

# 基于贝塞尔波束的大景深毫米波介质透镜天线设计

于 洋<sup>1,2</sup>, 王子野<sup>2</sup>, 乔灵博<sup>2</sup>, 赵自然<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学工程物理系, 北京 100084; 2. 清华大学危爆物品扫描探测技术国家工程实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 提出了基于贝塞尔波束的大景深毫米波介质透镜天线的设计方法. 利用轴锥镜生成贝塞尔波束, 并根据成像要求分别设计了基于贝塞尔波束的毫米波介质透镜天线和基于高斯波束的毫米波介质透镜天线. 在 3mm 波段进行了仿真测试及分析, 仿真结果表明, 所设计的基于贝塞尔波束的毫米波介质透镜天线的 3dB 宽度为 3.23mm, 景深约为 228mm, 相较于传统的基于高斯波束的毫米波介质透镜天线, 基于贝塞尔波束的毫米波介质透镜天线可实现的景深提升至 5 倍以上.

**关键词:** 毫米波成像; 景深; 贝塞尔波束; 安检

**中图分类号:** TN821+.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2020)07-1369-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.07.016

## Design of Large Depth of Field Millimeter-Wave Lens Antenna Based on Bessel Beam

YU Yang<sup>1,2</sup>, WANG Zi-ye<sup>1,2</sup>, QIAO Ling-bo<sup>2</sup>, ZHAO Zi-ran<sup>1,2</sup>

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. National Engineering Laboratory for Dangerous Articles and Explosives Detection Technologies, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In this study, we propose an approach to design large depth of field (DOF) millimeter wave (MMW) lens antenna based on Bessel beam. The Bessel beam is generated by using axicon. And the MMW dielectric lens antenna based on Bessel beam or Gaussian beam are designed respectively to satisfy the requirement of imaging. Further, the simulation experiment and analysis are conducted in the 3mm band. The results of simulation indicate that the 3dB beam-width is 3.23mm and the achievable DOF is around 228mm. Compared with the traditional MMW dielectric lens antenna based on Gaussian beam, the achievable DOF can be improved more than five times by MMW dielectric lens antenna based on Bessel beam.

**Key words:** millimeter-wave imaging; depth of field; Bessel beam; security detection

### 1 引言

毫米波以其非电离辐射、可穿透衣物及高分辨等特性,在人体安检成像、无损检测等领域受到了越来越多的关注<sup>[1,2]</sup>. 现有的毫米波主动式成像技术按照成像距离的大小可分为近距离成像和站开式成像两类,其中,近距离成像一般采用全息成像体制<sup>[3,4]</sup>,由于波束发散,成像距离较短;而相较于近距离成像,站开式成像的成像距离更长,能够保证安检人员有足够的安全距离和反应时间,因此得到了广泛关注<sup>[5,6]</sup>.

站开式毫米波成像系统中常采用基于高斯波束的

介质透镜天线<sup>[7]</sup>,如图 1 所示,透镜两侧的电场分布可以近似的看作高斯分布. 根据电磁波的传播特性,可将经过透镜会聚后的电磁波分为会聚区、聚焦区和发散区,该介质透镜天线利用的是电磁波的聚焦区,通过聚焦实现孔径扫描,其能实现的成像景深 *DOF* 取决于 *Rayleigh* 距离  $z_R$ , 即

$$DOF = 2z_R = \frac{2\pi w_{01}^2}{\lambda} \quad (1)$$

式(1)中  $\lambda$  为天线的工作波长,  $w_{01}$  为物方高斯波束的束腰半径. 基于高斯波束的毫米波介质透镜天线只能在焦平面附近获得清晰图像,成像景深有限,难以完全满

足实际成像场景的需要。

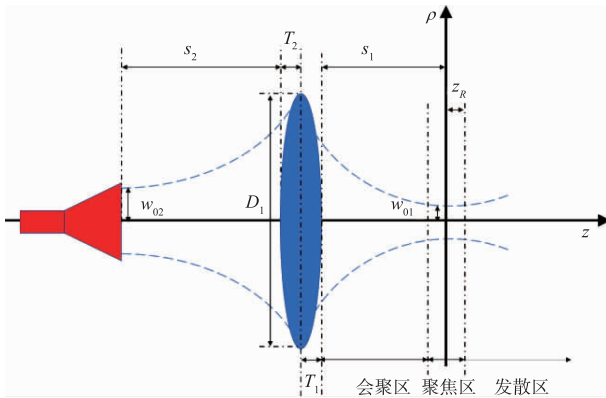


图1 基于高斯波束的介质透镜天线

本文提出了一种基于贝塞尔波束的大景深毫米波介质透镜天线的设计方法,通过轴棱锥法生成无衍射贝塞尔波束,从而拓展天线可实现的景深,仿真结果表明,相较于传统的基于高斯波束的毫米波介质透镜天线,文章所设计的基于贝塞尔波束的毫米波介质透镜天线将成像景深拓展至5倍以上。

## 2 贝塞尔波束成像原理

贝塞尔波束是一种无衍射波束,其场分布可以用第一类零阶贝塞尔函数描述,理想贝塞尔波束的电场分布可写为<sup>[8]</sup>

$$E(\rho, z, t) = \exp[i(\beta z - \omega t)] J_0(\alpha \rho) \quad (2)$$

式(2)中  $J_0$  为第一类零阶贝塞尔函数,  $t$  为电磁波的传输时间,  $\rho, z$  分别为电磁波传输的径向距离和轴向距离,其中  $\rho = x^2 + y^2$ ;  $\alpha = k_\rho$ ,  $\beta = k_z$ , 分别为波束在径向和轴向的波束分量,两者满足  $k_\rho^2 + k_z^2 = k^2 = (\omega/c)^2$ ,  $k$  为波矢,  $\omega$  为电磁波的角频率。式(2)显示,电场的强度分布与  $z$  无关,即电磁波在传播过程中电场的横向分布保持不变,这就是所谓的贝塞尔波束的无衍射特性。

理想的贝塞尔波束的能量是无穷的,这在现实中是不存在的,在实际的系统中,由于孔径有限,我们只能获得准贝塞尔波束。轴棱锥法是最常用的产生准贝塞尔波束的方法。如图2所示,一束平面波照射在轴棱锥上,在透镜后将产生的一定的距离的贝塞尔波束。

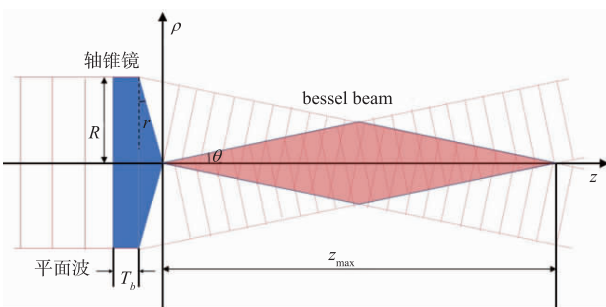


图2 轴棱锥产生贝塞尔波束示意图

轴锥镜的设计是生成贝塞尔波束的关键,对贝塞尔波束的传播距离及能量分布都有直接影响。根据折射定律,并结合图2中的几何关系可知,贝塞尔波束传输的最大距离  $z_{max}$  满足

$$z_{max} = R \left( \frac{1}{\tan \theta} - \tan r \right) \quad (3)$$

式(3)中  $R$  为轴锥镜底面半径,  $r$  为锥棱镜的底角,  $\theta = \sin^{-1}(n \sin(r)) - r$ , 是折射电磁波与轴向的夹角,  $n$  为轴锥镜材料的折射率。

轴棱锥法产生的贝塞尔波束的3dB半径  $\rho_0$  可写为

$$\rho_0 = \frac{1.126}{\alpha} = \frac{1.126}{k \sin \theta} \quad (4)$$

从式(3)、式(4)可以看出,贝塞尔波束的传输距离及主瓣半径均随着  $r$  的减小而增大。因此,选定  $r$  时应当综合考虑所需的成像分辨率及最大成像距离。

轴锥镜的基底厚度为  $T_b$ , 基底的作用是便于轴锥镜的生产加工及固定,对于入射的准直平面波,基底厚度并不影响所生成的贝塞尔波束的传输距离及分辨率,但由于介质损耗大小和基底厚度正相关,故轴锥镜基底厚度越小越好,本文在仿真实验中取  $T_b = 0$ 。

## 3 基于贝塞尔波束的介质透镜天线的设计方法

如图3所示,基于贝塞尔波束的介质透镜天线由馈源喇叭天线、平凸透镜以及轴锥镜三部分组成。其中馈源喇叭天线用来生成满足要求的高斯球面波,平凸透镜的作用是将高斯球面波转化为高斯平面波,最后通过轴锥镜把平面波转化为无衍射的贝塞尔波束。

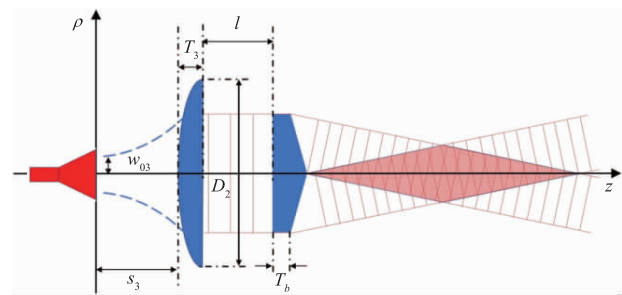


图3 基于贝塞尔波束的介质透镜天线

### 3.1 馈源天线设计

选择角锥喇叭天线作为馈源天线,其示意图如图4所示。为了减小损耗及避免多模式之间的干扰和附加色散,波导应尽量满足  $TE_{10}$  波单模传输,故波导口面尺寸  $a \times b$  取为

$$a \times b = 0.72\lambda \times 0.34\lambda \quad (5)$$

式(5)中  $\lambda$  为馈源天线的工作波长,波导的长度取为  $\lambda$ 。

角锥喇叭天线  $E$  面及  $H$  面方向图的3dB波束角  $\theta_{E,3dB}$ 、 $\theta_{H,3dB}$  可由式(6)表示,即

$$\theta_{E,3dB} = \frac{0.941\lambda}{D_E}, \theta_{H,3dB} = \frac{1.396\lambda}{D_H} \quad (6)$$

为使角锥喇叭天线的增益最大,  $R_E, R_H$  应该满足

$$R_E = \frac{D_E^2}{2\lambda}, R_H = \frac{D_H^2}{3\lambda} \quad (7)$$

$L_E$  和  $L_H$  分别为  $E$  面和  $H$  面的喇叭天线的长度, 在实际的喇叭天线中, 两者应取相同值即

$$L_E = L_H = L = R_H \left(1 - \frac{a}{D_H}\right) \quad (8)$$

若  $L_E \neq L_H$  可通过调整  $R_E$  使得式(8)成立.

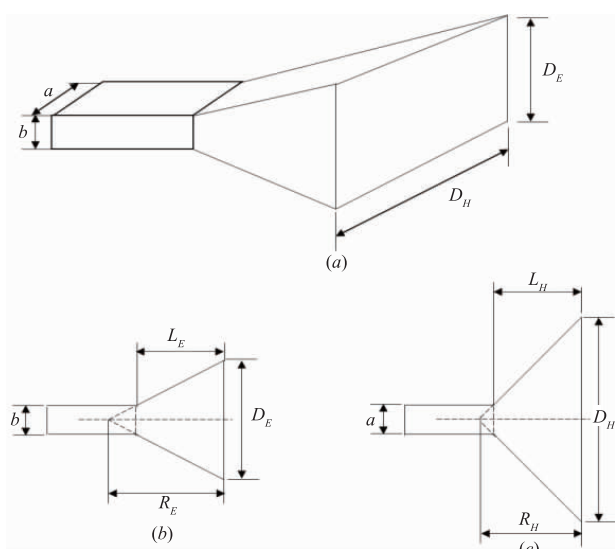


图4 角锥喇叭天线示意图 (a)结构示意图 (b)E面 (c)H面

### 3.2 介质透镜参数确定

材料是透镜的设计要素之一, 在毫米波段, 透镜材料一般选取在该波段损耗角较小的介质, 如高密度聚乙烯、聚四氟乙烯等. 而平凸透镜和轴锥镜的几何参数可分别根据高斯准光理论及贝塞尔波束成像原理导出.

对于平凸透镜, 据高斯准光理论, 透镜天线近轴波束的电场分布近似为高斯分布, 电场归一化表达式为<sup>[9]</sup>

$$E(\rho, z, t) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2(z)}\right) \exp(i(\beta z - \omega t)) \quad (9)$$

式(9)中  $w(z)$  为  $z$  处的波束半径, 其计算表达式可写为

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (10)$$

式(10)中  $w_0$  为束腰处的波束半径, 由式(9)推导可知, 波束的 3dB 焦斑宽度约为  $w_0$  的 1.177 倍, 而 3dB 焦斑宽度受限于馈源天线的口径. 取透镜的口径  $D = 2.5w$  时, 天线的截获效率为 95.6%, 满足工程应用需求. 透镜的像距  $s$  可根据系统的尺寸要求选取.

对于轴锥镜, 根据所需分辨率利用式(4)求出轴锥镜的底角  $r$ , 进而按照最大成像距离要求确定轴锥镜的

底面半径  $R$ . 轴锥镜和平凸透镜的距离  $l$  可通过电磁仿真软件扫描优化得到.

### 3.3 介质透镜轮廓确定

介质透镜的结构符合旋转轴对称结构, 故只需确定透镜的截面的曲线方程即可确定透镜的轮廓.

平凸透镜曲面轮廓可根据实际成像需要选择非球面、双曲面等. 由于双曲面的结构最为简单, 加工难度及加工成本较低, 故本文中平凸透镜的轮廓选为双曲面, 其轮廓曲线方程为

$$z = s + \frac{\sqrt{((n-1)s)^2 + (n^2-1)\rho^2} - (n-1)s}{n^2-1} \quad (11)$$

双曲面透镜的厚度  $T$  满足

$$T = \frac{1}{n+1} \left[ \sqrt{s^2 + \frac{(n+1)D^2}{4(n-1)}} - s \right] \quad (12)$$

轴锥镜的轮廓较为简单, 一般为三角形, 其轮廓曲线方程可写为

$$\rho = \tan r(z - z_0) \quad (13)$$

式(13)中  $z_0$  为轴锥镜顶点与原点之间的轴向距离.

## 4 设计实例及仿真分析

本节将分别设计基于高斯波束的毫米波介质透镜天线和基于贝塞尔波束的毫米波介质透镜天线, 并利用电磁仿真软件 FEKO 进行测试验证. 两透镜天线的示意图分别如图 1、图 3 所示. 透镜天线的工作波长  $\lambda$  为 3mm, 要求在透镜焦平面的图像分辨率为 3mm.

### 4.1 设计实例

设定馈源天线  $E$  面和  $H$  面方向图的 3dB 波束角度均为  $30^\circ$ , 根据式(5) ~ (8) 可得口面尺寸  $D_H \times D_E = 7.99\text{mm} \times 5.40\text{mm}$ , 长度  $L$  为 5.13mm, 仿真测试结果表明该喇叭天线的增益为 15.5dB,  $E$  面和  $H$  面的 3dB 波束角分别为  $29.86^\circ$  和  $30.10^\circ$ . 该喇叭天线的辐射场可以看作准高斯球面波, 其口径场与理想高斯波束的一维耦合系数<sup>[9]</sup> 分别为 0.895 和 0.780.

介质透镜的材料均选用聚四氟乙烯, 其在 3mm 波段的折射率  $n$  为 1.44. 依照陈其科等人<sup>[10]</sup> 所提方法设计基于高斯波束的介质透镜天线, 设定天线在物距  $s_1 = 200.00\text{mm}$  处形成高斯波束束腰且该处分辨率为 3mm, 则可求得束腰半径  $w_{01}$  为 2.55mm, 进而求得透镜口径  $D_1 = 186.99\text{mm}$ . 由于馈源天线的短边为 5.40mm, 取像平面聚焦波束的 3dB 焦斑为 6mm, 则对应的像平面束腰半径  $w_{02}$  为 5.11mm, 像距  $s_2 = 399.30\text{mm}$ . 基于高斯波束的介质透镜天线采用双凸透镜, 两截面轮廓均选择双曲面, 计算可得透镜厚度  $T_1 = 39.76\text{mm}$ ,  $T_2 = 23.12\text{mm}$ .

平凸透镜的参数可根据高斯准光理论确定, 为保证对比实验中变量的单一性, 设定像平面的束腰半径

$w_{03} = w_{02} = 5.11\text{mm}$ , 像距  $s_3 = s_2 = 399.30\text{mm}$ , 则透镜口径  $D_2 = 186.99\text{mm}$ , 透镜厚度  $T_3 = 23.12\text{mm}$ . 轴锥镜的参数根据上文贝塞尔波束成像原理确定, 为实现  $3\text{mm}$  的分辨率, 由式(4)可得  $\theta = 21.00^\circ$ , 进而求得轴锥镜底角  $r = 31.53^\circ$ . 为实现较长的传输距离, 轴锥镜底面半径  $R$  取为  $75.00\text{mm}$ . 利用电磁仿真软件 FEKO 对轴锥镜与平凸透镜之间的距离  $l$  进行优化, 仿真结果显示, 取  $l = 145.00\text{mm}$ , 入射至轴锥镜底面波束最接近高斯平面波, 此时  $z_0$  约为  $615.20\text{mm}$ .

## 4.2 仿真测试及分析

图 5、图 6 分别为基于高斯波束的介质透镜天线和基于贝塞尔波束的介质透镜天线 E 面及 H 面的归一化电场分布图. 从图 5 可以看出, 基于高斯波束的介质透镜天线的物方束腰所在平面为  $z = 25\text{mm}$ , 即实际的物距  $s_1 = 225\text{mm}$ , 与设定的  $s_1 = 200\text{mm}$  略有偏差, 束腰处的  $3\text{dB}$  宽度为  $4.39\text{mm}$ , 大于设定的  $3\text{mm}$ , 主要原因是馈源天线的辐射场并不是理想的高斯波束.

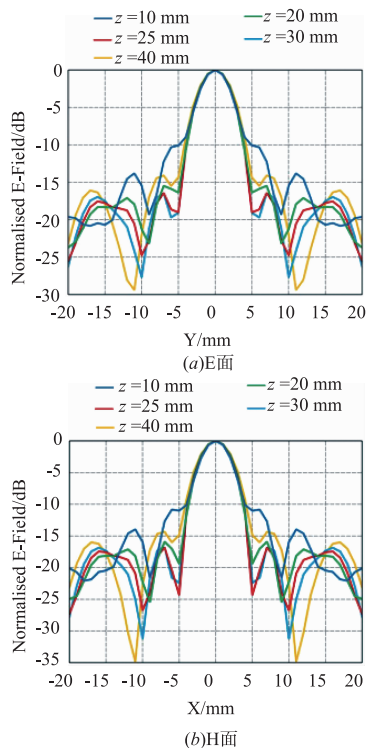


图5 基于高斯波束介质透镜天线电场分布仿真结果

图 6 显示, 基于贝塞尔波束的介质透镜天线的电场在传播过程中, 各轴向位置处 E 面和 H 面的主瓣宽度均保持不变, 电场的  $3\text{dB}$  宽度约为  $3.23\text{mm}$ , 接近所设定的  $3\text{mm}$ , 仿真结果验证验证了该方法的有效性.

接下来, 根据电磁仿真所获得的两种介质透镜天线方向图进行实孔径仿真成像, 如图 7 所示, 成像目标是由尺寸分别为  $5\text{mm} \times 25\text{mm}$ ,  $5\text{mm} \times 20\text{mm}$  的两个金属条组成的 T 形金属板, 成像区域的大小为  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ .

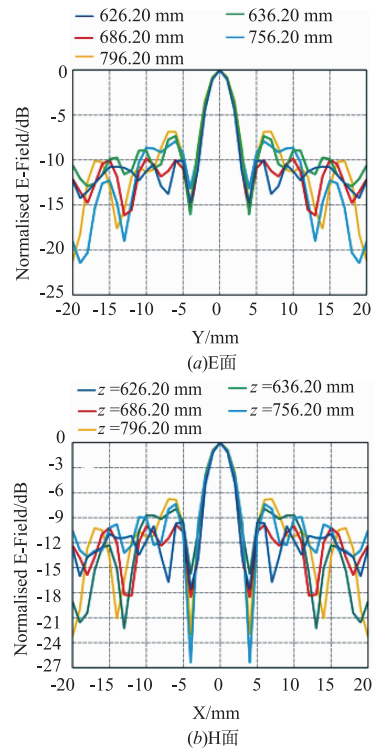


图6 基于贝塞尔波束介质透镜天线电场分布仿真结果

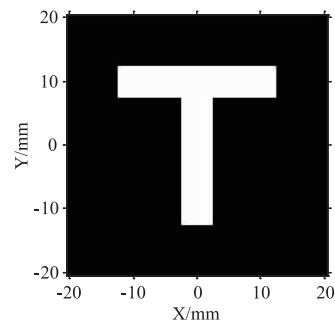


图7 成像目标

图 8 为基于高斯波束的介质透镜天线在不同偏焦距离处所成图像. 图 8 显示基于高斯波束的成像方法在焦平面附近能清晰成像, 在偏焦  $13\text{mm}$  时所成图像出现轻微伪影, 随后成像质量迅速恶化, 偏焦  $15\text{mm}$  时所成图像出现大量伪影, 偏焦  $20\text{mm}$  时所成图像已不可分辨.

图 9 为基于贝塞尔波束的介质透镜天线在各轴向位置所成图像. 从图中可以看出, 在  $z = 616\text{mm}$  到  $z = 836\text{mm}$  的范围内, 所成图像质量稳定, 均未出现明显模糊.  $z = 856\text{mm}$  时所成图像伪影严重, 图像不可分辨.

为更精细、更客观的对比两种介质透镜天线的成像结果, 采用平均结构相似性 (Mean Structural Similarity index, MSSIM) 作为评价图像质量的指标<sup>[11]</sup>. MSSIM 为无量纲数, 其取值范围为  $0 \sim 1$ , MSSIM 值越大, 天线所成图像与原始图像越相似, 即天线所成图像的质量越好.

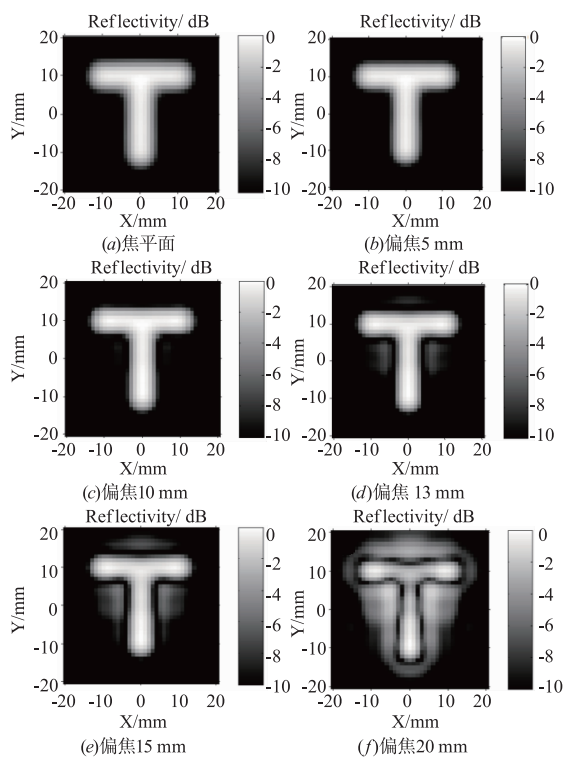


图8 不同偏焦距离下基于高斯波束的介质透镜天线成像结果

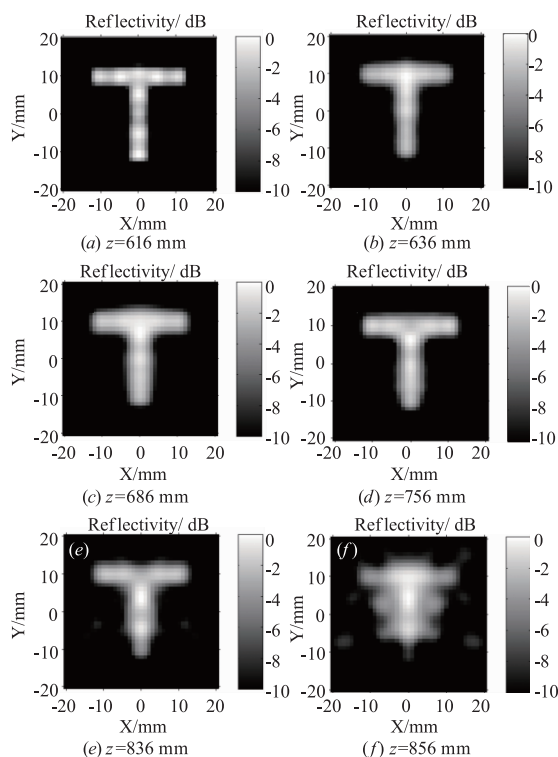
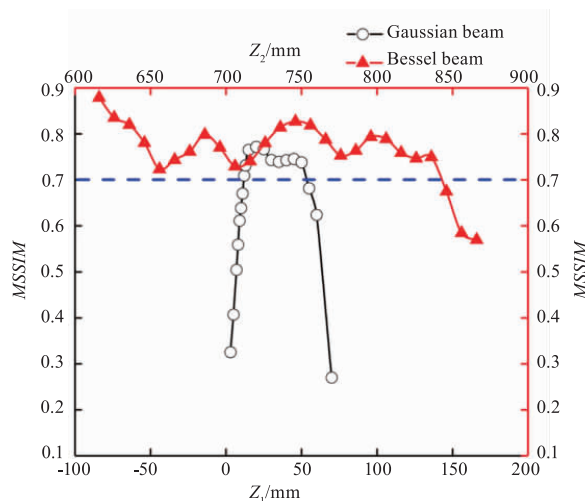


图9 各轴向位置处基于贝塞尔波束的介质透镜天线成像结果

图8(a)~(f)的  $MSSIM$  分别为 0.77、0.77、0.76、0.71、0.64、0.41。由于  $MSSIM = 0.64$  时图像已出现明显模糊,故规定  $MSSIM > 0.7$  的图像为有效图像。进一步地,计算两种介质透镜天线在各轴向位置处所成图

像的  $MSSIM$ ,结果如图10所示。则在  $MSSIM > 0.7$  为有效图像的判定标准下,设计实例中基于高斯波束的介质透镜天线能实现的景深约为 42mm,基于贝塞尔波束的介质透镜天线能实现的景深约为 228mm。

图10 各轴向位置处介质透镜天线所成图像的  $MSSIM$ 

## 5 结论

本文从贝塞尔波束成像原理出发,提出了一种基于贝塞尔波束的毫米波介质透镜天线的设计方法,依照该方法设计了基于贝塞尔波束的介质透镜天线。仿真测试表明,在 3mm 波段,该介质透镜天线的 3dB 宽度约为 3.23mm,景深约为 228mm。与传统基于高斯波束的介质透镜天线相比,景深提升了 5 倍以上,且其成像分辨率也优于传统介质透镜天线。

## 参考文献

- [1] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(9): 1581–1592.
- [2] Helander J, Ericsson A, Gustafsson M, et al. Compressive sensing techniques for mm-wave nondestructive testing of composite panels [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10): 5523–5531.
- [3] Sheen D, McMakin D, Hall T. Near-field three-dimensional radar imaging techniques and applications [J]. Applied Optics, 2010, 49(19): E83–E93.
- [4] Sun Y, Yang M, Cui H, et al. A broadband T/R front-end of millimeter wave holographic imaging [J]. Journal of Computer and Communications, 2015, 3(03): 35–39.
- [5] Appleby R, Wallace H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1THz region [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(11):

- 2944 – 2956.
- [6] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 169 – 182.
- [7] 窦文斌. 准光技术在太赫兹技术中的应用[J]. 微波学报, 2013, 29(5): 113 – 119.  
Dou Wen-Bin. Application of quasi optical techniques in THz technology [J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(5): 113 – 119. (in Chinese)
- [8] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams I The scalar theory [J]. JOSA A, 1987, 4(4): 651 – 654.
- [9] GOLDSMITH P F. Quasi-optical techniques [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(11): 1729 – 1747.
- [10] 陈其科, 樊勇, 张永鸿, 等. 用于近程被动成像的 3mm 波准光介质透镜天线设计 [J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(2): 168 – 173.  
Chen Qi-Ke, Fan Yong, Zhang Yong-Hong, et al. Design of quasi-optical lens antenna for 3mm band near range passive MMW imaging [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(2): 168 – 173. (in Chinese)
- [11] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600 – 612.

### 作者简介



于 洋 男, 1996 年 6 月出生于河南周口, 清华大学工程物理系博士研究生. 研究方向为毫米波、太赫兹波人体安检成像技术.  
E-mail: yu-y17@mails. tsinghua. edu. cn



王子野 女, 1991 年 8 月生于河北省承德市, 清华大学工程物理系博士研究生. 主要研究方向为毫米波成像算法.  
E-mail: yeyedemaomao@126. com



乔灵博 男, 1990 年 6 月出生, 河南洛阳人, 高级工程师, 研究方向为毫米波与太赫兹成像.  
E-mail: qlb199063@163. com



赵自然(通讯作者) 男, 1977 年 8 月出生, 辽宁铁岭人, 2004 年获得清华大学博士学位. 现为清华大学研究员, 博士生导师, 研究方向为人体安检成像技术.  
E-mail: zhaozr@mail. tsinghua. edu. cn