



国家“十一五”出版规划重点图书
空间飞行器设计专业系列教材
航天一线专家学术专著

航天光学遥感技术

SPACE OPTICAL REMOTE SENSING TECHNOLOGY

马文坡 编著



中国科学技术出版社

- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

航天光学遥感技术

SPACE OPTICAL REMOTE SENSING TECHNOLOGY

马文坡 编著

中国科学技术出版社
· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航天光学遥感技术/马文坡编著. —北京:中国科学技术出版社,2010.11

(空间飞行器设计专业系列教材)

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5729 - 9

I. ①航… II. ①马… III. ①航天器 - 光学遥感 - 高等学校 - 教材 IV. ①V423

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 208540 号

本社图书封面贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京国防印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×960 毫米 1/16 印张:18.5 字数:500 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

印数:1-2000 册 定价:42.00 元

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5729 - 9/V · 53

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书从基本概念和原理入手,系统地介绍了航天光学遥感技术,内容涉及航天光学遥感数据获取和处理的各主要环节,其中重点阐述了航天光学采样成像系统,特别是采样成像型光学遥感器的工作原理、设计、测试以及性能度量 and 预测。

全书共分10章。第1章对遥感作了概括性介绍,包括遥感的概念与分类、遥感简史、遥感系统、成像链、遥感信息提取、航天遥感的特点以及典型遥感应用;第2章阐述了航天光学遥感涉及的一些基本概念和基础理论,包括辐射度量与光度量、基本辐射度学定律、线性系统理论、傅立叶变换、图像采样与重构、基本探测原理和探测谱段等;第3章介绍了航天光学遥感成像链路,包括组成、信息获取过程以及照明源、大气、目标、遥感平台、光学遥感器、星上数据处理及地面接收、处理、显示和观察者对遥感图像的影响;第4章讲述了航天光学遥感器;其中重点介绍了采样成像型光学遥感器的组成、图像与光谱数据获取原理以及各部分的特性和对遥感图像的影响,并简要介绍了胶片相机和主动式光学遥感器;第5章介绍了航天光学成像遥感特别是采样成像型光学遥感器的主要性能度量以及图像质量评价和预测;第6章对采样成像型航天光学遥感器的设计作了概括性介绍,包括任务分析、总体设计以及各主要组成部分的设计;第7章讲述了采样成像型航天光学遥感器的测试与试验,重点介绍了几个主要性能指标的测试;第8章介绍了航天光学遥感图像处理的一些基础知识,包括图像校正、图像复原、图像增强、图像融合和图像数据压缩等;第9章列举了几颗典型光学遥感卫星及其光学遥感器;第10章对航天光学遥感技术的发展进行了展望。

作者简介

马文坡 1967年生,中国空间技术研究院北京空间机电研究所研究员,博士,博士生导师。1992年毕业于中国空间技术研究院飞行器设计专业,一直从事航天光学遥感技术研究工作。

责任编辑 崔玲
封面设计 中文天地
正文设计 孙俐
责任校对 赵丽英
责任印制 安利平

总 序

我国航天技术走过了40多年的光荣历程,正面临着21世纪更加蓬勃发展的形势,需要人才,需要知识。

空间飞行器即航天器,包括卫星、飞船、空间站、深空探测器等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科,它所涵盖的知识面很宽,涉及光、机、电、热和系统工程等,是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求,同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此,本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识,在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员,他们把自己丰富的知识和经验很好地融入到这套丛中,理论与实践密切结合,使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版。它的出版是非常值得祝贺的,相信它不仅是一套不错的研究生教材,能够为培养高级航天技术人才服务;同时又是一套优秀的学术专著,将对我国航天科学与技术的发展做出贡献。

阎桂荣

2001年9月

前 言

航天光学遥感技术是一门涵盖了多个学科的综合探测技术,它涉及辐射度学、大气、航天器、光学遥感器、数据传输、数据处理、显示和图像解译等学科和技术;就航天光学遥感器而言,它涉及先进材料、光学、精密机械、热控、探测器和信号处理等学科和技术。

为了使读者系统全面地了解航天光学遥感,本书从基本概念和原理出发,对航天光学遥感成像链路及其各环节对遥感图像的影响作了概括性阐述,重点放在航天光学成像遥感,特别是采样成像型光学遥感器上,着重介绍了其工作原理、各环节对遥感图像的影响、基本设计思路与方法、性能度量、图像质量评价和预测以及主要性能指标的测试方法等。在此基础上,介绍了航天光学遥感图像处理的一些基础知识。最后,介绍了几颗典型光学遥感卫星及其光学遥感器,并对航天光学遥感技术的发展进行了展望。

本书的编写和出版是在中国空间技术研究院研究生部和北京空间机电研究所的支持和帮助下完成的。中国空间技术研究院研究生部和北京空间机电研究所的有关领导和老师在本书编写过程中给予了大力支持,在此表示衷心感谢。陈世平、谭维炽、刘兆军、王怀义、杨秉新、于豫民、王小勇、王世涛、徐鹏、傅丹膺、曹东晶、李涛、高卫军、周峰、满益云、李博、连华东等专家在本书编写过程中给予了很多指导,在此表示诚挚的谢意。北京空间机电研究所人力资源处的领导、老师和部分在读研究生在本书编写过程中提供了大量帮助,在此表示深切谢意。邱民朴和赵学敏等同志

在本书编写过程中提供了大量资料,在此表示由衷感谢。

本书是航天光学遥感方面的入门参考书,既可作为航天光学工程专业的研究生教材,又可作为相关专业科研人员和工程技术人员的参考书。

由于编者的技术水平和知识面有限,加之航天光学遥感技术在飞速发展,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

作者

2010年9月

目 录

第 1 章 遥感概述	1
1.1 遥感与近感	1
1.2 遥感的分类	3
1.3 遥感简史	6
1.4 遥感系统、成像系统和成像链	7
1.5 遥感数据处理与信息提取	10
1.6 航天遥感的特点	12
1.7 典型遥感应用	12
第 2 章 航天光学遥感理论基础	15
2.1 辐射度学与光度学	15
2.2 线性系统理论与傅立叶变换	25
2.3 图像采样与重构	30
2.4 基本探测原理	35
2.5 探测谱段	36
第 3 章 航天光学遥感成像链路	39
3.1 成像链路组成与成像遥感过程	39
3.2 航天光学遥感成像链路描述	41
第 4 章 航天光学遥感器	55
4.1 概述	55
4.2 采样成像型光学遥感器的基本组成	56
4.3 典型采样成像型光学遥感器	56
4.4 光谱获取原理	62
4.5 光学系统	66
4.6 探测器	83
4.7 电子学系统	107
4.8 结构与机构	112
4.9 热控系统	112
4.10 采样成像型光学遥感器的 MTF 和 SNR	113
4.11 胶片相机	115

4.12	主动式航天光学遥感器	115
第 5 章	航天光学成像遥感系统性能度量及像质评价和预测 ...	117
5.1	性能度量	117
5.2	图像质量评价	130
5.3	图像质量预测	142
第 6 章	航天光学遥感器设计	156
6.1	技术要求	156
6.2	设计概要	157
6.3	总体设计	160
6.4	光学系统	166
6.5	结构与机构	167
6.6	电子学系统	172
6.7	焦面组件	174
6.8	热控系统	175
6.9	星上定标器	177
6.10	制冷器	180
6.11	可靠性与安全性	185
第 7 章	航天光学遥感器测试与试验	188
7.1	概述	188
7.2	基本测试与试验程序	189
7.3	MTF 测试	191
7.4	辐射分辨率测试	202
7.5	试验	210
第 8 章	航天光学遥感图像处理基础	214
8.1	数字图像处理概述	214
8.2	图像畸变与校正分类	215
8.3	辐射校正	215
8.4	大气校正	217
8.5	几何校正	218
8.6	图像复原	222
8.7	图像增强	224
8.8	图像融合	231

8.9	图像数据压缩	232
第9章	典型光学遥感卫星及其光学遥感器	234
9.1	CBERS-1	234
9.2	Landsat 系列卫星	246
9.3	SPOT	259
9.4	IKONOS	261
第10章	航天光学遥感技术与展望	265
10.1	航天光学遥感系统总体设计	265
10.2	光学遥感卫星	267
10.3	展望	274
参考文献	280

第1章 遥感概述

遥感(remote sensing)是一门涉及多个学科的综合而复杂的探测技术,它涵盖了能量产生与传输、能量与物质相互作用、能量探测以及探测数据处理与分析等多个领域中的学科和技术。遥感的应用范围很广,它涉及政治、军事和经济等各个方面,并且已经在土地利用、农业、林业、地质、测绘、全球变化探测、环境监测、非再生资源勘探、气象、灾害监测以及军事等领域发挥了重要作用,成为各个国家可持续发展必不可少的手段。本章从基本概念出发,对遥感进行了概括性介绍,主要内容包括遥感的概念与分类、遥感简史、遥感系统、航天遥感的特点以及典型遥感应用等。

1.1 遥感与近感^[1-4]

1.1.1 遥感与近感的概念

尽管遥感已经在许多领域应用了很多年,但尚未见到对“遥感”这一术语的统一定义。不同文献对遥感的定义或多或少存在差异,但基本含义相同,即在非直接接触的情况下获取目标或现象的信息。

广义上讲,遥感是指在非直接接触的情况下对所研究的目标或现象的一些特性信息进行测量或采集,因此,广义上讲,人们利用视觉系统获取信息就属于遥感。

严格意义上讲,遥感是指利用位于地面载体(如车辆、舰船)、航空器(如飞机、气球、飞艇)或航天器(如卫星、飞船、航天飞机)上的探测仪器,在非直接接触的情况下获取地球表面(陆地和海洋)、大气以及宇宙中其他天体的信息的一门科学和技术。用于遥感的探测仪器常被称作遥感器或传感器,用于承载遥感器的工具或载体被称为遥感平台。

在非直接接触的情况下获取目标信息,就需要某种载体在目标与遥感器之间传递信息。在遥感中,目标反射、散射或辐射的电磁辐射为通常的遥感信息载体。电磁辐射是能量的一种形式,它与目标相互作用后,就携带了目标信息,

通过遥感器获取来自目标的电磁辐射,并经过一系列处理,可产生能够观察到的效应。除了电磁辐射,还有其他信息载体,如重力场和声波等。

在多数情况下,遥感指的是利用航空和航天平台上的遥感器获取所关心的目标反射、散射或辐射的电磁辐射能量,通过处理和分析来获得所关心目标的信息。其基本工作流程是:位于航空和航天平台上的遥感器获取目标及其背景的遥感数据或图像,获取的遥感数据或图像通过无线传输或回收记录遥感图像的介质而到达地面,经过一定处理和解译得到所需要的信息,然后提供用户使用。遥感器之所以能够探测目标或者将目标与背景区分开来,是由于目标的不同部位以及目标与背景在反射、散射或辐射电磁能量方面存在差异。

近感(*proximal sensing*)是指通过人员或传感器靠近乃至接触目标来获取目标的数据或信息。近感与遥感是相对的,因此,理解了遥感的概念,近感就很容易理解。

1.1.2 遥感与近感的互补性

相对于近感而言,遥感的优势很多、作用很大、应用很广。遥感的很多作用通过近感难以实现,因此,遥感很有必要。尽管如此,遥感还不能完全取代近感,对于很多应用,需要将遥感与近感结合起来才能达到较好的效果。下面通过一些例子对它们的特点和互补性作简要说明。

(1)对于有些情况,受条件限制,人员或传感器难以靠近或接触目标,必须通过遥感对目标进行探测。比如,在一些严重自然灾害(如台风、地震和海啸等)爆发期间,人员或传感器难以靠近;又如,获取他国情报特别是军事情报时,人员或传感器很难接近目标;再如,对于一些很遥远的天体,受技术水平等因素限制,在一段时间内人员或传感器无法接近目标。然而,对于自然灾害的评估与救灾以及所获取情报的评估和确认,常需要把遥感与近感手段结合起来使用。

(2)由于近感的观测范围有限,短时间内无法对大范围目标进行探测,因此,对于有些应用,必须发挥遥感观测范围大、时效性强的优势。比如,对全球范围的天气进行预报需要及时了解世界各地(包括陆地和海洋)的气象变化,这通过近感很难做到,而通过遥感(如利用气象卫星来观测)则很容易实现。又如,获取所关心地区的大范围鸟瞰图,包括平面和立体图像,通过近感很难做到,而通过遥感则可以在较短时间内完成。然而,目前的天气和气象预报并不是完全依靠遥感手段,而是将遥感与近感手段结合起来使用。

(3)对于涉及人类生存和发展的一些管理和规划问题,必须把遥感和近感手段结合起来使用。一方面,通过遥感手段获取所关心对象的宏观信息,另一方面通过现场测量和调查等近感手段获取所关心对象的具体信息。然后,依据这两方面的信息,通过综合分析做出决策。

1.2 遥感的分类^[1-3]

遥感的分类方法很多,比如,可以按照遥感机理、观测频率或波长范围、仪器类型、平台类型、传感器(接收器)类型和应用领域等进行分类。

1.2.1 主动式遥感和被动式遥感

根据遥感机理不同,遥感可以分为主动式遥感和被动式遥感。在主动式遥感中,要向感兴趣的目标发射电磁辐射(电磁波),并接收从目标返回的电磁辐射。激光雷达系统和雷达系统是典型的主动遥感系统。在激光雷达系统中,向目标发射激光;在雷达系统中,向目标发射微波辐射。对于被动式遥感,不向目标发射电磁辐射,通常是探测目标反射的太阳辐射或目标自身发射的电磁辐射。

(1)主动式传感器

典型的主动式传感器包括雷达(radar)和激光雷达(lidar)。

雷达即无线电探测和测距仪器。它向目标发射微波脉冲辐射,接收目标后向散射的微波辐射。根据微波辐射从雷达传输到目标再从目标返回到雷达所需的时间,可以确定目标到雷达的距离。当雷达经过目标时,通过测量目标各部分到雷达的距离以及散射的微波辐射的强度,可以获取目标图像。由于微波辐射能够穿透云和多数雨,因此,雷达不仅可以昼夜工作,还可以全天候工作。雷达除了用于测高(雷达高度计)、测距(雷达测距仪)和成像外,还可用于测量海面风速和风向。常用的成像雷达为合成孔径雷达(SAR)。散射计(scatterometer)是一种高频微波雷达,它的主要用途是通过测量后向散射的微波辐射来测量海面风速和风向。

激光雷达为光探测和测距仪器。它向目标发射激光脉冲,测量目标后向散射或反射的激光。通过发出激光与接收到后向散射激光的时间间隔,可以确定目标到激光雷达的距离。激光雷达不仅可用于测高(激光高度计)和测距(激光测距仪),还可用于测量大气中气溶胶(悬浮于大气中的液态和固态微粒)、云以及其他成分的分布。

(2) 被动式遥感器

被动式遥感器的工作波段范围涵盖了紫外、可见光、红外和微波区域。被动式遥感器包括各种成像仪(Imager)、辐射计(Radiometer)和光谱仪(Spectrometer)。

成像仪是一种在选定波段获取目标空间信息(图像)的仪器。工作在光学波段(紫外、可见光和红外光谱区)的成像仪常被称为相机。

辐射计是一种在选定波段定量获取电磁辐射强度信息的仪器。

光谱仪是一种用于探测和分析入射电磁辐射光谱成分(光谱信息)的仪器。

对于工作在光学波段的被动式遥感器,还可以根据它们获取的信息分为多种类型。既获取空间信息又获取光谱信息的被动式遥感器被称为光谱成像仪或成像光谱仪;既获取空间信息又获取辐射强度信息的被动式遥感器被称为成像辐射计;既获取光谱信息又获取辐射强度信息的被动式遥感器被称为光谱辐射计;而能够同时获取空间信息、光谱信息和辐射强度信息的被动式遥感器被称为成像光谱辐射计。对于成像光谱仪,根据其谱段数目、谱段宽度以及谱段连续程度,可分为多光谱(multispectral)成像仪、高光谱(hyperspectral)成像仪和超高光谱(ultraspectral)成像仪。同样,对于光谱辐射计和成像光谱辐射计,也可以这样分类。

1.2.2 光学遥感与微波遥感^[5]

按照波段由短到长,电磁辐射大致可以分为七个波段范围,分别是 γ 射线、X射线、紫外、可见、红外、微波和无线电波。但是,有些相邻波段之间的界线并不很明确,不同文献的表述存在差异。对于上述一些波段,又可细分为若干个较窄的波段,比如,将红外波段分为近红外、短波红外、中波红外、长波红外和远红外。此外,对于某些电磁辐射波段,还有一些其他叫法,如毫米波和太赫兹波等。

太赫兹(THz)波是介于红外与毫米波之间的电磁辐射,其频率范围为0.1~10THz,波长为30~3000 μm ,也叫T射线、亚毫米波或远红外波。太赫兹波最早用于天文观测,原因是到达地球上的由天体辐射的电磁波大部分位于太赫兹波段。太赫兹波的辐射能量低,但穿透能力强。

根据观测频率或波长范围不同,遥感可以分为多种类型,如紫外遥感、可见光遥感、红外遥感和微波遥感。通常将紫外遥感、可见光遥感和红外遥感统称为光学遥感,这样,根据观测频率或波长范围不同,可将遥感分为光学遥感和微波遥感两大类。在光学遥感中,目前主要的观测波长范围包括0.3~0.4 μm (近

紫外)、 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ (可见光)和 $0.7 \sim 14 \mu\text{m}$ (红外)。

1.2.3 摄影遥感与非摄影遥感

摄影遥感是指利用感光胶片作为记录和保存图像的介质的遥感,而其他遥感属于非摄影遥感。摄影遥感基于胶片的光化学反应对目标进行探测,其敏感波长范围主要集中在 $1 \mu\text{m}$ 以下,主要是可见光和近红外波段。对波长超过 $1 \mu\text{m}$ 的电磁辐射进行探测,需要采用非摄影遥感手段。典型的非摄影遥感包括以探测器作为接收器的光学遥感以及采用天线作为接收器的微波遥感。非摄影遥感成像系统有时被称为电子成像系统。

1.2.4 成像遥感与非成像遥感

在遥感中使用的仪器类型可分为成像型遥感器和非成像型遥感器,这样遥感可分为成像遥感和非成像遥感,目前多数遥感为成像遥感。成像型遥感器主要包括成像仪、成像光谱仪和合成孔径雷达(SAR)等。非成像型遥感器主要包括光谱仪、高度计以及探测大气温度、湿度和成分分布的探测仪等。需要说明的是,对于成像光谱仪获取的遥感数据,也可用“非成像”方式处理和显示其光谱数据。

对于光学成像遥感,可以分为单谱段成像、光谱(包括多光谱和高光谱)成像、偏振成像和多方位(多角度)成像等;对于微波成像遥感,可以分为单频段成像、多频段成像和极化成像等。

在光学成像遥感领域,以胶片作为信息载体的遥感成像系统被称为摄影测量系统(photographic system),而以探测器作为接收器的遥感成像系统被称为采样成像系统(sampled imaging system)。前者以连续方式成像,后者以采样(离散)方式成像。采样成像系统有时被称作光电成像系统(electro-optical imaging system)和电子成像系统(electronic imaging system)等。以探测器作为接收器的成像型光学遥感器被称为采样成像型光学遥感器。

在航天光学遥感领域,以胶片作为信息载体的相机和以探测器作为接收器的成像型光学遥感器常被统称为空间相机,或简称“相机”。

1.2.5 地面遥感、航空遥感与航天遥感

主要的遥感平台类型包括车辆、舰船、气球、飞机(含无人机)、飞艇、卫星、飞船和航天飞机等。基于车辆、舰船等地面平台上的遥感器获取遥感数据的遥感被称为地面(或地基)遥感,基于气球、飞机和飞艇等航空平台上的遥感器获

取遥感数据的遥感一般被称为航空遥感,而基于卫星、飞船和航天飞机等航天平台上的传感器获取遥感数据的遥感被称为航天遥感。

除了上述这些遥感分类方法外,还有其他一些分类方法。比如,可以根据应用领域对遥感进行分类。典型应用领域包括气象观测、资源探测、环境与灾害监测、测绘以及军事侦察等。

对于一个具体的遥感系统或传感器,它会牵涉上述分类的所有方面。例如,在本书中介绍的中巴地球资源卫星(CBERS)上的光学传感器为用于地球资源探测的被动式成像型航天光学传感器,它们利用探测器作为接收器。

1.3 遥感简史^[3,6,7]

遥感始于照相(摄影)技术的发明,随后又发展了主动和被动光电探测技术以及微波探测技术,并经历了“地面遥感—航空遥感—航天遥感”这一发展历程。照相技术发明后,人们首先在地面上进行近距离照相,随后利用气球、风筝、火箭甚至鸽子携带照相机从空中照相。20世纪初,人们开始从飞机上照相。航空遥感在第一次世界大战和第二次世界大战中得到广泛应用。1946年,从白沙试验场发射的V-2火箭携带照相机在空间摄取了地球的照片。

随着1957年10月4日苏联发射世界上第一颗人造地球卫星,人类进入了太空时代。20世纪60年代初期,携带胶片相机和电视摄像系统的卫星和飞船被送入太空收集民用和军事信息,标志着航天遥感时代的开始。在20世纪60年代,比较有代表性的卫星包括美国的泰罗斯1号(TIROS-1)气象卫星和“科罗纳(Corona)”侦察卫星以及苏联的“天顶(Zenit)”军事卫星。

自20世纪70年代开始,航天遥感(特别是民用航天遥感)进入快速发展时期,除了美国和苏联外,很多国家如法国、德国、日本、中国、加拿大和印度等都成功发射了自己的遥感卫星。而且遥感卫星的空间分辨率不断提高,观测波段范围不断扩展。1978年,美国发射了海洋卫星1号(Seasat-1),标志着航天雷达遥感开始,该卫星采用合成孔径雷达(SAR)获取图像,工作波段为L波段(波长23.5cm)。近几十年来,各国发射了大量遥感卫星,比较有代表性的民用或商用遥感卫星包括LANDSAT系列卫星、SPOT系列卫星、RADARSAT卫星、IKONOS卫星和WorldView-2卫星等。

尽管遥感已经有一百多年的历史,但“遥感”一词还是一个相对比较新的术语。随着人类探测电磁辐射的能力超出人的视觉系统和摄影测量系统敏感的波长范围,这就需要引入一个新的术语来概括从遥远的载体上进行探测的过