



工业和信息化部“十二五”规划专著
“十三五”国家重点图书出版规划项目

被动毫米波近场成像技术与应用

Near-Field Passive Millimeter Wave Imaging:
Technology and Application

● 邱景辉 王楠楠 祁嘉然 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

化部“十二五”规划专著
国家重点图书出版规划项目

被动毫米波近场成像技术与应用

Near-Field Passive Millimeter Wave Imaging:
Technology and Application

● 邱景辉 王楠楠 祁嘉然 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以机场安全检查、海关缉私和反恐为应用背景,围绕被动毫米波近场成像的关键技术展开讨论,系统地介绍了毫米波成像系统的分类、被动毫米波成像技术的主要成像体制、被动毫米波近场成像的辐射探测机理、毫米波辐射计、毫米波成像系统馈源天线、毫米波近场成像准光理论,以及典型的 Ka 频段被动毫米波成像系统应用等。本书总结了作者及其领导的学术团队在被动毫米波近场成像领域近 15 年的基本研究成果,同时也介绍了近年来国内外在被动毫米波近场成像领域的发展概况。

本书对于从事毫米波辐射探测理论、天线、辐射计和系统研究的人员是一本极具实用价值的工具书,可作为高等学校电磁场与无线技术、遥感科学与技术等专业本科生和研究生的学习参考书,也可作为安全检查、防盗反恐、医疗器械等领域从事探测技术研究的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

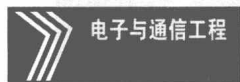
被动毫米波近场成像技术与应用/邱景辉,王楠楠,祁嘉然著.

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2018.8

ISBN 978-7-5603-5980-9

I. ①被… II. ①邱… ②王… ③祁… III. ①微波光学—
微波成像—研究 IV. ①TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 089017 号



策划编辑 许雅莹 杨 桦 张秀华

责任编辑 李长波

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江艺德印刷有限责任公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 340 千字

版 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5980-9

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

自然界中所有物体都能发射电磁波,电磁频谱中 30~300 GHz 的频段通常称为极高频频段,其对应波长为 1 cm~1 mm,称为毫米波。毫米波介于红外波段与微波波段之间,兼具两者特点。与微波波段相比,毫米波波长短,在相同的天线尺寸下可获得较高的角分辨率,且频带宽,频谱资源十分丰富;与红外及可见光成像相比,尽管毫米波成像系统的空间分辨率相对较低,但其在 35 GHz、94 GHz、140 GHz 和 220 GHz 几个大气窗口处,能穿透雾、云、烟尘等,具有在较恶劣气候条件下全天候工作的能力,这在遥感、导航、卫星通信和军事等应用中具有重要的意义。同时,毫米波具有穿透织物的特点,使其在机场安全检查、海关缉私和反恐领域展现了蓬勃的发展趋势。

近年来,恐怖主义猖獗,安全问题日益得到世界人民的关注,对安检系统的可靠性与智能化也提出了更高的要求。当前国内机场采用的金属门和金属探测器只能对近距离小范围目标进行检测,同时对金属以外的危险品不具备探测能力。尽管 X 光背散射人体扫描仪可以探测人体衣物下隐匿的危险品,但会对被测人体造成轻微的辐射,因此不适宜对普通的乘机人员进行这种类型的安检。红外线是靠物体表面温度成像,在有织物遮挡的情况下无法清晰成像。而毫米波成像系统可以探测到人体衣物下隐藏的危险品,不仅可以检测出金属物体,还可以检测出塑料手枪、炸药等危险品,获得的信息更加详尽、准确,可以大大降低误警率。被动毫米波成像技术由于其对人体完全无辐射、无电磁污染,因此具有很广阔的应用前景。

本书从国内外被动毫米波成像技术在安检领域的研究概况入手,首先介绍了毫米波的辐射探测理论,并围绕毫米波近场成像,详细分析了室内及室外人体与隐匿物的温度对比度。其次,详细介绍了毫米波成像系统的关键技术:毫米波辐射计、毫米波馈源天线和聚焦天线以及相关的准光学理论。最后,给出了 Ka 频段被动毫米波焦平面阵列成像仪的具体设计案例,以供读者参考。

本书的撰写是基于作者及其团队近 15 年来在毫米波近场成像领域的研究成果。邱景辉、王楠楠、祁嘉然共同撰写 1.2 节,王楠楠撰写 1.3.1 节、第 5 章和第 6 章,祁嘉然撰写 1.1 节、1.3.2 节及第 2~4 章。邱景辉负责全书统稿和校稿。本书参考了陆凯、于锋、庄重、张瑞东、付彦志、董佳鑫等人的硕士学位论文和相关文章,在此表示衷心感谢。同时,汪立青、杜天尧、肖姗姗、张梓福、刘畅、翟璇、林霁暖、赵鹏、邱爽、尹智颖等人在本书的撰写和校对过程中付出了辛勤

的劳动,在此一并表示感谢。

哈尔滨工业大学的姜义成教授、哈尔滨工程大学的杨莘元教授和清华大学的赵自然研究员对书稿的修改提出了中肯的建议,作者从他们提出的宝贵建议中获益良多,在此向他们表示衷心的感谢。

被动毫米波近场成像技术近年来发展迅速,涉及面广,作者水平有限且时间仓促,难免存在疏漏与不足之处,希望读者批评指正。

作 者

2018 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 毫米波成像技术简介	1
1.2 毫米波成像系统分类	2
1.3 隐匿物品探测被动毫米波成像技术研究现状	6
1.3.1 国外发展现状	6
1.3.2 国内研究现状	18
本章参考文献	23
第 2 章 被动毫米波近场成像原理	29
2.1 黑体辐射探测理论	29
2.1.1 普朗克黑体辐射定律	29
2.1.2 瑞利—琼斯定律	30
2.1.3 功率—温度对应关系	31
2.2 人体衣物下隐匿物探测被动毫米波近场成像原理	33
2.2.1 被动毫米波近场成像辐射温度传递模型	33
2.2.2 隐匿物品与人体温度对比度分析	37
2.2.3 典型物品毫米波辐射特性	43
2.2.4 典型衣物的透射特性	43
本章参考文献	44
第 3 章 毫米波辐射计	47
3.1 毫米波辐射计工作原理	47
3.2 毫米波辐射计关键技术参数	48
3.2.1 噪声系数	48
3.2.2 带宽	49
3.2.3 积分时间	50
3.2.4 温度灵敏度	50
3.2.5 准确度	51
3.2.6 稳定度	52
3.3 毫米波辐射计类型	52
3.3.1 直接检波式辐射计	54
3.3.2 超外差式辐射计	59
3.3.3 狄克式辐射计	60
3.3.4 其他类型辐射计	63

3.4	辐射计定标	70
3.4.1	辐射计定标原理	70
3.4.2	被动毫米波近场成像系统定标方法	73
3.5	辐射计指标测试方法	83
3.5.1	线性度和温度灵敏度测试	83
3.5.2	带宽测试	85
3.5.3	噪声系数测试	85
3.5.4	积分时间测试	86
3.5.5	稳定性测试	86
3.5.6	正切灵敏度与接收机动态范围	86
3.6	毫米波器件的发展现状与趋势	88
3.6.1	GaN 材料的兴起	88
3.6.2	AlGaN/GaN HEMT	88
3.6.3	单片微波集成电路	89
3.6.4	GaN HEMT 与 MMIC 的发展现状及趋势	89
	本章参考文献	91
第 4 章	被动毫米波近场成像馈源天线	95
4.1	被动毫米波近场成像馈源天线基本参数	95
4.1.1	反射系数	95
4.1.2	电压驻波比	96
4.1.3	辐射方向图	96
4.1.4	带宽	97
4.1.5	效率	98
4.1.6	方向性系数	98
4.1.7	增益	98
4.1.8	极化	99
4.1.9	天线阵列的互耦	99
4.2	被动毫米波近场成像馈源天线主要类型	100
4.2.1	喇叭天线	100
4.2.2	渐变缝隙天线	101
4.2.3	介质棒天线	115
4.2.4	波导缝隙天线	125
4.2.5	其他类型馈源天线	150
4.3	馈源天线参数对系统成像性能的影响	152
4.3.1	对温度灵敏度的影响	152
4.3.2	对空间分辨率的影响	152
	本章参考文献	152

第 5 章 被动毫米波近场成像准光理论与聚焦天线.....	156
5.1 聚焦天线种类及特点	156
5.2 透镜天线	157
5.2.1 准光路设计方法与过程	157
5.2.2 透镜天线工作原理与效率	169
5.2.3 介质透镜天线设计原理	171
5.2.4 介质透镜天线设计实例	175
5.3 椭球反射面天线	181
5.3.1 准光路与椭球天线设计	181
5.3.2 椭球面天线聚焦特性分析	185
5.3.3 椭球面天线测试	188
本章参考文献.....	191
第 6 章 典型被动毫米波成像系统.....	193
6.1 被动毫米波成像系统扫描方式	193
6.2 人体衣物下隐匿物探测 20 通道焦面阵成像系统.....	195
6.2.1 系统构成	195
6.2.2 系统指标与成像实验	197
6.3 高空间分辨率人体衣物下隐匿物探测 70 通道成像系统.....	199
6.3.1 系统组成	200
6.3.2 系统指标分析	202
6.2.3 分系统方案与性能指标	206
6.2.4 系统成像实验	213
名词索引.....	215

第 1 章 绪 论

1.1 毫米波成像技术简介

自然界中所有物体都能发射电磁波,电磁频谱中 30~300 GHz 的频段通常称为极高频 (Extremely High Frequency, EHF) 频段,其对应波长为 1 cm~1 mm,称为毫米波^[1,2]。毫米波介于红外(Infrared, IR)波段与微波(Microwave, MW)波段之间,兼具两者特点。与微波波段相比,毫米波波长短,在相同的天线尺寸下可获得较高的角分辨率,且频带宽,频谱资源十分丰富;与红外及可见光成像相比,尽管毫米波成像系统的空间分辨率相对较低,但其在 35 GHz、94 GHz、140 GHz 和 220 GHz 几个大气窗口处,能穿透雾、云、尘及织物等,具有在较恶劣气候条件下全天候工作的能力,这在遥感、导航、卫星通信和军事等应用中具有重要的意义^[3,4]。

被动毫米波(Passive Millimeter Wave, PMMW)成像是一种新型的无源探测技术,它利用毫米波辐射计(一种高灵敏度毫米波接收机)接收来自目标、背景的毫米波辐射,将其转变为电压信号,由信号处理单元进行分析,最终给出直观的毫米波成像图,以此来反映各景物之间以及景物各部分之间辐射能力的差异,以实现目标的识别和探测功能^[5]。

毫米波成像系统分为主动毫米波成像系统、半主动毫米波成像系统和被动毫米波成像系统。与主动毫米波成像系统相比,被动毫米波成像系统不向外发射电磁波,无电磁污染,同时,也不存在类似雷达在近距离时的“角闪烁效应”;并且理论和实验研究表明:隐身涂层材料对雷达系统的隐身性能越好,越容易被被动系统发现,这使 PMMW 成像在各种应用领域成为一种新的技术手段,日益受到各国的重视^[6,7]。

20 世纪 30 年代后期,基于各种真空管的相干微波源的发展成为该领域首次具有象征意义的事件^[8]。毫米波成像技术最早源于第二次世界大战后射电天文学的发展,其基本理论的成熟和技术上的初步探索是在 20 世纪 50 年代,研究的主要动力是军事上在雨雾、扬沙天气条件下对目标成像探测的需求^[9]。20 世纪 50 年代英国国防研究中心(Defense Research Agency, DRA, 原称为 Radar and Signals Research Establishment, RRE 或 RSRE)研制出第一台毫米波辐射计成像系统“Green Minnow”,该系统包含 16 个工作于 35 GHz 的迪克式辐射计和口径为 0.5 m 的透镜天线,不仅体积庞大,而且空间分辨率与温度分辨率都很差^[10,11]。

此后,英美等国科学家一直致力于 PMMW 成像技术的研究和开发。在随后近 30 年里毫米波成像技术进展相对缓慢。20 世纪八九十年代,随着人们对毫米波认识的增长,以及砷化镓(Gallium Arsenide, GaAs)、磷化铟(Indium Phosphide, InP)等半导体工艺的进步,毫米波有源、无源器件日臻成熟和完善,微波单片集成电路(Microwave Monolithic Inte-

grated Circuit, MMIC)的研究取得了突破性进展,得到了广泛应用,为毫米波成像技术的更新换代创造了良好的条件,对该技术的发展产生了巨大的推动作用^[12-14]。

MMIC 的迅速发展是毫米波成像技术的一个重要里程碑,当前,MMIC 正向高集成、低噪声、高频工作发展^[15]。例如:高增益、低噪声放大器是毫米波成像辐射计前端的关键部件,文献[16]利用 70 nm 变形异质结高迁移场效应晶体管(Metamorphic High Electron Mobility Transistor, MHEMT)技术研究了 W 频段两级和三级的低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)MMIC,芯片尺寸分别为 1 mm×2 mm 和 1 mm×3 mm,小信号增益分别为 13 dB 和 19 dB,室温时两种 LNA 噪声系数均小于 3 dB,测量的其 1 dB 压缩点输出功率为 5 dBm。文献[17-20]采用上述技术研究了 220~320 GHz 的 LNA MMIC 等。

毫米波元器件技术和信号处理技术迅速发展,使被动毫米波辐射成像的研究步入活跃时期,获得了突破性进展。毫米波成像系统逐渐向小体积、高频率及低成本方向发展,并在进入 21 世纪后逐渐投入商用。

毫米波成像技术的应用范围极其广泛,涉及遥感、盲降、导航、精确制导、安检、医学、环境监测及射电天文观测等众多军事和国民经济领域。例如,在无损检测方面,可利用亚毫米波准近场实时成像对微小结构工业电子排线进行检测^[21];在交通方面,毫米波成像系统可用于低能见度天气条件下引导飞机着陆,以及汽车、轮船防撞^[22];在军事方面,利用毫米波在几个大气窗口处对雨雾的穿透性和被动工作方式的隐匿性,被动毫米波成像系统可以完成海上侦察任务,也可用于在海岸缉私中搜索雨雾中的船只^[23],此外,在末制导方面,PM-MW 成像不仅能弥补红外与激光探测的不足,而且在反涂层隐身应用方面具有极其重要的作用,对提高我军在未来战争中的突防能力和生存能力具有十分重要的意义^[24];在安全检查方面,利用人体和违禁物品毫米波辐射特性的不同以及毫米波对织物的穿透能力,可以发现隐匿违禁物品,且由于不发射电磁波,不会对人体造成任何伤害,因此 PMMW 成像技术可用于在机场、海关等处检测人体隐匿违禁物品,此类应用已成为当前毫米波成像技术的应用热点^[25,26]。

2010 年 3 月 29 日,俄罗斯首都莫斯科市中心发生两次爆炸,2011 年 4 月 11 日白俄罗斯发生地铁爆炸案,相关事件严重威胁着人们的生命和财产安全,造成极大的损失。因此,安全问题日益得到世界人民的关注,对安检系统的可靠性与智能化也提出了更高的要求。传统的金属探测器只能对近距离小范围目标进行检测,效率低,已远远不能满足安检的需求。尽管 X 光等各种射线具有很强的穿透力,但会对被测人体造成辐射伤害,即使当前存在低辐射剂量的 X 光机,但其依然不容易被公众接受。红外线是靠物体表面温度成像,在有织物遮挡的情况下无法清晰成像。而毫米波成像系统不仅可以检测出金属物体,还可以检测出塑料手枪、炸药等危险品,获得的信息更加详尽、准确,可以大大地降低误警率^[27,28]。因此,近年来 PMMW 成像技术在人员安检等方面发展迅速,得到了极大重视和广泛应用。

1.2 毫米波成像系统分类

根据是否对目标及背景采用电磁波照射,毫米波成像系统可分为主动毫米波成像系统、半主动毫米波成像系统和被动毫米波成像系统。

1. 主动毫米波成像系统

主动毫米波成像系统是对目标及背景发射毫米波信号,并采用毫米波接收机接收回波信号进行加工处理的毫米波成像系统。以美国太平洋西北国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)的隐匿物品探测全息毫米波成像系统为例,该系统利用 SAR 成像原理,采用宽带模式获得成像的距离分辨率,实现了三维成像。如图 1.1 和图 1.2 所示,该系统工作于 27~33 GHz 频段,水平方向为两排天线阵列,上排为 64 路发射天线阵列,下排为 64 路接收天线阵列。采用一套收发信机和 9 个单刀八掷开关实现对水平视场(Field of View, FOV)的电扫描。垂直方向采用 2 m 线性机械扫描,实现对视场的覆盖。该系统的成像分辨率可达到 0.5~1 cm^[29]。

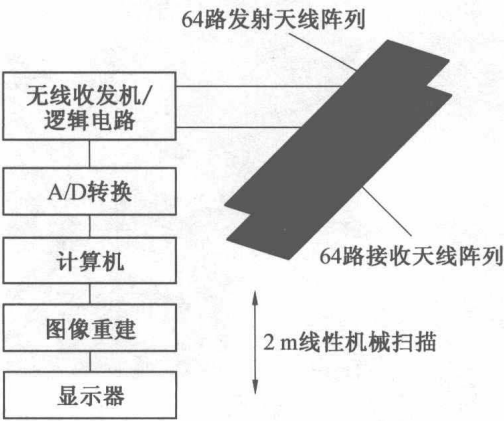


图 1.1 宽带毫米波全息成像系统框图

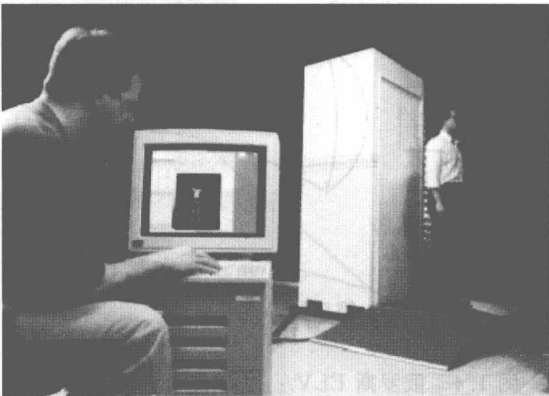


图 1.2 宽带毫米波全息成像系统样机

在上述研究基础上,PNNL 联合 L-3 公司研制了工作于 W 频段的旋转扫描成像系统,成像效果如图 1.3 所示^[30-33],可见,主动成像分辨率较高,工作于宽带时能获得距离分辨率。但主动成像会发射电磁波,对人体产生辐射,同时存在侵犯隐私问题,不易被人接受。



图 1.3 光学图像(左)和 100~112 GHz 宽带毫米波图像(右)

2. 半主动毫米波成像系统

半主动毫米波成像系统是指在被动毫米波成像系统的基础上,采用高斯白噪声对目标平面进行照射,以提高系统的成像质量并缩短成像时间。如图 1.4 所示,俄罗斯 ELVA-1 公司采用非相干辐射脉冲噪声源对目标平面进行照射,接收机通过聚焦天线接收来自目标反射的噪声,提高目标和背景的温度分辨率。该系统的工作频段为 92~96 GHz,平均脉冲功率为 50 mW,脉冲周期为 100 ns,接收机噪声系数为 7 dB,系统空间分辨率约为 1 cm。系统样机及毫米波成像图如图 1.5 和图 1.6 所示^[34]。

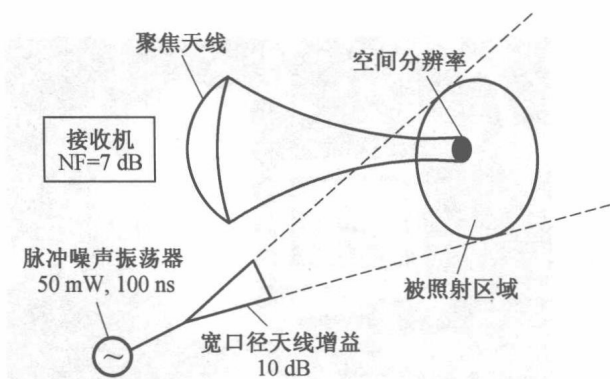


图 1.4 俄罗斯 ELVA-1 半主动毫米波成像系统原理图

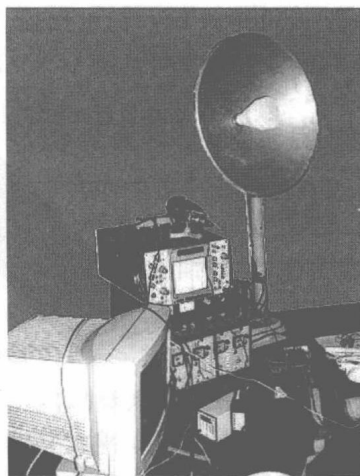


图 1.5 俄罗斯 ELVA-1 半主动毫米波成像系统样机

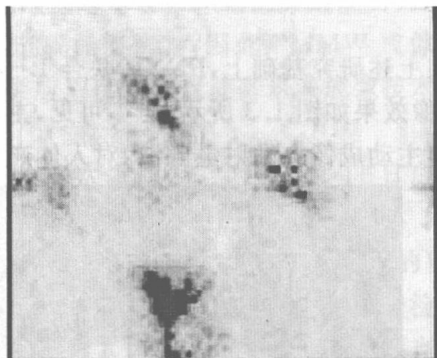
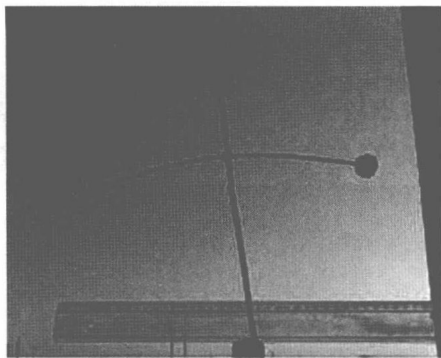


图 1.6 样品目标(小管上的铝箔球)及其毫米波图像

图 1.7 和图 1.8 为 QinetiQ 公司 8 mm 半主动毫米波成像系统及其毫米波成像图。该系统在 PMMW 成像系统的基础上引入了主动照射室,通过均匀的毫米波照射模拟白噪声,提高目标与背景的亮温(亮度温度)差;同时,准光路中采用了法拉第旋转器(Faraday Rotator)与极化旋转技术(Polarization Rotating Technique),使光路变得更加紧凑,但增加了光路的损耗^[35,36]。系统空间分辨率约为 2 cm,垂直视场为 1.8 m,水平视场为 0.9 m,帧频可达 10 Hz。

尽管外加噪声毫米波成像系统提高了目标和背景的温度对比度,但由于外加噪声很难

实现对目标平面的均匀照射,导致相同亮温的目标点显示出不同的亮温值,使得该技术未能被普遍应用。同时,尽管提高目标与背景的温度对比度所需的噪声功率较小,对人体的辐射量低于美国电气电子工程协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)在 $3\sim 300\text{ GHz}$ 频段对人体辐射的安全标准 10 mW/cm^2 ,但依然不容易被人们所接受^[37]。

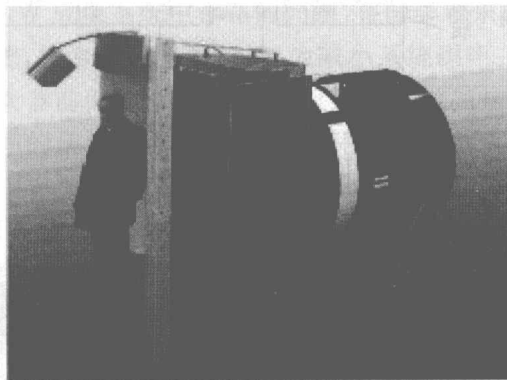


图 1.7 QinetiQ 公司 8 mm 半主动毫米波成像系统

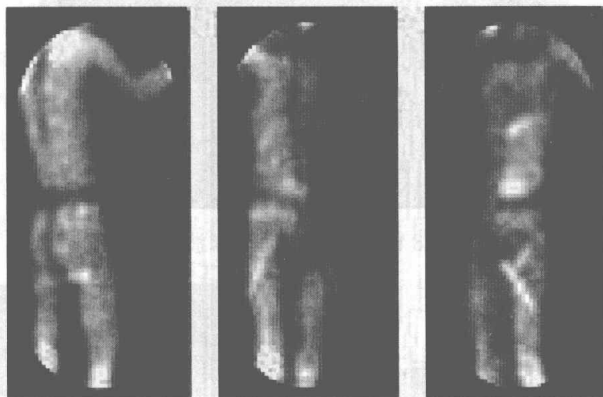


图 1.8 QinetiQ 公司 8 mm 半主动毫米波成像图

3. 被动毫米波成像系统

PMMW 成像系统完全不发射电磁波,仅靠接受物体自身的辐射来识别目标,因此,无目标闪烁和对人体辐射等缺点^[38]。图 1.9 和图 1.10 为乌克兰科学院“冰山”国家科研中心研制的 8 mm 波段 PMMW 成像系统原理框图和系统实物图。系统工作于 8 mm 波段,采用 16 通道辐射计和天线组成焦平面阵列完成垂直方向的扫描,水平方向采用机械扫描,角分辨率为 0.3° ,成像时间为 3 s。该系统对室外场景探测的被动毫米波成像图及相同场景的光学照片如图 1.11 所示^[39,40]。

综上所述,PMMW 成像是当前人体隐匿物品探测(Detection of Concealed weapons, CWD)应用的重要发展方向,为提高温度分辨率、提高成像速率和节省成本,逐渐衍生出多种体制的 PMMW 成像系统,本章将结合当前国际上的研究现状重点加以阐述。

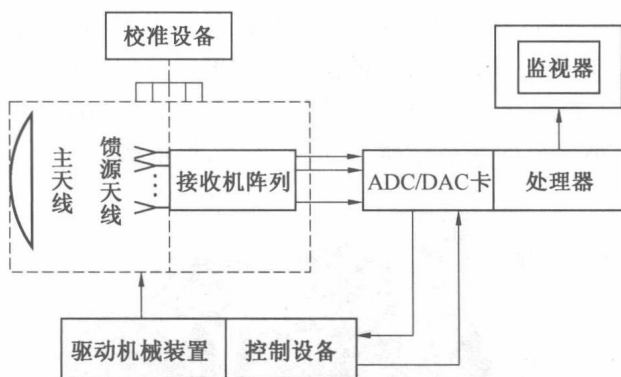


图 1.9 8 mm 波段被动毫米波成像系统框图



图 1.10 8 mm 波段被动毫米波成像系统

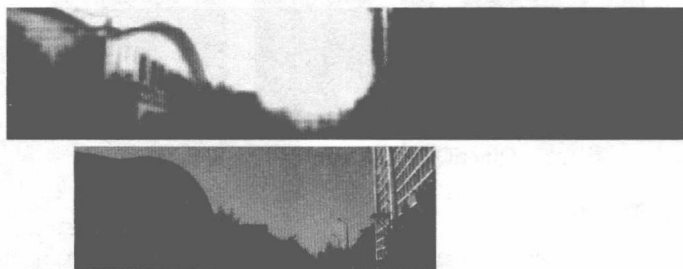


图 1.11 被动毫米波成像图(上)及相同场景的光学照片(下)

1.3 隐匿物品探测被动毫米波成像技术研究现状

1.3.1 国外发展现状

PMMW 成像技术的发展可根据是否在辐射计接收机前端加入 LNA 而分为两代。20 世纪 90 年代中期,美国和欧洲几家公司开始投入财力和物力进行第一代 PMMW 成像系统的研究。在 CWD 方面的应用最初采用单通道机械扫描,尽管该成像体制成本低,但完成对视场的扫描时间过长,不能实现实时成像,因此在 CWD 应用方面实用性较差。为此,各国

学者研究了各种多通道 PMMW 成像技术,但随着阵列通道数目的增加出现了新的问题,例如:温度灵敏度较低,在室内,辐射计接收机没有足够的灵敏度分辨出隐匿的金属武器;各通道的灵敏度和增益均衡性较差,严重影响了系统整体的温度灵敏度,导致对隐匿物探测性能下降;不能提供足够多的像素以覆盖视域。

为解决第一代 PMMW 成像系统中存在的问题,各国学者采取了多种技术途径,研究了第二代 PMMW 成像系统,技术途径主要包括:为减小系统噪声,在毫米波前端加入 LNA,并且尽量减小低噪声放大器前面部件的损耗;通过采用机械扫描或电扫描方式减少接收机通道数量以实现通道之间的最佳平衡,并且精心选用低噪声放大器和检波器使整个通道实现最佳匹配等。

目前,多通道 PMMW 成像技术相对于单通道机械扫描成像引入了许多新的理论和研究方法,其成像体制主要包括焦平面阵列(焦面阵)成像、焦面阵结合线性机械扫描成像、频率扫描结合机械扫描成像等,代表性研究机构主要包括美国的 Millivision、Trex、Lockheed Martin、Brijot、TRW,英国的 QinetiQ 等。

1. 焦平面阵列成像

如图 1.12 所示,被动毫米波焦平面阵列(Focal Plane Array,FPA)成像的基本原理是:将毫米波接收阵列置于聚焦天线的焦面,利用馈源阵列的偏焦产生多个不同指向的高增益固定波束来覆盖视场^[41]。在空间分布的目标可看成无数个点目标的集合,来自点目标的电磁波入射至聚焦天线,点目标的空间位置决定了该点对聚焦天线的入射角,每个点目标的位置与电磁波聚焦在焦平面上的位置一一对应;来自每个点目标的电磁波的强度不同,辐射计接收机接收到的功率也就不同,于是在焦平面上形成目标的像^[42]。

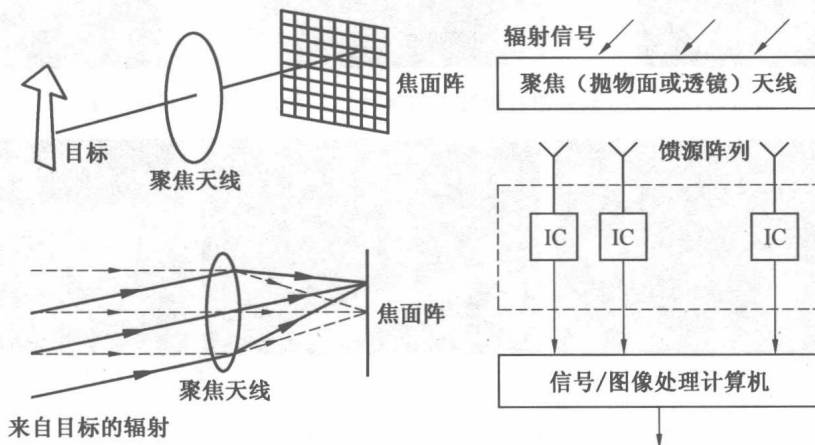


图 1.12 被动毫米波焦平面阵列成像原理图

美国 TRW(Thompson Ramo Wooldridge Inc)公司在毫米波 FPA 成像技术方面居于世界领先地位,现其毫米波成像技术已经转让给 NGC(Northrop Grumman Corporation)。图 1.13 和图 1.14 为 NGC 3 mm FPA 成像系统及其室内隐匿物品探测成像效果图,在该毫米波图像(图 1.14 的中间子图)中黑色代表高温^[43]。该系统采用工作于 W 频段的直接放大检波(Direct Amplification and Detection,DAD)MMIC(2 mm×7 mm),每个模块包含 4 路接收器和天线。如图 1.15 所示,由 10 个模块组成一个“1×40 卡”,再由 13 个“1×40 卡”组

成系统的焦面阵。图 1.13 所示系统采用了 26×40 路 DAD MMIC 组成 1 040 个单元的 FPA, 并利用与水平方向成 45° 角的反射镜的微小位移实现 4 倍像素的过采样。该系统研发初期主要用于低能见度条件下飞机着陆, 后用于室内人体隐匿物品探测。系统指标参数见表 1.1^[44,45]。

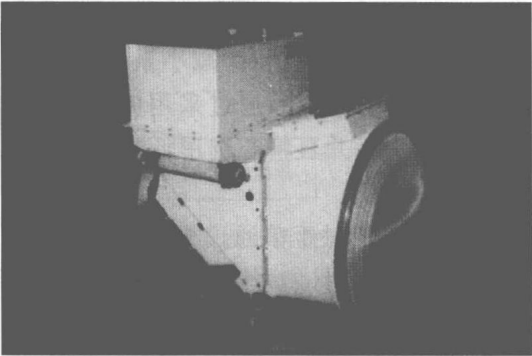


图 1.13 NGC 3 mm FPA 成像系统

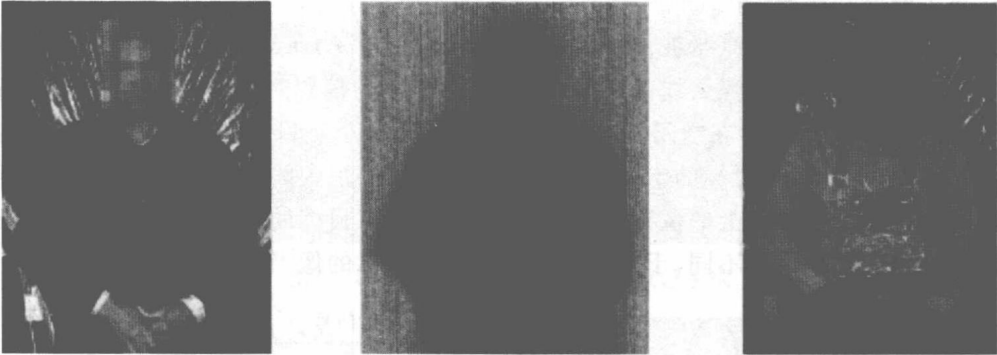
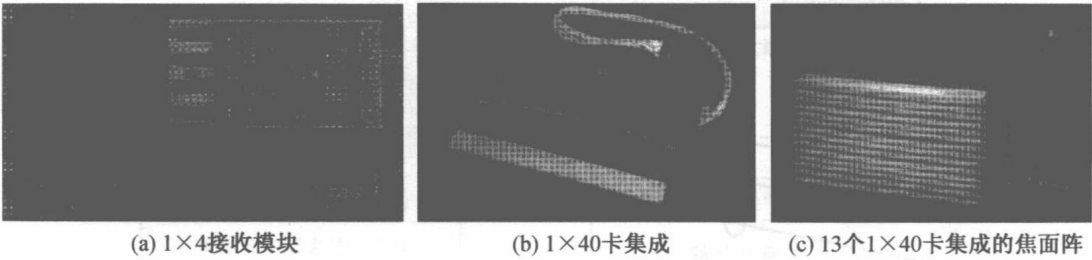


图 1.14 人体运动衫下(左)藏有塑料包装金属弹片(右)的可见光及其被动毫米波成像图(中)



(a) 1×4接收模块 (b) 1×40卡集成 (c) 13个1×40卡集成的焦面阵

图 1.15 NGC 520 单元焦面阵

表 1.1 NGC 1 040 单元被动毫米波焦面阵成像仪参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
工作中心频率	89 GHz	像素	H40×V104
带宽	10 GHz	焦面阵单元数	H40×V26
视场	H15°×V10°	接收机类型	直接检波式
温度灵敏度	2 K	透镜天线口径	45.72 cm
帧频	17 Hz	角分辨率	0.5°

毫米波 FPA 成像具有诸多优点:一是该技术类似光学摄像,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;二是由于不需要扫描,可以适当增大接收机积分时间,提高辐射计的温度灵敏度;三是结构简单,易于集成。其缺点是:为满足采样要求和对视场的覆盖,需要大量的辐射计接收机和天线单元,在当前 MMIC 还较为昂贵的情况下,对系统成本提出了较高要求。所以实际应用中,多采用一维辐射计阵列与机械扫描相结合(包括平扫和圆锥扫描等)实现对视域的覆盖,既降低了系统成本,又提高了成像速率,使实时成像成为可能。该成像方式是当前 PMMW 成像技术研究的热点,将毫米波成像技术推向了一个新的应用时代。

2. 焦面阵结合线性机械扫描成像

焦面阵结合线性机械扫描成像体制是在毫米波 FPA 成像体制上发展而来的。该体制是在聚焦天线的焦平面上一维采用辐射计接收机阵列覆盖视域,另一维采用机械扫描覆盖视域,这样不仅降低了成本,还能满足采样率和实时成像的要求。

日本东北大学(Tohoku University)与日本万视宝株式会社(Maspro Denkoh Corporation)和中央电子株式会社(Chuo Electronics Corporation Ltd.)联合研制了 77 GHz PMMW CWD成像仪,其工作原理图和系统实物图如图 1.16 和图 1.17 所示。该成像仪一维采用 25 单元辐射计接收机和天线阵实现对水平视域的覆盖,另一维采用金属反射镜的转动实现对垂直视域的扫描。来自目标点的电磁波被透镜聚焦,再经过一个固定反射镜和一个转动反射镜后,被天线和接收机阵列接收。透镜采用聚乙烯作为材料,表面曲线采用射线追迹法(Ray-Tracing Method)设计,如图 1.18 所示。系统馈源采用费尔米-狄拉克函数(Fermi-Dirac Function)渐变的渐变缝隙天线(Tapered Slot Antenna, TSA),增益为 17 dBi,10 dB波束宽度为 35° ,馈源天线与接收机阵列如图 1.19 所示,系统对炸药探测的毫米波成像图如图 1.20 所示,系统参数见表 1.2^[46,47]。

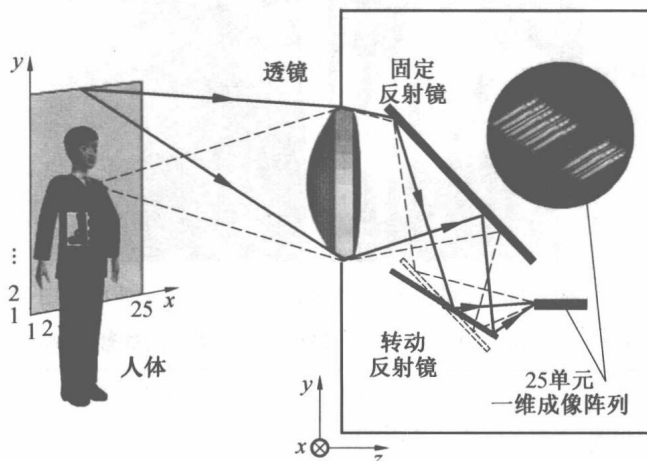


图 1.16 被动毫米波成像仪光学系统