

文章编号:1001-9014(2011)05-0419-06

## 被动毫米波焦面阵成像技术

王楠楠, 邱景辉\*, 张鹏宇, 邓维波

(哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**以安全检查为背景,研究了近距离被动毫米波焦面阵成像的关键技术.其中包括采用基模高斯波束法结合几何光学法分析系统准光路;设计多波束宽角扫描透镜天线;提出一种新型结构的介质棒天线,该天线易于排成紧密阵列且能够为透镜提供良好的照射;研制工作于Ka频段的高灵敏度、小型化直接检波式辐射计等.给出了20通道被动毫米波焦面阵成像系统的实验结果,表明该系统可用于室内近距离探测人体隐匿物品.

**关键词:**被动毫米波成像;焦平面阵列;基模高斯波束法;介质棒天线;毫米波辐射计

**中图分类号:**TP79 **文献标识码:**A

## Passive millimeter wave focal plane array imaging technology

WANG Nan-Nan, QIU Jing-Hui\*, ZHANG Peng-Yu, DENG Wei-Bo

(School of Electronics Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Under the background of safety inspection, the key technologies of near-range passive millimeter wave focal plane array imaging are studied. The analysis of the system quasi-optics were carried out using fundamental Gaussian beam method combined with geometrical optics method. A multi-beam wide-angle scanning lens antenna was designed. A new dielectric rod antenna was devised, which is prone to be aligned in close arrays and provide good radiation to the lens. Miniaturized direct-detection radiometers were fabricated with high-sensitive in Ka-band. Experimental results of the 20-channel passive millimeter wave focal plane array imaging system are presented, which can be used to detect hidden objects on human bodies in near range indoors.

**Key words:** passive millimeter wave imaging; focal plane array; fundamental Gaussian beam method; dielectric rod antenna; millimeter wave radiometer

**PACS:** 42.30.-d

### 引言

被动毫米波(PMMW, Passive Millimeter Wave)成像技术是利用毫米波辐射计探测、接收被测目标、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辐射能力的差异,从而识别不同的物体.

近年来,随着GaAs、SiGe等半导体材料的发展,以及低噪声放大器(LNA, Low Noise Amplifier) MMIC(Monolithic Microwave Integrated circuit)价格的下降及其稳定性的提高,PMMW成像技术在安全检查、遥感等方面的应用已达到较高的水平.国外Ka和W波段的PMMW成像系统开始步入商用阶段,正向快速、实时、高分辨率成像方向发展,这要求

成像系统由单通道机械扫描向多通道快速扫描转变,PMMW焦平面阵列(FPA, Focal Plane Array)成像技术就是其中一个重要的发展方向.

美国Millivision, Brojot, TRW, Trex, 英国Qinetiq等公司在PMMW FPA成像系统方面已经取得一定的研究成果;南京理工大学、东南大学毫米波重点实验室、中国科学院空间科学与应用研究中心以及华中科技大学等在毫米波成像技术方面也有较为深入的研究<sup>[1-3]</sup>. 本文在研究PMMW FPA成像的关键技术同时,将给出Ka频段20通道PMMW成像系统室内探测人体隐匿物品实验结果.

### 1 PMMW FPA 成像关键技术研究

从近距离成像的准光路设计入手,研究探测人

收稿日期:2010-12-21,修回日期:2011-06-18

基金项目:黑龙江省专项基金(FW05W109)

作者简介:王楠楠(1982-),女,吉林四平人,博士生,主要研究领域为毫米波成像技术、微波天线和近场聚焦天线阵. E-mail:wnn610@163.com.

\* 通讯作者:E-mail:qjyh@hit.edu.cn.

Received date: 2010-12-21, revised date: 2011-06-18

体隐匿物品 PMMW FPA 成像系统的关键技术。

### 1.1 近距离 PMMW 成像准光路及聚焦天线研究

毫米波准光路的典型设计方法包括几何光学法、高斯波束法、ABCD 矩阵法以及混合设计法等<sup>[4-7]</sup>。其中高斯波束法是对电磁波传播特性的拟合,在毫米波段准确性较高,设计过程较为简单,故采用基模高斯波束法设计 PMMW 成像准光学系统参数。

各种多波束聚焦元件中,在毫米波段,透镜天线的体积及重量都较小,结合其宽角扫描特性可以获得良好的工作性能。因此,采用介质透镜天线作为系统的聚焦元件。

#### 1.1.1 PMMW 成像准光学系统设计原理

如图 1 所示,从目标平面辐射的电磁波按高斯波束传播并被透镜截断,透镜通过改变电磁波的相位使电磁波汇聚并被接收天线接收。若  $r$  表示场点到轴的距离,  $w$  表示垂直于光轴位置为  $z$  的平面上场强衰减到轴上  $1/e$  时对应的波束半径,  $R$  表示球面波前半径,  $\lambda$  表示工作波长,则在  $z$  为确定值的平面上,归一化场强随半径按高斯分布:

$$\frac{E(r)}{E(0)} = \exp\left[-\frac{r^2}{w(z)^2}\right], \quad (1)$$

令波束半径最小的位置为束腰平面  $z=0$ , 此时波束半径为束腰半径  $w_0$ 。束腰半径  $w_0$  与  $w$  满足如下关系:

$$w = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^{1/2}, \quad (2)$$

球面波前半径  $R$  则满足下式:

$$R = z \left[1 + \left(\pi w_0^2 / \lambda z\right)^2\right]. \quad (3)$$

若在天线排布方向视域宽度为  $a$ , 系统要求焦

斑大小为  $2\delta$ , 透镜的最大扫描角为  $\pm\theta$ , 接收天线阵列只考虑简单的线阵排布, 则物距  $z_2$  为

$$z_2 = a / (2 \tan \theta), \quad (4)$$

焦斑大小  $2\delta$  对应半功率波束分布, 由式(1)可得:

$$\delta = w_{02} \sqrt{0.5 \ln 2} = 0.59 w_{02}, \quad (5)$$

考虑偏轴时焦斑变大, 将  $w_{02} = \delta$  代入式(2), 求得距离  $w_{02}$  所在平面  $z_2$  处的波束半径  $w_d$ :

$$w_d = \delta \left[1 + \left(\lambda z_2 / \pi \delta^2\right)^2\right]^{1/2}. \quad (6)$$

根据高斯波束正态分布特性, 有限口径的透镜对高斯波束存在截断效应。采用 Goldsmith 给出的  $T_E(\text{dB}) = 20 \text{ dB}$  截断<sup>[8]</sup>, 透镜直径  $D$  可表示为:

$$D = [T_E(\text{dB})]^{1/2} w_d / 1.474 = 3.034 w_d. \quad (7)$$

如式(8)所示, 像距的选择关系到天线排布的最大范围, 即偏轴角最大的天线到光轴上的距离  $x$ 。根据文献[9]提出的准则, 选取  $F$  数为 1.2 (即), 即  $z_1 = 1.2D$ 。

$$x = \tan \theta \times z_1. \quad (8)$$

同样, 根据光路可逆原理, 可以计算出天线束腰半径  $w_{01}$ :

$$w_{01} = w_d \cdot \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{2\lambda z_1}{\pi w_d^2}\right)^2\right]^{1/2}\right\}^{1/2} / \sqrt{2}. \quad (9)$$

确定天线束腰半径  $w_{01}$  后应验证是否满足  $w_0 \geq 0.9\lambda$  的条件, 否则应考虑高阶高斯波束法以修正波束。由此, 根据式(3)可以计算出球面波前半径  $R_1$  和  $R_2$ 。

最后根据馈源天线的位置  $z_1$  及馈源对透镜的边缘照射电平来估算其增益。

#### 1.1.2 透镜天线设计

PMMW 成像系统需要获得尽可能高的空间分辨率, 即较小的焦斑。由式(10)可见, 为获得较小的焦斑  $r_A$  通常需要增大多波束聚焦天线口径  $D$  或减小系统工作波长  $\lambda$ 。

$$r_A = \theta_{HPBW} \cdot R_1 = 1.22 \lambda R_1 / D. \quad (10)$$

采用光轴上馈源光程差为零的方法来设计透镜, 选择透镜的最大偏轴角为  $\pm 6^\circ$ 。如图 2 所示, 透镜将发自初级天线的球面波经照明面变换为平面波。根据光路可逆, 平面波在经过阴暗面后变为球面波并汇聚于像点。点  $O$  发出的光线 1 和光线 2 等光程条件为:

$$R/\lambda_0 = L/\lambda_0 + (R \cos \theta - L)/\lambda_d. \quad (11)$$

其中  $L$  为天线到透镜距离,  $\lambda_d$  为透镜中电磁波

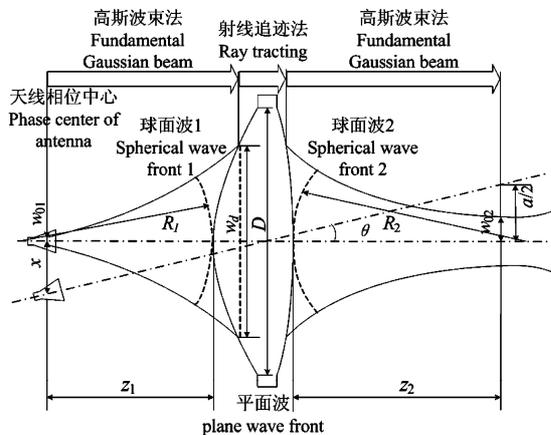


图 1 高斯波束法准光路示意图

Fig. 1 Design of quasi-optics with fundamental Gaussian beam

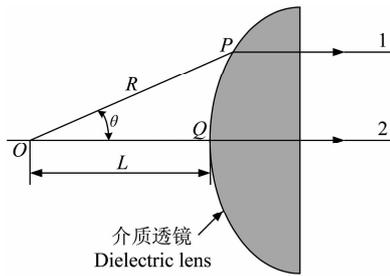


图 2 介质透镜中的射径长度示意图  
Fig. 2 Schematic of length in dielectric lens

波长. 整理为以  $O$  为原点, 光轴为  $x$  轴的直角坐标系下的形式:

$$\left(x - \frac{nf}{n+1}\right)^2 \left(\frac{f}{n+1}\right)^2 - y^2 / ((n-1)f^2 / (n+1)) = 1 \quad (12)$$

其中  $n$  为介质的折射率, 根据光路可逆设计另一面透镜.

### 1.1.3 透镜天线仿真和实验分析

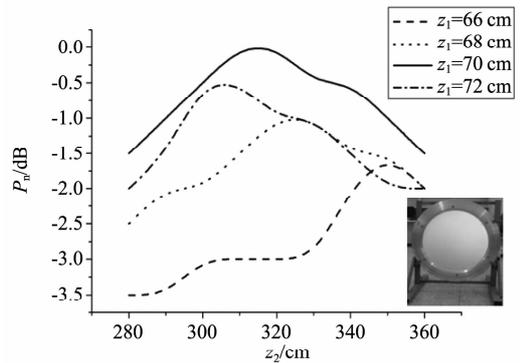
设计要求中心频率为 35 GHz, 焦斑尺寸  $2\delta = 85$  mm, 水平方向扫描角为  $\pm 6^\circ$ , 馈源天线排布视域宽度  $a = 600$  mm. 在观测平面上视场约为  $H0.6 \text{ m} \times V1.0 \text{ m}$ , 对人体躯干部分成像. 采用折射率  $n = 1.45$  的聚四氟乙烯作为透镜材料, 根据上述分析可得  $z_2 = 2854.3$  mm,  $w_d = 188.2$  mm,  $D = 571$  mm,  $z_1 = 685.2$  mm,  $x = 72$  mm,  $w_{01} = 9.95$  mm,  $R_1 = 687.1$  mm,  $R_2 = 3007.7$  mm, 透镜厚度约 100 mm. 根据式 (13) 计算出透镜轮廓线.

根据上述参数制作透镜天线, 并使用介质棒天线作为透镜的馈源天线, 采用 Agilent E8363B 矢量网络分析仪和 Agilent E4447A 频谱分析仪测量透镜天线的聚焦特性, 天线实物图及测量结果见图 3.

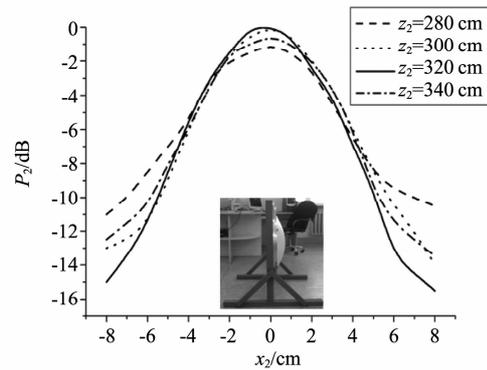
由图 3(a) 可见, 透镜聚焦位置随  $z_1$  增大而减小, 且归一化接收功率最大值在  $z_1 = 70$  cm 处, 此时  $z_2 \approx 320$  cm. 由图 3(b) 可见, 当  $z_1 = 70$  cm 时垂直光轴的平面上接收功率分布具有高斯分布特性, 当  $z_2 = 320$  cm 时准光路系统的半功率焦斑尺寸约为 6 cm. 图 3(c) 为发射天线偏轴  $6^\circ$  时透镜的聚焦特性, 可见, 透镜最小焦斑尺寸与最大归一化接收功率均产生于  $z_2 = 320$  cm 处, 此时准光路系统的半功率焦斑尺寸约为 6.5 cm, 视域范围约为 63 cm. 上述测量结果与设计要求的焦斑小于 8.5 cm 相比还有很大空间, 不仅满足该系统的设计要求, 而且可使用的视场范围还可以扩大.

## 1.2 馈源天线研究

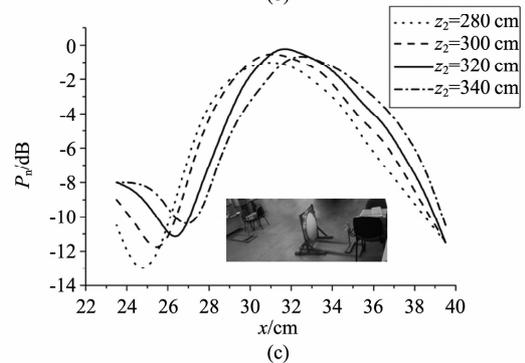
根据空间奈奎斯特采样定律, 要求 FPA 成像系



(a)



(b)



(c)

图 3 透镜聚焦特性测试结果 (a) 光轴上接收功率分布 (b)  $z_1 = 70$  cm 时接收功率分布 (c) 馈源偏轴  $6^\circ$  时的透镜聚焦特性

Fig. 3 Measured lens focusing characters (a) Received power distribution in axis (b) Received power distribution when  $z_1 = 70$  cm (c) Received power distribution  $6^\circ$  off axis

统透镜焦平面上的馈源分布较为紧密, 故必须使用较小截面的馈源. 另一方面, 馈源天线必须以尽可能低的溢出损耗为透镜提供有效的照射, 这需要天线具有较高的增益, 通常会使得天线具有很大的横截面. 为解决这个问题, 我们提出一种新型结构的介质棒天线.

### 1.2.1 天线结构与辐射原理

如图 4 所示, 新型结构介质棒天线分为 3 个部分, 即馈电渐变、棒体渐变和终端渐变. 该天线的馈电渐变分为两段,  $L_1$  段采用燕尾渐变, 使天线在较宽

频带内获得较低的回波损耗,  $l_2$  段采用圆台结构实现由方形截面至圆形截面的过渡, 可增大天线根部面积, 以增大带宽并减小副瓣电平; 棒体渐变段采用锥削的圆形介质棒, 且  $s_1$  和  $s_2$  两端的锥削角度不同, 适当调整两段的的比例和锥削角度, 可以减小天线的副瓣电平, 并获得对称的 E 面和 H 面辐射方向图.

天线选用聚四氟乙烯作为材料, 并采用金属波导馈电, 波导内壁与介质棒的馈电渐变段紧密贴合, 形成一个小圆锥喇叭, 不仅起到降低副瓣电平、提高天线增益的作用, 还可减小来自波导天线过渡区的不希望有的辐射.

### 1.2.2 介质棒天线仿真和实验结果分析

经过仿真优化, 确定最佳的介质棒天线参数, 制作辐射段长度为 50 mm 介质棒天线实物. 采用 Agilent E8363B 矢量网络分析仪和 Agilent E4447A 频谱分析仪测试天线的辐射特性.

图 5 为天线实物图及驻波比的仿真和实验结果, 仿真和实验结果较为吻合, 在 26.5 ~ 40 GHz 的宽频带范围内, 天线的驻波比小于 1.3, 在中心频率 35 GHz 处驻波比小于 1.2.

图 6 为 7 单元介质棒阵列单元间的互耦测量结果, 阵元间距为 19 mm 时, 天线之间的互耦均小于 -30 dB.

图 7 为天线辐射方向图和交叉极化测量结果,

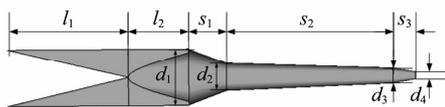


图 4 新型结构介质棒天线结构图  
Fig. 4 Schematic of the new dielectric rod antenna

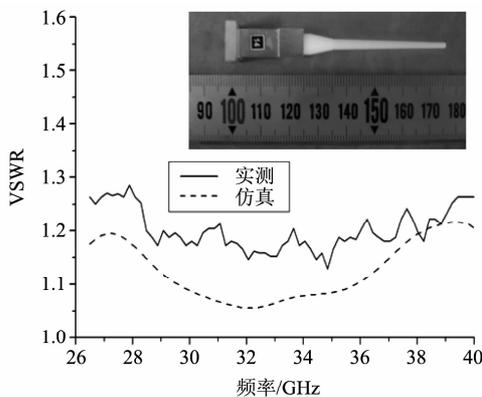


图 5 天线实物图及驻波比仿真与测试结果  
Fig. 5 Photograph of the antenna, simulated and measured results of VSWR

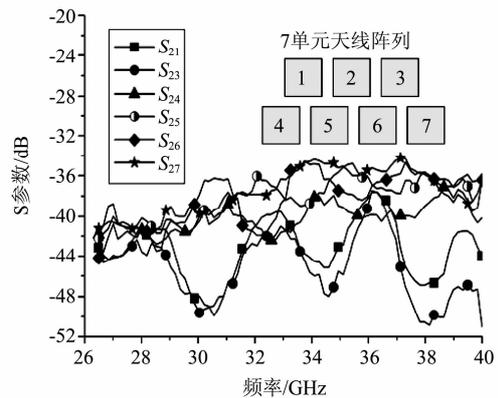


图 6 阵元间距为 19 mm 时互耦测试结果  
Fig. 6 Measured cross-coupling results when the distance between elements is 19 mm

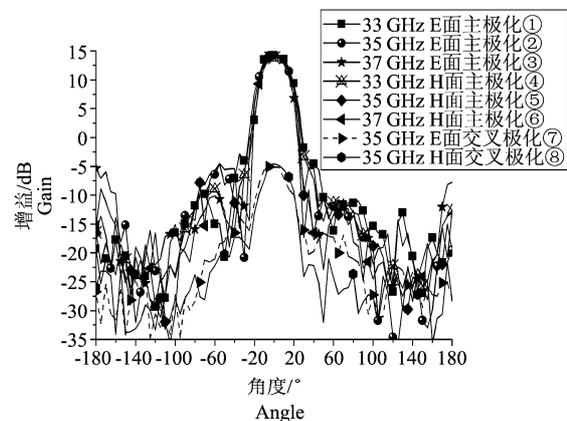


图 7 天线辐射方向图和极化测量结果  
Fig. 7 Radiation patterns of the antenna and measured results of polarization  
①33 GHz E-plane co-pol ②35 GHz E-plane co-pol ③37 GHz E-plane co-pol ④33 GHz H-plane co-pol ⑤35 GHz H-plane co-pol ⑥37 GHz H-plane co-pol ⑦35 GHz E-plane cross-pol ⑧35 GHz H-plane cross-pol

可见, 在 33 GHz、35 GHz 和 37 GHz, 天线对透镜的边缘照射电平约为 -10 dB, 增益较为平稳, 约为 15 dB, E 面和 H 面方向图具有很好的对称性, 第一副瓣电平约为 -20 dB. 同时, 在主辐射方向上天线交叉极化电平小于 -20 dB, 但由于链路损耗很大, 在副瓣方向上的交叉极化电平很小, 已经被噪声淹没, 故无法测出.

### 1.3 毫米波直接检波式辐射计研究

温度灵敏度是毫米波成像系统的关键指标之一, 它体现了系统检测物体最小温差的能力. 系统的温度灵敏度主要取决于辐射计, 但大于辐射计温度灵敏度. 温度灵敏度定义为

$$\Delta T_{\min} = \sqrt{\Delta T_n^2 + \Delta T_g^2} \quad (13)$$

其中,  $\Delta T_N$  为系统噪声温度引起的不确定性;  $\Delta T_C$  为系统增益波动引起的不确定性. 通过对辐射计的实时校准可将系统增益引起的波动视为零, 则:

$$\Delta T_{\min} \approx \Delta T_N = \alpha(T_A + T_{REC}) / \sqrt{B\tau} \quad (14)$$

$$T_{REC} = (N_f - 1) \cdot T_{st} \quad (15)$$

其中,  $T_A$  为天线视在温度,  $T_{REC}$  为接收机噪声温度,  $\tau$  为接收机积分时间,  $B$  为接收机检波带宽.  $N_f$  为接收机噪声系数(取线性值),  $T_{st}$  为环境温度, 系数  $\alpha$  可取 1.

可见, 提高系统温度灵敏度的主要方法可增大辐射计接收机带宽, 增大积分时间或者减小接收机噪声系数.

### 1.3.1 辐射计接收机设计

如图 8 所示, 为获得较大的系统工作带宽及减小辐射计体积, 该辐射计采用直接检波式结构, 使用三级 MMIC LNA 对输入噪声进行射频放大, 然后经过平方律检波、滤波, 再利用两级低频放大和积分电路, 最终输出与目标点亮温对应的电压值.

选择 TGA4508 单片 LNA 作为毫米波辐射计的射频放大器. 在工作带宽内, 该 LNA 的增益约为 20 dB, 单片噪声因数  $F = 2.8 \text{ dB} = 1.91$ . 若  $F_1, F_2, F_3$  为各级毫米波低噪声放大器的噪声系数;  $G_1, G_2$  为前两级的功率增益, 级联系统噪声系数计算如式 (16) 所示(假设各级之间的带宽相同).

$$F_m = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (16)$$

采用 ADS 对 TGA4508 LNA 进行三级级联仿真, 结果表明, 在 33 ~ 37 GHz 的工作频带内, 级联系统噪声系数小于 3.2 dB.

检波器的功率线性度对测量的准确性有着非常重要的影响. 综合分析后, 采用 Agilent 公司的零偏置梁式引线检波二极管 HSCH-9161 作为辐射计平方率检波器, 检波带宽约为 3.7 GHz. 对检波后的输出滤波后, 采用 OP37 进行低频放大, 硬件积分时间约为 500  $\mu\text{s}$ .

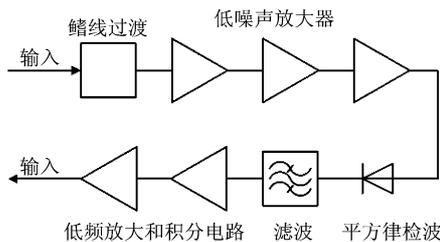


图 8 辐射计接收机原理框图

Fig. 8 Block diagram of the radiometer receiver

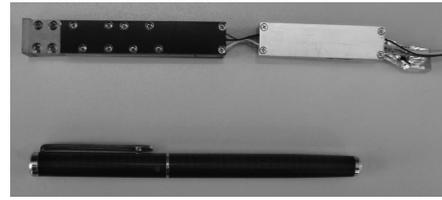


图 9 8 mm 波段直接检波式辐射计

Fig. 9 8 mm direct-detection radiometer

### 1.3.2 辐射计实验结果分析

8 mm 波段直接检波式辐射计外观如图 9 所示. 辐射计中心工作频率为 35 GHz, 工作带宽约为 3.7 GHz, 可探测亮温范围为 263 ~ 333 K. 辐射计的检波灵敏度测试结果为 -86 dBm, 根据温度与功率的关系:

$$P = kT_B(\theta, \varphi)\Delta f \quad (17)$$

得到积分时间为 0.5 ms 时辐射计的温度灵敏度约为 0.18 K. 在工作温度范围内, 辐射计线性度约为 0.999.

PMMW FPA 成像中对辐射计阵列输出电压一致性有很高的要求, 为使辐射计输出具有较好的一致性, 对辐射计阵列采用高低温实时校准方法. 低温模块控制为室温, 高温模块控制为 40°C.

## 2 PMMW FPA 成像系统实验分析

考虑到系统成本与成像帧频, PMMW FPA 成像系统采用水平方向使用 20 通道辐射计组成线阵, 垂直方向使用反射板扫描的方式, 系统示意图和实物见图 10. 系统工作中心频率为 35 GHz, 带宽 3.7 GHz; 设计视场为  $0.6 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ , 人体距离系统约为 3 m, 辐射计线阵方向采样率约为 0.7; 系统温度分辨率小于 1K, 空间分辨率小于 4 cm.

图 11 为系统实验结果图. 图 11(a) 为一恒温水箱上悬挂宽度为 4 cm 的钢尺, 从毫米波图像可见, 该系统可以分辨钢尺的形状, 验证了空间分辨率小

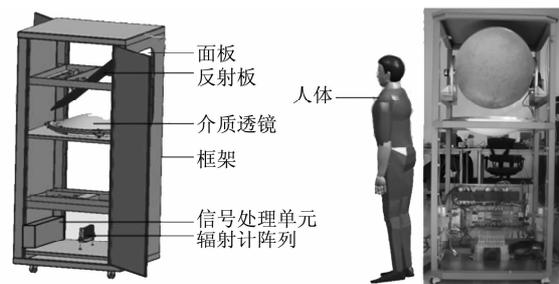


图 10 PMMW FPA 成像系统示意图和实物图

Fig. 10 Schematic and photograph of PMMW FPA imaging system

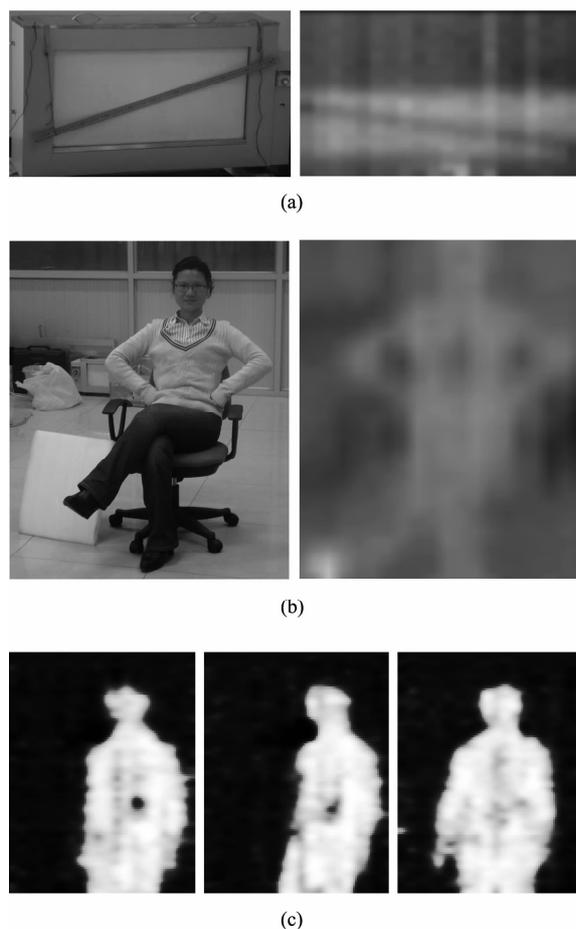


图 11 PMMW FPA 成像系统成像结果图 a) 恒温水箱悬挂 4 cm 宽的钢尺光学及毫米波成像图 b) 人体隐匿物品探测毫米波成像图 c) 人体正面藏有手机并旋转的毫米波动态捕捉图

Fig. 11 Images given by PMMW FPA imaging system a) Optical and MMW images of a 4cm-wide ruler hanging in a homothermal water tank b) MMW image of hidden objects on human bodies c) Dynamic MMW image of hidden mobile phone on human bodies

于 4 cm 的要求. 图 11(b) 为人体隐匿物品探测实验, 人体毛衫后放置小块铝箔, 人体脚下泡沫板后放置一杯热水, 从毫米波图像可见, 铝箔颜色暗于人体, 热水颜色亮于人体, 该系统可以探测隐藏在人体衣物下的金属及其他物品, 成像速率可实现 2 帧/s. 如图 11(c), 为人体正面藏有手机并旋转的动态捕捉图, 成像帧频 2 Hz.

### 3 结论

综上所述, 有如下结论: 1) 采用基模高斯波束法结合几何光学法设计 PMMW FPA 的准光路和聚焦透镜, 该设计方法采用解析式, 无需复杂的数值运算; 透镜具有宽角扫描特性,  $\pm 6^\circ$  内焦斑小于 6.5

cm. 2) 采用新型结构介质棒天线作为聚焦天线的馈源, 该馈源天线在 26.5 ~ 40 GHz 的宽频带范围内驻波比小于 1.3, 具有对称的 E 面和 H 面方向图, 天线增益在 33 GHz, 35 GHz 和 37 GHz 均约为 15 dB. 天线交叉极化电平低于 -20 dB, 阵列单元间距为 19 mm 时, 互耦小于 -30 dB, 与其他类型天线相比, 更适于作为 PMMW FPA 成像系统的馈源天线. 3) 研制了体积小、灵敏度高的直接检波式辐射计, 该辐射计的中心工作频率为 35 GHz, 带宽约大于 3.7 GHz, 正切灵敏度约为 -86 dBm, 工作温度范围内线性度大于 0.999. 4) 研制了 20 通道 PMMW FPA 成像系统, 给出了实验结果, 验证该系统空间分辨率小于 4 cm, 满足设计要求; 系统温度分辨率小于 1 K, 可以实现室内近距离探测人体隐匿物品, 可用于安全检查等场合.

### REFERENCES

- [1] Williams T D, Vaidya N M. A Compact, Low-Cost, Passive MMW Security Scanner [C]. Proc. of SPIE Vol. 5789, Bellingham, WA: SPIE, 2005, 109 - 116.
- [2] Zhang Guang-Feng, Li Xing-Guo, Lou Guo-Wei. Research on Passive MMW Imaging Based on an Alternating Current Radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张光锋, 李兴国, 娄国伟. 基于交流辐射计的被动毫米波成像研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(6): 461 - 464.
- [3] Dou W B, Sun Z L. Analysis of Vectorial Diffraction Field in the Focal Space of a Small F-Number Lens for Millimeter Wave FPA Imaging System [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (窦文斌, 孙忠良. 用于毫米波焦面阵成像的小 F 数透镜焦区矢量衍射场分析. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(2): 109 - 113.
- [4] Appleby R, Anderton R N, Price S, et al. Whole Body 35 GHz Security Scanner [J]. Proc. of SPIE, 2004, 5410: 244 - 251.
- [5] Tuovinen J, Hirvonen T M, Raisanen A V. Near-Field Analysis of a Thick Lens and Horn Combination: Theory and Measurements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, 40(6): 613 - 618.
- [6] Haddad D, Juncar P, Genevès G, et al. Gaussian Beams and Spatial Modulation in Nanopositioning [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(4): 1003 - 1009.
- [7] Goldsmith P F. Perforated Plate Lens for Millimeter Quasi-Optical Systems [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1991, 39(6): 834 - 838.
- [8] Deng Xiao-Dan, Pan Jun-Hua, Dou Wen-Bin. Analysis of Extending the Field-of-View of Focal-Plane Imaging System at Millimeter-Wavelengths [J]. *Acta Electronica Sinica* (邓小丹, 潘君骅, 窦文斌. 毫米波焦面阵成像视场扩大分析. *电子学报*), 2003, 31(12): 2012 - 2014.
- [9] Tuovinen J, Hirvonen T, Raisanen A. Near-Field Analysis of a Thick Lens and Horn Combination: Theory and Measurements [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 1992, 40(6): 613 - 619.