滤光片分光型高光谱相机发展现状及趋势 (特邀)

刘春雨[1], 丁 祎[1,2], 刘 帅[1], 樊星皓[1,2], 谢运强[1,2]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院天基动态快速光学成像技术重点实验室，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院大学 大珩学院，北京 100049)

摘 要：高光谱相机可将成像技术与光谱探测技术相结合，在对目标空间特征成像的同时，可以对每个空间像元形成多个窄波段实现连续的光谱覆盖，不同光谱信息能充分反映地物内部的物理结构、化学成分的差异。与传统的空间二维成像相比，高光谱相机可以同时获取目标的空间和光谱信息，在一定的空间分辨率下，能够获取宽谱段范围内地物独有的连续特征光谱，对地物的精准识别和探测具有显著优势，目前已成为对地遥感重要的前沿技术手段，在农、林、水、土、矿等资源调查与环境监测等领域具有重要的应用价值。随着滤光片镀膜技术的飞速发展，极大地促进了滤光片分光型高光谱相机的研制，目前基于滤光片分光原理的高光谱相机以大幅宽、高空间分辨率、高光谱分辨率和轻小型的优势成为高光谱遥感载荷的重要组成部分，在微纳卫星高光谱星座组网中获得广泛应用。主要对滤光片分光型的高光谱相机进行了综述，介绍了国内外典型滤光片分光型星载高光谱成像载荷，以及地面在研的滤光片分光型高光谱成像系统，并分析了这些系统的技术方案、性能指标及应用前景，阐述了基于滤光片分光原理的高光谱相机的技术特点和优缺点，最后展望了滤光片分光型高光谱相机的发展趋势。

关键词：遥感； 遥感载荷； 高光谱相机； 滤光片分光； 高分辨率
中图分类号：TB96 **文献标志码**：A **DOI**：10.3788/IRLA20210981

Development status and trend of filter hyperspectral camera (*Invited*)

Liu Chunyu[1], Ding Yi[1,2], Liu Shuai[1], Fan Xinghao[1,2], Xie Yunqiang[1,2]

(1. Key Laboratory of Space-Based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Daheng College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: While imaging the spatial characteristics of the target, the hyperspectral camera, which combine imaging technology with spectral detection technology, can form multiple narrow bands for each spatial pixel to carry out continuous spectral coverage. Spectral information can fully reflect the differences in physical structure and chemical composition of the ground features. Compared with traditional spatial two-dimensional imaging, it can obtain spatial and spectral information of the target at the same time. Under a certain spatial resolution, a wide continuous spectrum can be obtained. The unique continuous characteristic spectrum has outstanding advantages in accurate identification and detection of ground objects. It has become an important cutting-edge technology for remote sensing of the ground. And it is widely used in the investigation of agriculture, forestry, water, soil, minerals resources and environment monitoring. With the rapid development of filter coating technology, it has

收稿日期:2021-12-17; **修订日期**:2022-01-09
基金项目:国家自然科学基金 (41974210)
作者简介:刘春雨，女，研究员，博士生导师，博士，主要从事光学系统设计、光电系统总体设计等方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

greatly promoted the development of hyperspectral cameras based on the principle of filter splitting. At present, this type of hyperspectral cameras become an important part of the hyperspectral remote sensing payload and have been widely used in the networking of Nano-satellite hyperspectral constellations because of the wide range, high spatial resolution, and high spectrum. Hyperspectral cameras based on the principle of filter splitting were reviewed, and typical hyperspectral imaging payloads at home and abroad and other systems being studied were introduced. The technical solutions, performance indicators and application prospect of these systems were analyzed. The technical characteristics, advantages and disadvantages of hyperspectral cameras based on the principle of filter were explained. Finally, the development trend of filter hyperspectral was prospected.

Key words: remote sensing; remote sensing payload; hyperspectral camera; filter splitting; high resolution

0 引 言

高光谱相机又称为高光谱成像光谱仪，是集光谱采集和目标成像于一体的探测设备，利用成像光谱技术能够在连续光谱波段上对同一目标进行光谱成像，完成对该目标空间、辐射和光谱三重信息的整合，极大地提升了目标观测的信息维度。目前，高光谱相机已广泛应用于资源普查、环境监测、军事防御等多个领域。

根据分光原理的不同，现有的高光谱相机主要分为三类：色散型、干涉型和滤光片型。色散型高光谱相机一般先利用色散元件 (光栅或者棱镜) 进行分光，再经由成像系统成像在探测器上[1]；干涉型高光谱相机主要是利用干涉图与光谱图之间的对应关系，借助干涉仪来测量谱线元的干涉强度，并对干涉图进行逆傅里叶变换得到目标的光谱图[2−3]；滤光片型高光谱相机则是在成像光路中加入滤光片进行分光，根据滤光片的不同，滤光片型高光谱相机又可以细分为旋转滤光片型、楔形滤光片型、可调谐滤光片型和量子点滤光片型。图 1 所示为前三种滤光片高光谱相机的原理示意图。

基于滤光片型的高光谱相机具有系统结构形式简单、体积小、质量轻、空间分辨率高、灵活性好等优点。近年来，随着镀膜技术和商业高光谱遥感的发

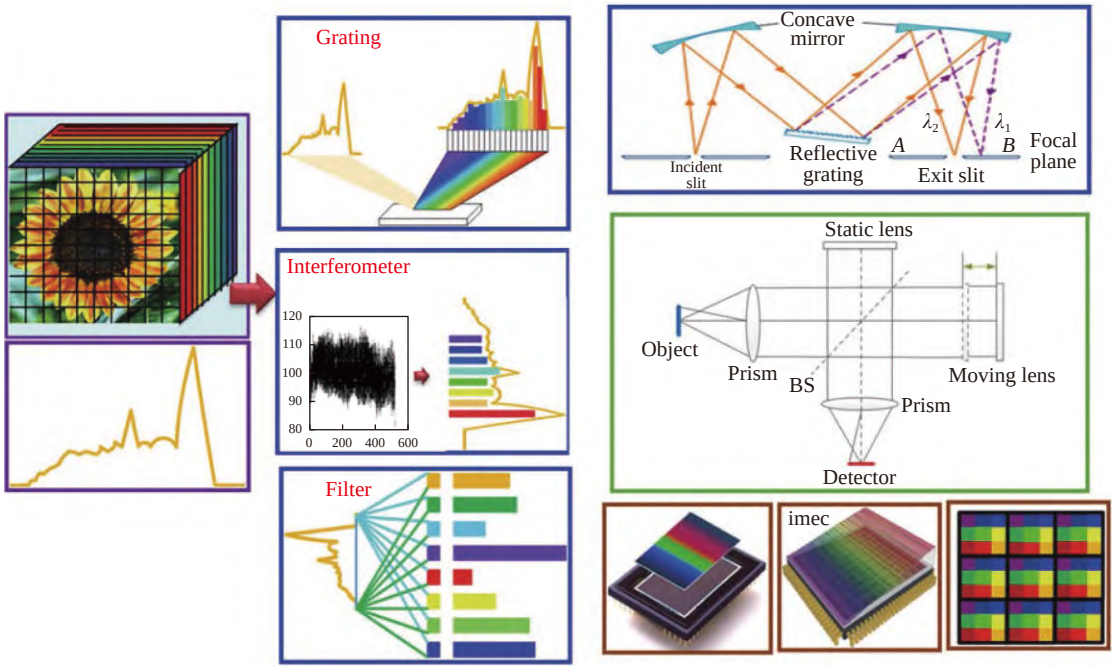

图 1 高光谱成像原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of hyperspectral imaging principle

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

展，基于镀膜型的高光谱相机也得以迅速发展，文中将对各种基于滤光片型高光谱相机的原理、发展现状以及发展趋势进行详细阐述。

1 旋转滤光片型高光谱相机

滤光片轮高光谱相机的结构如图 2 所示，它是以滤光片轮为分光元件，通过转动滤光片轮获得不同波段的光谱图像，从而完成复色光到单色光的分光。滤光片轮通常是将一组具有不同波长透过率的窄带滤光片固定在轮式结构上，每曝光一次采用一个滤光片。控制滤光片轮的旋转速度，使其转动频率与传感器采样频率同步，从而保证每个滤光片对应的谱段都能在传感器上成像[4]。

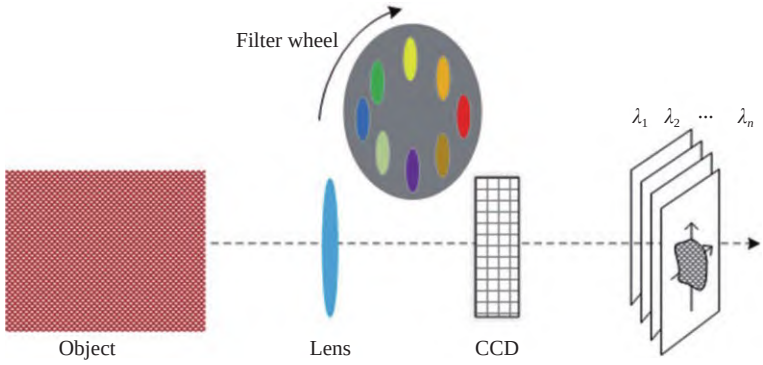

图 2 旋转滤光片型成像光谱仪结构图

Fig.2 Structure diagram of rotating filter imaging spectrometer

滤光片轮高光谱相机的关键器件是滤光片轮，可以根据观测波段的不同替换相应谱段范围的滤光片轮，光路结构简单，谱段更换灵活。但是由于光谱通道之间的切换需要依靠轮式结构的转动来完成，旋转结构带来的振动对成像质量影响较为明显，成像所需曝光时间较长；且单次曝光只能获得指定光谱范围的图像，光谱响应曲线是离散的，无法获取连续谱段的图像，存在实时性的问题；同时滤光片轮上各个滤光片的共面情况以及厚度均匀性也会带来成像模糊等问题。除此之外，随着光谱成像技术的发展，探测波段数目越来越多，滤光片轮已无法满足宽谱段高分辨率的观测，因此越来越多地被用于多光谱探测中。

1994 年，美国成功发射了对月探测卫星 Clementine，该卫星的有效载荷：UV/VIS 相机、NIR 相机和 HIRES 相机都用到了滤光轮，覆盖波段及滤光轮的相关参数如表 1 所示。

表 1 Clementine 卫星上所用滤光轮的相关参数

Tab.1 Relevant parameters of the filter wheel used on Clementine

Pay-load	Spectral range/nm	Filters	Center wavelengths and bandpass widths/nm					
			A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*
UV/VIS	415-1 000	6	415/40	750/10	900/20	950/30	1 000/30	—
NIR	1 070-2 840	6	1 100/60	1 250/60	1 500/60	2 000/60	2 600/60	2 780/120
HIRES	395-800	6	395-435	535-585	625-675	725-775	450-800	—

美国航空航天局研制的 JWST，其上搭载的 MIRI 中波红外相机-光谱仪和 NIRSpec 近红外多目标光谱仪都用到了滤光轮。NIRSpec 将滤光轮与光栅轮进行组合使用，其中滤光轮的主要作用是将光波分解为不同组分，再结合光栅轮进行更为精细的光谱分析。图 3 为 NIRSpec 所用滤光轮的示意图，该滤光轮覆盖光谱范围为 0.6~5 μm，主要由四个边缘滤光片、两个不同谱段的条带滤光片、一个用于捕获目标的透明滤光片以及一个用于在轨校准的反射镜组成。

MIRI 也是 JWST 的主要载荷之一，MIRI 主要由

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

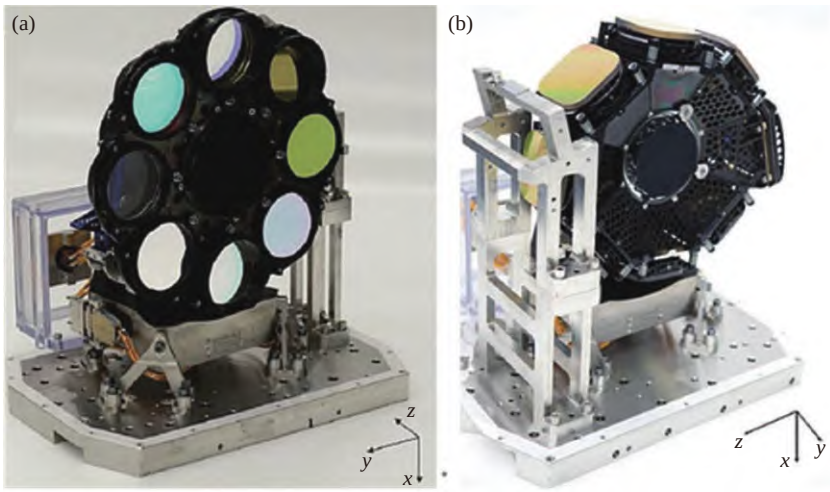

图 3 (a)NIRSpec 所用滤光轮的示意图; (b) 滤光轮辅助结构图

Fig.3 (a) Schematic diagram of filter wheel used in NIRSpec (b) Auxiliary structure diagram of filter wheel

成像仪和两个光谱仪 SPO、SMO 组成，负责在 5~28 μm 的中红外波段内进行成像及中低分辨率的光谱分析。滤光轮在 MIRI 中主要起连通成像、光谱的作用。如图 4 所示，该滤光轮主要分为 18 个通道，包括十个成像滤光片、四个日冕滤光片、一个中密度滤光片、一个双棱镜、一个透镜、一个与棱镜配重的明暗位置。

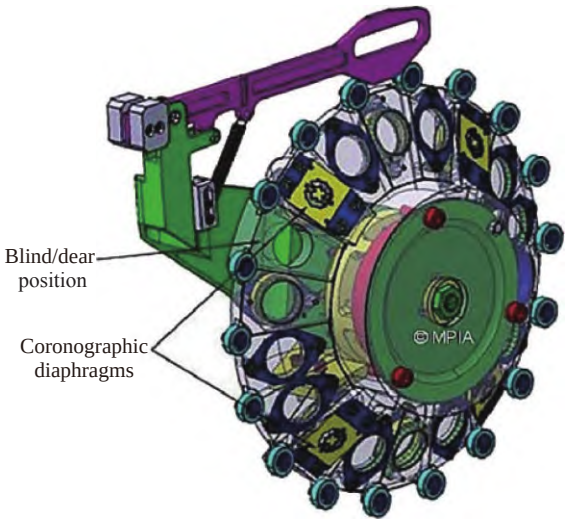

图 4 MIRI 上的滤光轮示意图

Fig.4 Schematic diagram of filter wheel on MIRI

Euclid 是欧洲航天局目前在研的卫星之一，预计发射至第二个拉格朗日点，该卫星的主要任务是在五年之内完成对整个河外星系暗弱目标的探测，有效载荷主要为一个成像仪器和一个光谱仪器，其中光谱仪器采用由四个滤光片构成的滤光轮进行分光，主要负责近红外波段的探测，其中每个滤光片有 8.5°的倾斜，防止在探测器上形成鬼像，图 5 为该光谱仪中滤光轮的早期设计模型[5]。

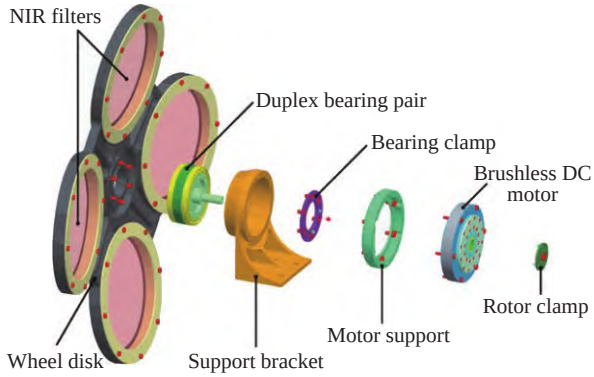

图 5 滤光轮机构设计分解图

Fig.5 Exploded view of the design of the filter wheel mechanism

2 可调谐滤光片型高光谱相机

可调谐滤光片高光谱相机以可调谐滤光片为分光元件，根据调谐方式的不同主要分为液晶可调谐滤光片 (Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF) 高光谱相机和声光可调谐滤光片 (Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF) 高光谱相机。

2.1 液晶可调谐滤光片型高光谱相机

如图 6 所示，液晶可调谐滤光片高光谱相机主要利用 LCTF 技术进行分光。

LCTF 是以液晶的电控双折射效应为原理进行研制的，它由多组平行排列的 Lyot 型滤光片级联而成，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

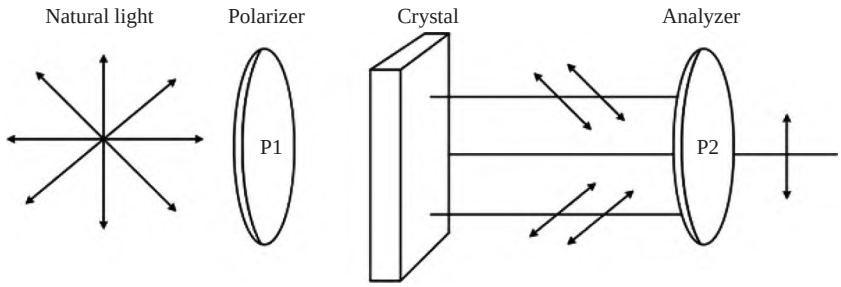

图 6 LCTF 成像光谱仪原理图

Fig.6 Schematic diagram of the LCTF imaging spectrometer

如图 7 所示，为一级 Lyot 滤光片的原理示意图，每一级 Lyot 滤光片都是通过在两个平行的偏振片之间填充液晶层和石英晶体来实现对波长的调制。

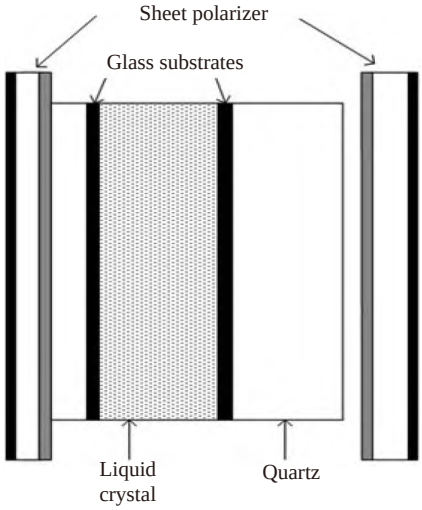

图 7 一级 Lyot 滤光片结构图

Fig.7 Structure diagram of primary Lyot filter

当某一波长的光经过第一个偏振片后会变成线偏振光，线偏振光进入液晶层时会发生双折射现象，产生一束寻常光 (o 光) 和非常光 (e 光)，它们的传播方向相同，但传播速度不同，因此经过液晶层后的出射光会产生相位差，相位差由公式 (1) 给出：

$$\delta = 2\pi d\Delta n(\lambda, T, V)/\lambda \tag{1}$$

式中：d 为液晶层的厚度；Δn为液晶对波长为λ的光的等效双折射率，且Δn依赖于波长λ、温度 T 和施加电压 V。

经过第二个偏振片后，两束光发生干涉，通过单极 Lyot 结构的透过率由公式 (2) 给出：

$$T_1 = \cos^2\frac{\delta}{2} = \cos^2\frac{(2\pi d\Delta n/\lambda)}{2} \tag{2}$$

若通过控制电压使每一级 Lyot 的光程差是前一级的二倍，即$\delta_{n+1} = 2\delta_n$，则 N 级 Lyot 滤光片级联的透过率为：

$$T = \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}d\Delta n\right)\cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}d\Delta n\right)\cdots\cos^2\left(2^{n-1}\frac{\pi}{\lambda}d\Delta n\right) \tag{3}$$

温度一定时，LCTF 的透射率函数仅依赖于波长和电压，利用晶体的光电效应，通过对液晶层施加外部电压，可以实现对波长的选择透过性。

LCTF 型高光谱相机主要通过电压调制透过的波长，可以实现任意宽波段范围内的快速调制，相比于滤光轮型高光谱相机，其无需轮式机构，避免了微振动等的影响，且其具有原理简单、体积小、能耗低等优势，在当前轻小型卫星有效载荷中占有独特地位。LCTF 型高光谱相机的视场角一般较小，适合对指定采样目标进行小视场范围的光谱成像。

值得注意的是，LCTF 作为核心分光元件，其本身存在光谱透过率低的问题，直接限制了 LCTF 成像光谱仪的光谱检测能力；此外，液晶的折射率受温度影响较大，中心波长随温度变化漂移明显[6]，对光谱测量精度也会产生一定的影响。

由美国喷气推进实验室自主研制的火星车样机 FIDO 上装有的相机 Pancam 就是由一组 CCD 相机和 LCTF 构成，其中 LCTF 被放在 CCD 相机的物方一侧，主要工作在 650 nm、740 nm 和 855 nm 波段处，带宽分别为 18 nm、25 nm 和 28 nm。

2014 年，日本发射了微纳卫星 Rising-2，主要用于观测高分辨率积雨云场景以及高层大气中的精灵现象，该卫星上搭载的高精度望远镜 HPT 可能是首个使用 LCTF 技术的星载载荷。HPT 的视场角为 0.28°×0.21°，光谱范围为 400~1 050 nm，其中 LCTF 仅用于近红外波段 (650~1 050 nm) 的分光，图 8 为 HPT 光路示意图。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

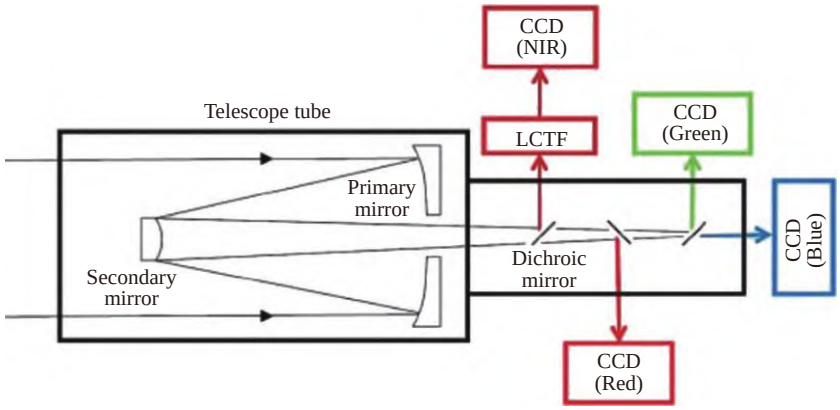

图 8 Rising-2 上搭载的 HPI 的光路示意图

Fig.8 Optical path diagram of HPI on Rising-2

2016 年，菲律宾发射的第一颗微型卫星 Diwata-1 上搭载的多光谱相机 SMI 也采用了 LCTF 技术，SMI 所在轨道高度为 400 km，空间分辨率达 80 m，覆盖波段为可见光波段 (420~700 nm) 和近红外波段 (650~1 050 nm)，主要用于监测植被变化和菲律宾水域浮游植物生长量的估测。

2.2 声光可调谐滤光片型高光谱相机

AOTF 主要由声光介质 (通常为各向异性晶体)、换能器阵列 (PZT) 和声终端组成。声波属于机械波，在介质中传播时会引起介质的疏密变化，由此会导致介质折射率的疏密变化，形成以声波波长为光栅常数的透射光栅，当光线以特定的角度入射到声光介质上时就会发生衍射现象，完成复色光到单色光的分光，ATOF 型高光谱相机就是根据该原理进行研制的。

与 LCTF 型高光谱相机相比，ATOF 型高光谱相机同样具备小型化的优势，能够适应机载、弹载等多类搭载环境。AOTF 型高光谱相机的波长调谐范围取决于声光晶体的通光谱段，尽管常用的氧化碲 (TeO_2) 晶体能够覆盖 0.2~4.5 μm 的波长范围，但是往往会受到超声换能器的带宽影响，使其波长调控范围被限制在一个倍程 (λ~2λ)[7]，因此，在调控范围的灵活性方面，LCTF 技术更具备竞争力。

2003 年 6 月，欧洲太空局发射的“火星快车”上搭载的 SPICAM 高光谱相机用于紫外和红外波段的探测，其中红外通道就采用了 Brimrose 公司的微型 AOTF 近红外光谱成像仪[8]，主要通过在 TeO_2 晶体上施加声波，实现了在 1.1~1.7 μm 波段内的分光。

2006 年 4 月，抵达金星的金星快车也应用了近红外 AOTF 光谱仪，光谱范围为 0.65~1.7 μm，光谱分辨率优于 1 nm。

2013 年，我国发射的“嫦娥三号”月球着陆车上搭载的凝视型高光谱相机 VNIS 也采用了 AOTF 的分光原理，图 9 所示为 AOTF 设计示意图。

VNIS 的光谱范围为 0.45~2.4 μm，可见光波段的

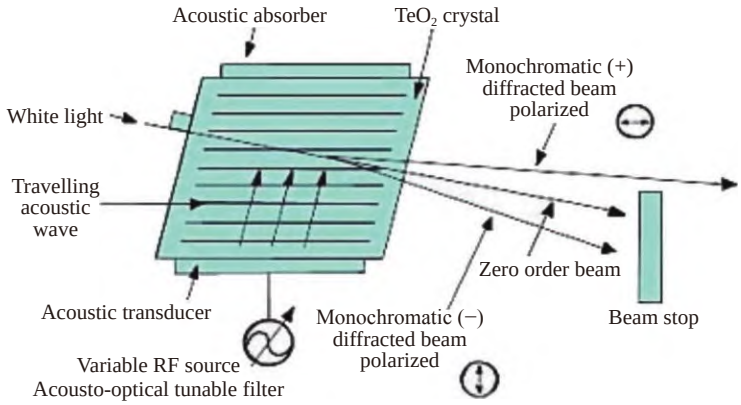

图 9 VNIS 中 AOTF 滤波片设计示意图

Fig.9 Design diagram of AOTF filter in VNIS

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

视场角为 6°×6°, 近红外波段的视场角为 3°×3°, VNIS 使用 40~180 MHz 的连续可调射频频率, 在 450~950 nm 波段实现了低于 8 nm 的光谱分辨率, 在 900~2 400 nm 波段实现了低于 12 nm 的光谱分辨率, 为月面巡视矿物组成析提供了科学探测数据[9], 是我国该类技术的首次空间应用。

3 楔形滤光片型高光谱相机

楔形滤光片型高光谱相机也被称为渐变滤光片型高光谱相机[1], 可以实现在光谱区和空间区的连续取样, 它的设计理念是将一个楔形多层薄膜介质作为滤光片, 并将其安装在紧靠着二维阵列探测器的位置[10−11], 使探测器的若干像元与渐变滤光片的某一光谱带相互对应, 图 10 为楔形滤光片谐振层厚度调制示意图。渐变滤光片型高光谱相机多以推扫成像为主, 推扫的方向与波长渐变方向一致, 通过扫描可以获得被测目标的完整数据, 像面上对应的就是全部工作波段。

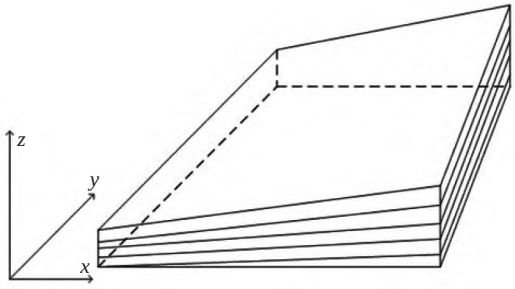

图 10 楔形滤光片谐振层厚度示意图

Fig.10 Schematic diagram of resonant layer thickness of wedge filter

渐变滤光片是一种特殊的法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 光学谐振器, 具有波长渐变、通道可选、性能稳定等优点, 其镀层呈楔子状, 改变谐振层的厚度, 渐变滤光片的中心波长也会随之改变。由于渐变滤光片不同中心波长所对应的膜层厚度变化较缓, 会带来膜系结构复杂、层数较多等问题, 但是近年来随着镀膜工艺水平的提高, 渐变滤光片的光谱透过率可以达到 70%, 光谱分辨率能达到 1%[12]。

根据渐变滤光片各波段与探测器像元之间的对应关系, 渐变滤光片高光谱相机又可以分为线性渐变型和滤光片阵列型, 下面将针对两种形式的高光谱相机的发展现状进行具体介绍。

3.1 线性渐变滤光片型高光谱相机

线性渐变滤光片 (Linear Variable Filter, LVF) 是一种特殊的滤光片, 其光谱特性会随位置线性变化, 能够将入射的复色光分解成与滤光片位置相关的光谱。线性渐变滤光片有带通、高通、低通等类型, 成像光谱仪中常用的线性渐变滤光片一般是基于多光束干涉原理的 F-P 窄带通线性渐变滤光片[13−14]。

F-P 窄带渐变滤光片通常由两个反射膜层与一个厚度渐变的腔层组成, 各位置的中心波长沿渐变方向连续线性变化, 如图 11 所示。其峰值透射波长 λ_0 由公式 (4) 给出[15]:

$$\lambda_0 = \frac{2nl}{k+(\varphi_1+\varphi_2)/2\pi} = \frac{2nl}{m} \tag{4}$$

式中: n 为谐振腔层的折射率; l 表示谐振腔层的厚度; φ_1和φ_2分别为上反射膜系和下反射膜系的位相; $k=0,1,2,\cdots$。

线性渐变滤光片与面阵探测器共同组成线性渐变滤光片型高光谱相机, 该类高光谱相机与光栅型高光谱相机相比具有光路紧凑、抗振动能力强等优势, 因此受到越来越多的关注[1,16]。

2000 年前后, OCLI 公司推出了商品化的 Micropac 系列光谱仪, 仪器的光谱分辨率小于 2.5% 倍的中心

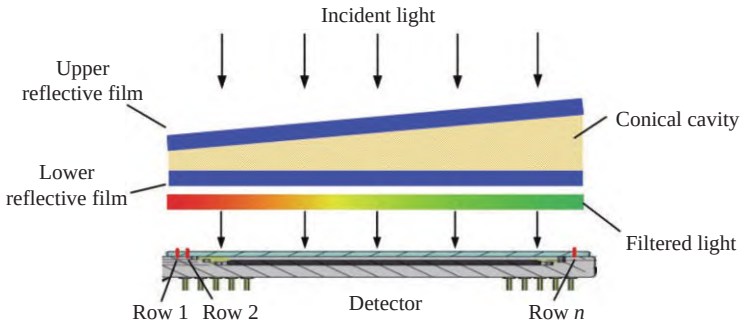

图 11 线性渐变滤光片结构及分光示意图

Fig.11 Schematic diagram of LVF structure and light splitting

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

波长，该系列可能是首款使用线性渐变滤光片的高光谱相机[17]。

2005 年，印度发射的“印度迷你卫星-1”搭载了线性渐变滤光片高光谱相机，该仪器的光谱范围为 400~920 nm，光谱分辨率优于 15 nm[18]。

2015 年，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张建采用双离子束溅射物理沉积方法，修正了线性渐变沉积速率，制备了高透过率、高色散系数的线性渐变滤光片。其工作波段为 650~1 050 nm，各个位置的中心波长峰值透过率均达到 85% 以上，中心波长的线性变化率为 20 nm/mm[19]。

2016 年，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的于新洋将线性渐变滤光片应用在水果的品质检测研究中，使用中心波长线性变化率为 35.9 nm/mm 的线性渐变滤光片研制了手持式近红外品质分析仪，其工作波段为 620~1 080 nm，光谱分辨率小于 1.5% 倍的中心波长[16]。

2017 年，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的袁境泽利用线性渐变滤光片设计了人体血红蛋白无创分析仪。该分析仪的工作波段为 620~1 080 nm，光谱分辨率小于 1% 倍的中心波长[13]。

2018 年，丹麦发射的立方星 GOMX[20]，其上搭载了微型渐变滤光片高光谱相机 HyperScout，光谱范围为 0.4~1 μm，光谱分辨率 15 nm，空间分辨率 70 m[20]。

2018 年，韩国标准与科学研究院的 Khaled Mahmoud 在 SPIE 会议上介绍了其研制的紧凑型电荷耦合检测器 (CCD) 光谱相机[21]，该光谱相机在像素数量为 1 280×1 024、像素尺寸为 4.65 μm 的 CCD 探测器上集成了 300~850 nm 波长的线性可变边缘滤波片，光谱分辨率为 10~20 nm。

2020 年，英国西苏格兰大学的 Shigeng Song[22] 使用旋转机械掩模方法和微波等离子体辅助脉冲直流反应溅射工艺实现了线性渐变滤光片的大量制备，如图 12 所示。

LVF 由交替的高/低折射率材料叠层制成。在一侧上沉积 54 个 H/L 交替层，H/L 交替层逐渐增加，并在基板的另一侧达到 110 个 H/L 交替层。最终，该 LVF 可以在 450~900 nm 的光谱范围内实现半波宽为 11.25 nm 的光谱分光，在中心波长处，光谱透过率可达 40%~80%，如图 13 所示。该制备工艺的优势在于

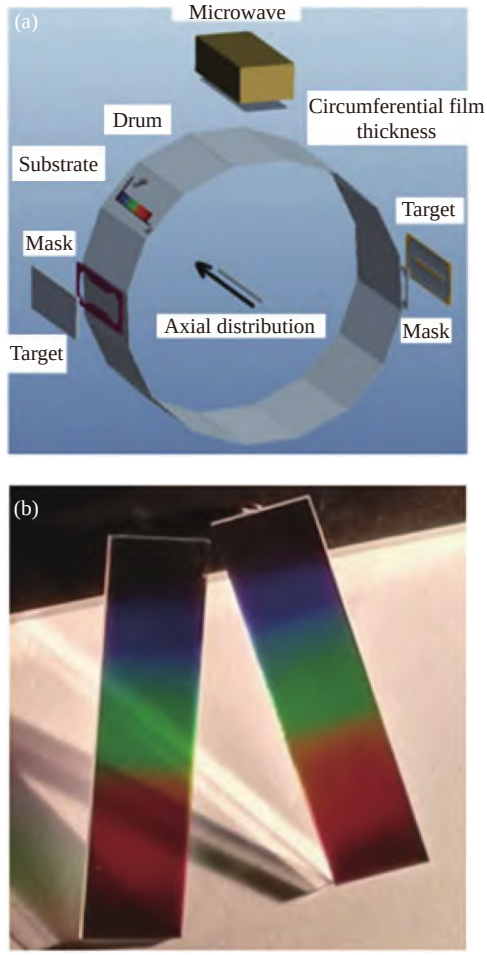

图 12 (a) 辅助脉冲-直流旋转鼓形溅射沉积系统原理图；(b) LVF 制备效果图

Fig.12 (a) Schematic diagram of microwave-assisted pulse-DC rotating drum sputtering deposition system; (b) Schematic diagram of LVF

可以批量制备廉价的线性渐变滤光片，推动线性渐变滤光片在无人机光谱仪等领域的使用。

2020 年，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘春雨[23] 团队利用线性渐变滤光片不受狭缝限制的特点，结合数字域 TDI 技术，解决了星载轻小型高分辨率高光谱相机信噪比不足的问题，研制了一款工作波段为 0.4~1 μm、地面分辨率为 10 m，平均光谱分辨率为 8.9 nm、系统总质量为 7 kg 的轻小型星载高光谱成像光谱仪，其原理如图 14 所示，探测器的 *P*1~*P*3 行连续成像多次，将多次成像的电子数相加可以提高图像信噪比。同年，该团队又公布了使用多片渐变滤光片探测器拼接技术的高分辨率大幅宽高光谱相机，该相机在 500 km 轨道处幅宽达到了 150 km，而质量仅为 9.2 kg[24]。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

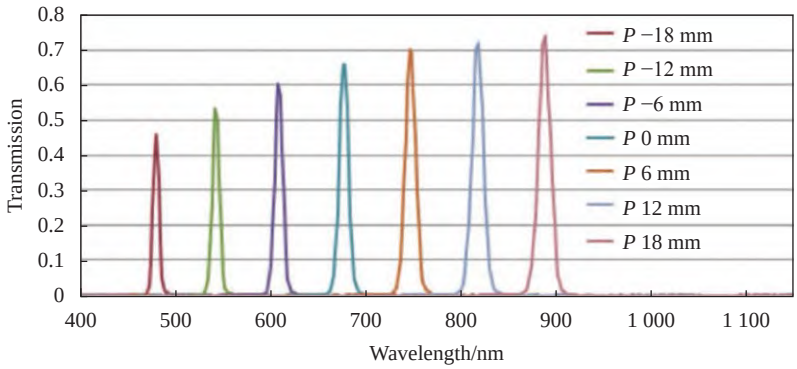

图 13 滤光片的光能透过率

Fig.13 Light energy transmittance of filter

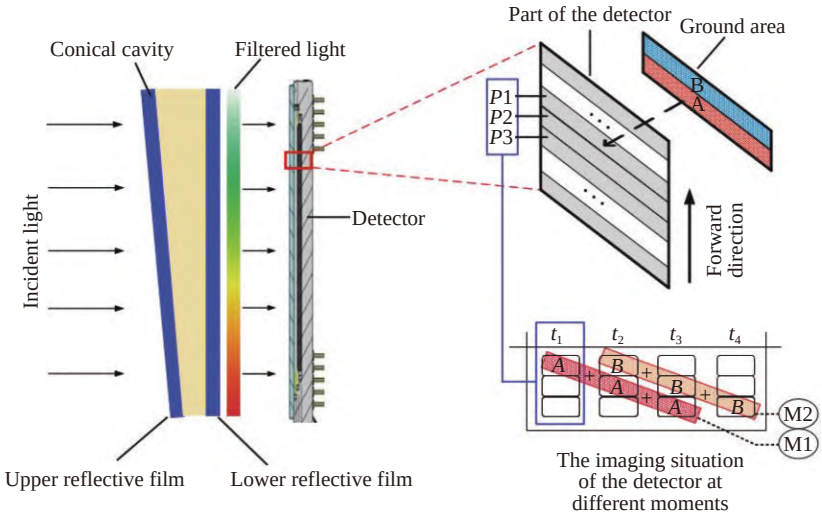

图 14 线性渐变滤光片与数字域 TDI 的原理图

Fig.14 Principle diagram of LVF and TDI

3.2 滤光片阵列型高光谱相机

滤光片阵列是一个由基元重复排列而成的周期结构，该基元内部可以划分为 n 个区域，通过设置每个区域的膜层厚度控制通过该区域的中心波长，将滤光片阵列与探测器像元进行一一对应，即可实现像素级的光谱探测，图 15 为滤光片阵列的分布方式示意图。数据采集完成后，将不同基元内部相同区域所对应的像元进行拼接处理即可得到该位置所对应的全谱段信息。

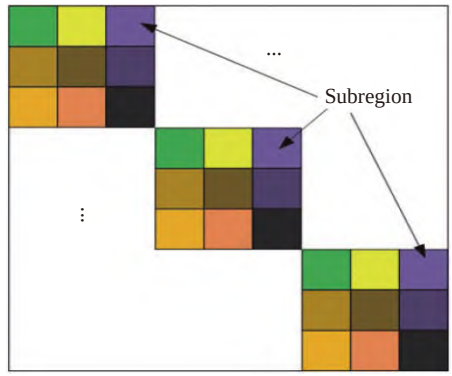

图 15 滤光片阵列的排布方式示意图[25]

Fig.15 Schematic diagram of the arrangement of the filter array[25]

滤光片阵列高光谱相机在探测时要求滤光片阵列与探测器像元相匹配，匹配区域过小会导致系统的对准误差较大，对最终的光谱成像质量产生一定影响[26]。相较于传统推扫的高光谱相机，该相机获取光谱信息和图像信息的方式为凝视拍摄，可进行视频高光谱成像，在进行暗弱目标探测、天文观测、机载探测及安防监视领域优势较为明显。

自 2010 年开始，包括我国在内的多个国家都已对其开展了深入研究并取得了显著成果。美国海洋光学公司的 Jim Lane 等人设计了一款基于像素级滤

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光片的四通道、半波宽约为 20 nm 的成像光谱仪[27]。该光谱仪四个通道的中心波长分别 750 nm、772 nm、802 nm 和 834 nm。滤光片物理尺寸为 35 mm×23 mm，包含 875 万 (3 500×2 500) 个单独的滤光单元，每个滤光单元的尺寸为 10 μm×10 μm，每个滤光单元周围有 1 μm 的边界，从而形成 8 μm×8 μm 的有效区域。滤光片的局部区域如图 16 所示。

该光谱仪的实验光路如图 17 所示，其包含一个摄影物镜，一个像素级滤光片，一个中继物镜和一个全色图像接收器。成像过程中，摄影物镜在滤光片上形成物体的中间图像，随后中继透镜将滤光片处的像再次成像到全色图像接收器上。

比利时微电子研究中心的 Bert Geelen 等人通过直接在探测器的每个像元处镀膜实现了多光谱成像[28]，如图 18 所示。该团队已实现 2 通道 (1×2)、4 通道 (2×2) 和 16 通道 (4×4) 镀膜技术。这种光谱仪具有

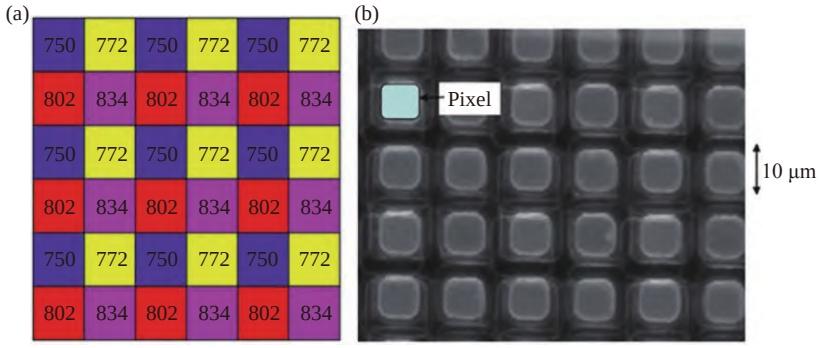

图 16 (a) 滤光片拜耳式图案；(b) 显微镜下的图像

Fig.16 (a) Bayer pattern of the filter; (b) Image under the microscope

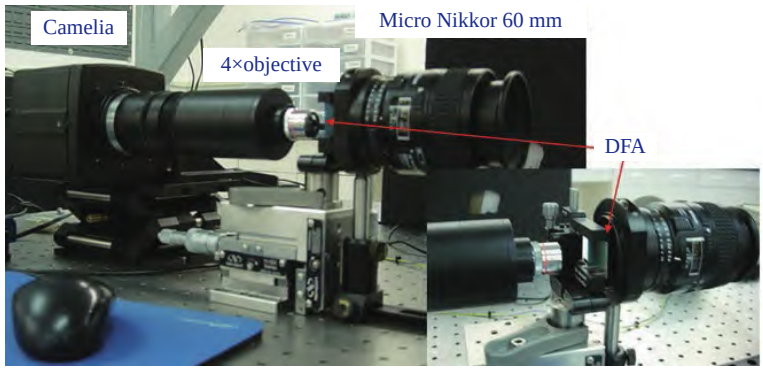

图 17 光谱仪实验光路，从右到左依次为摄影物镜、滤光片、中继物镜和全色图像接收器

Fig.17 Experimental optical path of the spectrometer, from right to left is a photographic objective, a filter, a relay objective, and a panchromatic image receiver

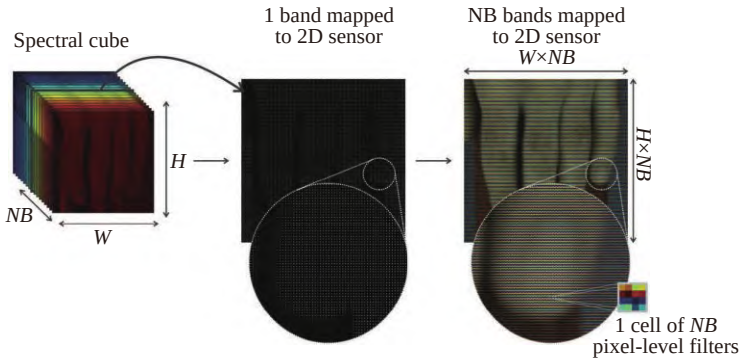

图 18 三维数据立方体和探测器像元镀膜示意图

Fig.18 Schematic diagram of 3D data cube and detector pixel coating

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

紧凑化、低成本、高采集速度以及灵活的频带选择和带宽调整能力等优点。

佐治亚理工学院的易定容和孔令华等人通过将 4 通道像素级滤光片放置于探测器前方实现了多光谱探测，该光谱仪已被用于皮肤病诊断领域[29]。该滤光片四个通道的中心波长分别为 540 nm、577 nm、650 nm 和 970 nm，半波宽为 30 nm，单个滤光单元的尺寸为 20.8 μm×20.8 μm，物理尺寸为 6.5 mm×5 mm，滤光单元之间的间距约为 1~2 μm，图 19 为该滤光片的实物图。

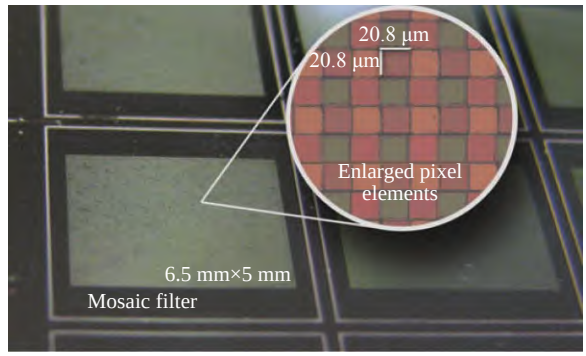

图 19 滤光片实物图

Fig.19 Physical map of filter

易定容团队利用计算机控制的二维精密平移台和旋转台将像素级滤光片固定在探测器前方，可实现小于 1/1 000 rad 的倾斜精度和 1 μm 以内的偏心精度[30]，其装置如图 20 所示。

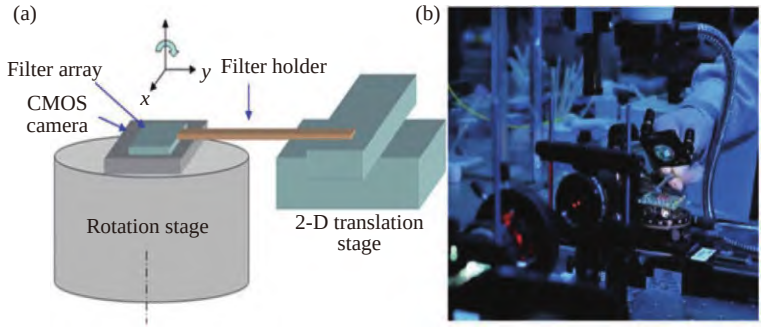

图 20 (a) 滤光片与探测器对齐的系统示意图；(b) 实际实验装置图

Fig.20 (a) Schematic diagram of filter aligned with detector; (b) Schematic diagram of the actual experimental setup

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘春雨和谢运强等人设计了一款 16 通道 (4×4) 像素级滤光片，半波宽约为 25 nm 的短波红外快照高光谱相机[31]，所用滤光片和整机分别如图 21 和图 22 所示。

该光谱相机由摄影物镜、像素级滤光片、中继物镜和全色探测器组成，滤光片 16 个通道的中心波长分别为 1 131、1 163、1 199、1 238、1 259、1 301、1 339、1 381、1 413、1 456、1 495、1 532、1 600、1 636、1 669 nm，共有 640×512 个滤光单元，每个滤光单元的尺寸为 15 μm×15 μm。

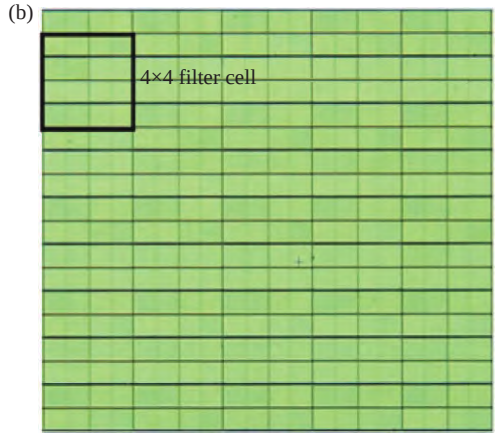

图 21 (a) 16 通道像素级滤光片示意图；(b) 显微镜下图像

Fig.21 (a) Schematic diagram of 16-channel pixel-level filter; (b) Image under microscope

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

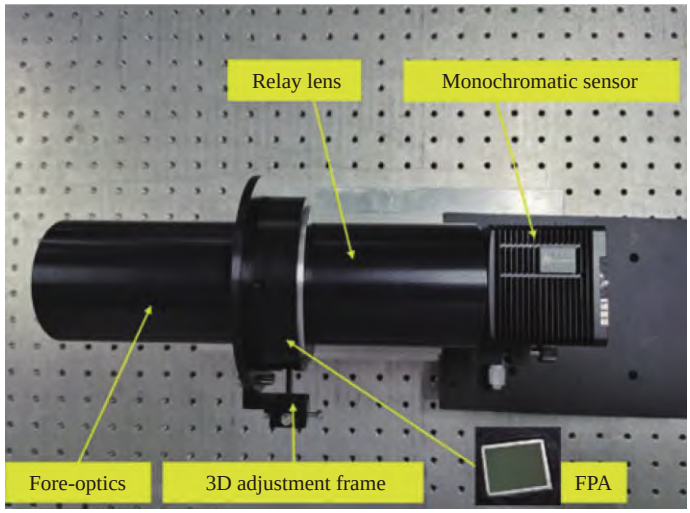

图 22 16 通道成像光谱仪整机图

Fig.22 Complete machine diagram of 16-channel imaging spectrometer

4 量子点光谱仪

量子点又称为“纳米晶”，它是一种无机材料，自身稳定性高，其半径小于大块的激子波尔半径[8]。颜色是物质的本征状态，一般来说，宏观材料的颜色不会因材料本身形状和体积的改变而发生变化，而量子点作为一种尺寸极小的纳米材料，其颜色会因自身原子个数的增加或减少而变化，即改变量子点的形状和大小可以调谐其吸收的光谱范围，利用量子点对光谱的调谐特性能够实现分光的功能。将不同尺寸的量子点集成在同一基板上，可以看作一种特殊形式的滤波器。单个量子点对透过的光波极为敏感，合理地控制量子点的大小、形状以及排列方式，可以实现对光谱连续精确的探测；将不同种类的量子点集成一起，则可以实现不同波段的同时探测，量子点光谱仪(Colloidal Quantum Dot Spectrometers, CQDs) 就是以此为原理进行研制的，其工作原理如图 23 所示[32]。

2015 年，清华大学的鲍捷等人首次提出了量子点光谱仪的概念。他们利用量子点体积微小的特点，将 195 种量子点集中在同一张薄膜上，并将该薄膜与微型探测器阵列附和在一起，构成了微型量子点光谱仪。理论上量子点光谱仪可以覆盖 0.2~5 μm 的光谱范围，这种新型光谱仪在极大地减小仪器体积和质量的同时并不影响光谱仪本身的分辨率和使用效率[33]。

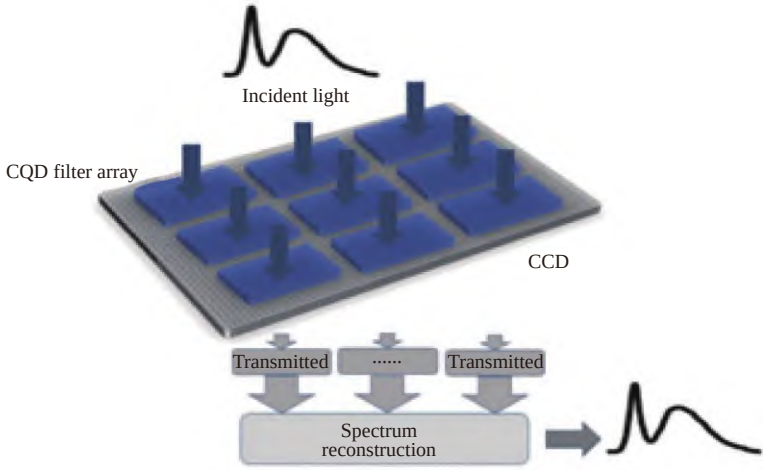

图 23 量子点光谱仪工作原理示意图[32]

Fig.23 Illustration of colloidal quantum dot spectrometer system[32]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2021 年，李慧宇团队针对近红外谱段的量子点光谱仪进行了研究，他们选取了 PbS 和 PbSe 两种材料的量子点，通过控制交替合成、配体交换和阳离子交换等关键参数实现了这两种量子点的光谱调谐，该团队采用 195 个量子点进行集成，将其作为滤光元件，选用金属氧化物半导体作为探测器，构成了近红外量子点光谱仪，图 24 所示为该团队研制的近红外量子点光谱仪原理图，其光谱范围为 0.9~1.7 μm，平均光谱分辨率可达 6 nm[34]。

传统概念上的光谱仪配置了高精度的光学和机械元件，体积笨重、造价昂贵、结构复杂，应用领域严重受限，量子点光谱仪的出现突破了上述局限，为微型光谱仪的推广提供了新思路。但由于量子点对光波的调谐与滤波器类似，在光谱反演时存在严重的噪声问题，因此，继量子点光谱仪出现之后也极大地推动了具有针对性的光谱重建算法的发展。

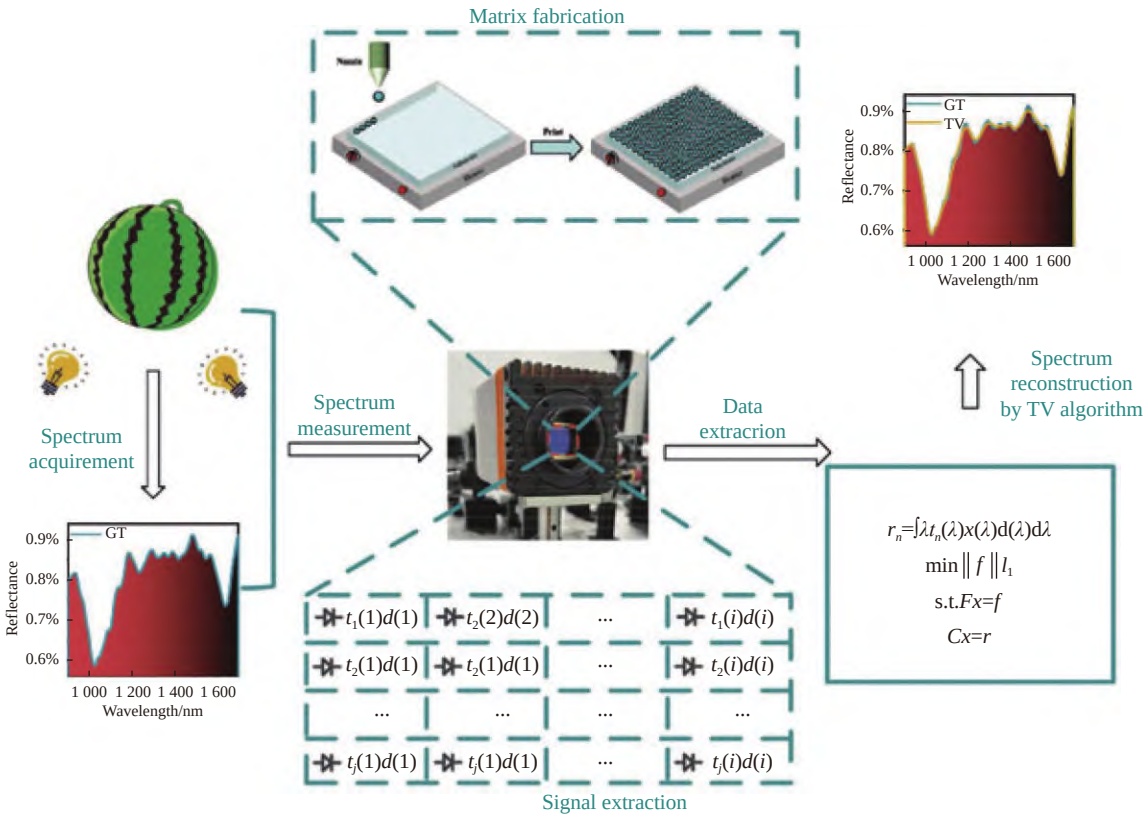

图 24 近红外量子点光谱仪原理图[34]

Fig.24 Schematic diagram of the proposed NIR QD spectrometer[34]

5 总结与展望

高光谱相机所得数据能够同时获取被测目标的二维空间信息及一维光谱信息，可以实现对目标的“指纹”探测。目前，高光谱相机正朝着宽谱段，高的空间、光谱以及时间分辨率的方向发展，广泛应用于军事、海洋科学、大气科学、农业科学等多个领域。高光谱相机的分光方式直接影响到整个系统的性能、体积及结构的复杂性，文中主要针对滤光片分光型的高光谱相机进行了介绍，该类型的高光谱相机具有结构紧凑、光路简单、质量轻、成本低等优势，不同类型的滤光片在成像光谱系统中的优势也不尽相同。

总的来看，滤光片分光型的高光谱相机正处于起步阶段，其光谱分辨率还无法与高精度的光栅色散分光方式相比拟，因此提高系统的光谱分辨率和能量利用率将成为镀膜型高光谱相机总的发展方向，尤其是随着镀膜技术以及量子点等新材料的发展，基于镀膜型的高光谱相机的光谱分辨率和能量利用率已得到了大幅提高，研发成本也有望进一步降低；此外，滤光片与探测器的结合也将进一步提高系统的光谱分辨

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率，甚至可以与高精度的光栅色散分光相媲美，因此，滤光片和探测器晶元的结合也是镀膜型高光谱相机的一大发展趋势。不难看出，滤光片型高光谱相机的发展将推动高光谱成像领域的颠覆性发展，并由此带动微纳卫星高光谱遥感技术的发展，为未来微纳高光谱卫星星座组网在轨业务运行，更好地服务于国民经济奠定技术基础。

参考文献：

[1] Wang Ying. Study of spectral imaging system based on filter [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2015. (in Chinese)

[2] Sellar R G, Boreman G D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications [J]. ***Optical Engineering***, 2005, 44(1): 013602.

[3] Wang Xinquan, Huang Min, Gao Xiaohui, et al. Portable multispectral imager based on LCTF [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2010, 39(1): 71-75. (in Chinese)

[4] Cao Congfeng, Fang Junyong, Zhao Dong. Development of UAV-borne multispectral camera based on narrow bandwidth filter array [J]. ***Optical Technique***, 2018, 44(1): 51-55. (in Chinese)

[5] Holmes R, U Grözinger, Krause O, et al. A filter wheel mechanism for the Euclid near-infrared imaging photometer [C]//SPIE, 2017, 7739: 856941.

[6] Liu Yinnian. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology [J]. ***National Remote Sensing Bulletin***, 2021, 25(1): 439-459. (in Chinese)

[7] Zhao Huijie, Zhou Pengwei, Zhang Ying, et al. Acousto-optic tunable filter based spectral imaging technology [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2009, 38(2): 189-193. (in Chinese)

[8] Gao Zedong, Hao Qun, Liu Yu, et al. Hyperspectral imaging and application technology development [J]. ***Metrology & Measurement Technology***, 2019, 39(4): 24-34. (in Chinese)

[9] Wang Jianyu, He Zhiping, Xu Rui. Application of imaging spectrum technology based on AOTF in deep-space exploration [J]. ***Infrared***, 2013, 34(12): 1-9. (in Chinese)

[10] Yang Guowei. Research on narrow pass-band tunable filters work in broad spectral range [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)

[11] Puschell J J , Huang A H , Woolf H M . GWIS: Geostationary wedge-filter imager-sounder[C]//SPIE, 1999, 3756: 223-232.

[12] Li Hongbo. Study of imaging hyperspectral technique based on linear variable filter [D]. Xi'an : University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)

[13] Yuan Jingze. Research on noninvasive measurement of human hemoglobin by near infrared spectroscopy [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017. (in Chinese)

[14] Krasilnikova A , Piegari A , Dami M , et al. Spatially resolved spectroscopy for non-uniform thin film coatings: comparison of two dedicated set-ups[C]//SPIE, 2005, 5965: 573-580.

[15] Chen Peng, Luo Luwen, Sheng Bin, et al. Study on fabrication method of linear variable filter [J]. ***Optical Instruments***, 2016, 38(4): 308-312. (in Chinese)

[16] Yu Xinyang. Development and application of a handheld near-infrared spectrometer based on a linear variable filter for measuring the internal quality of fruit [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016. (in Chinese)

[17] Lin Z, Anthon E W, Harrison J C, et al. Miniature spectrometer based on linear variable interference filters[C]//SPIE, 1999, 3855: 42-50.

[18] Kumar A, Chowdhury A R. Hyper-spectral imager in visible and near-infrared band for lunar compositional mapping [J]. ***Journal of Earth System Science***, 2005, 114(6): 721-724.

[19] Zhang Jian, Gao Jinsong, Li Yudong. Linear variable filter with high dispersion coefficient [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23(5): 1221-1226. (in Chinese)

[20] Soukup M, Gailis J, Fantin D, et al. Hyperscout: Onboard processing of hyperspectral imaging data on a nanosatellite[C]// Small Satellites, System & Services Symposium (4S), 2016.

[21] Mahmoud K, Park S, Lee D H. Development of a new linearly variable edge filter (LVEF)-based compact slit-less mini-spectrometer [J]. ***Journal of Physics Conference Series***, 2018, 972(1): 012026.

[22] Song S, Gibson D, Ahmadzadeh S, et al. Low-cost hyper-spectral imaging system using a linear variable bandpass filter for agritech applications [J]. ***Applied Optics***, 2020, 59(5): A167-A175.

[23] Fan Xinghao, Liu Chunyu, Jin Guang, et al. Small and high-resolution spaceborne hyperspectral imaging spectrometer [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2021, 29(3): 463-473. (in Chinese)

[24] Fan X, Liu C, Liu S, et al. The instrument design of lightweight

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and large field of view high-resolution hyperspectral camera [J]. ***Sensors***, 2021, 21(7): 2276.

[25] Tang Shaofan, Lu Zhijun, Wang Weigang, et al. Brief description of space hyperspectral imager (*Invited*) [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2019, 48(3): 0303003. (in Chinese)

[26] Zhao Yongqiang, Liu Xinyu, Tang Chaolong. Progress in speccc filter arrays [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2020, 57(19): 192301. (in Chinese)

[27] Eichenholz J M, Barnett N, Juang Y , et al. Real-time megapixel multispectral bioimaging [C]//SPIE, 2010, 7568: 75681L.

[28] Geelen B, Tack N, Lambrechts A. A compact snapshot multispectral imager with a monolithically integrated per-pixel filter mosaic [C]//SPIE, 2014, 8974: 89740L.

[29] D Yi, Kong L, Sprigle S, et al. Detecting early stage pressure ulcer on dark skin using multispectral imager [C]//SPIE, 2010, 7560: 75600U.

[30] Yi D, Awwal A, Iftekharuddin K M, et al. Novel instrumentation of multispectral imaging technology for detecting tissue abnormity [C]//SPIE, 2012, 8498: 84980J.

[31] Xie Y, Liu C, Liu S, et al. Snapshot imaging spectrometer based on pixel-level filter array (PFA) [J]. ***Sensors***, 2021, 21(7): 2289.

[32] Zhang J, Zhu X, Bao J. Solver-informed neural networks for spectrum reconstruction of colloidal quantum dot spectrometers [J]. ***Optics Express***, 2020, 28(22): 33656-33672.

[33] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer [J]. ***Science Foundation in China***, 2015, 523(3): 67-70.

[34] Li H, Bian L, Gu K, et al. A near - infrared miniature quantum dot spectrometer [J]. ***Advanced Optical Materials***, 2021, 9(15): 2100376.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net