

文章编号: 2095-4980(2021)01-0027-04

一种被动式焦平面太赫兹成像系统设计及仿真

缪玮杰, 冯 辉, 高炳西, 涂 昊

(博微太赫兹信息科技有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 为解决现有传统人体安检的弊端, 采用太赫兹波成像系统设计方法, 设计了一种远距离高分辨的被动式焦平面太赫兹成像系统。系统由太赫兹探测器、准光系统、扫描结构组成, 工作频率为 110 GHz, 物距为 6 m, 视场大小为 2.0 m×0.8 m, 分辨力为 2.5 cm。在 GRASP 软件上仿真并通过实验验证, 该系统可以实现乘客在无接触、不停留的情况下, 检出身上的携带物品。

关键词: 太赫兹; GRASP 仿真; 扫描结构; 准光系统

中图分类号: TN944

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019544

Design and simulation of a passive terahertz imaging system

MIAO Weijie, FENG Hui, GAO Bingxi, TU Hao

(Brianware Terahertz Information Technology Co.,Ltd, Hefei Anhui 230088, China)

Abstract: A passive terahertz imaging system with high resolution and long distance is designed by using the terahertz wave imaging method. The system consists of a scanning module, terahertz detectors and quasi-optics. The system has the operating frequency of 110 GHz, the object distance of 6.0 m, and the detector field of 2.0 m×0.8 m. The resolution of the system is 2.5 cm. It is simulated and verified by experiments in GRASP. This system can check the articles carried with human body at a no-touch and non-stop way.

Keywords: terahertz; simulation of GRASP; scanning module; quasi-optical system

近年来, 随着交通行业的全面建设, 机场、地铁、高铁班次日益紧密, 站点客流量逐年增大, 如, 上海虹桥站单日最高客流达 22 万余人次, 上海站单日最高客流达到 17 万余人次, 大客流已经成为交通常态^[1]。在大客流交通行业中实现快速准确的安检是现在的重点任务, 而人体安全检查是当前安检的薄弱环节^[2]。传统的安检模式是配以金属探测器手动检查。这种人体的安全检查方式存在多种弊端: 无法检测非金属危险品, 效率低下, 对人体有接触, 在客流量相对较大场合会导致堵塞^[3]。如何实现高效安检是当前人体安检亟待解决的问题。

X 光人体安检系统^[4]曾用于公共交通场合, 用于侦测人体藏匿的违禁品, 但这对人体健康构成隐患, 且被指责为侵犯人体隐私, 并未被普及。相比之下, 太赫兹波^[5]既能够侦测人体藏匿的违禁品, 又不会造成电离辐射损伤。太赫兹波处于 30 μm~3 mm 之间的电磁波, 能够穿过衣服, 这一特性使得太赫兹波能够实现在对人体无接触的情况下进行安检, 检出违禁品种类涵盖金属与非金属, 既有效弥补了金属探测的不足, 又实现了无接触安检, 提升了安检体验。目前太赫兹人体安检已有所发展和应用。本文设计并仿真了被动式焦平面太赫兹成像准光系统, 实现了远距离大视场成像。

1 被动式焦平面太赫兹成像系统方案

焦平面太赫兹成像系统^[6]分为主动式和被动式。主动式焦平面太赫兹成像系统具有太赫兹源和太赫兹探测器, 自主发出太赫兹波并对发出的太赫兹波进行接收并分析成像; 被动式焦平面太赫兹成像系统没有太赫兹源, 只有太赫兹探测器, 太赫兹探测器通过接收环境中的太赫兹波并分析成像。每个人或动物等发热的生物或非生物在环境中都会发出太赫兹波。太赫兹成像系统将接收到的太赫兹波传递到太赫兹探测器, 经过信号处理后, 得到目标区域的图像, 其成像流程如图 1 所示。

收稿日期: 2020-01-07; 修回日期: 2020-03-16

作者简介: 缪玮杰(1992-), 男, 硕士, 主要研究方向为太赫兹技术。email:allen_mwj@163.com

太赫兹成像系统在整个被动式焦平面成像系统中，类似于探测器的另一个增益天线，负责将接收的太赫兹波传输到探测器。太赫兹成像系统根据太赫兹探测器的排布方式分为扫描型太赫兹准光系统和非扫描型太赫兹准光系统。非扫描型太赫兹成像系统如图 2 所示，其结构只有准光系统。这种成像系统结构简单，稳定，但需要更多的探测器组成探测器面阵列。扫描型太赫兹成像系统如图 3 所示，其内部结构由扫描结构与准光系统组成，这种准光结构配合探测器组成的线性阵列即可实现二维图像侦测，需要的探测器数量少。综合比较 2 种成像系统，本文选择了成本更低的扫描型太赫兹成像系统。

根据地铁、高铁安检要求，乘客身高主要分布在 1.7 m±0.2 m，横向宽度 0.5 m±0.2 m，违禁品主要为管制刀具和液体。被动式焦平面太赫兹成像系统的设计指标见表 1。

2 成像系统设计

成像系统由扫描结构与准光系统组成。常见的扫描结构包括多面转镜方案和摆镜方案 2 种，见图 4。多面转镜是一种多棱柱结构，底面是正多边形，侧面是反射面，绕中心轴匀速转动。其优点是均匀连续转动，结构上容易实现，且稳定性、可靠性好，转动一圈可以成多幅(与边数相等)图像。缺点是转动周期内，只有一部分角度可以用来成像，利用率低。

摆镜为矩形结构，表面为反射面，绕一个位于反射面，与其中一条边平行，与另一条边中点相交的转轴来回摆动。其优点是所有运动过程均用来成像，利用率高。缺点是来回摆动在结构上相对较难实现，运动速度不均匀，稳定性和可靠性较差。为保证采集更多有效数据，本文选择摆镜为扫描结构^[7]。

准光系统的设计^[8]方式主要有 3 种：反射镜组、透射镜组和反射镜与透镜组合镜组。反射镜组存在光线遮挡；透射镜组存在一定的能量损失，反射镜与透镜组合所占空间更大。综合考虑 3 种准光系统，最终选择单透镜作为准光系统。

根据光学设计中的初始结构算法 PW 法^[9]设计出单透镜的基本参数，透镜材料选用聚四氟乙烯，该材料折射率为 1.43，折射率较高。表 2 为透镜的 2 个面型参数，均非球面面型，配合非球面面型，可较好地消除球差、慧差等像差。再将单透镜的基本模型参数设置到 GRASP 软件中进行仿真优化，最终得出单透镜两面面型分别为双曲面和椭球面，其结构如图 5 所示，该透镜为双凸面镜，透镜口径为 400 mm。

在 GRASP 软件^[10]中进行建模，如图 6 所示。实际应用中，被检人员发出太赫兹波，通过扫描模块、透镜到达被动式太赫兹探测器。根据光路的可逆性，设置由馈源主动发射出 110 GHz 的太赫兹波，通过透镜到达物面。扫描模块只改变电磁波的传输方向，故在仿真中可不作考虑。整个建模过程以透镜为核心，镜面 1 为透镜靠近馈源一侧，其面型为双曲面，镜面 2 为远离馈源一侧，其面型为椭球面。透镜的坐标系建立在镜面 1 的中心，以透镜坐标系为基准坐标系，建立馈源坐标系和物面坐标系。馈源在 Z 轴上偏离-800 mm，物面坐标系偏离+6 000 mm。在馈源上设置好馈源的参数：高斯波束，频段为 110 GHz。在透镜上建立 Physical Optics 物理光学分析模块，在物面上



Fig.1 Schematic of passive terahertz imaging system
图 1 被动式焦平面太赫兹成像系统原理框图

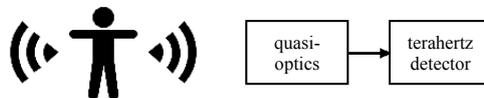


Fig.2 Scannerless passive terahertz imaging system
图 2 非扫描型太赫兹成像系统

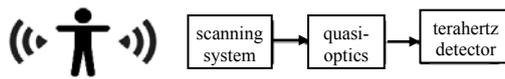


Fig.3 Scanning passive terahertz imaging system
图 3 扫描型太赫兹成像系统

表 1 被动式焦平面太赫兹成像系统设计指标
Table 1 Design goal of passive terahertz imaging system

parameter	index
field	1.9 m×0.7 m
resolution	30 mm
work distance	6 m

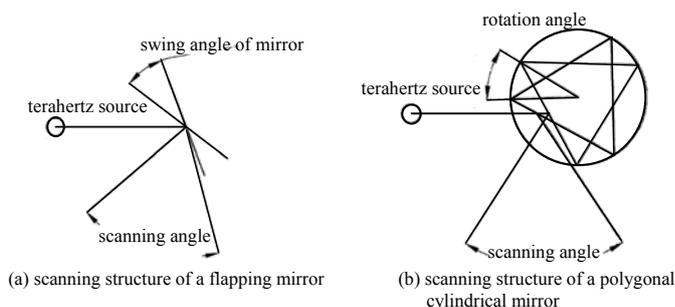


Fig.4 Different scanning structures
图 4 两类扫描结构对比

表 2 透镜面型参数

Table 2 Parameters of the Teflon lens		
surface	radius/mm	conic
surface 1	1 600	-2
surface 2	600	-0.7



Fig.5 Teflon lens
图 5 聚四氟乙烯透镜

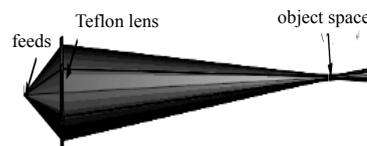
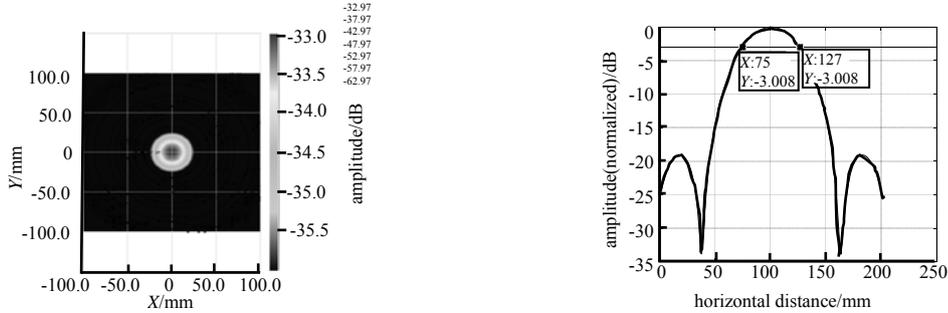


Fig.6 Model in GRASP
图 6 GRASP 软件建模图形

上设置好馈源的参数：高斯波束，频段为 110 GHz。在透镜上建立 Physical Optics 物理光学分析模块，在物面上

建立 200 mm×200 mm 的平面接收模块和 200 mm 的线接收模块。

仿真结果如图 7 所示：成像面的电磁场分布如图 7(a)所示，中心能量从-32.97 dB 衰减到-35.97 dB 的范围为半径约 25 mm 的圆；成像面 E plane 维能量归一化如图 7(b)所示：衰减-3 dB 水平间隔为 26 mm，得出该准光系统物面分辨力约为 25.5 mm。



(a) electromagnetic field distribution in image plane (-3 dB energy attenuation) (b) power distribution on image plane(after normalization)

Fig.7 Simulated results at the center of view field

图 7 中心视场仿真结果图

上述仿真针对光轴上的成像情况，像差比较好，边缘视场离轴量最大，需要通过仿真确认边缘视场与中心视场的差别，进而对整个准光系统作出更全面的评价。

模型在原有基础上，馈源三维坐标 X 轴偏移 70 mm，对应的像面 X 轴偏离 500 mm，如图 8 所示。

仿真结果如图 9 所示：成像面的电磁场分布如图 9(a)所示，中心能量为-33.43 dB，衰减-3 dB 的范围约为半径 25 mm 的圆；成像面 E plane 维能量归一化如图 9(b)所示，-3 dB 衰减的水平间隔约为 25 mm，综合中心视场仿真结果，得出该准光系统物面分辨力约为 25 mm。

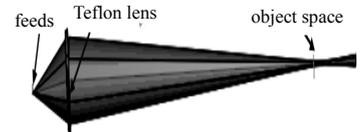
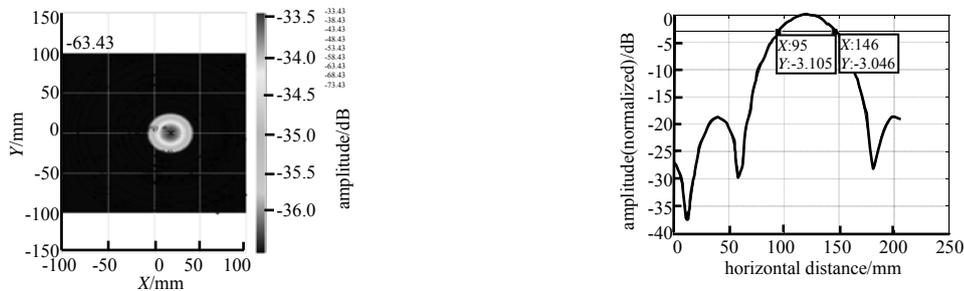


Fig.8 Marginal field model in GRASP

图 8 边缘视场仿真模型



(a) electromagnetic field distribution in image plane(-3 dB energy attenuation) (b) power distribution in image plane(after normalization)

Fig.9 Simulated results at margin of view field

图 9 边缘视场仿真结果图

相比于中心视场仿真结果，边缘视场电场分布没有中心视场仿真对称，但根据偏移量显示，物面的边缘视场要大于 500 mm。此外，边缘视场能量为-33.43 dB，低于中心视场的-32.97 dB，两者略微的差别主要由 2 个原因导致：a) 由于馈源直接平移，两侧波束宽度角不同，但馈源的主瓣是对称的，导致馈源的能量相对低一些；b) 依据光学设计，物面平移导致光程并不完全匹配，像差增加。实际使用中，这些因素均存在，故仿真结果合理。

从以上仿真结果可以看出，准光系统物面横向视场可以达到 1 000 mm，物面分辨力约 25 mm。

3 实验结果

依据上述仿真结果，设计了相应的机械结构。为验证设计指标是否达到，在物面上放置一个加热板，并在加热板上固定不同宽度的条带对，如图 10(a)所示，测试条带宽度从 1.5~3 cm 不等。测试结果如图 10(b)所示，可以看出，该准光系统可以分辨 2.5 cm 的条带对，与仿真结果相符合。

确认准光系统基本达到设计指标后，进行实际人体安检测试，测试图像如图 11 所示，该视场为 2.0 m×0.8 m，人体携带的宽 4 cm 的刀具、截面最小宽度为 2.5 cm 的手枪模型以及 4 cm×6 cm 的皮带扣均被识别出。该视场宽

度略小于仿真结果的原因是：太赫兹探测器并未安装到仿真中设定的视场边缘位置。从实验结果中可以看出，边缘视场能量与中心能量几乎无差别。

从实验结果可见，本文实现的被动式焦平面太赫兹成像系统实现了物距 6 m 的情况下 2.0 m×0.8m 的成像视场以及 2.5 cm 的分辨力，满足设计要求。

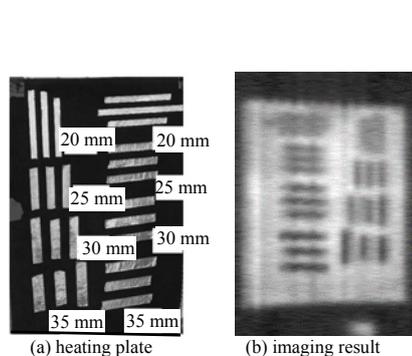


Fig.10 Heating plate and imaging result
图 10 测试板与成像效果

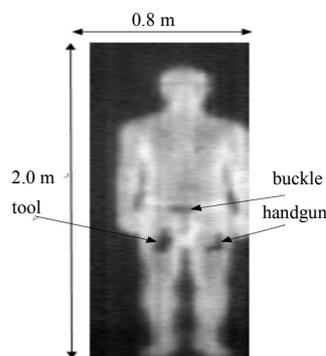


Fig.11 Imaging result of a person with hidden items
图 11 实际人体检测效果

4 结论

本文基于 GRASP 软件设计，仿真了一种被动式焦平面太赫兹波段成像系统，并进行实验验证，涵盖了扫描结构的选型、准光系统的设计以及实验验证。该准光系统工作频段为 110 GHz，物距为 6 000 mm，像距为 800 mm，物面分辨力达到 2.5 cm，物面视场 2.0 m×0.8 m。该设计可应用于远距离人体安检，实现无感知无停留检测人体表面隐藏违禁品的功能，可用于地铁、高铁、机场等大客流安检现场。

参考文献：

- [1] 王卫光,陈士祥. 对高铁大客流安检查危工作的思考[J]. 铁道警察学院学报, 2015(4):15-17. (WANG Weiguang, CHEN Shixiang. Thoughts on safety inspection of high-speed railway and large passenger flow[J]. Journal of Railway Police College, 2015(4):15-17.)
- [2] 武帅,屈浩,涂昊,等. 太赫兹技术应用进展[J]. 电子技术应用, 2019(7):3-7. (WU Shuai,QU Hao,TU Hao,et al. Application progress of terahertz technology[J]. Electronic and Applied Technology, 2019(7):3-7.)
- [3] 李培合. 太赫兹技术在大客流安检中的应用[J]. 中国安全防范技术与应用, 2018(6):14-17. (LI Peihe. Application of terahertz technology in security check of large passenger flow[J]. China Security Protection Technology and Application, 2018(6):14-17.)
- [4] GUO X L,LI G,CHENG Y,et al. Standards and guidelines of radiation protection and safety in dental X-ray examinations[J]. Chinese Journal of Stomatology, 2017,52(12):762-772.
- [5] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010(6):703-707. (YAO Jianquan. Terahertz technology and its application[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2010(6):703-707.)
- [6] 高炳西,冯辉. 太赫兹人体安检关键技术及应用[J]. 警察技术, 2016,156(3):24-27. (GAO Bingxi,FENG Hui. Key technology and application of terahertz human body security[J]. Police Technology, 2016,156(3):24-27.)
- [7] 谢巍,侯丽伟,潘鸣. 被动太赫兹成像二维扫描技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):176-179. (XIE Wei, HOU Liwei,PAN Ming. 2D scanning technology in passive terahertz imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):176-179.)
- [8] 时华峰,于文龙,余菲,等. 准光设计主动式毫米波人体扫描安全检测系统的研制[J]. 红外, 2012(11):22-28. (SHI Huaifeng,YU Wenlong,YU Fei,et al. New human body inspection system with quasi-optical and active scanning MMW technology[J]. Infrared, 2012(11):22-28.)
- [9] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 2版. 北京:科学出版社, 1985. (WANG Zhijiang. Theoretical basis of optical design[M]. 2nd edition. Beijing:Science Press, 1985.)
- [10] 陆泽健. 三维准光网络系统的仿真和实验验证[D]. 北京:北京邮电大学, 2015. (LU Zejian. Simulation and experimental verification of 3D quasi optical network system[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.)