

**Infrared Polarization Imaging
Technology and Application**

红外偏振成像 技术与应用

李军伟 陈伟力 徐文斌 逯祎/著



科学出版社

红外偏振成像技术与应用

李军伟 陈伟力 徐文斌 逯 祎 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从红外辐射机理出发,探讨分析了目标表面的红外偏振特性、偏振成像系统的标定、偏振图像处理的主要方法以及偏振探测的典型应用。具体内容包括:红外辐射偏振产生的机理及其应用,常用的红外偏振成像系统(包括偏振成像器件、偏振成像构成方式等),红外偏振探测与标定处理方法,红外辐射偏振传输建模分析,影响目标表面红外偏振特性(偏振度、偏振角)因素分析,红外偏振数据处理、偏振图像处理方法(包括融合、颜色重构以及评价方面),基于偏振特性的目标检测与识别应用等。

本书可作为从事光学测试、红外辐射探测、光电子技术方面工作的科研人员和工程技术人员的参考资料,也可作为高等院校、科研院所的光电检测、光学工程、信息科学等相关专业的专业用书,还可作为一般读者了解红外辐射偏振成像技术的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

红外偏振成像技术与应用/李军伟等著. —北京:科学出版社, 2017. 8
ISBN 978-7-03-054116-1

I. ①红… II. ①李… III. ①偏振-红外图象-研究 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 190652 号

责任编辑:钱俊 胡庆家/责任校对:彭涛

责任印制:张伟/封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 8 月第一次印刷 印张:18

字数:360 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

光波中蕴含着丰富的信息,不仅包括强度、相位、频率信息,也包含偏振态信息。偏振是光波的重要基本特性之一。人眼在不借助任何仪器设备的情况下,是无法直接感知到光波的偏振态信息的,但地球上有很多种类的动物,却拥有偏振感知能力。随着人们越来越深刻地认识自然世界,对光电探测系统探测精度的要求也越来越高。而当被探测目标由于某种原因不想被探测到时,其背景也越来越复杂,这就迫切需要人们不断开发和研究新的方法和手段去提高复杂背景下目标的探测识别能力。红外偏振成像技术正在逐步成为国内外成像技术研究的热点话题,这是因为它在军事以及民用上均有较为重要的应用价值。近年来,随着探测技术和传感技术的飞速发展,红外探测的精度越来越高。但是,即使探测灵敏度有较大提高,受杂乱背景信号、目标特性等诸多因素的影响,发现和识别目标的概率仍然较低。例如,如果把与目标物温度相差无几的噪声源放在目标物周围,那么就使得现有的红外探测设备无法识别目标物。为了寻找解决这种问题的有效办法,将“偏振成像”引入红外领域。

红外偏振成像技术是最近二十年来兴起的新型红外成像技术,偏振成像将对光辐射的探测由强度、光谱拓展至偏振矢量领域。红外偏振成像能够反映一部分材料的表面几何与折射率特性,提高红外成像系统对目标的探测、识别与区分能力,其主要利用目标与背景的红外辐射偏振特性差异实现目标探测与识别,为隐蔽和伪装目标的探测识别提供了新的技术途径。热红外偏振成像技术发展之初,人们对红外辐射是否存在偏振特性持怀疑的态度,但是随着理论以及探测水平的提升,热红外偏振成像技术在民用,特别是在军事方面得到了广泛的应用,主要有伪装探测、海上搜救、地雷检测等。我国也和世界上许多国家一样在红外偏振成像技术发展与应用方面取得了很大进展,并且与高光谱探测、水声探测等技术结合,开拓了更多新的研究领域。

从目前的技术发展来看,国内外红外偏振成像的技术手段多采用旋转线栅探测的结构。与线栅结构相比,微偏振阵列具备同时探测的能力,故更具有优势,但由于制作工艺的限制,并没有得到大范围的推广使用,这也是未来迫切需要解决的主要问题。

作者及其研究团队对红外偏振成像技术进行了系统的研究,积累了大量红外偏振方面的宝贵数据,该书就是他们以红外偏振成像为主题,从理论分析、建模研究、定标处理以及探测识别应用等方面的关键技术进行翔实和系统论述的一部专著。该书重点聚焦了红外偏振传输及融合重构方面的难点问题,就理论推导、建

模仿真、定量处理与特征识别等进行了深入的阐述。该书是该实验室多年研究成果的系统总结、凝练和提升。

该书的出版对我国红外偏振成像技术的研究和发展具有指导意义,也会对红外偏振成像领域的学术交流起到积极的促进作用。另外,对高等院校以及科研院所的研究和教学工作也能提供很有价值的参考。

宣益民
2017年1月

前 言

图像信息一直是人们认识大千世界、识别关注对象的重要依据,但随着客观世界复杂度的不断提升,单一的图像特征信息必须结合其他特征信息才能满足实际应用需求,偏振成像技术便在此条件下应运而生,为人们观测地物、认识世界提供了一种新的便利途径,受到了国内外学者的广泛关注。

随着科学技术的发展,偏振成像技术在光谱通道上依次经历了全色影像、多光谱和高光谱影像的发展,在波谱范围上经历了从可见光到近红外、中/远红外的过渡。在目前的偏振成像探测中,使用最多的波段为可见光波段,可见光偏振成像设备及相应的数据处理技术目前已发展得较为成熟,但可见光波段易受天气、环境、干扰、距离等因素的影响,并且很多活动在地面、水面和空中的军事装置,如坦克、车辆、军舰、飞机等,往往都是强红外辐射源,因此,红外偏振成像探测技术越来越受到重视。

由于受红外探测器制造工艺及相关技术的限制,红外偏振成像设备的研制起步较晚,受设备自身及传输过程中各种外界因素的影响,相比于可见光偏振,红外偏振设备的定标与校正、数据的获取与测量以及数据的处理与分析更为复杂,目前国内还没有专门介绍红外偏振从数据获取到数据处理、分析、建模及应用完整流程的专著。本书是系统完整地介绍红外偏振成像的专著,在结构上力求体现完整性和系统性。

全书共12章。第1章介绍了偏振技术和红外成像技术的发展历史,重点介绍了红外偏振成像技术的产生与发展。第2章从电磁场角度分析偏振机理,介绍描述光波偏振态的方法和偏振成像的原理,并针对红外偏振成像技术的特点讨论分析其应用方向及领域。第3章介绍了国内外偏振成像设备的发展历史,列举了偏振器件的种类、典型红外偏振成像系统的技术方案,重点介绍了几种典型的国内外偏振成像设备。第4章基于微面元理论的双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)模型,研究建立了包含反射和辐射信息的红外偏振辐射传输方程,利用实测数据对模型进行了验证分析。第5章分析了目标表面粗糙度、辐射温度、表面发射率、探测角度等因素对目标红外偏振度特性的影响,同时分析了目标红外偏振角特性的影响因素。第6章介绍了红外偏振测量原理和系统组成,给出了测量系统的建立过程和部件选取方案,设计了静态和动态测试试验方案及特性数据获取流程。第7章介绍了红外偏振成像系统的辐射定标、偏振定标以及大气校正方法等,并对光谱偏振数据的定标进行了详细介绍。第8章讨论了红外偏振图像的融合方法,并开展了图像融合实验和融合图像质量

评价。第9章基于偏振可视化的概念介绍了基于颜色空间的偏振图像重构方法,并就偏振图像重构效果分析了重构方法的有效性。第10章详细介绍了红外偏振数据的处理方法及处理流程,设计并实现了红外偏振成像数据处理与分析软件系统。第11章介绍了基于偏振特性及偏振光谱特性检测识别的基本理论和基本方法,并通过实例展示了检测与识别效果。第12章根据需求牵引与技术推动的原则对后续技术发展进行了展望。

本书是作者及其研究团队多年的研究成果,我们长期从事红外偏振成像测量、数据处理与分析工作,本书撰写内容是这些研究成果的结晶。本书由李军伟负责拟定章节大纲和全书的统稿、定稿工作。参与本书撰写的还有陈伟力、徐文斌、逯祎等研究团队成员,在此一并表示感谢。

本书的写作与出版得到了刘忠领、董雁冰、朱振福等专家的指导。宣益民院士对本书的编写工作给予了热情的关怀与大力支持,并为本书作序,特致以崇高的敬意和衷心的感谢。韩玉阁教授对本书提出了许多宝贵建议,科学出版社钱俊编辑对本书出版给予了大力支持,在此均致以诚挚的谢意。

在本书相关内容的撰写中参阅了大量国内外文献资料,在此对这些文献资料的作者致以衷心的感谢。

尽管我们十分认真地、力争全面地介绍红外偏振成像的原理和数据处理方法,但是由于受掌握的信息和自身水平的限制,难免在论述上会有一些遗漏和不足,望广大读者不吝赐教。

李军伟
2017年1月

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 偏振技术的发展历史	1
1.2 红外成像技术的发展历史	5
1.3 红外偏振成像技术的产生与发展	7
1.4 小结	13
参考文献	13
第 2 章 红外偏振成像原理	16
2.1 基本概念与定律	16
2.2 红外偏振成像原理	27
2.3 红外偏振成像技术的特点	32
2.4 小结	39
参考文献	40
第 3 章 红外偏振成像设备	44
3.1 红外偏振成像设备的发展历程	44
3.2 红外偏振成像方式	46
3.3 红外偏振成像典型设备	60
3.4 小结	66
参考文献	67
第 4 章 红外辐射偏振特性建模与分析	70
4.1 反射偏振传输模型分析	70
4.2 辐射偏振传输模型研究	75
4.3 红外偏振辐射传输模型验证分析	79
4.4 典型目标的红外辐射偏振特性分析	83
4.5 小结	97
参考文献	98

第 5 章	红外偏振特性影响因素	99
5.1	红外偏振度影响因素分析	99
5.2	红外偏振角影响因素分析	115
5.3	小结	122
	参考文献	122
第 6 章	红外偏振成像特性测量技术	124
6.1	红外偏振成像测量技术的发展	124
6.2	红外偏振成像测量系统	128
6.3	红外光谱偏振测量系统	132
6.4	实验方案设计	139
6.5	特性数据获取	141
6.6	小结	142
	参考文献	142
第 7 章	红外偏振成像特性定标与校正	145
7.1	定标技术概述	145
7.2	系统定标	149
7.3	大气校正	169
7.4	小结	174
	参考文献	174
第 8 章	红外偏振图像融合技术	177
8.1	偏振图像融合的必要性的必要性	178
8.2	红外偏振图像融合的常用方法	179
8.3	红外偏振融合实验及融合图像质量评价	187
8.4	小结	194
	参考文献	194
第 9 章	红外偏振图像重构技术	196
9.1	偏振图像重构基本概念	196
9.2	偏振图像重构方法	198
9.3	偏振重构图像的评价指标	203
9.4	小结	208
	参考文献	208

第 10 章	红外偏振成像数据处理技术	211
10.1	红外偏振数据处理方法	211
10.2	红外偏振数据处理流程	235
10.3	红外偏振数据处理软件	235
10.4	小结	237
	参考文献	238
第 11 章	基于红外偏振特性的检测与识别应用	241
11.1	偏振特性检测与识别应用	241
11.2	偏振光谱检测	244
11.3	偏振光谱识别	263
11.4	小结	271
	参考文献	271
第 12 章	展望	274
12.1	从单类型数据到协同数据发展	274
12.2	从定性到定量分析处理	276

第 1 章 绪 论

红外成像技术是当今迅速发展的高新技术之一,其通过探测目标与背景的红外辐射强度差异,实现对目标的发现、识别和跟踪^[1]。红外成像技术具有被动工作、抗干扰性强、目标识别能力强、全天候工作等特点,已被广泛应用于军事侦察、监视和制导方面。但由于地物、植被等背景往往具有与目标相当的辐射强度和辐射纹理,特别是随着光电对抗技术的发展,各种红外伪装措施尤其是红外迷彩技术的应用,使目标和背景的辐射特性发生改变,目标的红外热特征产生歪曲,严重影响红外成像探测系统的目标探测能力,因此,如何从复杂的背景和伪装物辐射中有效地探测和识别目标成为国内外迫切需要解决的问题,新的红外探测技术成为研究探索的主要方向之一。

实验表明:由于物体反射和电磁辐射的过程中都会产生由其自身性质决定的偏振特性,不同物体或同一物体的不同状态(如粗糙度、含水量、材料理化特征等)在热红外波段往往具有不同的偏振状态,利用目标表面辐射或反射偏振信息的红外偏振成像技术,可以综合获得目标的强度、偏振和图像等多维特征信息,有效提高目标与背景的对比如度,突出目标的细节特征,增强目标识别效果,更全面、深入地了解目标的属性和行为;自然物和人造物之间存在明显的红外偏振特性差异,这些差异可构成目标探测的新信息^[2-5]。因此,红外偏振成像技术逐步成为近年来国内外研究的热点,并在复杂背景下的目标探测中展现出广泛的应用前景。

本章首先介绍偏振技术和红外成像技术的发展历史,重点介绍红外偏振成像技术的产生与发展。

1.1 偏振技术的发展历史

光的本质是电磁波,具有波粒二象性。偏振是光的一个基本波动属性,它反映了光传播过程中电磁场的振动形式。由于电磁波是横波,所以光波中光矢量的振动方向总和光的传播方向垂直,在垂直于光传播方向的平面内,光矢量可能有各种不同的偏振状态,这种振动状态通常称为光的偏振态。光的偏振是普遍存在的,自然界中任何一个光子都是偏振的。虽然每个光子都有一个明确的偏振方式,但不同光子的偏振方式一般不同。

在光与地物相互作用的过程中,目标的表面结构、内部特征及观测角度的改

变都会使光的偏振特性发生相应的变化,利用这种变化可以更有效地识别地物。在自然界中,太阳光经过大气层时,会发生散射偏振,水体、冰雪、沙漠、植被等反射的太阳光也具有一定程度的偏振性,故在实际的测量中,进入到传感器中的光多数情况下是部分偏振光。1987年11月在美国约翰逊航天中心召开了关于偏振光遥感的学术讨论会,就目标表面反射和辐射传输,偏振遥感仪器,农业、地理、海洋、水文等领域对遥感的要求及天文遥感等进行了专门讨论。以后数年间,又有多次偏振与遥感的国际会议召开,使偏振遥感成为一个热点,许多国家都开展了相关研究与应用。

偏振探测技术方面,从20世纪70年代开始,国外先后发展了多种偏振光学探测设备。图1.1概况展示了国外偏振信息获取设备的技术发展与改进过程,偏振光学探测识别技术经过约40年的发展,具有以下趋势:在动态目标偏振探测方面,从“分时”向“同时、实时”发展;在军事目标特性与识别方面,在越来越多的军事应用领域,不断兴起针对偏振特性的探测与识别应用研究和验证;偏振探测和测量设备逐步实现轻小型、集成化和模块化。表1.1列举了国外6类偏振探测技术的发展历程。

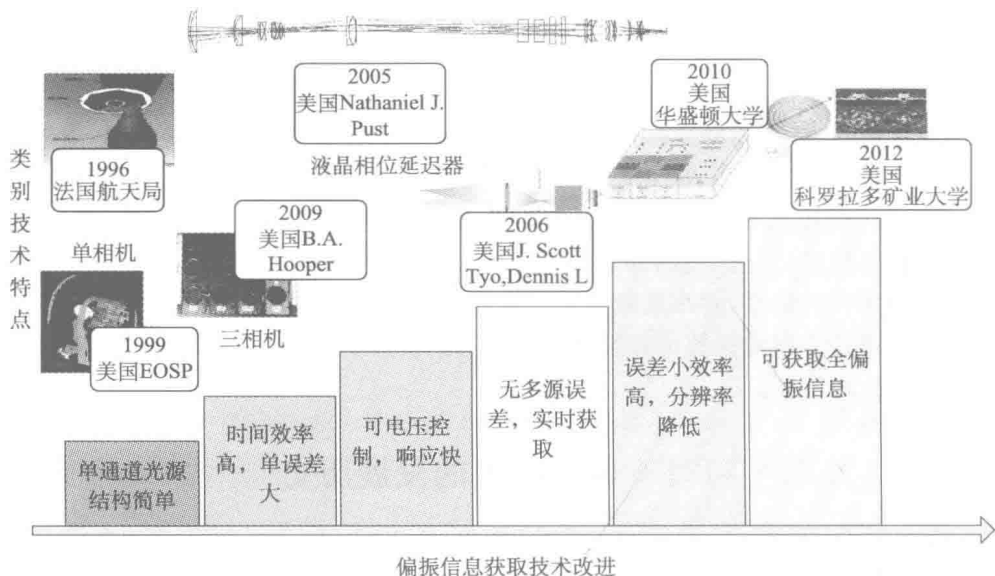


图 1.1 国外偏振信息获取设备的技术发展与改进过程

表 1.1 偏振探测技术发展历史

时间	类型	典型特征	典型应用领域
20世纪70年代	旋转偏振片型	时序式,机械旋转 体积中等,(准)静态成像	大气探测等

续表

时间	类型	典型特征	典型应用领域
20 世纪 80 年代	分振幅型	多光路、多探测器 体积庞大,可实时成像	地物探测等
20 世纪 90 年代	液晶调制/声光可 调滤波器型	时序式,电控旋转 体积小但光通量低,(准)静态成像	科学实验等
20 世纪 90 年代后期	分波前/分孔径型	多光路、单探测器 体积小,实时线偏振成像	地面监测等
2003~	通道调制型	单光路、单探测器 全偏振、实时成像、轻小模块化	着重面向军事应用
2010~	微纳器件型	单光路、单探测器 全偏振、实时成像、小型集成化	着重面向军事应用

在偏振仪器研究方面,1977 年 8、9 月份,美国先后发射了旅行者 1 号和旅行者 2 号,并在这两个遥感平台上装有光度偏振计。1978 年 5 月,美国发射了先锋金星轨道器,其上携带了光度偏振计,目的是进一步研究行星的表面与云层。同年,美国国家航空航天局(NASA)发射了雨云 7 号海岸带水色扫描仪(CZCS),载荷带有偏振镜头。1985 年,美国利用航天飞机对地开展了偏振摄影。1990 年年底,美国研制出地球观测扫描偏振计(EOSP),有 12 个探测通道,全部具有偏振分析功能,主要目的在于利用偏振光研究云的特性、气溶胶光学厚度,探索气溶胶粒径大小和光学性质的变化等。1991 年,NASA 研发了室内单叶的偏振光二向性反射测量装置,并进行了地面目标的测量与研究。1996 年,法国国家空间研究中心(CNES)研制出地球反射偏振测量仪(polarization and directionality of the earth reflectance,POLDER),具有 8 个测量通道,其中 3 个为偏振通道,主要探测云和大气气溶胶、陆地表面和海洋表面情况,能获得双向反射分布函数(BRDF)和偏振分布函数(BPDF)。1998 年,美国犹他州立大学空间动力实验室研制出红外超光谱成像偏振仪(hyperspectral imaging polarimeter,HIP),装载在空军 KC-135 型飞机平台上,用偏振法测定云顶 $2.7\mu\text{m}$ 水吸收带的后向散射太阳光光谱,获得 400 多幅对地观测的偏振图像。2003 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所研制成功了机载多波段偏振 CCD 相机,同年 12 月该相机搭载国产 Y-12 飞机进行了航空校飞试验,首次在国内获取了航空偏振图像。

在偏振图像特征研究方面,乔延利等基于自主研制的 CCD 成像仪,说明了偏振遥感信息在表达暗目标(或低照度)和人工建筑目标方面有更丰富的内涵。曹汉军等基于实验型偏振 CCD 相机,在自然光照条件下进行了自然目标和人工目标的偏振图像数据获取实验,结果显示偏振探测的特殊性质使其在军事侦察及伪装识别等方面有着广阔的应用前景。叶松等提出了一种采用 HIS 柱形彩色空间表征偏振遥感图像偏振信息的方法,研究表明 HIS 颜色空间能完整地表征偏振遥

感图像偏振信息,提高了偏振遥感图像的认识能力;同时,对航空偏振图像数据进行了图像大气散射校正实验,结果表明该方法能有效地进行航空遥感图像的大气散射校正,从而提高航空遥感图像的认识能力。

在对地观测偏振信息的研究方面,1987年,Grant指出树叶不是单纯的散射更不是单纯的镜面反射,而是两者都有,镜面反射发生在叶子表面,并探讨了如何利用偏振特性将镜面反射与散射分离的技术问题。同年,Woessner等也探讨了影响植被偏振特性的因素,研究表明偏振强度的大小受入射角及目标反射率的影响,并且偏振强度的大小与目标反射率的大小成反比。在研究植被偏振的同时,也研究了土壤的偏振特性,同样是偏振强度的大小与目标反射率的大小成反比。董国权等讨论了近年来最新发展的高分辨率微分光谱、偏振光光谱、激光光谱、荧光光谱和远红外细分光谱等几种新型的植被光学遥感方法。从这些方法的物理基础出发,分析了利用高分辨微分光谱技术探测植被反射光谱的“红缘”及冠层反射偏振度指数、植被冠层荧光指数等具体的遥感应应用方法。1998年,赵云升教授及其课题组全面系统地在地面偏振目标进行了深入研究,与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、北京大学遥感与地理信息系统研究所、中国科学院遥感与数字地球研究所等单位合作,取得以下研究成果。

1) 植被偏振反射研究

在对植被偏振特性的研究中,大量的研究都集中在叶片上,叶片表面的镜面反射和漫反射同时发生,而偏振光是由镜面反射产生的。为了将多角度信息与偏振信息相结合,赵云升等对植物单叶的偏振反射特性进行了研究,结果表明植物叶片的偏振反射特性与本身的性质、测量波长、观测角度有很大的关系。为偏振光遥感、多角度遥感的深入研究与应用提供了依据。

2) 岩矿偏振反射研究

赵云升等对橄榄岩、花岗岩等岩石表面的偏振反射进行了测量,发现光线入射角对岩石的反射、偏振反射影响很大。在空间水平方向,方位角对光谱具有极化特征,且也呈现椭圆分布规律。在空间垂直方向,竖直探测角随着光线入射角的不同而显著地影响着岩石的反射特征。解释了产生反射能量水平方向呈椭圆分布的机理,主要是由岩石表面镜面反射和漫反射的共同作用。为了对比岩石表面镜面反射和漫反射分量,赵乃卓进行了比较深入的研究,结果表明光线入射天顶角会对这两种反射起到一定的影响,且影响的强弱受岩石表面光滑程度和探测方位角的控制。

3) 土壤偏振反射研究

起初对土壤偏振反射特性的研究是在干燥土壤的基础上开展的,发现各类干燥土壤具有朗伯体反射特征。改变光线入射天顶角、探测器天顶角和波段时,各类干燥土壤同样没有偏振反射特征。对含水土壤进行偏振研究,发现含水土壤表现出偏振反射特性,含水土壤的偏振度随着土壤湿度的增加而增加。

4) 水体偏振反射研究

水体偏振研究起初是对不同液体表面的偏振反射测量开始的,赵云升等简明阐述了水、油等平静液体表面的偏振反射特征,分析得到影响液体表面偏振反射的主要因素有液体的种类、波段、方位角、探测角以及光线入射角,通过对不同浓度 LAS(直链烷基苯磺酸盐, linear alkylbenzene sulphonate)、不同污染水体与水面溢油的多角度偏振反射测量得出偏振特性是水体的一个固有特征。

1.2 红外成像技术的发展历史

可见光是人眼能够感知的电磁波,可见光的波长为 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 。比 $0.38 \mu\text{m}$ 短的电磁波和比 $0.78 \mu\text{m}$ 长的电磁波,人眼都无法感受。由于比 $0.78 \mu\text{m}$ 长的电磁波位于可见光谱红光以外,故称为红外线。红外线,又称红外辐射,一般是指波长为 $0.78 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的电磁波。其中波长为 $0.78 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的部分称为近红外,波长为 $2.0 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的部分称为中、远红外(热红外)。图 1.2 为电磁波谱图。

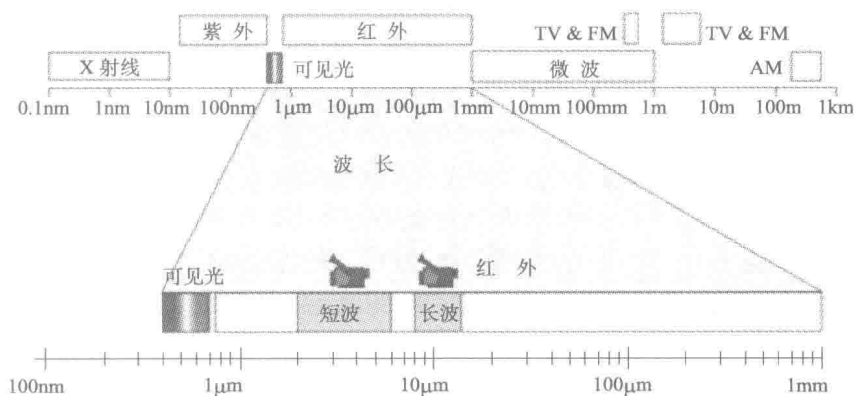


图 1.2 电磁波谱图

自然界中,所有温度在绝对零度(-273°C)以上的物体都会不停地向外辐射红外线。波长为 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外线在大气中透过性比较好,通常称其为“大气窗口”,因此大部分红外探测器件使用 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ (短波)和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ (长波)这两个波段。红外成像技术是一种红外辐射信息探测技术,它可以直观地显示不同物体或物体的不同部位具有的红外辐射特性差异,同时转换成可见光图像,实现将人类肉眼看不到的红外辐射信息向人类视觉感知范围内的可见光谱区转化,红外图像的实质是目标表面温度分布图像。

自 1800 年英国物理学家赫歇尔(Herschel)发现了红外线后,人类步入了应用红外技术的时代。热成像技术的兴起可以追溯到 20 世纪 50 年代。根据所有物体都在不停发射红外线的特点,各国竞相开发出各种红外热成像仪器。1959 年,美

国芝加哥大学率先研制成功第一台前视红外热像仪,60年代,美国的许多公司又相继研制出多种机载前视红外系统,并用于越南战场。60年代中期,瑞典 AGA 公司和瑞典国家电力局在红外成像的基础上,开发了具有温度测量功能的热红外成像装置。70年代,法国汤姆逊公司研制出不需制冷的红外热电视产品。70年代后期,受到电子技术和信号处理技术快速发展的推动,热成像技术获得突破性进展,至今已经历四代。

第一代红外成像系统主要由红外探测器(含制冷器)、光机扫描器、信号处理电路和视频显示器组成,采用单元红外探测器或线列红外探测器利用光机扫描系统实现二维成像。

第二代红外成像系统是20世纪80年代初由美国和西欧首先开始研制的,采用位于光学系统焦平面,具有 n 像元 $\times m$ 像元且带有信号处理的面阵探测器,即红外焦平面探测器阵列。这种焦平面阵列的优点是既能在焦平面上封装高密度探测器,又能在焦平面上进行信号处理。第二代红外成像系统组件与第一代通用组件相比,显著提高了系统的响应速度和分辨率,其视场更大、尺寸更小、质量更轻、可靠性更好,且应用范围更广。

第三代红外成像器件,即制冷式红外焦平面凝视式阵列日趋成熟,除32像元 \times 32像元和64像元 \times 64像元凝视式中波红外阵列外,512像元 \times 512像元、640像元 \times 480像元、1024像元 \times 1024像元、1968像元 \times 1968像元红外焦平面阵列已被广泛使用,4096像元 \times 4096像元的中波焦平面阵列即将推向市场。

而非制冷红外焦平面阵列的出现和应用则标志着红外成像技术的又一次革命,拓宽了红外成像技术的发展领域。非制冷红外焦平面阵列主要用于8~14 μm 长波段探测,其器件和整机系统应用技术发展迅速。各代红外成像技术的详细比较见表1.2。

表 1.2 各代红外成像技术发展

红外成像	波段和模式	探测器	阵列	特点
第一代	波段: 3~5 μm 或 8~12 μm ; 模式: 光机扫描、制冷器制冷	锑铟(InSb) (HgCdTe)	I类: 60/120/180 像元; II类: Sprite 探测器(扫机 型探测器)	采用通用组件红外探测器(含制冷器)、光机扫描器、信号处理电路和视频显示器
第二代	波段: 3~5 μm 或 8~12 μm ; 模式: TDK、扫描焦平面阵列、制冷器制冷	锑铟(InSb) (HgCdTe)	阵列: 50 像元 \times 4 像元、 100 像元 \times 32 像元	既能在焦平面上封装高密度探测器,又能在焦平面上进行信号处理,性能优于第一代通用组件。缺点是成本高,制造难度大

续表

红外成像	波段和模式	探测器	阵列	特点
第三代	波段: 3 ~ 5 μm 或 8~12 μm ; 模式: 红外焦平面凝视式阵列、 制冷器制冷	铟锑(InSb) 铂硅(PtSi) (HgCdTe) 量子阱红 外探测器	阵列: 64 像元 \times 64 像元、 256 像元 \times 256 像元、512 像元 \times 512 像元、640 像 元 \times 480 像元、1024 像元 \times 1024 像元、1968 像元 \times 1968 像元等	阵列敏感元件的尺寸 小于 20 μm , 这一类光 探测器的 D^* 很高。性 能优于第二代, 但成本 高, 制造难度大
第四代	波段: 3 ~ 5 μm 或 8~12 μm ; 模式: 非制冷式	热释电材 料氧化钒 (VO)	阵列: 320 像元 \times 240 像 元、640 像元 \times 480 像元 和 1024 像元 \times 1024 像元 等, 氧化钒辐射计阵列、 钛酸锶钽热电探测器	优点是可以在室温下 工作, 一般不需要制冷 器, 质量轻、功耗小, 可 靠性好。缺点是灵敏 度低、响应速度慢

目前热成像仪主要采用焦平面阵列技术, 集成数万个乃至数十万个信号放大器, 将芯片置于光学系统的焦平面上, 取得目标的全景图像, 无需光-机扫描系统, 极大地提高了灵敏度和热分辨率, 可以进一步提高目标的探测距离和识别能力。目前的发展水平大致为: 用于地面观察时, 一般可做到在 1500m 的距离上识别人, 2500m 的距离上识别车辆; 用于空中侦察时, 在 20km 高空可侦察到地面上的人群和车辆; 用于水面侦察时, 可发现 15~20km 远处的舰艇。

中国有关科研所在 20 世纪 70 年代已经开始对红外热成像技术进行研究, 到 80 年代初, 中国在长波红外器件的研制和生产技术上有了一定的进展。80 年代末和 90 年代初, 中国已经研制成功了实时红外成像样机, 其灵敏度、温度分辨率都达到了较高的水平。进入 90 年代, 随着几大民营红外企业的崛起与成长, 开辟了红外热成像技术应用发展的新阶段, 近几年来, 中国的红外成像技术应用得到突飞猛进的发展, 与西方的差距正在逐步缩小, 尤其在新技术的应用方面更可以说是独树一帜。

1.3 红外偏振成像技术的产生与发展

随着探测技术和传感器技术的发展, 红外探测的精度和灵敏度越来越高, 可以探测的目标温差越来越小。据资料显示, 现在最先进的热像仪, 其温度灵敏度已经达到了 0.05 $^{\circ}\text{C}$ 。虽然探测的灵敏度提高了, 但是, 由于杂乱背景信号的限制, 目标发现和识别的概率仍不是很高。比如, 在目标物周围放置温度相同的噪声源, 那么现有的红外热像仪就无法进行识别了。将偏振成像引入红外领域的目的就是为了解决这一问题。

由菲涅耳反射定律可知, 当非偏振光束从光滑表面反射时会产生部分偏振光, 而根据基尔霍夫理论, 热辐射也会表现出偏振效应。所以地球表面和大气中