文章编号　2095-1531(2017)01-0114-08

室内人体隐匿物被动太赫兹成像研究进展

丁　丽,丁　茜,叶阳阳,朱亦鸣*
(上海理工大学 上海市现代光学系统重点实验室,上海 200093)

摘要:太赫兹波由于其极低的光子能量和对非极性物质较强的穿透特性已成为人体隐匿物检测应用的热点。本文以室内人体隐匿物品探测为主要应用背景,简要介绍了太赫兹波段的大气传播特性;重点分析了基于辐射检测的室内被动太赫兹成像原理和系统的关键技术,包括辐射计和阵列扫描方式等;回顾了国内外被动太赫兹成像技术在人体安检领域的研究现状。综合考虑系统成本和成像时间,一定数量的高灵敏度辐射计加上扫描机构成像的方式在未来很长一段时间里将是被动太赫兹成像系统的主流方式。

关　键　词:太赫兹波;被动成像;辐射计;人体安检
中图分类号:TP394.1;TH691.9　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20171001.0114

Overview of passive terahertz imaging systems for indoor concealed detection

DING Li, DING Xi, YE Yang-yang, ZHU Yi-ming*
(*Shanghai Key Lab of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai* 200093, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: ymzhu@usst.edu.cn*

Abstract: Terahertz wave has become a hot research point for body hidden objects detection applications due to its extremely low photon energy and the strong penetration properties to non-polar material. In this paper, taking indoor body concealed detection as the main background, we briefly introduce the atmospheric propagation characteristics of THz waveband. Then we focus on the analysis of the indoor passive terahertz imaging principle and the key technology of imaging system based on radiation detection, including radiometer and scanning array mode, and review the research status of passive terahertz imaging technology in the field of human body security inspection at home and abroad. Considering system cost and imaging time, passive terahertz imaging system consisting of a certain number of high sensitivity radiation meters and scanning imaging mechanism will be the mainstream in the future for a long time.

Key words: Terahertz wave; passive imaging; radiometer; personnel security screening

收稿日期:2016-09-21;**修订日期**:2016-11-15
基金项目:上海市自然科学基金资助项目(No. 16ZR1423100);上海高校青年教师培养资助项目(No. ZZsl15009)
Supported by Natural Science Foundation of Shanghai (No. 16ZR1423100); Foundation for the Youth of Colleges and Universities of Shanghai (No. ZZsl15009)

1　引　言

人体隐匿物品检测一直是国内外反恐维稳的研究热点[1-10]。目前的隐匿物品探测设备主要有:光学/红外成像仪、X 射线系统、CT 探测系统、金属安检门、手持式金属探测器等。虽然光学、X 射线和红外成像无疑具有很高的分辨率,但是光学/红外探测不能穿透衣物和包裹层探检隐匿违禁物;X 射线系统和 CT 探测系统具有很好的穿透性,但其高辐射会伤害人体而无法用于人体安检;金属安检门只能告警不能定位,且对非金属违禁物无能为力;手持式金属探测器不能探检非金属违禁物,且须接触式操作,检查速度慢,易造成被检人员有被侵犯感。随着国际上恐怖活动的日益猖獗,这些传统探测设备在实际应用中存在的不足与缺陷开始曝露。

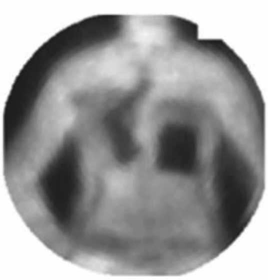
太赫兹波(Terahertz waves,1 THz = 10^{12} Hz)是一种介于微波和红外光之间的电磁波,通常所研究的 THz 电磁辐射是指频率在 0.1 T ~ 10 THz,属于远红外和亚毫米波范畴[10]。与上述常见隐匿物品探测的信号源相比,太赫兹波具有极低的光子能量低,频率为 1 THz 的光子能量约为 4.1 meV,而 X 射线光子能量在 1 000 eV 量级,不会引起光致电离,不会对人体造成伤害;比微波波长短,具有波束窄、定向性好的优点,可以获得高的成像分辨率;而于可见光和红外相比,能够穿透很多非极性物质,达到可见光不能达到的透视性。这些优势使得太赫兹成像技术用于医学诊断、生物体检查更安全,并能够实现穿透衣物和包裹层的违禁品高灵敏度探测和高分辨率成像,已成为安检领域的一个重要研究方向。

本文介绍了太赫兹波在大气中的传播特性,主要分析被动太赫兹成像的辐射检测原理,辐射计的结构、性能和当前基于准光机理的被动成像系统通常采用的扫描方式,最后回顾了国内外被动太赫兹成像仪的研究现状和未来被动太赫兹成像系统发展方向。

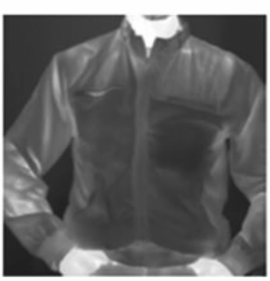
2　被动太赫兹成像原理

在电磁波谱中,人眼能够观察到的区域为可见光区,此时的辐射源是太阳,辐射峰值约为 3 000 K。而在没有光照的夜晚,地球上物体的自然辐射能量主要集中在红外区域,辐射峰值大约为 300 K。在过去的 30 年里,先进红外探测技术的发展使得人类眼睛的"可视"范围已经扩展到夜晚。而对太赫兹频段的研究则是人类对自己"可视"能力提出的进一步要求。太赫兹波辐射不仅有不分昼夜的优势,还能够突破雾、沙尘等恶劣天气对常见可见光和红外等"可视"器件的性能限制,使得真正全天候、全天时的探测成像成为可能。三者的成像性能比较如图 1 所示[8]。

(a) 可见光成像
(a) Optical imaging



(b) 太赫兹成像
(b) Terahertz imaging



(c) 红外成像
(c) Infrared imaging

图 1　可见光、太赫兹和红外成像结果比较

Fig. 1　Comparison among optic, terahertz and infrared imaging performance

微波至可见光频段的电磁波辐射在大气中传输的每公里传输路径衰减曲线如图 2 所示,在 10 GHz到 1 000 THz 频段里,电磁波在大气中传播会受到其中不同成分,如水气、水滴、氧气、氮气

和 CO_2 等共振吸收的影响[11,2]。图 2 显示出在明朗、干燥的天气条件下，红外和可见光的辐射在大气中的传播衰减较小；而在有雾、多云和下雨等天气条件时，大气中的水分子会加剧电磁波辐射的衰减和散射特性。可见，在太赫兹波段，影响大气衰减程度的最大因素是大气中的水汽含量。即使如此，在 94、140、220、350、650、800 GHz 等频率大气中各成分对太赫兹波的衰减作用在干燥明朗天气和雾天都保持一个相对适中的量，存在良好的大气传播特性。事实上，小于 300 GHz 频段的太赫兹波辐射在云、雾、烟、雪和沙尘暴等恶劣天气条件下的传输衰减仅仅是可见光和红外辐射的百万分之一，已成为目前室内/室外人体隐匿物探测太赫兹成像的主要考虑频段，文本主要考虑室内的应用场景。

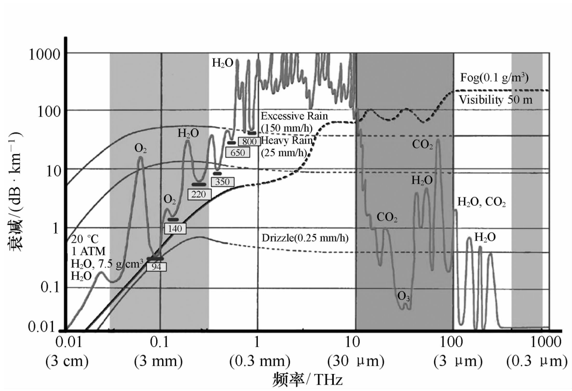


图 2 电磁波辐射衰减曲线

Fig. 2 Electromagnetic radiation attenuation

2.1 有效辐射温度

众所周知，所有媒介（气体、液体、固体和等离子体等）都向外辐射电磁能量，而液体和固体目标的辐射谱是连续的，即在全频段都具有反射和吸收电磁波的能力[2]，也就是说，和已知的红外和可见光区一样，目标媒介在太赫兹波频段的吸收或者发射电磁波强度的大小可以用发射系数 ε 表示。因此，一个物体的太赫兹波段的体表亮温 T_s 由物理温度 T_0 和发射系数 ε 的乘积表示，即：

$$T_s = \varepsilon T_0 , \tag{1}$$

假设目标自身发射系数是影响成像性能的唯一因素，则成像可以直接通过测量场景中不同目标的亮温 T_s 实现，场景中不同物理材料目标间发射系数的差异会引起天线接收端接收到的辐射能量的差异，并体现为成像结果中图像像素强度的不同。但事实是，在室内环境中天线端接收到的物体辐射能量强弱还和成像场景中存在的其它噪声辐射源温度和所在环境的背景噪声温度有关。譬如，一个金属板本身的辐射系数 $\varepsilon = 0$，亮温为 $T_s = 0$，但是，由于其高反射特性，它针对空间中任意辐射源的反射可以在其表面表现出一定的表面温度。这一现象可用表面散射辐射温度 T_{sc} 表示，记为反射系数 ρ 和场景中其他噪声辐射源温度 T_i 乘积与透射系数 t 和背景噪声温度 T_b 乘积的和，

$$T_{sc} = \rho T_i + t T_b . \tag{2}$$

一个目标在天线端被接收到的实际有效辐射温度（称为视在温度）T_A 为联合亮温 T_s 和表面散射辐射温度 T_{sc} 的和：

$$\begin{aligned} T_A &= T_s + T_{sc} = \\ &\varepsilon T_0 + \rho T_i + t T_b , \end{aligned} \tag{3}$$

其中，处于热力学稳定的物体满足条件：

$$\varepsilon + \rho + t = 1 . \tag{4}$$

式(4)是对简化模型获得的结论，并没有考虑入射角度、表面平滑度、极化影响以及成像场景中环境温度变化等实际因素。

2.2 天线接收功率和物体温度

根据普朗克合体辐射定律，黑体在所有方向上都以相同的光谱亮度辐射能量，即黑体的光谱是无方向性的，单位立体角、单位面积、单位带宽内的辐射功率可表示为：

$$B(f,T) = \frac{2hf^3}{c^2}\left(\frac{1}{e^{hf/(kT)} - 1}\right) , \tag{5}$$

式中，$B(f,T)$ 是黑体辐射谱亮度，h 是普朗克常数，f 是频率，k 是波尔兹曼常数，T 是绝对温度，c 是光速，$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

可见，普朗克黑体亮度是 $B(f,T)$ 频率 f 和温度 T 的函数。当 $hf/(kT) \ll 1$ 时，利用近似关系式 $e^x - 1 \approx x$，则式(5)可以简化为：

$$B(f,T) = \frac{2f^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} . \tag{6}$$

假设带宽为 Δf 的窄带天线的天线增益为 A_r，方向图 $F(\theta,\varphi)$，则天线接收到的总功率可以表示为：

$$P = A_r \int_f^{f+\Delta f} \iint_{4\pi} B(f,T) F(\theta,\phi) \, d\Omega df . \tag{7}$$

当 $\Delta f/f \ll 1$ 满足窄带条件时,谱亮度 $B(f,T)$ 在带宽 Δf 范围内近似为常数。将以下关系式:

$$\iint_{2\pi} F(\theta,\phi)\,\mathrm{d}\Omega \mathrm{d}f = \frac{\lambda^2}{A_r}\,, \tag{8}$$

代入式(7),得到温度和功率成线性关系:

$$P = kT\Delta f\,. \tag{9}$$

3　被动太赫兹成像系统

在室内环境中,对于人体隐匿物的太赫兹成像,影响目标等效辐射温度的因素包括衣物本身的辐射、透过衣物的人体本身和隐匿物的辐射以及对环境背景温度的反射、衣服对周围环境温度的反射等。如图3所示,天线接收到的功率是波束覆盖场景内所有辐射路径的温度叠加结果。

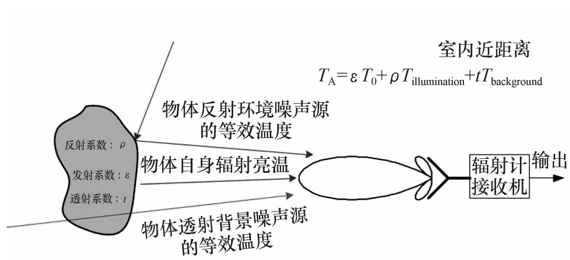


图3　室内被动成像温度模型

Fig. 3　Temperature model for indoor passive imaging

若能将等效辐射温度 T_A 或天线接收功率 P 和场景内的空间位置一一对应起来,就可以通过测量 T_A/P 来实现场景的两维成像。从式(3)和式(9)可以看到,基于辐射计探测的被动成像原理表明只要场景内的人体表面和环境、隐匿物对电磁波存在吸收率、发射率和反射率等辐射能力的差异,这种差异就能通过高灵敏度辐射计探测,从场景内的不同位置目标的温度/能量对比图反映出来,从而实现辐射情况分布的成像。被动太赫兹成像系统就是利用太赫兹波辐射计获取目标的辐射分布特性生成图像,可检测出人体上所隐藏的枪支、爆炸物、各种合成物、金属物品、毒品、货币、液体和陶瓷等违禁品,具有成像清晰、检测率高、无辐射对人体无害等特点。

3.1　辐射计

能够高灵敏度探测热辐射的接收机称为辐射计,其输出电压值与接收到的温度呈线性关系[12]。物体的太赫兹辐射是非相干的微弱信号,被动太赫兹成像仪的成像性能取决于高灵敏度太赫兹辐射计的性能。通常辐射计体制包括全功率辐射计、狄克(Dick)型辐射计、噪声相加型辐射计、比较辐射计和相关辐射计等。

针对近距离太赫兹被动成像,比较经典的辐射计类型是太赫兹全功率辐射计,其原理框图如图4所示,辐射计结构中可以包括多级前端低噪声放大器和多级后端视频放大器,其中视频放大器包含了低通滤波器和积分器,实现低通滤波输出或者隔直交流输出;由于检波器通常遵循平方律准则,输出电压正比于输入功率,由式(9)可知输出电压与天线接收端的物体视在温度同样成正比关系。这种直接检波式辐射计,系统噪声温度低、直流功耗小、结构简单、体积小。

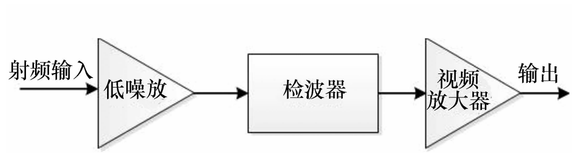


图4　太赫兹全功率辐射计原理框图

Fig. 4　Diagram of terahertz full power radiometer

辐射计灵敏度是衡量辐射计性能的主要指标,辐射计能检测出的最小天线温度变化量即为辐射计的温度分辨率 $\Delta T_{\min}$,表示最小的温度变化所产生的输出直流电压变化量大于或等于辐射计的均方根噪声起伏功率:

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_A + T_{\mathrm{REC}}}{\sqrt{B\tau}}\,, \tag{10}$$

式中,T_A 表示天线视在温度,T_{REC} 为辐射计高频前端的等效输入噪声温度,B 为高频前端的等效噪声带宽,为辐射计的有效积分时间,τ 主要由视频放大器的带宽决定。

功率和温度关系式(9)表示辐射计输出电压正比于天线的视在温度 T_A,因此为了提高 T_A 的检测性能,需要提高辐射计的检测灵敏度。从式(10)可知降低辐射计的等效噪声温度 T_{REC} 是最有效手段,这要求辐射计的整机噪声系数足够小。在条件允许时,还可以通过增加辐射计的高频带宽和积分时间来改善辐射计的灵敏度。特别是针对近距离成像的太赫兹辐射计,相比于提高前端高频低噪放的工作带宽,适当增加后端视频放大器的积分时间更易于实现灵敏度的提高。

3.2 扫描方式

被动太赫兹成像的一个主要难点是高辐射计灵敏度和辐射计慢响应时间之间的矛盾。从式(10)可以看到，为了提高辐射计灵敏度，通常需要辐射计满足 ms 级的有效积分响应时间，比如3mm 波段的辐射计，具有 $B=3$ GHz 高频带宽，噪声温度 $T_{REC}=1\ 500$ K，当实际温度为 $T_A=295$ K 时，则为了达到 $\Delta T_{min}=1$ K 的温度分辨率，要求积分时间满足 $\tau=1.1$ ms。显然，传统机械扫描方式通过对单个辐射计进行机械扫描完成二维场景的覆盖，如图 5 所示，尽管成本低，但是需要的扫描时间长，很难达到实时成像的要求，限制了其在实际场合的应用。为了达到或者逼近实时成像的需求，基于准光学理论的太赫兹焦面阵成像(Focal Plane Array，FPA)被提出[13]。

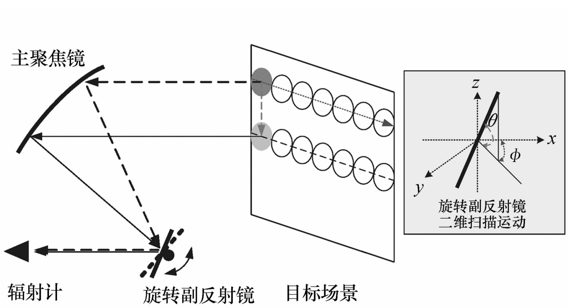


图 5 单辐射计二维扫描示意图

Fig. 5 Diagram of two-dimensional scanning by a single radiometer

图 6 所示的被动太赫兹成像类似于摄像[2]，利用一个两维的阵面，每个阵元的辐射计对应一个像素，对目标视场形成凝视，不需要扫描，可实现实时成像和对目标跟踪；同时由于不需要扫描，可以适当增大接收机积分时间，提高辐射计的温度灵敏度。目前太赫兹焦平面探测器的核心元件辐射计的成本较高，如果完全采取焦平面直接成像方式将导致整个系统成本十分昂贵。太赫兹焦平面成像需要大量的辐射计才能满足系统的采样要求和视场的覆盖，对系统成本提出了较高要求。因此，在实际应用中为了同时兼顾系统成本和成像速率的要求，针对二维成像，当前的主流系统均采用一定数量的辐射计加上扫描机构成像的方式实现对视场的覆盖，利用一定的成像时间代价换取整个系统成本的降低。如图 7 所示的平面扫描[2]或者如图 8 所示基于卡塞格伦结构的折叠光路扫描[5]等，通过适当增大接收机积分时间，从而提高辐射计的温度灵敏度。

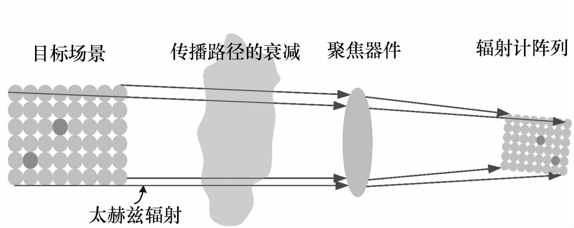


图 6 太赫兹准光学被动成像原理

Fig. 6 Diagram of FPA

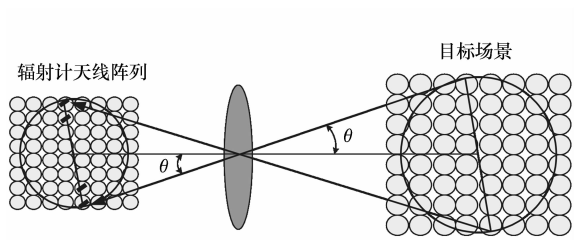


图 7 平面扫描

Fig. 7 Diagram of flat scanning

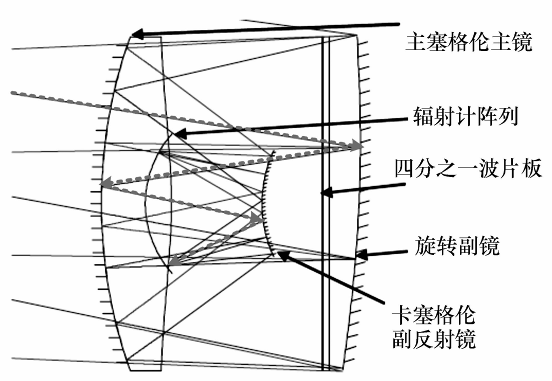


图 8 基于卡塞格伦结构的折叠光路扫描

Fig. 8 Diagram of folded optical path based on Cassegrain

3.3 国外研究现状

早在 1993 年，美国 Millitech 公司就研制了 2 ~3 mm 波段的 FPA 成像系统[1]。2000 年初，美国 NGC 公司从毫米波 FPA 成像的领导公司 TRW 获得毫米波成像技术[2]，推出了一系列 3 mm FPA 成像系统，并将应用从初期对低能见度条件下飞机着陆推广到室内人体隐匿物品探测。为了降低 FPA 的研制成本，实际中多采用焦面阵技术和机

械扫描相结合,在此基础上 Millivision 公司利用楔形透镜旋转研制了 Vela 125 型被动成像仪[3],Brijot 公司利用凸轮驱动扫描镜的机械结构推出了 GEN1/2 系列产品[4],英国 QinetiQ 公司则利用折叠光路研制了 iSPO-30 等被动成像仪[5]。为了兼顾成像距离和分辨率,被动太赫兹成像仪的工作频率逐渐升高。Thruvision 公司利用 8 通道的外差接收机结构研制了工作频率 250 GHz[7]、作用距离 3 m 至 25 m 的 T4000 等系列产品。德国 Jena/IPHT 的 Safe-Visito 成像仪工作在 350 GHz 频段,利用卡塞格伦天线结构和 0.3 K 吸附制冷机大大提高了 1 mm 波段的辐射计接收灵敏度[8]。芬兰的 VTT/NIST 则利用超导天线耦合微测辐射计实现了 640 GHz 波段 5m 探测距离处温度分辨率 0.5 K,空间分辨率 4 cm 的被动成像仪[9]。

表 1 总结了国外典型代表机构被动太赫兹成像仪的主要技术参数。可见,国外对基于准光学理论的被动太赫兹成像技术的系统开发已步入商用阶段,3 mm 波段的部分产品已经进入室内人体安检市场,研究重点集中在更高性能的器件研究以及对更高频段器件和系统的准光学技术探索方面。

表 1　国外太赫兹被动成像系统

Table 1　Terahertz passive imaging system at abroad

国别	公司	中心频率/GHz	帧速率/Hz	温度分辨率/K	阵元数/个	空间分辨率
美国	NGC	89	17	2	1 040	2.1 cm@5 m
	Millivision Vela 125	94	10	3	64	5 cm@1.6 m
	Millitech	94	30	/	64	3 cm@5 m
	Brijot BIS-WDS² GEN2	90	4 - 12	1	16	6 cm@(3 ~ 5 m)
	Thruvision T4000	250	/	>1	/	3 cm@3 m
英国	QinetiQ iSPO-30	94	15	5	64	2.5 cm@5 m
德国	Jena/IPHT Safe-visitor	350	10	/	10 ~ 20	1 cm@1 m
芬兰	VTT/NIST	640	7 - 10	0.5	64	4 cm@5 m

3.4　国内研究现状

由于太赫兹器件制造水平以及测试仪器的限制,国内太赫兹成像技术起步比较晚,成像技术绝大部分还停留在理论研究和跟踪研究上,暂时还没有投入使用的太赫兹成像探测样机。在准光学研究上,国内 Ka 波段技术相对比较成熟,器件设备基本能实现国产,W 波段系统的应用研究尚处于初级阶段。在聚焦元件设计方面,除了主聚焦元件设计上比较成熟外,扩展半球透镜研究以及具有一定应用背景的透镜研究等都获得了一定成果。目前,从事被动太赫兹室内成像探测系统研究的单位主要有南京理工大学[14-15]、华中科技大学[16-17]、东南大学[18-19]、哈尔滨工业大学[20-21]、电子科技大学[22-23]、上海理工大学[24-26]等。

南京理工大学毫米波实验室主要是针对 Ka 波段的交流辐射计扫描成像,研制了原理样机。还对 7 元线列并扫的 Ka 波段焦平面成像系统进行了研究。并研究了用于隐匿物探测的 W 波段直流辐射计,对 W 波段目标辐射特性进行了分析。

华中科技大学分析了 8 mm 波段和 3 mm 波段的目标辐射特性、成像机制和超分辨算法等,在提高图像分辨率上做了大量研究工作的基础上,对金属目标毫米波辐射探测与识别和阵列成像探测的关键技术进行了研究。

东南大学毫米波重点实验室的研究团队重点研究和分析了毫米波焦平面成像的天线—扩展半球介质透镜。并在 94 GHz 频段,对手枪等隐匿物目标开展了作用距离 1 m,成像像素 30 × 30 的成像探测实验。

哈尔滨工业大学邱景辉等人重点研究了准光路理论和聚焦天线、高灵敏度小型化辐射计设计方法和馈源天线优化方法等。研制了 Ka 波段 20 通道的毫米波焦平面成像系统样机,并对系统的空间分辨率、温度灵敏度等参数进行了实验分析;针对 2.4 ~ 3.3 m 的成像距离的人体隐匿物品进行了成像像素 30 × 20 的成像探测实验,系统成像速率达 1.5 s。

电子科技大学针对准光学理论、信号处理方法和系统研制等方面开始了被动太赫兹成像的研究,目前已研制出针对中、远距离场景检测的被动低频段太赫兹焦平面成像系统,正开展近距离室内隐匿物探测的成像研究。

上海理工大学重点在宽频太赫兹吸收器、滤波器等功能器件和主被动 W 波段成像系统研制、目标识别算法等方面开展了研究,研制了被动太赫兹多通道成像系统样机。

综上所述,当前被动太赫兹成像技术在国内的发展尚处于实验室研究阶段,为实现实时、高温度灵敏度成像,使之在机场安检等应用中探测人体衣物下隐匿违禁物品,还存在许多关键技术需要解决。

5 结束语

基于太赫兹波大气传输特性和辐射检测理论,探讨了被动太赫兹成像系统的成像原理:依靠某一大气传窗口对应的太赫兹波频段,利用高灵敏度太赫兹波辐射计探测、接收被测场景中目标、背景的电磁辐射,根据不同物质的辐射特性不同,反映各景物之间以及景物各部分之间太赫兹辐射能力的差异,从而识别不同的物体。通过对辐射计结构和性能的介绍,反映设计被动太赫兹成像系统时主要需要考虑的是实时成像要求和高温度灵敏度之间的矛盾。为了解决这一难题,一种方案是基于低性能辐射计的焦平面成像,另一种是采用高性能辐射计阵列配合机械扫描。从当前的研究现状可以看到在未来很长一段时间内这种方式仍是被动太赫兹成像系统的主流方式。

总的来说,国外通过对准光学聚焦和扫描结构的改进以及更高频段的尝试,被动太赫兹成像系统正逐步向快速、实时、高分辨率和远作用距离成像的方向发展。而由于芯片或工艺的原因,国内研究太赫兹频段的成像技术进展缓慢。但是针对当前已有的条件下,研究 Ka 或者 W 频段的实时、高灵敏度成像的关键技术,将毫米波辐射计、准光路理论和馈源天线研究的成果由 Ka 频段推广到更高频段,可以在现有器件的条件下,用以提高系统的温度分辨率和被动太赫兹成像系统的性能。

参考文献:

[1] GOLDSMITH P F, HSIEH C T, HUGUENIN G R, *et al.*. Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, 41(10): 1664-1675.

[2] YUJIRI L. Passive millimeter wave imaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2006, 4(3): 39-50.

[3] WILLIAMS T D, VAIDYA N M. A compact, low-cost, passive MMW security scanner[J]. *Defense and Security International Society for Optics and Photonics*, 2005: 109-116.

[4] GARY V T. Millimeter wave case study of operational deployments: retail, airport, military, courthouse, and customs [J]. *SPIE*, 2008, 6948: 694802-16.

[5] ANDERTON R N, APPLEBY R, BEALE J E, *et al.*. Security scanning at 94 GHz[J]. *SPIE*, 2006, 6211: 6211C-8.

[6] WIKNER D A. Progress in millimeter-wave imaging[J]. *SPIE*, 2011, 7936: 1392-1398.

[7] MANN C. A compact real time passive terahertz imager[J]. *SPIE*, 2006: 6211: 62110E-5.

[8] MAY T, ZIEGER G, ANDERS S, *et al.*. Safe VISITOR: visible, infrared, and terahertz object recognition for security screening application[J]. *SPIE*, 2009, 7309: 73090E-8.

[9] LUUKANEN A A, GRONBERG L, GRONHOLM M, *et al.*. Real-time passive terahertz imaging system for standoff concealed weapons imaging[J]. *SPIE*, 2010, 7670: 767004-8.

[10] LUUKANEN A, APPLEBY R, KEMP M, *et al.*. Millimeter-wave and terahertz imaging in security applications[J]. *Terahertz Spectroscopy and Imaging*, 2012: 491-520.

[11] PREISSNER J. The influence of the atmosphere on passive radiometric measurements[J]. *In AGARD Millimeter and Submillimeter Wave Propagation and Circuits*, 1979.

[12] SKOUM N. Microwave radiometer systems: design and analysis[J]. *Norwood Ma Artech House P*, 1989, 1(2): 250-252.

[13] 金伟其,田莉,王宏臣,等. THz 焦平面探测器及其成像技术发展综述[J]. 红外技术, 2013, 4: 187-194.
JIN W Q, TIAN L, WANG H CH, *et al.*. Review of THz focal plane detector and the development of its imaging technolo-

gy[J]. *Infrared Technology*,2013,4:187-194. (in Chinese)

[14] 张坤. 噪声照射下毫米波辐射测量的实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
ZHANG K. Experiment on millimeter wave radiometric measurement under noise illumination[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2010. (in Chinese)

[15] 曾文辉. W 波段测量辐射计接收机设计[D]. 南京:南京理工大学,2008.
ZENG W H. Design of W-band radiometer-measuring receiver[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2008. (in Chinese)

[16] 张光锋. 毫米波辐射特性及成像研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
ZHANG G F. Research on millimeter wave radiometric characteristic and imaging[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2005. (in Chinese)

[17] 郎量,张祖荫,郭伟,等. 毫米波超综合孔径辐射计成像技术[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(7):1623-1626.
LANG L,ZHANG Z Y,GUO W. Imaging by millimeter wave super-synthesis radiometer[J]. *Systems Engineering and Electronics*,2009,31(7):1623-1626. (in Chinese)

[18] 邓小丹,潘君骅,窦文斌. 毫米波焦面阵成像视场扩大分析[J]. 电子学报,2003, 31(12A): 2012-2014.
DENG X D,PAN J H,DOU W B. Analysis of extending the field-of-view of focal-plane imaging system at millimeter-wavelengths[J]. *Acta Electronica Sinica*,2003, 31(12A):2012-2014. (in Chinese)

[19] 陈昊,窦文斌. 用于毫米波焦面成像阵的介质加载波导阵元分析[J]. 红外与毫米波学报, 2003,22(5):398-400.
CHEN H,DOU W B. Analysis of waveguide loaded with dielectric used as millimeter wave focal imaging array elements [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*,2003,22(5). 398-400. (in Chinese)

[20] QIU J H,WANG N N,YU F,DENG W B. Design of wide-band monopole antenna with parasitic elements[C]. 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility,Singapore,2008:411-414.

[21] 王楠楠,邱景辉,张鹏宇,等. 被动毫米波焦面阵成像技术[J]. 红外与毫米波学报,2011,30(5):419-424.
WANG N N,QIU J H,ZHANG P Y,*et al*.. Passive millimeter wave focal plane array imaging technology[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*,2011,30(5):419-424. (in Chinese)

[22] YANG J Y,TAN R J,XIONG J T,LI L C. Frequency domain estimation and correction algorithm of row displacement for scanning PMMW imaging[J]. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*,2013,34(2):205-216.

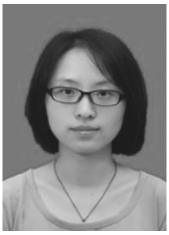
[23] CHEN Q K,FAN Y,LI L C,*et al*.. Design of W-band 16 elements full sampling focal plane linear array[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*,2013,32(1):23-27.

[24] ZANG X F,LI Z,SHI C,*et al*.. Rotatable illusion media for manipulating terahertz electromagnetic waves[J]. *Optics Express*,2013,21(21):25565-72.

[25] ZANG X F,SHI C,CHEN L,*et al*.. Ultra-broadband terahertz absorption by exciting the orthogonal diffraction in dumbbell-shaped gratings[J]. *Scientific Reports*,2015,5:8901.

[26] 高春梅,陈麟,谢乐,等. 不同周期数牛眼结构对基于伪表面等离子激发的太赫兹透射的影响[J]. 光子学报,2012, 41(10):1156-1160.
GAO CH M,CHEN L,XIE L,*et al*.. Comparison on terahertz transmission based on spoof surface plasmon polaritons between bull's eye structures with different ring grooves[J]. *Acta Photonica Sinica*,2012,41(10):1156-1160. (in Chinese)

作者简介：



丁　丽(1985—),女,浙江湖州人,博士,讲师,主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail:sunnylding@usst.edu.cn

朱亦鸣(1979—),男,上海人,博士,教授,博士生导师,主要从事太赫兹波谱与成像方面的研究。E-mail:ymzhu@usst.edu.cn