

航天高光谱成像仪简述(特邀)

唐绍凡,鲁之君,王伟刚,李欢

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘要: 航天高光谱载荷相比于传统的多光谱载荷,在光谱分辨率上有着巨大的提升,随着定量化遥感的发展,天基探测不仅可以对地面目标的几何信息进行采集,更可以利用高光谱数据实现大气、陆地资源、战场环境、海洋物质成份的探测,随着航天高光谱技术的不断发展,高时间分辨率的对全球气候、自然资源、水纹情形的光谱成像已成为可能。高光谱探测依据成像原理的不同,主要可以分为干涉型光谱仪、衍射型光谱仪、滤光片型光谱仪。文中针对其中应用较为广泛的光栅衍射型光谱仪、时间傅里叶变换光谱仪、空间傅里叶变换光谱仪、声光调制滤光片(AOTF)光谱仪、液晶可调谐滤光片(LCTF)光谱仪、高光谱滤光片光谱仪进行了介绍,并针对每种光谱仪的优势及存在的局限性进行了分析。

关键词: 光栅衍射型光谱仪; 时间傅里叶变换光谱仪; 空间傅里叶变换光谱仪;

AOTF 光谱仪; LCTF 光谱仪; 高光谱滤光片光谱仪

中图分类号: TP7391.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0303003

Brief description of space hyperspectral imager (invited)

Tang Shaofan, Lu Zhijun, Wang Weigang, Li Huan

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Compared with traditional multispectral load, the space hyperspectral load has a great improvement in spectral resolution. With the development of quantitative remote sensing, space-based detection can not only collect geometric information of ground targets, but also detect the material composition of atmosphere, land resources, battlefield environment and marine resources by using hyperspectral data. With the continuous development of space hyperspectral technology, it has become possible to monitor global climate, natural resources and hydrographic landforms with high temporal resolution. According to different imaging principles, hyperspectral detection can be divided into interference spectrometer, diffraction spectrometer and filter spectrometer. In this paper, grating diffraction spectrometer, time Fourier transform spectrometer, space Fourier transform spectrometer, AOTF spectrometer, LCTF spectrometer and hyperspectral filter spectrometer were introduced, and the advantages and limitations of each spectrometer were analyzed.

Key words: grating diffraction spectrometer; time Fourier transform spectrometer; space Fourier transform spectrometer; AOTF spectrometer; LCTF spectrometer; hyperspectral filter spectrometer

收稿日期:2018-10-10; 修订日期:2018-11-20

基金项目:科技部重点研发项目(2016YFB00501)

作者简介:唐绍凡(1972-),男,研究员,硕士生导师,博士,主要从事遥感器总体设计方面的研究。Email: sftang@126.com

0 引言

传统的光学遥感载荷以多光谱遥感载荷为主,由于其成像谱段较少且在光谱维成像不连续,因此只能获取地物的几何信息及少量光谱信息,无法探测得到地物的三维光谱立方数据。

随着航天光学遥感技术的发展,遥感领域针对定量化遥感的需求不断提升。在大气成分探测、陆地资源探测、海洋资源探测、战场环境探测等多个领域,仅仅得到目标的几何信息及少量光谱信息是无法满足探测需求的,高光谱遥感载荷通过将入射的自然光进行分光,可以得到每个地物在不同谱段反射或辐射的单色光,利用大量的先验信息对每个地物的光谱曲线进行分析,不仅可以得到地物的几何信息,更可以对地物的物质组成进行进一步的探测。现有的高光谱探测方法主要包含三类:干涉型光谱仪、衍射型光谱仪、滤光片型光谱仪,依据其具体的探测模式又可细分为:光栅衍射型光谱仪、时间傅里叶变换光谱仪、空间傅里叶变换光谱仪、AOTF 光谱仪、LCTF 光谱仪、渐变滤光片光谱仪。

1 衍射型光谱仪

衍射型光谱仪以光的衍射效应为原理,通过光栅或各向异性的晶体进行分光,最终实现复色光到单色光的分光,主要的探测模式为光栅分光、AOTF 分光。

1.1 光栅衍射型光谱仪

光栅形光谱仪广泛应用于低轨、高轨遥感卫星,它以多缝夫琅禾费衍射为理论依据,利用光栅进行分光^[1]可有效实现遥感器的高光谱、超光谱成像遥感。

由多缝干涉原理可知,不论单色光波长为何值,多缝干涉皆会在 $\sin\theta \sim \sin\theta_0$ 处对衍射光强进行采样,其中 θ 为衍射角, θ_0 为入射角,通常采样位置为干涉零级,由于平面光栅的衍射零级位置始终位于干涉零级,因此通过平面光栅难以实现分光^[2]。

为了解决光栅光谱仪分光的问题,航天光谱载荷通常使用闪耀光栅实现复色光的分光,闪耀光栅如图 1 所示。

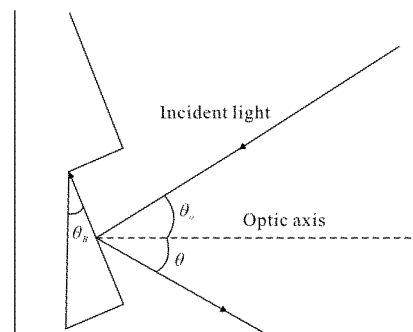


图 1 闪耀光栅

Fig.1 Blazed grating

闪耀光栅在不同入射角 θ_0 和不同闪耀角 θ_B 下的焦面光强分布如下式:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi a(\sin(\theta + \theta_B) - \sin(\theta_0 - \theta_B))}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a(\sin(\theta + \theta_B) - \sin(\theta_0 - \theta_B))}{\lambda}} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin\left(N \frac{\pi}{\lambda} d(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d(\sin\theta - \sin\theta_0)\right)} \right]^2 \quad (1)$$

由上式可知:对闪耀光栅而言,焦面光强分布可被认为由三部分构成:光强常数 I_0 、单缝衍射采样强度以及多缝干涉采样脉冲强度。

仅对两不同谱段单色光在同一入射角不同闪耀角下光强的分布进行分析,结果如图 2 所示。

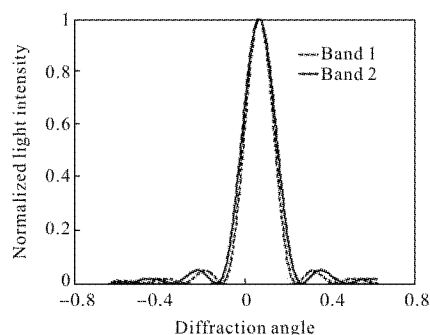


图 2 不同闪耀角下焦面衍射光强

Fig.2 Diffraction intensity of focal plane at different blazing angles

衍射零级位置与单色光波长无关,通过改变闪耀角可实现衍射零级在衍射角方向的偏移。

在独立地对衍射进行分析后,同时对多缝干涉采样信号进行分析,在不考虑衍射的影响时,在一定入射角下,干涉采样信号如图 3 所示。

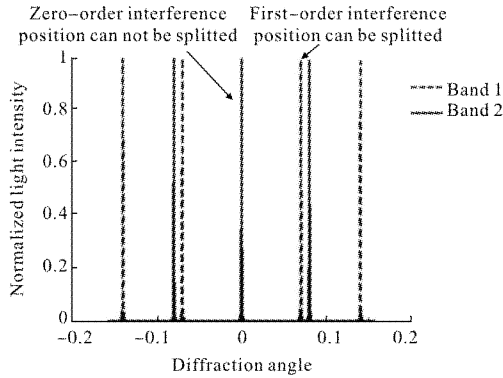


图 3 干涉采样信号

Fig.3 Interferometric sampling signal

由上图可知，系统干涉零级的位置与单色光波长无关，在干涉一级位置对应不同谱段的单色光，采样信号的位置不同，也就是说将衍射的零级通过闪耀角平移至干涉一级位置时即可实现分光，采样结果如图 4、5 所示。

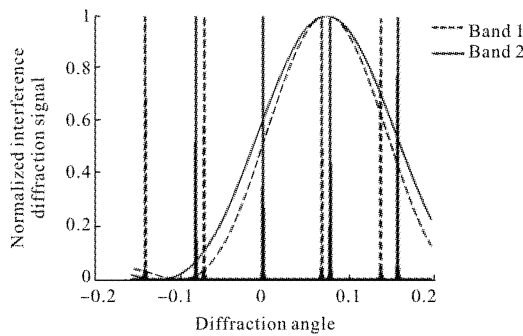


图 4 光栅光谱仪干涉分光采样方法

Fig.4 Sampling method of interference spectroscopy for grating spectrometer

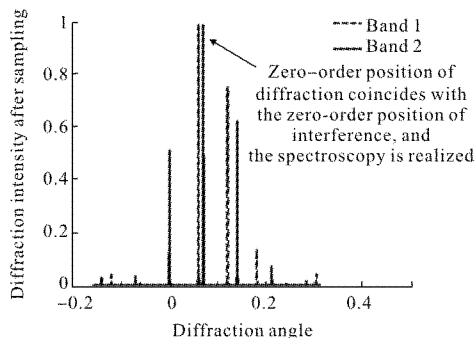


图 5 光栅光谱仪干涉分光采样结果

Fig.5 Sampling results of interference spectroscopy for grating spectrometer

航天光栅形光谱载荷通常以闪耀光栅作为分光原件配合光学系统进行高光谱成像，Offner 光学成

像系统是一种经典的三反光学系统，最早是 Abe Offner 提出^[3]。目前普遍应用于中继望远成像系统中，尤其在宽谱段遥感仪器中应用优势明显，其原理如图 6 所示。

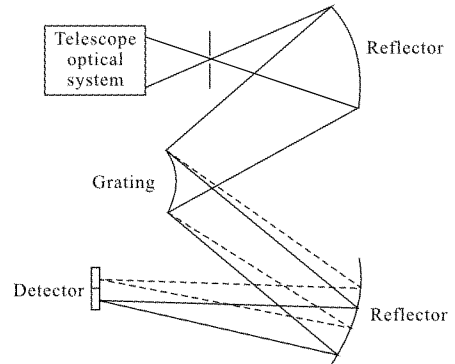


图 6 Offner 光学成像系统

Fig.6 Offner optical imaging system

复色光经过望远光学系统后成像在一次像面位置，通过在一次像面放置一个狭缝将面视场限制为一条线视场，通过三反结构是以光栅为分光原件可将不同谱段的单色光所对应的线视场成像在探测器不同线列。对低估光谱载荷其成像方式主要选择推扫成像，对高轨光谱载荷其成像方式主要选择扫描成像。

光栅衍射光谱仪具有高空间分辨率，高时间分辨率的优势，在航天光谱成像载荷中应用最为广泛，但由于存在二次光谱且衍射效率较低，在成像时存在一定的系统误差。

航天型光栅型光谱仪主要可以分为大气观测类载荷和对地观测类载荷，大气探测类载荷主要包括美国的 OCO-2，欧洲的 TROPOMI，北京空间机电研究所在研的 FY-3 03 批高光谱温室气体监测仪，长春光机所的碳卫星二氧化碳探测仪等等，对地观测载荷主要包括美国的 Hyperion、HyspIRI，北京空间机电研究所在研的静止轨道全谱段高光谱探测仪，上海技术物理研究所的 GF-5 可见短波红外高光谱相机等。

1.2 AOTF 光谱仪

声波是一种机械波，在介质中的传播会引起介质的疏密变化，进而导致介质中折射率的疏密变化，形成透射光栅。其中光栅常数为声波的波长。当满足衍射条件的光波透射时，将会发生衍射现象。AOTF 光谱仪即是以此为原理研制而成^[4]。

AOTF 以体光栅原理为理论^[5]，通过换能器(PZT)

与吸声体的相互配合可在 TeO₂ 晶体产生相位与声波, 相位与声波的关系是相对应的, 能够随时间和空间进行周期性变换, 最终在晶体内部形成一个相位光栅。AOTF 工作原理如图 7 所示。

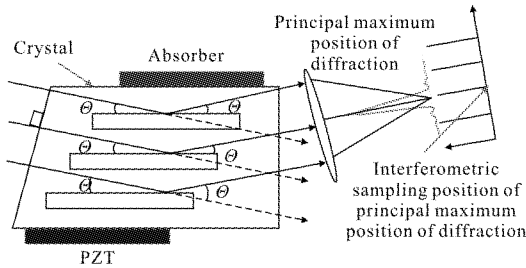


图 7 AOTF 工作原理示意图

Fig.7 Schematic diagram of AOTF working principle

对于各项同性的晶体, 由于其折射率不因入射光偏振态的改变而改变, 因此可以直接通过布拉格公式进行分析, 各项同性晶体声波频率与衍射极大值的对应关系如下:

$$2\lambda_s \sin(\theta) = \frac{\lambda}{n} \quad (2)$$

式中: λ_s 为声波的波长; θ 为入射角; λ 为入射光线的波长; n 为对应波长下的折射率, 通过调整 PZT 可以改变入射声波的波长, 当入射光是复色光时, 在衍射角不变的情况下可以得到复色光在不同波长下的光谱能量信息。

常见的声光可调晶体为各向异性晶体, 对于不同方向的偏振光折射率不同, 因此需要通过反常布拉格理论进行分析, 任何一束入射光可认为是沿两个方向振动的不同相位的偏振光的叠加, 当入射光经过衍射后其相位发生变化, 设入射光为 o 光, 衍射光为 e 光, 则对应入射光及衍射光其矢量叠加^[6] 如图 8 所示。

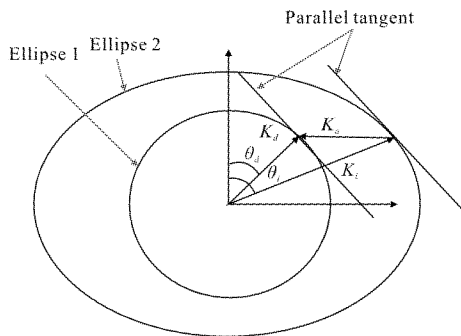


图 8 晶体动量匹配

Fig.8 Crystal momentum matching

其中, K_d 为入射光矢量, K_i 为反射光矢量, $K_a = K_d - K_i$, $|K_d| = \frac{2\pi n_d}{\lambda}$, $|K_i| = \frac{2\pi n_i}{\lambda}$, $n_d(\theta_d, \lambda)$ 为入射光的折射率, $n_i(\theta_i, \lambda)$ 为衍射光的折射率, 当入射光以不同角度入射时其折射率轨迹为椭圆 1, 衍射光以不同角度出射时其折射率轨迹为椭圆 2, 由晶体的旋光特性可知, 对应任意一组入射光和衍射光, 二者沿轨迹方向切线平行, 若 $|K_a| = \frac{2\pi f_a}{v_a}$, 则衍射方向为衍射极大值方向, 其中 f_a 为声频率, v_a 为声波沿 K_a 方向的波速。经计算可知当衍射方向为衍射极大值方向时, f_a 可表示为:

$$f_a = \left(\frac{v_a}{\lambda} \right) \left[n_i^2 + n_d^2 + 2n_i n_d \cos(\theta_i - \theta_d) \right] \quad (3)$$

通过调节 f_a 可以在固定的衍射角位置得到不同波长下的衍射极大值。成像方式如图 9 所示。

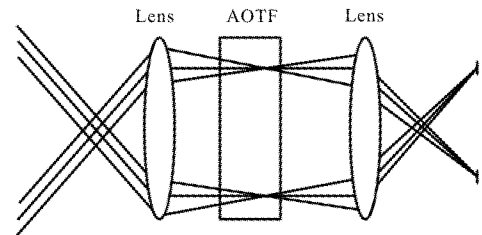


图 9 AOTF 光线成像系统

Fig.9 AOTF ray imaging system

当入射角变为 $\theta_i \pm \delta_i$, $\delta_i = \pm 0.45^\circ$ 时, 衍射光强下降为入射角 θ_i 处的一半, 由此可知对于 AOTF 的光谱成像仪, 当其口径过大时入射光的孔径角过大, 衍射方向的能量较弱。

AOTF 光谱仪可通过换能器(PZT)与吸声体的配合进行光谱筛选, 针对不同目标可有选择性的在特定谱段进行探测, 可针对不同行业进行定制化的光谱数据筛选, 然而由于 AOTF 光谱仪的口径一般较小因此在高分辨率成像时存在一定局限性。

航天 AOTF 光谱仪主要应用于行星探测, 中国的 CE-3 月球探测仪, 美国国家航空航天局 NASA 研制的 AIMS 和欧洲航天局 ESA 研制的 SPICAM、SPICAV 等 AOTF 成像光谱载荷均已用于他们各自的行星探测任务。

2 干涉型光谱仪

干涉型光谱仪以光的干涉效应为原理, 通过动镜扫描、偏振干涉、棱镜干涉等方式进行分光, 主要的探测模式为时间傅里叶变换光谱仪、空间傅里叶变换光谱仪、AOTF 光谱仪、LCTF 光谱仪。

2.1 时间傅里叶变换光谱仪

时间傅里叶变换光谱仪以迈克尔逊干涉为原理^[7], 利用干涉信号和光谱图之间的对应关系, 通过测量干涉信号和对干涉图进行傅里叶积分变换对光谱进行解析, 其原理如图 10 所示。

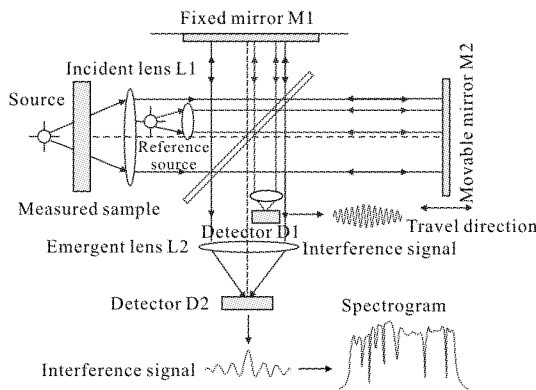


图 10 时间傅里叶变换光谱仪

Fig.10 Time Fourier transform spectrometer

光谱仪中接收到的光是连续的, 由无数个无限窄的单色光组成的复色光。当这些光通过迈克尔逊干涉仪时, 每一种单色光都发生干涉, 产生干涉光。复色光光源的干涉图就是由这些无数个无限窄的单色干涉光组成的。

设单色光波长 $\lambda(\text{cm})$, 波数 ν 。波长 λ 和波数 ν 的关系是: $\nu=1/\lambda$ 。假定分束器是一个不吸收光的薄膜, 反射率和透射率各为 50%。如果动镜匀速移动, 单色光的干涉图是一个余弦波。每当光程差等于单色光波长的整数倍时, 到达检测器的信号最强。

当一个光源发出的辐射是复色光, 测得的干涉图是组成复色光的单色光的干涉图相加。零光程差时, 干涉信号最强。随着光程差的增加, 干涉图强度呈指数衰减。谱线越宽, 干涉图衰减越快。

对连续光源, 干涉图用积分表示, 即对单色光干涉图方程进行积分:

$$I(\delta)=\int_0^{+\infty} B(\nu)\cos(2\pi\nu\delta)d\nu \quad (4)$$

式中: $B(\nu)$ 为复色光在波数 ν 下的光强; $I(\delta)$ 为光程差为 δ 这一点时, 检测器检测到的信号强度。这个信号是从 $0\sim+\infty$ 对所有波数(所有波长的光)进行积分得到的, 即所有波长干涉图强度的加和。

由公式(4)得到的只是干涉图, 为了得到光谱图, 对公式(4)进行傅里叶逆变换:

$$B(\nu)=\int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta)\cos(2\pi\nu\delta)d\delta \quad (5)$$

式中: $I(\delta)$ 为一个偶函数, 故:

$$B(\nu)=2\int_0^{+\infty} I(\delta)\cos(2\pi\nu\delta)d\delta \quad (6)$$

公式(6)表明, 理论上对应一束自然光可以测量一条波数从 $0\sim+\infty \text{ cm}^{-1}$, 而且分辨率无限高的光谱曲线。然而由于干涉仪的动镜扫描距离是有限的, 因此探测得到的光谱范围也是有限的。

时间傅里叶变换光谱仪光谱分辨率极高, 大气类载荷可达到 0.02 cm^{-1} ^[8], 可有效满足用户对高光谱分辨率的要求, 然而受成像方式限制, 其空间分辨率通常较低。

时间傅里叶变换光谱仪主要针对大气成分的探测需求, 从成像模式上可以分为对地观测载荷及临边观测载荷, 对地观测载荷主要包括北京空间机电研究所的 FY-3 04 星高光谱温室气体监测仪, 日本 GOSAT 光谱仪。临边观测模式的光谱仪主要包括北京空间机电研究所研制的 GF-5 大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪以及加拿大的 ACE-FTS 光谱仪。

2.2 空间傅里叶变换光谱仪

空间调制形傅里叶变换光谱仪不同于时间调制形傅里叶变换光谱仪, 其主要特点是利用棱镜分光的方式将线视场像面中的每个点在光谱维进行展开, 最终得到每个像点在光谱维的干涉图像, 通过对干涉图像进行傅里叶变换最终可得到每个点的光谱曲线^[9], 其示意图如图 11 所示。

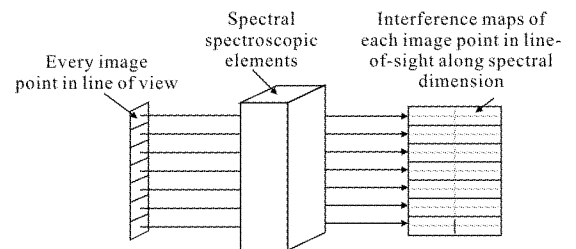


图 11 空间傅里叶变换光谱仪

Fig.11 Space Fourier transform spectrometer

光谱分光通常使用 Sagnac 棱镜作为分光元件^[10], 其分光原理如图 12 所示。

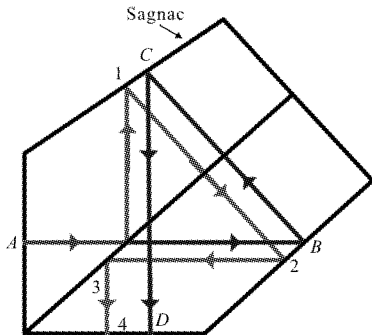


图 12 Sagnac 棱镜分光

Fig.12 Sagnac prism splitting

设 A 为线视场任意像点的一条入射光线, 当入射光进入棱镜后被分为两路, 一路沿着 1、2、3、4 的顺序射出棱镜, 一路沿 B、C、D 的顺序射出棱镜, 出射光出射位置不同但光程差相同。将线视场一次像面放置于傅里叶透镜前焦面位置处, 对应线视场同一像点的两束出射光在前焦面上就形成了两个虚物点, 这两个虚物点形成于同一光源, 满足相干条件, 因此傅里叶透镜可将相干光束形成平行光, 调整探测器位置, 使其位于傅里叶透镜的后焦面上, 则两支光束的干涉图即可被探测器所接收, 成像原理如图 13 所示。

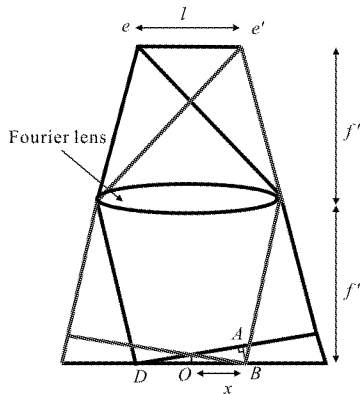


图 13 空间傅里叶变换光谱仪分光原理

Fig.13 Spectroscopic principle of space Fourier transform spectrometer

图中 e, e' 为出射光线的两个虚物点, 光线通过傅里叶透镜后形成两束平行光, 对于探测器平面上一点 B 对应两个像的光程差为 AB , B 点距离光轴与探测器平面交点 O 的距离为 x , 则两虚物点在 B 点处的光强可表示为^[11]:

$$I = I_0 + I_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} lx/f' \quad (7)$$

式中: l 为两虚物点间的距离; f' 为傅里叶透镜焦距, 对上式进行傅里叶变换即可得到每个像点对应的光谱曲线。

空间傅里叶变换光谱仪由于没有活动机构, 因此相比于时间傅里叶变换光谱仪更为稳定, 设计也更为简单, 但由于系统的最大光程差较小, 因此探测谱段光谱分辨率提升较为困难, 且由于探测器存在非均匀性, 探测光谱存在一定系统误差。

航天用空间傅里叶变换光谱仪的主要研制单位中国科学院西安光学精密机械研究所研制的 CE-1 干涉成像光谱仪成功地完成了对月球表面物质的探测。

2.3 LCTF 光谱仪

液晶可调谐滤光片 LCTF 一般由一个起偏器和多组 Lyot 滤光片构成, 每一个 Lyot 滤光片由晶片、检偏器构成。其结构如图 14、15 所示^[12]。

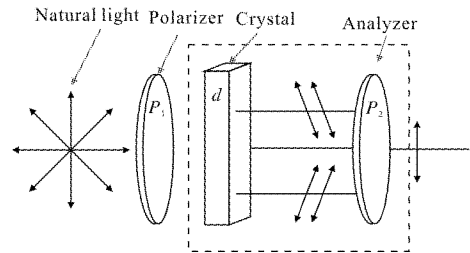


图 14 LCTF 光谱仪

Fig.14 LCTF spectrometer

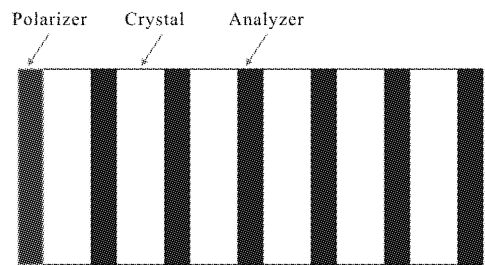


图 15 LCTF 光谱仪剖面图

Fig.15 LCTF spectrometer profile

垂直入射的自然光经过起偏器以偏振方向 P_1 进行传播, 当光线通过晶体后沿 X、Z 方向被分解为 o 光、e 光, 最终通过检偏器以 P_2 方向进入下一级 Lyot 滤光片进行进一步的调制。

LCTF 几何示意图如图 16 所示, 偏振方向投影如图 17 所示, 其中 X、Z 方向为 e 光 o 光的偏振方向, 则由几何关系推导可知通过第一级滤光片的偏

振光光强可表示为^[13]:

$$I=I_0[\cos^2(\beta)-\sin(2\alpha)\sin(2(\alpha-\beta))\sin^2(\varphi/2)] \quad (8)$$

式中: α 与 β 为 P_1 、 P_2 方向与 X 、 Y 方向的夹角; φ 为 e 光 o 光通过厚度为 d 的晶片后的光程差,通过调整起偏器、晶体、检偏器的相对姿态可将 β 的角度设置为 0° ,将 α 的角度设置为 45° 。则光强 I 可表示为:

$$I=I_0\left[\cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right] \quad (9)$$

式中: $\varphi=\frac{2\pi d}{\lambda}(n_e-n_o)$, λ 为偏振光的波长, n_e 、 n_o 分别为 e 光 o 光的折射率,设共有 N 级滤光片,若将每一级的晶体厚度设置为 $d_i=2^i d$, $i \in (0, N)$, 则最终的出射光光强可以表示为:

$$I_{\text{out}}=\prod_N I_0\left[\cos^2\left(\frac{2^i \pi d}{\lambda}(n_e-n_o)\right)\right] \quad (10)$$

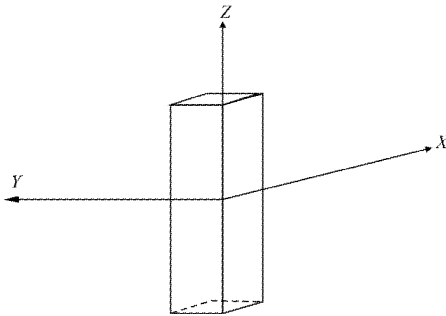


图 16 LCTF 几何示意图
Fig.16 LCTF geometric diagram

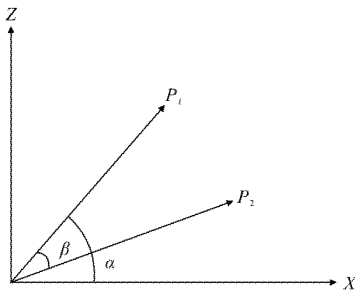


图 17 o -ray e -ray 矢量投影
Fig.17 o -ray e -ray vector projection

经仿真可知,若以波数为参考,每一级滤光片对应的调制函数如图 18 所示。

由图 18 可知,在 4760 cm^{-1} 下,每一级滤光片的调制函数都取得最大值,因此 LCTF 可通过多级滤光实现成像系统在较小波数范围内的光谱采样,最终采样脉冲如图 19 所示。

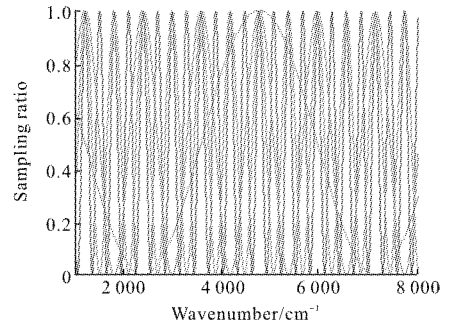


图 18 每级滤光片调制函数

Fig.18 Modulation function of each stage filter

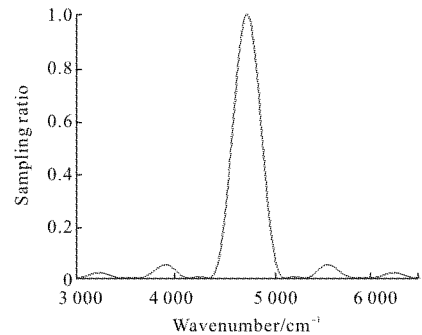


图 19 4760 cm^{-1} 采样结果

Fig.19 4760 cm^{-1} sampling results

若考虑视场角的影响,当入射光以一定角度入射时,出射光光强可表示为^[14]:

$$I_{\text{out}}=\prod_N I_0\left[\cos^2\left(\frac{2^i \pi d}{\lambda \cos(\theta_i)}(n_e-n_o)\right)\right] \quad (11)$$

式中: θ_i 为入射光对 e 光 o 光折射角的平均值。由此可知当入射角发生变化时出射光线的光谱会发生一定偏移,因此视场一般较小。

通过调整液晶上施加的电压可改变晶体对 e 光 o 光的折射率,进而实现谱段筛选。

LCTF 可有效根据采样目标适时调整光谱探测范围,实现载荷有针对性的光谱探测,然而 LCTF 视场角一般较小,但光谱分辨率较高,因此,更适用于视场角较小的光谱成像载荷。

LCTF 光谱成像技术暂时还未有在轨运行的载荷,因其光谱分辨率较高且成像方式简单,在不久的将来必将在航天领域占有一席之地。

3 滤光片型光谱仪

多光谱载荷通常使用滤光片进行滤光,但带宽一般较高,高光谱滤光片型光谱仪利用集成法布里珀洛型线性渐变滤光片可实现窄带滤光。

3.1 高光谱滤光片型光谱仪

高光谱滤光片型光谱仪使用集成法布里珀洛型线性渐变滤光片进行滤光^[15],集成法布里珀洛型线性渐变滤光片在单一基片上集成了多个微型法布里珀洛滤光片,F-P 滤光片中空谐振腔的厚度、高低折射率介质的厚度以及介质层数,共同决定了其中心波长及带宽。

在两个平行的平板反射镜中间间隔一个空腔谐振腔,是 F-P 滤光片的最初形式,F-P 干涉仪是两块相同的、间距为 d 的平行反射镜,如图 20 所示,当两个反射镜具有同样的高反射率时,干涉仪实现对某一波长高透射,空腔厚度变化时,透过的中心波长也随之改变。

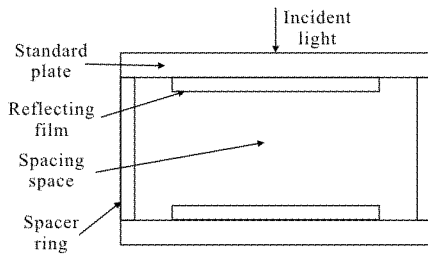


图 20 集成法布里珀洛型线性渐变滤光片
Fig.20 Integrated Fabry-Perot linear gradient filter

高光谱滤光片型光谱仪可通过镀膜的方式实现片上滤光,大大释放光学系统的设计难度,但由于镀膜技术较为复杂,研制难度较大。

航天光谱渐变滤光片主要成像模式有两种,一种是在面阵探测器上对应每一行镀上厚度不同的镀膜,以实现探测器渐变滤光的效果,此种成像模式常用于推扫成像模式如图 21 所示。另一种成像模式通

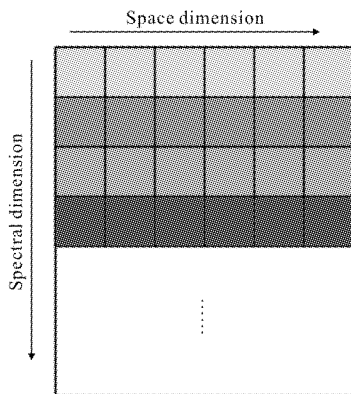


图 21 高光谱滤光片成像模式一
Fig.21 Imaging mode 1 of hyperspectral filters

过在探测器不同位置划分子区域的方式进行探测,认为每个子区域对应一个地面分辨率,子区域由 $n \times n$ 个像元构成,每个像元镀膜厚度不同探测谱段不同,在采集数据时将不同子区域相同位置像元进行拼接即可得到该位置所对应谱段的遥感图像,成像方式如图 22 所示。

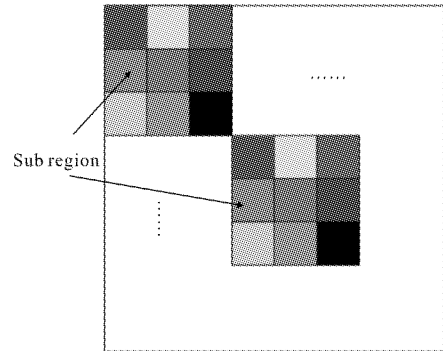


图 22 高光谱滤光片成像模式二
Fig.22 Hyperspectral filter imaging mode 2

航天高光谱渐变滤光片因其尺寸小,成像方式较为简单,有着广泛的应用前景。主要的应用载荷包括中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的吉林一号卫星。

4 结 论

高光谱遥感在军事、大气科学、海洋科学,农业科学等领域有着广泛的应用前景。各类高光谱成像方式针对不同需求有着各自独特的优势,AOTF、LCTF 光谱仪成像方式较为简单,且成像光谱稳定性高,但视场角及口径难以做得很大,因此更适用于小行星及月球探测。空间傅里叶变换光谱仪成像方式稳定,但最大光程差较低,因此适用于地理资源探测,时间变换傅里叶光谱仪光谱分辨率较高,但空间分辨率较低且活动机构成像较为复杂,主要适用于大气成分探测,高光谱滤光片式光谱仪体积小,光学系统简单但探测器制作工艺较为复杂且透过率较低,因此适用于低轨推扫成像。光栅型光谱仪在空间分辨率及光谱分辨率方面都有着较为突出的优势,在光学遥感领域有着较大的发展空间。高光谱成像技术将传统的遥感信息从二维拓展到三维,在定量化遥感迅猛发展的今天,高光谱遥感必将成为我们认识世界、

改造世界的重要手段。

参考文献：

- [1] Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Lu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. (in Chinese)
- [2] Cheng Yu. The design and fabrication of convex blazed grating with small blaze angle [D]. Soochow: Soochow University, 2014. (in Chinese)
- [3] Tong Yajun, Wu Gang, Zhou Quan. Design method of Offner imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1148–1152. (in Chinese)
- [4] Chang Lingying, Zhao Baochang, Qiu Yuehong. Optical and mechanical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 345–349. (in Chinese)
- [5] Li Yongshuai, Wang Zhibin, Chen Youhua. Optical design of large FOV imaging system for AOTF spectrum camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(1): 41–45. (in Chinese)
- [6] Hao Yonggui. The research of hyperspectral imaging technology based on the acousto-optic tunable filter [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] Weng Shifu. Fourier Transform Infrared Spectrometer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [8] Fan Bin, Chen Xu, Li Bicen. Technical innovation of optical remote sensing payloads onboard GF-5 satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0102002. (in Chinese)
- [9] Ma Wenpo. Aerospace Optical Remote Sensing Technology [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2011. (in Chinese)
- [10] Chang Baochang, Yang Jianfeng, Xue Bin. Design of solid Sagnac interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 474–478. (in Chinese)
- [11] Fei Xinlin. Optical design of spectral imaging system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [12] Krasilenko V G. Prospects of liquid crystal structures application in instrumental realizations of neural network matrix – tensor equivalental models (MTEM) [C]//Selected Papers from the International Conference on Spectroscopy of Molecules & Crystals, 2002.
- [13] Du Lili, Yi Weining, Zhang Dongying. Multispectral image acquisition system based on liquid crystal tunable filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 187–191. (in Chinese)
- [14] Zhang Dongying, Hong Jin, Tang Weiping. Design of hyperspectral imaging system based on LCTF tuning [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2455–2458. (in Chinese)
- [15] Li Wenjie, Wang Chengliang, Shi Binbin. Design of spaceborne miniature imaging spectrometer based on linear variable filter [J]. *Infrared*, 2015, 36(12): 1–7. (in Chinese)