每个位置处测试到的增益值比实际增益低。



(a)增益 (a) Gain (b)3 dB 主瓣宽度 (b)3 dB main lobe beamwidth

图 14 角锥喇叭天线的远场辐射性能

Fig. 14 Far field characteristics of diagonal horn antenna



(a)增益 (a) Gain (b)3 dB 主瓣宽度 (b)3 dB main lobe beamwidth

图 15 透镜天线的远场辐射性能

Fig. 15 Far field characteristics of lens antenna

## 5 结 论

本文根据太赫兹通信系统对天线增益高、定向性强的要求,提出了“井”字堆叠型透镜天线。首先设计了角锥喇叭天线作为透镜天线的初级馈源,然后基于菲涅耳-基尔霍夫衍射理论和傍轴近似条件提出了“井”字堆叠型透镜,并对其聚焦场进行了分析,最后研究了全波周期和焦距比等结构特性对透镜天线远场辐射特性的影响。实验结果表明:透镜天线具有对称的辐射模式,在 320~380 GHz 工作频率内的增益高于 26.4 dB,3 dB 主瓣宽度低于  $4.8^\circ$ 。与现有的太赫兹透镜天线相比,“井”字堆叠型透镜天线具有更高的聚焦增益和更强的定向性,能量辐射更为集中。除此之外,由多个金属环构成的透镜结构还具有结构刚性强、灵活度高、制造工艺简便且成本低等特点,基本满足了太赫兹通信系统对天线的要求。

## 参考文献:

- [1] DUFOUR D, MARCHESE L, TERROUX M, *et al.*. Review of terahertz technology development at INO [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(10): 922-946.
- [2] AHMAD H, MUHAMMAD F D, PUA C H, *et al.*. Dual-wavelength fiber lasers for the optical generation of microwave and terahertz radiation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 0902308.
- [3] 李宏光, 杨鸿儒, 薛战理, 等. 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1410-1416.
- LI H G, YANG H R, XUE ZH L, *et al.*. Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowed spectral filter method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1410-1416. (in Chinese)
- [4] 王成, 林长星, 邓贤进, 等. 140 GHz 高速无线通信技术研究 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(9): 2263-2267.
- WANG CH, LIN CH X, DENG X J, *et al.*. 140 GHz data rate wireless communication technology research [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2263-2267. (in Chinese)
- [5] JHA K R, SINGH G. *Ring Resonator-Integrated Hemi-Elliptical Lens Antenna* [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- [6] MA H F, CHEN X, YANG X M, *et al.*. A broadband metamaterial cylindrical lens antenna [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(19): 2066-2070.
- [7] KARIMKASHI S, KISHK A A. Focusing properties of Fresnel zone plate lens antennas in the near-field region [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(5): 1481-1487.
- [8] XU J F, CHEN Z N, QING X M. 270-GHz LTCC-integrated high gain cavity-backed Fresnel zone plate lens antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 1679-1687.
- [9] SINGH N, CHOURE C K, CHAUHAN M, *et al.*. Performance comparison of phase shifting surface lens antenna with other lens antennas [C]. *Proceedings of 2014 International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, IEEE, Allahabad: ICPCES, 2014: 1-6.
- [10] ZHANG S. 3D printed dielectric Fresnel lens [C]. *Proceedings of the 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation*, Davos: EuCAP, 2016: 1-3.
- [11] KULISHOV M, JONES H F, KRESS B. Analysis of PT-symmetric volume gratings beyond the paraxial approximation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 9347-9362.
- [12] KAMBUROV L P, RODRIGUEZ J M, URUMOV J R, *et al.*. Millimeter-wave conical Fresnel zone lens of flat dielectric rings [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(4): 2140-2148.
- [13] LIU Y J, GE Y H. Design of high efficiency broadband Fresnel zone lens antenna at K band [C]. *Proceedings of 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Bali Island: APCAP, 2015: 317-318.
- [14] SABATYAN A, RAFIGHDOOST J. Focusing specification of cross-like Fresnel zone plate [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(24): 4796-4799.
- [15] BALANIS C A. *Antenna Theory: Analysis and Design* [M]. 4th ed.. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

## 作者简介:



曾 威(1993—),男,山东郓城人,2014年于重庆邮电大学获得学士学位,主要从事太赫兹通信透镜天线的研究。E-mail: vlad\_zehn@163.com

## 导师简介:



潘 武(1966—),男,四川大英人,博士,教授,1989年、1995年、2001年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事太赫兹技术、超材料及其应用方面的研究。E-mail: panwu@cqupt.edu.cn