

被动毫米波成像系统的发展状况及其关键技术

宋 崧, 王学田, 邓甲昊

北京理工大学机电工程与控制国家级重点实验室, 北京 100081

摘要 毫米波对大气具有良好的穿透性并能提供较好的角分辨率, 因此被动毫米波 (PMMW) 成像技术越来越受到重视。为科学设计 PMMW 成像系统, 本文在分析被动毫米波成像原理、系统组成及辐射特性的基础上, 重点阐述了国内外被动毫米波成像的最新进展及关键技术, 包括主要器件、系统和信号处理方法等, 并提出了被动毫米波成像的发展方向和应用领域。

关键词 被动毫米波成像; 辐射计; 焦平面; 微波单片集成电路

中图分类号 TN015, TN957.5

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.19.012

Status and the Key Techniques of Passive Millimeter-Wave Imaging System

SONG Song, WANG Xuetian, DENG Jiahao

National Key Laboratory of Mechatronical Engineering and Control; Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Millimeter wave has a nice air propagation property and could provide a moderate angular resolution. On the basis of the discussion involving the theory and characteristic of Passive Millimeter Wave (PMMW) image, the current advances of foreign countries in this domain including the devices, systems, and the signal processing methods are introduced. Then, domestic research work is proposed, and furthermore the developing trend and applications of PMMW image are also detailed.

Keywords PMMW image; radiometer; focal plane; MMIC

0 引言

由于毫米波 (Millimeter-Wave, MMW) 波段位于红外与微波之间, 除具有红外和微波的共同特征外, 还具有其特有的性能。与红外相比, MMW 大气衰减小, 区别金属目标和周围环境的能力强; 与微波相比, MMW 的指向性好、抗干扰能力强、探测性能好。因此, MMW 探测设备在恶劣天气或战场烟尘条件下, 比光电探测器更具优势, 具有良好的烟尘、云雾、沙暴和雨雪的穿透能力, 能适应恶劣的战场环境, 可全天候、全天时工作, 在环境遥感或军事侦察等领域得到广泛应用。以毫米波辐射计为主要部件的被动式毫米波成像探测设备, 其工作机制是自身不发射信号, 仅通过接收目标的毫米波辐射而成像。在毫米波段, 不同物体的发射率相差很大, 这会使

目标与其周围背景的亮度温度差异显著, 因而会在天线视域内形成一亮度温度分布, 从中可以分析出目标的某些特征。该分布的毫米波辐射传播至天线处, 将得到一天线温度, 它是天线视域内亮度温度分布的加权平均。加权函数就是天线的功率方向性函数, 经过反演运算后, 能得到亮度温度的分布函数^[1]。

1 被动毫米波成像基本特性

在电磁频谱上, 毫米波波长短于微波, 在相同的天线尺寸下可得到较窄的波束, 提供较高的角分辨率; 其波长又长于红外, 在几个大气窗口处, 云、雾、烟尘等对毫米波的衰减远小于对红外的衰减, 因而毫米波探测器在恶劣天气或战场烟

收稿日期: 2011-06-02; 修回日期: 2011-06-15

作者简介: 宋崧, 博士研究生, 研究方向为探测制导与控制技术及毫米波遥感与成像, 电子邮箱: soongs2008@yahoo.cn; 邓甲昊 (通信作者), 教授, 研究方向为中近程目标探测与信号处理及感知与自适应控制, 电子邮箱: bitdjh@sohu.com

尘条件下比光电探测器更为有效,具有全天候工作能力。

与主动成像相比,被动成像有其固有优点:(1) 被动式图像通过检测物体辐射的能量得到,在毫米波段与可见光段的原理一致,因而被动毫米波图像与可见光图像相近,有利于物体辨认,而主动系统如雷达,其成像要受到“闪烁效应”的影响,难以直接显现物体的自然形状;(2) 被动式成像不发射电磁波,因而没有电磁污染,比主动式更适于隐匿工作。理论分析还表明,各种涂层隐身材料对雷达的隐身性越好,就越容易被被动探测系统发现。此外,就探测金属目标而言,被动毫米波成像有一个显著的优点,就是金属目标的发射率很低,它仅反射天空的辐射,而天空温度在一定时空范围内基本不变,因而金属目标的毫米波特征很稳定,昼夜变化及车辆行止等对被动毫米波系统的成像品质影响不会太大。

2 几种成像体制及其特点

经资料调研,PMMW 成像主要有以下几种体制。

(1) 单孔二维机械扫描成像。该体制依靠二维机械扫描过程中的数据采样实现二维成像。由于辐射计的灵敏度与积分时间呈正比,为了保证高灵敏度,采样频率不能太高,因此成像时间长,效率低。同时,由于一幅图像的采样时间长,系统的稳定度要求很高。所以,此种体制正逐渐被淘汰。

(2) 相控阵系统。该系统难以设计出有效的辐射单元,馈电系统损耗过大,因此目前在毫米波段应用不多。

(3) 干涉阵列系统。该系统过于复杂和昂贵,且干涉阵列所需的空間很大,主要应用于射电天文领域。

(4) 综合合成孔径成像。该体制技术方案十分复杂。其最大优点为在同等天线口面下可以大大降低天线质量和加工难度,同时具有良好的分辨率。该体制的不足之处主要有:① 对于射频通道来说,由于每个接收机的天线增益低,因而灵敏度降低;② 同样需要多个辐射计接收机,在选用较高的毫米波频率情况下相对成本较高;③ 由于要求基线位于接收平面上,天线的纵向尺寸较大,使得系统体积较大;④ 系统复杂,可靠性低。

(5) 焦平面阵列成像系统。它将多个接收单元排列在聚焦天线的焦平面上,利用各馈源的偏焦不同,产生多个不同指向的波束覆盖视域。由于每个辐射计接收机设置在不同的偏角距离上,每个接收通道所对应的天线波束宽度和天线口面利用效率均不一致,导致每个通道的分辨率和接收效率不一致,因而图像质量较差,给图像处理和识别增加了难度。此外,一方面,需要使用多个辐射计接收机,在选用较高的毫米波频率情况下相对成本较大;另一方面,每个射频通道增益随环境温度的变化规律难以一致,虽然环境温度可以通过设计保温系统解决,但是增加了系统的复杂性、体积和成本。近几年来,随着微波单片集成电路(MMIC)的迅速发展,用于毫米波焦平面成像系统的馈源单元及接收机的性能都大大提高,其成本又大幅下降,因而焦平面成像体制已成为被动毫米波成像的主要体制^[2-3]。

3 被动毫米波成像系统关键技术

从系统结构分析,被动毫米波成像系统的关键技术包括馈源天线、聚焦天线技术、毫米波电路集成技术及信号处理技术等几方面。

3.1 馈源天线技术

馈源天线长久以来一直是一个研究的热点。除了喇叭天线是一种传统的馈源外,近年渐变缝隙天线(TSA)也日渐成熟^[4-6]。TSA 是通过在介质层的接地板上蚀刻出渐变缝隙形成的,性能类似于行波天线,其主要优点为:(1) 尽管其本身为平面结构,但在 E 面和 H 面上都能形成对称的波束;(2) 有适中的增益;(3) 输入阻抗在一个很宽的频带内基本不变,适宜作宽频带天线;(4) 用 TSA 构成阵列时,其阵元间距小于传统的喇叭天线。

渐变缝隙天线有非线性槽线天线(Vivaldi)、线性缝隙天线(LTSA)及等宽缝隙天线(CWSA)3种(图1)。其中 Vivaldi 的缝隙以指数形式逐渐张开,LTSA 的缝隙以直线形式逐渐张开,而 CWSA 的缝隙张至一定程度后就不再变化。LTSA 最为常用,它的长度一般为 $4\lambda_0-10\lambda_0$ (λ_0 为自由空间波长),张角 α 约为 $4^\circ-12^\circ$,有效厚度为 $d_{\text{eff}}=(\sqrt{\epsilon_r-1} \cdot d/\lambda_0)$,约在 0.005—0.03 之间,其中 d 为介质的实际厚度, ϵ_r 为介电常数。

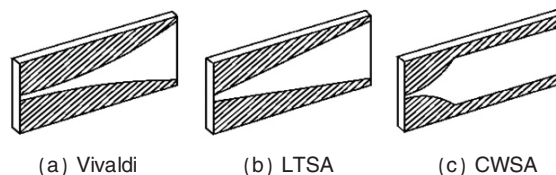


图1 3种渐变缝隙天线

Fig. 1 Three kinds of tapered slot antenna

3.2 毫米波电路集成技术

被动式毫米波成像系统需要大量的毫米波接收器,必须降低其价格并使其小型化。研制被动毫米波成像专用集成电路——毫米波接收器,实现毫米波接收器的集成化成为毫米波成像系统的关键技术之一。毫米波焦平面成像系统得以迅速发展的一个重要原因是近20年MMIC的研究获得了突破,目前国内外许多研究机构都已开发出了MMIC单片接收机。

(1) 美国汤普森-拉莫-伍德里奇(Thompson-Ramo-Wooldridge, TRW)公司的产品及特性。

TRW 研究组使用 GaAs 材料制造的 MMIC 直接检波式接收机,每个大小仅为 $2.0\text{mm} \times 7.6\text{mm}$,其中包括低噪声放大器(LNA)及检波电路,增益大于 40dB,噪声小于 5.5dB,温度灵敏度小于 0.4K。并把每4个接收机作为一个小模块制造在同一片电路上,如图2(a)所示,图中接收机的前端即为 LTSA,用这样的模块就可以组成更大的阵列^[7-8]。

(2) Lockheed Martin 公司的产品及特性。

其 RF 前端 MMIC 接收机的大小为 $6.35\text{mm} \times 6.35\text{mm} \times 25.4\text{mm}$,包括 LNA、混频器及中频放大器,16个接收机密集排列成一角状阵列,如图2(b)所示^[9]。

(3) Millivision 公司的产品及特性。

Millivision 公司研制的 MMIC 接收机卡,每片上有 8 个接收机,图 2(c)所示为一个 8×8 接收机阵列^[10]。

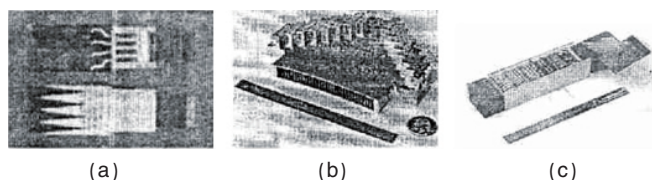


图 2 3 个公司的 MMIC 接收机

Fig. 2 Three kinds of receiver

3.3 毫米波成像系统

自 1980 年由 Thomson-CSF 和 Fujitsu 研制出高电子迁移率晶体管 (HEMT) 以来,HEMT 一直受到人们的关注。1985 年,Maselink 用性能更好的 InGaAs 沟道制成的赝配 HEMT (pHEMT),使 HEMT 工作频率更高、噪声更低。随着 MMIC 的迅速发展,特别是应用 HEMT 技术设计 MMIC 的发展,实现毫米波接收器集成化已成为可能。若将多路毫米波接收器封装在一起,可进一步缩小体积。在 MMIC 接收机的基础上,国外已研制出被动毫米波成像专用毫米波接收器。

(1) TRW 公司的产品及性能。

图 3(a)所示为 TRW 研究组为飞行器自动着陆而研制的 PMMW 成像仪样机。其主要参数为:中心频率 89GHz,带宽 10GHz,聚焦天线口径 460mm,接收机阵列为 40×26 个 MMIC 直接检波接收机,经过处理可得到的像素个数为 80×52,视域为 15°×10°,角分辨率为 0.5°,温度灵敏度小于 2K,成像帧速为 17Hz^[11]。

(2) Lockheed Martin 公司的产品及性能。

图 3(b)所示为 Lockheed Martin 公司的 PMMW 成像仪样机,中心为卡赛格伦天线。为了减少接收机的数目,此系统仅在水平方向线性排列了 34 个接收机,并在垂直方向上作机械扫描,最终可获得 34×44 个像素。其主要参数为:中心频率 94GHz,视域 15°×13.6°,温度灵敏度 0.6—2K,成像帧速 10Hz。

(3) Millivision 公司的产品及性能。

图 3(c)所示为 Millivision 的手持式 PMMW 成像仪,其主要参数为:中心频率 94GHz,带宽 5GHz,聚焦天线直径 125mm,温度灵敏度小于 1K,像素个数为 32×32,成像帧速 10Hz。

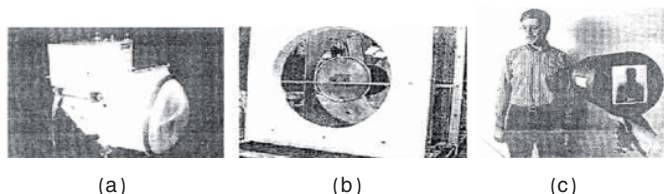


图 3 3 个公司的 PMMW 成像仪

Fig. 3 Three kinds of PMMW Imager

近年来,国内许多单位或厂家也开展了毫米波 MMIC 的研究,但由于工艺等因素限制进展比较缓慢。目前由东南大学射频与光电子研究所组织,向国内开放的法国 OMMIC 公

司 0.2μm pHEMT 工艺多目标晶圆计划是实现毫米波接收器集成化的一个途径。该工艺的 $f_t=55\text{GHz}$,主要用于 MMIC、光通信 IC 及射频集成电路 (RFIC) 等领域。OMMIC 公司提供了以下器件模型: nE/DFET 大小信号模型,肖特基势垒二极管 (BEDiode 用于变容、GMDiode 用于混频器、overlap-Diode 用于电压移位),电阻有 CaAs 和 NiCr 电阻,MIM 电容有两种,以及螺旋电感、空气桥、过孔、焊接和各种连线、微带器件等^[9]。0.1μm pHEMT 工艺多目标晶圆计划也已对外开放。

3.4 信号处理技术

虽然毫米波成像仪的分辨率已远远高于微波成像仪,但相对来说其波长仍然太长,因而绕射现象严重。解决的途径主要有增大天线口径、使用超分辨率算法两种。由于超分辨率算法较为复杂,运算量大,一般采用高性能数字信号处理 (DSP) 实现。该项技术也是被动式毫米波成像系统的研究热点之一。

成像仪的光学系统可以看成是一个空间低通滤波器,它的截止频率与其天线口径尺寸及工作波长有关。通带以内的频率信息可通过线性逆变换方法恢复,但通带以外的信息将丢失,这会在截止频率点产生强烈的吉布斯振铃效应 (gibbs ringing effect)。因此,寻求恢复截止频率点以外信息,且能够真正实现频带拓展的数学方法 (即“超分辨率”算法) 都是非线性的。

恢复有噪带限图像是求解不定逆的数学问题,即方程的解不唯一,因此必须使用关于理想图像的先验信息,实质上是给求解加上一些限制。至今已发展了许多算法,如 Two-Mu、ML、MAP、CID、MUSIC 等^[12-13],它们在一定程度上均可提高图像的分辨率。

4 国内被动毫米波成像技术的研究状况

目前,对工作于 8mm 波段的被动式毫米波成像系统的研究,国内主要以南京理工大学和哈尔滨工业大学的研究为代表,他们各自采取了不同的设计思路,可以实现实时成像。

4.1 南京理工大学的研究进展

南京理工大学毫米波光波近感技术研究所长期以来一直从事毫米波技术的研究。在被动式辐射计研究方面,不仅理论上完成了辐射计的建模、波形模拟、目标的特征提取及识别,而且已经制成了数种辐射计,并在此基础上对毫米波焦平面成像技术进行了研究^[14-18]。

4.1.1 LTSA 馈源天线

该所已研制出数种 LTSA,在中心频率为 35GHz 时,介质基片 $\epsilon_r=2.2$, $d=0.254\text{mm}$,它的有效厚度 $d_{\text{eff}}=0.014$ 。当 $L=6\lambda_0$, $\alpha=8^\circ$,馈电使用波导激励的鳍线时,测得天线的 E 面和 H 面增益分别约为 18dB 和 15dB;3dB 波宽为 21.2°和 25.4°,驻波比 $SWR<2.5$ 的带宽范围约为 10GHz^[19-21]。

4.1.2 七元并扫焦平面系统

对焦平面成像系统进行了研究,设计了一种七元并扫焦平面系统,其聚焦元件为卡赛格伦天线。卡氏天线的直径波

长比 $D_m/\lambda=100$, 当工作频率为 35GHz 时, $D_m=860\text{mm}$, 3dB 波宽 $\theta_{3\text{dB}}=1.2\cdot\lambda/D_m=0.69^\circ$ 。天线的焦径比 $F_m/D_m=0.38$, 放大率 $M=5$ 时, 可得天线焦距 $F_m=327\text{mm}$, 等效焦距 $F_e=M\cdot F_m=1635\text{mm}$, 主面半张角 $\theta_{\text{m}}=67^\circ$, 副面的半张角 $\theta_{2\text{m}}=15^\circ$ 。对副面的遮挡损失和绕射损失进行权衡后, 取副面直径 $D_s=137.5\text{mm}$ 。

4.1.3 8mm 直接检波式辐射计

该所研制的直接检波式接收机主要由 LNA、毫米波检波器及视频放大器组成。LNA 采用 InGaAs HEMTS 管构成, 毫米波检波器采用肖特基势垒二极管构成, 其灵敏度可表示为

$$\Delta T_{\text{min}} = \frac{F_m T_0}{\sqrt{B\tau}} \quad (1)$$

其中, F_m 为系统噪声系数; T_0 为环境温度, 通常取 $T_0=290\text{K}$; B 为系统带宽; τ 为积分时间。该系统采用的直接检波式接收机的系统噪声为 $F_m=4\text{dB}$, 带宽 $B=1000\text{MHz}$, 积分时间 $\tau=2\text{ms}$, 求得 $\Delta T_{\text{min}}=0.52\text{K}$ 。

射频低噪放的增益可表示为

$$G_{\text{IF}} = \frac{P_{\text{if}}}{kT_{\text{sys}}BF_m} \quad (2)$$

其中, P_{if} 为检波器要求的输入功率, 即要求射频放大器输出的功率; k 为波尔兹曼常数; T_{sys} 为系统噪声。取检波器要求的输入功率为 $P_{\text{if}}=-20\text{dB}$, $T_{\text{sys}}=1100\text{K}$, $B=1000\text{MHz}$, $F_m=4\text{dB}$, 可求得 $G_{\text{IF}}=54\text{dB}$ 。考虑各种接头损耗 5dB, 故要求射频低噪放的增益达到 59dB。8mm 波段单片 HEMT 低噪放的增益可达 23dB, 噪声系数为 3dB, 带宽为 5GHz, 因此采用 3 片低噪放模块级联即可满足辐射计要求。毫米波焦平面成像系统的结构如图 4 所示。

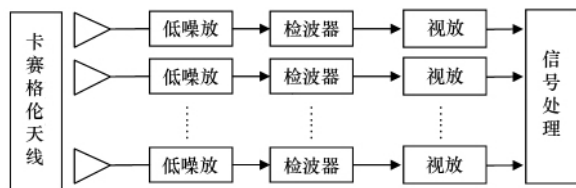


图 4 毫米波焦平面成像系统的结构图

Fig. 4 Block diagram of MMW focal-plane imaging system

4.2 哈尔滨工业大学的研究进展

目前, 哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院研制了工作于 8mm 波段的 20 通道焦平面阵列成像系统, 其聚焦元件为介质透镜。该系统可实现对目标的快速扫描, 其成像空间分辨率为 5cm, 水平视场为 12° , 垂直视场为 20° , 能达到对人体隐匿物品的室内近场探测, 可以应用到机场安检等领域。

该系统采用被动毫米波成像技术, 将来自人体的电磁辐射经反射板反射, 并由聚焦透镜聚集于 20 单元组成的辐射计阵列, 经过信号处理单元, 得到目标与背景的毫米波图像, 系统结构如图 5 所示。

4.2.1 8mm 直接检波式辐射计设计

系统采用直接检波式辐射计组成 $2\text{mm}\times 10\text{mm}$ 波焦平面阵列, 接收机结构如图 6 所示。辐射计工作的中心频率为

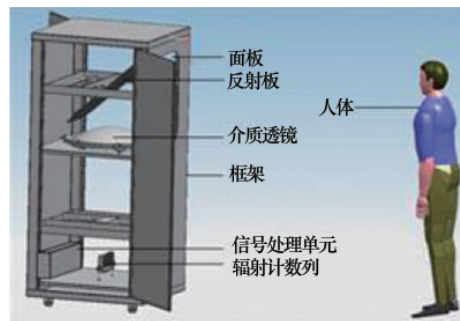


图 5 20 通道 8mm 被动成像系统结构图

Fig. 5 Structure of 20-channel 8mm wave passive imaging system

35GHz, 带宽约为 3GHz, 采用 3 级 MMIC 低噪声放大器对输入信号进行 60dB 的放大, 积分时间为 1ms。辐射计采用 3.5V 和 12V 供电, 噪声系数小于 6dB。



图 6 辐射计结构框图

Fig. 6 Block diagram of radiometer structure

4.2.2 聚焦透镜的设计

聚焦透镜的设计直接决定了系统空间分辨率能否满足要求。根据奈奎斯特采样定理, 空间分辨率为焦斑大小的 1/2, 而焦斑大小又与准光学器件的口径、工作频率和成像距离有关, 如式(3)所示

$$r_A = \Delta\theta \cdot f = 1.22\lambda \cdot f/D \quad (3)$$

其中 f 为馈源到透镜的距离; λ 为系统工作波长; D 为透镜口径(有效直径)。

近场毫米波成像系统需要聚焦元件获得小尺寸焦斑。根据系统需要, 聚焦透镜采用相对介电常数为 2.3 的介质透镜作为聚焦元件, 透镜口径为 570mm, 馈源阵列距透镜为 650—750mm, 人体距系统 240—330cm, 系统的空间角分辨率为 0.9° , 水平视场为 12° , 垂直视场为 20° 。

4.2.3 阵列馈源的设计

该系统采用优化介质棒天线作为馈源, 该天线可通过增加长度来提高增益, 在 26.5—40GHz 的频带内, 反射损耗低于 -18dB, 增益大于 17dB, 第一旁瓣电平低于 -20dB。系统采用焦径比大于 1 的宽角扫描透镜, 将馈源置于透镜的焦平面上, 阵列分为两排, 每排 10 个单元, 单元间距为 14mm, 天线间的耦合小于 -20dB。以 -15dB 的边缘照射电平实现了对透镜的有效照射。馈源阵列如图 7 所示。

4.2.4 系统样机及成像效果

20 通道 8mm 波成像系统原理样机及成像图如图 8 所示。目标适用恒温水箱, 温度为 40°C , 前面悬挂宽度为 40mm 的钢尺。

图 9 为系统样机探测人体隐匿物品的成像效果图。实验中人体毛衫下藏有锡箔, 脚下放一杯热水。由图 8 和图 9 可

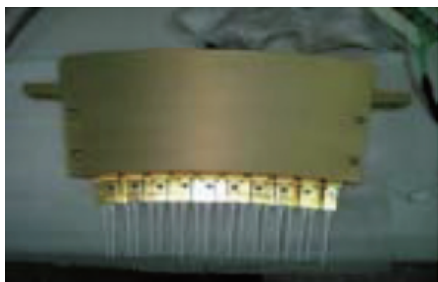


图 7 馈源阵列图

Fig. 7 Picture of feed-source array

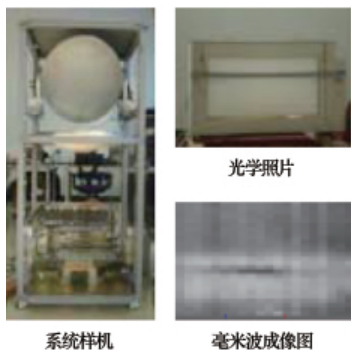


图 8 20 通道 8mm 成像系统样机及成像图

Fig. 8 Pictures of 20-channel PMMW imaging system



图 9 探测人体隐藏物体成像图

Fig. 9 Pictures of imaging tests

知,该系统可实现室内探测人体隐藏物品的目的,系统性能指标如表 1 所示。

表 1 20 通道 8mm 被动成像系统性能指标
Table 1 Performance of 20-channel 8mm passive
MMW imaging system

主要参数	性能指标
原始图像分辨率	30×20
工作频率/GHz	35
工作带宽/GHz	3
透镜口径/mm	570
系统角分辨率/(°)	0.9
温度灵敏度/K	<1
成像距离	2.4m×3.3m
成像时间/s	1.5
系统尺寸	0.8m×0.8m×1.8m

5 展望

由以上分析可知,PMMW 成像技术具有广泛应用前景。

5.1 应用前景

PMMW 成像技术由于其探测体制的天然优势,在许多领域都得到了应用。

(1) 利用毫米波对雨雾的穿透性,以及被动工作方式的隐匿性,PMMW 成像技术可在军事侦察上发挥重要作用,也可在海岸缉私中用于搜索雨雾中的船只,或在机场、海关等处检测可能隐藏在衣物下的小型武器;

(2) PMMW 成像技术利用人体和武器毫米波辐射特性的不同,可以发现隐匿武器,且由于不发射电磁波,不会对人体造成任何伤害;

(3) PMMW 成像技术可用于低能见度天气条件下显示机场跑道,引导飞机安全着陆,也可用于汽车防撞系统;

(4) 在医疗检查、环境监测、等离子体研究及射电天文观测等方面,PMMW 成像技术也得到广泛地应用。

5.2 发展方向

由于国外在 PMMW 成像方面的研究开展较早,各种毫米波器件也更成熟,因此目前其成像系统已是第二代产品,基本实现了实时成像。主要的发展方向是着眼于系统的小型化和实现实时成像,主要表现在以下几个方面:

- (1) 提高工作频率,由 8mm 波段向 3mm 波段过渡;
- (2) 利用 MMIC 技术实现毫米波电路的集成化、小型化;
- (3) 构建更大规模的二维凝视阵列,实现实时成像;
- (4) 加强对毫米波“超分辨率”算法的研究。

参考文献 (References)

- [1] 李兴国. 毫米波近感技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
Li Xingguo. Millimeter-wave Near-sensing technology & Application[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1991.
- [2] Goldsmith P F, Hsieh C T, Huguenin G R, *et al.* Focal plane imaging system for millimetre wavelengths [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, 41(10): 1664-1674.
- [3] Lettington A H, Dunn D, Blankson I M, *et al.* Review of imaging architecture [C]//Proc SPIE, Orlando, April 3, 2002. doi:10.1117/12.477457.
- [4] Janaswamy R, Schaubert D. Analysis of the tapered slot antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, 35(9): 1058-1064.
- [5] Schaubert D, Kollberg E, Korzeniowski T, *et al.* Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1985, 33 (12): 1392-1400.
- [6] Johansson J F, Yngvesson KS, Kollberg E L. Model experiments with slot antenna arrays for imaging[C]//Proc SPIE. SPIE, 1985, 598: 118-125.
- [7] Moffa P, Yujiri L, Agravante H H, *et al.* A large-aperture passive millimeter wave pushbroom camera [C]//Proc SPIE, Orlando, April 19, 2001. doi:10.1117/12.438130.
- [8] Kuroda R T, Dow G S, Guo Y, *et al.* Direct detection MMIC FPAs for MMW imaging [C]//Proc SPIE, Orlando, April 21, 1997. doi: 10.1117/12.277070.
- [9] Yujiri L, Shoucri M, Moffa P. Passive millimeter wave imaging[J]. *Microwave Magazine, IEEE*, 2003, 4(3): 39-50.

- [10] Ferris Jr D D, Currie N C. Overview of current technology in MWW radiometric sensors for law enforcement applications [C]//Proc SPIE, Orlando, April 26, 2000. doi: 10.1117/12.391821.
- [11] Philip M, Larry Y, Karen J, *et al.* Passive millimeter-wave camera flight tests[C]//Proc SPIE, Orlando, April 26, 2000. doi:10.1117/12.391830.
- [12] Sundareshan M K, Bhattacharjee S. Superresolution of passive millimeter-wave images using a combined maximum likelihood optimisation and projection-onto-convex-sets approach[C]//Proc SPIE, Orlando, April 19, 2001. doi:10.1117/12.438132.
- [13] Lettington A H, Yallop M R, Dunn D. Review of super-resolution techniques for passive millimeter-wave imaging [C]//Proc SPIE, Orlando, April 3, 2002. doi:10.1117/12.477467.
- [14] 娄国伟, 李兴国, 宁军. 高速扫描全功率毫米波辐射计研究 [J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(4): 241-246.
Lou Guowei, Li Xingguo, Ning Jun. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1998, 17(4): 241-246.
- [15] 章勇, 李兴国, 李跃华. 七元并扫毫米波焦平面成像系统的研究[J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(4): 157-162.
Zhang Yong, Li Xingguo, Li Yuehua. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, 18(4): 157-162.
- [16] 汪敏, 李兴国, 吴文. 8mm 波段直接检波式接收机研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(4): 310-313.
Wang Min, Li Xingguo, Wu Wen. *Journal of Infrared and Millimeter waves*, 2002, 21(4): 310-313.
- [17] 章勇. 被动毫米波成像技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1999.
Zhang Yong. Study on passive millimeter-wave imaging technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 1999.
- [18] 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.
Qian Songsong, Li Xingguo. *Guidance & Fuze*, 2003, 24(4): 29-36.
- [19] 徐晨, 杨永杰, 包志华. 被动毫米波成像系统的关键技术 [J]. 南通大学学报, 2005, 4(1): 49-51.
Xu Chen, Yang Yongjie, Bao Zhihua. *Journal of Nantong University*, 2005, 4(1): 49-51.
- [20] 邱景辉, 王楠楠, 庄重, 等. 8mm 波段 20 通道被动焦面阵成像系统研究[C]//2009 年全国微波毫米波会议论文集(下册). 北京: 电子工业出版社, 2009: 1223-1226.
Qiu Jinghui, Wang Nannan, Zhuang zhong, *et al.* Research on 8mm 20-channel passive FPA imaging system [C]//Proceedings of 2009 National Conference on Microwave and Millimeter Waves (II). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 1223-1226.
- [21] 杨永杰, 徐晨, 包志华. 被动毫米波成像系统 [J]. 电视技术, 2005(9): 82-84.
Yang Yongjie, Xu Chen, Bao Zhihua. *Video Engineering*, 2005 (9): 82-84.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·



“第六届国际耐火材料会议”征文

由中国硅酸盐学会和中国金属学会联合主办的“第六届国际耐火材料会议”将于 2012 年 10 月 18—21 日在郑州召开。

征文范围: 隔热和新能源领域用耐火材料; 节能技术、再生利用及环境生态友好型耐火材料; 钢铁领域用耐火材料; 水泥、玻璃和陶瓷领域用耐火材料; 其他领域(有色、铸造、石灰、石化、电力、焚烧等)用耐火材料; 耐火原料; 耐火材料装备、标准化、检测与工艺过程模拟; 耐火材料基础研究与教育等。

征文截止日期: 2012 年 5 月 31 日。

通信地址: 北京市朝阳区管庄东里 1 号 (100024); 联系电话: 010-51167543; 传真: 010-65749474; 电子信箱: chj@bjruitai.com。



《科技导报》“科技要闻”栏目征稿

“科技要闻”栏目主要选登各类媒体报道的自然科学领域近期的重要科技研究成果新闻。欢迎各研究课题组和科技工作者个人推荐或自荐新闻, 每条新闻约 300 字。栏目责任编辑: 杨书卷, 投稿邮箱: yangshujuan@cast.org.cn。