

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.03

高光谱成像与应用技术发展

高泽东^{1,2}, 郝群¹, 刘宇^{2,1}, 朱院院², 曹杰¹, 孟合民², 刘杰², 程洪亮²

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 介绍了高光谱成像的需求与应用、光谱成像技术的现状与发展。高光谱成像已在产品分选、精准农业、环境监测、文物保护、刑事侦查、伪装识别等行业得到应用。传统的棱镜光栅色散型、连续可调谐滤光型、傅里叶变换干涉型等光谱成像分光方式成本高、体积大、速度慢, 目前其光谱成像仪仍作为主要的研究设备。为促进产业化应用, 需要发展体积小、成本低、速度快的光谱成像技术。计算层析、压缩编码、胶体量子点 CQDs 光谱成像技术仍需理论突破, 短时间难以实用。积分视场、离散采样光谱成像技术原理简单、技术成熟, 可用于空间分辨率要求不高的场合。复眼滤光式、像素滤光式光谱成像技术通过单片集成像素级滤光片, 既能在权衡光谱分辨率与空间分辨率的基础上实现实时性, 又能极大地减小体积、降低成本。

关键词: 高光谱成像; 光谱检测识别; 产业应用; 光谱分光方式; 傅里叶变换光谱仪; 实时快照式光谱仪
中图分类号: TB96; TP792 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2019)04-0024-11

Hyperspectral Imaging and Application Technology Development

GAO Zedong^{1,2}, HAO Qun¹, LIU Yu^{2,1}, ZHU Yuanyuan², CAO Jie¹,
MENG Hemin², LIU Jie², CHENG Hongliang²(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The hyperspectral industry application, hyperspectral imaging technology and its development are introduced. Hyperspectral imaging data has been used in product sorting, precision agriculture, environmental monitoring, cultural relics preservation, criminal investigation, camouflage identification and other industries. However, the traditional spectroscopic imaging methods, such as prism grating dispersion, continuous tunable filter and Fourier transform interferometry, are still mainly used as scientific research equipment because of their high cost, large volume and slow speed. To promote massive industrial application, spectral imaging technology with compact size, low cost and fast speed is needed. Computational tomography, compressive coding and CQDs (colloidal quantum dots) spectral imaging still need theoretical breakthroughs and are difficult to be applied in a short time. The integral field unit and the discrete sampling spectral imaging technology are simple in principle and mature in technology, which can be used in the occasion of low spatial resolution requirements. The compound-eye filter and the pixel filter spectral imaging technology can achieve real-time performance on the basis of balancing spectral resolution and spatial resolution through a single integrated pixel filter, and can greatly reduce volume and cost.

Key words: hyperspectral imaging; spectral detection and recognition; industry applications; spectrum-dividing techniques; fourier transform spectrometer; real-time snapshot spectrometer

0 引言

光谱成像技术结合了成像技术与光谱技术, 既能获取 2D 空间信息又能获取 1D 光谱信息, 基于这种 3D 光谱数据立方体, 能够检测、识别出各种传统成像技术难以探测识别的目标, 此技术已经在大气、海洋和陆地观测以及实验室分析中得到广泛的应用^[1]。

本文从光谱数据立方体的特点出发, 论述了光谱成像数据比灰度图像和彩色图像具有更优异的目标区分能力的原因, 介绍了光谱成像技术的应用方法和应

用领域。综述了棱镜、光栅色散型, 声光、液晶可调谐滤光型, 时间调制、空间调制、时空混合调制傅里叶变换干涉型光谱成像技术原理。从研究应用与产业应用的差距入手, 分析了成像光谱技术小型化、低成本、快速、快照式的发展趋势。

1 光谱成像数据检测应用

1.1 三维数据

高光谱成像设备能同时获取二维空间信息和一维

光谱信息, 获取的数据称作光谱数据立方体, 如图 1 所示。成像光谱数据立方体是一个三维矩阵, 图像的高度为 H , 图像的宽度为 W , 光谱波段数为 L , 图像的像素数 $P = H \times W$ 。如果在空间上取出一个像素, 以波长为横轴, 像素每个波长处的反射率为纵轴, 将得到像素地面分辨率范围内材质的平均光谱。如果在相同的窄带波长处选取所有的像素, 并按照其空间坐标位置作图, 将得到窄带波长处反射率场景灰度图。

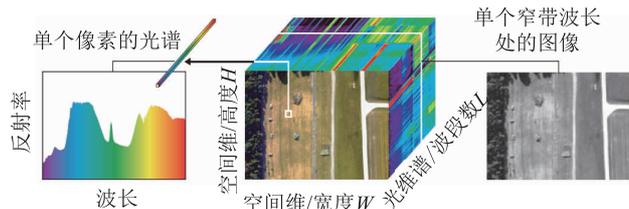


图 1 光谱数据立方体构成图

光谱数据立方体可以用三维矩阵描述, 为了便于数据处理, 将三维矩阵整合成二维矩阵, 用数据矩阵 \mathbf{X} 表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1P} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2P} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{L1} & x_{L2} & \cdots & x_{LP} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 元素 x_{ij} 为第 i 窄带波段处第 j 个像素的反射率值; 列向量 $\mathbf{X}_{(1:L)j} = (x_{1j}, \cdots, x_{Lj})^T$ 为第 j 个像素的光谱向量; 行向量 $\mathbf{X}_{i(1:P)} = (x_{i1}, \cdots, x_{iP})$ 表示第 i 窄带波段的反射率图像^[2]。

1.2 区分能力

宽波段成像系统, 如灰度相机获取的是波段范围内的积分值, 每个像素由一个数值构成, 当两个不同对象宽波段响应积分相等时, 灰度图像将无法区分这两个对象。而彩色相机获取的是红、绿、蓝三个波段范围的积分值, 每个像素由三个数值构成, 当两个不同对象在 R, G, B 三个宽波段内的响应积分相等时, 彩色图像将无法区分这两个对象。虽然彩色图像的大小是灰度图像的 3 倍, 但目标的区分能力将极大提升^[3]。

假设如数字图像具有 255 个量化等级, 那么灰度图像理论上则具有 255 个区分能力, 而彩色图像则具有 $255 \times 255 \times 255$ 个区分能力, 与灰度图像相比, 彩色图像数据量增加了 3 倍, 而区分能力则提高了 255×255 倍, 彩色图像极大地提升了对于不同对象的区分能力。

高光谱成像设备获得的数据不是一个宽波段积分标量, 也不是 R, G, B 三个波段的分别积分, 而是在

光谱曲线上进行窄带离散采样, 每个像素是一个矢量, 根据信号理论可知, 像素矢量的分量个数越多, 即光谱通道数越多, 或光谱分辨率越高, 矢量越逼近原始光谱曲线, 越具有区分能力。但是矢量分量个数越多, 数据量越大, 数据越冗余, 海量数据给数据传输、处理、应用带来了挑战。为此, 实际应用中需要权衡空间分辨率与光谱通道数。

1.3 检测应用

光谱成像应用技术即如何使用光谱数据立方体, 通常有两类方法:

1) 基于 2D 空间图像的检测识别方法

以一幅一幅窄带光谱图像为处理对象, 或以主成分分析 PCA、独立成分分析 ICA 等方法提取的特征图像为对象, 用特征提取的方法针对每幅图像进行处理, 最后将每幅图像的检测识别结果进行融合得到最终结果^[4]。这类方法可充分利用传统图像处理的基本方法, 但计算量大, 难以检测识别亚像素小目标。

2) 基于 1D 光谱矢量的检测识别方法

以像素的光谱矢量为处理对象, 根据像素之间光谱矢量的相似性或差异性进行检测处理。这种方法不利用图像的几何特征, 可以检测识别亚像素小目标; 充分利用像素的光谱特性, 能极大提升检测识别能力。基于 1D 光谱矢量的检测识别方法是目前光谱信息处理的主流。

二维空间的每个像素均包含一条光谱曲线, 如果像素中只有一种对象, 像素光谱曲线则是该对象的“纯净光谱”曲线; 如果像素中包含几个对象, 像素光谱曲线则是每个对象的光谱曲线按贡献率组合而成的“混合光谱”。由于大气散射效应, 实际上不存在真正的“纯净光谱”曲线。

针对产品的高光谱数据立方体, 将像素中对应合格品的光谱向量视为“纯净光谱”像素, 将像素中对应不合格品的光谱向量视为“另类光谱”像素, 将既有合格成分又有不合格成分的像素视为“混合光谱”像素。通过光谱矢量相似性计算, 如欧氏距离 ED、光谱角 SA、光谱信息散度 SID、正交投影散度 OPD, 可以有效区分纯净光谱、另类光谱与混合光谱^[5]。根据有无另类光谱像素、混合光谱像素, 可以分析出产品是否合格; 根据另类像素、混合像素的个数, 可以分析产品的质量等级; 根据另类像素、混合像素的区域分布, 可以分析产品的损坏区域。

根据上述方法, 可将高光谱成像数据用于: ①产品分选, 在线快速检测、分选肉类、水果、蔬菜、工

业品等，如图 2 的枣类分选；②精准农业，检测不同农作物的种植比例、农作物的健康状况、农作物的生长进度、检测土壤中或农作物叶片中氮磷钾等主要肥度指标，为科学施肥提供依据，减少环境污染，如图 3 农作物长势分布图；③环境监测，检测水体质量、调查污染源，如图 4 的河流浑浊度反演图；④医疗诊断，检测人体的病变组织、血液浓稠度等，如图 5 的牙齿表面病变检测；⑤文物保护，检测文物的材料、指导文物修复，如图 6 基于高光谱数据的壁画文字提取；⑥刑事侦查，实现指纹鉴别、血迹鉴别、笔迹鉴别、足迹鉴别、潜在图像识别、可燃液体残留侦测，如图 7 的指纹提取^[6]；⑦伪装识别，检测复杂场景的伪装隐身目标，如图 8 远距离伪装目标探测识别^[7]。

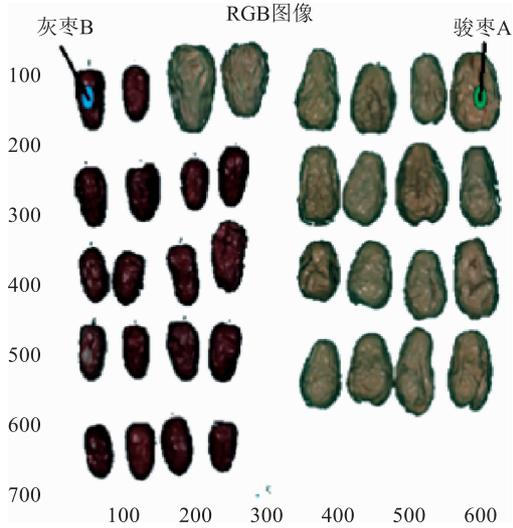


图 2 枣类分选

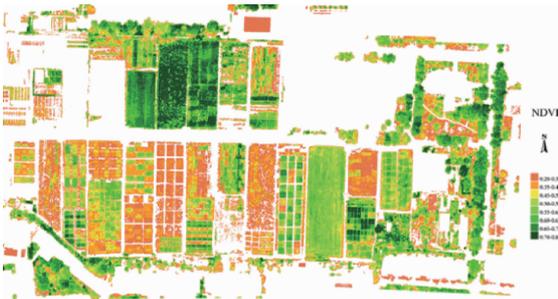


图 3 农作物长势分布

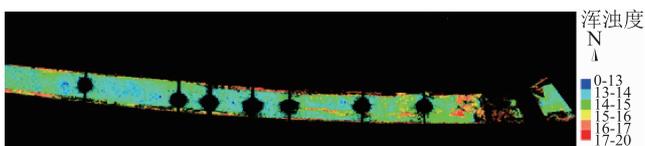


图 4 河流浑浊度反演图

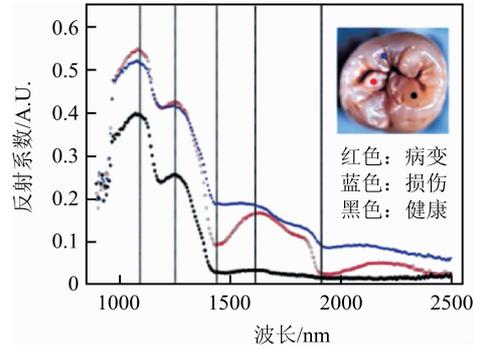


图 5 牙齿表面的近红外光谱反射率曲线

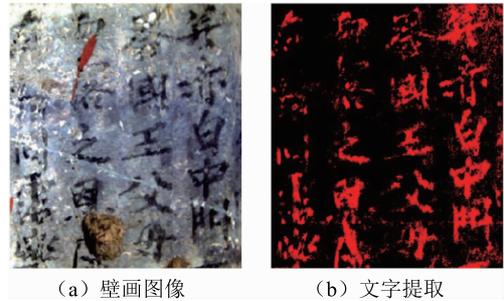


图 6 基于高光谱成像数据的壁画文字提取



图 7 高光谱指纹提取



图 8 远距离伪装小目标识别

2 光谱成像数据的获取方式

光谱成像数据包括 2D 空间信息和 1D 光谱信息，而成像探测器是 2D 探测器，一次瞬态只能获取 2D 信息，因此获取 3D 光谱数据通常有两种方式：①一次获得一个窄带波段内的 2D 空间信息，如滤光片轮切换方式，声光、液晶等可调谐滤光成像方式；②一次获得 1D 空间信息加 1D 光谱信息，如带狭缝的光谱成像方式，常见的有棱镜光栅色散型光谱成像方式、空间调制型光谱成像方式。根据光谱分光方式的不同，光谱成像技术主要分为色散型、滤光型、干涉型等。

2.1 色散型

棱镜和光栅色散型光谱成像技术出现较早，较为成熟，是目前光谱成像采用最多的技术。棱镜色散型光谱成像仪以棱镜为色散元件，而光栅色散型以光栅为色散元件。

2.1.1 棱镜色散型

在棱镜色散型光谱成像仪中，不同波长的光线受到棱镜不同程度的折射而被色散。典型的棱镜色散型光谱成像方式如图 9 所示，成像物镜将场景的复色光成像到狭缝平面上，透过狭缝的入射光经准直物镜准直后，经过棱镜或光栅的色散由聚焦镜聚焦到焦平面探测器上，最终狭缝按波长成像在焦平面探测器上。

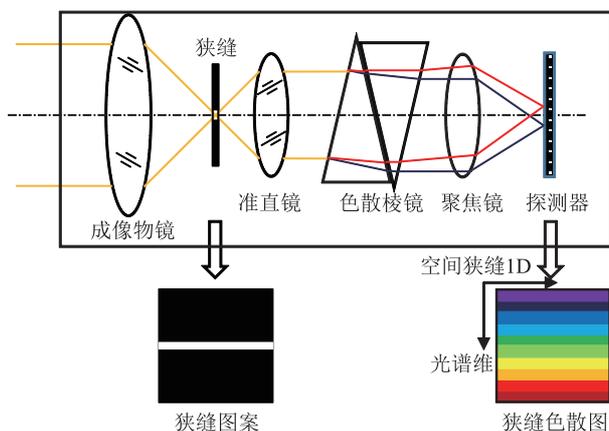


图 9 棱镜色散型光谱成像方式

棱镜色散型的技术特点是：①每个瞬态仅能获得狭缝 1D 的光谱信息，须垂直于狭缝方向进行推扫，以获得场景 2D 的光谱数据；②棱镜色散后的光谱只有一套零级光谱，相对强度大；③因棱镜材料对不同波长的折射率变化不与波长呈线性关系，因此其谱线排列不均匀，在短波区，谱线排列非常稀疏，而在长波区，谱线排列非常稠密。

2.1.2 光栅色散型

光栅色散型光谱仪的原理是：光栅对不同波长的光有不同的衍射角而使光色散，如图 10 所示。其设计和调试难点在于：光栅有多级次的衍射，正级次光谱和负级次光谱对称分布在零级光谱两侧，零级光谱因波长重合而不能分光，而级次之间存在重叠，为此需要通过前置单色器或滤光片等措施，消除不需要的波长。

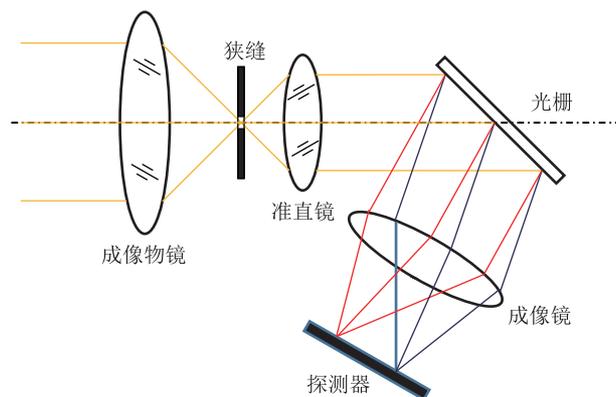


图 10 光栅色散型光谱成像方式

与棱镜色散型相比，光栅色散型具有衍射角与光谱波长近似呈正比关系、谱线排列均匀、光谱分辨率较高等技术优势。

2.2 滤光型

传统的滤光型光谱成像技术是在宽波段成像光路中，增加带有窄带滤光片的切换机构，每次一个窄带滤光片切入光路，并得到该波段窄带空间图像，各个窄带滤光片先后切入光路，获得完整的光谱数据立方体，常用于多光谱成像。

可调谐滤光型光谱成像技术就是在这种方式的基础上发展而来，通过可自由调谐的滤光器件，实现每个瞬态得到一个窄带图像，常见的可调谐滤波方式有声光可调谐滤光型 (Acousto-optic Tunable Filter, AOTF)、液晶可调谐滤光型 (Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF)、电光可调谐滤光型、Fabry-Perot 可调谐滤光型等。本文主要介绍 AOTF 与 LCTF 两种可调谐滤光方式。

2.2.1 声光可调谐滤光型

AOTF 有共线型和非共线型两类。在声光晶体介质中，共线型 AOTF 入射光、衍射光、声波的传播方向相同^[8]，而非共线性型 AOTF 入射光、衍射光、声波的传播方向不同^[9]。尽管共线型 AOTF 具有入射角孔径大和分辨率高的优点，但是符合共线条件的声光晶

体不多，并且共线型 AOTF 的结构比较复杂，因此限制了共线型声光可调谐滤波器的应用和发展。

声光可调滤光器是根据各向异性声光晶体介质中的反常布拉格(Bragg)衍射的原理研究制作而成的一种新型的分光元件，如图 11 所示，主要由可调谐射频源、压电超声换能器、声光晶体、压电超声换能器和吸声体组成。可调谐射频源给压电超声换能器提供频率可调的高频电信号激励。压电超声换能器利用压电晶体的逆压电效应，接收高频驱动电信号，在交流电场的作用下，通过机械振动把电信号转换成同频率的超声波，并传入声光晶体中。声光晶体是声光可调滤光器的核心，是光波和声波相互作用的场所，当满足布拉格衍射条件时，入射光会产生布拉格衍射，对于一定的超声波频率，只有一定的光波长才会发生衍射，改变超声波的频率就能改变衍射光的波长。声光晶体一般采用具有较高的声光品质因素和较低声衰减的双折射晶体，光谱成像中常用的声光晶体有 TeO_2 。吸声体吸收通过晶体后的声波，防止反射回去的声波与入射时的声波和光波产生相互作用。

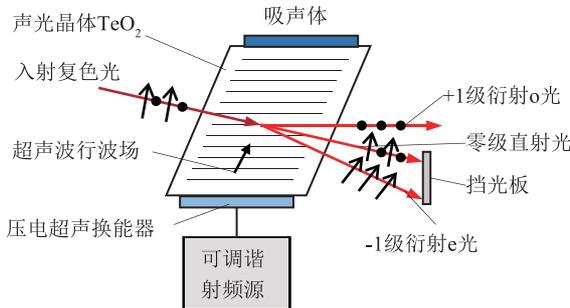


图 11 非共线声光滤光器原理

根据声光滤光器原理，非共线型 AOTF 的调谐关系为

$$\lambda_o = \frac{v_a \Delta n}{f_a} (\sin^2 2\theta_i + \sin^4 \theta_i)^{1/2} \quad (2)$$

式中： λ_o 为衍射光波长； v_a 为超声声速； Δn 为双折射引起的折射率差； f_a 为超声波频率； θ_i 为入射光与晶体光轴的夹角。通过式(2)可知：①电信号的频率 f_a 控制超声波频率 f_a ；②一个超声波频率 f_a 对应一个衍射光波长 λ_o ，当 f_a 发生变化时， λ_o 必将随之相应地改变；③改变电信号的频率 f_a 可快速选择衍射光的波长 λ_o ；④如果离散步进地调谐超声波频率 f_a ，则可获得一定波段范围内的光谱数据立方体。

与棱镜、光栅色散型光谱成像技术相比，声光调制型光谱成像技术特点是：①体积小、重量轻、全固

态无移动部件；②电调谐易于快速实现波长任意切换或连续扫描，时间分辨率高，16000 波长点/s；③利用反常布拉格衍射，衍射效率高，适用于作为光谱分析仪器^[10-11]。

AOFF 实际应用：2003 年，ESA 发射的火星探测器及 2004 年“勇气号”和“机遇号”均采用 Brimrose 公司的微型 AOTF 近红外光谱成像仪。

2.2.2 液晶可调谐滤光型

液晶可调谐滤光片 LCTF 是利用液晶电控双折射效应制成的新型分光器件。LCTF 由多个 Lyot 波片单元级联构成，单组 Lyot 波片如图 12 所示，由偏振片、液晶、石英构成相位延迟片。

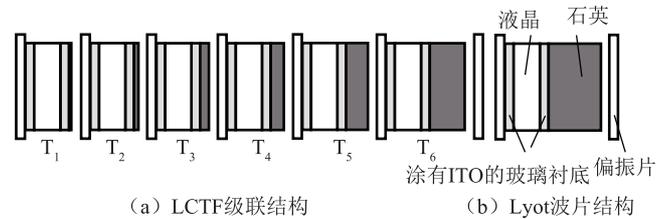


图 12 LCTF 结构

当一束线偏振光通过液晶时，对于波长为 λ 的光，其 o 光和 e 光的相位差为

$$\delta_i = 2\pi d \Delta n_i / \lambda_i \quad (3)$$

式中： d 为液晶层厚度； Δn_i 为液晶对波长 λ_i 光的双折射率，它取决于波长 λ 、温度 T 和电压 V 。

$$\Delta n_i(T, \lambda_i, V) = \Delta n_0(T, \lambda_i) f(V) \quad (4)$$

式中： $\Delta n_0(T, \lambda_i)$ 为温度 T 、波长 λ_i 、电压 $V=0$ 时液晶的双折射率； $f(V)$ 为液晶双折射率随电压变化的函数。偏振光经检偏后，将发生干涉，其透过率为

$$T(\lambda_i) = \cos^2(\delta_i) = \cos^2[2\pi d \Delta n_0(T, \lambda_i) f(V) / \lambda_i] \quad (5)$$

由式(5)可知，调节电压使得液晶的双折射率发生变化，从而导致光谱透过率发生变化。在单组 Lyot 波片中，o 光和 e 光产生的光程差为通过液晶和通过石英产生的光程差。在级联结构中，每组 Lyot 单元的光程差是前一组 Lyot 单元光程差的两倍。经过六级调制后，LCTF 能够获得窄带滤光片的效果^[12]。

LCTF 滤光型光谱成像技术的特征是：施加不同的电压，调节双折射液晶造成的相位差，从而使不同波长的光发生干涉，实现对不同波长的连续可调谐扫描；优点是：无移动部件、孔径大、视场角大，采用电控可实现连续可调谐。但 LCTF 采用偏振片进行起偏、检偏，使得光能利用率低，探测器需采用低照度宽波段

探测器,或像增强器,不利于目标探测识别,限制了实际应用^[13]。

2.3 干涉型

傅里叶变换干涉型光谱成像技术是一种间接光谱成像技术,通过具有光程差的相干光束形成稳定干涉条纹,利用干涉条纹光波能量与复色光光谱存在的傅里叶变换关系,实现窄带光谱的反演解算。

2.3.1 干涉成像光谱原理

同一单色波长的光各自形成相干干涉,互不干扰,形成单色光的干涉强度分布

$$I(\nu, \Delta) = 2(t \cdot r \cdot A_0(\nu))^2 [1 + \cos(2\pi\nu \cdot \Delta)] \quad (6)$$

式中: Δ 为光程差; ν 为波数, $\nu = 1/\lambda$; A_0 为振幅; $A_0(\nu)$ 为复色光强; t, r 分别为分束镜的透过率和反射率。

不同波长的光不满足干涉条件(光波频率不同),为非相干叠加,总强度是单色波长干涉强度的和(积分)。

$$\begin{aligned} I(\Delta) &= \int_0^{\infty} dI(\nu, \Delta) \\ &= \int_0^{\infty} 2(t \cdot r \cdot A_0(\nu))^2 [1 + \cos(2\pi\nu \cdot \Delta)] d\nu \end{aligned} \quad (7)$$

令 $B(\nu) = (t \cdot r \cdot A_0(\nu))^2 = (t \cdot r)^2 A_0^2(\nu) \propto A_0^2(\nu)$, 称作复色光的光谱图。

$$I(\Delta) = \int_0^{\infty} 2B(\nu) d\nu + \int_0^{\infty} 2B(\nu) \cos(2\pi\nu \cdot \Delta) d\nu \quad (8)$$

式(8)第一项与光程差 Δ 无关,代表复色光干涉总强度的直流成分;式(8)第二项与光程差 Δ 有关,代表复色光干涉总强度的交流成分。实际处理时,总强度 $I(\Delta)$ 可以去除直流成分,单独保留交流成分。

$$I(\Delta) = \int_0^{\infty} 2B(\nu) \cos(2\pi\nu \cdot \Delta) d\nu \quad (9)$$

傅里叶逆变换可得,复色光的光谱强度为

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\Delta) \cos(2\pi\nu \cdot \Delta) d\Delta \quad (10)$$

FFT型高光谱成像技术根据调制方式的不同可分为三类:一类是基于迈克尔逊干涉仪原理的时间调制型FFT光谱成像技术;另一类是基于Sagnac干涉仪原理的空间调制型FFT光谱成像技术;第三类是时空混合调制型FFT光谱成像技术。

2.3.2 时间调制型

时间调制型干涉原理如图13所示,它以Michelson干涉仪为分光元件,入射光束经分束镜分成两束:反

射光束、透射光束;反射光束经静镜反射、分束镜透射到达聚焦镜;透射光束经动静反射、分束镜反射到达聚焦镜;两束光束经聚焦透镜干涉,成像在探测器上呈干涉条纹。

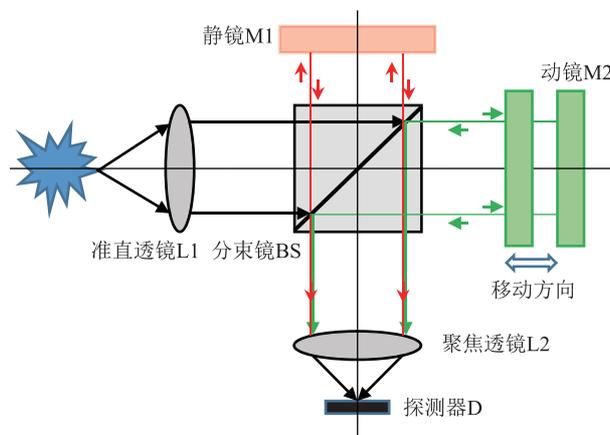


图13 时间调制型FFT光谱成像仪原理

时间调制型FFT光谱成像仪的特征:一次只能获得2D场景一个光程差的干涉图,需要依靠动镜M2的扫描运动产生不同光程差的干涉图,需要一定时间才能完成序列干涉图的产生。优点:①从理论上讲可以达到任意的光谱分辨率(只要入射光能量足够强)、测量的光谱范围也非常宽;②仪器只依赖于运动扫描系统,相对于利用色散扫描的光谱仪来说,其结构要简单得多。缺点:①通过动镜M2运动改变透射光束光程,从而改变反射光束与透射光束的光程差,因此需要非常精确的位置扫描;②当需要较高光谱分辨率时,动镜移动量很大,体积比较庞大。

2.3.3 空间调制型

空间调制型FFT光谱成像仪原理如图14所示,它以分体式sagnac干涉仪为分光元件,分束镜45°放置,反射镜M1、反射镜M2首先相对于分束镜BS布置。当反射镜M1与反射镜M2对称时,透射光束与反射光束没有光程差,不会引起干涉;当两个反射镜不对称时,如图14中反射镜M2平行偏移 c ,可实现横向剪切量为 d ,透射光束与反射光束形成光程差,满足干涉条件^[14]。

空间调制型FFT光谱成像仪的特征在于:不同光程差通过反射镜的位置空间差的方式一次调制,一次即可以获得1D光谱维和1D空间维,由垂直于狭缝方向的1D空间扫描获得另一维的空间维信息。优点在于:①没有运动部件,稳定性强;②可同时获得1D狭缝内每个点的干涉图,因此光谱可实时测量;③狭缝

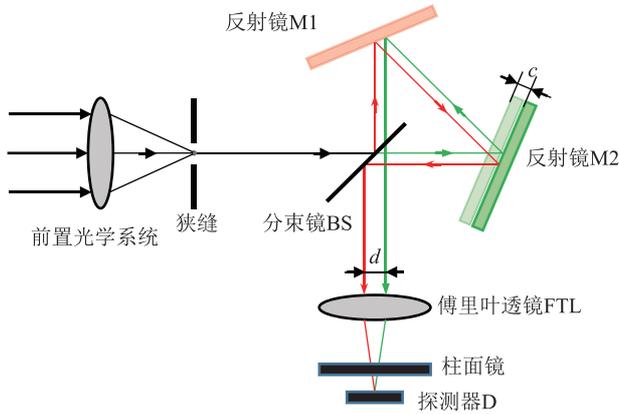


图 14 空间调制型 FFT 光谱成像仪原理

宽度只决定 1D 空间分辨率的要求，在满足空间分辨率的前提下，狭缝宽度可以尽可能的大，从而具有大视场和高通量的优势。缺点在于：①空间调制型的光程差不可能很大，难以实现较高的光谱分辨率；②存在狭缝，降低了入射辐射通量，降低了系统的信噪比。

2.3.4 时空混合调制型

如图 15 所示，时空混合调制型 FFT 光谱成像仪形式上与空间调制型 FFT 光谱成像仪类似，但光路上没有入射狭缝，也没有柱面镜；空间调制型进入横向剪切分束镜的光线是透过 1D 狭缝的光束，而时空混合调制型进入分束镜的是 2D 场景的平行光^[15]。

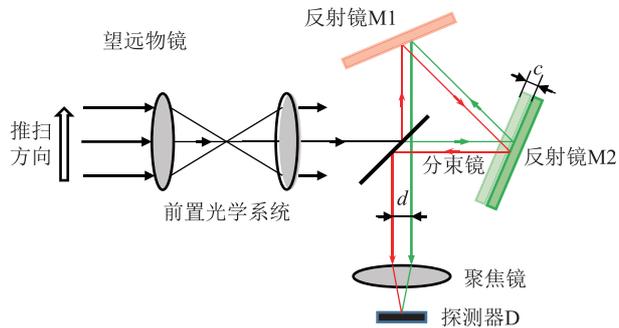


图 15 时空混合调制型 FFT 光谱成像仪原理

时空混合调制型 FFT 光谱成像仪的特征在于：光程差由横向剪切产生，故属于空间调制；同一时刻不同视场角的光程差不同，特定物点的一系列光程差需要在不同时刻通过推扫产生，从而最终获得一副完整的干涉图，因而具有时间调制特点^[16]。优点是：①原理简单、系统结构简化，系统设计难度降低；②没有运动部件，提高了系统的稳定性、可靠性、抗震动性和抗冲击性；③允许很大的视场，大口径，在满足光通量的要求下，可以大大减小仪器的体积、重量^[17]。

缺点是：具有时间调制特征，物点的不同光程差在不同时刻获取，故不具有光谱测量实时性。

3 光谱成像技术发展趋势

3.1 小型化与低成本

虽然光谱成像技术的目标区分能力已经在应用中得到证明，但是此技术目前还是主要作为科学研究工具，应用于实验室作为光谱分析仪器或航天、航空等遥感领域。现有成熟的光谱成像技术的速度、体积、成本，限制了光谱成像技术的产业化应用。为缩短研究和产业之间的差距，光谱成像技术正向小型化、低成本方向发展。

3.1.1 焦平面分光

2012 年，比利时 IMEC 提出了一种单片集成式高光谱成像探测器方案，将阶梯楔形 Fabry-Perot 干涉滤光片制作在 CMOS 传感器表面。如图 16 所示，F-P 滤光片由透明层（称为空腔）和两个反射镜制成，反射镜分别分布在透明层两侧。腔的长度决定了滤光片的中心波长，反射镜的反射率决定了滤光片的半高宽（FWHM）。通过设计空腔的长度和反射镜的反射率即可得到离散的窄带光谱。采用单片集成式探测器的光谱成像仪如图 17 所示，物镜将图像直接聚焦在传感器顶部的滤光片上，无需任何额外的光学元件，如棱镜或光栅。极大减小了光谱仪的体积和重量^[18]。

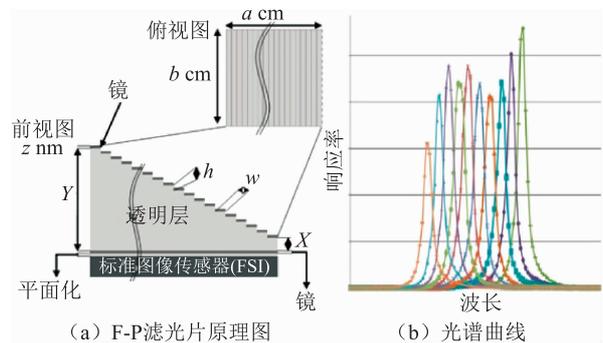


图 16 在 CMOS 成像器上集成 Fabry-Perot 光学滤波器

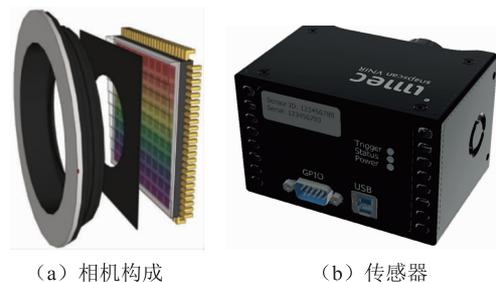


图 17 相机架构的概念表示：远心镜头、可变孔径和传感器

区别于狭缝线扫仅能一行一行获取高光谱图像线, 阶梯 F-P 滤光片每个阶梯对应一个光谱带, 每个光谱带能够覆盖多条空间线, 通过并行采集可以提高光谱成像的速度。例如, 对于指定的光谱带, 滤光器下有 16 条线, 因此该成像器的线速率 16 倍于探测器的帧速率, 如探测器 180 ft/s (54.864 m/s), 即每秒 2880 行。

3.1.2 胶体量子点

2015 年, 清华大学提出了一种基于胶状量子点纳米材料的光谱仪。胶体量子点 (Colloidal Quantum Dots, CQDs) 是半导体纳米晶体, 其半径小于大块的激子玻

儿半径。简单地通过改变 CQDs 的大小、形状和组成, 可以在深紫外到中波红外波长范围内, 连续、精细地调谐吸收光谱。基于 CQDs 的量子点光谱仪原理如图 18 所示, 195 种滤波器形式的 CQD 材料, 每个点都是一个 CQD 滤波器, 由一种 CQD 材料制成, 嵌入在聚乙烯醇缩丁醛薄膜中。图 18 (b) 为一些 CQD 滤波器的透射光谱。量子点光谱仪测量入射光谱, 一个 CQDs 滤波器测量一个总透射强度, 从而产生一组测量的透射光强度。采用线性回归方法, 由测量的透射光强度重构出原始的窄带光谱^[19]。

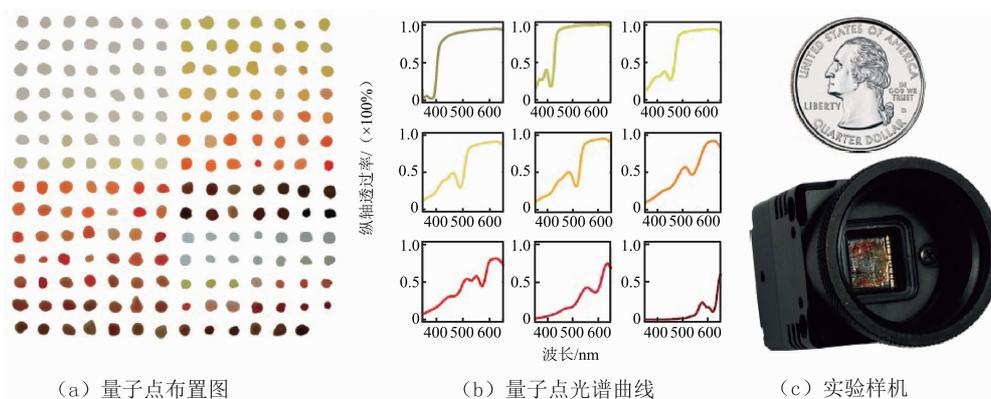


图 18 CQDs 原理图

3.2 实时快照式

常规的色散型、滤光型、干涉型光谱成像方式均需要某种形式的扫描, 狭缝色散型需要垂直于 1D 狭缝的空间扫描, 获得另一维空间信息; AOTF, LCTF 需要凝视进行光谱扫描, 以获得所有的光谱信息。这种空间或光谱扫描往往需要数秒甚至分钟时间以获取完整光谱数据立方体, 仅适用于探测静态场景、静止目标, 不适用于工作在光照变化、大气扰动等复杂条件, 难以探测动态目标。为满足光谱成像应用于复杂工况条件, 光谱成像技术正向着实时、快照式方向发展。

3.2.1 计算层析

使用先进的光栅在 2D 传感器上产生光谱立方体的重叠投影。然后, 使用与计算机断层扫描 (CT) 重建算法相关的复杂算法, 从该重叠的投影数据中提取光谱立方体, 如图 19 所示。这种方法的缺点包括: 重建算法的复杂性使得实时可视化不可能, 光谱立方体的分辨率有限, 展开立方体的像素数量从传感器尺寸的 4.2% 变化到 22% ~ 64%。重构精度和分辨率高度依赖于场景, 还取决于迭代算法和迭代终止准则^[20]。

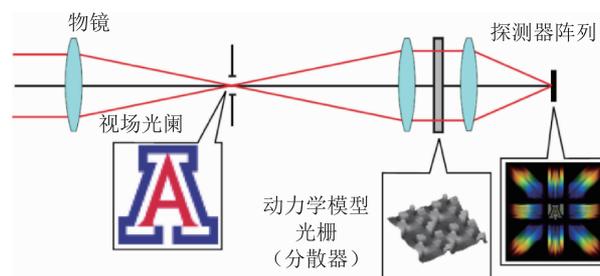


图 19 计算层析光谱成像原理图

3.2.2 压缩编码

2009 年, 杜克大学 Brady 研究小组提出了直视型编码孔径快照式光谱成像仪 (Direct View Coded Aperture Snapshot Spectral Imager, DV-CASSI)。DV-CASSI 原理图如图 20 所示, 包括物镜、编码孔径、带通滤光片、F/8 中继透镜、Amici 西棱镜作为色散元件、CCD 探测器^[11]。对场景进行空间降采样并使用压缩感测来重构, 但重构依赖于复杂的算法, 难以实时可视化。此外, 压缩感知概念采用依赖于信号的空间分辨率与图像质量的权衡, 取代了空间分辨率与光谱分辨率的折衷, 这使得结果数据的质量不可预测, 通常会引入空

间和光谱重构伪影。因此，降低了获得的空间分辨率的优势^[21]。

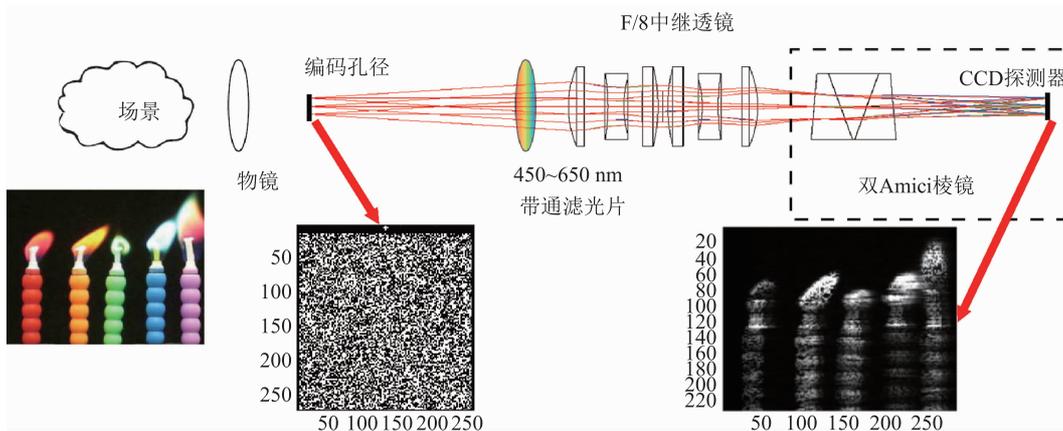
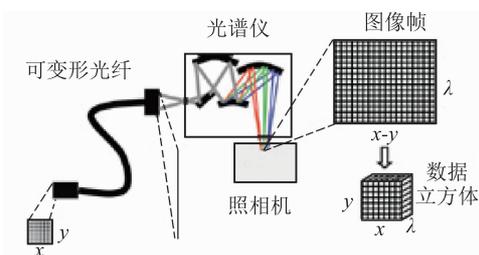


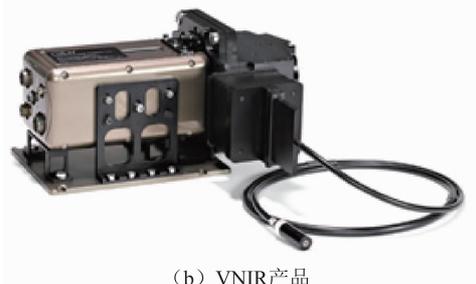
图 20 DV-CASSI 原理图

3.2.3 积分视场

2006 年，美国 Opto-knowledge 公司采用可变形光纤，将 2D 空间图像“拉直”转换成 1D 条带图像，如图 21(a) 所示，然后再由光栅或棱镜等色散元件进行色散，获得初始 2D 场景的光谱数据立方体。由于每次曝光帧周期可以获得一个完整的光谱数据立方体，因此称为实时视频级高光谱成像仪^[22]。但其空间分辨率较低，仅为 44×40 ，主要应用于高光谱分辨率、低空间分辨率需求的场合，如实时自动目标识别、IED/爆炸物/化学探测、生物识别/生物医学、导弹拦截、爆炸闪电分析、燃烧诊断等。



(a) 4DIS 原理



(b) VNIR 产品

图 21 4DIS 光学原理图及实物

3.2.4 离散采样

2009 年，Bodkin 提出快照式光谱成像 Hyper-pixel

Array (HPA) 相机，如图 22 所示。通过掩模板实现场景的离散间隔采样，通过色散棱镜实现离散采样点的色散，离散点的光谱平铺到探测器平面^[23]。其原理简单、计算量极小，实时性好，适用于大目标的探测，例如农业调查、环境监测。为了保证色散后的光谱不重叠，每个采样点之间需保留足够的间隔，空间采样点受到极大约束，难以用于小目标探测识别。

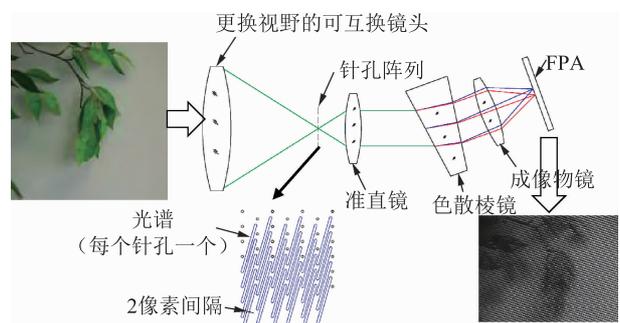


图 22 HPA 相机原理与实物

3.2.5 复眼滤光

2003 年，Jun Tanida 将 TOMBO 架构应用于彩色成像，提出 color TOMBO 架构，其方法是在微透镜上方附着 R, G, B 宽波段滤光片阵列，实现颜色滤波。2004 年，日本学者 Jun Tanida 又将 color TOMBO 中根据 unit 的滤光分割架构进一步推广到光谱实时成像 MS-TOMBO 中，如图 23 所示，即在典型 TOMBO 系统上附着按照 unit 空间分割的滤光片阵列^[24]。

3.2.6 像素滤光

2014 年，比利时微电子研究中心的 Imec 提出将 Fabry-Pérot 像素级滤光片阵列整体在传感器表面集成，如图 24 所示。彩色数字相机可以同时获取场景 3 个通

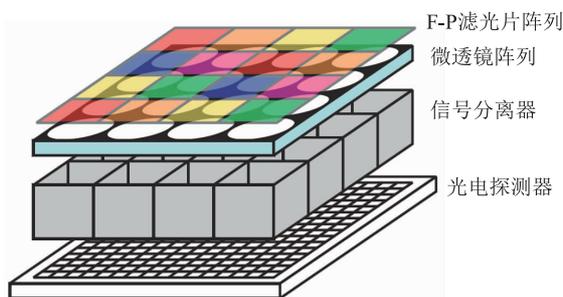
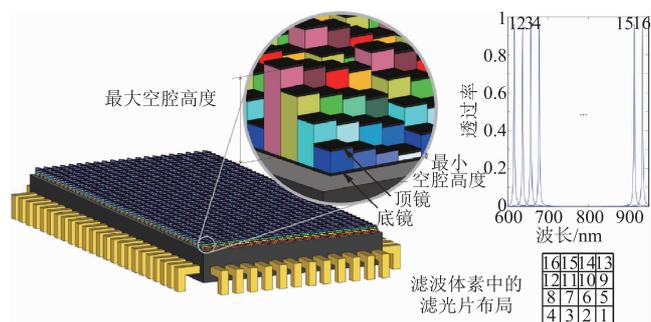


图 23 多光谱 TOMBO 架构原理图

道的光谱图像。将此概念推广，将相邻 $n \times n$ 阵列视为一个光谱体素单元，通过在探测器上方排列 n^2 个滤光片即可同时获得 n^2 个通道的光谱数据^[25]。图 24 是在 CMOS 传感器上方按照 4×4 基本滤光片阵列的拼接，可同时获得 16 个通道的光谱数据。这种基本滤光片阵列拼接式的多光谱快照式成像方案通过牺牲空间分辨率，同时获取具有一定空间分辨率和光谱分辨率的光谱数据立方体。如采用 1024×1024 的 CMOS 探测器，欲同时获得 4×4 共 16 个通道的光谱数据，则理论上每次曝光时间内可获得光谱立方体的空间分辨率为 256×256 。

图 24 4×4 基本滤光片阵列拼接构成的马赛克快照式光谱成像原理

4 结论

高光谱成像数据包含 2D 空间信息和 1D 光谱信息，比传统的灰度图像和彩色图像具有更强大的物质区分能力，根据光谱特征图像的检测处理或根据像素光谱特性的差异，可实现多种检测识别应用，目前已在产品分选、精准农业、环境监测、文物保护、刑事侦查、伪装识别等行业发挥重要作用。

近年来，棱镜光栅色散型、AOTF 可调谐滤光型、傅里叶变换干涉型光谱成像仪已得到快速发展，但是这些光谱仪体积较大、成本较高，一般作为科学仪器

使用，不适合产业化应用需求，因此小型化、低成本、实时快照式光谱仪将是未来的发展趋势。基于焦平面分光的光谱成像技术将阶梯楔形 Fabry-Perot 干涉滤光片制作在 CMOS 传感器表面，通过器件形式实现光谱分光，光谱仪具有体积小、重量轻、易于批量生产、成本低等优势。在 6 种实时快照式光谱成像方案中，计算层析、压缩编码光谱成像技术基于复杂的重构理论，重构的数据质量和重构实时性还需要进行攻关突破，短时间难以实用；积分视场、离散采样光谱成像技术原理简单且相对成熟，一般用于对空间分辨率要求不高的场合。复眼滤光式光谱成像技术采用复眼成像实现视场的复制，将 3D 映射到 2D，像素滤光式光谱成像技术将 Bayer 彩色成像概念扩展到光谱成像，通过探测器表面的像素级 Fabry-Perot 滤光分光，既能在权衡光谱分辨率与空间分辨率的基础上实现实时性，又能极大地减小体积、降低成本。

参考文献

- [1] 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): 75-80.
- [2] 朱院院, 高教波, 高泽东, 等. 基于相似性分类的高光谱主成分融合方法比较[J]. 光学技术, 2016, 42(2): 97-102.
- [3] 朱院院, 高教波, 高泽东, 等. 基于多区间映射评价优选的光谱数据融合显示算法[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 728-734.
- [4] 朱院院, 高教波, 高泽东, 等. 高光谱空间降采样独立成分特征分离[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3246-3258.
- [5] Chang C I. Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis[M]. Wiley-interscience, 2013.
- [6] Dualix Spectral Imaging [EB/OL]. [2018-10-29]. <http://dualix.com.cn/>.
- [7] 朱院院, 高教波, 高泽东. 基于滑窗负熵统计的高光谱独立特征提取方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 302-311.
- [8] Harris S E, Wallace R W. Acousto-optic Tunable Filter[J]. Journal of the Optical Society of America. 1969, 59(6): 744-747.
- [9] Chang I C. Noncollinear Acousto-optic Tunable Filter With Large Angular Aperture[J]. Applied Physics Letters, 1974, 25(7): 370-372.
- [10] He Z H, Lian W L, Wu M J. Determination of Tobacco Constituents with Acousto-optic Tunable Filter Near Infrared Spectroscopy[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2006, 14(1): 45-50.
- [11] Voloshinov V B, Kulakov L A, Mironov O V. Scanning an Optical Image in the Presence of Acousto-optic Light Filtering [J]. Soviet Journal Communications Technology Electronics,

- 1989, 34(2): 54 - 58.
- [12] 杜培胜, 郭靖, 董前民. 液晶可调谐滤光片及其在光谱仪上的应用[J]. 红外, 2007, 28(11): 4 - 8.
- [13] 王新全, 黄旻, 高晓惠, 等. 基于液晶可调谐滤光片的便携式多光谱成像仪[J]. 光子学报, 2010, 39(1): 71 - 75.
- [14] 相里斌, 赵葆堂. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. 光学学报, 1998, 18(1): 18 - 22.
- [15] 董瑛, 相里斌, 赵葆堂. 大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 330 - 334.
- [16] 孟合民, 高教波, 肖相国, 等. 红外高通量干涉成像光谱仪的设计与验证[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2903 - 2908.
- [17] 孟合民, 高教波, 郑雅卫, 等. 基于分体式 Sagnac 干涉仪的长波红外干涉成像光谱系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 19 - 25.
- [18] Tack N, Lambrechts A, Soussan P, et al. A Compact, High-speed, and Low-cost Hyperspectral Imager [C]//Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, 2012, 8266(4): 16.
- [19] Bao J, Bawendi M G. A Colloidal Quantum Dot Spectrometer [J]. Science Foundation in China, 2015, 523(3): 67.
- [20] Descour M R, Volin C E, Dereniak E L, et al. Demonstration of a High - speed Nonscanning Imaging Spectrometer [J]. Optics Letters, 1997, 22(16): 1271 - 1273.
- [21] Wagadarikar A A, Pitsianis N P, Sun X, et al. Video Rate Spectral Imaging using a Coded Aperture Snapshot Spectral Imager[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6368 - 88.
- [22] Gat N, Scriven G. Development of Four-dimensional Imaging Spectrometers (4D - IS)[C]//Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, 2006, 6302(2): 104.
- [23] Bodkin A, Sheinis A, Norton A, et al. Snapshot Hyperspectral Imaging: the Hyperpixel Array Camera [C]//Proceedings of SPIE, 2009: 7334.
- [24] Shogenji R, Kitamura Y, Yamada K, et al. Multispectral Imaging using Compact Compound Optics [J]. Optical Society of America, 2004, 12(8): 1642 - 1655.

- [25] Tack N. A Compact Snapshot Multispectral Imager with a Monolithically Integrated Per - pixel Filter Mosaic [C]// Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VII. International Society for Optics and Photonics, 2014: 661 - 674.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51735002)

作者简介



高泽东(1980 -), 男, 高级工程师, 主要从事实时光谱成像与信息处理技术研究。2006 年于陕西科技大学获得硕士学位, 同年到西安应用光学研究所工作至今, 2016 年开始在北京理工大学光电学院攻读博士学位。承担了国家级基础类、预研类、型号类项目十余项, 获省部级科技进步奖 2 项; 授权发明专利 5 项; 发表论文 20 余篇。



郝群(1968 -), 女, 教授, 博士, 研究领域包括智能光电感测技术、精密光学测量及仪器。北京理工大学光电学院院长; 中国光学学会常务理事、光电专委会主任委员, 中国仪器仪表学会理事、光机电技术与系统集成分会常务副理事长, 中国兵工学会光学专业委员会主任委员; 《Defence Technology》杂志副主编。

1998 年毕业于清华大学精密仪器系, 同年到北京理工大学工作至今, 其中 1999 ~ 2001 年兼任日本东京大学客座研究员, 2011 年兼任美国凯斯西储大学讲座教授。主持承担了国家自然科学基金重点/仪器专项、国防重大重点等二十余项科研项目, 是 111 学科创新引智基地负责人。获得省部级科技奖 3 项、国家级教学成果奖 1 项、省部级教学成果奖 4 项。先后入选教育部跨世纪优秀人才培养计划, 全国巾帼建功标兵、北京市教学名师等。授权发明专利 50 项, 发表学术论文 200 余篇。