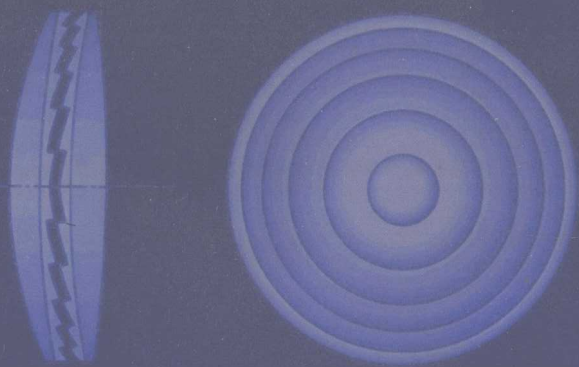


高光谱成像仪及其光学系统设计

洪新华 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

高光谱成像仪及其光学系统设计

洪新华 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

高光谱成像仪及其光学系统设计/洪新华 著. - 北京:北京大学出版社, 2006. 9

ISBN 7-301-06586-8

I. 高… II. 洪… III. 高光谱成像仪-设计 IV. G364

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 0996708 号

书 名: 高光谱成像仪及其光学系统设计

著作责任者: 洪新华

责任编辑: 苏昌茂

责任校对: 史曙光

标准书号: ISBN 7-301-06586-8/F·0982

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

印刷者: 河南省新乡市第一印刷厂

经销者: 新华书店

880 毫米×1230 毫米 开本 32 印张 5.25 印数 1000 册 字数 152 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

版权所有,翻印必究。

目 录

第一章 高光谱成像仪及其应用	1
1-1 高光谱成像仪及其研究现状	3
1-2 国外研究状况	6
1-3 高光谱成像仪系统	14
1-4 高光谱成像仪的主要分系统	16
1-5 高光谱成像仪的光学系统及其存在的问题	16
1-6 高光谱成像仪的应用	23
第二章 问题与研究背景	31
2-1 二级光谱的研究历史	33
2-2 校正二级光谱的常规方法	39
2-3 二元光学的概念及研究背景	44
2-4 课题的目的及意义	48
2-5 本书的主要研究内容	49
第三章 衍/折混合光学系统的像差	51
3-1 光学设计理论与方法	54
3-2 系统的色差	62
3-3 高级像差	65
3-4 系统像差小结	67
3-5 折射光学系统消色差与复消色差	67
3-6 二元光学的标量衍射理论基础	75

3-7 二元光学元件的色散特性	79
3-8 BOL 透镜衍射公式的推导	92
3-9 本章小结	95
第四章 衍/折混合光学系统的设计	96
4-1 成像光谱仪光学系统指标的确定	97
4-2 根据像差特性参数 $P-W-C$ 求解系统结构参数	98
4-3 二元光学元件的像差特性参数及其确定	101
4-4 系统的设计	103
4-4 本章小结	121
第五章 环境气压温度对衍/折射混合光学系统的影响	123
5-1 环境气压对衍/折光学系统的影响	124
5-2 压力对象面移动的影响	125
5-3 环境温度对设计的影响	130
5-4 本章小结	133
第六章 二元光学器件的加工与检测	135
6-1 二元光学器件的加工技术	136
6-2 二元光学器件的检测	141
6-3 本章小结	147
第七章 结论与展望	150
参考文献	153
致谢	156

第一章 高光谱成像仪及其应用

第一章 高光谱成像仪及其应用

现代科学技术的发展对所使用的探测仪器要求越来越高,测量准确、智能化和小型化甚至微型化成为最基本的要求。在科学技术发展中的光学仪器仅以透镜棱镜为主、且光机电集成的趋势下,越来越显得重、大、笨,因此研制小型、高效的光学元器件已刻不容缓。

随着仪器分辨率要求的不断提高,不可避免地要求使用大孔径光学成像系统,然而,对于空间光学系统来说,重量和体积受运载工具的限制。即使运载能力超强的美国,哈勃太空望远镜和“锁眼”侦察卫星,也已分别达到了其航天飞机和运载火箭的运载极限。因此,寻求和发展新的高分辨率成像概念和技术,已成为上世纪末以来各空间大国竞相研究的热点,这也是我国在高分辨率光学卫星领域里赶上美、欧发达国家的机遇。

二十世纪八十年代遥感仪器最重要的发展之一就是成像光谱仪的兴起,目前这也是当代遥感注视的重点之一。成像光谱仪是将成像技术和光谱技术结合在一起,在可见光至近红外、短波红外、热红外光谱区域($0.4 \sim 1.1\mu\text{m}$, $1.4 \sim 2.5\mu\text{m}$, $8 \sim 14\mu\text{m}$),探测物体空间特征的同时并将每个空间像元色散形成几十个到上百个波段带宽为 10nm 左右的连续光谱覆盖。由于成像光谱仪高光谱分辨率的巨大优势,在空间对地观测的同时获取众多连续波段的地物光谱图像,达到从空间直接识别地球表面物质的目的,成为遥感领域的一大热点。

高光谱成像仪从多光谱遥感成像技术基础上发展以来,就以

它独特的特性,应用在地物精确分类、地物识别、地物特征信息的提取等,高光谱分辨率获取景物或目标的高光谱图像,在航空、航天器上进行陆地、大气、海洋等观测中有广泛的应用。并且在高光谱成像仪建立目标的高光谱遥感信息处理和定量化分析模型后,还可提高高光谱数据处理的自动化和智能化水平。

1-1 高光谱成像仪及其研究现状

传统照相机获得的是目标的几何影像信息,随着光学技术的发展,人们提出了多光谱扫描仪的概念,但它只能提供目标在有限几个谱段范围的光谱信息。为了克服多光谱扫描仪光谱信息量太少的缺点,美国 JPL 实验室在 20 世纪 70 年代末到 80 年代初发展了光谱成像技术。首先进入工程应用的是基于光栅或棱镜的色散型光谱成像仪,但是随着科学技术的不断发展,特别是航空航天事业的飞速发展,人们对光谱成像仪的技术指标要求越来越高,主要表现在空间分辨率、光谱分辨率和对弱信号的探测能力等方面。色散型光谱成像仪存在着能量利用率低等原理性缺陷,使它的进一步发展受到阻碍。相反,干涉型光谱成像仪在原理上具有高光谱分辨率与高能量利用率等优点,因此近年来受到人们的广泛关注和研究。特别是在 20 世纪 90 年代以后,出现了静态干涉光谱成像技术,这种新型光谱成像技术在原理上保留了干涉型光谱成像的主要优点,并且可靠性和稳定性好、体积小、光谱线性度高、光谱范围宽,适合在飞机和卫星等飞行器上搭载,引起国际上广泛的重视。美国 Lincoln 实验室光谱成像技术专家 Persky 认为,静态干涉型光谱成像技术将成为光谱成像技术领域的典型代表和发展方向。近年来,焦平面探测器推帚成像技术也以其探测器积分时间长、成像部件无需机械运动等特点,通过先进的光学设计和高新电子技术的应用,使得仪器光谱波段达几百个,光谱分辨率高达 2nm,并可在高的光谱分辨条件下具有高信噪比、体积小、重量轻等特点,正在成为当代空间对地观测的主要技术手段。

1-1-1 成像光谱仪工作原理

成像光谱仪技术从原理上可以分成色散型和干涉型两大类：色散型光谱仪是利用介质折射率随波长变化的性质，即采用棱镜折射分光作分光元件，或利用光栅衍射作分光元件，从而使光按照一定的规律分布，得到光谱；干涉型光谱仪是利用光的干涉现象得到干涉图，经傅立叶变换在频域里得到光谱图。

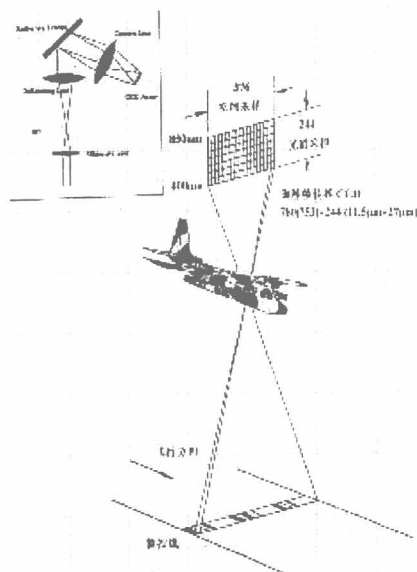


图 1-1a 焦平面探测推帚成像原理

Fig. 1-1a principle of push-broom imaging

根据成像光谱仪的扫描方式，其工作原理也不尽相同，作为光学成像仪成像的一个例子，来看一下焦平面探测器推帚成像原理，见图 1-1a。地面物体的反射光通过物镜成像在狭缝平面，狭缝作为光阑使穿轨方向地面物体条带的像通过，挡掉其他部分光。这个地面物体条带像发出的光线经过准直镜后平行射出，经色散器件在垂直条带方向按光谱色散，用会聚镜会聚成像在探测器光敏面。

光敏面的水平方向平行于狭缝,称空间维,每一行水平光敏元上是地物条带一个光谱波段的像;光敏面的垂直方向是色散方向,称光谱维,每一列光敏元上是地物条带一个空间采样视场(像元)光谱色散的像。这样,面阵探测器每帧图像数据就是一个穿轨方向地物条带的光谱数据,加上航天器的运动,以一定速率连续记录光谱图像,就得到地面二维图像及图像中各像元的光谱数据,即图像立方体,见图 1-1b。

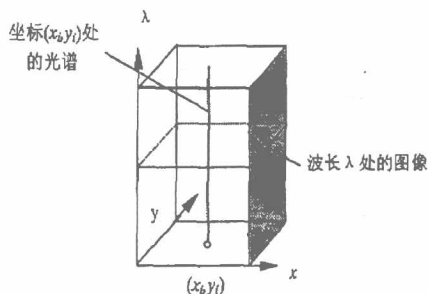


图 1-1b 数据立方体

Fig. 1-1b data cube

动态干涉光谱成像仪的基本原理可以利用迈克耳孙干涉仪来解释。

中科院西安光机所的张淳民首次提出了基于 Savart 偏光镜横向剪切的稳态、大视场、高通量的偏振干涉成像光谱技术,计算了给出了剪切量和光程差的计算公式。设计研制了基于 Savart 偏光镜的超小型稳态偏振干涉成像光谱仪(USP II S)的实验装置;在实验室进行了模拟推扫实验,获得了一系列干涉图、目标像和复原光谱。在 USPIIS 的基础上,采用视场补偿方法,提出了基于视场补偿型 Savart 偏光镜的稳态大视场偏振干涉成像光谱仪(SLP II S)的创新原理及方案,论证了 SLPIIS 的分光机理、成像及广角补偿原理。

1-1-2 光谱成像仪数据获取系统构成

光谱成像仪由光学系统、信号前端处理盒、数据采集记录系统三部分组成,见图 1-2。

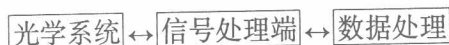


图 1-2 光谱成像仪数据获取系统

Fig. 1-2 data gaining system of spectroscopic imaging instrument

数据的回放及预处理通过专用软件在高性能的微机上完成。软件具有数据备份、快速回放、数据规整和格式转换、图像分割截取、标准格式的图像数据生成等功能。

对色散型光谱成像仪来说,具体又可以分为以下几个部分:扫描系统(主要涉及对物体目标的观测视场),定标系统(为航天器在飞行过程中出现的性能变化提供标准,以便为遥感数据提供校正),主光学系统(收集光学信号),分色系统(实现光谱分离),成像系统(汇集各光谱区的信息到相应的焦平面上),焦平面组件包括组合滤色片、探测器、低噪声读数系统等(主要实现各谱段光谱的细分,同时还将相应的光信号转化为电信号),电路系统(中心电平和放大倍率调整、数模转换、信号存储等),电源系统(对各系统供电),另外还有制冷系统和温控系统(保证系统各部分在正常温度情况下工作),中央处理系统(系统时序控制、格式编排和遥控管理等),图像显示系统等。

1-2 国外研究状况

国外对光谱成像技术的研究较早,最早是从 20 世纪 80 年代中后期开始的,当时大多采用的方案是基于迈克尔逊干涉仪的动镜扫描(动态)干涉型光谱成像仪。

动态干涉光谱成像仪的主要优点是灵敏度高、光谱分辨率极

高,但它同时也存在着极大的难点,即高稳定性的扫描动镜系统。尽管如此,为了利用动态干涉光谱成像仪的高光谱分辨率特点,国外许多单位还是开展了长期的技术攻关,研制了包括非成像的干涉光谱仪在内的各种仪器。表 1-1 列出了国外对动态干涉光谱仪的研究情况,表 1-2 列出了国外对动态干涉光谱成像仪的研究情况。

表 1-1 代表性干涉光谱仪(非成像)

代号	研制单位	搭载平台	光谱范围 (cm^{-1})	光谱分辨率 (cm^{-1})	发射时间 (年)
I6T	Block Eng. Inc.	Discover	660 ~ 5000	40	1962
IRI B	GSFC/Texas Instr.	NIMBUS III	400 ~ 2000	5A	1969
IRIS D	同上	NIMBUS 4	400 ~ 1600	2.8A	1970
SI - 1	GDR	Meteor	400 ~ 1600	5	1976, 1977 1979
ITS	UW/SBRC /Bomen	EPOP or POES	620 ~ 2720	0.625 ~ 2.5	Future
GHIS	同上	GOES	620 ~ 2721	0.32 ~ 4.63	Future
IASI	CNES	METOP - 1	645 ~ 2760	0.5A	2001
ATMOS	JPL/Honeywell	Space Shuttle	625 ~ 5000	0.01	1985, 1991, 1993, 1994
IMG	JAROS/Toshiba	ADEOS	690 ~ 3030	0.1A	1996
MIPAS	ESTEC/DASA	ENVISAT	685 ~ 2410	0.03, 0.15, 0.3	1998
TES(e)	JPL	CHEM	600 ~ 4350	0.025, 0.1A	2002
IRIS m	GSFC/Texas Instr.	MARINER 9	200 ~ 2000	2.4A	1971
IRIS v	同上	Voyager 1,2	180 ~ 2500	4.3	1977

代号	研制单位	搭载平台	光谱范围 (cm^{-1})	光谱分辨率 (cm^{-1})	发射时间 (年)
FS 1/4	GDR/USSR	Venera 15,16	280 ~ 1600	5A	1983
IOTA	Block Eng. Inc.	Surveyor	300 ~ 2000	80	Canceled
FIRAS	CSFC/MIT	COBE	1 ~ 100	0.2, 1	1989
TES(m)	SBRC	Mars Observer Mars Global Surveyor	200 ~ 1600	5, 10, 16	1992, 1996
CIRS	CSFC etc.	Cassini	10 ~ 1400	0.5 ~ 20	1997
PFS	Italy, German, Russian, France, Spain	Mars96	222 ~ 7700	2A	1996
I14, I15	Block Eng. Inc. AFCRL	Gemini 7	770 ~ 1250	130	1965
CIRRIS	AFGL/USU	Space Shuttle	400 ~ 4000	1, 4, 8	1991
SPIRIT	AFPL/USU	MSX	357 ~ 4000	1, 2, 10	1995

注1: CSFC: NASA 空间飞行中心; GDR: 民主德国; UW: 威斯康新大学; CNES: 法国空间中心; JPL: 喷气推进实验室; JAROS: 日本资源观测系统组织; ESTEC: 究室(后更名为空军地理研究室 AFGL, 后又更名为空军 Phillips 研究室 AFPL); USU: 犹他州立大学。

注2: 分辨率数据后的 A 表示切趾后的分辨率。

表 1-2 代表性动态干涉光谱成像仪

名称	研制单位	光谱范围 (μm)	光谱分辨率 (cm^{-1})	视 场		空间 分辨率	时间
IFTS	JPL	1 ~ 2.4	R = 10,000	10 角秒		0.08 角秒	1988
IFTS	ESA	0.12 ~ 0.28 0.25 ~ 0.5	R = 50,000 R = 100,000	10 角秒		0.3 角秒	1989
IFPS	同上	0.25 ~ 0.9	R = 40,000				1989
HRII	同上	0.45 ~ 1.1 1.1 ~ 2.5 8 ~ 12.5	N = 65 N = 20 N = 45	30km		40 40 200	1991
IFTS	大阪大学	VIR	N = 16	64 × 64 面阵探测器			1991
IFTS	Livermore	1.25 ~ 4	10nm	9°	50 × 60 面阵		1993
IRIFTS	加拿大 国防研 究所	2.2 ~ 5.5	6nm	32 × 32 面阵探测器			1994
WAMDII	加拿大	多普勒效应,窄带高分辨, 测风场、温度场					1984 1995
WINDII	加拿大	WAMDII 的改进型		8° × 6°		320 × 256 面阵	1991 1995

相信随着精密机械工艺技术、加工装调技术、控制技术、润滑技术等的不断进步,动态干涉型光谱成像仪将越来越多地应用于遥感领域。

20 世纪 80 年代末 90 年代初,随着面阵探测器阵列制造技术的不断提高,同时也为了回避动态扫描镜系统这个难题,国外不少单位开始研究静态干涉光谱成像技术。已经开展此项工作的有美

国的喷气推进实验室 JPL、美国空军 Phillips 实验室、Hawaii 大学、Florida 工学院及华盛顿大学、Michigan 大学等;法国空间局 CNES;欧洲空间局 ESA 以及加拿大、日本等国家的一些单位。

1993 年,美国 NASA 研制了数字阵列扫描干涉型高光谱成像仪 DASI,谱段范围是 $0.4 \sim 1.0\mu\text{m}$ 和 $1.1 \sim 2.2\mu\text{m}$,光谱分辨率为 300cm^{-1} (对应可见光/近红外波段的谱段数 50 个,短波红外可分辨谱段数约 15 个,视场角 5° ,可见光近红外谱段在空间方向上有 256 像素,短波红外为 390 像素。体积仅 $40 \times 15 \times 10\text{ cm}^3$ 。1994 年进行机载飞行实验,成功得到了农田的光谱图像,空间分辨率为 $2.4\text{m} \times 31\text{m}$,图像尺寸为 $0.6\text{km} \times 3\text{km}$ 。1996 年讨论了探测器与实验结果的改进。

1993 年 Hawaii 大学与 Florida 工学院等在美国海军研究局 (ONR)支持下联合研制了空间调制干涉型高光谱成像仪 SMIFTS (直译为空间调制成像富里叶变换光谱仪),光谱范围 $1 \sim 5\mu\text{m}$,光谱分辨率 $100 \times 1000\text{cm}^{-1}$,采用 $256 \times 256\text{InSb}$ 探测器,对檀香山国际机场进行了成功的测量实验,得到了光谱图像。该仪器的成功为星载干涉光谱成像仪的研制奠定了基础。

1995 年,在美国空军支持下,Kestrel 公司与 Florida 工学院等单位合作,对前期研制的 SMIFTS 进行改进提高,研制了机载富里叶变换高光谱成像仪 FTVHSI,光谱范围 $0.44 \sim 1.1\mu\text{m}$,波段数 256,视场角 15° ,瞬时视场角 0.8 mrad ,采用了 1024×1024 面阵 CCD,两行、两列相加为一行、一列 (binning 模式)。FTVHSI 是对传统色散型光谱成像原理的突破,它的诸多原理性优点和很好的机载飞行试验结果,引起国际上广泛的关注。图 1-3 是 FTVHSI 获得的美国 Michigan 州 Eagle River 附近的高光谱图像:

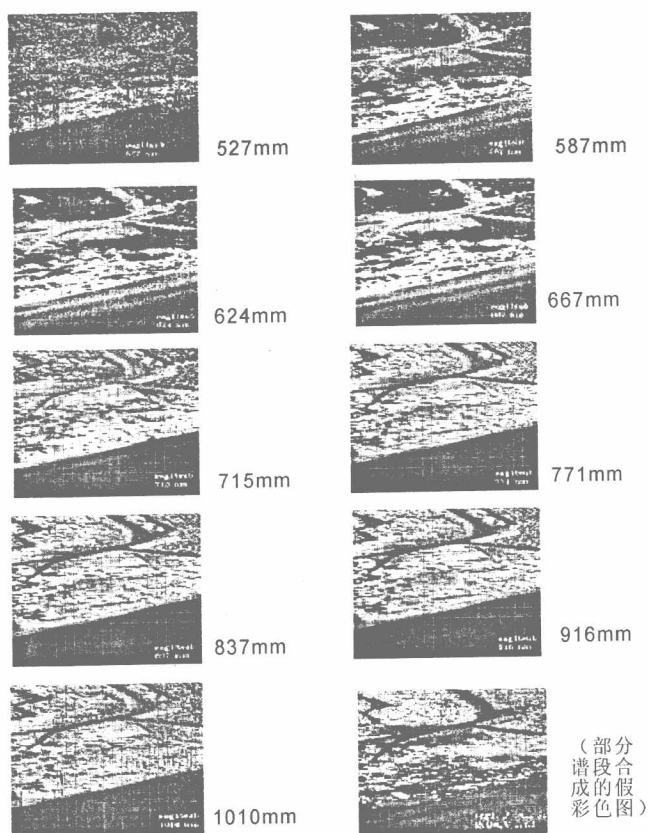


图 1-3 FTVHSI 获得的部分高光谱图像

Fig. 1-3 part images of hyperspectral gained by FTVHSI

在 SMIFTS 和 FTVHSI 的研制基础上,干涉型高光谱成像仪很快地得到美国空军的进一步支持,开始研制星载仪器,在短短 3 年时间里,美国 Kestrel 公司以及原 SMIFTS (FTVHSI) 研究小组(现在 Michigan 技术大学)一起研制成功了强力卫星 MightySat 2.1 搭载的干涉型高光谱成像仪 FTHSI,并于 2000 年 7 月 19 日在美国加州范

登堡空军基地发射成功。

至此,静态干涉型光谱成像技术在短短 8 年左右时间里(1992 年提出 SMIFTS 原理,至 2000 年发射成功 FTHSI),走过了原理研究、地面装置试验、机载飞行试验和卫星发射成功全过程,其快速、顺利、成功是任何其它类型光谱成像仪都无法比拟的,这也是干涉型光谱成像技术原理性优势的一个例证。

静态干涉光谱成像技术的研究情况见表 1-3。

表 1-3 代表性静态干涉光谱成像仪

名 称	研制单位	光谱范围 (μm)	光 谱 分辨率	视场	空 间 分辨率	时间
ISIS(实验室装置)	法国空间中心 CNES	0.45 ~ 1.0	N = 208	144 等分视场		1987
FTSI(星载仪器)	同上	0.44 ~ 1.3	N = 208	2.3km	20m	1990
DASI(进行了机载实验)	美国 NASA	0.4 ~ 1.01 1.1 ~ 2.2	N = 50 N = 15	5°	2.4m	1993
SMIFTS(进行了机载实验)	美国海军研究局 ONR 支持 HU/FTI	1 ~ 5	N = 256	256 × 256 InSb 探测器		1993
FTVHSI(进行了机载实验)	美国空军支持 Kestrel、FTI	0.44 ~ 1.1	N = 256	15°	0.8mrad	1995
FTHSI(强力卫星搭载)	美国空军支持 Kestrel、MTU	0.35 ~ 1.05	N = 256	3°	0.05mrad	2000

因为强力卫星 MightySat 搭载的 FTHSI 是世界上第一台飞上太空,并完美工作的成像光谱仪,下面对其进行较为详细的介绍。

强力小卫星是美国空军 Phillips 实验室资助的新技术演示卫星计划,项目经费为 3.64 千万美元,微卫星本体重量为 113kg,搭载硬