

太赫兹波定向天线设计与分析

时翔¹ 张超² 钱嵩松² 邢业新¹

¹常州工学院计算机信息工程学院, 江苏 常州 213002

²南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 针对太赫兹波探测与通信的具体应用,基于微波、毫米波定向天线的设计与应用基础,对四种 0.36 THz 的太赫兹波定向天线(即馈源喇叭天线、双抛物面卡塞格伦天线、天线透镜以及偏馈式单反射面天线)进行了有效的的设计、分析、仿真与制作。对上述几种太赫兹波定向天线的设计及分析,为基于微波倍频技术的太赫兹波技术在定向探测和通信中的应用,提供了天线技术方面的理论和实践依据。

关键词 探测器; 太赫兹波; 定向天线; 喇叭天线; 抛物面天线; 透镜天线

中图分类号 TN256; TN822+.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.100401

Design and Analysis of Terahertz Wave Directional Antenna

Shi Xiang¹ Zhang Chao² Qian Songsong² Xing Yexin¹

¹ School of Computer Information and Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China

² School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Aiming at the specific application of terahertz wave detection and communication, the four kinds of 0.36 THz terahertz wave directional antennas, including feed horn antenna, double paraboloid Cassegrain antenna, lens antenna and offset feed single reflector antenna, are respectively designed, analyzed, simulated and fabricated based on microwave and millimeter-wave directional antenna design and application. The design and analysis of the above several terahertz wave directional antennas can provide theoretical and practical basis for the directional detection and communication application of terahertz wave technique that is based on the microwave double frequency technique.

Key words detectors; terahertz wave; directional antenna; horn antenna; paraboloid antenna; lens antenna

OCIS codes 040.2235; 110.6795; 090.2910

1 引言

太赫兹波(0.1~10 THz)介于微波和红外之间,既有微波与红外的优点,又能克服二者缺点,因此在探测与通信领域具有巨大的应用前景^[1-2]。

基于光子学方法的太赫兹波技术,包括半导体激光器、飞秒激光器、光电导体的宽带太赫兹源,以及光混频器等发展比较成熟^[3-5],相比之下,基于电子学方法的太赫兹波技术仍然较为缺乏。一方面,微波倍频的太赫兹源输出频率和功率相对较低;另一方面,太赫兹器件的微小尺寸和其高精度加工要求也是制约太赫兹波导器件发展的重要因素。尽管如此,通过倍频链路实现的太赫兹源具有一些独特的优点:1)太赫兹波倍频链路具有良好的可锁相特性以及频率捷变特性,十分适用于探测与通信领域;2)太赫兹波半导体固态倍频链路可工作在室温下,这一点是低温量子级联激光器等太赫兹技术所无法比拟的;3)半导体固态倍频源性能非常

收稿日期: 2016-06-06; **收到修改稿日期:** 2016-06-17; **网络出版日期:** 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(61001010, F010606)、江苏省科技项目(BRA2015076)

作者简介: 时翔(1974—),男,博士,副教授,主要从事微波、太赫兹波探测与成像技术方面的研究。

E-mail: shix@czu.cn

稳定、体积很小、耗能极低,可以应用于要求长时间工作的深空探测与通信领域。因此,微波倍频链路技术成为现阶段太赫兹波技术得以实施的有效方法。2014年11月,美国国防部先进研究项目局(DARPA)的“太赫兹电子元件”项目,基于微波倍频链技术,研发了目前最快的固体放大器单片集成电路,其使用的10级同源放大器工作频率可达1012 GHz。

本文基于太赫兹波低频段的探测与通信应用需求,以0.36 THz频率为例,进行了太赫兹波定向天线系统的设计、分析及研究,制作了性能良好的0.36 THz馈源喇叭天线、卡塞格伦天线与透镜天线,并在此基础上,进行了偏馈式单反射面天线的设计与仿真,为太赫兹频率的定向天线应用提供了理论和实践依据。所有的计算和仿真均使用Ansoft公司开发的全波三维电磁仿真软件HFSS,其可对天线的各种性能进行较为精确的计算和仿真。

2 馈源喇叭天线的设计

在定向天线技术中,喇叭天线既可以单独使用,也可以作为反射面天线和透镜天线的馈源。在研究过程中,不仅需要设计并分析一个喇叭天线,还需将其用作下述卡塞格伦天线、透镜天线和偏馈式单反射面天线的馈源天线。因此,在设计中要重点考虑以下几个方面:

- 1) 作为上述天线的馈源喇叭天线必须有特定的相位中心,其相位中心与反射面天线、透镜天线的焦点重合;
- 2) 作为反射面天线馈源的喇叭口径必须适当;
- 3) 作为馈源的喇叭在通带内阻抗变化平稳,交叉极化分量较小且功率容量充足。
- 4) 应用于太赫兹波频段的喇叭天线与工作于微波、毫米波频段的类似,只需将尺寸按比例缩减,但微波、毫米波频率通用的馈源喇叭天线,由于尺寸和加工精度的问题,在太赫兹波段难以通过普通的工艺实现,通常需经过特殊设计。

图1为所设计的喇叭天线的参数示意图及其在HFSS中的模型,该喇叭天线为圆锥喇叭。其几何参数为:工作频率 $f_0 = 360$ GHz,口面直径 $d_h = 2.5$ mm,锥高 $L_h = 7.71$ mm,馈电波导截面长边长 $a = 0.559$ mm,馈电波导截面窄边长 $b = 0.279$ mm。在HFSS中仿真的圆锥喇叭的 E 面与 H 面方向图如图2所示, θ 角为 E 面和 H 面上的辐射方向与天线口面的反向法线之间的夹角。

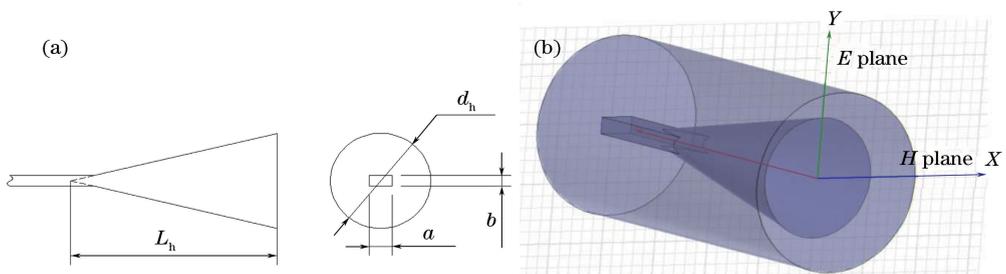


图1 (a) 圆锥喇叭参数示意图及 (b) 其在 HFSS 中的模型

Fig. 1 (a) Schematic diagram of conical horn parameters and (b) its model in HFSS

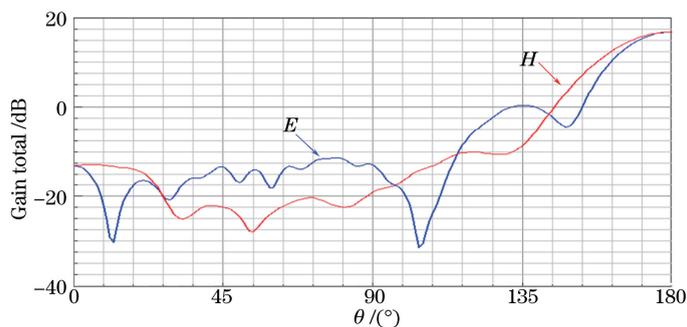


图2 HFSS中圆锥喇叭的 E 面与 H 面方向图

Fig. 2 Antenna pattern of E plane and H plane of conical horn in HFSS

上述极小的波导尺寸及圆锥口径,采用传统的焊接、铣制等工艺无法实现^[6]。图3为可采取的一种有效的对称拼接的方法,将喇叭整体分成上下对称的两块,矩形波导口与圆锥喇叭一体化加工后进行拼接,从而获得完整的天线。这种工艺能够保证较高的加工精度,并基本实现太赫兹波馈源天线的功能。

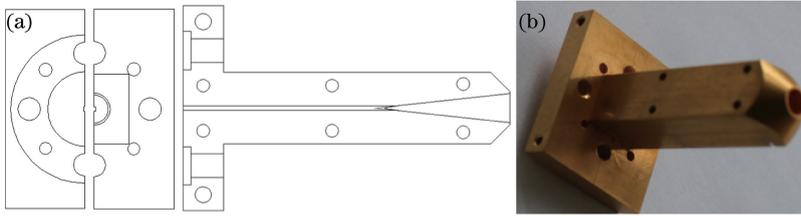


图3 (a) 圆锥喇叭天线的拼接结构及 (b) 其实物图

Fig. 3 (a) Splicing structure of conical horn antenna and (b) its actual object

3 双抛物面卡塞格伦天线设计

双反射面的卡塞格伦天线在微波、毫米波频率的定向天线中被广泛使用。在太赫兹波卡塞格伦天线的设计中,由于解决了馈源喇叭天线的设计,只需在此基础上对其主反射面和副反射面进行设计和制作。

卡塞格伦天线的设计参数如图4所示,太赫兹波卡塞格伦天线主反射面为旋转抛物面,副反射面为旋转双曲面结构。副反射面的一个焦点与主反射面焦点重合,二者焦轴重合,馈源位于副面的另一焦点上。天线设计的主要参数如表1所示,其天线方向图仿真结果如图5所示。

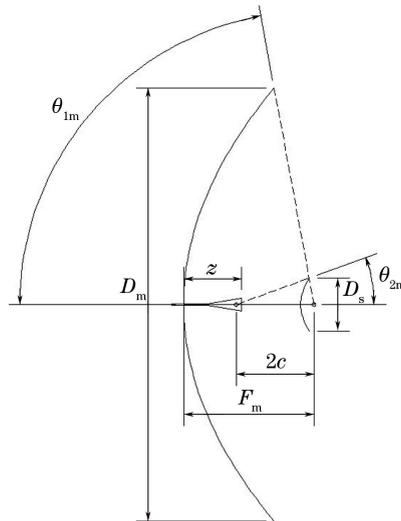


图4 卡塞格伦天线参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of Cassegrain antenna parameters

表1 0.36 THz 卡塞格伦天线主要参数

Table 1 Main parameters of 0.36 THz Cassegrain antenna

Main parameter	Value	Main parameter	Value
Frequency f_0 /THz	0.36	Half angle of the main surface $\theta_{1m}/(^{\circ})$	64.0
Main surface diameter D_m /mm	200	Half angle of the side surface $\theta_{2m}/(^{\circ})$	13.0
Side surface diameter D_s /mm	20	Distance between the two focal points $2c$ /mm	48.31
Focal length diameter ratio $F_m/D_m (F_m)$ /mm	0.4 (80)	Two vertex spacing 2Δ /mm	33.44
Double curvature e	1.4444	Feed forward amount z /mm	31.7

在上述 0.36 THz 馈源喇叭天线的设计制作以及对卡塞格伦天线的分析研究基础上,设计制作了 0.36 THz 的卡塞格伦天线。由于只涉及到主反射面和副反射面以及相应的支架制作,制作工作显得较为简单,但其中一个不可忽视的问题是:由于工作在 0.36 THz 频率,对于主反射面和副反射面表面的粗糙度,

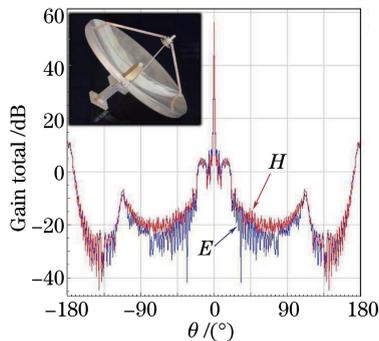


图 5 0.36 THz 卡塞格伦天线方向图仿真结果

Fig. 5 Pattern simulation diagram of 0.36 THz Cassegrain antenna

0.36 THz卡塞格伦天线比微波、毫米波反射面天线具有更高的抛光或镀金的要求。图 6 为 0.36 THz 卡塞格伦天线在室内的验证性测试场景。太赫兹波(0.36 THz)辐射源在室内的一侧辐射太赫兹波,在室内的另一侧放置配有卡塞格伦天线的太赫兹波辐射计,接收调制后的太赫兹波辐射信号,输出辐射计的信号通过示波器进行显示。通过观察辐射计的输出信号,可定性验证天线的性能。

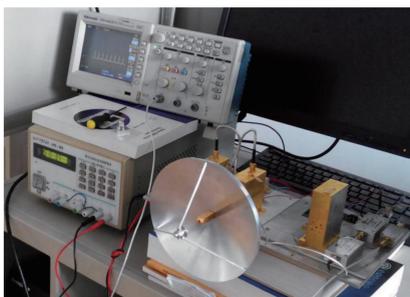


图 6 0.36 THz 卡塞格伦天线室内实际测试

Fig. 6 0.36 THz Cassegrain antenna indoor testing

4 透镜天线设计

馈源天线在卡塞格伦天线中的遮挡会影响天线的效率和增益,在更精确的近距离探测与成像应用中,往往采用透镜天线作为太赫兹波探测系统的定向天线^[7]。透镜天线的示意图如图 7 所示,其方程为

$$(n^2 - 1)x^2 + 2(n - 1)fx - y^2 = 0, \tag{1}$$

式中 n 为透镜材料折射率, f 为透镜焦距, D 为透镜口径, d 为透镜厚度。若给定 n, f 及 D ,即可得到透镜最大厚度 d_{\max} 为

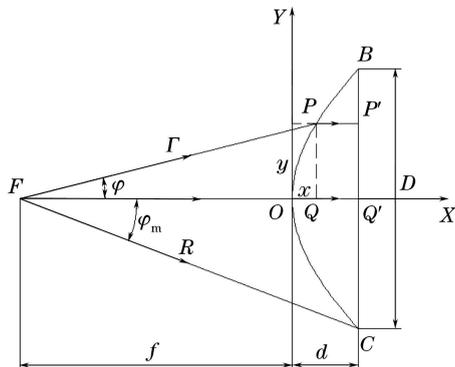


图 7 透镜天线示意图

Fig. 7 Schematic diagram of lens antenna

$$d_{\max} = -\frac{f}{n+1} + \sqrt{\left(\frac{f}{n+1}\right)^2 + \frac{(D/2)^2}{n^2-1}} \quad (2)$$

考虑到透镜也是口面天线,其波束宽度 $\omega_{3\text{ dB}}$ 可近似表示为

$$\omega_{3\text{ dB}} = (\lambda_0/D) \times 70^\circ, \quad (3)$$

式中 λ_0 为天线工作波长。

模拟中选择透镜材料为聚四氟乙烯,折射率约为 1.45,透镜口径为 200 mm,采用上述馈源喇叭天线,经 HFSS 建模仿真后,200 mm 口径透镜天线的天线方向图仿真结果如图 8 所示,其具有良好的方向性和高增益特性。

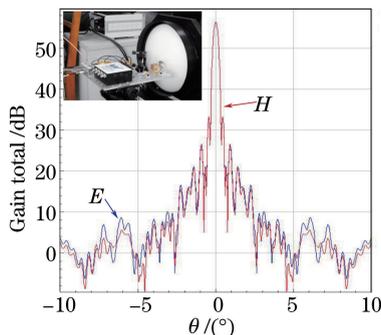


图 8 200 mm 口径透镜天线方向图仿真结果

Fig. 8 Pattern simulation diagram of 200 mm aperture lens antenna

5 偏馈式单反射面天线设计与分析

偏馈式单反射面天线与透镜天线一样,没有了馈源的遮挡,具有较高的效率和增益,同时,其加工制作的难度也较透镜天线和卡塞格伦天线更低,因而在太赫兹探测与通信的技术应用中具有重要的应用前景。本文设计了如图 9 所示的 0.36 THz 偏馈式单反射面天线。

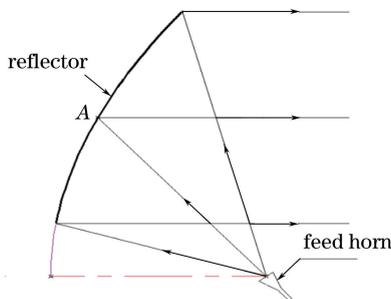


图 9 偏馈单反射面天线

Fig. 9 Offset feed single reflector antenna

馈源采用上述设计制作的圆锥喇叭天线,馈电采取偏馈方式,具体参数为:工作频率为 0.36 THz,主面口径为 200 mm,天线焦径比为 0.8,天线焦距为 160 mm,馈源偏移量为 50 mm。

图 10 为偏馈单反射面天线主面方向图的仿真结果,从图中可以看出,在天线反射面(E 方向)上,由于反射面结构的不对称,其方向图也不对称,但不对称部分只在旁瓣部分,低于主瓣 40 dB 以上,对其使用影响不大。

偏馈式单反射面天线最突出的一个优点是:能够更好地获取所需的天线方向,并将定向天线的优势发挥得更好。如图 9 所示,将抛物面绕 A 点左右旋转,以获取所需的天线主瓣波束方向。将上述偏馈式单反射面天线的反射面(抛物面)绕图 9 中 A 点分别向左、右偏转 1.5° 后,在 HFSS 中天线的方向图仿真结果如图 11 所示。从图中可以看出,在偏馈式单反射面天线反射面分别向左、右偏转 1.5° 后,天线的主波束分别向左、右偏转了 2.4° ,增益为 55 dB,与无偏转时的 56 dB 相比,仅有轻微的下降,而其旁瓣仅有一 -27 dB 的增益,因此偏馈式单反射面天线具有良好的定向特性。

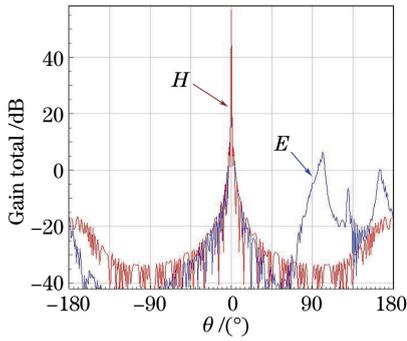


图 10 偏馈式单反射面天线方向图仿真结果

Fig. 10 Pattern simulation diagram of offset feed single reflector antenna

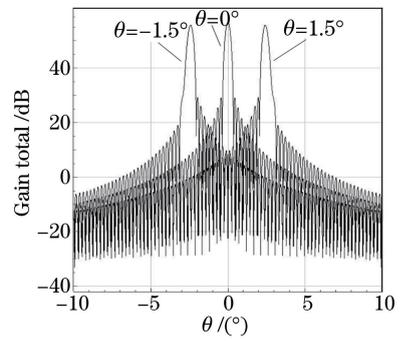


图 11 偏馈式单反射面天线反射面向左、右偏转 1.5° 后的方向图仿真结果

Fig. 11 Pattern simulation diagram of offset feed single reflector antenna deflected 1.5° along left and right directions

6 结 论

对工作频率为 0.36 THz 的太赫兹波定向天线进行了设计与分析,研制了 0.36 THz 的馈源喇叭天线、卡塞格伦天线和透镜天线,并对偏馈式单反射面天线进行了设计、仿真与分析。研究表明,在太赫兹波低频段,采用微波、毫米波定向天线的设计与制作方法,通过提高加工精度和特殊的工艺,完全可以实现太赫兹波定向天线的设计与制作,为太赫兹波探测与通信的具体应用提供了理论和实践的基础。本文并未实际制作出性能良好的太赫兹波偏馈式单反射面天线,但其良好的定向性能和波束指向偏移特性使其在太赫兹波探测与通信系统所需的定向天线技术中占据重要地位。后续研究工作将围绕太赫兹波偏馈式单反射面天线进一步完善太赫兹波定向天线技术的理论和实践基础,同时,也将进行太赫兹波高频段定向天线的设计与分析。

参 考 文 献

- Liu Qiao, Li Zeren, Meng Kun, *et al.* Study of vibration sensing behind barriers by terahertz interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(6): 916-920.
刘 乔, 李泽仁, 孟 坤, 等. THz 干涉测量用于障碍物后振动传感的研究[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 916-920.
- Wang Yahai, Hu Dahai, Du Liuge, *et al.* Rapid terahertz imaging technique[J]. Journal of Microwaves, 2015, (S1): 36-39.
王亚海, 胡大海, 杜刘革, 等. 太赫兹快速成像技术[J]. 微波学报, 2015, (S1): 36-39.
- Wang Xuemin, Shen Changle, Jiang Tao, *et al.* Fabrication of 2.5 THz quantum cascade laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(12): 120102.
王雪敏, 沈昌乐, 蒋 涛, 等. 2.5 THz 量子级联激光器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(12): 120102.
- Gao Jihong, Jia Jingyue, Zhang Yueheng, *et al.* Study on the performance and optimization of terahertz quantum-well photodetectors[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(6): 731-736.
高继红, 贾敬岳, 张月衡, 等. 太赫兹量子阱探测器性能研究及提高[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(6): 731-736.
- Shi Shengcai, Li Jing, Zhang Wen, *et al.* Terahertz high-sensitivity superconducting detectors[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 228501.
史生才, 李 婧, 张 文, 等. 超高灵敏度太赫兹超导探测器[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 228501.
- Li Yong, Zhai Xiaoxia, Zhang Wenjing, *et al.* Tolerance analysis of terahertz conical horn[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(1): 7-11.
李 勇, 翟晓霞, 张文静, 等. 太赫兹圆锥喇叭容差分析[J]. 微波学报, 2016, 32(1): 7-11.
- Hristov H D, Rodriguez J M, Grote W. The grooved-dielectric Fresnel zone plate: an effective terahertz lens and antenna[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2012, 54(6): 1343-1348.