文章编号 2097-1842(2022)05-0929-17

压缩光谱成像系统中物理实现架构研究综述

李云辉*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春130033)

摘要:不同于传统点对点映射成像方式,计算光学成像通过将前端光学信号的物理调控与后端数字信号的计算处理联合起来,使图像信息获取更加高效。这种新型成像体制有望缓解传统成像技术框架下低制造成本与高性能指标间的矛盾, 尤其在高维图像信息获取中呈现更显著优势。而物理器件支撑下的系统架构一直是计算光学成像发展的基石,本文针 对压缩光谱成像这一子技术领域,介绍了现有可实现空间或光谱调制的光学器件,并以此为基础对多型压缩光谱成像系 统架构进行了梳理、归纳,依据信息调制过程的差异,将其规整为单像素光谱成像、编码孔径光谱成像、空间-光谱双重 编码光谱成像、微阵列型光谱成像与散射介质光谱成像等几类。重点阐述了多种系统架构的信息调制与采集原理,以及 对光谱图像数据立方体的调制效应,并讨论了其中的共性问题。最后给出了面临的技术挑战,探讨了未来发展趋势。 关键词:计算成像;压缩光谱成像;光学编码;压缩感知

中图分类号:O439;TB133 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2022-0104

Review of physical implementation architecture in compressive spectral imaging system

LI Yun-hui*

 (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
 * Corresponding author, E-mail: liyunhui@ciomp.ac.cn

Abstract: Different from the traditional point-to-point mapping imaging method, computational optical imaging combines the physical regulation of the front-end optical signal with the processing of the back-end digital signal to make the image information acquisition more efficient. This new imaging mechanism is expected to alleviate the contradiction between low manufacturing cost and high performance indicators under the framework of traditional imaging technology, especially in the acquisition of high-dimensional image information. Since the system architecture supported by physical devices is the cornerstone of computational optical imaging, aiming at the sub-technical field of compressive spectral imaging, in this paper, we introduce the existing optical devices that can realize spatial or spectral modulation. Based on this, the architecture of multi-type compressive spectral imaging system is sorted out and summarized, which can be categorized as single-pixel spectral imaging, coded aperture spectral imaging, spatial-spectral dual-coded spectral imaging,

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 62005266);中国科学院青年创新促进会(No. 2022219)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62005266); Youth Innovation Promotion Association, CAS (No.2022219)

收稿日期:2022-05-26;修订日期:2022-06-27

microarray spectral imaging and scattering medium spectral imaging, based on the information modulation process. We focus on the information modulation and acquisition principles of various system architectures and their modulation effects on the spatial-spectral data cube, and then analyze and explore the common issues. Finally, the technical challenges faced are given, and the future development trend is discussed. **Key words**: computational imaging; compressive spectral imaging; optical coding; compressive sensing

1引言

传统相机除获取代表场景强度的二维空间信息外,对光谱信息的采集仅涵盖红、绿、蓝 (RGB) 3个通道,而作为新兴科学研究与工程应用的有效技术手段,光谱成像具备采集场景空间-光谱数据立方体的能力,其中增添的高分辨光谱通道信息为目标探测、识别、分析提供了更为精细的差异化特征,在军事安全、环境监测、生物科学、医疗诊断、食品检验等领域得到了广泛应用。

然而,面对三维光谱图像数据立方体,现有阵 列探测器单次只能捕获其中的二维子集,剩余维 度需借助空间展开或时间扫描方式进行探测。根 据数据采集过程差异,传统光谱成像设备大体可 分为滤光型光谱仪、扫描型光谱仪和干涉型光谱 仪3类四。滤光型光谱仪在每次曝光时使用滤光 轮或可调谐滤光器采集单谱段内的全空间分辨率 图像,多个谱段信息采集需分时切换完成,牺牲了 时间分辨率。其中的阵列式滤光器虽然实现了空 间-光谱信息的快照式采集,但牺牲了灵敏度和空 间分辨率。相比之下,扫描型光谱仪每次曝光时 采集的是光谱-空间数据,而另外一个空间维度信 息需通过扫描方式获取,牺牲了时间分辨率,同时 涉及更多的机械运动过程和校准复杂性。干涉型 光谱仪与滤光型光谱仪类似,同样需要光谱扫描 过程,且其复杂性和精度要求使其系统构建和校 准难度较大。因此在基于奈奎斯特-香农采样定 律的完备采样光谱成像系统框架下,始终面临空 间、光谱、时间分辨率和灵敏度指标之间的矛盾。 此外,随着光谱分辨率或空间分辨率提升,以完备 采样方式对数据立方体获取还会引入更长采集时 间代价和海量数据存储及传输压力。有限的时间 分辨率也严重制约了动态场景的光谱成像应用。 这些传统光谱成像系统忽略了自然场景在空

间和光谱维度上的相关性,而其所带来的信息冗

余为更高效的光谱图像数据采集提供了可能。近 年来压缩感知理论指导下的压缩欠采样成像系统 在应对大尺度、高维度图像数据采集中发挥了积 极作用,其通过特定的信息编码调制手段,可以远 低于奈奎斯特-香农采样定律要求的采集量实现 高质量数据重构^[24]。在具备高冗余性的光谱成 像应用中,部分压缩光谱成像系统甚至可实现快 照式采集,这大大缩短了信号获取时间,提高了时 间分辨率,而且信息混叠采样方式也带来灵敏度 的提升。

压缩光谱成像系统涉及物理实现架构、离散 建模、编码调制优化、稀疏表达、系统校准、重构 算法等诸多技术层面^[5]。其中特定的光路设计和 可用的编码调制器件是系统硬件实现的前提,也 决定了系统性能上限。鉴于此,本文从硬件角度 切入,旨在对现有压缩光谱成像系统物理架构这 一子问题进行全面梳理与讨论。首先,介绍了各 种编码调制光学器件及对光谱图像数据的调制效 应,进而在其基础上阐述了各类系统架构和多个 变种型式,并从信号调制角度对不同的采样方案 进行描述、归纳。最后,讨论了压缩光谱成像系 统物理架构约束下的若干共性问题。希望这些分 析和讨论不仅能为读者提供关于压缩光谱成像的 新见解,也可以为新型光谱成像系统设计和对现 有方法改进带来启发。

2 压缩光谱成像数学模型

压缩光谱成像技术包含前端光学信息调控与 后端数字信号计算重构两个阶段,其中前者依赖 于光学系统物理架构,是本文论述的重点。前端 光学调控的基本思想是通过对空间-光谱数据立 方体的编码调制,并通过下采样提取目标场景的 有效信息,进而再借助后端重构算法实现场景信 息重建。前向调制及采样过程抽象为如下数学表述:

$$\boldsymbol{g} = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{f} \quad , \tag{1}$$

其中g为采样结果,f为原始目标场景,H为光学 调控所对应的测量矩阵。多种系统架构对图像信 息的调控过程会形成不同的测量矩阵形式,从而 造成了理论模型间的差异性。

由于上述前向过程是欠定的,在后端数字信号 处理过程中,需要借助重构算法求解如下优化问题:

$$\arg\min_{f} \left\{ \frac{1}{2} \|\boldsymbol{g} - \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{f}\|_{2}^{2} + \lambda \Gamma(\boldsymbol{f}) \right\} \quad , \qquad (2)$$

其中第一项为保真项, $\|\cdot\|_2$ 表示 L₂范数; 第二项 $\Gamma(\cdot)$ 为正则项, 表征目标信号的先验信息, τ 为其权重系数。

3 光学调制器件

压缩光谱成像系统中对空间和光谱信息的调制通常需要在光学路径中完成,而这就需要光学器件为其实现提供支撑。全自由度信息调制使系统具有更高的灵活性和更深的优化空间,然而在高维度信息处理时通常也会付出高昂代价,或受限于物理器件水平而丧失可行性,取而代之的是有限自由度的结构化调制方案。基于此,现有光学器件对光谱-图像数据立方体信息处理涉及调制(Modulation)、剪切(Shearing)、复用(Multiplexing)、分割(Unmixing)、复制(Duplicating)等多个操作。

最为常用的空间调制器件为光刻掩模板,将 其置于光学路径中的不同位置可实现多样的幅值 调制过程,放置于光学像面与光谱面处可分别实 现空间信息调制与光谱信息调制,置于二者中间 则可实现空间-光谱混合调制。在此基础上衍生 出的灰度模板可以实现多灰度级幅值调制,彩色 编码模板可以实现每个空间位置的差异化光谱调 制。可时变调整的空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 包含液晶 (Liquid Crystal Display, LCD)、硅基液晶 (Liquid Crystal on Silicon, LCoS)、数字微镜阵列 (Digital Micromirror Device, DMD)等,它们可实现更为灵活的幅值、相位、光 谱调制。如: DMD 和 LCoS 常置于像面处用于实 现 0/1 幅值调制; LCD 或变形镜 (Deformable Mirror, DM) 通常置于光瞳处进行相位调制以生成目 标点扩散函数 (Point Spread Function, PSF)分布, 从而实现空间信息复用调制。此外,采取电压调 控还能够使 LCD 具备透射光谱调制能力。

更高效的光学器件甚至具备独立实现空间-光谱图像信息调制能力,从而简化系统架构,实现 紧凑化、微型化设计。如:利用法布里-珀罗谐振 器阵列 (Fabry-Perot Resonators Array, FPRA) 可 实现像素级差异化光谱调制;利用衍射滤波器 阵列 (Diffractive Filter Array, DFA) 与散射介质 (Scattering Medium, SM)可实现空间信息复用调 制,并且依靠不同波长 PSF 的各异性可实现光谱 差异化调制。

剪切、分割、复制等操作也可为信息调制过 程提供辅助作用。其中,剪切操作用于在低维信 息一致化调制基础上,从高维度角度开展差异化 调制。如通过光栅或棱镜色散实现空间-光谱数 据立方体的"倾斜"化。通过压电陶瓷驱动编码 模板可实现剪切位移,通过更为灵活的可时变 SLM可从时间维度实现差异化调制。空间复制 操作便于对目标场景进行空间并行化调制,进而 实现快照模式下的多重采样功能。如采用外表面 镀膜反射镜组 (First-Surface Mirrors, FSMs) 及透 镜阵列方式进行空间复制,实现并行差异化调制, 也可以通过分束棱镜实现多探测器并行采样。光 谱分割操作可通过单色光谱照明或液晶可调谐滤 波器 (Liquid Crystal Tunable Filters, LCTF) 实现。 上述光学器件对信息的调制效应如图 1(彩图见 期刊电子版)所示。



Fig. 1 Modulation effects of optical devices on information

4 系统架构型式

在上一小节中所述的光学调制器件支撑下, 各种器件配置组合与信息调制方案层出不穷。本 节重点阐述各类系统架构及其多个变种型式。依 据信息调制过程,可划分为单像素光谱成像 (Multispectral Single Pixel Imager, MSPI)、编码孔 径光谱成像 (Coded Aperture Snapshot Spectral Imager, CASSI)、空间-光谱双重编码光谱成像 (Dual-Coded Spectral Imager, DCSI)、微阵列型光 谱成像、散射介质光谱成像等几大类,每个类别 中还含有多种改进型式。

4.1 单像素光谱成像

单像素相机 (Single Pixel Camera, SPC) 是压

缩感知理论在成像领域最早、最典型的应用,大 多光谱成像系统均是在其基础架构上扩展而来 的。图 2(彩图见期刊电子版)为多种衍生系统架 构型式,为了更好地可视化,将相应的对空间-光 谱三维数据立方体的调制及降维投影过程绘制在 其右侧,其中系统架构中关键光学调制器件与其 对数据立方体的调制效果如图中虚线所示。如 图 2(a)所示,在基于 DMD 的 SPC 基础框架下, 通过将光电二极管替换为光谱仪,对单像素采集 的信息进行光谱分割,就完成了一种压缩光谱成 像系统的构建^[6-11]。系统中具体的光信号路径为: 目标场景经物镜聚焦于 DMD 上,经 DMD 对全 光谱数据空间调制后,再由中继镜组投射到光谱 仪上,经光谱分割后,最终通过线阵探测器完成信 息采集。此时各谱段的空间信息被同步调制,而



- 图 2 单像素光谱成像系统架构及相应的空间-光谱数据立方体调制过程: (a) 基于光谱仪的单像素光谱成像仪; (b) 空间-光 谱调制单像素光谱成像仪; (c) 光谱分离单像素光谱成像仪; (d) 空间-光谱调制光谱成像仪
- Fig. 2 Single pixel spectral imaging system architecture and its corresponding spatial-spectral data cube modulation diagram.
 (a) Spectrometer-based single pixel spectral imager; (b) spatial-spectral modulation single-pixel spectral imager;
 (c) spectral unmixing single pixel spectral imager; (d) spatial-spectral modulation spectral imager

光谱信息则保持常规采集模式,这种机制可视为 一种并行光谱采集,因光谱维度未压缩而使分辨 率得到保证,但也因光谱信息未调制而限制了采 样率缩减。如图 2(b)所示,作为后端光谱仪的一 种替代方案,索津莉团队通过对照明光进行空间 调制,并利用 SLM 与探测器采样速率的差异性, 在照明光路的光谱面实施光谱调制,进而在相邻 两个 SLM 调制更新期间,利用探测器的多个采样 结果经傅立叶分解直接得到光谱成分信息[12]。系 统中具体的光信号路径为:宽谱照明光源首先经 SLM 完成空间调制,然后由衍射光栅与透镜组合 将光信号压缩为一维光谱条带,并由转轮带动透 过率以正弦规律变化的图案实现光谱调制,这样 分别经空间调制和光谱调制的光束照射到目标物 体上,最终通过桶状探测器完成采集。值得说明 的是,探测器在相邻两个 SLM 更新期间完成了多 次采样,由于不同光谱经历了不同时间频率的调 制,这些采样结果所绘制的曲线经傅立叶分解后, 可以提取出每个谱段的强度信息,从而间接实现 了光谱分割。对于每个谱段均可以看作是一个典 型的 SPC。该系统巧妙利用光谱傅立叶调制,实 现光谱成像的同时保留了单像素优势,然而这也 使其构成稍显复杂。

为实现更灵活的空间-光谱信息调制,研究人 员提出一种单像素系统型式,如图 2(c) 所示。通 过光谱分离器将不同光谱沿空间维度平铺,并采 用 SLM 并行差异化调制,进而通过单像素完成采 集[13-14]。系统中具体的光信号路径为:宽谱照明 光源经带通滤光片滤除带外信号后,照射到目标 物体上,物体反射光束经物镜与准直镜传递到光 谱分离器中,其输出的不同谱段光束经成像透镜 聚焦于 DMD 不同区域, 经 DMD 对每个谱段进 行差异性调制后,最终通过光电二极管完成采 集。这种以空间换时间的方式有效提升了时间分 辨率。另一种系统型式如图 2(d) 所示, 通过 SLM 在频域内调制实现空间信息复用,并采用光纤进 行空间离散下采样,进而再借助棱镜与 DMD 组 合实现光谱调制,最终采用线阵探测器完成空间-光谱复用调制信息的采集[15]。系统中具体的光信 号路径为:首先在由两个傅立叶透镜组成的 4-f 系统中,采用 SLM 在其频谱面内调制。经 4-f 系 统输出的光信号聚焦于光线捆束的输入端,由后 者实现离散下采样并整理成一维线阵形式。在该 一维光信号经棱镜色散后的光谱面内,采用 DMD实施光谱调制,并由柱状透镜重新汇聚,最 终通过线阵探测器完成采集。然而这种空间下采 样方式会造成一定的光能量损失。

4.2 编码孔径光谱成像

4.2.1 基本型式

编码孔径光谱成像仪 (CASSI) 及其衍生型式 如图 3(彩图见期刊电子版)所示。单色散 (Single Disperser, SD)-CASSI 开创了压缩光谱成像系统 的先河,如图 3(a)所示,该系统通过前端物镜将目 标场景成像于编码孔径平面内,采用固定编码掩 模板对每个波长均执行一致的空间调制,并通过 色散元件对数据立方体进行光谱剪切,进而再投 影到探测器焦平面,其捕获数据包含一维空间信 息与光谱信息的复用^[16-18]。系统中具体的光信号 路径为:目标场景经物镜聚焦于编码孔径处,经编 码掩模板调制后,再由中继镜组投射到棱镜,经棱 镜色散剪切处理的信号最后通过中继镜组投影到 面阵探测器上。

作为上述系统更早期版本的双重色散 (Dual Disperser, DD)-CASSI, 如图 3(b) 所示。其由两个 通常用作传统色散光谱仪的 4-f 型色散臂串联组 成,两臂对称排列,根据光路可逆性,第二个臂恰 好抵消前者引入的色散。该系统第一个色散臂将 输入图像成像于中间分割面,并且由棱镜色散实 现光谱剪切。经置于该位置的固定编码掩模板空 间调制后,再由第二个色散臂执行逆剪切操作,使 不同谱段图像重新重合,进而完成不同光谱的差 异性空间调制^[19]。系统中具体的光信号路径为: 目标场景首先经中继镜入射到第一个色散棱镜, 再经中继镜将色散光信号聚焦于编码孔径处。经 该处编码掩模板调制后的光信号,继续通过中继 镜入射到第二个色散棱镜,该棱镜将抵消前一棱 镜引入的色散效应,并最终经中继镜投影到面阵 探测器上。相比于 SD 版本,该系统构建复杂,需 要9个光学器件,且校准难度大。但因为各光谱 图像采样时空间重合, DD 版本仅复用光谱信息, 这一方面使其保留了空间分块并行重构处理的可 行性,从而给加速图像重构带来优势;另一方面也 因不含空间信息复用,降低了其维持低采样率的 能力。相比较而言, DD 版本更适于高空间分辨 率、低光谱分辨率的应用场合。

为保留 DD-CASSI 系统的优势,同时降低系



图 3 CASSI 系统基本型式: (a) 单色散 CASSI; (b) 双色散 CASSI Fig. 3 Basic types of CASSI system. (a) SD-CASSI; (b) DD-CASSI

统构建复杂度, ZHAO ZH X 等人提出了一种基于 反射光路的紧凑改进型, 如图 3(b) 虚线框内所 示, 相较于原始 DD-CASSI 系统, 采用一个棱镜 先后执行两次色散, 从而使系统器件数量和规模 减少一半^[20]。

4.2.2 彩色编码孔径型式

在常规 DMD"开"、"关"调制基础上,利用其 高速开关斩波操作,可等效实现不同灰度级的空 间幅值调制,提升动态范围^[21-22]。进一步地,采用 彩色编码孔径模板 (Colored Coded Aperture, CCA) 的 C(Colored)-CASSI 系统,如图 4(a)(彩图见期刊 电子版)所示,一步实现了空间-光谱信息调制,不 仅提高了图像重构质量,而且借助彩色模板与棱 镜色散对光谱信息的共同作用,能够重构得到更 高的光谱分辨率^[23-30]。系统中具体的光信号路径 为:目标场景经物镜聚焦于 CCA,其调制后的信 号由中继镜投射到棱镜,经棱镜色散剪切处理后, 最终再通过中继镜投影到面阵探测器上。若将 CCA 移动到色散元件后的探测器焦平面上,就构 成了一种压缩光谱图案式快照成像仪 (Compressive Spectral Patterned Snapshot Imager, CSPSI), 如图 4(b)(彩图见期刊电子版)所示。该系统交换 了对光谱图像数据的调制顺序,虽然产生与原始 C-CASSI系统相异的调制效果,但仍然保证了有 效的空间-光谱信息调制与复用。这种架构相当 于将 CCA 嵌入到探测器中,实现了更为紧凑的设 计[31-34]。系统中具体的光信号路径为:目标场景 先由中继镜投射到棱镜上,经棱镜色散的信号再 通过中继镜投影到紧邻 CCA 的面阵探测器上。 另一种基于 CCA 的型式是采用 DM 和嵌入 CCA 的探测器组合,如图 4(c)(彩图见期刊电子版)所 示。这种型式省去了色散元件,由 DM 通过波前调 整实现空间信息复用,进而再通过 CCA 实现光谱 调制与复用[35]。系统中具体的光信号路径为:目 标场景光束经透镜组准直后投射到 DM 上,经波 前调制后的反射光信号再通过分束棱镜反射到 嵌入 CCA 的面阵探测器上。相比于 CSPSI 系统, 该系统对空间信息复用调制更充分,因而信息采集 更高效,具备维持更低采样率的能力。将 DM 替换 为随机相位板也可实现同样的信息调制效果^[36]。





图 4 CASSI 系统彩色编码孔径型式: (a) 彩色 CASSI; (b) 压缩光谱图案式快照成像仪; (c) 基于变形镜的 CSPSI Fig. 4 Colored coded aperture types of CASSI system. (a) C-CASSI; (b) CSPSI; (c) DM-based CSPSI

4.2.3 光谱分割型式

除采用 CCA 实现光谱调制复用外,也常直接 采用逐个光谱分割型式。如图 5(彩图见期刊电 子版)中左上图所示,通过 LCTF 将光谱沿时间维 度展开,实现光谱分时处理,进而基于 LCTF 对光 谱随机切换与 DMD 的时变空间调制进行组合, 实现空间-光谱信息调制^[37-38]。系统中具体的光信 号处理流程为:目标场景经物镜入射到 LCTF 内, 由其透过特定谱段光信号,并通过中继镜聚焦 于编码孔径处,经 DMD 调制后该特定谱段的数 据最终经中继镜投影到面阵探测器上。在探测器 的一次曝光期间,上述过程多次执行,LCTF 与 DMD 同步更新,从而实现对不同谱段信息的差异 化调制。



图 5 CASSI 系统光谱分割型式 Fig. 5 Spectral unmixing type of CASSI system

另一种类似的光谱分割型式是基于 LED (Light Emitting Diode)的压缩时间-光谱成像仪 (LED-based Compressive Spectral-Temporal Imager, LeSTI),如图 5 中左下图所示。该系统借助 多个单色 LED 照明实现各光谱场景的分时呈现, 并在各光谱呈现期间通过 DMD 对其进行差异化 调制^[39]。系统中具体的光信号处理流程为:经光 谱标定的 LED 依次照射目标场景,反射光束经中 继镜聚焦于编码孔径处,经 DMD 调制后,含有该 LED 光谱谱段的数据再经中继镜投影到面阵探 测器上。同样地, LED 照明与 DMD 同步更新, 实现对不同谱段信息的差异化调制。这两种系统型式对空间-光谱数据立方体的调制效应本质上是一致的, 它们的优势在于通过依次对分割后的光谱处理, 可实现更灵活的信息调制操作, 但随之而来的是调制步骤繁琐, 耗用了更多采集时间, 使系统对动态场景应用场合的适用性变差。

4.2.4 编码可调整型式

对于光谱丰富或空间纹理细腻的场景,单次 拍摄 (Snapshot) 采集信息往往不够充分,图像重 构质量难以得到保证。此时就需要多重拍摄 (Multi-shots)来增加信息采集量,而且要保证每次 拍摄时信息调制的各异性。一种系统型式是编码 孔径敏捷式光谱成像仪 (Code Aperture Agile Spectral Imager, CAASI)。其在 CASSI 基础架构 上,通过使用压电陶瓷驱动固定光刻掩模板进行 微位移移动来等效空间调制时变性,或采用 DMD 来实现更为灵活的时变调整等型式,对每帧 采集提供差异化的信息调制,满足多帧调制与采 集需求^[40-44]。另一种型式如图 6(彩图见期刊电子 版)所示。在前面所述的 CSPSI 系统基础上,通 过旋转色散元件实现信息调制差异性调整^[45]。此 时系统中光信号处理与工作流程为:目标场景先 由中继镜投射到棱镜上,经棱镜色散的信号再通 过中继镜投影到嵌入 CCA 的面阵探测器上。每 次曝光将棱镜置于不同角度,以图 6 所示为例,分 别在 0°、90°、180°与 270°各拍摄一次,等效实现 了对同一目标场景的 4 次拍摄。值得注意的是, 采用多重拍摄来提升图像重构质量的同时,也不 可避免地降低了时间分辨率。



图 6 CASSI 系统编码可调整型式 Fig. 6 Coding adjustable type of CASSI system

4.2.5 多帧互补采集型式

在面对复杂目标场景时,一方面想通过调整 调制过程,多重拍摄采集来提高采样率,更充分地 捕获场景信息,进而提升图像重构质量;另一方面 要避免因多重拍摄引入的采集时间加长,时间分 辨率降低的弊端。为此学者们探究了多种并行化 多帧采集型式以提高 CASSI 的性能,同时保持其 快照优势,如图 7(彩图见期刊电子版)所示。一 种典型方式如图 7(a) 所示, 通过在 CASSI 物镜前 放置分束器,使得同一场景可以由 CASSI 系统与 全色或彩色相机同时拍摄。这种未经调制的原始 图像与 CASSI 采集结果相结合, 能够有效提升光 谱图像重构精度,且相比于 CASSI 的两帧采集重 构结果更具优势[46-47]。系统中具体的光信号路径 为:目标场景首先经分束镜分为两个独立通道,其 中一个通道为基础的 SD-CASSI 系统架构, 由物 镜将目标聚焦于编码孔径处,经编码掩模板调制 后,再由中继镜投射到棱镜上,经棱镜色散处理后 的信号通过中继镜投影到面阵探测器上;另一通 道则直接通过物镜将目标成像于 Bayer 排列的彩 色探测器上。然而,为将两探测器采样结果统一

到联合模型中,需要对两个光路进行严苛的几何 对准及响应标定,这无疑增大了系统复杂度,而且 分光操作将导致入射到 CASSI 系统的光能量损 失一半。

全色图像的获取并不一定需要额外光路分光 来实现,如图 7(b) 所示, HIUBUČEK J.等人就提 出了一种仅用一个探测器同时捕获 CASSI 图像 和全色图像的方案。在常规光栅色散应用中,采 用一级衍射实现 CASSI 的光谱剪切操作, 而容易 被忽略的零级衍射可用于获取全色图像[48-50]。系 统中具体的光信号路径为:经白光 LED 光源照射 的目标场景,其反射光线经物镜聚焦于 DMD 上, 经空间调制后通过衍射光栅分别将零级与一级衍 射图案投影在面阵探测器的不同区域。其中零级 衍射图案等效于全色探测器采集的图像,一级衍 射图案等效于基础 SD-CASSI 系统采集的图像。 即便如此,上述系统型式也只能在快照时间内实 现两帧数据采集,利用零级衍射的双孔径版本实 现了两个调制模式下4帧信息的快照式采集[51], 但这仍然是十分有限的。



图 7 CASSI 系统多帧互补采集型式: (a) 双相机 CASSI; (b) 零级与一级衍射 CASSI

Fig. 7 Multi-frame complementary acquisition type of CASSI system. (a) Dual-camera CASSI; (b) 0th and 1st order diffraction CASSI

4.2.6 多帧阵列采集型式

为实现更多帧数据的快照式采集,以空间复 制操作为基础,同步执行差异化调制是行之有效 的思路。JEON D S 等人提出了一种基于图像倍 增器的系统型式,如图 8(a)(彩图见期刊电子版) 所示。在该系统中,前端物镜将目标场景投射到 漫反射屏上,该图像由反射镜组复制为 3×3 阵列, 并投影到 CASSI 系统中编码模板的不同区域,实 现了 9 帧数据的差异化调制与并行采集^[52]。系统 中具体的光信号路径为:目标场景经物镜投影到 漫反射屏,漫反射屏发出的光束由反射镜组复制 为阵列后,经中继镜组分别聚焦于编码孔径的 不同区域。每一组信号经空间调制后,均由中继 镜组投射到色散棱镜上,最后中继镜再将色散后 信号投影到面阵探测器上。另一种型式为多重视 图彩色编码孔径快照式光谱成像仪 (Multiview Colored CASSI, MC-CASSI), 如图 8(b)(彩图见期 刊电子版)所示。该系统在 DD-CASSI 基础上, 采用微透镜阵列实现了目标场景的空间复制,具 备更多帧数据的同步采集能力^[33-54]。系统中具体 的光信号路径为:目标场景首先经物镜与微透镜 阵列复制为多组光束信号,这些信号并行入射到 基础 DD-CASSI 系统内,每组信号彼此没有混 叠,最终在探测器上不同区域采集的是每组信号 独立调制的结果。多帧阵列采集的基本思想是以 空间并行代替时间串行操作,保证了高时间分辨 率,但也因此引入一些弊端,如每帧采集的光能量 严重下降,编码孔径模板与探测器的空间分辨率 需求上升等。







Fig. 8 Multi-frame array acquisition type of CASSI system. (a) Image multiplier CASSI; (b) lenslet array CASSI

4.3 空间-光谱双重编码光谱成像

CASSI系统主要在空间像面处执行编码,而 对光谱则采用剪切或分割操作,来辅助实现空间-光谱数据立方体的调制。相比较而言,双重编码 孔径光谱成像仪 (DCSI)则是在光学路径中分别 构建空间像面与光谱面,并在两处执行独立的编 码调制。如图 9(a)(彩图见期刊电子版)所示的 DCSI系统为双臂架构,由空间调制臂和光谱调制 臂串联组成。在空间调制臂中,物镜将目标场景 投射到 DMD 上,由其实现空间调制。在随后的 光谱调制臂中,采用衍射光栅对空间调制后信息 进行色散,并在其光谱面安装 LCoS 实现光谱调 制^[55-57]。系统中具体的光信号路径为:目标场景 首先经物镜聚焦于 DMD,在此完成空间调制后, 再由中继镜投射到衍射光栅,在衍射光栅形成的 光谱面内,放置 LCoS 进行光谱调制。最终反射 光线再经分束镜反射投影到面阵探测器上。通过 空间调制与光谱调制的组合, DCSI 可实现更为 灵活的调制模式,相较于 CASSI 系统具备更好的 性能。



图 9 DCSI 系统架构: (a) 双重编码孔径光谱成像仪; (b) 空间-光谱编码压缩成像仪 Fig. 9 Architecture of DCSI System. (a) DCSI; (b) SSCSI

然而, DCSI 系统中需要两个 SLM 器件, 这使系统 实现的硬件代价和校准变得复杂。空间-光谱编码 压缩成像仪 (Spatial-Spectral Encoded Compressive Spectral Imager, SSCSI) 如图 9(b)(彩图见期刊电 子版)所示。其在前者基础上,将编码孔径模板安 装于探测器前的微小偏移处, 即置于空间像面与 光谱面之间, 针对目标场景空间维和光谱维进行 混合调制, 省去了 DMD 与 LCoS 器件, 使系统得 到简化[58-61]。

4.4 微阵列型光谱成像

光谱成像仪的小型化、微型化是未来发展趋势之一,微阵列型的压缩光谱成像系统架构为紧凑型设计提供了可能。如图 10(a)(彩图见期刊电子版)中左上图所示,AUGUST I.等人利用特殊设计的液晶单元 (Liquid Crystal Cell, LCC) 贴附于 探测器表面,在传统成像系统基础上形成了一种

紧凑型超光谱成像仪 (Miniature Ultra Spectral Imager, MUSI)。通过改变施加在 LCC 两端的电压, 可以调节与波长相关的透过性,进而直接在光谱 域内实现光谱调制,而无需将其转换到空间内再 进行间接调制,使系统得到简化^[62-64]。需要说明 的是,由于探测器上所有像素执行相同的光谱调 制过程,信息捕获需要分时多次操作,无法实现快 照式采集。它的并行化版本有两种型式,一种型 式如图 10(a)中左中图所示,将来自目标场景的入 射光束准直后,由陷波滤波器阵列进行光谱调制, 并经透镜阵列并行投射到探测器上;另一种型式 如图 10(a) 中左下图所示,采用法布里-珀罗谐振 器阵列 (FPRA) 与透镜阵列组合的多孔径设计, 首先通过透镜阵列对目标场景进行复制,接着布 里-珀罗谐振器阵列 (FPRA) 利用其光谱透过性对 每组目标场景进行差异化光谱调制,最终并行投 射到探测器上^[65-66]。上述系统的一种改进型式如 图 10(b)(彩图见期刊电子版)所示。采用像素级 法 FPRA 设计,无需透镜阵列,每个 FPRA 利用其 光谱透过性对目标场景每个像素进行差异化光谱 调制,从而实现像素级空间-光谱调制^[66]。然而如 此微小的 FPRA 制造难度较大。



图 10 微阵列型光谱成像架构: (a) 左上为紧凑型超光谱成像仪, 左中为陷波滤波器阵列光谱成像仪, 左下为基于 FPRA 阵列的光谱成像仪; (b) 像素级 FPRA 阵列光谱成像仪

Fig. 10 Architecture of microarray spectral imaging. (a) Top left is the MUSI, middle left is the notch filter array spectral imager, bottom left is FPRA-based spectral imager; (b) pixel-level FPRA-based spectral imager

4.5 散射介质光谱成像

散射在光学成像中通常被视为一种阻碍成像 质量提升的负面因素,然而在计算成像中却作为 一种有效的信息调制工具。散射介质常用来制造 弥散的 PSF 分布,以实现二维空间信息复用,从 而通过阵列探测器实现并行化信息调制与采样。 由于每个探测像素采样中包含全部目标场景信 息,可以大大降低采样数量。在此基础上,借助不 同深度信息的 PSF 差异性可以实现 3-D 空间数 据调制,同理,借助散射介质对光谱的敏感性,利 用不同谱段的 PSF 差异性可实现空间-光谱信息 调制。如图 11(彩图见期刊电子版)所示,通过在 入射光瞳处安装光谱的敏感的光学扩散器或散射 介质,实现不同光谱的 PSF 差异化分布,从而在 成像探测器处提供扩散及色散的 (Diffused and Dispersed, DD) 目标图像, 完成快照式光谱图像数 据采集^[67-70]。也可采用衍射滤波器阵列 (DFA) 代 替散射介质实现相同的调制过程, 并带来更高的 通光效率^[71-72]。这种光谱成像型式的优势在于系 统组成简单、结构紧凑, 信息调制更充分, 散射介

质对光谱的敏感性也使其具备更高的光谱分辨能 力。但介质散射也通常意味着低可控性,需要依 赖高精度标定来获得系统传输矩阵,且对误差十 分敏感,轻微系统结构变化就会导致散射介质模 型快速失效,从而不得不进行新的测量与建模。 这种低鲁棒性给实际工程应用带来麻烦。



图 11 散射介质光谱成像架构



4.6 各系统型式总结

在对各类系统架构及其多个变种型式分别介 绍后,在该小节将对上述所有系统进行梳理、归 纳,并对每个系统型式所对应的空间-光谱数据立 方体的调制方式以及相应物理实现器件做出明确 说明,如表1所示。

	表1 各系统型式特征总结
Tab. 1	Summary of the characteristics of each system type

系统型式类别	系统名称	调制方式	物理器件	对应图表
单像素光谱成像	基于光谱仪的单像素光谱成像仪[6-11]	空间调制,光谱分离	DMD, 色散元件	图2(a)
	空间-光谱调制单像素光谱成像仪[12]	空间调制,光谱调制	DMD, 衍射光栅, 正弦调制转轮	图2(b)
	光谱分离单像素光谱成像仪[13-14]	光谱分离,空间调制	光谱分离器, SLM	图2(c)
	空间-光谱调制光谱成像仪[15]	空间调制,光谱调制	SLM+色散棱镜+DMD+柱状透镜	图2(d)
编码孔径光谱成像 (基本型式)	SD-CASSI [16-18]	空间调制,光谱剪切	光刻掩模板+色散棱镜	图3(a)
	DD-CASSI ^[19]	光谱剪切,空间调制,光谱逆剪切	色散棱镜+光刻掩模板+色散棱镜	图3(b)
编码孔径光谱成像 (CCA型式)	C-CASSI [23-30]	空间-光谱调制,光谱剪切	光谱滤波阵列+色散棱镜	图4(a)
	CSPSI [31-34]	光谱剪切,空间-光谱调制	色散棱镜+光谱滤波阵列	图4(b)
	DM-based CSPSI [36]	空间复用,空间-光谱调制	DM+光谱滤波阵列	图4(c)
编码孔径光谱成像 (光谱分割型式)	LCTF光谱分割型[37-38]	光谱分离,空间调制	LCTF+DMD	图5左上
	LeSTI ^[39]		LED+DMD	图5左下
编码孔径光谱成像 (编码可调整型式)	CAASI ^[40-44]	空间调制(时变),光谱剪切	DMD(时变)/压电陶瓷,色散棱镜	/
	CSPSI ^[45]	光谱剪切(时变), 空间-光谱调制	色散棱镜(旋转),光谱滤波阵列	图6
编码孔径光谱成像 (多帧互补采集型式)	Dual-camera CASSI [46,47]	通道1:空间调制,光谱剪切 通道2:空间-光谱调制(彩色相机)	分束镜,光刻掩膜板,色散棱镜	图7(a)
	$0^{\mbox{\tiny th}}$ and $1^{\mbox{\tiny st}}$ order diffraction CASSI $^{[48:50]}$	通道1(1*衍射光): 空间调制, 光谱 剪切; 通道2 (0 th 衍射光): 无调制 (全色相机)	DMD, 衍射光栅	图7(b)
编码孔径光谱成像 (多帧阵列采集型式)	图像倍增CASSI ^[52]	空间复制,空间调制,光谱剪切	图像倍增器,光刻掩模板, 色散棱镜	图8(a)
	透镜阵列CASSI ^[53]	空间复制,光谱剪切,空间调制, 光谱逆剪切	透镜阵列,色散棱镜,光刻掩模板, 色散棱镜	图8(b)
空间-光谱双重编码 光谱成像	DCSI [55-57]	空间调制+光谱调制	DMD+衍射光栅+LCoS	图9(a)
	SSCSI [58-61]	空间光谱混合调制	衍射光栅+光刻掩模板	图9(b)
微阵列型光谱成像	MUSI ^[62-64]	光谱调制(时间延展)	LCC	图10(a)左上
	陷波滤波器阵列光谱成像仪[65]	空间复制,光谱调制	陷波滤波器阵列,透镜阵列	图10(a)左中
	FPRA阵列光谱成像仪 ^[66]	空间复制,光谱调制	FPRA,透镜阵列	图10(a)左下
	像素级FPRA阵列光谱成像仪 ^[66]	空间-光谱调制(像素级)	FPRA	图10(b)
散射介质光谱成像	散射介质光谱成像仪[67-72]	空间-光谱复用调制	散射介质/DFA	图11

5 共性问题讨论

在充分了解各型压缩光谱成像系统架构基础 之上,本节对其系统架构背后的信息编码调制问 题展开几点讨论,以挖掘掩藏在内部的设计思想, 为新型系统设计提供指导。

5.1 信息复用度

压缩光谱成像系统涉及两个空间维度、一个 光谱维度的信息采集,在将三维数据立方体投影 到二维阵列探测器时,必然要经历降维过程。针 对这个问题,一种方式是引入额外维度,如沿空间 或时间维度展开;另一种方式就是将调制后的信 息混叠采样。后者带来的低数据采集量是压缩成像 的技术优势所在。信息复用也由此带来两个关 注点:

(1)采样效率。信息复用程度越高,即每个 采样结果中包含了更多维度的信息,则使系统具 备更高的采样效率,这也意味着能够以更低的采 样率获得可观的图像质量,反之亦然。但信息复 用度并不是越高越好,还要与系统应用目标相匹 配,在非复用维度内的信息采集通常是相对充分 且完整的,这也就保证了该维度信息的重构质量, 即使以降低整体采样效率为代价。举例来说, DD-CASSI系统中只复用了光谱信息,空间信息 保留相对完整,因此相较于 SD 版本,其更适合高 空间分辨率、低光谱分辨率的应用场合。

(2)可分块重构性。源特性虽然不在本文论 述范围,但需要强调的是:压缩成像领域的图像获 取实时性一直受重构算法计算复杂度瓶颈影响, 未得到有效解决,尤其对于大规模信息重构时愈 发严重。除借助 GPU等并行化计算处理器件外, 直接对采样模型进行分块化处理,以降低矩阵运 算规模是更有效的方式。而且低尺度的分块模型 也使稀疏冗余字典学习变得可用,对提高重构质 量有利。然而信息复用度越高,对应模型中测量 矩阵的稠密度越高,则模型拆分就越困难。这也 是采用高信息复用度方案来提升采样效率的同 时,引入的负面影响。

5.2 调制自由度

各型压缩光谱成像系统架构对应理论模型中 不同测试矩阵型式,调制自由度体现为测量矩阵 中元素的取值范围以及矩阵结构化型式。例如, 对于 DD-CASSI 系统来说,编码孔径对相邻谱段 的空间编码只平移一个位移单位,这形成了谱段 间编码差异性的强约束;而对于 DSCI 系统来说, 第一编码孔径对不同谱段执行一致的空间编码, 另一编码孔径又在光谱域内实现光谱编码,二者 组合可以形成更灵活的调制,因此相比于前者来 说,可以获得更优异的性能。更高自由度将使系 统具备更大的编码优化潜力,以感知矩阵互相关 性为理论指导的测量矩阵优化能够收获更好的效 果。但高自由度预示着低结构化矩阵型式,这给 图像重构算法执行中带来了巨大的数据存储及计 算代价。对于高维度数据压缩采样来说,采用维 度可分离调制型式,并借助 Kronecker 模型简化 重构算法是一种有效路径^[73-74]。

5.3 系统校准

相比于传统成像系统来说, 压缩成像系统通 常会额外引入用于信息调制的光学器件, 而实际 光学调制过程与数学模型的匹配度决定了重构算 法的执行效果。为准确获取系统前向采样模型, 系统校准难度及方法都是系统设计时需预先考虑 的问题。在一个压缩成像系统中, 都至少存在着 编码器件与探测器像素采样的空间对准要求。在 涉及空间信息复用的 PSF 调制中, 严格的 PSF 标 定也是保证采样模型精度的关键。而对于采用分 束镜等器件来实现信息空间复制时, 各子图像的 信息一致性需要严格校准, 不仅包含几何空间对 准, 还存在视角、光透过率等差异性的补偿。

5.4 技术指标权衡

与传统光谱成像系统中空间、光谱、时间分 辨率和灵敏度指标的矛盾类似,压缩光谱成像系 统虽然相较于传统系统极大地解放了这些指标间 的相互制约,但就其在计算成像领域内,相对而 言,仍然需要在各指标间做出权衡。例如,采用空 间复制方式实现并行化调制采集,虽然保证了图 像重构质量又不牺牲时间分辨率,但却降低了通 光效率,且极大地增加了系统硬件代价。而采用 分时多帧采集方式时,又使其因时间分辨率下降 对动态场景变得不再适用。

因此,即使在压缩感知理论下,设计出的各项 指标均令人满意的完美系统仍然是不可行的。系 统设计应面向实际应用,依据性能指标优先级,并 考虑系统构建成本、难度来综合衡量。系统设计 没有最好,只有更适用。

6 结论与展望

从最早提出的 CASSI 系统算起, 压缩光谱成 像已历经十几载, 虽然得益于光学器件的发展, 各 种新型系统不断涌现, 但客观来说, 现阶段仍然处 于发展机遇期, 还有众多技术难点亟待突破。目 前多数研究仍处于原理验证阶段, 无论从系统性 能指标方面, 还是应用稳定性与兼容性方面, 距离 商用化落地还有相当的提升空间。如光谱图像分 辨率、质量仍然不能令人满意, 器件成本过高, 系 统复杂度高, 校准难度大, 鲁棒性不够理想, 大规 模图像重构的算法实时性等问题仍面临巨大挑 战。但作为涉及光学、数学、计算机、信号处理等 多学科交叉融合的技术领域, 技术手段和理论工 具的选择空间足够广阔。同时, 各种微纳光学器 件的加入,以及以深度学习为代表的数据驱动算法,都为其注入了强大动力。更可喜的是,众多国内外优秀学者正投身其中并不懈努力,笔者相信这会加速挖掘该技术领域潜藏的巨大能量。

在提升性能与实用性的同时, 压缩光谱成像 也正向更高维度拓展, 快照式压缩光谱成像已经 实现视频率光谱图像信息采集。若将时间维度信 息加入到系统调制与压缩进程, 将带来空间-光 谱-时间的 4-D 数据采集能力, 从而获得更高的时 间分辨率。在此基础上发展起来的压缩超快光谱 成像技术 (Compressed Ultrafast Spectral-Temporal, CUST) 已经实现万亿帧率, 这对瞬态物理过程或 医疗领域应用具有重要意义^[75-77]。甚至引入深度 等信息的 5-D 数据采集也已开始被研究。此外, 以应用为导向, 通过与特定应用需求整合, 并革新 传统"采样-重构-识别"为直接采样识别, 规避复 杂重构算法, 也将是压缩光谱成像技术发展的重 要路径之一。

参考文献:

- [1] 于磊. 成像光谱仪的发展与应用(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20210940.
 YU L. Development and application of imaging spectrometer (*Invited*)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210940. (in Chinese)
- [2] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [3] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [4] CANDES E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [5] YUAN X, BRADY D J, KATSAGGELOS A K. Snapshot compressive imaging: theory, algorithms, and applications[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2021, 38(2): 65-88.
- [6] SUN T, KELLY K. Compressive sensing hyperspectral imager[C]. *Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging*, Optica Publishing Group, 2009: CTuA5.
- [7] LI CH B, SUN T, KELLY K F, *et al.*. A compressive sensing and unmixing scheme for hyperspectral data processing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(3): 1200-1210.
- [8] MAGALHAES F, ARAÚJO F M, CORREIA M, *et al.*. High-resolution hyperspectral single-pixel imaging system based on compressive sensing [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 071406.
- [9] CHENNING T, HUANZHENG Z, XUCHENG W, et al.. Compressive single-pixel hyperspectral imaging using RGB sensors [J]. Optics Express, 2021, 29(7): 11207-11220.
- [10] KRAVETS V, KONDRASHOV P, STERN A. Compressive ultraspectral imaging using multiscale structured illumination[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(22): F32-F39.
- [11] GARCIA H, CORREA C V, ARGUELLO H. Optimized sensing matrix for single pixel multi-resolution compressive spectral imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 4243-4253.
- [12] BIAN L H, SUO J L, SITU G H, et al.. Multispectral imaging using a single bucket detector [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24752.
- [13] STARLING D J, STORER I, HOWLAND G A. Compressive sensing spectroscopy with a single pixel camera[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(19): 5198-5202.

- [14] LI Z W, SUO J L, HU X M, et al.. Efficient single-pixel multispectral imaging via non-mechanical spatio-spectral modulation[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41435.
- [15] MARTÍN G, BIOUCAS-DIAS J M. Spatial-spectral hyperspectral image compressive sensing [C]. Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2017: 3988-3991.
- [16] WAGADARIKAR A, JOHN R, WILLETT R, et al.. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): B44-B51.
- [17] CAO X, YUE T, LIN X, et al.. Computational snapshot multispectral cameras: toward dynamic capture of the spectral world[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(5): 95-108.
- [18] HE J J, WU J M, LU ZH, *et al.* . Compressive hyperspectral imaging for snapshot multi-channel fluorescence microscopy [C]. *Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging*, Optica Publishing Group, 2018: CW2E. 5.
- [19] GEHM M E, JOHN R, BRADY D J, et al.. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J]. Optics Express, 2007, 15(21): 14013-14027.
- [20] ZHAO ZH X, MENG Z Y, JU ZH Y, *et al.* . A compact dual-dispersion architecture for snapshot compressive spectral imaging [C]. *Proceedings of 2021 Asia Communications and Photonics Conference*, IEEE, 2021: 1-3.
- [21] RUEDA C H F, CALDERÓN G A R, FUENTES H A. Spectral selectivity in compressive spectral imaging based on grayscale coded apertures [C]. *Proceedings of Symposium of Signals, Images and Artificial Vision*, IEEE, 2013: 1-5.
- [22] DIAZ N, RUEDA H, ARGUELLO H. High-dynamic range compressive spectral imaging by adaptive filtering[C]. Proceedings of the 2015 3rd International Workshop on Compressed Sensing Theory and its Applications to Radar, Sonar and Remote Sensing, IEEE, 2015: 89-93.
- [23] RUEDA H, ARGUELLO H, ARCE G R. Experimental demonstration of a colored coded aperture-based compressive spectral imaging system[C]. *Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging*, Optica Publishing Group, 2014: CTu2C. 6.
- [24] ARGUELLO H, ARCE G R. Colored coded aperture design by concentration of measure in compressive spectral imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(4): 1896-1908.
- [25] RUEDA H, ARGUELLO H, ARCE G R. Compressive spectral imaging based on colored coded apertures [C]. Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE, 2014: 7799-7803.
- [26] RUEDA H, ARGUELLO H, ARCE G R. DMD-based implementation of patterned optical filter arrays for compressive spectral imaging [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 32(1): 80-89.
- [27] RUEDA H, ARGUELLO H, ARCE G R. Colored coded aperture compressive spectral imaging: design and experimentation [C]. *Proceedings of 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*, IEEE, 2015: 601-604.
- [28] RUEDA H, ARGUELLO H, ARCE G R. Compressive spectral testbed imaging system based on thin-film colorpatterned filter arrays[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(33): 9584-9593.
- [29] GALVIS L, MOJICA E, ARGUELLO H, *et al.*. Shifting colored coded aperture design for spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(7): B28-B38.
- [30] PARADA-MAYORGA A, ARCE G R. Spectral super-resolution in colored coded aperture spectral imaging[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2016, 2(4): 440-455.
- [31] RUEDA H, LAU D, ARCE G R. RGB detectors on compressive snapshot multi-spectral imagers[C]. *Proceedings of 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*, IEEE, 2015: 388-392.
- [32] CORREA C V, ARGUELLO H, ARCE G R. Compressive spectral imaging with colored-patterned detectors [C]. *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE, 2014: 7789-7793.
- [33] CORREA C V, ARGUELLO H, ARCE G R. Snapshot colored compressive spectral imager[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(10): 1754-1763.
- [34] MEJÍA-MELGAREJO Y H, VILLARREAL-DULCEY O P, ARGUELLO-FUENTES H. Adjustable spatial resolution of compressive spectral images sensed by multispectral filter array-based sensors[J]. *Revista Facultad de Ingeniería*, 2016(78): 89-98.
- [35] MARQUEZ M, MEZA P, ARGUELLO H, et al.. Compressive spectral imaging via deformable mirror and colored-

mosaic detector [J]. Optics Express, 2019, 27(13): 17795-17808.

- [36] MONAKHOVA K, YANNY K, WALLER L. Snapshot hyperspectral imaging using a random phase mask and spectral filter array[C]. *Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging*, Optica Publishing Group, 2020: JF2F. 4.
- [37] WANG X, ZHANG Y H, MA X, *et al.*. Compressive spectral imaging system based on liquid crystal tunable filter[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25226-25243.
- [38] XU C, XU T F, YAN G, *et al.*. Super-resolution compressive spectral imaging via two-tone adaptive coding[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 395-411.
- [39] MA X, YUAN X, FU CH, *et al.*. LED-based compressive spectral-temporal imaging [J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10698-10715.
- [40] ARCE G R, BRADY D J, CARIN L, *et al.*. Compressive coded aperture spectral imaging: an introduction[J]. *IEEE* Signal Processing Magazine, 2014, 31(1): 105-115.
- [41] KITTLE D, CHOI K, WAGADARIKAR A, et al.. Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[J]. Applied Optics, 2010, 49(36): 6824-6833.
- [42] ARGUELLO H, ARCE G R. Code aperture optimization for spectrally agile compressive imaging [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(11): 2400-2413.
- [43] KITTLE D S, MARKS D L, BRADY D J. Design and fabrication of an ultraviolet-visible coded aperture snapshot spectral imager[J]. Optical Engineering, 2012, 51(7): 071403.
- [44] WU Y H, MIRZA I O, ARCE G R, *et al.*. Development of a digital-micromirror-device-based multishot snapshot spectral imaging system [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2692-2694.
- [45] CORREA C V, HINOJOSA C A A, ARCE G R, *et al.*. Multiple snapshot colored compressive spectral imager[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(4): 041309.
- [46] WANG L ZH, XIONG ZH W, GAO H H, *et al.*. Dual-camera design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 848-858.
- [47] WANG L ZH, XIONG ZH W, SHI G M, et al. . Compressive hyperspectral imaging with complementary RGB measurements[C]. Proceedings of 2016 Visual Communications and Image Processing, IEEE, 2016: 1-4.
- [48] ŽÍDEK K, DENK O, HLUBUČEK J, *et al.*. Compact and robust hyperspectral camera based on compressed sensing [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2016, 10151: 101510N.
- [49] HLUBUČEK J, LUKEŠ J, VÁCLAVÍK J, et al.. Enhancement of CASSI by a zero-order image employing a single detector[J]. Applied Optics, 2021, 60(5): 1463-1469.
- [50] SAITA Y, SHIMOYAMA D, TAKAHASHI R, *et al.*. Single-shot compressive hyperspectral imaging with dispersed and undispersed light using a generally available grating [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5): 1106-1111.
- [51] HLUBUČEK J, LUKEŠ J, VÁCLAVÍK J, *et al.*. Differential coded aperture single-snapshot spectral imaging [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2342-2345.
- [52] JEON D S, CHOI I, KIM M H. Multisampling compressive video spectroscopy[J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(2): 467-477.
- [53] BLANCO G, PEREZ J, MONSALVE J, *et al.*. Single snapshot system for compressive covariance matrix estimation for hyperspectral imaging via lenslet array [C]. *Proceedings of the 2021 XXIII Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision*, IEEE, 2021: 1-5.
- [54] MARQUEZ M, MONSALVE J, RUEDA H, *et al.* . Compressive spectral virtual multishot imager via lenslet array[C]. *Proceedings of Optics and Photonics for Sensing the Environment*, Optica Publishing Group, 2021: JW2A. 14.
- [55] AUGUST Y, VACHMAN C, RIVENSON Y, *et al.* . Compressive hyperspectral imaging by random separable projections in both the spatial and the spectral domains [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): D46-D54.
- [56] STERN A, YITZHAK A, FARBER V, et al. . Hyperspectral compressive imaging [C]. Proceedings of the 2013 12th Workshop on Information Optics, IEEE, 2013: 1-3.
- [57] LIN X, WETZSTEIN G, LIU Y B, et al.. Dual-coded compressive hyperspectral imaging [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2044-2047.
- [58] LIN X, LIU Y B, WU J M, *et al.*. Spatial-spectral encoded compressive hyperspectral imaging [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(6): 233.
- [59] WANG P, LI J, QI CH, et al.. Input aperture restriction of the spatial spectral compressive spectral imager and a

comprehensive solution for it[J]. Optics Express, 2021, 29(12): 17875-17889.

- [60] SALAZAR E, PARADA A, ARCE G R. Spatial super-resolution reconstruction via SSCSI compressive spectral imagers[C]. *Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging*, Optica Publishing Group, 2018: CTu5D. 5.
- [61] SALAZAR E, PARADA-MAYORGA A, ARCE G R. Spectral zooming and resolution limits of spatial spectral compressive spectral imagers[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2019, 5(2): 165-179.
- [62] STERN A, AUGUST I Y, OIKNINE Y. Compressive gigavoxel spectral imaging[C]. *Proceedings of Computational Optical Sensing and Imaging*, Optica Publishing Group, 2016: CW5D. 1.
- [63] OIKNINE Y, AUGUST I, STERN A. Along-track scanning using a liquid crystal compressive hyperspectral imager[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8446-8457.
- [64] AUGUST I, OIKNINE Y, ABULEIL M, *et al.*. Miniature compressive ultra-spectral imaging system utilizing a single liquid crystal phase retarder[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23524.
- [65] ZHANG M Q, WANG L ZH, ZHANG L, *et al.*. High light efficiency snapshot spectral imaging via spatial multiplexing and spectral mixing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19837-19850.
- [66] OIKNINE Y, AUGUST I, STERN A. Multi-aperture snapshot compressive hyperspectral camera[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5042-5045.
- [67] GOLUB M A, AVERBUCH A, NATHAN M, *et al.*. Compressed sensing snapshot spectral imaging by a regular digital camera with an added optical diffuser[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): 432-443.
- [68] HAUSER J, GOLUB M A, AVERBUCH A, et al.. Dual-camera snapshot spectral imaging with a pupil-domain optical diffuser and compressed sensing algorithms [J]. Applied Optics, 2020, 59(4): 1058-1070.
- [69] HAUSER J, AVERBUCH A, NATHAN M, *et al.*. Design of binary-phase diffusers for a compressed sensing snapshot spectral imaging system with two cameras [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(26): 7853-7864.
- [70] SAHOO S K, TANG D L, DANG C. Single-shot multispectral imaging with a monochromatic camera [J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1209-1213.
- [71] WANG P, MENON R. Ultra-high-sensitivity color imaging via a transparent diffractive-filter array and computational optics [J]. *Optica*, 2015, 2(11): 933-939.
- [72] WANG P, MENON R. Computational multispectral video imaging [Invited][J]. Journal of the Optical Society of America A, 2018, 35(1): 189-199.
- [73] DUARTE M F, BARANIUK R G. Kronecker compressive sensing [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(2): 494-504.
- [74] CAIAFA C F, CICHOCKI A. Multidimensional compressed sensing and their applications [J]. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 2013, 3(6): 355-380.
- [75] LU Y, WONG T T W, CHEN F, et al.. Compressed ultrafast spectral-temporal photography[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(19): 193904.
- [76] YANG CH SH, CAO F Y, QI D L, *et al.*. Hyperspectrally compressed ultrafast photography[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(2): 023902.
- [77] PARK J, FENG X H, LIANG R G, *et al.*. Snapshot multidimensional photography through active optical mapping[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5602.

作者简介:



李云辉 (1989—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,助理研究员,2012 年与 2014 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2019 年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事新体制智能计算成像技术、空间光学遥感成像系统及空间目标稳像跟踪控制技术领域研究。E-mail: liyunhui@ciomp.ac.cn