

# 基于曲柄摇杆机构的被动太赫兹波成像系统

张镜水 朱维文 赵跃进 赵瑞忠 董立泉

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 针对传统单通道被动太赫兹波成像系统的效率低、结构复杂的缺点,设计了一种基于曲柄摇杆机构的光机扫描太赫兹波成像系统。使用曲柄摇杆机构对行扫描镜实现快速驱动,同时配合场反射镜的运动完成对成像目标的二维扫描。通过使用 390 mm 口径的卡塞格林天线以及 94 GHz 太赫兹波辐射计完成对目标的快速成像。实验表明,系统单帧成像时间为 20 s,成像视场角为  $30^\circ \times 36^\circ$ ,角分辨率可达  $0.6^\circ$ 。在室内条件下,可以很好地对人体进行成像,并能有效地探测隐藏在衣物下的危险物品。该系统具有成本低、效率高、结构简单等特点,对实现被动太赫兹成像系统的小型化、快速化有较高的参考价值。

**关键词** 成像系统;被动太赫兹波成像;曲柄摇杆机构;光机扫描

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1211006

## Passive THz Imaging System Based on the Crank-Rocker Mechanism

Zhang Jingshui Zhu Weiwen Zhao Yuejin Zhao Ruizhong Dong Liquan

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** In order to solve the problem of low efficiency and high complexity in traditional single channel passive THz imaging system, a novel passive terahertz (THz) imaging system with single channel and optical-mechanical scanning is designed. A crank-rocker mechanism is employed to realize the fast movement of the line scanning mirror, and the two-dimensional imaging is achieved through the cooperation of the line scanning mirror and the frame scanning mirror. A Cassegrain antenna of 390 mm in diameter and 94 GHz Schottky diodes are used in this system to help to accomplish the fast scanning imaging of the objects. The single frame imaging time of the system is only 20 s, the field of view (FOV) is  $30^\circ \times 36^\circ$ , and the angular resolution is up to  $0.6^\circ$ . The experimental results show that the system can image the human body, and effectively detect dangerous items concealed under the clothes. The system of fast scanning has many advantages such as low cost, high efficiency and simple structure, and provides a useful reference for the development of passive THz imager in miniaturization and high-speed.

**Key words** imaging systems; passive terahertz imaging; crank-rocker mechanism; optical mechanical scanning

**OCIS codes** 110.0110; 110.6795; 110.2970; 110.3000; 110.2960

## 1 引言

太赫兹波(0.1~10 THz)具有透视性以及高分辨率的特点,可以透过织物看到隐藏的武器和爆炸物等。而被动式成像是利用人体自身辐射出的太赫兹波进行成像,不会对人体造成任何伤害。因此,近年来被动式太赫兹波成像技术在人员安检等方面有着非常好的应用前景<sup>[1-6]</sup>。

目前,被动太赫兹波成像的方式主要有机械扫描成像、相控阵成像、合成孔径成像以及焦平面成像

等<sup>[7]</sup>,但是,由于太赫兹波部件技术还不够成熟,且制造成本过高,所以大多系统都采用了单通道机械扫描的成像方式。其中韩国的系统<sup>[8-9]</sup>以及德国微波与雷达研究的系统<sup>[10]</sup>都是通过驱动会聚天线进行二维摆动来完成对目标的扫描,此种方式的效率很低,单帧成像时间高达几分钟;而美国 QinetiQ 公司的单通道太赫兹成像系统<sup>[11]</sup>采用将会聚天线进行圆锥扫描的方式完成对目标的成像,这种方式虽然成像较快但是系统结构比较复杂,难以大规模推

收稿日期: 2013-05-26; 收到修改稿日期: 2013-07-22

基金项目: 2010 北京市优博指导教师科研项目(YB20101000701)

作者简介: 张镜水(1989—),女,博士研究生,主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail: jszhang4678@gmail.com

导师简介: 赵跃进(1958—),男,博士,教授,主要从事电子稳像、太赫兹成像技术、基于微机电系统的红外成像技术等方面的研究。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号: S040421008S)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

广使用。针对目前太赫兹波成像所存在的缺点,本文设计了一种基于曲柄摇杆机构的被动式太赫兹波成像系统,利用单通道光机扫描方式对人体进行快速被动式扫描成像,可在室内有效地探测隐藏在衣物下的危险物品,成像速度较快,成像质量清晰,探测目标轮廓明显。

## 2 成像系统的设计

### 2.1 太赫兹成像原理

被动式太赫兹波成像系统运用黑体辐射原理。自然界中辐射源的辐射功率可以用等效的黑体辐射功率来代替,称此等效黑体温度为该辐射源的表现

温度  $T_{ap}$ 。将  $T_{ap}$  与该辐射源的实际温度  $T$  之比定义为该灰体的频谱发射率  $\epsilon$  (以下简称发射率),即

$$\epsilon = \frac{T_{ap}}{T}. \quad (1)$$

频率一定时,不同物体的发射率不同。黑体的发射率为 1,人体的发射率介于 0 和 1 之间,而高导电金属板具有良好的反射性,其发射率可看成为 0。故利用此原理,被动式探测器可以识别隐藏于人体内的金属目标。

根据此原理,本系统由机械扫描机构、太赫兹波辐射计、信号(图像)处理单元、控制器以及图像显示装置等部分组成<sup>[10]</sup>,如图 1 所示。

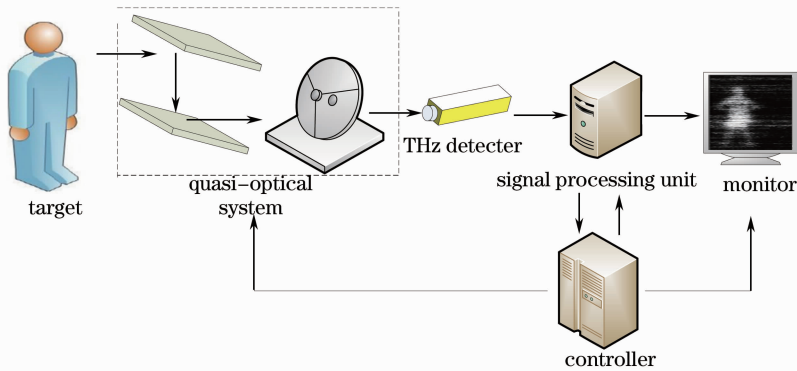


图 1 被动太赫兹波成像系统的结构示意图

Fig. 1 Configuration of passive THz imaging system

机械扫描机构在成像系统的最前端,用以反射和收集视场中太赫兹波热辐射能量,主要通过上、下两个反射镜在场和行两个方向上进行扫描,使得太赫兹波辐射计的天线波束依次扫过目标的各个部分,然后由辐射计(爱尔兰 Farran 公司 94 GHz 太赫兹波辐射计,工作频率为 75~110 GHz)将天线波束驻留时目标的太赫兹波辐射亮度温度起伏转换成相应的电压信号,再经过放大和信号(图像)处理形成目标图像,最后送至显示器,从而显示出目标场景的辐射亮度温度分布图像。

### 2.2 机械扫描机构的设计

机械扫描机构的结构如图 2 所示,主要由一个汇聚天线、一个行扫描镜以及一个场扫描镜构成。汇聚天线选用电磁波成像中较为常用的卡塞格伦天线。根据系统工作条件要求本天线的 3 dB 波宽  $\theta_{3\text{dB}} = 0.57^\circ$ ,工作频率  $f_0 = 94\text{ GHz}$ ,故可求得其主反射镜的口径为

$$D_m = \frac{70^\circ\text{C}}{\theta_{3\text{dB}} f_0} = 390\text{ mm}, \quad (2)$$

卡塞格林天线的增益系数可表示为

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda_0^2} g = \left(\frac{\pi D_m}{\lambda_0}\right)^2 g, \quad (3)$$

式中  $A$  为主反射器的口面直径,  $g$  是天线的增益因子。故由此计算该天线的增益可达 50 dB。行扫描镜和场扫描镜选用航天蜂窝复合材料,具有相当高的硬度和非常小的密度,十分轻便,减小了系统进行机械扫描时所克服的转动惯性,大大提升系统的扫描速率。

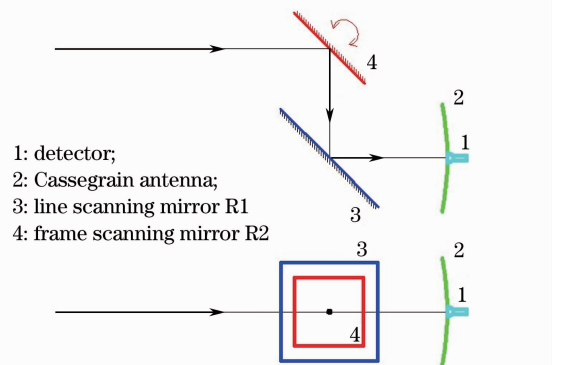


图 2 扫描机构图

Fig. 2 Scanning mechanism system

在扫描过程中,会聚天线固定不动,通过行扫描镜和场扫描镜的运动来实现二维空间扫描。与传统的通过汇聚天线运动而实现扫描的系统相比,该系统在扫描方式上效率更高,而且会聚天线的口径可以做得很大,有利于系统成像分辨率的提高。

### 2.3 快速扫描的实现

若用电机直驱转动反射镜使其在水平面内进行往复的摆动,则会因为反射镜较大的转动惯量而难以实现高速扫描。因此,本课题组使用曲柄摇杆机构实现行扫描镜的驱动。曲柄摇杆机构的设计如图3所示。

在曲柄摇杆机构  $ABCD$  中,点  $A$ 、点  $D$  为支点,则杆  $AB$  为曲柄,杆  $CD$  为摇杆。在扫描的过程中,

曲柄  $AB$  由电机驱动,围绕点  $A$  在图纸平面内做圆周运动,则摇杆  $CD$  会在  $C_1D$  与  $C_2D$  之间不停摆动,其摆动角  $\psi_{\max}$  由以上四杆的长度决定,为  $15^\circ$ 。若将行反射镜固定在摇杆  $CD$  上,便可以通过行反射镜的反射实现一维扫描的目的。通过这种方式的驱动可以实现的扫描速率为  $6 \text{ line/s}$ ,扫描范围为  $30^\circ$ 。

### 2.4 成像分辨率

系统成像的空间分辨率<sup>[10]</sup>为

$$\varphi_o = \Delta\theta d = 1.22\lambda \frac{d}{D}, \quad (2)$$

式中  $\Delta\theta$  为系统成像的角分辨率, $\lambda$  为  $94 \text{ GHz}$  波段对应的波长为  $3.2 \text{ mm}$ , $d$  为被测物到卡塞格伦天线主反射面的距离, $D$  为卡塞格伦天线主反射面的口径为  $390 \text{ mm}$ 。

因此可得本系统的成像角分辨率  $\Delta\theta$  为  $0.6^\circ$ 。若在相对卡塞格伦天线主反射面  $4 \text{ m}$  的距离上进行成像,其成像分辨率为  $40 \text{ mm}$ ,可以实现对一般尺寸隐匿物品进行探测的目的。

## 3 成像实验与分析

### 3.1 室内不携带隐匿物品的成像

系统对距离  $4 \text{ m}$  处且身上不带有隐匿物品的人进行成像实验,结果如图4所示。

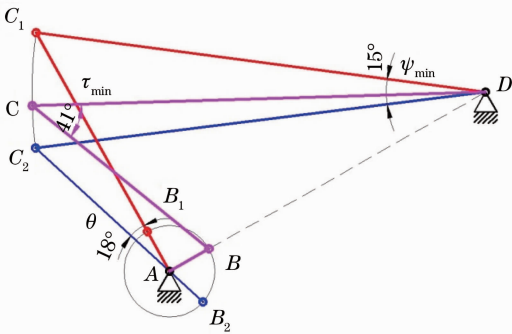


图3 曲柄摇杆机构的示意图

Fig. 3 Schematic crank-rocker mechanism

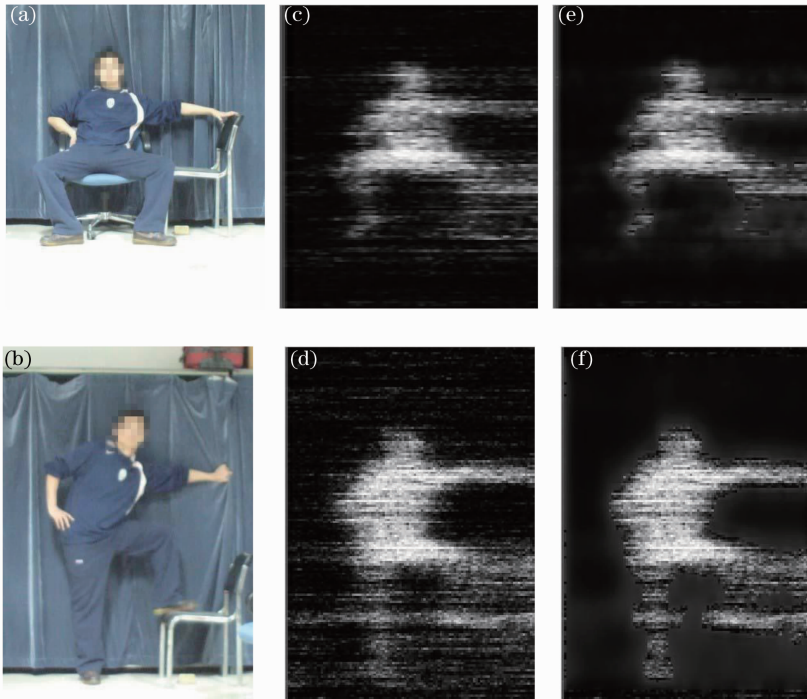


图4 室内无隐匿物品成像实验。(a),(b)成像场景;(c),(d)被动太赫兹波图像;(e),(f)处理后的被动太赫兹波图像

Fig. 4 Indoor imaging without concealed object. (a), (b) Imaging scene; (c), (d) passive THz image;

(e), (f) processed passive THz image

由图 5 中看出,实验所得被动太赫兹波图像完全可以反映成像对象的大体轮廓和基本姿势。而且太赫兹辐射能量同温度相关<sup>[11]</sup>,由于躯干部分的温度比四肢的温度高 2 K~3 K,所以图像中受检者的

躯干与四肢尤其是双腿相比显得较亮。

### 3.2 室内携带隐匿金属的成像

系统对距离 4 m 处且身上带有隐匿金属[如图 5(a)所示]的人进行成像实验,结果如图 5 所示。

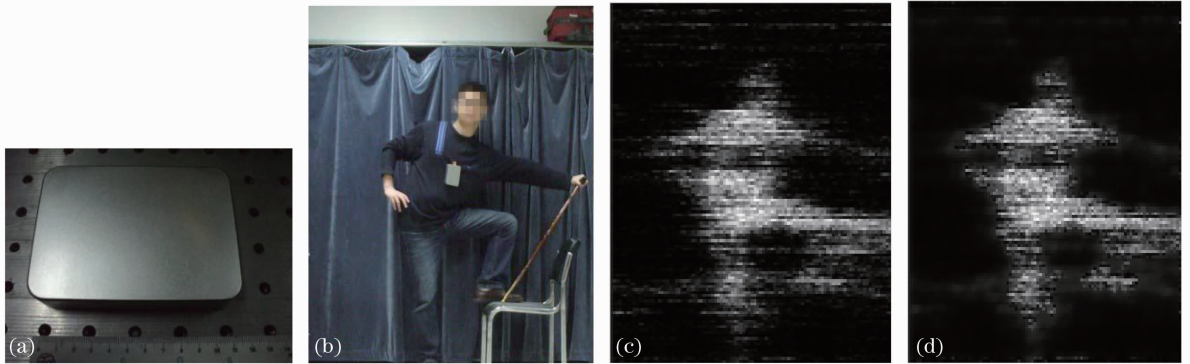


图 5 室内有隐匿物品成像实验。(a)隐匿金属(11 cm×8 cm);(b)成像场景;(c)被动太赫兹波图像;(d)处理后的被动太赫兹波图像

Fig. 5 Indoor imaging with concealed metal. (a) Concealed metal (11 cm×8 cm); (b) imaging scene; (c) passive THz image; (d) processed passive THz image

由图 5 中看出,由于金属在太赫兹波段具有较高的反射率,完全反射了较低的环境温度,因此在所得的图像中其灰度值较低,在明亮的人体背景的衬托下很容易被发现。

### 3.3 成像噪声分析

从系统成像效果来看,其可以在普通的室内环境下对人体进行成像,而且对于隐匿于衣物下的金属也可以明显地辨认出来,达到了实验要求。但是就整个图像来说,图中存在大量的噪声,尤其是在背景中有很明显的噪声分布,图像的低信噪比是阻碍该项技术发展的主要因素之一。经过分析,可以认为本实验图像的噪声主要来源于以下两方面:

1) 实验环境。对于电磁波成像实验,理想的成像地点应该是电波暗室,而文中的实验则是在普通室内进行的,在这种非电波暗室中进行成像实验,各种电磁辐射使得实验环境非常复杂,探测器很容易受到干扰,因此导致了图像像质下降。

2) 硬件系统的性能。为了使最终成像效果具有很良好的对比度,探测器后续处理电路需要把探测器输出的在毫伏级变化的辐射信号转换为在 0~5 V 变化,因此探测器后续处理电路需要具有至少 1000 倍的增益,这样就会导致电路中电源的波纹或是元器件受热引起的温漂对信噪比产生很大的影响,从而也会导致像质下降。

## 4 结 论

设计并研制了工作于 94 GHz 频段的单通道被动太赫兹成像系统。该系统采用机械扫描形式,水平方向采用了由曲柄摇杆机构驱动的快速扫描方式实现 30°的扫描,垂直方向通过反射镜的转动实现 36°的扫描,角分辨率约为 0.6°,单帧成像速度可达 20 s,在距离系统 4 m 处成像空间分辨率为 4 cm。扫描过程中,会聚天线固定不动而通过行、场扫描镜结合获取信息的方式提高了系统的扫描效率,也使得系统的分辨率得到提高;而曲柄摇杆机构的驱动方式避免了电机直接驱动行扫描镜时因扫描镜转动惯量太大而难以实现高速扫描的缺点。该系统具有高效、结构简单等特点,能够实现室内对人体隐匿物品的近场探测。该系统经进一步改进将可用于机场安检等领域。

### 参 考 文 献

- 1 L Yujiri, M Shoucri, P Moffa. Passive millimeter-wave imaging [J]. IEEE Microwave Magazine, 2003, 4(3): 39-50.
- 2 Qian Songsong, Li Xingguo. Overview of passive millimeter wave imaging [J]. Guidance & Fuze, 2003, 24(4): 29-36.  
钱嵩松, 李兴国. 被动毫米波成像综述[J]. 制导与引信, 2003, 24(4): 29-36.
- 3 Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Advances in research on THz digital holographic imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 42-49.  
李琦, 丁胜晖, 李运达, 等. 太赫兹数字全息成像的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 42-49.

- 4 Li Qi, Ding Shenghui, Yao Rui, *et al.*. Experiments on continuous-wave terahertz reflection-mode imaging for concealed objects [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 200–205.  
李琦, 丁胜晖, 姚睿, 等. 隐藏物的连续太赫兹反射扫描成像实验[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 200–205.
- 5 S Yeom, D S Lee, J Y Son, *et al.*. Concealed object detection using passive millimeter wave imaging [C]. Beijing: Universal Communication Symposium (IUCS), 2010. 383–386.
- 6 S Yeom, D S Lee, H Lee, *et al.*. Distance estimation of concealed objects with stereoscopic passive millimeter-wave imaging [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 115: 399–407.
- 7 D Stephan, P Markus, S Helmut. Study of passive MMW personnel imaging with respect to suspicious and common concealed objects for security applications [C]. SPIE, 2008, 7117: 71170C.
- 8 R Appleby. The history of passive millimetre wave imaging at qinetiQ [C]. SPIE, 2008, 7117: 711702.
- 9 W Zhu, Y Zhao, L Dong, *et al.*. A novel design of a high performance passive millimeter-wave imager for security [C]. SPIE, 2010, 7854: 785426.
- 10 R M Woodward, R Appleby. Terahertz and millimetre wave technology in port and harbour security [C]. SPIE, 2005, 5780: 145–152.
- 11 G N Sinclair, R Appleby, P R Coward, *et al.*. Passive millimeter-wave imaging in security scanning [C]. SPIE, 2000, 4032: 40–45.

栏目编辑：何卓铭