光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.022

均匀分布狭缝阵列编码光谱成像系统的仿真与验证

徐 艳[1,2,3]，李春来[1,4]，刘世界[2,4]，唐国良[1,2]，谢佳楠[1]，王建宇[1,2,3,4]*

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 上海科技大学 信息科学与技术学院，上海 201210；
4. 国科大杭州高等研究院，杭州，310024）

摘 要： 为解决传统色散型高光谱成像仪扫描速度慢和编码孔径光谱成像系统存在部分信息失真或丢失、光谱重构复杂度高等问题，设计了一种基于均匀分布狭缝阵列的光谱成像系统，在编码孔径光谱成像系统的基础上，采用微位移电机控制阵列编码狭缝对成像视场进行微扫描，以实现光谱不混叠成像，在满足一定成像帧频的条件下实现动态场景的无损探测。仿真结果表明：在光谱图像重构质量与单狭缝系统结果一致的前提下，该系统的采集效率提升了 17 倍；空间结构相似度和光谱保真度分别是 50％压缩采样率编码孔径光谱成像系统的 1.8 倍和 1.17 倍，在完成仿真的基础上，搭建实验装置进行了可行性验证。

关键词： 光谱成像；编码孔径；计算光谱；压缩感知；快照

中图分类号： TP751 **文章编号：** 1001－5868(2021)04－0562－06

Simulation and Verification of Uniformly Distributed-slit Array Coded Spectral Imaging System

XU Yan[1,2,3], LI Chunlai[1,4], LIU Shijie[2,4], TANG Guoliang[1,2], XIE Jianan[1], WANG Jianyu[1,2,3,4]

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, CHN; 4. Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, CHN)

Abstract: In order to solve the problems of slow scanning speed of traditional dispersive hyperspectral imagers and the problems of information loss, signal distortion, and high reconstruction complexity in the coded aperture spectral imaging system, in this paper, a slit spectral imaging system based on a uniformly distributed array is designed. On the basis of the coded aperture spectral imaging system, a displacement motor is used to control the slit array code plate to perform field-of-view spectrum non-aliasing micro-scanning to realize the non-destructive detection of dynamic scenes. The simulation results show that the collection efficiency of this method is 17 times that of the single-slit system, and the system's spectral data reconstruction result is consistent with that of the single-slit system. The spatial structure similarity is 1.8 times and the spectral fidelity is 1.17 times of that of the 50% sampling rate coded aperture system. Finally, the system was verified by experiments.

Key words: spectral imaging; coded aperture; computational spectrum; compressive sensing; snapshot

收稿日期：2021－04－23.

基金项目：装备发展部装备项目(GFZX04014308)；中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y202058).

* **通信作者：**王建宇

0　引言

光谱成像技术是近年来遥感领域的一种新技术，被广泛应用于农业、矿产勘查、航空航天等领域[1-2]。传统的单狭缝推扫式光谱成像（Push-broom Hyperspectral Imager，PHI）[3]为线视场推扫式成像，对静态目标单次采集一维空间信息和光谱信息，时间分辨率较低。当目标场景为动态时，存在无法反映目标运动属性的缺陷。编码孔径光谱成像技术（Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging，CASSI）[4-6]是新型的快照式成像光谱技术之一。编码孔径位于光学系统一次焦面，以面视场成像体制单帧或多帧采集目标的空间光谱混叠信息，然后通过重建实现目标图谱获取，具备对动态目标视频成像的能力[7-9]。编码孔径采用压缩感知原理采集空间光谱混叠信息，通过算法恢复光谱数据立方体，但是高压缩区域信号失真严重，不利于光谱信息重构和光谱特征的分析。

本文设计了一种均匀分布狭缝阵列编码光谱成像（Uniformly Distributed-slit Array Coded Spectral Imaging，UDACSI）系统，相邻狭缝间距满足探测光谱信号不混叠的条件，使用微位移电机控制狭缝阵列编码板进行微扫描，实现全采样的光谱成像，是一种具备视频级能力的光谱呈现系统。将 UDACSI 系统与 PHI 系统、CASSI 系统进行对比仿真分析，使用结构相似性度量（Structural Similarity Index Measure，SSIM）[10]进行空间重构评价，通过修正光谱角匹配（Modified Spectral Angle Mapper，MSAM）[11]进行光谱保真度对比。UDACSI 系统延续了 CASSI 系统快照的优势，弥补了光谱信息失真的问题，降低了光谱重构算法复杂度。

1　理论分析

PHI 系统数据采集方式为线视场，获取目标三维光谱数据立方体，需耗费大量的采集时间以及数据存储空间。CASSI 系统基于压缩感知理论对稀疏信号进行压缩采样[9]，具有比 PHI 系统更高的采集效率，编码模式取决于设计的编码板。

UDACSI 系统光路图如图 1 所示，f_1 为望远物镜的焦距，f_2 为准直透镜的焦距，色散元件位于准直透镜和成像透镜之间，f_3 为成像透镜与探测器的距离，系统狭缝和探测器像元大小相匹配 1∶1。平行光射入望远物镜一次焦面的编码模板，通过准直棱镜、色散元件，到达成像透镜焦面的探测器上。

根据光谱成像系统的光学原理[6]，得到探测器的光谱密度计算公式：

$$F_1(x,y;\lambda)=F_0(x+\alpha(\lambda-\lambda_c),y;\lambda)T(x+\alpha(\lambda-\lambda_c),y)+\omega_e \tag{1}$$

式中，$F_0(x,y,\lambda)$为目标在望远物镜焦面（PHI 单狭缝位置、CASSI 和 UDACSI 编码板位置）的光谱密度，$T(x,y)$为编码模板或者单狭缝，α 为色散率，ω_e 为光学系统引入的噪声。

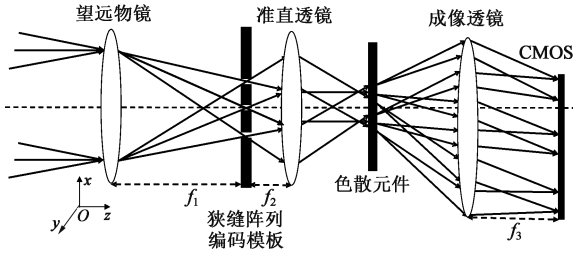
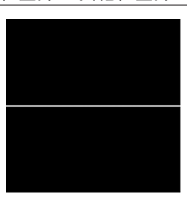
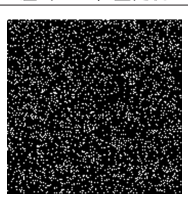
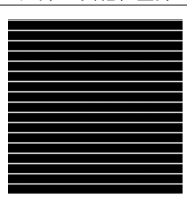


图 1　均匀狭缝光谱成像系统光路

2　数值仿真结果与分析

目标反射或者辐射的光信号到光谱成像系统的探测器，目标通常是面源，仿真过程分割为许多特性均匀的小面元，光谱成像系统的数据采集方式取决于式(1)中的 $T(x,y)$。三种系统对应的 $T(x,y)$ 如表 1 所示，其中 1 表示信号可以通过，0 表示信号不能通过。

表 1　三种系统对应的 $T(x,y)$

系统	PHI	CASSI	UDACSI
	只在 x 方向中间视场狭缝位置为 1，其他位置为 0	二维随机编码模板对应的 1，0 位置随机	只在狭缝阵列所在 x 处为 1，其他位置为 0
$T(x,y)$			

仿真原始数据来源于全谱段多模态成像光谱仪的可见光波段，光谱数据立方体为 512×512×30，

空间维 512×512、光谱维 30 元。

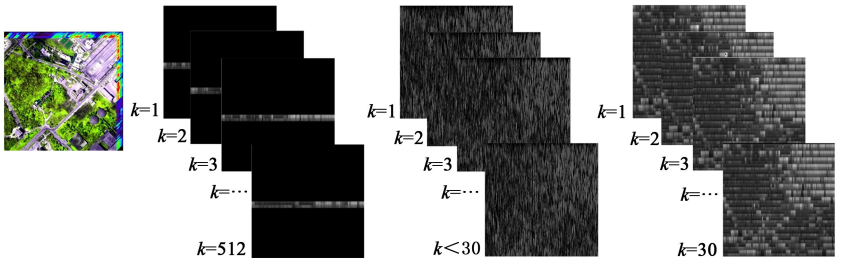
仿真中单个狭缝色散范围覆盖探测器 30 个像元。PHI 系统单狭缝宽度为探测器像元宽度(13 μm),狭缝长度 512 μm×13 μm;CASSI 系统编码孔径尺寸为 13 μm×13 μm,与探测器像元大小 1∶1;UDACSI 系统均匀狭缝阵列的间距为 30 μm×13 μm,狭缝宽度为 13 μm,共 17 条狭缝。本文对以上三种系统光学传递过程分别进行仿真,重构光谱数据立方体,对光谱重构结果进行对比。

2.1 三种光谱成像系统仿真

PHI 系统对目标场景逐行扫描,如图 2(b)所示,仿真过程中采集一次数据大小为 1×512×30,对原始光谱数据进行全采样扫描需 512 次。

CASSI 系统对目标场景进行采样,如图 2(c)所示,单帧在探测器得到 512×512×1 的空间光谱混叠信息。CASSI 系统在低采样条件下进行光谱数据的恢复过程属于非全采样,采样次数少于 30 次。

UDACSI 系统对目标场景进行采样,如图 2(d)所示,系统单次采样为 512×512×1 的不混叠光谱数据信息,通过微位移电机控制狭缝阵列有效位移 30 次,进行全采样,比单狭缝推扫次数降低一个数量级。



(a) 原始光谱数据立方体 512×512×30 (b) 单狭缝逐行扫描 (c) 二维随机编码孔径 (d) 狭缝阵列微扫描

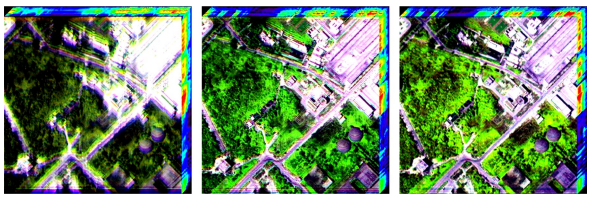
图 2 原始光谱数据与仿真过程

对于目标 $M\times N\times L$ 的光谱数据立方体,假设单帧采样数据为 $M_1\times N_1\times L_1$,则单帧采样率 η 的计算公式如下:

$$\eta=\frac{M_1\times N_1\times L_1}{M\times N\times L} \tag{2}$$

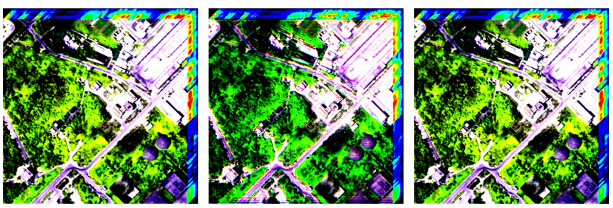
2.2 光谱数据恢复

仿真中 PHI 系统、CASSI 系统、UDACSI 系统的光谱数据立方体的重构方法为:PHI 系统的采用数据拼接方法恢复;CASSI 系统采用迭代加权最小二乘法(Iteratively Reweighted Least Square, IRLS)[12]来进行重构;UDACSI 系统采用数据拼接方法。图 3(a),(b),(c)依次为 CASSI 系统仿真 20%,50%和 80%采样率下的重构结果。图 4(a),(b),(c)依次为 PHI 系统、50%采样率 CASSI 系统、UDACSI 系统数据恢复结果。



(a) 20%采样率 (b) 50%采样率 (c) 80%采样率

图 3 CASSI 系统仿真的不同采样率重构光谱数据立方体



(a) PHI 系统 (b) 50%采样率 CASSI 系统 (c) UDACSI 系统

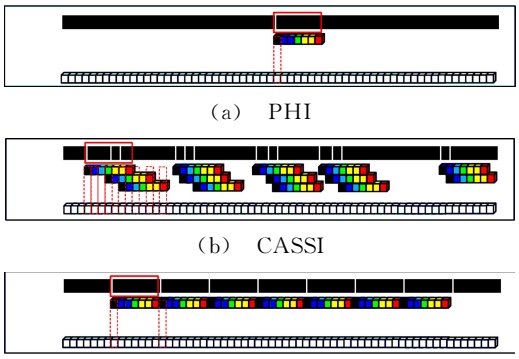
图 4 三种系统仿真的重构光谱数据立方体

2.3 能量和灵敏度的差异分析

光谱成像系统的灵敏度体现在信噪比上[13]。通过对 PHI 系统、CASSI 系统和 UDACSI 系统色散维数据进行分析,三种系统在可见光波段的数据流如图 5 所示。

图 5(a)为 PHI 系统数据流,在色散方向只有一元空间的光谱数据到达探测器,在狭缝位置的色散范围覆盖探测器像元接收对应波长的能量。图 5(b)为 CASSI 系统数据流,探测器像元接收到的信号取决于该像元的光谱混叠程度。CASSI 系统像元接收到 N 个透光孔径的色散信号能量,信号能量增加 N 倍,噪声增加 $\sqrt{N}$ 倍,该像元信噪比为不混叠情况下的 $\sqrt{N}$ 倍。二维随机编码的透光孔径位置具有随机性,导致 CASSI 系统不同像元的信噪比具有随机性。图 5(c)为 UDACSI 系统数据流,狭缝间距满足光谱色散不混叠,在一个狭缝色散范围内的

像元不会接收到相邻狭缝色散的光谱信号，信噪比与 PHI 系统相近。



(a)　PHI

(b)　CASSI

(c)　UDACSI

图 5　PHI 系统、CASSI 系统和 UDACSI 系统光谱信号探测数据流

2.4　光谱数据恢复结果评价

空间信息的重构结果可以通过结构相似性度量 SSIM 评价，SSIM 取值范围在[0，1]之间，越接近 1 表示图像失真越小，SSIM 计算公式如式(3)：

$$SSIM(x,y)=[l(x,y)]^{\alpha}[c(x,y)]^{\beta}[s(x,y)]^{\gamma} \tag{3}$$

式(3)中，通常取 $\alpha=1,\beta=1,\gamma=1$，$l(x,y)$ 是亮度，$c(x,y)$ 是对比度，$s(x,y)$ 是结构三个方面的比较，SSIM 简化后如式(4)：

$$SSIM(x,y)=\frac{(2\mu_x\mu_y+c_1)(\sigma_{xy}+c_2)}{(\mu_x^2+\mu_y^2+c_1)(\sigma_x^2+\sigma_y^2+c_2)} \tag{4}$$

其中 μ_x，μ_y 分别为 x，y 的均值，σ_x，σ_y 分别为 x，y 的标准差，σ_{xy} 为 x 和 y 的协方差，c_1，c_2 为常数。

通过对 PHI 系统、CASSI 系统、UDACSI 系统光谱数据立方体重构，单个光谱通道图像与原始光谱数据立方体对应光谱通道图像的 SSIM 比较，结果如图 6 所示。PHI 系统的 SSIM 平均值为 1，CASSI 系统在 20%，50%和 80%采样率的 SSIM 平均值分别为 0.34，0.55 和 0.766，UDACSI 系统 SSIM 平均值为 1。结果表明：UDACSI 系统在空间相似度上与 PHI 系统的 SSIM 评价曲线基本重合，CASSI 系统在结构相似性度上比 PHI 系统和 UDACSI 系统差。

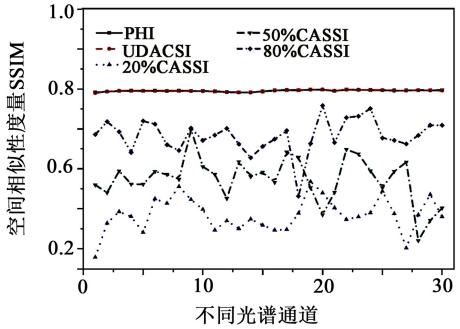


图 6　PHI 系统、CASSI 系统、UDACSI 系统重构不同光谱通道 SSIM

采用光谱相似函数(Spectral Similarity Function，SCF)衡量光谱重构曲线与原始光谱曲线的相似程度。将两条光谱曲线视为两个向量，两者之间的夹角作为评价两条光谱曲线的相似度，称为光谱角度匹配(Spectral Angle Mapper，SAM)，SAM 计算公式如式(5)：

$$SAM=\cos\theta=\frac{X_0X_i}{\|X_0\|\|X_i\|}=\frac{\sum_k^n x_0(k)x_i(k)}{\left(\sum_{k=1}^n x_0^2(k)\sum_{k=1}^n x_i^2(k)\right)^{1/2}} \tag{5}$$

当 SAM 值越接近于 1，表示两条光谱曲线相似度越高，光谱保真度越高。本文采用的 MSAM 比 SAM 匹配精确度更高，MSAM 计算公式如式(6)：

$$MSAM=1-\arccos\theta=1-\frac{2}{\pi}\arccos\left(\frac{\sum_k^n x_0(k)x_i(k)}{\left(\sum_{k=1}^n x_0^2(k)\sum_{k=1}^n x_i^2(k)\right)^{1/2}}\right) \tag{6}$$

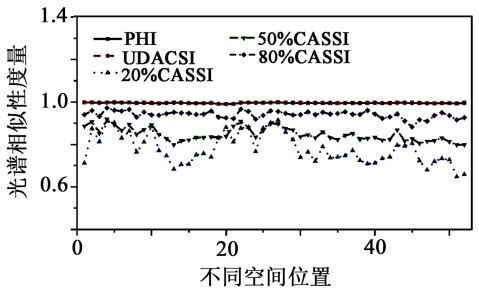


图 7　PHI 系统、CASSI 系统、UDACSI 系统重构不同位置 MSAM

对 PHI 系统、CASSI 系统、UDACSI 系统重构光谱数据立方体，与原始光谱数据的 MSAM 比较，结果如图 7 所示。仿真实验选取非色散维中间视场的光谱数据，从上向下等间隔取 52 个位置分析光谱保真度。PHI 系统 MSAM 平均值为 1，CASSI 系统在 20%，50% 和 80%采样率下 MSAM 平均值分别为 0.78，0.85 和 0.94，UDACSI 系统 MSAM 平均值为 1。结果表明：PHI 系统和 UDACSI 系统的光谱重构 MSAM 评价曲线基本一致，在光谱恢复

精度的重构上，CASSI 系统明显比 PHI 系统和 UDACSI 系统差。

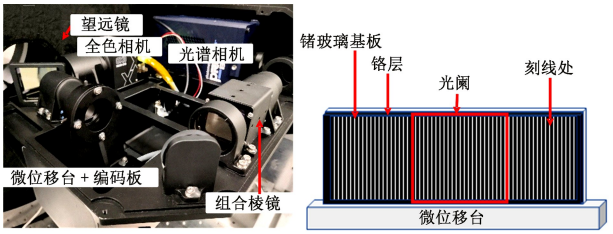
三种系统仿真对比如表 2，对比可知：PHI 系统单帧采样率低，采集次数高，全采样需要大量时间成本；CASSI 系统不需要全采样，具备视频成像能力，相对于 PHI 系统具有更高的成像速度，但光谱重构复杂，光谱失真；在 SSIM 和 MSAM 与 PHI 系统一致的条件下，UDACSI 系统的单帧采样率是 PHI 系统的 17 倍，在光谱不失真的条件下，其采样速度为 50%采样率 CASSI 系统的一半。

表 2 三种系统仿真对比

系统	PHI	CASSI	UDACSI
成像体制	线视场推扫成像	面视场视频成像	面视场视频成像
单帧采样	1×512×30	512×512×1	512×512×1
单帧采样效率 η	0.195%	3.3%	3.3%
采样次数	512	＜30	30
传感器单帧获取信息	空间 1 维＋光谱 1 维（不混叠）	空间 2 维＋光谱 1 维（混叠）	空间 2 维＋光谱 1 维（周期分布，不混叠）
重构算法	数据拼接	IRLS 算法等	数据拼接
SSIM	1	0.55(50%采样)	1
MSAM	1	0.85(50%采样)	1
系统灵敏度实现	狭缝限制能量，灵敏度受限	图谱混叠，能量提升，灵敏度较高	狭缝限制能量，灵敏度受限
工程实现难度	原理简单，技术成熟	二维随机编码孔径制作难度大，重构算法实时性有困难	狭缝阵列制作相对简单，无须复杂重构算法

3 实验验证

为了验证 UDACSI 系统数值仿真结果的可行性，搭建如图 8(a)所示的实验系统。实验装置基于仿真计算的光学原理，系统视场内有 15 条狭缝。UDACSI 系统光谱通道采用加拿大 Teledyne Photometrics 公司的 Prime BSI Scientific CMOS 探测器。图 8(b)为均匀狭缝阵列编码板示意图，均匀狭缝阵列编码板是用激光在锗玻璃上镀一层不透光的金属铬层薄膜，狭缝宽度为 13 μm。

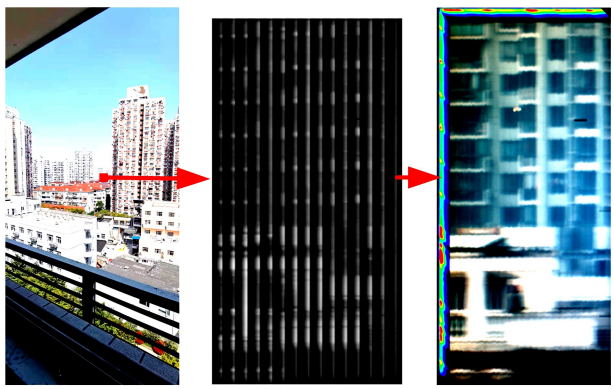


(a) 实验装置示意图 (b) 均匀狭缝阵列编码板示意图

图 8 UDACSI 系统及均匀狭缝阵列编码板示意图

采用单色仪(iHR320)对 UDACSI 系统进行光谱分辨率测试，结果表明在 440～900 nm 波段的平均光谱分辨率为 19 nm。

利用 UDACSI 系统样机对外成像试验进行光谱数据重构，获得的光谱数据立方体影像如图 9。图 9(a)是在对外成像试验场地手机对外拍摄的场景，红色小框对应建筑为 UDACSI 系统成像的目标，成像距离约为 5 km。图 9(b)为 UDACSI 系统样机单帧采样的探测器数据。图 9(c)为光谱重构数据立方体影像图。结果表明：UDACSI 系统具有在可见和近红外波段恢复目标光谱信息的能力。



(a) 手机拍摄图像 (b) 单帧采样 (c) 重构影像

图 9 UDACSI 系统光谱相单帧成像和全采样光谱数据重构结果

4 结论

通过采样效率和光谱保真度，对比了 PHI 系统、CASSI 系统和 UDACSI 系统的优缺点，分析了单狭缝、二维随机编码孔径和均匀狭缝阵列对光谱成像系统数据流的影响。仿真结果表明：在采样效率上，UDACSI 系统的光谱数据重构不失真，单帧采样效率为 PHI 系统的 17 倍，且 UDACSI 系统与 PHI 系统的信噪比基本一致。在光谱数据恢复的空间结构相似度和光谱相似性上，UDACSI 系统优于 50%采样的 CASSI 系统，但是成像速度较后者降低了 50%。UDACSI 系统是一种介于 PHI 系

统、CASSI系统之间的、具备目标图谱完全恢复能力的新型视频光谱成像方法。搭建的装置试验表明：UDACSI系统在可见和近红外波段具备对远距离遥感目标视频光谱成像探测的能力，在后续的UDACSI系统优化和研制上提供了重要参考。

参考文献：

[1] Simone P, Stefano P, Raffaele C, et al. Special Issue: Hyperspectral remote sensing of agriculture and vegetation [J]. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3665.

[2] 付严宇，杨　桄，关世豪. 航空航天高光谱成像仪研究现状及发展趋势[J]. 红外，2020，41(8)：1-8，14.
Fu Yanyu, Yang Guang, Guan Shihao. Research status and development trend of hyperspectral imagers onboard airborne and spaceborne platforms[J]. Infrared, 2020, 41(8): 1-8, 14.

[3] Sellar Glenn R, Boreman Glenn D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications [J]. Optical Engineering, 2005, 44(1): 13602.

[4] Tao C, Zhu H, Sun P, et al. Hyperspectral image recovery based on fusion of coded aperture snapshot spectral imaging and RGB images by guided filtering [J]. Optics Communications, 2020, 458: 124804.

[5] David K, Kerkil C, Ashwin W, et al. Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[J]. Applied Optics, 2010, 49(36): 6824-6833.

[6] Wa A, PN P, S Xiaobai, et al. Video rate spectral imaging using a coded aperture snapshot spectral imager[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6368-6388.

[7] 刘世界，张旭东，张　月，等. 多帧图像编码孔径光谱成像技术[J]. 红外与毫米波学报，2017，36(6)：799-804.
Liu Shijie, Zhang Xudong, Zhang Yue, et al. Multi-frame image coded aperture snapshot spectral image technology[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(6): 799-804.

[8] Liu Shijie, Li Chunlai, Xu Rui, et al. Method for evaluating spectral similarity based on first-order gradient information [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(3): 776-781.

[9] Jeon D S, Baek S, Yi S, et al. Compact snapshot hyperspectral imaging with diffracted rotation [J]. ACM Trans. on Graphics (tog), 2019, 38(4).

[10] Zhao Z, Bai L, Han J, et al. High-SNR snapshot multiplex spectrometer with sub-hadamard-s matrix coding[J]. Optics Communications, 2019, 453.

[11] Zhou Wang, Alan Conrad Bovik, Hamid Rahim Sheikh. Image qualifty assessment: From error visibility to structural similarity[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2004, 13(4).

[12] 刘世界，李春来，徐　睿，等. 基于一阶梯度信息的光谱相似度评价方法[J]. 光谱学与光谱分析，2021，41(3)：776-781.
Liu Shijie, Li Chunlai, Xu Rui, et al. Method for evaluating spectral similarity based on first-order gradient information[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(3): 776-781.

[13] Liu Shijie, Zhang Xudong, Zhang Yue, et al. Multi-frame image coded aperture snapshot spectral image technology[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(6): 799-804.

作者简介：

徐　艳(1993－)，女，安徽阜阳人，硕士研究生，主要研究领域为快照式光谱成像技术；

王建宇(1959－)，男，博士，研究员，博士生导师，主要研究方向为空间红外光电系统、空间激光探测系统、量子通信卫星系统等。

(上接第561页)

[14] 宋建华. 具有温度补偿的APD数控偏压电路[J]. 光学与光电技术，2013，11(2)：12-15.
Song J H. APD numerical control bias circuit with temperature compensation[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(2): 12-15.

[15] 王　东，张　凡，黄光明，等. 基于FPGA的光电倍增管APD偏压控制电路设计[J]. 核电子学与探测技术，2008，28(6)：1219-1222.
Wang D, Zhang F, Huang G M, et al. Design of bias control circuit for photomultiplier APD based on FPGA[J]. Nuclear Electronics & Detection Technol., 2008, 28(6): 1219-1222.

[16] 高　远，李　松. 温度控制与温度补偿双模式的APD驱动电路设计[J]. 半导体光电，2019，40(6)：869-873.
Gao Y, Li S. APD drive circuit design for temperature control and temperature compensation dual mode[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 869-873.

[17] 李　旭，彭　欢，王春辉. 星载激光测距仪APD最佳雪崩增益控制技术研究[J]. 红外与激光工程，2016，45(5)：77-82.
Li X, Peng H, Wang C H. APD optimal gain control investigation for space borne laser range find[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 77-82.

作者简介：

向雨琰(1994－)，男，博士研究生，主要从事光电探测方面的研究；

李　松(1965－)，女，博士，教授，博士生导师，主要从事卫星激光遥感技术与设备方面的研究。