



光纤传像束 调制传递函数研究

王春红◆著



光纤传像束 调制传递函数研究

王春红◆著



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

光纤传像束调制传递函数研究 / 王春红著. -- 哈尔滨 : 黑龙江大学出版社, 2013.8
ISBN 978 - 7 - 81129 - 648 - 8

I. ①光… II. ①王… III. ①光纤传输系统 - 成像系统 - 光学传递函数 - 研究 IV. ①TN818

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 186705 号

光纤传像束调制传递函数研究

GUANGXIAN CHUANXIANGSHU TIAOZHI CHUANDI HANSHU YANJIU

王春红 著

责任编辑	刘剑刚
出版发行	黑龙江大学出版社
地 址	哈尔滨市南岗区学府路 74 号
印 刷	哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本	720 × 1000 1/16
印 张	8
字 数	122 千
版 次	2013 年 8 月第 1 版
印 次	2013 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 81129 - 648 - 8
定 价	20.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 色散成像光谱仪	2
1.3 干涉成像光谱仪	4
1.4 面阵探测器推扫式成像光谱仪	17
1.5 超光谱成像仪	19
1.6 本书论述的主要内容	20
第二章 光纤传像束的光学特性	22
2.1 国内外光纤传像技术发展概况	22
2.2 光纤特性	23
2.3 光纤传像束的光学特性	27
第三章 光纤传像束的调制传递函数	34
3.1 光学传递函数的发展历史	34
3.2 光学调制传递函数的基本理论	39
3.3 光纤传像束的调制传递函数	49
第四章 光纤传像束调制传递函数的收敛性	61
4.1 引言	61
4.2 光纤数对线列光纤调制传递函数的影响	61
4.3 初位置对光纤传像束调制传递函数的影响	69
第五章 光纤传像束的平均调制传递函数	78
5.1 引言	78
5.2 光纤传像束的平均调制传递函数	78
5.3 光纤数对平均调制传递函数的影响	83

5.4 占空比对平均调制传递函数的影响	84
5.5 光纤包层厚度对平均调制函数的影响	85
5.6 线列光纤与线阵 CCD 平均调制传递函数的比对	88
第六章 光纤传像束调制传递函数测量原理分析	91
6.1 MTF 测量方法	91
6.2 扫描法	92
6.3 自相关法	100
6.4 互相关法	104
6.5 对比度法	105
6.6 频谱对比法	106
参考文献	107
后 记	121

第一章 绪 论

1.1 引言

20 世纪 80 年代初期,美国科学家提出了成像光谱学(Imaging Spectrometry)的概念。其基本思想是:在许多相互邻接,甚至有些是相互重叠的狭窄光谱波段,同时收集地面的辐射图像数据。这样不仅可以得到多个狭窄光谱波段的地面图像,而且还可以得到地面上每个分辨元地面的光谱曲线数据。在地面图像二维信息的基础上,增加第三维光谱信息,直接与目标物质结构相关,大大提高了从遥感数据判别并获取地面信息的能力。

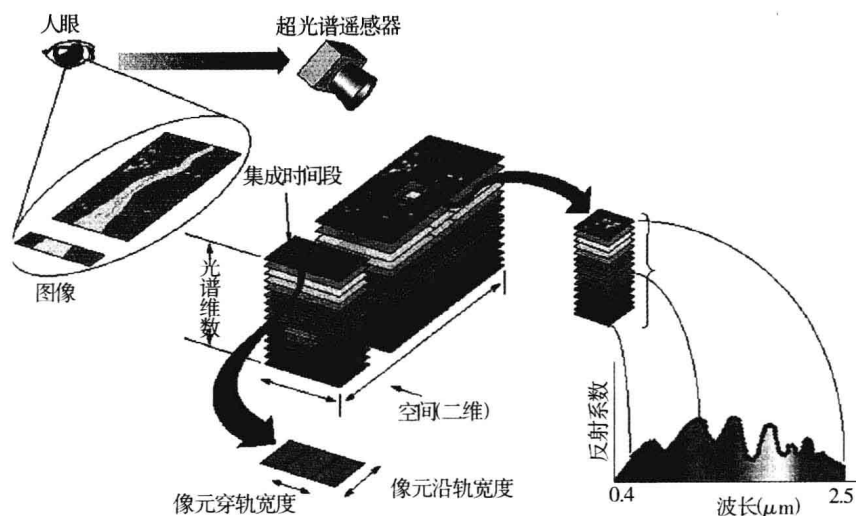


图 1-1 成像光谱仪

自从成像光谱学的概念提出以后,不到十年时间便发展并建立起成像光谱仪技术。

成像光谱仪(Imaging Spectrometer)是在20世纪80年代初发展起来的新一代光学遥感器。它利用“狭缝”将原来一直独立使用的光学成像系统和光谱获取系统有机结合成一体,从而能够同时获取目标的空间特征和光谱特征。成像光谱仪显著地提高了遥感技术探测地球表面特征和物体性质的能力,在军事上能够揭露伪装、判明真假目标,开辟了军事侦察的新技术手段;在民用的农、林、水、土、矿等资源调查与环境监测等领域也有重要的应用前景^[1]。

1.2 色散成像光谱仪

根据获取目标像元光谱方式的不同,成像光谱仪分为色散成像光谱仪和干涉成像光谱仪两大类^[2]。

最早研究和发展的成像光谱仪是色散型的,即利用光栅或棱镜对目标像元的光谱进行分光、线阵列或面阵列探测器采集数据、飞行中摆扫或推扫来获取光谱图像。

20世纪80年代,依靠这种新的设计原理研制的机载成像光谱仪 AIS(1982)、机载可见红外成像光谱仪 AVIRIS(1987)等航空成像光谱仪,显示了它们在矿物识别和植被绘图等方面的优越性能——能够查验多光谱遥感探测不出的地表特征,展现了广阔的应用前景和技术潜力。

20世纪80年代中期,美国和欧洲太空局都提出了研制航天成像光谱仪的计划:NASA在地球观测系统(EOS)中展开了中分辨率(地面分辨率为数百至千米)和高分辨率(地面分辨率为数十米)成像光谱仪(MODIS、HIRIS)研制工作,欧空局(ESA)也进行了中、高分辨率成像光谱仪 MERIS 和 HRIS 的研制工作。

美、欧的高分辨率成像光谱仪 HIRIS 和 HRIS 的研制工作由于计划调整没有执行下去,但是它们近十年的研究为后来航天高分辨率成像光谱仪的研究奠定了技术基础。

现在,国际上研制出的高分辨率超光谱成像仪有 HIS^[3]、COIS^[4]、Hyperion 和 CHRIS。

1. 海岸海洋成像光谱仪(COIS——Coastal Ocean Imaging Spectrometer)波长范围为 $0.4\ \mu\text{m}$ — $2.5\ \mu\text{m}$, 共有 210 个波段, 光谱分辨率为 $10\ \text{nm}$, 主要是针对美国海军系统战时对浅海岸带环境、水深、水下灾害、水质清洁度、底质类型等信息的实时需求而设计的。

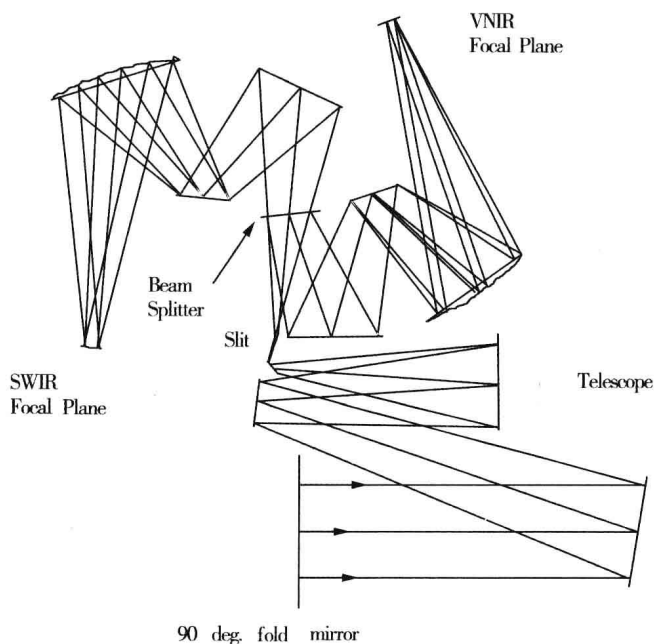


图 1-2 COIS 光学原理图

2. 美国 TRW 公司负责研制 Hyperion 超光谱成像仪, 共用望远镜采用 TMA 设计方案, 将地面一条窄带成像在置于其后焦面的狭缝上, 分光镜将经过狭缝的光束分为可见近红外 (VNIR, $0.4\ \mu\text{m}$ — $1.0\ \mu\text{m}$) 和短波红外 (SWIR, $1.0\ \mu\text{m}$ — $2.5\ \mu\text{m}$) 两部分, 分别进入 VNIR 和 SWIR 平场光栅光谱仪, 在它们的光谱成像面上由 CCD 和 HgCdTe 面阵列探测器获取地面一条窄带的光谱图像信息。通过卫星的推扫获得地面二维空间的光谱图像数据。

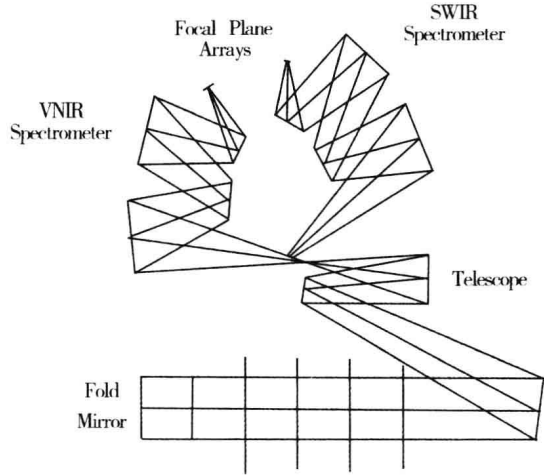


图 1-3 Hyperion 光学原理图

3. CHRIS 是英国 Sira 光电公司为欧空局小卫星平台 PROBA (Project for On – Board Autonomy) 研制的主要有效载荷,应用于提高空间对地遥感数据研制的高分辨率超光谱成像仪。PROBA 于 2000 年秋成功发射升空,进入轨道高度约为 830 km 的接近圆的太阳同步极轨。

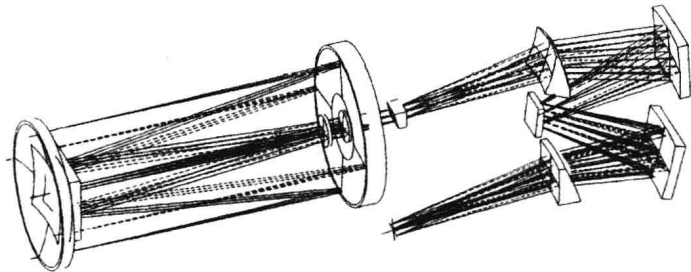


图 1-4 CHRIS 光学原理图

色散型成像光谱仪出现得早,研究得相对成熟。

1.3 干涉成像光谱仪

干涉成像光谱技术的研究开始于 20 世纪 80 年代末,该技术方法将望远成像与双光束干涉相结合,利用目标像元辐射光谱与其干涉图之间的傅里叶变换

关系,通过对测得的干涉图数据进行处理来获取目标像元的光谱信息^[5-11]。由于从像元光谱干涉图复原出光谱图需要进行傅里叶变换,所以,干涉成像光谱仪又称为傅里叶变换成像光谱仪,简称 IFTS (Imaging Fourier Transform Spectrometer)。干涉成像光谱仪具有体积小、质量轻等优点,很适合于搭载在轻小型卫星上。

干涉成像光谱仪的核心技术是光学干涉术和数据处理。根据像元光谱干涉图获取方式的不同,干涉成像光谱仪分为时间调制和空间调制两种类型。

1.3.1 时间调制干涉成像光谱仪

时间调制干涉成像光谱仪通过动镜扫描来获得像元光谱的时序干涉图。目前国外通常采用迈克尔逊干涉仪实现干涉调频^[12-15],干涉仪光路系统主要包括以下几部分^[16]:光源准直系统、分束器、动镜、固定镜、聚光系统以及探测器等,其中动镜可沿着光轴方向运动,如图 1-5 所示。

由图 1-5 可知,物体发出的光通过准直光学系统后成为平行光束,平行光经反射系数为 r 、透射系数为 t 的分束器形成两束光,一束由分束器透射到动镜,另一束则反射至固定镜。这两束光经固定镜和动镜反射后再次通过分束器形成两束相干光束,其中一束返回光源,另一束沿与入射光垂直的方向传输并被探测器接收。当动镜沿光轴移动时,导致一束光的光程改变,相干光束的光程差随之发生变化,从而在探测器平面上形成明暗相间的时序干涉条纹。

探测器上干涉条纹的信号强度是两束相干光束间光程差的函数:

$$I_0(\alpha) = \int_0^{\infty} 2RTB_0(\sigma)[1 + \cos(2\pi\sigma\alpha)]d\sigma \quad (1-1)$$

式中, α 表示光程差,单位为 cm ; σ 表示波数,单位为 cm^{-1} ; $R = r^2$, $T = t^2$; $B_0(\sigma)$ 表示光源光谱强度。

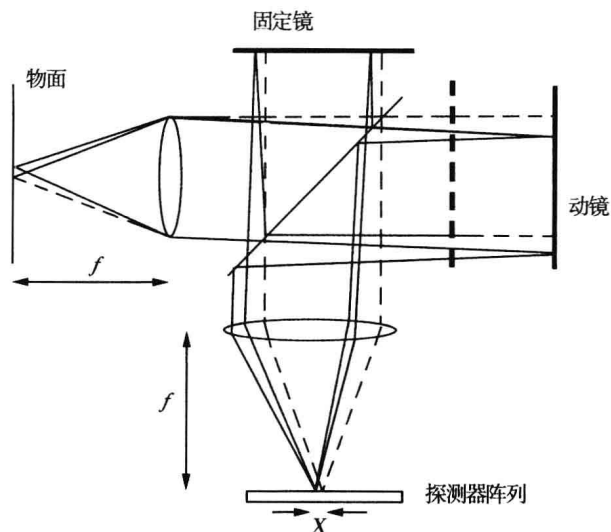
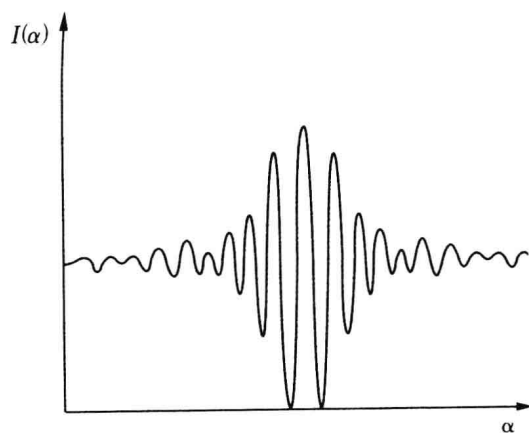


图 1-5 迈克尔逊干涉成像光谱仪工作原理图

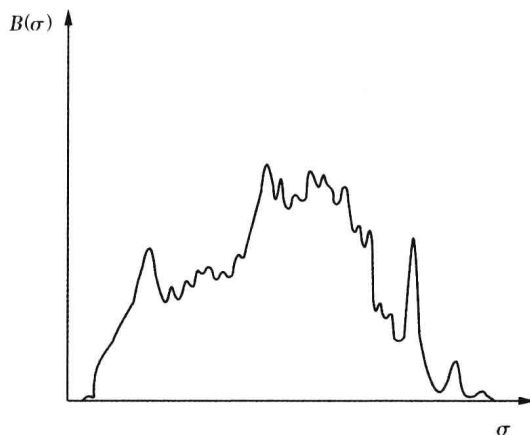
光程差趋近于无穷时的干涉图信号强度为：

$$I_0(\infty) = \int_0^{\infty} 2RTB_0(\sigma) d\sigma \quad (1-2)$$

$I_0(\infty)$ 代表了干涉条纹的平均值,仅仅影响背景亮度,不包含光谱信息,如图 1-6 所示。



(a) 干涉图



(b) 光谱图

图 1-6 干涉图和光谱图

去掉式中的直流成分,只研究蕴含光谱信息的交流调制部分,得到式:

$$I(\alpha) = \int_0^{\infty} 2RTB_0(\sigma) \cos(2\pi\sigma\alpha) d\sigma \quad (1-3)$$

将光谱扩展到负波数范围,且令 $B_0(-\sigma) = B_0(\sigma)$,考虑到理想情况下,干涉图为偶函数,因此略去常数后,可推得:

$$I(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} B_0(\sigma) e^{i2\pi\sigma\alpha} d\sigma \quad (1-4)$$

由式(1-4)得:

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\alpha) e^{-i2\pi\sigma\alpha} d\alpha \quad (1-5)$$

$$\text{或 } B(\sigma) = \int_0^{\infty} I(\alpha) \cos(2\pi\sigma\alpha) d\alpha \quad (1-6)$$

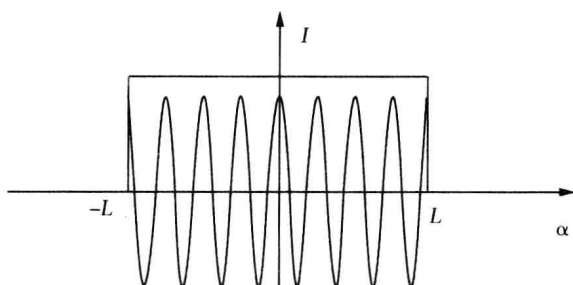
可见已知像元光谱干涉图,根据式(1-5)或(1-6)可得到光谱信息。

式(1-5)所示干涉图的光程差积分限为无穷大,但对于实际仪器而言,干涉图的测量不可能在无限区间内实现,只能测到某一有限的最大光程差处为止。假设干涉图记录是在 $[-L, L]$ 有限光程差区间进行的,式(1-5)对应的光谱表达式为:

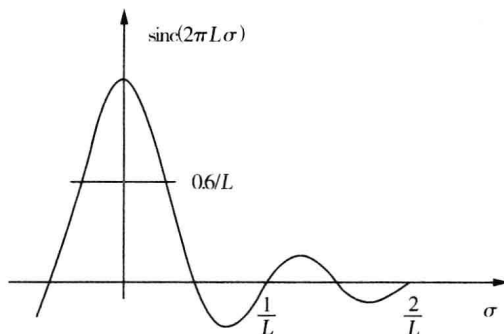
$$\begin{aligned}
 B(\sigma) &= \int_{-L}^L I(\alpha) e^{-i2\pi\sigma\alpha} d\alpha \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} I(\alpha) \text{rect}\left(\frac{\alpha}{2L}\right) e^{-i2\pi\sigma\alpha} d\alpha
 \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\text{式(1-7)中 } \text{rect}\left(\frac{\alpha}{2L}\right) = \begin{cases} 1 & |\alpha| \leq L \\ 0 & |\alpha| > L \end{cases} \quad (1-8)$$

称为矩形截取函数,表示实际计算干涉图受最大光程差限制。



(a)



(b)

图 1-7 干涉图截取及仪器线型函数

根据卷积定理,两函数乘积的傅里叶变换等于各自傅里叶变换的卷积,所以由截取干涉图(即有限范围干涉图)计算得到的光谱为:

$$B(\sigma) = B_0(\sigma) * 2L \text{sinc}(2\pi\sigma L) \quad (1-9)$$

式(1-9)中, $B(\sigma)$ 称为复原光谱, 表示从实际记录的有限长干涉图计算得到的光谱。sinc 函数定义式为 $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$, 通常把 $2L\text{sinc}(2\pi\sigma L)$ 称为仪器函数或仪器线型函数, 缩写为 ILS, 它表示对于无限窄的单色谱线, 光谱仪数据处理系统实际输出的光谱, 它考虑了干涉图截取对复原光谱的影响^[17]。图 1-7 为矩形截取干涉图和对应的仪器线型函数, 可见 $\text{sinc}(2\pi\sigma L)$ 为偶函数, 在中心 $\sigma = 0$ 处有最大值, 在 $2\sigma L = n, n = 1, 2, 3, \dots$ 处和波数 σ 轴相交, 半高线宽为 $0.6/L$ 。

当波数分别为 σ_1 和 σ_2 的两束单色光同时入射光谱仪时, 根据上述分析可知, 其复原光谱应该是两个具有一定扩展宽度的光谱分布函数的叠加。如果两条单色谱线的间距增大到某一确定值时, 复原光谱中波数为 σ_1 和 σ_2 的两条单色谱线恰好能分开, 则称 $\Delta\sigma = |\sigma_1 - \sigma_2|$ 为这一干涉光谱仪的分辨率。通过上面对仪器线型函数波形的分析可知, 当两条谱线间距略大于 ILS 函数的半高线宽 ($0.6/L$) 时, 它们在傅里叶变换后的复原光谱中是可分辨开的。这里, ILS 函数的半高线宽成为了一个重要指标, 说明 ILS 函数和干涉光谱仪的分辨率是直接相关的。

实际讨论干涉光谱仪分辨率常用的判据有两种: 瑞利判据和半高线宽判据。但不论采用何种判据, 干涉光谱仪的光谱分辨率值都正比于两相干光束间最大光程差的倒数, 即使考虑到切趾函数, 分辨率值也总是介于 $1/2L$ 到 $1/L$ 之间。总之, 分辨率反比于最大光程差 L 。

事实上, 为了实现干涉图数据的计算机处理, 即使在 $[-L, L]$ 区间内的干涉图也不能以无限小的光程差间隔进行记录和处理, 而只能采用有限大小的相等间隔进行采样, 光程差采样间隔 $\Delta\alpha$ 的选取十分重要。采样间隔过大会导致干涉光谱仪复原光谱发生畸变并损失光谱信息; 采样间隔过小, 不但不会增添光谱信息反而会增大数据量, 浪费计算时间。

在实践中, 由于本身因素或者受传输媒质、探测器敏感度等限制, 被测光谱通常为有限带宽的。采用干涉光谱仪对波数在 $[0, \sigma_{\max}]$ 区间的光谱进行测量时, 要使采样后的干涉图包含连续干涉图中的全部光谱信息。根据采样定理可知采样的光程差间隔应满足下列条件:

$$\Delta\alpha \leq \frac{1}{2\sigma_{\max}} \quad (1-10)$$

即:

$$\Delta\alpha \leq \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad (1-11)$$

也就是说对于最小波长而言至少需要两个采样点,若干涉图的采样间隔过大则采样不充分(欠采样),发生混叠现象,不能重现真实光谱信息。

实际对干涉图采样时,首先要了解最高截止频率,以确定应选取的最低采样频率。若光谱成分未知时,就需要用光学滤光片或电子滤波器等装置来限制光谱范围,去掉波数大于 $\sigma_{\max}$ 的光谱成分。信号处理中把这个为避免混叠而进行滤波的过程称为抗混叠滤波。

干涉成像光谱仪的直接测量结果为探测器采样记录的数字干涉图,为了获得目标像元的光谱信息,需要对记录的数字干涉图进行数据处理。人们围绕时间调制干涉图的数据处理开展了大量的研究工作,如切趾、相位校正等。到目前为止,时间调制干涉成像光谱仪的干涉图数据处理方法已经相对完善^[18-19]。

时间调制干涉成像光谱仪通过动镜移动来获取不同光程差位置的干涉图信号。随着精密机械和气浮导轨等技术的发展,动镜能实现较长距离的高精度移动,即干涉图采样光程差范围加大,因此时间调制干涉成像光谱仪的光谱分辨率高。但动镜移动产生的振动以及机械平台的抖动会引起干涉图畸变,最终将影响光谱信息的测量准确性,所以时间调制型干涉成像光谱仪不适合机载测量,但高光谱分辨率的优势使其在大气探测领域占有重要地位^[20-21]。

国外研制的时间调制干涉成像光谱仪主要有:

1. 1988年,美国加利福尼亚技术研究所喷气推进实验室(JPL)完成了“哈勃成像迈克尔逊光谱仪(HIMS)”的指标设计^[22],光谱范围是 $1.0\mu\text{m}-2.45\mu\text{m}$,光谱分辨能力为1—10 000。

2. 1993年,美国Lawrence Livermore国家实验室完成了基于迈克尔逊干涉仪的干涉成像光谱仪方案研究^[23],该技术可用于近紫外、可见光、近红外及中红外谱段,光谱分辨率可控制。1995年研制出样机,1996年利用该技术对化学品及气体的渗漏进行了监测实验,取得了满意效果^[24-27]。

3. 1999 年,美国 ITT 公司的空间与通信部开发出适用于空间应用的迈克尔逊型干涉(傅里叶变换)成像光谱仪实验样机^[28],干涉图采用双边采样,动态范围为 16 位。

1.3.2 空间调制干涉成像光谱仪

空间调制干涉成像光谱仪采用“杨氏双缝干涉”的原始思想,利用“剪切”干涉仪将景物的光谱辐射分成两束,然后使两束相干光在探测器平面上相遇形成干涉条纹,如图 1-8 所示:

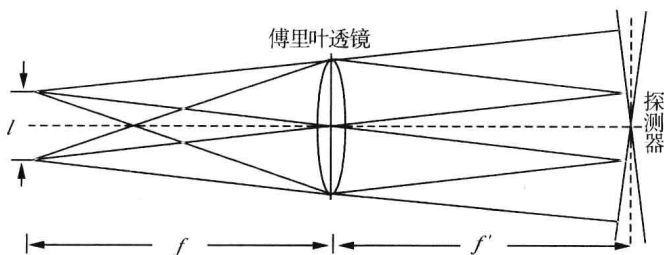


图 1-8 空间调制干涉成像光谱仪的等效干涉光路图

空间调制干涉成像光谱仪不需移动任何光学元件便可获得像元的完整干涉图,因此又称为静态干涉成像光谱仪或无动镜干涉成像光谱仪。

用于空间调制干涉成像光谱仪的干涉系统主要有两种:(1) 由一个分束器和两个平面反射镜构成的三角共路型干涉系统^[29]; (2) 以 Wollaston 棱镜或 Savart 偏光镜为核心的双折射型干涉系统^[30]。

1. 双折射型干涉成像光谱仪

双折射型干涉成像光谱仪利用双折射晶体作为分束元件,采用偏振干涉方法获取干涉图,主要有 Wollaston 棱镜和 Savart 偏光镜两种结构^[30]。这里以美国 1993 年研制的数字阵列扫描干涉成像光谱仪(DASI)样机为例,说明基于 Wollaston 棱镜分光结构的干涉成像光谱仪工作原理。

DASI 结构如图 1-9 所示^[7],由前置光学系统、入射狭缝、准直透镜、偏振片、Wollaston 棱镜、成像光学系统和探测器组成。

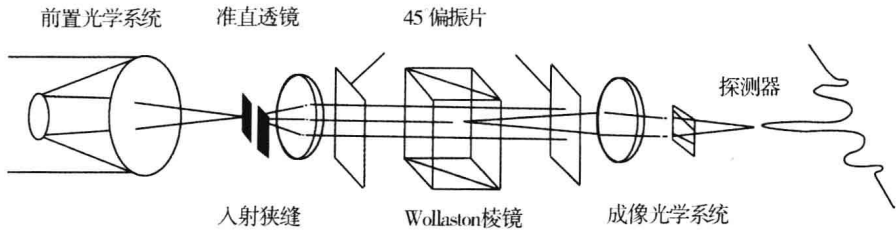


图 1-9 DASI 结构示意图

前置光学系统将被测目标成像在入射狭缝上,狭缝发出的光经准直透镜和起偏偏振片后,入射到 Wollaston 棱镜上。Wollaston 棱镜由两块直角三棱镜制成,两棱镜的光轴互相垂直,直角相对组合在一起,如图 1-10 所示。

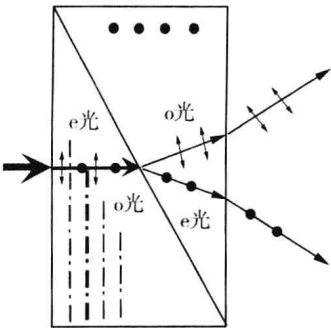


图 1-10 Wollaston 棱镜分光示意图

偏振光经 Wollaston 棱镜分解为强度相等、振动方向互相垂直的两束线偏振光,即 o 光和 e 光。o 光和 e 光经检偏偏振片复合成偏振方向相同的偏振光,再经傅里叶透镜和柱面镜会聚后,在傅里叶透镜和柱面镜共同的焦平面上即探测器平面上形成目标干涉图和像。

2. 三角共路型干涉成像光谱仪

三角共路型干涉成像光谱仪的光路组成包括四个子系统:前置光学系统、三角共路型干涉仪、成像光学系统和探测器,如图 1-11 所示^[19];