

航天相机CCD/CMOS 成像系统设计

Design of CCD/CMOS
Imaging System for Space Camera

金光 曲宏松 郑亮亮 张贵祥 陶淑苹 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航天相机 CCD/CMOS 成像系统设计

Design of CCD/CMOS Imaging System
for Space Camera

金光 曲宏松 郑亮亮 张贵祥 陶淑苹 著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书围绕着 CCD/CMOS 光电探测器,阐述了航天相机 CCD/CMOS 成像系统的设计与实现。全书按照以下顺序展开:首先介绍 CCD/CMOS 光电探测器的基本工作原理,并详述了一种新的时间延迟积分(TDI)成像技术——数字域 TDI,同时说明了成像系统的关键技术指标;然后分别描述 CCD 与 CMOS 成像系统的具体设计,并对焦平面阵列设计与系统可靠性设计进行介绍;最后阐述了航天相机成像系统的总装与总测,同时对未来成像技术的发展进行了展望。

本书适合航空航天院所的工作人员、高校的在读学生及对航天相机技术有兴趣的人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

航天相机 CCD/CMOS 成像系统设计/金光等著. —北京:
国防工业出版社,2019.9

ISBN 978-7-118-11952-7

I. ①航… II. ①金… III. ①航天遥感-图象传感器-
成像系统-系统设计 IV. ①TP72②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 203143 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)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 彩页 1 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 170 千字

2019 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

人类在 20 世纪取得的一项重大进步就是实现了太空对地观测,即可从太空中对人类赖以生存的地球通过非接触探测的遥感方式进行观测,获取具有大量丰富信息的图像数据,为人类社会的可持续发展提供技术支撑与服务。航天相机成像系统作为一种重要的空间观测装备,已得到了世界多国相关领域越来越密切的关注,并开展了针对性研究,尤其随着商业航天技术的飞速发展,航天相机成像技术必将取得更大的技术进步,迎来更广泛的应用,发挥更加重要的作用,能够促进国家经济建设、军事等方面的蓬勃发展,也能为人们的日常生活提供技术服务与保障。

本书围绕着目前广泛应用的 CCD、CMOS 两种光电探测器开展了航天相机成像系统设计,介绍了该领域的相关知识与技术要点,内容涵盖了光电探测器技术、数字域时间延迟积分技术、成像系统关键指标、两种探测器的成像系统设计、相机系统的可靠性设计、相机系统的总装与总测等方面,并利用具体的航天相机实例,详细说明了成像系统的相关设计,可使读者能够对航天相机成像系统有更直观的了解,并通过对本书的仔细阅读,可为将来从事相关领域工作打下良好的基础。

本书由金光、曲宏松、郑亮亮、张贵祥、陶淑苹所著。在本书撰写过程中,得到了作者所在团队——中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间新技术研究部相关科研人员的大力支持,感谢杨秀彬、徐明林、谢晓光(以上人员按姓氏笔画排序)在编写像移补偿分析与仿真、焦平面拼接技术、焦平面热控技术等章节部分的辛勤付出,同时感谢王绍举、王天聪、冯汝鹏、朴永杰、刘春雨、李宗轩、吴勇、范国伟、周美丽、徐伟、常琳、解鹏(以上人员按姓氏笔画排序)在文献资料搜集与文稿校对等方面付出的辛勤劳动,在此向他们致以诚挚的谢意。

本书是编者根据实际的工程项目,并参阅了大量国内外参考文献基础上,结合近年来光电探测成像技术的主要发展编写而成的。本书涉及面较广,因编

者的专业范围、学识水平和时间限制,书中难免存在纰漏与不当之处,敬请广大读者批评指正。

最后,特别感谢国防工业出版社为本书的出版所提供的大力支持与帮助!

编者

2019年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天相机成像技术发展现状	1
1.2 航天相机成像技术发展趋势	6
1.3 本书的主要内容与安排	9
第 2 章 CCD/CMOS 光电探测器简介	10
2.1 CCD 光电探测器基本原理	10
2.2 CCD 光电探测器的主要技术指标	14
2.3 CMOS 光电探测器基本原理	20
2.3.1 CMOS 探测器结构与工作原理	20
2.3.2 CMOS 探测器发展	23
2.4 CMOS 光电探测器的主要技术指标	24
2.5 CCD 与 CMOS 探测器对比	26
第 3 章 基于数字域的时间延迟积分成像技术	29
3.1 时间延迟积分成像技术概述	29
3.1.1 电荷域 TDI	30
3.1.2 模拟域 TDI	31
3.1.3 数字域 TDI	32
3.2 基本数字域 TDI 算法	34
3.2.1 时序参数计算	37
3.2.2 基于 FPGA 的数字域图像延时叠加	40
3.2.3 对比分析	41
3.3 数字域 TDI CMOS 成像系统	42
3.4 数字域 TDI CMOS 成像系统功能简介	43
3.5 数字域 TDI CMOS 与 TDI CCD 成像系统性能比较	44

3.6	“卷帘快门效应”分析	46
第4章	航天相机成像系统关键技术指标	49
4.1	焦距与相对孔径	49
4.2	视场角	49
4.3	曝光时间	50
4.4	数据率	51
4.5	信噪比预估分析	51
4.6	像移补偿分析与仿真	52
4.6.1	高精度像移补偿数学模型	53
4.6.2	数学仿真及分析	57
4.6.3	高精度像移补偿模型总结	63
第5章	航天相机 TDI CCD 成像系统设计	64
5.1	TDI CCD 成像系统总体设计	64
5.2	CCD 探测器	66
5.3	供电电源系统设计	68
5.4	驱动单元设计	70
5.4.1	原始驱动信号的产生	70
5.4.2	驱动放大电路设计	71
5.5	预放单元设计	72
5.6	CCD 信号处理单元设计	73
5.6.1	视频处理电路设计	73
5.6.2	FPGA 电路设计	76
5.7	图像数据输出接口设计	78
5.8	通信接口设计	80
第6章	航天相机 CMOS 成像系统设计	81
6.1	航天相机 CMOS 成像系统概述	81
6.2	CMOS 探测器	82
6.3	供电系统设计	85
6.4	数字处理电路设计	86
6.5	图像数据输出接口设计	89

第 7 章	焦平面阵列设计	92
7.1	焦平面拼接技术	92
7.2	焦平面热控技术	94
7.2.1	焦平面热控技术概述	94
7.2.2	航天相机焦平面组件热设计难点	95
7.2.3	工程设计案例	95
7.2.4	详细设计方案及分析	99
第 8 章	航天相机成像系统空间环境适应性及可靠性设计	104
8.1	电磁兼容性与空间静电防护设计	104
8.1.1	设计思路	104
8.1.2	电磁兼容性设计实施	104
8.2	航天相机系统可靠性设计的保障措施	106
8.3	环境适应性分析与设计	107
8.3.1	抗辐射设计	108
8.3.2	单粒子效应防护设计	108
8.3.3	内带电效应防护	109
第 9 章	航天相机成像系统总装与总测	110
9.1	焦平面安装与测试	110
9.2	整机传函测试	111
9.3	辐射定标	113
9.4	外场成像试验	118
9.5	在轨测试	119
第 10 章	展望与趋势	121
10.1	超高速光电探测器发展趋势	121
10.2	一体化发展趋势	121
10.3	智能化发展趋势	122
参考文献		123

第 1 章 绪 论

1.1 航天相机成像技术发展现状

目前,随着科学技术的快速发展与进步,人类对未知目标的探索已具有多种方式,可谓“上天、入地、下海”,能够及时获取所期望的数据信息。在这几种探测方式中,基于航天相机成像技术的空间探测方式越来越受到关注,已发展成目标探索与感知的有效手段,并且随着商业航天技术的蓬勃发展,该方式将会具有重要的民用与军事应用价值。

航天相机成像技术是指从距离地面 100km 以上的高空利用成像系统对兴趣目标进行探测以获取相关信息的技术。由于目标的种类及其所处环境条件的差异,其具有反射、散射或辐射不同波长电磁波信息的特性,航天相机成像系统正是利用这一固有特性,收集目标的电磁波信息并利用相应探测器将其转换为电信号,再进行信号的处理、存储与分析,完成目标的定性、定位或定量的描述,获取目标的空间、时间、光谱等信息,以供用户进行分析、处理与判读。

航天相机成像系统通常分为紫外线、可见光或红外等相机系统。基于可见光的成像技术可以更直观地获取目标的数据信息,因此是当前常用的目标探测方式之一。目前基于可见光的光电探测器主要有电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 和互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 两种。

CCD 是一种技术成熟、应用广泛的半导体成像器件,是目前高端数字摄像的主要元件,其能在入射光的激励下产生并存储光生电荷,当对 CCD 的电极施加特定驱动时序脉冲时,所存储的电荷便能按指定的顺序定向输出,从而实现图像的扫描输出^[1]。CCD 探测器具有体积小、集成度高、性能稳定、抗振动、抗电磁干扰等特点,这使得其在航空航天遥感领域也备受青睐。

按照像元的排布方式,两种探测器都可以分为面阵与线阵两类,前者在完成曝光后,探测器每次输出一幅面阵图像,后者则每次输出一行线阵图像。随着技术的不断发展,为解决常规线阵探测器灵敏度不足的问题,在 20 世纪 70

年代一种新型的线阵探测器——时间延迟积分电荷耦合器件(TDI CCD)应运而生,其是一种具有时间延迟积分功能的光电探测器。该器件可通过对同一目标进行多次扫描实现曝光电荷的累加,具有高灵敏度、高动态范围、低噪声等特点。

在实际的在轨应用中,面阵探测器与线阵探测器也有着不同的用途。对于面阵探测器,航天相机通常采用视频的成像方式,利用该方式可获取目标的动态信息,如运动速率、方向等;缺点是只能观察一个较小的局部区域。对于线阵探测器,航天相机则通常采用推扫的成像方式,利用该方式可获取较长的观测数据条带;缺点是只能获取目标的静态数据,不具有动态信息。

航天相机 CCD/CMOS 成像系统具有的诸多优点、多种灵活的成像模式,使其在国土普查、资源探测、地理测绘、考古调查、海洋海事、城市规划、减灾防灾、农林业监控、军事侦察、空间防卫等领域得到了广泛应用,发挥出巨大的军民应用价值。因此,世界各国均非常重视该项技术的发展。

目前,世界上已有多个国家先后多次成功发射了光学遥感卫星,装载了不同性能指标的航天相机。

美国 Digital Globe 公司先后发射了 3 颗 WorldView 系列卫星,如图 1-1 所示,各卫星相机系统的主要技术指标如表 1-1 所列。



图 1-1 WorldView 系列卫星

美国 Skybox 公司采用了完全不同的成像方式获取目标信息,该公司研制的卫星 Skysat-1 与 Skysat-2 分别于 2013 年和 2014 年发射入轨,如图 1-2 所示,具有视频成像方式和数字延迟积分的推扫成像方式实现图像数据的采集,后一种方式是卫星在轨利用面阵推帧(push frame)模式获取大量高重叠率的面阵图像,再通过地面处理,在序列图像配准的基础上,对相同目标点成像像元处理提

升信噪比,实现类似 TDI 的成像效果,获得高质量的二维图像^[2]。Skysat 也是首个使用面阵 CMOS 探测器实现 1m 级高分辨率的对地观测卫星。

表 1-1 WorldView 系列航天相机主要技术指标

指标	WorldView-1	WorldView-2	WorldView-3
发射时间	2007 年	2009 年	2014 年
轨道高度/km	496	770	617
探测器	TDI CCD	TDI CCD	TDI CCD
成像方式	推扫	推扫	推扫
分辨率/m	0.5(全色)	0.46(全色) 1.84(多光谱)	0.31(全色) 1.24(多光谱)
幅宽/km	17.6	16.4	16.4
量化等级/bit	11		
影像波段	全色		
	—	8 波段多光谱	
	—	—	8 波段 SWIR 12 波段 CAVIS

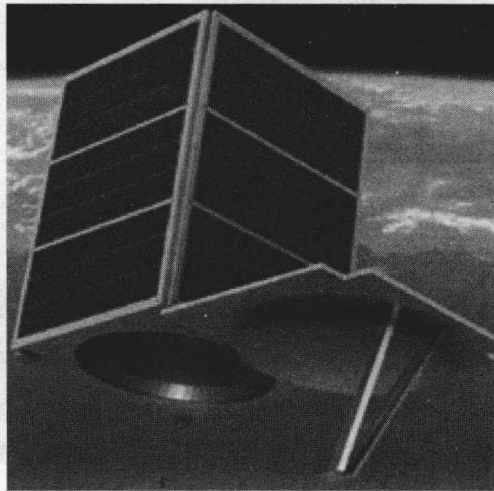
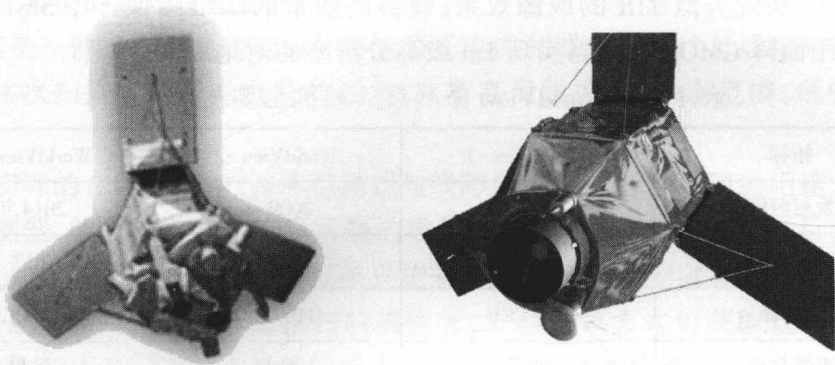


图 1-2 Skysat 微小卫星

法国 EADS Astrium 公司主要运营大宽幅的 SPOT 系列和高分辨率的 Pleiades 系列光学遥感卫星,如图 1-3 所示。各卫星相机系统的主要技术指标如表 1-2 所列。



(a) Spot6/7卫星

(b) Pleiades卫星

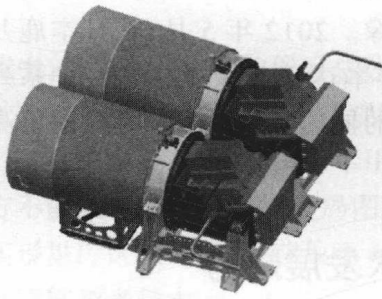
图 1-3 Spot 卫星与 Pleiades 卫星

表 1-2 Spot 及 Pleiades 卫星相机主要技术指标

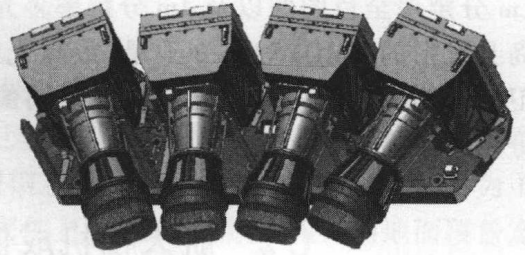
	SPOT6/7	Pleiades-1A/1B
发射时间	2012/2014 年	2011/2013 年
轨道高度/km	694	
探测器	TDI CCD	
成像方式	推扫	
分辨率/m	1.5(全色) 6(多光谱)	0.5(全色) 2(多光谱)
幅宽/km	60	20
量化等级/bit	12	
影像波段	全色多光谱	全色多光谱

中国的高分辨率对地观测系统重大专项(简称高分专项)规划了一系列高分卫星。其中,“高分”一号(GF-1)卫星于2013年4月发射升空,是高分辨率对地观测的首发星,其上装载了2台全色多光谱高分辨率多光谱相机和4台宽覆盖多光谱相机,如图1-4所示,6台相机相互配合,使“高分”一号卫星具有“高分辨率与大视场相结合,多载荷图像拼接融合应用”的特点。

“高分”二号(GF-2)卫星于2014年8月成功发射,标志着我国民用遥感卫星进入亚米级时代。“高分”二号卫星配置了2台相同的分辨率为1m全色/4m多光谱组合而成的相机。相机采用了小相对孔径的设计理念,质量和体积为传统方案的1/3,达到国际先进水平。



(a) 高分辨率多光谱相机



(b) 宽覆盖相机

图 1-4 “高分”一号卫星的高分辨率多光谱相机与宽覆盖相机示意图

“高分”四号(GF-4)卫星于2015年12月成功发射,运行在地球静止轨道,卫星配备了1台面阵CMOS相机,并首次采用了可见光近红外和中波红外共口径技术,可见光近红外谱段地面分辨率优于50m,中波红外谱段分辨率优于400m。该卫星可覆盖以南海为中心的广大区域,可观测面积大,能长期对某一地区固定连续观测。

“高分”五号(GF-5)卫星于2018年5月成功发射,是我国第一颗高光谱综合观测卫星,如图1-5所示。该卫星设计运行于太阳同步轨道,轨道高度705km,主要用于获取从紫外到长波红外谱段的高光谱分辨率遥感数据产品,是实现高分专项“形成高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率和高精度观测的时空协调、全天候、全天时的对地观测系统”目标的重要组成部分。

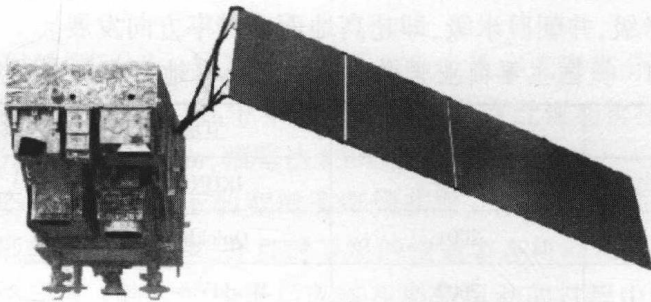


图 1-5 “高分”五号卫星在轨运行示意图

日本也积极发展小卫星高分辨率成像技术。2014年11月发射了具备新系统结构的“先进观测卫星”-1,该卫星质量小于500kg,全色分辨率优于0.5m、多光谱分辨率优于2m,成本约为美国WorldView-2的1/5,具有高分辨能力、高敏捷能力、低成本和小型化的特点^[3]。

韩国以“韩国多用途卫星”(KOMPSAT)系列卫星为主要发展项目。

2006年7月,在俄罗斯联邦普列谢茨克发射的KOMPSAT-2卫星可获取1m分辨率全色图像以及4m分辨率多光谱图像。2012年5月,在日本鹿儿岛县发射的KMOPSAT-3卫星,最高光学分辨率达0.7m。KOMPSAT系列卫星在为韩国政府和军方提供卫星图像服务的同时,还向全球用户销售高分辨率图像。

1.2 航天相机成像技术发展趋势

围绕着商业、民用及军事应用等需求,人们期望获取更清晰、视场更宽广、信息量更大的遥感图像数据,因此,航天相机的技术指标也在不断地提升,主要体现在地面分辨率、幅宽、光谱分辨率等方面。

1. 超高地面分辨率

地面分辨率是指航天相机的每一个像元所覆盖的地面宽度,其计算公式为

$$GSD = \frac{Ha}{f} \quad (1-1)$$

式中: H 为航天相机与地面间的距离,即轨道高度; a 为像元的几何尺寸; f 为相机光学系统的焦距。

该指标决定了系统所能分辨目标的能力,即空间分辨率。

为了获取更多的目标信息,进一步提升对目标的认知度和辨识度,人们对地面分辨率指标的要求越来越高。表1-3列举了近年来美国主要商业光学遥感卫星及其地面分辨率指标的情况,可以看出地面分辨率逐渐由米级迅速提高至亚米级、分米级,并朝厘米级,即超高地面分辨率方向发展。

表1-3 美国主要商业光学遥感卫星及其地面分辨率发展情况

序号	时间/年	卫星	地面分辨率/m
1	1999	IKONOS	1
2	2001	Quickbird	0.61
3	2007	WorldView-1	0.5
4	2008	Geoeye-1	0.41
5	2014	WorldView-3	0.31

2. 超宽覆盖

航天相机的地面覆盖宽度是指相机全部感光像元所覆盖的地面宽度,其计算公式为

$$W = \frac{NH\alpha}{f} \quad (1-2)$$

式中: N 为有效拼接的像元总数。

该指标决定了系统所能观测的区域范围。

在海湾战争中,美国的军用侦察卫星地面覆盖宽度不足 10km,导致美国军方不能及时获取战场的全局图像情报信息,严重影响了战略决策。因此,为了实现更广区域的观测,获取更多的数据信息,人们期望航天相机的地面覆盖宽度能够越来越大。

当前,主流的宽幅成像方式有以下四种。

(1) 多片探测器拼接增大相机的有效视场。多片探测器在焦面上很难直接按照一条直线进行物理排列,通常采用视场拼接或光学拼接的成像系统设计方式。视场拼接方式将多片探测器在焦平面上装配成上下交错的双列,以 QuickBird、IKONOS、“资源”一号 02C、“天绘”一号(TH-1)等卫星所搭载的高分辨率多光谱相机为代表。光学拼接方式通过分光等模式将焦平面上交错安装的多片探测器形成一条近似直线的连续扫描阵列,如 Pleiades、“资源”三号(ZY-3)等卫星上搭载的高分辨率多光谱相机采用的就是光学拼接成像系统设计^[4]。

(2) 多相机多角度视场拼接。为了更大程度地增加覆盖能力,国产高分辨率遥感卫星常采用多相机拼接成像技术,即将多台视场重叠的 CCD 线阵相机沿垂轨方向安置,同时对地推扫成像,实现高分辨率与宽覆盖的结合,以“北京”一号(BJ-1)、“资源”一号 02C、“高分”一号(GF-1)、“高分”二号(GF-2)等卫星为代表。

2013 年发射的“高分”一号卫星装备了 2 台全色多光谱高分辨率多光谱相机和 4 台宽覆盖多光谱相机,其中 4 台多光谱相机通过视场拼接的方式,实现了星下点地面分辨率优于 16m,幅宽达 830km。

(3) 卫星姿态快速机动下的宽覆盖影像获取。以美国为首的西方航天大国都在大力发展新型敏捷卫星,并且对卫星的快速姿态机动和高精度控制稳定能力提出了严格要求。新型敏捷卫星能够在姿态机动的过程中开启光学相机进行成像,并具备多点目标成像、多角度目标立体成像、多条带拼幅成像等工作模式,对于宽度与长度明显大于相机成像幅宽的区域目标,能够在多条带拼幅成像模式下将区域目标分解为多个可观测的条带,然后利用卫星的姿态机动能力连续调整相机指向,根据成像指令依次扫描各个条带实现对区域目标的完全覆盖。

美国的高分辨率光学遥感卫星基本属于此类敏捷卫星,在空间分辨率达到

分米级并逐步接近厘米级的同时,也拥有较强的覆盖能力。如 WorldView-3 卫星搭载的高分辨率多光谱相机地面分辨率达到 0.31m,地面覆盖宽度为 13.1km,能够沿轨获取 66.5km×112km 连续覆盖区域的影像^[4]。

(4) 多星组网实现对地广域观测。要兼顾高分辨率与宽覆盖成像,单颗卫星的能力仍然是有限的。通过多星组网构成虚拟星座,能够获得更大的影像获取能力和更高的时间分辨率,实现对指定大区域的高分辨率持续观测。目前,美国的 QuickBird、GeoEye-1、WorldView-1/2/3/4 卫星构成了高分辨率卫星星座,一天可对同一地区成像 4 次;法国形成了由 SPOT-6/7、Pleiades-1A/1B 四颗卫星组成的星座,极大地提高了对目标区域的影像获取能力。

3. 超高光谱分辨率

光谱分辨率是指对光谱信息的最小分辨程度。其是由成像探测系统决定的,相比一般的全色光谱和拥有几个光谱通道的多光谱,高光谱分辨率的成像系统通常具有多达几十个甚至上百个光谱通道,可以覆盖电磁波波谱的紫外、可见光、近红外、中红外甚至长波红外区域,可获取许多非常窄的光谱连续的影像数据^[5]。该系统能利用目标的不同光谱特性,通过获取高光谱分辨率的观测数据实现对目标的精确识别与定量反演,可弥补多光谱或全色成像遥感定量应用的局限和不足。

高光谱分辨率遥感技术在地质制图、资源调查、植被普查、海洋遥感、农业遥感、土壤监测等领域具有重要的应用价值,可实现对大气环境、水环境和生态环境的综合监测。

2000 年,美国海军 NEMO (Naval Earth Map Observer) 卫星上装载着 COIS (Coastal Ocean Imaging Spectrometer) 发射成功,用于对海洋进行观测,轨道高度为 605km,光谱范围为 0.4~2.5 μm ,光谱分辨率为 10nm,光谱段为 210 个,空间分辨率为 60m,幅宽为 30km。

我国 2008 年发射的环境与减灾小卫星(HJ-1A)搭载了一台具有 128 个探测波段的可见光—近红外超光谱成像仪,探测范围为 0.45~0.95 μm ,光谱分辨率优于 5nm,其为广大陆地及海洋环境与灾害监测提供了大量的重要数据。

美国 2009 年“战术星”-3 搭载的超光谱成像仪可以覆盖可见光和短波红外波段,工作谱段为 0.4~2.5 μm ,光谱段多达 400 个,光谱分辨率可达 5nm,能够精细探测地面目标的光谱特征,发现和判别伪装目标和各类新目标。

俄罗斯 2014 年发射的“资源”-P2 卫星,运行在 475km 的太阳同步轨道,其主载荷为 1m 全色/4m 多光谱的高分辨相机,幅宽 38km,同时还带有宽覆盖多光谱相机和高光谱相机。其高光谱相机焦距为 200mm,全色分辨率为 11.9m,5 通道多光谱分辨率为 23.8m,幅宽为 97.2km,共有 216 个通道,空间分辨率为

25~30m,光谱分辨率为5~10nm,幅宽为30km;其宽覆盖多光谱相机焦距为200mm,全色分辨率为59.4m,5通道多光谱分辨率为118.8m,幅宽为441.6km。2台相机同步工作,共同完成多光谱成像任务^[6]。

我国2018年发射的“高分”五号卫星装载了可见短波红外高光谱相机、全谱段光谱成像仪、大气主要温室气体监测仪、大气痕量气体差分吸收光谱仪、大气气溶胶多角度偏振探测仪和大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪等多台载荷,具备了紫外—可见—红外(短波、中波、长波)全谱段的高光谱观测能力,其中可见短波红外高光谱相机的光谱范围为0.4~2.5 μm ,光谱分辨率为5nm(VNIR)、10nm(SWIR)。

综上所述,航天相机系统的光谱谱段数越来越多,光谱分辨率越来越高,逐步朝超高光谱分辨率方向发展,可实现对地物光谱特性更精细的探测,为地物辨识提供更丰富的数据信息。

1.3 本书的主要内容与安排

本书围绕CCD/CMOS光电探测器,阐述了航天相机CCD/CMOS成像系统的设计与实现,全书按照以下顺序展开:首先介绍探测器的基本工作原理,详述了一种新的TDI成像技术——数字域TDI,以及说明了成像系统的关键技术指标;然后分别描述CCD与CMOS成像系统的具体设计,并对焦平面阵列设计与系统可靠性设计进行介绍;最后阐述了航天相机成像系统的总装与总测,同时对未来成像技术的发展进行了展望。

全书共分为10章:第1章主要介绍了航天相机的定义及发展现状,总结了当前航天相机成像技术的发展趋势;第2章对CCD/CMOS光电探测器的基本原理与主要技术指标分别进行了介绍;第3章详述了一种基于数字域的时间延迟积分成像技术;第4章说明了成像系统的主要关键指标;第5章与第6章则分别对CCD/CMOS成像系统的设计进行了详细描述;第7章介绍了焦平面阵列设计,包括拼接技术与热控技术两个方面;第8章针对航天相机系统在空间环境中的适应性与可靠性设计分别进行了说明;第9章详细介绍了航天相机成像系统的总装与总测,包含整机的主要测试环节;第10章展望了成像系统未来的发展趋势。