

文章编号: 1672-8785(2015)12-0013-05

被动毫米波成像系统设计

李志豪 李维姣 刘伟豪 丁志平 袁 曦 沈 俊 温亚珍

(公安部第三研究所, 上海 200031)

摘 要: 被动毫米波成像是公共安全检查工作的一个重要发展方向。目前, 国内外主要集中在对纯反射系统的面阵探测领域进行研究, 其研发成本较高, 而大口径离轴抛物面镜的加工更是颇具难度。将几何光学和高斯波束相结合, 基于毫米波透镜设计和研制了一种适用于近场被动毫米波成像的准光学系统, 其探测距离为 1.5 m, 成像面积为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 空间分辨率优于 3 cm。该系统可实现非接触式安全检查, 因此在各种公共检查场所具有广泛的应用前景。

关键词: 几何光学; 高斯波束; 准光路系统; 毫米波成像

中图分类号: TN015; TB811+.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.12.003

Design of Passive Millimeter Wave Imaging System

LI Zhi-hao, LI Wei-jiao, LIU Wei-hao, DING Zhi-ping, YUAN Xi, SHEN Jun, WEN Ya-zhen

(The Third Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai 200031, China)

Abstract: Passive millimeter wave imaging is an important development direction in the field of public security. Nowadays, the researchers at home and abroad mainly concentrate their efforts in the reflex systems with focal plane arrays. This will result in a high development cost. Moreover, the fabrication of large diameter off-axis paraboloidal mirrors is more difficult. By combining geometrical optics with Gaussian beams, a quasi-optical system suitable for near field passive millimeter wave imaging is designed and developed on the basis of a millimeter wave lens. The system has a detection range of 1.5 m, an imaging area of $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ and a spatial resolution better than 3 cm. Because the system can implement non-contact security inspection, it has a wide application prospect in various public inspection places.

Key words: geometrical optics; Gaussian beam; quasi-optical system; millimeter imaging

0 引言

与可见光和红外光相比, 毫米波拥有更强的穿透能力。因此, 毫米波成像系统不仅能够用于户外远场侦测, 而且由于没有辐射且不会对生物组织造成破坏, 更适用于针对室内公共安全的人体检查, 即查看人体表面是否藏匿物品, 如金属、塑料和爆炸物等。目前, 毫米波成像系

统采用的频段主要包括 Q 波段 (35 GHz) 和 W 波段 (94 GHz) 两个大气窗口。与 Q 波段相比, W 波段能够提供更高的空间分辨率。实际上, 目前大多数针对毫米波成像系统的研究主要集中在探测距离为数百米甚至数公里的远场检测上。对于几米范围内的近场检测, 则是采用价格较高的阵列探测器并配合离轴抛物面反射系统进

收稿日期: 2015-11-02

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (13231203100)

作者简介: 李志豪 (1985-), 男, 上海人, 助理研究员, 硕士, 主要从事光电技术研究。E-mail: lizhihao559@hotmail.com

行成像的。本文采用口径为 350 mm 的毫米波透镜、平面反射镜扫描系统以及单点探测器, 初步实现了 1.5 m 范围内的辐射成像, 其成像面积为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 空间分辨率优于 3 cm。该设计在保证透视效率的前提下还降低了成本, 因此更加贴合实际应用。

1 准光学系统和探测器设计

1.1 准光学系统设计

表 1 列出了用于近场检测的被动毫米波成像系统的整体设计参数。

表 1 被动毫米波成像系统的设计参数

内容	目标值
整体尺寸 ($L \times W \times H$)	$<1.5\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$
成像范围 ($W \times H$)	$1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$
分辨率 δ	$<3\text{ cm}$
物体距离 D	$1 \sim 1.5\text{ m}$
入射角度 θ	$<16^\circ$
探测器尺寸 ($D \times H$)	$10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$

在我们设计的几何光路中, 通过正透镜将 1.5 m 远处的物体聚焦在焦平面上, 然后利用反射镜 1 的纵向扫描和反射镜 2 的横向扫描实现对整个物体的扫描。这个成像系统的光学核心主要在于透镜设计, 其空间分辨率主要受限于毫米波透镜的像差分辨率以及衍射极限分辨率中的较大者。对于像差分辨率 d_{ab} , 我们采用基于 HDPE 高密度聚乙烯材料 (折射率为 $1.54@94\text{GHz}$) 制成的透镜。像差分辨率 d_{ab} 的表达式如下:

$$d_{ab} = \frac{0.068}{(M+1)^2} \cdot \frac{f}{(F/\#)^3} \quad (1)$$

式中, M 为放大率; f 为焦距; $F/\#$ 为 F 数^[1-2]。

通常一块光学系统透镜主要受制于衍射极限^[3], 即像面光斑上 86% 能量的集中区域, 其表达式为

$$d_{di} = 1.64 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

式中, λ 为毫米波的波长; D 为透镜口径。

另外, 光学透镜还要考虑焦深 (Depth of Focus, DOF) 问题, 它会直接影响系统装配时的探测器调试, 其表达式为

$$DOF = 2.97\pi\lambda[(M+1)F/\#]^2 \quad (3)$$

由于几何光学只考虑直线传播, 而没有考虑毫米波的衍射特性, 因此在传播过程中高斯波束的半径值可由柱坐标系的近轴波动方程的基模解来计算:

$$w = w_0[1 + (\lambda z/\pi w_0^2)^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中, w 为光强降至光轴 $1/e^2$ 时所对应的波束半径; z 为波束的传播距离; w_0 为波束半径的初始值。考虑以上问题, 通过 CodeV 软件优化后得到的高斯波束图见图 1。最终到达探测器喇叭口的束腰半径控制在 5 mm, 入射角度控制在 -12 dB 波束角度以内 (见图 2)。

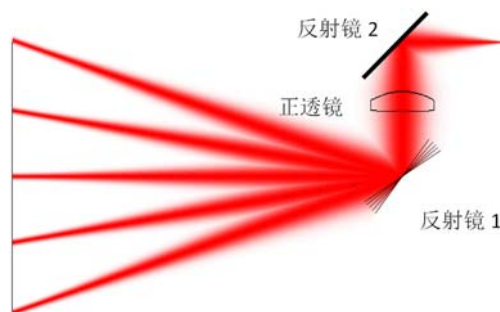


图 1 几何光学和高斯波束

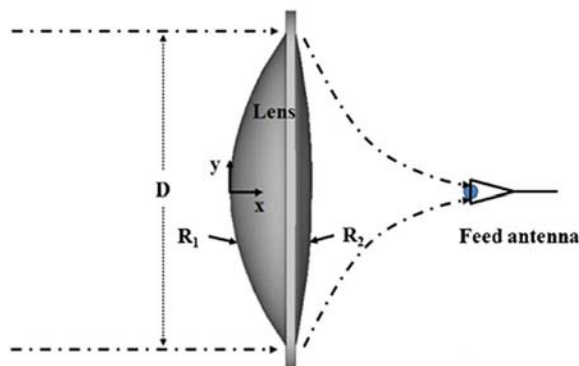


图 2 束腰入射至探测器的馈源喇叭处

1.2 探测器及馈源喇叭设计

辐射计主要分为超外差式和直接检波式两种, 超外差式辐射计又可分为单边带超外差式

和双边带超外差式两种。其中, 直接检波式辐射计没有本振, 频率关系简单, 通道间的相互影响小, 设备组成简单, 功耗低、体积小、重量轻, 但增益稳定性相对较差。根据目前的器件性能水平以及本文对辐射计的具体要求, W 波段辐射计采用直接检波的实现方案 (见图 3)。

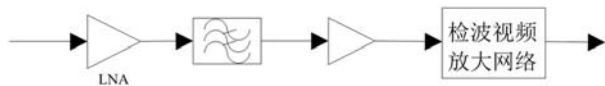


图 3 直接检波式辐射计的原理框图

馈源喇叭的主要功能是接收来自天线的信号, 并将其馈入辐射计子系统。根据无源成像系统的要求, 辐射计的馈源喇叭需要工作在 86 ~ 94 GHz 范围内, 其波束宽度应为 $\pm 16^\circ$ 。图 4 所示为 W 波段馈源喇叭的仿真结果。馈源喇叭在 75 ~ 110 GHz 全波导带宽内的回波损耗优于 -26

dB。从馈源喇叭的方向图中可以看出, 馈源喇叭的 -3 dB 波束宽度为 $\pm 8^\circ$, -12 dB 波束宽度为 $\pm 16^\circ$ 。

建立辐射计仿真模型进行仿真。根据系统指标要求和仿真结果, 对系统的各模块进行指标分配。通过系统仿真可以更准确地把握系统设计中的一些细节, 从而更准确地进行指标细化和分配。图 5 所示为 W 波段辐射计检波前的仿真结果。辐射计的噪声系数小于 4.5 dB, 检波前的输出功率在 -20 dBm 左右。图 6 所示为馈源喇叭的实际驻波比的测试结果。

2 实验与测试

首先对透镜及探测器部件进行测试 (见图 7)。根据本文设计的焦距以及探测器的温度灵

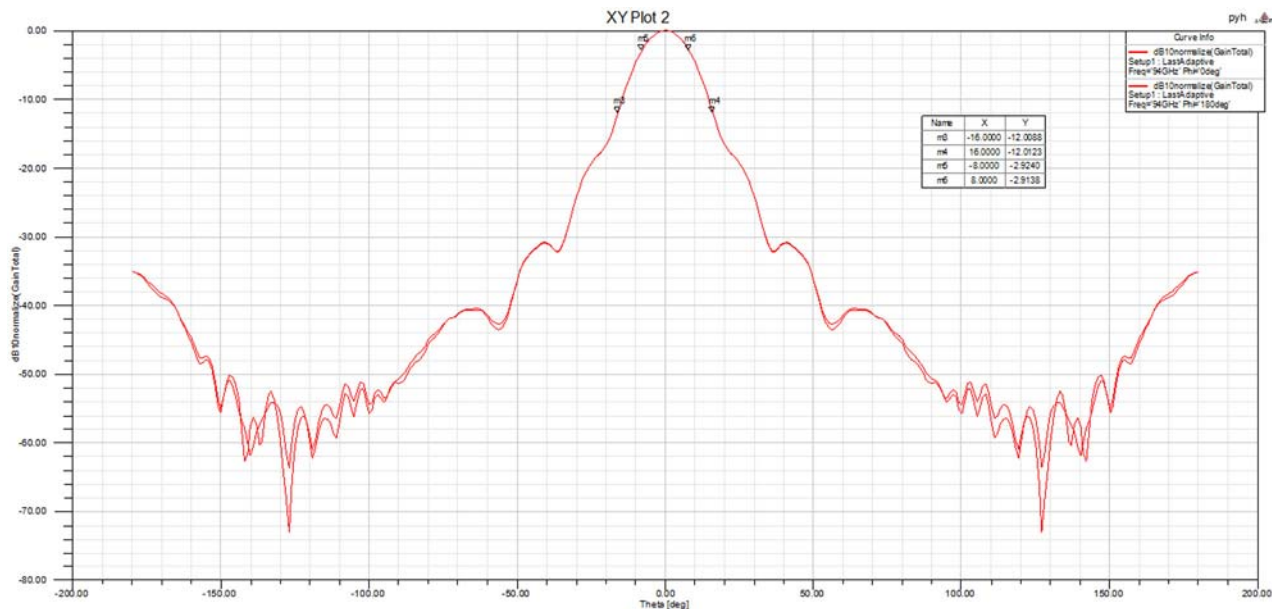


图 4 馈源喇叭的仿真结果

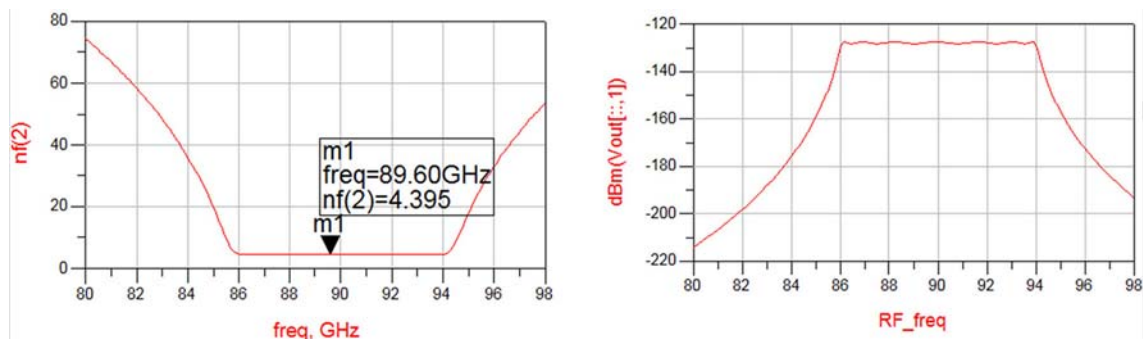


图 5 W 波段辐射计的仿真结果

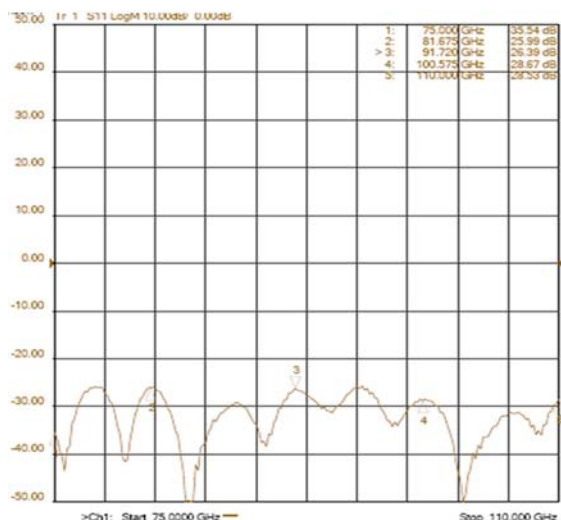


图 6 馈源喇叭的驻波比测试结果

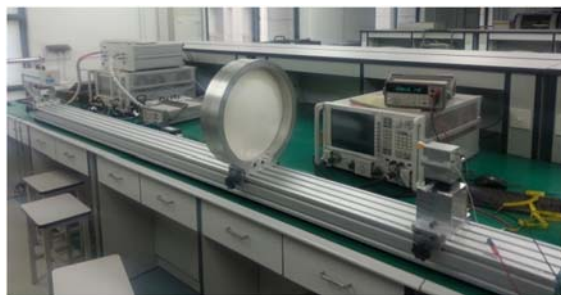


图 7 透镜及探测器部件测试

敏度，我们在长轨上直接进行验证。发射源通过矢量网络分析仪直接发射作为点源，探测器依

据设计尺寸被固定在另一端。然后透过透镜进行信号检查，并通过前后移动寻找能量最大点。实验结果表明，本文设计的透镜符合预期要求。

在确保部件设计满足预期要求之后，我们对各部件进行了调试，并将其正装到系统中进行成像探测测试（见图 8）。利用该系统对人体进行了透视成像。图 9 所示为操作界面及三角尺检测结果。我们从中可以看见衣物下的皮带扣以及口袋中的手机和三角尺。目前，我们正致力于



图 8 系统测试

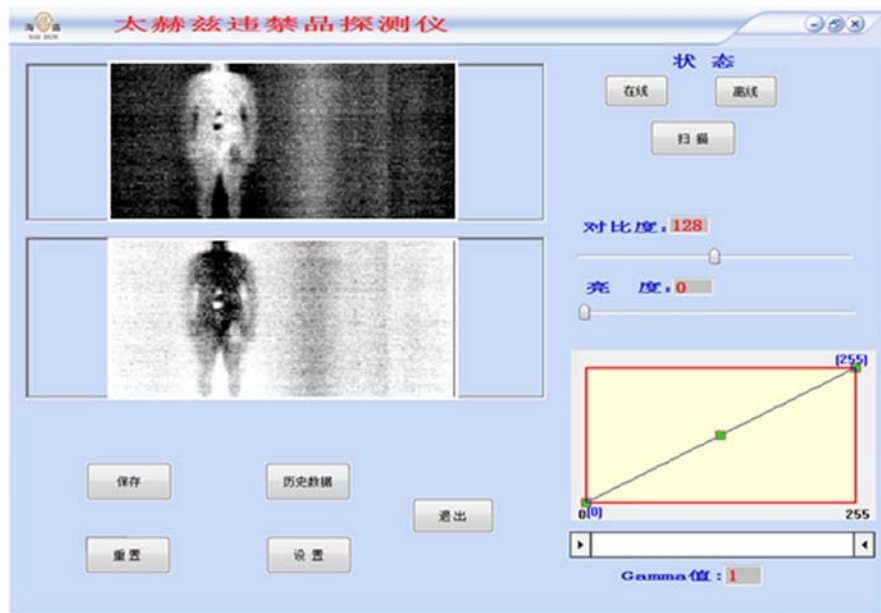
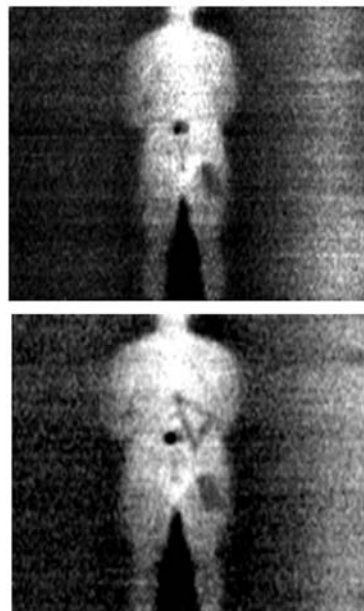


图 9 实际扫描成像



进一步提高该系统的温度灵敏度, 并对成像校正软件进行优化。

3 结束语

本文将几何光学和高斯波束相结合, 基于毫米波透镜设计和研制了一种适用于近场被动毫米波成像的准光学系统, 其探测距离为 1.5 m, 成像面积为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 空间分辨率优于 3 cm。该系统可实现非接触式安全检查, 因此在各种公共检查场所具有广泛的应用前景。

(上接第 12 页)

在安装透镜并制成浸没型探测器后, 其噪声 (约 $0.2\text{ }\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$) 和响应时间 ($3 \sim 4\text{ ms}$) 完全满足整机使用要求, 而且最大的器件响应率超过 120 V/W 。在此基础上, 我们对研制的两个批次的锰钴镍薄膜芯片进行了常规可靠性筛选。具体情况如下: 第一批锰钴镍薄膜芯片 (编号为 MCN13-17-1) 的成品元件共 75 个, 经过常规高低温老化后, 其筛选合格率为 72%; 再通电老化后, 其筛选合格率为 66.7%。第二批锰钴镍薄膜芯片 (编号为 MCN13-18-1) 的成品元件共 38 个, 经过常规高低温老化后, 其筛选合格率为 76.3%; 再通电老化后, 其筛选合格率为 79.3%。由此可见, 采用薄膜型锰钴镍材料研制的热敏探测器的筛选合格率和采用体材料制备的器件相差不大, 因此可以满足航天用地平仪的可靠性要求。

4 结束语

基于用传统的高温烧结方法制备的 Mn-Co-Ni-O 陶瓷体材料制作的器件在使用寿命和可靠性等方面都存在不足, 无法满足当代航空航天技术发展的要求。我们采用化学溶液法制备了 Mn-Co-Ni-O 薄膜材料, 然后利用光刻和离子束刻蚀与溅射等半导体工艺手段研制出了一种新型薄膜热敏电阻红外探测器。以最终应用为目

参考文献

- [1] Meinhart C D, Wereley S T. The Theory of Diffraction-limited Resolution in Microparticle Image Velocimetry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(7): 1047-1053.
- [2] Laser Components. Lens Theory [EB/OL]. www.lasercomponents.com/de/applikationsreport/lens-theory.pdf, 2007.
- [3] Boreman G D. Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.

标, 重点摸索出了 Mn-Co-Ni-O 薄膜材料的芯片工艺技术。该芯片在灵敏面尺寸的精准度和电极欧姆接触等方面均有较大提高。其器件性能虽与体材料器件相当, 但在微电子工艺的兼容性方面明显优于体材料器件, 因而有望进一步推动多元线列热敏探测器和地平仪的小型化发展。另外, 我们还实现了这种新型薄膜热敏电阻红外探测器的小批量生产, 并对其可靠性进行了初步的试验验证。结果表明, 该研究能够满足航天用地平仪的要求, 并且具有较大的科学意义和良好的航天应用前景。

参考文献

- [1] 夏海平, 梅春明. 溶胶-凝胶法制备高稳定性 $\text{Cr}_x\text{Ni}_{1.0}\text{Mn}_{2.0-x}\text{O}_4$ 系列热敏电阻 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(Z2): 513-517.
- [2] 韩劲松, 崔维鑫, 刘学明. 热敏电阻红外探测器视场自动测量系统的研制 [J]. *红外*, 2007, 28(5): 6-10.
- [3] Yun Hou, Zhiming Huang, Yanqing Gao, et al. Characterization of $\text{Mn}_{1.56}\text{Co}_{0.96}\text{Ni}_{0.48}\text{O}_4$ Films for Infrared Detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(20): 202115.
- [4] 上海技术物理所第三研究室热敏器件组. 热敏电阻红外探测器研制报告 [J]. *红外物理与技术*, 1975, 1(3): 1-33.
- [5] 黄心耕, 孟克里, 芦冬梅, 等. 热敏电阻红外探测器新介质层的设计及其研究 [J]. *控制工程*, 2003, 15(4): 16-21.
- [6] 周炜. Mn-Co-Ni-O 薄膜光电性质及器件物理研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.