

文章编号: 1672-8785(2015)03-0001-07

# 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪综述

李文杰<sup>1</sup> 王成良<sup>1</sup> 郑新波<sup>2</sup> 石斌斌<sup>1</sup> 欧阳琰<sup>1</sup>

(1. 空军预警学院, 湖北 武汉 430019;

2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

**摘 要:** 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪具有结构紧凑、小型化、空间分辨率高等特点, 现已成为成像光谱仪的发展方向。首先介绍了线性渐变滤光片以及相应成像光谱仪的概念与原理, 然后对其优势和适用领域进行了分析, 最后归纳了国内外的相关发展情况, 并指出了其良好的发展前景。

**关键词:** 线性渐变滤光片; 成像光谱仪; Geospectral 相机; SVFIS

**中图分类号:** O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.03.001

## Review of Imaging Spectrometer Based on Linear Variable Filter

LI Wen-jie<sup>1</sup>, WANG Cheng-liang<sup>1</sup>, ZHENG Xin-bo<sup>2</sup>, SHI Bing-bing<sup>1</sup>, OUYANG Yan<sup>1</sup>

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** An imaging spectrometer based on a linear variable filter has the features of compact structure, miniaturization and high spatial resolution. Now, it has become the development trend for imaging spectrometers. Firstly, the concepts and principles of the linear variable filter and its corresponding imaging spectrometer are presented. Then, the advantages and application fields of such imaging spectrometers are analyzed. Finally, the related development status at home and abroad is discussed and the future prospects of the imaging spectrometers based on linear variable filters are given.

**Key words:** linear variable filter; imaging spectrometer; Geospectral camera; SVFIS

## 0 引言

成像光谱仪是一类能同时获取被探测目标二维空间信息和光谱信息的新型遥感器。从 20 世纪 80 年代诞生至今, 成像光谱仪的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率不断提高, 已被广泛运用于军民领域<sup>[1]</sup>。

根据工作原理的不同, 成像光谱仪可以分为色散型、干涉型、滤光片型和计算光谱成像型

等几种<sup>[2]</sup>。其中, 滤光片型成像光谱仪按照滤光片类型又可分为基于可调谐滤光片的成像光谱仪和基于线性渐变滤光片的成像光谱仪。

近年来, 成像光谱仪开始普遍采用阵列器件, 并朝着小型化和组件化的方向发展。通过与线性渐变滤光片相配合, 成像光谱仪可实现多光谱探测和结构小型化, 并能提高信噪比、可靠性和空间分辨率, 从而展现出了良好的应用前景。随着线性渐变滤光片制备工艺的不断提升,

**收稿日期:** 2015-01-06

**作者简介:** 李文杰 (1991-), 男, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要研究方向为红外光电探测技术。

E-mail: kfcvs@qq.com

基于线性渐变滤光片的成像光谱仪也逐渐进入实用领域。

## 1 线性渐变滤光片

与一般滤光片不同,线性渐变滤光片的中心波长会沿着其厚度变化方向呈线性变化(见图1)。它是一种常用于快速分光的光学薄膜器件,具有小型化、质量轻、稳定性高等优点。

线性色散系数  $L$  是一个衡量线性渐变滤光片性能的重要指标<sup>[3]</sup>,其定义为

$$L = \frac{\lambda_e - \lambda_s}{d_e - d_s} \quad (1)$$

式中,  $d_s$  和  $d_e$  分别为线性渐变滤光片中光谱变化方向的起始位置和结束位置;  $\lambda_s$  和  $\lambda_e$  分别为线性滤光片的起始工作波长和结束工作波长。

## 2 工作原理

在基于线性渐变滤光片的成像光谱仪中,图像传感器的表面上安装了一块线性渐变滤光片(见图2)。图像传感器的每一行像元所接收到的光谱波长与相应位置滤光片的透过波长相对应,因此基于线性渐变滤光片的成像光谱仪所能探测到的光谱范围取决于线性渐变滤光片的光谱宽度<sup>[4,5]</sup>。

图像传感器的每一行像元与所对应的光谱带相互配合,每一列像元沿着扫描方向在不同的空间位置上进行采样,所以该图像传感器有一个空间光谱轮廓。通过一定的扫描方式可以得到完整的目标光谱图像。每一幅光谱图像都是由行阵列沿着列阵列方向扫描得到的。

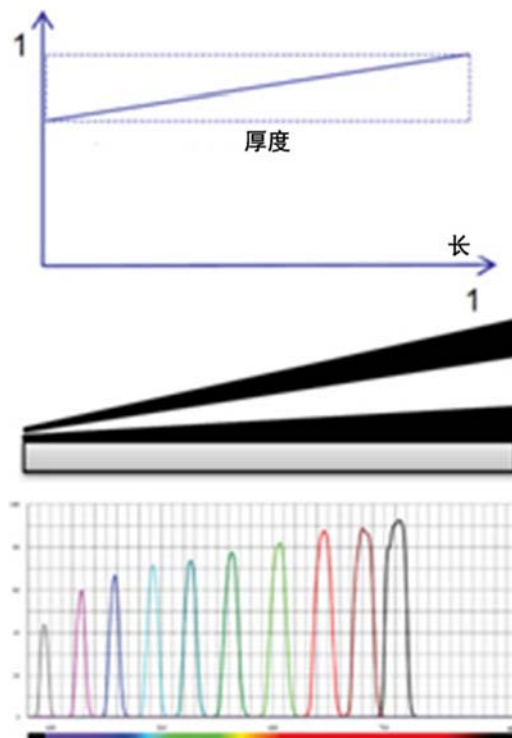


图1 线性渐变滤光片的薄膜厚度特性及光谱透过率曲线

根据空间维信息获取方式的不同,光谱成像技术可以分为摆扫式、推扫式、凝视式和视窗式四种<sup>[6]</sup>。基于线性渐变滤光片的成像光谱仪主要采取推扫式扫描,即在视场内沿飞行方向进行一维扫描。该系统相当于由多个线阵组成,通过一维运动获取多组二维图谱信息(见图3)。

通过在各个波段对目标进行扫描,可以得到图像数据立方,即每一个目标点都含有一条连续的光谱曲线。当需要提取某一特定波段的光谱图像时,通过用光谱分离法对特征光谱的图像信息进行重构(过程见图4),可以获得多幅

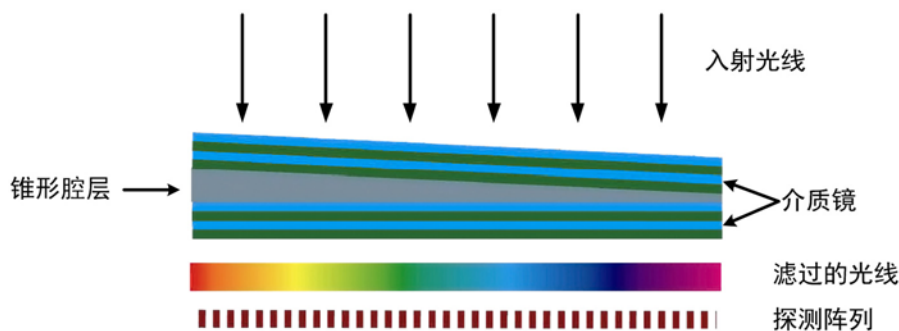


图2 线性渐变滤光片与探测阵列结构的原理图

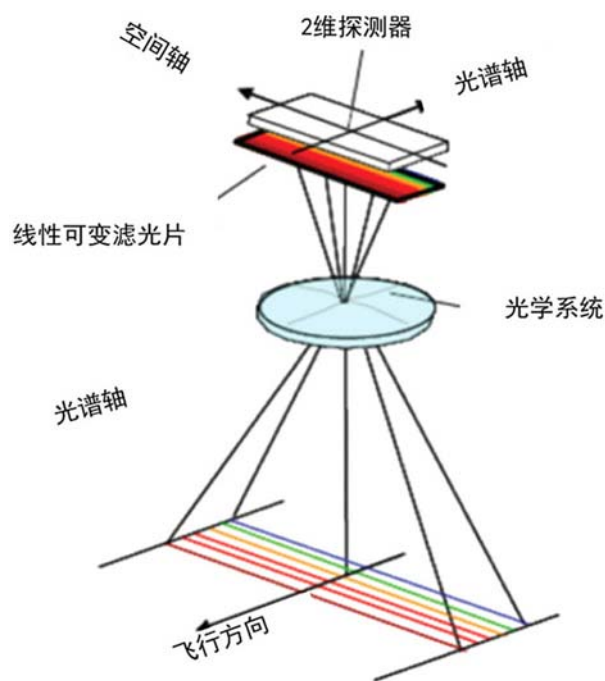


图3 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪的工作原理图

单色图像（见图5）。在扫描一次之后，通过多次图像重构可以获取特定波长下的单色图像。

通过改变扫描步长和采用图像重构算法可以提高光谱分辨率，但光谱分辨率最终还是取决于线性渐变滤光片的光谱带宽。在充分考虑空间分辨率的前提下，通过图像重构算法可以提高整体图像的光谱分辨率，使整体图像的光谱分辨率接近线性渐变滤光片的光谱带宽<sup>[7]</sup>。

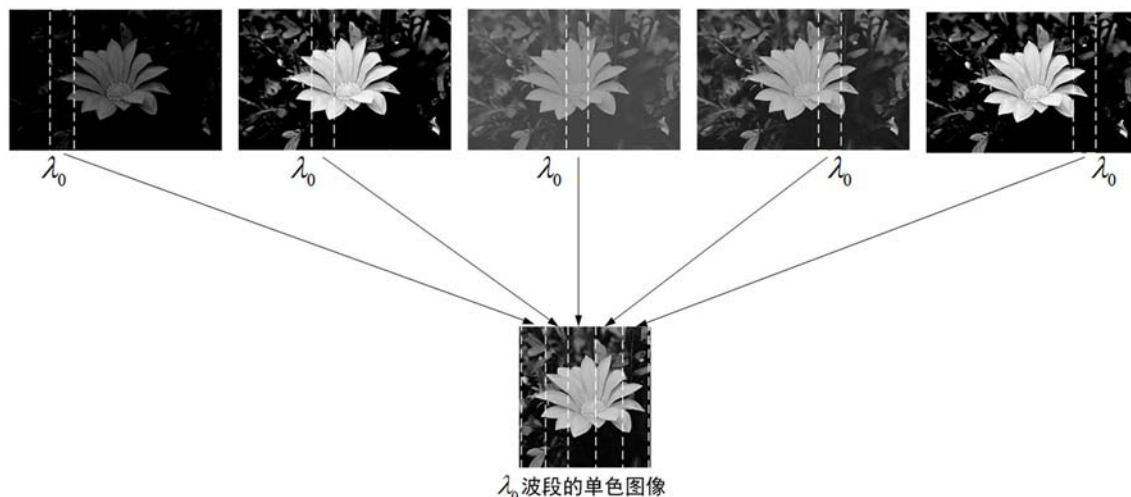


图4 图像重构过程的示意图

### 3 优势分析与应用领域

#### 3.1 优势分析

(1) 系统简单，结构紧凑。基于线性渐变滤光片的成像光谱仪的分光元件紧贴在图像传感器的上方，可大大减小系统的复杂性，使结构变得更加紧凑，系统变得更加小型化。

(2) 光学系统简单，定标容易。色散型和干涉型成像光谱仪需要使用复杂的光学系统结构，这些结构通常包含数量较多的分光元件且安装精度要求非常高。而基于线性渐变滤光片的成像光谱仪则无需考虑这些问题，因为其分光元件就是一块线性渐变滤光片，且与图像传感器的相对位置固定，所以在使用过程中不会出现谱线弯曲和非线性问题，以致定标过程要简单得多。

(3) 空间分辨率高。由于图像传感器的成像单元尺寸很小，基于线性渐变滤光片的成像光谱仪的光谱分辨率上限在很大程度上取决于线性渐变滤光片的光谱带宽。在保证光谱分辨率的前提下，可以通过改进扫描步长和采用重构算法来实现高空间分辨率。

#### 3.2 应用领域

(1) 在军用领域，基于线性渐变滤光片的成像光谱仪可以用于伪装识别、武器使用探测、近海探测等方面。由于具有宽谱段探测特性，它可以利用特定谱段对目标进行侦查和判读。

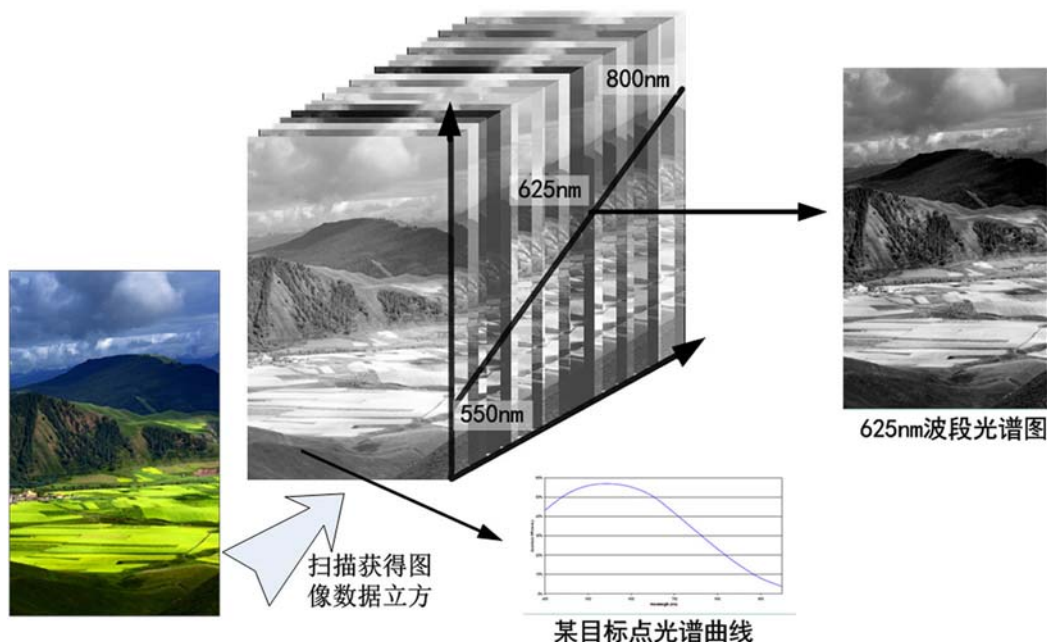


图 5 多波段成像光谱数据的处理过程

(2) 在民用领域, 该成像光谱仪可以实现对农林业、城市绿化、陆地和海洋环境等的监测, 特别是可以借助于机载平台对陆地进行高空间分辨率光谱成像。

(3) 在航天领域, 随着微纳卫星的迅猛发展以及遥感技术在各个领域的不断深入, 用户对图像数据信息提取的要求越来越高, 对高分辨率图像和更快、更灵活的图像获取方式的需求也进一步增多。由于具有体积小、重量轻、对用户需求反应迅速、研制周期短、成本低等优点, 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪非常适合搭载在微纳卫星平台上使用。

#### 4 国内外发展情况

随着线性渐变滤光片工艺水平的不断提高, 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪已开始走向实用化。在美国 Hughes Santa Barbara 研究中心研制的 WIS-1/2 成像光谱仪和美国 Flight Landa 公司研制的 C2VIFIS 成像光谱仪中, 分光元件均采用了线性渐变滤光片。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的第一个新千年地球轨道任务——EO-1 卫星上也搭载了一台基于线性渐变滤光片的成像光谱仪——先进陆地成像仪 (Advanced Land

Imager, ALI)。国内学者也在紧跟此领域的发展步伐开展工作, 如清华大学和南开大学都在进行相关研究。

##### 4.1 国外发展情况

早在 20 世纪 80 年代, 美国 Hughes Santa Barbara 研究中心就开始研制基于线性渐变滤光片的成像光谱仪 (见图 6) [4]。他们最终于 1989 年 8 月在实验室内进行了成像演示论证, 并在 1992 年进行了机载实验。该样机的图像传感器是一个定制的  $64 \times 128$  元硅探测阵列 (见图 7)。整合在探测器表面上的线性渐变滤光片使其能够获得 64 个光谱波段和 128 个空间像元。

1990 年, Nahum Gat 申请了热红外成像光谱仪 (Thermal Infrared Imaging Spectrometer, TIRIS) 的专利 (见图 8)。TIRIS 也采用了基于线性渐变滤光片的系统结构, 同时还采用了非制冷光具。它可在机载平台上进行推扫式扫描, 其工作波段为  $7.5 \sim 14.0 \mu\text{m}$ 。所用焦平面阵列是一种  $64 \times 20$  元非本征 Si:As 探测器, 工作在 10 K 温度下, 能提供 64 个光谱分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$  的光谱波段和 20 个空间分辨率为  $3.6 \text{ mrad}$  的空间像元。该焦平面上安装了一种定制的线性渐变滤光片, 可抑制来自外部非制冷光具的近场辐射。

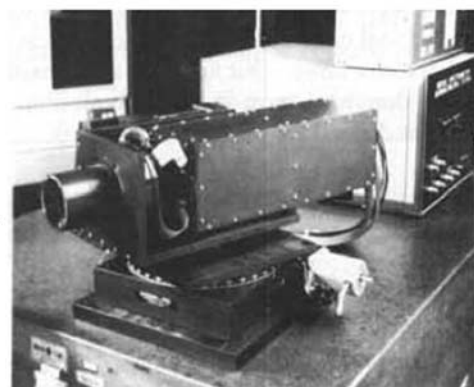
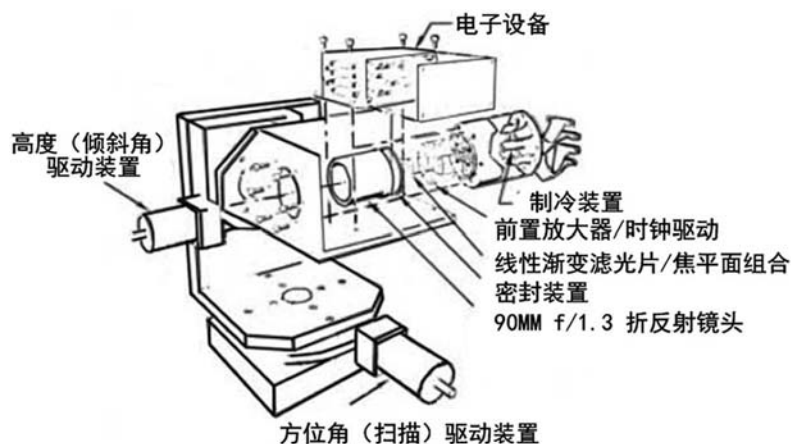


图 6 样机结构及外形的示意图

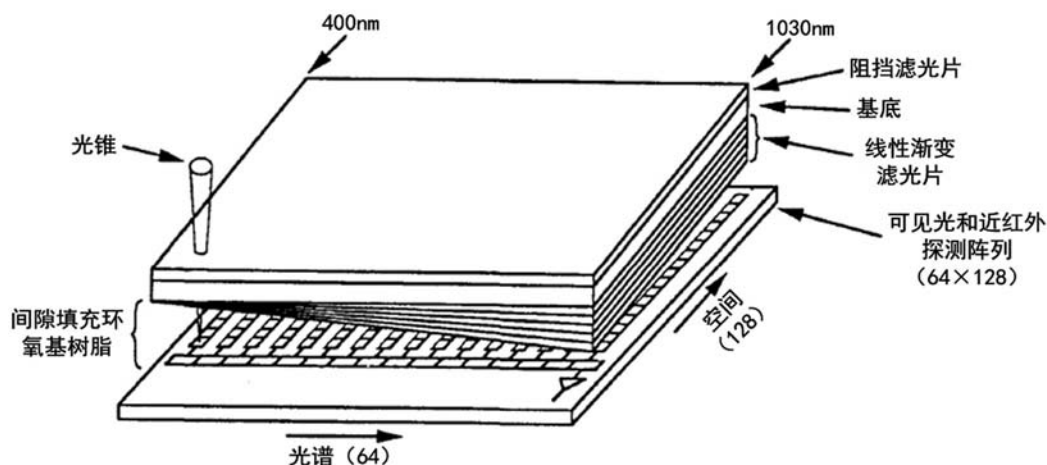


图 7 成像模块的结构示意图

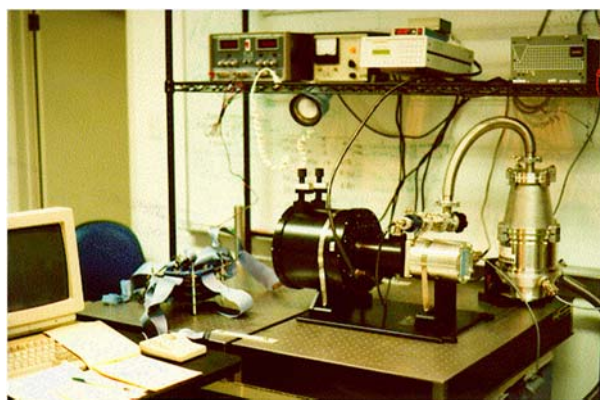


图 8 TIRIS-II 的实验室定标和特性测试装置

自 1994 年起, 美国 Flight Landata 公司开始研制 C2VIFIS 成像光谱仪<sup>[10]</sup>。该光谱仪能够探测 96 个波段, 可以覆盖 420 ~ 870 nm 的波段范围。其成像模块共有 3 个部分: 第一部分的表面上安装的是渐变可见光滤光片; 第二部分安装

的是渐变近红外滤光片; 第三部分安装的是带通滤光片。通过计算机控制这三个部分的曝光时间, 使其在扫描过程中同时获取目标区域的光谱数据和图像数据; 后期则通过图像重构来获取感兴趣波段的单色图像。

ALI 是 NASA 新千年计划中的 EO-1 对地观测任务的有效载荷, 其系统结构中也采用了线性渐变滤光片<sup>[11]</sup>。ALI 的焦平面上布置有 4 个传感器芯片组件, 其中每个传感器芯片组件包含 1 块线性渐变滤光片; 这些组件构成一个多光谱传感器, 使系统能够对从可见光、近红外到短红外等的 10 个谱段进行探测 (见图 9)。其中, 全色图像传感器的一个像元所对应的地面分辨率能够达到 10 m<sup>2</sup>, 多光谱图像传感器的一个像元所对应的地面分辨率为 30 m<sup>2</sup>。

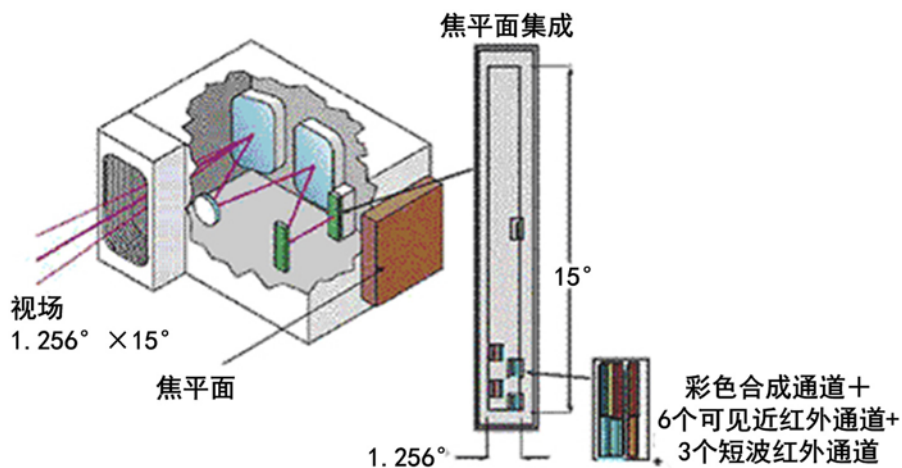


图 9 遥感器的方案简图和焦面组件图

近些年来,线性渐变滤光片在成像光谱仪领域的应用变得更加丰富。例如,2005年,印度发射了“印度迷你卫星-1”,其成像系统采用了线性渐变滤光片。该系统能探测64个波段,可覆盖400~920 nm的频谱范围,其光谱分辨率优于15 nm。2009年,Maresi L等人提出了一种基于线性渐变滤光片的超光谱成像仪。由于滤光片沉积技术的不断发展,Tack N等人于2012年成功地将线性渐变滤光片直接沉积到了图像传感器上<sup>[12-14]</sup>。

2013年,德国科学家Delauré B等人在国际摄影测量与遥感学会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)会议上提出了一种创新的紧凑型成像光谱仪(Geospectral相机)<sup>[15]</sup>。这类成像光谱系统是以一种创新的探测器为基础进行构造的。这种探测器能够在同一块传感器芯片上实现两类传感器,因而能够在同一个视场中同时进行全色和光谱成像(见图10)。该系统可以同时从两类传感器中获取目标场景的光谱信息和图像信息。这一切都应归功于线性渐变滤光片,它被安装在其中一个传感器的表面上,而另一个传感器的表面上安装的是全色镜片。这种成像光谱系统还需要通过用配套软件对两类传感器的同步信号进行处理来提取精确的光谱图像结果。

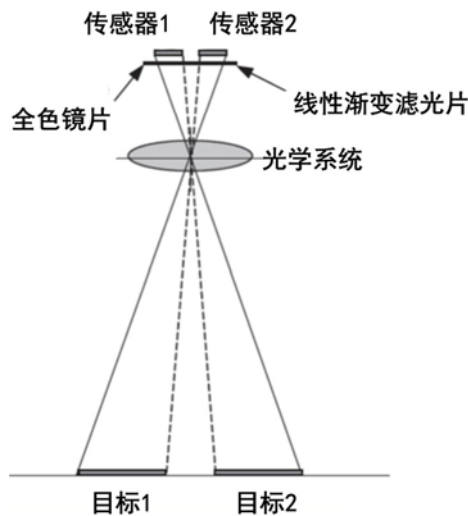


图 10 结构示意图

## 4.2 国内发展情况

2002年,清华大学设计了一种基于微纳卫星平台的高光谱遥感系统(SVFIS)<sup>[16]</sup>。该系统中的图像传感器平分为两个区域(见图11),其中第1~512行作为图像探测区,第513~1024行作为光谱探测区。光谱探测区由2个线性渐变滤光片组成,它们分别响应可见光波段和近红外波段。整个系统具有体积小、重量轻、结构紧凑等特点。

同年,南开大学也设计了一种基于线性渐变滤光片的小型可见光成像光谱仪<sup>[17]</sup>,其结构见图12。该光谱仪依靠微动平台使线性渐变滤光片作横向运动,并通过扫描使CCD图像传感器获取大量光谱和图像信息;后期通过一系列

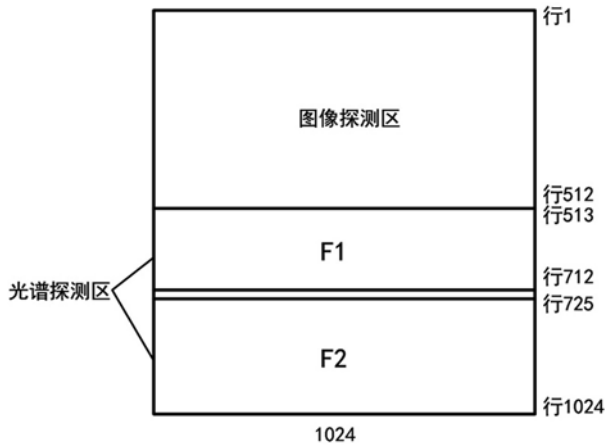


图 11 探测器的表面结构

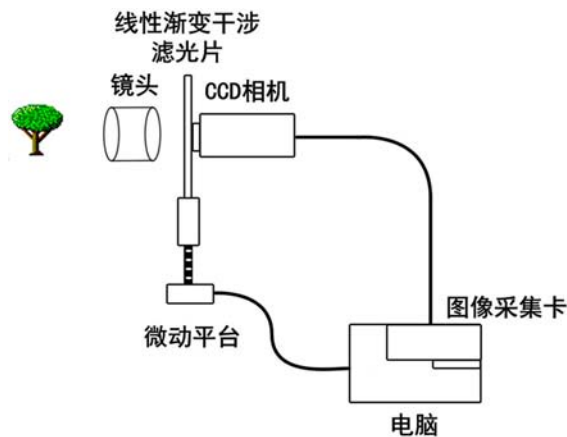


图 12 光谱仪的示意图

图像重构算法, 可以获取含有图谱信息的光谱图像数据立方。该仪器具有结构简单、空间分辨率和光谱分辨率较高等优点。

## 5 总结及展望

成像光谱仪已经成为 21 世纪遥感技术发展的热门方向, 而如何实现系统的小型化和轻量化也已成为研究重点。由于具有结构紧凑、光学系统简单、定标容易以及空间分辨率高等特点, 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪十分适合在天基平台上使用, 尤其是在微纳卫星平台上的应用, 这也是当前成像光谱仪应用的发展方向。

## 参考文献

[1] 洪新华, 姚凯. 成像光谱仪的原理与应用 [J]. 河南科技学院学报, 2005, 33(2): 113-116.

[2] 付强. 基于成像链分析的光谱成像系统设计方法研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2012.

[3] 范滨, 李刚正, 程鑫彬, 等. 线性渐变滤光片的制备与测试 [J]. 光学仪器, 2006, 27(4): 95-103.

[4] 郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览 [J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 75-79.

[5] 许洪. 多光谱、超光谱成像探测关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

[6] 马兰, 邢霞, 陈筱勇. 常用航空航天传感器成像特点探讨 [J]. 影像技术, 2012, 16(5): 51-54.

[7] 徐晓轩. 凝聚态物理研究中的空间分辨光谱方法 [D]. 天津: 南开大学, 2002.

[8] Mika A M. Linear-wedge Spectrometer [C]. SPIE, 1990, 1298: 127-131.

[9] Gat N, Subramanian S, Ross S, et al. Thermal Infrared Imaging Spectrometer (TIRIS) Status Report [C]. SPIE, 1997, 3061: 284-291.

[10] Sun X H. Computerized Component Variable Interference Filter Imaging Spectrometer System Method and Apparatus: US, 6211906 B1 [P]. 1988-10-02.

[11] Bicknell W E, Digenis C J, Forman S E, et al. EO-1 Advanced Land Imager [C]. SPIE, 1999, 3870: 80-88.

[12] Kumar A S K, 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.

[13] Maresi L, Taccola M, Kohling M, et al. PhytoMapper-compact Hyperspectral Wide Field of View Instrument [M]. Berlin: Springer, 2010.

[14] Tack N, Lambrechts A, Soussan P, et al. A Compact, High-speed, and Low-cost Hyperspectral Imager [C]. SPIE, 2012, 8266: 82660Q.

[15] Delauré B, Michiels B, Biesemans J, et al. The Geospectral Camera: A Compact and Geometrically Precise Hyperspectral and High Spatial Resolution Imager [C]. Hannover: ISPRS Hannover Workshop, 2013.

[16] 董瑛, 尤政, 郝云彩. 纳型卫星高光谱遥感系统 - 基于空间线性可变滤波器的成像光谱仪 (SVFIS) [J]. 宇航学报, 2002, 15(4): 12-14.

[17] 徐晓轩, 林海波, 俞钢, 等. 小型线形可变滤光片分光的可见成像光谱仪及其特性研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 26(5): 713-717.