

现代光学技术丛书

HONGWAI RECHENGXIANG
YU XINHAO CHULI

红外热成像 与信号处理

◎ 邢素霞 著

本书特色

1. 详述DSP/FPGA的信号处理
2. 讲解红外图像的非均匀性校正
3. 红外辐射理论及对红外热成像距离的影响分析
4. 非制冷探测器的探测原理及工作偏置对探测器性能的影响分析



国防工业出版社

National Defense Industry Press

现代光学技术丛书

红外热成像与信号处理

邢素霞 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地介绍了红外热成像的基本理论和信号处理中的关键技术。全书共分7章,主要内容包括:红外辐射理论及对红外热成像作用距离的影响分析,非制冷探测器的探测原理及工作偏置对探测器性能的影响分析,红外图像的非均匀性校正,图像增强技术,基于DSP/FPGA的信号处理电路开发的关键技术及红外热成像系统的性能评估。

本书是根据在研发红外热成像系统中遇到的关键问题以及在民用、交通、军事上的实际需要编写的。适用于从事红外热成像系统的科研工作人员、工程技术人员作为参考,也可供国防院校的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

红外热成像与信号处理 / 邢素霞著. —北京:国防工业出版社,2011.1
ISBN 978-7-118-07278-5

I. ①红... II. ①邢... III. ①红外成像系统—信号处理 IV. ①TN216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 003027 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10 1/2 字数 237 千字

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

目前,国外在红外热成像技术的发展上处于遥遥领先地位,而我国的红外热成像技术还相对落后。一代红外热成像在技术上虽已取得突破,但在装备上仍很少;二代红外热成像装备尚处于试验阶段,无法装备部队。从总体上看,我国红外热成像技术要比国外落后15年~20年。因此,发展新一代红外热成像技术已经成为历史发展的趋势。

另一方面,西方国家对我国进行严密的技术封锁。美国《出口管理法》明令规定,禁止向中国出口任何可能用于军事目的的产品和技术。目前,可以出口我国的红外成像器件均属于商业级产品。

随着我国对红外探测器及热成像系统需求的不断加大,这种供需矛盾将会日益明显。尽管国外的非制冷红外热成像系统可以进入国内市场,但价格比较昂贵,且不一定满足需要(如枪瞄)。如果完全依赖国外,势必受制于人。面对复杂的国际形势,我们不得不未雨绸缪,做好红外热成像系统的研发工作,而国内在该方面的文献很少。

《红外热成像与信号处理》一书是继常本康教授、蔡毅教授的《红外成像阵列与系统》之后详细系统地介绍红外热成像系统的开发研究过程的科研用书,有别于目前出版的红外系统的应用实例方面的丛书,如《红外探测器件与应用》、《红外热像检测与诊断技术》等。该书的出版,将为从事或即将从事该领域研究的科研人员提供很好的帮助和启发。

全书共分7章。第1章介绍了红外热成像系统的发展及现状;第2章和第3章分别介绍了红外辐射理论和非制冷红外探测理论;第4章针对红外图像的非均匀性、对比度低等问题,开展了红外图像处理技术的研究和讨论,并通过实验对各种算法进行了比较;第5章重点介绍了基于DSP/FPGA的信号处理电路的研制开发;第6章则重点介绍了基于FPGA的信号处理电路的研制开发;第7章对红外热成像系统进行了性能评估。其中,第6章内容为常本康教授编著,其余章节均为邢素霞著,全书的统筹与编稿由邢素霞完成。

本书内容是作者参与“非制冷红外热成像系统”课题、主持北京市教委科技规划面上项目(项目编号:KM20101001002)和北京市优秀人才培养资助项目(项目编号:2009D005003000006)等研究成果的总结,出版受到“北京工商大学学术专著出版资助”项目的资助。

在本书的撰写过程中,受到蔡毅教授的指点和帮助,在此作者表示衷心的感谢。在撰写过程中,还参考和引用了一些文献的观点和素材,在此向文献的作者表示衷心的感谢。在书稿的编辑与排版过程中,还受到很多人的帮助与支持,在此表示衷心的感谢。

本书选题新颖,特别适用于从事国防、军事科研单位或学校的科研工作人员、工程技术人員作为参考,也可供国防院校的研究生参考。

由于作者水平有限,本书难免存在不妥之处,敬请读者和专家批评指正。

作 者
2010年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 红外热成像系统的发展概况	1
1.1.1 制冷型红外热成像技术	2
1.1.2 非制冷红外热成像技术	3
1.2 非制冷红外热成像技术发展优势	5
1.3 非制冷红外热成像技术的应用前景	5
1.4 国内外非制冷热成像技术发展差距与战略对策	6
第 2 章 红外辐射理论	8
2.1 红外辐射及辐射源	8
2.1.1 太阳辐射	9
2.1.2 地球红外辐射	9
2.1.3 大气热辐射	10
2.1.4 人工黑体	10
2.1.5 人体热辐射	11
2.2 红外辐射的基本理论	13
2.2.1 透射、反射、吸收定律	13
2.2.2 基尔霍夫定律	14
2.2.3 普朗克定律	15
2.2.4 维恩定律	16
2.2.5 斯忒藩-玻耳兹曼定律	17
2.2.6 红外辐射源的光谱辐射效率	17
2.2.7 目标与背景的辐射对比度	17
2.2.8 光谱微分出射率(热导数)	19
2.2.9 实际物体的红外辐射	20
2.2.10 影响物体发射率的因素和变化规律	21
2.3 红外辐射的大气传输特性	22
2.3.1 地球的大气层结构	22
2.3.2 地球的大气成分	24
2.4 地球大气与红外辐射相互作用	25

2.4.1	标准大气模型	25
2.4.2	地球大气对红外辐射的消光	26
2.4.3	地球大气对红外辐射吸收	27
2.4.4	地球大气对红外辐射的散射	29
2.4.5	影响红外辐射传播的气象条件	31
2.5	红外热像仪的作用距离	35
第3章	非制冷焦平面阵列探测原理	37
3.1	非制冷焦平面探测原理与分类	37
3.2	主要热探测机制	40
3.2.1	电阻型微测辐射热计	40
3.2.2	热释电探测器	43
3.2.3	热电偶探测器	46
3.3	重要限制	47
3.3.1	温度波动噪声限制	47
3.3.2	背景波动噪声限制	48
3.4	微测辐射热计的偏置效应	51
3.5	微测辐射热计的噪声	53
3.6	典型非制冷红外焦平面阵列	57
第4章	红外图像处理技术	61
4.1	红外图像特点	61
4.2	红外图像的非均匀性校正	61
4.2.1	红外图像的非均匀性产生机理	61
4.2.2	红外图像的非均匀性校正方法	62
4.2.3	红外图像非均匀性校正算法评估与讨论	69
4.3	盲元检测与补偿	75
4.3.1	盲元检测	75
4.3.2	盲元补偿	76
4.3.3	盲元检测与补偿算法评估	76
4.4	红外图像增强	78
4.4.1	红外图像直方图	79
4.4.2	直方图均衡	80
4.4.3	自适应分段线性变换	81
4.4.4	离散小波变换红外图像增强方法	83
4.4.5	图像增强实验	84

第 5 章 基于 DSP/FPGA 的信号处理电路	88
5.1 基于 DSP/FPGA 的信号处理电路总体设计	88
5.2 驱动电路设计	90
5.2.1 设计要求	90
5.2.2 电路设计	92
5.3 TEC 温控电路设计	94
5.3.1 TEC 温度控制原理	94
5.3.2 TEC 温度控制电路设计	94
5.3.3 多温度点 TEC 控制电路思想的提出	97
5.3.4 自适应多温度点控制电路设计	98
5.3.5 温度控制结果测试	99
5.4 A/D 数据采集电路	100
5.4.1 电路设计要求	100
5.4.2 电路设计与实现	100
5.4.3 噪声估计	102
5.5 DSP 功能模块	102
5.5.1 VC33 的工作模式选择	103
5.5.2 VC33 的中断触发和对输入信号的限制	104
5.5.3 DMA 数据传输	105
5.5.4 VC33 系统时钟	105
5.5.5 DSP 的资源分配	106
5.5.6 DSP 程序设计	107
5.5.7 程序初始化	108
5.6 FPGA 功能模块	108
5.6.1 EP1C12 的结构	109
5.6.2 FPGA 的配置	110
5.6.3 时钟系统	110
5.6.4 基于流水线结构的实时信号处理	112
5.6.5 视频合成	114
5.6.6 直方图统计	115
5.6.7 逻辑仲裁	115
5.7 D/A 数据转换	116
5.8 与 PC 的通信接口	118
5.8.1 异步串行通信方案	118
5.8.2 通信接口的实现	119
5.8.3 通信模块软件设计	120

5.9	其他电路模块	123
5.9.1	看门狗电路	123
5.9.2	电源管理模块	124
5.10	系统调试	128
5.10.1	硬件调试	128
5.10.2	软件调试	129
5.10.3	联合调试与系统成像	132
第6章	基于FPGA的信号处理	135
6.1	基于FPGA的电路设计与工作原理	135
6.2	FPGA芯片选择	137
6.3	NiosII处理器	138
6.3.1	NiosII处理器的特性	138
6.3.2	NiosII CPU内核	139
6.3.3	Avalon总线	140
6.3.4	外设接口IP核	141
6.3.5	HAL系统库	141
6.4	NiosII处理器系统功能配置	142
6.5	基于NiosII的软件设计	144
6.5.1	实时信号处理系数计算	144
6.5.2	图形界面服务程序	145
6.5.3	串口通信	146
6.5.4	键盘服务程序	147
第7章	红外热成像系统的质量评价	148
7.1	噪声等效温差(NETD)	148
7.2	最小可分辨温差(MRTD)	150
7.3	调制传递函数(MTF)	151
7.4	信号传递函数(SiTF)	153
7.5	光谱传递函数(SPTF)	154
参考文献		155

第1章 绪论

1.1 红外热成像系统的发展概况

夜视技术是利用夜间天空辐射对地表景物的照射,或者利用目标自身热辐射,借助科学仪器观察可见光波段以外的景物图像的技术,其核心技术为传感器技术。夜视技术在现代战争中具有重要地位,装备夜视器材的武器装备遍及海陆空作战平台,应用于大中小型武器系统,因此,掌握先进的夜视技术对于控制战场形势具有至关重要的意义。

1934年,红外变像管在德国问世,第一次使人类的非可见光谱观察成为可能。红外变像管在“第二次世界大战”和朝鲜战争中得到了广泛应用。20世纪50年代以后,夜视技术发展迅速,并逐渐分化为两个发展方向:微光成像技术和红外热成像技术。两者的主要区别是,前者利用景物目标对夜天空光谱辐射的反射获得目标图像,主要工作于 $0.5\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$ 的大气窗口;后者利用目标自身发射的光谱辐射获得目标图像,主要工作于 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 两个大气窗口。与微光成像技术相比,红外热成像技术制作工艺复杂,生产维护成本高,但在作用距离、图像质量、昼夜共用问题、可应用领域等方面具有显著优势。

西方发达国家非常重视红外热成像技术的发展。冷战结束以后,美国进行了全球战略调整,提出美军在未来作战中要具备各种作战能力,其中前两种都与红外热成像技术密切相关,即能将全球监视系统和通信系统以及有关数据的合成与处理集中用于某一战区,形成信息优势,在全天候条件下能伪装和突破防线,识别和打击重要的固定和机动目标。在美国的国家导弹防御计划中,红外探测器技术是其中一项关键技术。目前,西方国家的武器装备如星、弹、机、舰、车等无一例外装备了红外系统,在预警探测、情报侦察、夜视观瞄、火控制导、精确打击、电子对抗等领域发挥着不可替代的作用。实际上,红外技术已经成为一个国家武器装备水平的标志。

近年来,世界各国纷纷扩大资金投入,成立专门的研发机构和生产企业,大力发展红外热成像技术。2000年,美国、英国、法国、德国、日本、印度和中国用于发展红外热成像技术的财政总投入高达100亿美元,其中仅美国就投入了20亿美元,并且该项投入还在逐年快速递增。此外,以色列、瑞典、俄罗斯、加拿大、澳大利亚、荷兰、新西兰等国也都在积极发展各自的红外热成像技术。据统计,目前世界上从事红外热像仪研制和生产的公司有一百多个,其中规模较大、影响力较强的公司主要有美国的Ratheon公司、Boeing公司、LockheedMartin公司、DRS公司、Sarnoff公司、Rockwell科学中心、SantaBarbara研究中心和JetPropulsion实验室,英国的BAE公司,法国的CEA-LETI公司、Thomson-CSF公司、Sofradir公司和ULIS公司,德国的AIM公司,以色列的SCD公司,日本的三菱电机公司、NEC公司、富士通公司和尼康公司。

红外热成像技术的核心技术是探测器技术。按照工作温度分类,红外探测器分为制冷型和非制冷型。自第一代热像仪问世至今,制冷型红外热像仪已经发展到第三代。第一代热像仪采用多元线列或小面阵探测器,光机扫描机构复杂,信号处理简单,图像质量低于黑白电视图像;第二代热像仪采用长线列或与黑白电视分辨率相当的凝视焦平面阵列,读出电路采用大规模集成电路并有一定的信号处理功能;第三代热像仪采用长线列或与高清晰度电视分辨率相当的凝视焦平面阵列,具有多个工作波段,读出电路采用超大规模集成电路并有复杂信号处理功能。制冷型红外探测器主要有 HgCdTe、InSb 光量子型探测器和 GaAlAs/CaAs 量子阱型探测器。非制冷红外热成像技术起步相对较晚,但发展非常迅速。目前,非制冷红外焦平面阵列的分辨率与二代制冷型热像仪相当。成熟的非制冷红外探测器主要包括热释电型和微测辐射热计型两种类型。

1.1.1 制冷型红外热成像技术

20 世纪 50 年代至 60 年代,美国研制成功需要制冷的 PbS 红外探测器,并将其用在防空导弹的导引头上。同时,窄带半导体技术迅速发展,为响应波长的延伸和响应率的提高提供了理论指导。这些工作为红外热像仪的发展铺平了道路。美国得州仪器公司利用 Ge:Hg 探测器研制成功了第一代红外热像仪,它利用光机系统对目标进行二维扫描,利用光子探测器接收目标发出的红外辐射,经光电转换和一系列信号处理,形成目标温度场图像。受探测器性能的影响,该热像仪的扫描速度很慢,并不能实时显示。1958 年,英国 Lawson 公司研制成功 HgCdTe 红外探测器;1964 年,利用该探测器研制成功世界第一台实时显示的红外热像仪。20 世纪 70 年代,美国完成了热成像系统通用组件计划,英国、法国等也相继研制了通用组件热像仪。各国通用组件略有不同,其中以美国的第一代热像仪通用组件技术的影响最大。西方国家生产的第一代热像仪产品总数约有万台之多。

瑞典 AGA 公司首先研制成功第二代红外热像仪。该系统由液氮制冷,110V 电源电压供电,重约 35kg,与第一代热像仪相比,便携性并没有质的提高。随着相关配套技术的不断发展,1986 年研制的红外热成像系统已无需液氮或高压气,而以热电方式制冷,用电池供电,质量小于 7kg,并且具备温度测量、图像采集和数据存储等功能,仪器的功能、精度和可靠性都得到了显著的提高。而目前的第二代热像仪质量可小于 1kg,噪声等效温差(NETD)小于 20mK,测温精度可达 $\pm 0.5\%$ 。美、英、法、德、日、以色列等国都可以生产第二代热像仪。具有代表性的产品有美国洛克维尔科学中心、Raytheon、Boeing、日本 NEC 和富士通的 HgCdTe 中波红外热像仪,美国洛克维尔科学中心、法国 CEA-LETI 公司、日本 NEC 的 HgCdTe 长波红外热像仪,美国圣巴巴拉研究中心和英国 BAE 系统红外有限公司的 InSb 中波红外热像仪,美国洛克维尔科学中心以及洛克希德·马丁、法国汤姆逊-CSF、瑞典德工业微电子控制、日本的东阳技术公司的量子阱长波红外热像仪,美国 Sarnoff、日本三菱电机公司的 PtSi 中波红外热像仪等,其面阵空间分辨率从 128×128 到 512×480 。自 20 世纪 80 年代起,西方国家部队已经开始装备第二代红外热像仪。与第一代热成像技术相比,第二代热成像技术的主要特征为探测器元数大为增加探测器器件带有大规模集成电路,具有一定信号处理功能温度灵敏度更高。在相同的工作条件下,作用距离是第一代的 1.5 倍~2 倍。

第三代制冷型红外热成像技术的发展开始于 20 世纪 90 年代后期,美、法、日、以色列等国在该领域的研究处于领先地位。2000 年,美国喷气式推进实验室公布了其长波 $8\mu\text{m} \sim 9\mu\text{m}$ 和甚长波 $14\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ 双色 GaAlAs/GaAs 量子阱红外热像仪,焦平面采用分子束外延技术生长,读出电路采用 CMOS 工艺,液氮杜瓦制冷,其面阵大小为 640×480 ,两波段的 NETD 分别为 36mK 和 44mK。美国国防研究规划局已授权研制四色量子阱热像仪,光谱范围从可见光到长波红外,阵列规模增大到 1024×1024 。2002 年,法国 CEA/LETI 研制成功超长线阵 HgCdTe 器件,阵列规模为 1500×2 ,NETD 为 5mK;还研制成功 128×128 HgCdTe 中波双色器件,两波段的 NETD 分别为 28mK 和 15mK;同年还生产了第一个 1000×1000 HgCdTe 红外焦平面阵列样品。1999 年,美国洛克维尔科学中心联合夏威夷大学天文研究所研制了 2048×2048 HgCdTe 短波红外焦平面阵列,并在 2000 年通过了最后测试。2004 年,他们又研制了 $4K \times 4K$ 的红外焦平面阵列,这是红外焦平面阵列首次达到这样的集成度,但未见采用该探测器生产红外热像仪的报道。

我国于 20 世纪 90 年代初完成了第一代热成像组件的研制,开始少量装备部队,产品性能与国外第一代的相当,在热成像技术领域中实现了从无到有的转变。2000 年前后,上海技术物理研究所相继研制成功四种型号 64×64 元 InSb 光伏型红外探测器,像素尺寸为 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$,电学串音小于 2%。目前,上海技术物理研究所和重庆大学等单位正在研制 128×128 元及更大规模的 InSb 红外探测器。上海技术物理研究所和昆明物理研究所等单位正在研制 288×4 元 HgCdTe 红外探测器。

1.1.2 非制冷红外热成像技术

非制冷红外热成像技术开始于 20 世纪 80 年代。当时的制冷型红外热成像技术有几个缺点:①由于制冷型红外探测器材料价格昂贵和探测器的成品率很低,导致了制冷型红外热成像系统价格昂贵;②制冷型红外热成像系统额外需要一套制冷设备,增加了系统成本,降低了系统的可靠性,制冷系统一直是制冷型热成像系统可靠性最差的部件;③制冷型系统的功耗大,难以实现小型化。这些缺点直接限制了它在低成本武器系统(如枪瞄)和工业领域的推广应用。因此,发展具有价格低、体积小、功耗低、性能可靠、操作方便等优点的非制冷红外热成像技术成为必然。

美国军队夜视实验室首先意识到低成本、轻重量的重要性,并联合美国国防研究规划局,设立专项基金支持非制冷红外热成像技术的研究。美国得州仪器和 Honeywell 公司首先开始了非制冷红外焦平面阵的研制。两家公司采用的技术是不同的,前者采用铁电体材料,基于热释电效应;后者采用 VO_x 材料,基于测辐射热原理。这两种技术都不需要制冷,但是都需要温度稳定器。1997 年,Raytheon 公司继承了美国得州仪器的技术。几乎同时,Honeywell 公司将其技术转让给了 Raytheon 夜视系统公司、波音和洛克希德·马丁。得州仪器研制的铁电型红外焦平面阵列探测器已商业化,其阵列规模为 320×240 ,像素尺寸 $48.5\mu\text{m}$,工作温度为 22°C ,工作波段为 $7\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$,NETD 小于 70mK。Indigo 系统公司产品基于氧化钒微测辐射热计技术,它可以生产阵列规模为 160×128 、 256×256 、 320×120 、 320×240 等不同分辨率的非制冷红外探测器,像素尺寸已从最初的 $51\mu\text{m}$ 降至现在的 $25\mu\text{m}$,NETD 已降至 80mK 以下。波音下属公司 DRS 首先研制成功阵列规模为 640×480 非制冷红外探测器,这是目前分辨率最高的非制冷红外焦平面阵列。洛克希

德·马丁公司也成功研制出 640×480 非制冷红外探测器,并把它推广到医疗领域。研究人员还对采用 640×480 红外焦平面阵列的热像仪和采用 320×240 红外焦平面阵列的热像仪的视距性能做了现场实验比较。两者具有相同的光学系统($F/1$),相同的帧频(30Hz)。前者的 NETD 为 150mK,可以探测到 3900m 处的行人;而后者 NETD 仅为 113 mK,只能探测到 2350m 处的行人。

在法国国防部基金的资助下,CEA/LETI 公司于 1992 年开始了基于非晶硅微测辐射热计技术的非制冷红外焦平面的研究。近年来,其生产企业 Sofradir 公司及后来的 ULIS 公司不断将其产品推向货架,主要有像素尺寸为 $45\mu\text{m}$ 的 160×120 、 320×240 阵列和像素尺寸为 $35\mu\text{m}$ 的 160×120 、 320×240 阵列。像素尺寸为 $45\mu\text{m}$ 的 320×240 红外焦平面阵列 NETD 可达 85mK。2001 年,ULIS 公司公布了像素尺寸缩小为 $35\mu\text{m}$ 的 320×240 红外焦平面阵列,其 NETD 为 35mK。2005 年,ULIS 公司推出了 640×480 红外焦平面阵列。2009 年,ULIS 公司又推出了 1024×768 的非制冷焦平面阵列,像素尺寸缩小为 $17\mu\text{m}$,噪声等效温差为 40mK,响应率为 15.5mV/K 。采用非晶硅设计红外焦平面阵列的优点是与基于硅材料技术相兼容,有利于读出电路及其他复杂信号处理电路的集成,也有利于降低探测器的生产成本。

日本主要有三菱和 NEC 从事非制冷红外热成像技术的研究。三菱主要基于硅 P-N 结技术,目前未见其产品报道。NEC 获得了 Honeywell 公司的专利授权,主要从事基于 VO_x 微测辐射热计技术的研究。2003 年,NEC 公布了其研制的 320×240 非制冷红外焦平面阵列,其像素尺寸为 $37\mu\text{m}$,填充因子为 0.72。它直接在读出集成电路上沉积 VO_x 薄膜,然后生成阵列,降低了工艺复杂性。该阵列在帧频 30Hz 和 $F/1$ 条件下,NETD 约 100mK。

英国宇航系统公司采用钽铌酸铅(PST)研制的铁电型非制冷焦平面探测器和手持热像仪,阵列规模为 256×128 ,像元中心距为 $56\mu\text{m}$,比探测率 D^* 为 $7 \times 10^8 \text{cmHz}^{0.5} \text{W}^{-1}$ 。NETD 小于 120mK。

此外,加拿大、澳大利亚、荷兰等国也在积极发展非制冷热成像技术。

我国开展非制冷红外热成像技术研究比发达国家起步晚。2000 年,上海技术物理研究所承担的钛酸锶钡铁电薄膜材料研究项目,通过中国科学院上海分院鉴定。该项目采用新工艺制备的铁电薄膜材料性能已达到国际领先水平。2002 年,中国科学院上海技术物理研究所报道了其研制的非制冷红外热像仪。该仪器由 320×240 电阻型焦平面阵列探测器、长波红外透镜、DSP 处理器、嵌入式 PC 以及液晶显示器等组成,其光谱范围为 $8\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$,视场为 $60^\circ \times 120^\circ$,帧频为 30Hz,噪声等效温差 NETD 为 0.1K。整个仪器系统由嵌入式 PC 控制,可实现单色和伪彩色、温度分析与显示以及现场记录等功能。2004 年,国内非制冷红外探测器技术实现了零的突破。昆明物理研究所采用锆钛酸铅(PZT)材料研制成功阵列规模为 128×128 、像素中心尺寸为 $100\mu\text{m}$ 的热释电非制冷焦平面探测器,其比探测率 D^* 达到 $1 \times 10^8 \text{cmHz}^{0.5} \text{W}^{-1}$ 。

近几年,从事红外热成像系统研发的单位也在逐渐增加,主要有武汉高德、广州飒特、浙江大立等,其产品主要应用在民用和商业上,核心部件——红外探测器均为国外进口。尽管如此,与西方发达国家技术水平相比,我国在红外热成像技术方面的差距仍然很大,尤其是在焦平面器件的研制方面,目前还没有高性能非制冷红外焦平面阵列的有关报道。

1.2 非制冷红外热成像技术发展优势

非制冷红外热成像技术起步较晚,但发展非常迅速,一些技术指标已经接近制冷型红外热成像技术。非制冷红外热成像技术的飞速发展,主要是由其发展优势决定的。

(1)非制冷热成像系统具有高的可靠性。低温制冷系统和复杂扫描装置常常是红外系统的故障源,制冷型红外成像系统必须工作在低温下(例如 77K),而且对温度稳定性要求非常高,否则将不能正常工作。而非制冷热成像系统可以工作在常温下,省去了复杂的制冷系统。另外,非制冷热成像系统采用大面阵的焦平面阵列,无需扫描装置,因此非制冷热成像系统与制冷型热成像系统相比,可靠性大大提高。

(2)非制冷热成像系统的价格低。低温制冷系统和扫描装置是制冷型热成像系统价格昂贵的两个主要因素之一,省去了低温制冷系统和扫描装置,使系统成本大大降低。非制冷热成像系统价格低的另一个主要原因就是非制冷探测器的生产成本远远低于制冷型探测器的生产成本。首先是制冷型探测器的材料(如 HgCdTe, InSB, Al-GaAs)生产困难,大面阵的均匀材料生产更加困难;其次,制冷型探测器的制备工艺复杂,成品率很低,因此造成制冷型探测器的价格一直居高不下。这也给制冷型热成像系统进入民用市场带来困难。而非制冷探测器无论在材料和制备工艺上相对低廉,特别是采用非晶硅材料的探测器,它与目前非常成熟的 CMOS 工艺互相兼容,其价格优势更加明显。

(3)非制冷热成像系统的体积小、质量小、功耗低,易于设计便携式热成像系统。

非制冷红外焦平面阵列探测器的不足之处是,在灵敏度和响应速度上不如制冷型红外探测器。目前最好的非制冷红外探测器的 NETD 已降至 30mK 以下,与制冷型探测器差距不大,但帧频只有几十赫兹,与制冷型探测器还有一个数量级的差距。

1.3 非制冷红外热成像技术的应用前景

由于具备价格低、体积小、质量小、功耗低、可靠性高等方面的优势,非制冷热成像系统极其具有市场竞争力,特别适合性价比要求高的低端军事领域和厂、矿、企业的应用。由于制冷型热成像系统的价格昂贵,目前无法进入这些市场。

在军事应用领域,非制冷热成像系统特别适合低成本的轻武器使用,作为单兵侦查、夜间驾驶、轻武器瞄具等。2001 年,美国陆军启动 TWS(热武器瞄具)项目。截止到 2005 年 8 月,Raytheon 公司已经向美国陆军交付 25000 只武器热瞄具,用于步枪、狙击枪和重型机枪热瞄具,其中以轻型武器热瞄具装备的武器有 M16、M4、M203 和 M136 等,可以探测并识别 200m 以外的行人。DRS 公司生产的 U3000/U4000 作为武器热瞄具也已经装备于美国陆军。2005 年 10 月,DRS 公司获得了美国海军陆战队价值 4600 万美元的合同,负责提供 3800 套手持式双目热成像系统,用于远程观测和侦察。热成像系统采用了最新的 640 × 480 微测辐射热计红外焦平面阵列,响应波段为 8 μ m ~ 12 μ m,重 3 英磅(1 英磅 = 0.453592kg)。此次采购是一个为期 5 年采购合同的首次订单,总合同额可能为 6.6 亿美元,总的采购量 2.8 万套。2003 年 12 月,BAE 系统公司赢得了美国内政部为

期3年总价值450万美元的资助,用于提高陆军急需的MicroIR系列非制冷红外焦平面阵列的生产能力,并进一步降低成本。其配备的武器系统有A4、A16系列和M136 AT-4。可用在空降师、机械化步兵师等作战部队。

其他国家和地区也非常重视装备非制冷热成像器材。2005年3月,英国国防部与Raytheon公司签订了一项价值67万英镑的合同,为英国皇家海军采购热成像设备。英国国防部订购的热成像装备包括25套热像瞄准具、5台显示器以及一个轻型视频系统。2005年,我国台湾地区开始装备第四代T91步枪,所用瞄具即为热像瞄具。

在工业领域,非制冷红外热成像系统可以用于电力、冶金、交通、节能、水污染控制、石油化工、工艺质量控制、非接触温度测量、预防性维修、风切变探测等方面;在医疗领域,非制冷红外热成像系统可以用于癌症的早期诊断、静脉堵塞的早期诊断、手术监测、伤口监视、截肢位置选择、防寒服装的检测等方面;在农林业领域,非制冷红外热成像系统可以用于森林草原火灾预警、农作物估产、病虫害探测与预警等;在准军事领域,非制冷红外热成像系统可以用于公安、消防、海关缉私、预警监控、搜索救援等方面。如美国通用汽车公司在部分凯迪拉克轿车上配备了Raytheon公司的非制冷热像仪,用于夜间特别是恶劣天气下路况观察;CEA/LETI和ULIS公司研究人员一直致力于其探测器产品在汽车驾驶上的应用。Indigo系统公司于匹斯堡矿业安全器械公司合作开展了其非制冷热像仪在火灾预防的应用和推广工作。这些都是制冷型热成像系统因为其高昂的价格目前无法打入的市场。随着我国经济的快速发展,特别是重工业和制造业的蓬勃发展,国内对低成本红外热成像系统的需求量也在逐年增加。

1.4 国内外非制冷热成像技术发展差距与战略对策

西方发达国家的红外热成像技术已经非常成熟,在技术水平上处于绝对领先地位。相比较而言,我国的红外热成像技术则起步较晚,比西方发达国家落后十年以上。

我国于20世纪90年代初完成了第一代红外热成像组件的研制,开始少量装备部队,产品性能与国外第一代的相当,在红外热成像技术领域实现了从无到有的转变;目前,二代红外热成像器件尚处于实验室阶段,还无法装备部队。

与此同时,西方国家对我国进行严密的技术封锁。美国《出口管理法》明令规定,禁止向中国出口任何可能用于军事目的的产品和技术。依据欧盟对华军售禁令,任何盟国不得向中国出口军事产品和军事技术。而西方国家内部军事产品和军事技术交流频繁。例如,美国批准Honeywell公司将其基于VO_x的非制冷红外探测器技术转让给日本NEC公司和加拿大INO公司,美国ICC公司获得了澳大利亚国防部的授权,引进了基于非晶硅的非制冷红外探测器技术。目前,可以出口我国的红外成像器件主要是法国ULIS公司的160×120、320×240和384×288的非制冷探测器以及美国的部分非制冷探测器,它在欧盟属于商业级产品。

随着我国对红外探测器及热成像系统需求的不断加大,这种供需矛盾将会日益明显。尽管国外的非制冷红外热成像系统可以进入国内市场,但价格比较昂贵,且不一定满足需要(如枪瞄)。如果完全依赖国外,势必受制于人。面对复杂国际形势,我们不得不未雨绸缪,做好两方面的准备。一方面,要立足自我,加大投入,加速发展,开发不同类型的红

外焦平面探测器,满足不同需要:①发展高性能、大面阵制冷型红外探测器技术,满足军事需求;②发展低成本、高性价比的非制冷红外探测器技术,满足低端军事需求和民用市场。另一方面,在目前国内焦平面技术发展相对落后的情况下,引进允许我国进口的非制冷红外焦平面阵列,利用我国现有的信息技术和微电子技术,研制自己的非制冷热成像系统,用最低的成本,满足目前我国军队和民用市场的迫切需求。

第2章 红外辐射理论

红外物理的基本内容包括红外辐射、常见的红外辐射源、红外辐射的基本规律、红外辐射的大气传输等基本概念和内容。

2.1 红外辐射及辐射源

任何物体,其内部的带电粒子都是处于不停的运动状态的。当物体具有一定的温度,即物体的温度高于热力学温度 0K 或 -273°C 时,它就会不断地像周围进行电磁辐射。物体的自发辐射,在常温下主要是红外辐射。红外辐射俗称红外线或红外光,它是人眼看不见的光线,具有强烈的热作用,故称为热辐射。根据习惯和方便,在热成像技术中,也不严格地将红外辐射与热辐射两个名词等同使用。在遥感技术中,习惯上将长波红外波段称为热红外波段。

物体的热辐射特性主要由物体的温度决定,故又称为温度辐射。物体的温度辐射特性是光学温度传感和光电传感的基础。在电磁波谱中,通常将波长在 $0.75\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ 之间的电磁波称为红外光谱,对应的频率范围大致在 $4 \times 10^{14}\text{Hz} \sim 3 \times 10^{11}\text{Hz}$ 。

红外辐射具有与可见光等其他波段的电磁波相同的物理性质,例如有波动性和量子性的双重特征。红外辐射的波动性表现为反射、折射、干涉、衍射和偏振等。红外辐射的量子性表现为黑体辐射和光电效应。在考虑红外辐射的发射和吸收时,只有将其视为“分立的微粒——光子”的集合体才能进行完整的解释。一个光子的能量为 $h\nu$ (h 为普朗克常量,其值为 $6.6272 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$, ν 为频率),光子频率越高或波长越短,光子能量也就越大。量子力学首先就是在黑体辐射理论上取得突破的。此外,只能用红外辐射量子特性,才能进行红外辐射的光电效应分析。

与可见光相比,红外辐射的特殊性在于其波长长,具有更加明显的绕射、衍射等效应,更有利于在大气内传播。此外,其光子能量与构成物质的分子、原子热运动的能量大致相当,更容易被吸收和发射。与雷达的电磁波相比,红外辐射的特殊性在于其波长短,量子效应、热响应明显,因此,可研制出与可见光成像器件类似的探测元尺寸足够小的红外焦平面探测器。

在红外光谱学中,一般将红外波段分成近红外、中红外和远红外三个波段。具体划分如下(在红外光谱学中,习惯用波长的倒数——波数作为波长单位):

近红外波段: $0.78\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ ($12821\text{cm}^{-1} \sim 4000\text{cm}^{-1}$),对应电子低能级、振动谐波能量;

中红外波段: $2.5\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ ($4000\text{cm}^{-1} \sim 200\text{cm}^{-1}$),对应分子振动能量;

远红外波段: $50\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ ($200\text{cm}^{-1} \sim 10\text{cm}^{-1}$),对应分子转动能量。

近红外波段可以用光电倍增管探测,有时也将其称为电子红外。中红外波段一般用卤化物晶体制成的棱镜进行分光和测量,有时将其称为棱镜红外。在远红外波段没有合适的棱镜材料,只能采用衍射光栅进行分光和探测,所以也将其称为光栅红外。

因不同波长的红外辐射与大气分子的相互作用不同,所以,不同波长的红外辐射在大气中的传播特性不同。在热成像技术中,也按波长和大气对红外辐射吸收将红外辐射分为三个波段:短波红外(SWIR): $1\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$;中波红外(MWIR): $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$;长波红外(LWIR): $8\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 。

这三个波段是大气选择性吸收形成的“大气透射窗口”。室温物体的红外辐射集中在中波红外和长波红外波段。在该光谱区的红外辐射来自于构成物质的分子和原子与热运动对应的振动和转动能级之间跃迁的自发辐射,振动和转动的能量大致与室温能量相当。因此,即使是室温物体,其温度也可以使物体具有足够的热能激励其发射波长在中、长波红外辐射。从狭义上讲,这是把中波红外和长波红外辐射称为热辐射的理由。

理想的红外辐射源是黑体。黑体是一个与环境达到热平衡并能吸收入射到其上的一切辐射能物体。黑体的最大特征就是所发射的辐射能等于所吸收辐射能。黑体的辐射能量是温度、波长的连续函数。当温度足够高时,黑体也可以辐射包括可见光在内的电磁波。作为对理想黑体的一个近似,在一个内表面温度均匀的足够大的空腔表面开一个小孔,就构成一个实际性能非常接近理想状态的黑体。普朗克定律准确地描述了黑体辐射的规律。黑体的发射率等于1。对实际红外辐射源的分析可以在黑体辐射理论的基础上加以修正。

实际红外辐射源有灰体和选择性辐射体两大类。灰体是不能吸收入射到其上的一切辐射能的吸收体,其发射率为常数,但小于1。选择性辐射体的发射率是波长的函数,为 $0 \sim 1$ 。

2.1.1 太阳辐射

太阳是自然界中的第一红外辐射源。大气层外太阳辐射与5900K黑体辐射曲线如图2.1所示。

太阳辐射与温度为5900K黑体最接近,峰值波长约 $0.5\mu\text{m}$ 。由于太阳的辐射在通过大气层时,受到大气成分的吸收和散射,致使到达地面的仅是 $0.15\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 的波长范围内辐射,该波长范围内的辐射占总到达地面的辐射能量的98%。在平均日-地距离处(距太阳约 $1.5 \times 10^8\text{km}$),99%的太阳辐射能量集中在 $0.276\mu\text{m} \sim 10.94\mu\text{m}$ 的波长范围内,垂直于太阳辐射的单位面积、单位时间所接收到的太阳辐射能(称为太阳常数)的统计平均值为 $1390\text{W}/\text{m}^2$ 。

太阳对地表的辐照度,随季节、不同地理区域、云量和大气状况等不同,可在很大范围内变化。

2.1.2 地球红外辐射

地球是自然界中仅次于太阳的红外辐射源。地球的大气温度通常在200K~300K范围内,可视为温度为280K的灰体,其热辐射的峰值在 $10\mu\text{m}$ 处。

在白天,地球表面的红外辐射由两部分构成:反射和散射太阳辐射;地球自身的红外