

压缩感知光谱成像技术的编码孔径与探测器匹配优化

刘铭鑫^{1,2}, 张新^{1*}, 王灵杰¹, 史广维¹, 吴洪波¹, 付强¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,
中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 编码孔径光谱成像仪在实际应用中存在着编码模板与探测器分辨率不匹配从而降低系统分辨率的问题。针对该问题进行了两种情况分析,并通过数学理论建模给出了相应的解决方案。对于编码模板分辨率高于探测器分辨率这一情况,提出引入邻域嵌入超分辨技术的方法,实现了基于压缩感知的超分辨光谱成像。对于编码模板分辨率低于探测器分辨率这一情况,提出区块阈值划分的编码孔径,将编码微元按照区块阈值重新划分并进行灰度分级,从而实现低分辨率编码模板的高分辨率编码孔径。利用梯度投影稀疏重构(GPSR)算法进行数据立方体重建,实验结果表明:运用基于超分辨理论的编码孔径快照光谱成像系统所测得的光谱图像更精准,内容更丰富;采用基于区块阈值划分的编码孔径的编码孔径快照光谱成像系统具有更高的空间分辨率和光谱分辨率。结果证实优化后的编码孔径快照光谱成像系统,其分辨率和成像质量大幅度提升,并实现了高分辨率元件的100%利用。

关键词: 光谱成像; 压缩感知; 编码孔径; 优化设计

中图分类号: V248.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20201302.0290

Optimization of matching coded aperture with detector based on compressed sensing spectral imaging technology

LIU Ming-xin^{1,2}, ZHANG Xin^{1*}, WANG Ling-jie¹, SHI Guang-wei¹, WU Hong-bo¹, FU Qiang¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

Abstract: In practical applications, when the coding template of coded aperture spectral imagers does not match the resolution of their detector, the resolution of the system is lowered. For this problem, by using a mathematical model for the Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging system (CASSI), its limiting factors such as a mismatch between its coding template and the detector's resolution are analyzed and the correspond-

收稿日期: 2019-04-28; **修订日期:** 2019-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61505201); 吉林省科技发展计划青年科研基金(No. 20160520175JH)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61505201) and Youth scientific research fund of Jilin province science and technology development plan (No. 20160520175JH)

ing solutions are given. Considering that the resolution of the coding template is higher than the resolution of the detector, it is proposed that super-resolution technology is introduced to the CASSI system to achieve super-resolution spectral imaging through compressed sensing. For cases in which the resolution of the coding template is lower than the resolution of the detector, a grayscale coding aperture with threshold partitioning grading is proposed to achieve a high-resolution coding mode, which can ensure the resolution of the coded aperture spectral imager. The GPSR algorithm is used to reconstruct the data cube. Experimental results show that the spectral image measured by the CASSI system based on super-resolution theory is more accurate and richer in content. The CASSI system based on a coded aperture with grayscale grading is employed and shown to have higher spatial resolution and spectral resolution. It can be concluded that after optimization, the resolution and imaging quality of the CASSI system are greatly improved and its high resolution components are fully utilized.

Key words: computational spectral imaging; compressed sensing; coded aperture; optimized design

1 引言

光谱成像技术将成像技术与光谱技术相结合,能够同时获得目标场景的空间信息和光谱信息。因此,光谱成像技术在各个领域都有着广泛的应用。随着科学的发展,技术的进步,各领域对光谱成像技术的指标要求越来越高,高空间、高光谱分辨率、高光学利用率、高信噪比以及高效率的存储和传输等要求为光谱成像技术提出了新的挑战^[1-3]。

随着计算成像技术的发展,光谱成像技术进入了高速发展阶段。自20世纪70年代,计算光谱成像技术提出以来,国内外的相关研究成果不断涌现,目前该技术已进入应用阶段。2006年,杜克大学的Brady等人运用二维编码模板结合计算机仿真提出了压缩感知光谱成像技术^[4]。2016年,Johann等人模拟和研究了多路复用中波红外成像仪图像计算光谱成像技术^[5]。2018年,Michael等人提出一种新的光谱成像方法,通过在普通的数码相机上安装一个色散扩散器和一个基于压缩传感器的数字处理算法,将普通的数码相机转换为快照光谱成像仪,实现了快照光谱成像仪的小型化、轻量化设计^[6]。

压缩光谱成像(Compressive Spectral Imaging, CSI)是通过二维编码模板来探测目标场景信息,其所用的采样数量远小于扫描型光谱成像仪使用

的采样数。在各种光谱成像技术中,编码孔径快照光谱成像仪(CASSI)技术通过数字微反射器(DMD)作为编码模板,实现了压缩光谱成像。在一般的光谱成像技术中,系统极限分辨率是由探测器的分辨率决定的。但在CASSI中,若想获得理想的系统分辨率,DMD的分辨率必须和探测器的分辨率相同,DMD的微元与探测器像素一一对应,即两者共同决定系统分辨率。这种由于探测器像元与DMD的微反射镜尺寸不相同而导致的不匹配将会对光谱图像重建产生影响,同时也是对较高分辨率元件的浪费,会明显降低重建光谱图像的空间分辨率和光谱分辨率。

本文将对探测器与编码模板分辨率不匹配的CASSI系统进行数学建模。提出当探测器的分辨率低于编码模板分辨率时,利用低分辨率探测器实现超分辨光谱成像;当编码模板分辨率低于探测器分辨率时,运用区块阈值划分的编码孔径实现不匹配校正。通过计算机仿真模拟和实验分析得出以下结论:采用本文方法得到的光谱图像质量有显著提高。

2 编码孔径与探测器分辨率的匹配优化

2.1 编码孔径与探测器分辨率不匹配问题

CASSI可实现凝视快照成像,其核心是压缩感知理论。编码孔径光谱成像技术以色散型光谱成像技术为原型,利用编码模板替换狭缝,当目标

场景光线到达编码模板后,编码模板对目标的空间或光谱信息进行调制,到达色散元件后发生色散,最后被探测器接收的是一幅包含目标场景经过编码调制后的空间及光谱信息的二维混叠图像。通过压缩感知复原算法可以将混叠的二维图像复原成数据立方体。编码模板经过多次更新,目前的主流元件为 DMD^[1]。DMD 短时间内可实现多次编码,可以使 CASSI 的快照成像质量有极大提升。但在实际应用时,大多数 DMD 的微元尺寸或分辨率与探测器的像元尺寸或分辨率是不同的,即产生编码孔径与探测器不匹配的问题。这导致了在 CASSI 中,无法完成 DMD 微元与探测器像素点对点的成像。传统的解决方法就是将高分辨率元件的像素以方阵的形式组合,将组合的方阵视为一个像素,使得探测器和编码模板分辨率相匹配^[2]。传统解决方法的系统分辨率取决于分辨率较低的元件,是一种低利用率方法。

探测器与编码模板的分辨率间的关系可能存在 3 种情况:(1) 编码模板分辨率等于探测器分辨率,要编码模板与探测器可以点对点成像;(2) 编码模板分辨率大于探测器分辨率。若要解决这个问题,可以将成像过程分成两步,第一步将高分辨率图像成像在低分辨率的探测器上,第二步为在低分辨率的像面处获得高分辨率的图像。其主要思想类似于邻域嵌入超分辨算法。本次研究中,利用超分辨原理将得到的混叠二维图像看成是超分辨系统的高分辨率原始图像,利用超分辨技术从低分辨率的探测器上获得高分辨率的混叠二维图像,再通过压缩感知复原算法对光谱图像进行重建;(3) 编码模板分辨率小于探测器分辨率。此时,将编码模板的编码模式由二进制编码模式转换成区块阈值编码模式。此方法间接将低分辨率的编码模板转变成具有高分辨率的阈值区块编码,可以充分利用探测器的分辨率。

2.2 分辨率不匹配系统数学模型推导

CASSI 的光学结构主要由编码孔径、色散元件和焦平面阵列(FPA)探测器组成,如图 1(彩图见期刊电子版)所示。

该系统的特点为能进行快照式拍摄获取数据立方体,从而在探测器上获得混叠的二维光谱图

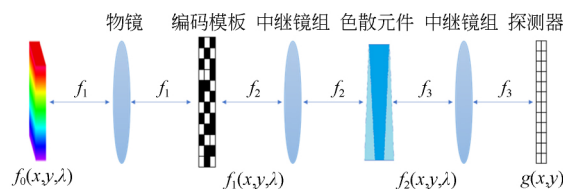


图 1 编码孔径快照光谱成像系统的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of coded aperture snapshot spectral imaging system

像。假设目标场景的光谱密度可表示为 $f(x, y, \lambda)$, 其中 x, y 表示目标的空间位置, λ 表示目标的光谱位置。当目标经过前置系统及编码模板后, 其光谱密度函数的分布为: $f_1(x, y, \lambda)$ 。设编码模板的传递函数为 $T(x, y)$, 可以从图 1 中看到编码模板由黑色和白色方块组成, 其中白色代表透光(DMD 处于“开”状态), 黑色代表不透光(DMD 处于“关”状态), 即黑白的二进制编码模式(0 代表不透光, 1 代表透过)。随后经过色散元件进行色散, 脉冲响应函数为:

$$q(x, y, \lambda) = h(x' - S(\lambda) - x, y' - y), \quad (1)$$

其中 $S(\lambda) = \alpha(\lambda)(\lambda - \lambda_c)$ 为色散元件引入的沿 x 轴的光谱分离量, 因此, 经色散后探测器前的光谱图像为:

$$f_2(x, y, \lambda) = \iint T(x', y') f_0(x', y', \lambda) h(x' - S(\lambda) - x, y' - y) dx' dy'. \quad (2)$$

由于探测器得到的是光强分布, 故对波长进行积分, 可得到探测器接收的混叠图像分布:

$$I(x, y) = \int_{\lambda} f_2(x, y, \lambda) d\lambda. \quad (3)$$

在进行 t 次快照拍摄时, 每次拍摄时编码模板都要改变, 因此使用不同的编码孔径 $T^t(x, y)$ 在 FPA 处获得的能量可以表示为:

$$I^t(x, y) = \int_{\lambda} T^t(x - S(\lambda), y) f_0(x - S(\lambda), y, \lambda) d\lambda, \quad (4)$$

其中 $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$, N 为快照拍摄次数。将探测器离散化, 可以得到:

$$I_{mn}^t = \iint p(m, n; x, y) I^t(x, y) dx dy, \quad (5)$$

其中 $p(m, n; x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_d} - m, \frac{y}{\Delta_d} - n\right)$, 代表探

测器的离散像素点。 $\Delta_d = D_2/A_2$ 为探测器像元间距,其中 D_2 为探测器面阵面积, A_2 为探测器像元数。将式(5)代入式(6)可得:

$$I'_{mn} = \iiint \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_d} - m, \frac{y}{\Delta_d} - n\right) T^t(x - S(\lambda), y) f(x - S(\lambda), y, \lambda) dx dy d\lambda. \quad (6)$$

设编码孔径的透射率函数如下:

$$T^t(x, y) = \sum_{m', n'} t'_{m', n'} \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta_c} - m', \frac{y}{\Delta_c} - n'\right), \quad (7)$$

其中 $\Delta_c = D_1/A_1$ 为编码孔径的微元间距, D_1 为编码模板面积, A_1 为编码模板微元数, $t'_{m', n'}$ 为离散化的编码模板函数。

一般的 CASSI 系统在设计阶段是可以满足 $A_1 = A_2 = A$ 的,即使实际编码模板和探测器的面积不相等,也可以通过设计中继镜组使其具有不同的放大倍数来实现。若 $A_1 = A_2$,此时 $\Delta_c = D_1/A_1 = \Delta_d = D_2/A_2$,那么探测器和编码模板就可以实现点对点一一对应。但当 $A_1 \neq A_2$ 时,则 $\Delta_c = D_1/A_1 \neq \Delta_d = D_2/A_2$,此时出现了探测器和编码模板的不匹配情况。在这种情况下,只能以另一种方式来匹配编码模板和探测器的分辨率。常见的方法是将高分辨率元件以点阵形式重新划分,以 $\Delta = m \times n \cdot D/A$ 作为一个新的像素与低分辨率元件匹配,使得 $\Delta = m \times n \cdot D/A = \Delta_c = D_1/A_1$ 或 $\Delta = m \times n \cdot D/A = \Delta_d = D_2/A_2$ 。这种划分方式降低了系统的分辨率,系统分辨率为 $N = \min(A_1/A_2)$ 。这将明显减小系统的空间及光谱分辨率,并且影响了复原数据立方体的分辨率^[13-14]。

当高分辨率元件的像素划分成点阵式时,即 $N = A_1/p_1 = A_2/p_2$ 时,在第 (m, n) 个探测器像素的强度分布为:

$$I'_{mn} = \sum_{m', n'} t'_{m', n'} \iiint \text{rect}\left(\frac{x - S(\lambda)}{\Delta} - m', \frac{y}{\Delta} - n'\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta} - m, \frac{y}{\Delta} - n\right) \cdot f(x - S(\lambda), y, \lambda) dx dy d\lambda, \quad (8)$$

其中 $\Delta = d/A$ 。当探测器分辨率高于编码模板时,将 3 个探测器像元耦合成一个像素点,即来自一个编码模板像元区域的能量被映射到 3 个探测器像素上,每个新像素点被划分成 3 个区域,分别为 R_0 、 R_1 和 R_2 ,3 个区域分别对应着探测器上的位置 $(m-1, n)$ 、位置 (m, n) 和位置 $(m+1, n)$ 。经过色散后的能量在第 (m, n) 位置的分布权重为:

$$\mu_{mnku} = \left(\iiint dx dy d\lambda \right) \left(\iiint_{R_1 \cup R_2 \cup R_3} dx dy d\lambda \right)^{-1}, \quad (9)$$

其中 m, n 为探测器的空间坐标, k 代表波段, u 代表 R_0 、 R_1 和 R_2 位置。具体划分原理图如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

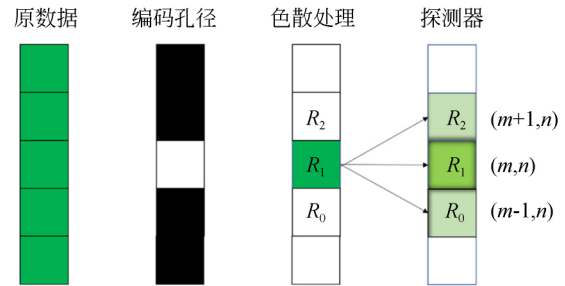


图2 探测器划分原理

Fig. 2 Detector division principle

现将探测器以新的划分方式离散化:

$$I'_{mn} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{u=0}^2 \mu_{mnku} t'_{m(n-k-u)} f_{m(n-k-u)k}(x, y, \lambda), \quad (10)$$

其中 $f_{m(n-k-u)k}(x, y, \lambda)$ 的 m, n 为探测器的空间坐标, k 代表原始目标场景的第 k 个波段, $t'_{m(n-k-u)}$ 由式(7)给出,且 $m, n = 0, 1, \dots, N-1, k = 0, 1, \dots, L-1, u = 0, 1, 2, l = 0, 1, \dots, K-1$ 。式中的 L 为波段数,是由探测器的分辨率决定的。在重新划分探测器像元后,系统的空间分辨率将由探测器和编码模板的分辨率共同决定。

3 分辨率不匹配的解决办法

上文中提到了在 CASSI 系统中,存在着两种分辨率不匹配方式。这两种情况都会导致系统的分辨率变低,使得高分辨率元件利用率大大降低。第一种为编码模板分辨率高于探测器分辨率。针对这种情况,将超分辨技术引入 CASSI 系统中是一个有效的解决办法。本文将被编码模板调制后的光谱图像看成是一种高分辨率图像,通过超分辨技术将其成像在低分辨率的探测器上,并先进行超分辨复原,再进行光谱图像重建。这种方法可以明显降低分辨率不匹配的影响。第二种情况

为编码模板的分辨率低于探测器。针对这种情况,本文设计了一种区块阈值划分的编码孔径,这种设计可以充分利用探测器的分辨率,从而减小像素不匹配的影响。

3.1 基于压缩感知的超分辨光谱成像

当编码模板分辨率高于探测器分辨率时,会发生分辨率不匹配的情况。对此,将超分辨思想加入这种分辨率不匹配的系统中。如果探测器像元间距大于由成像光波长给出的奈奎斯特采样限制的分辨率,那么可以将邻域嵌入超分辨思想引入上节推导的数学模型式(10)中。在高分辨率图像流形和低分辨率图像流形具有相似的局部几何结构的前提下,利用图像的自相关性,对于每个探测器像元,在训练集内找到与其对应的 K 个邻近低频图像块,然后求解^[3]:

$$\begin{aligned} \min \quad & \|y_i^q - \sum_{x_q^p \in N_q} \omega_{qp} y_s^p\|^2 \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{x_q^p \in N_q} \omega_{qp} = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: y_i^q 为测试图像块; y_s^p 为寻找出的近邻样本集合 N_q 中的低频图像块; ω_{qp} 为对应的权重。

在探测器分辨率低于编码模板分辨率的情况下,将编码模板进行微元组合,使得探测器的像元与重新组合的微元组像素一一对应。 x 和 y 方向的探测器的像元数量 P 是由编码模板微元组的微元数量所决定的。因此,当 $N = N_1 = PN_2$ 时,将超分辨模型代入式(11)后,位于探测器 (m, n) 位置的像元前接收光谱密度为:

$$I_{mn}^t = \sum_{q=0}^{P-1} \sum_{r=0}^{P-1} I_{(P-q)(P-r)}^t, \quad (12)$$

其中 I_{ab}^t 是子像素处获得的数据, $a, b = 0, 1, \dots, A_2(P-1)$ 。此时将两个方向色散效应的影响代入式(12)中,可以得到:

$$\begin{aligned} I_{mn}^t = & \sum_{q=0}^{P-1} \sum_{r=0}^{P-1} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{u=0}^2 \mu \omega_{qp} (mP - q) (nP - r) \\ & ku T_{((mP-q-k) - k-u) (nP-r)}^t (F_k)_{((mP-q-k) - k-u) (nP-r)}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $F \in R^{N^2L}$, $T^t \in R^{N^2}$, $I \in R^{N/P(N/P+L/P-1)}$ 。此时编码孔径分辨率低于探测器的分辨率。

式(13)中,已经将超分辨算子放入数学模型中,此时系统分辨率由编码孔径来决定,而不

像传统方法那样由分辨率低的探测器分辨率决定。根据此测量结果可以重建一个高空间分辨率的光谱图像。图3为超分辨光谱成像算法流程。这种方法可以实现编码模板分辨率的100%利用率。

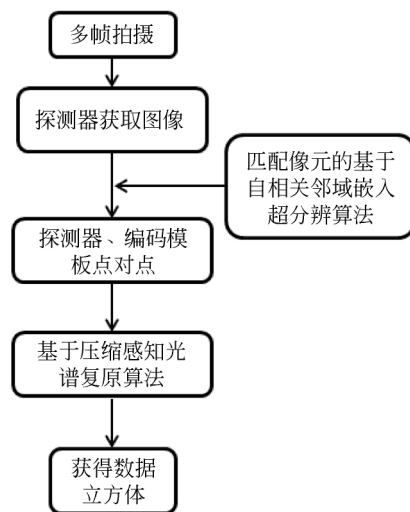


图3 超分辨光谱成像算法流程

Fig. 3 Flow chart of super resolution spectral imaging algorithm

3.2 基于区块阈值划分的编码孔径

当探测器分辨率高于编码模板的分辨率时,无法将超分辨技术引入这个系统中,其原因是编码模板的低分辨率将导致被调制的入射光也具有低分辨率调制信息,即使探测器具有很高的分辨率,也无法利用压缩感知复原算法来恢复出高分辨率的光谱图像。

在这种情况下,可以将区块阈值划分的概念引入编码模板中。由于编码模板的低分辨率,当一个被编码模板微元调制的光到达探测器时,可能对应着多个探测器像元接收。以此为根据,将编码模板按照对应探测器接收像元数进行灰度值划分,这样划分后的编码模板上的一个微元可能对应着多个理论意义上的灰度编码微元,此时只要将灰度编码微元与探测器像元一一对应,就可以充分利用探测器分辨率。根据这种方法,可以通过与探测器像素大小匹配的编码模板获得光谱图像系统。但在这种情况下,实现测量所需的编码孔径函数已经不是以前黑白的二进制编码模式,而是一种具有区块阈值划分的编码模式,需要

按照编码孔径微元映射到每个探测器像元的对应关系进行重新划分。这种划分方式在测量结果中不会显示出来,探测器接收的投影结果依然是通过低分辨率的编码模板调制产生的。但在处理过程中,会先对编码模板进行理论上的区块阈值划分,在数据重建过程中应用这种划分方式来复原数据立方体。

现对其数学模型进行推导。要在编码模板分辨率低于探测器分辨率的系统中实现编码模板与探测器的匹配,需要令区块阈值划分后的编码模板的分辨率与探测器分辨率相同,即 $N = QA_1 = A_2$, 其中 Q 为区块阈值划分数量。那么一个探测器像元所对应的一个编码模板微元所成的像有 Q^2 个像元,则式(8)可以重新定义为:

$$\begin{aligned} i_{mn}^{(1)t} + i_{mn}^{(2)t} + \dots + i_{mn}^{(Q^2)t} &= \sum_{m',n'} t_{m',n'}^t \\ \iiint \text{rect}\left(\frac{x - S(\lambda)}{Q\Delta_c} - m', \frac{y}{Q\Delta_c} - n'\right) & \\ \text{rect}\left(\frac{x}{Q\Delta_c} - m, \frac{y}{Q\Delta_c} - n\right) \cdot & \\ f(x - S(\lambda), y, \lambda) dx dy d\lambda. & \quad (14) \end{aligned}$$

此时,从上述公式中可以看出区块阈值划分编码孔径已经可以实现高分辨率探测了,此时,只需要按照区块阈值划分将式(14)左侧的因子 $i_{mn}^{(s)t}$ ($s = 1, 2, \dots, Q^2$) 进行分解。此时的编码模板透过率函数就与之前不同了,定义具有灰度分级的编码模板函数为 $\hat{t}_{m'n'}$, 此时探测器像元接收光强为:

$$\begin{aligned} i_{mn}^{(i)t} &= \sum_{m',n'} t_{m',n'}^t \iiint \text{rect}\left(\frac{x - S(\lambda)}{\Delta} - m', \frac{y}{\Delta} - n'\right) \\ \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta} - m, \frac{y}{\Delta} - n\right) f(x - S(\lambda), y, \lambda) dx dy d\lambda, & \quad (15) \end{aligned}$$

其中 $\Delta = D/A_2$, i 为探测器上一个像元的位置。重新拆分编码模板微元和定义灰度等级后的编码模板函数 $\hat{t}_{m'n'}$ 可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} \hat{t}_{m',n'} &= \alpha(\beta t_{m',n'} + (1 - \beta) t_{m',n'+1}) + \\ (1 - \alpha)(\beta t_{m'+1,n'} + (1 - \beta) t_{m'+1,n'+1}), & \quad (16) \end{aligned}$$

α 和 β 定义为区块阈值划分编码孔径中,按照灰度划分后编码模板子微元的径向和切向权重。而 $t_{m',n'}$ 则为未进行微元拆分和区块阈值划分的编码模板函数。而 α 和 β 的阈值表达式为:

$$\alpha = \begin{cases} J, J > 0 \\ 1, J = 0 \end{cases}, \beta = \begin{cases} K, K > 0 \\ 1, K = 0 \end{cases}, \quad (17)$$

其中 J 和 K 是根据编码模板微元与探测器像元尺寸的比 $Q = p_2/p_1$ 定义的, J 和 K 可以写成:

$$J = \left\lfloor \frac{n+1}{Q} \right\rfloor Q - n, \quad (18)$$

$$K = \left\lfloor \frac{m+1-k-u}{Q} \right\rfloor Q - (m-k-u). \quad (19)$$

图4为编码模板微元重新划分后与探测器像元的匹配情况。图4表示了在编码模板分辨率较低时,选一个 2×2 的微元阵对编码模板进行微元拆分和区块阈值划分的过程。

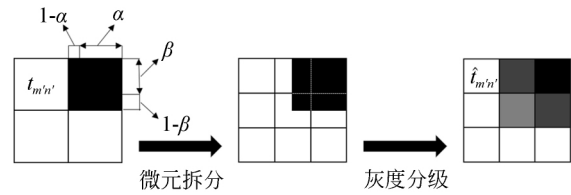


图4 区块阈值划分过程

Fig. 4 Block threshold partitioning

由图4可知,编码模板微元重新划分后的子微元与探测器像元尺寸相匹配,因此,区块阈值划分编码孔径是可以充分利用探测器的高分辨率实现数据立方体的获取和重建的。将区块阈值划分的 CASSI 进行离散化可得:

$$I_{mn}^t = \sum_{k=0}^{(L-1)P'-2} \sum_{u=0}^{P'-2} \mu_{mnku} \hat{T}_{m(n-k-u)}^t (f_k(x, y, \lambda))_{m(n-k-u)}, \quad (20)$$

其中 $m, n = 0, 1, \dots, (N-1)Q, k = 0, 1, \dots, (L-1)Q$ 。由上式可知 Q 决定了系统获取目标的空间和光谱分辨率。

本节通过引入区块阈值划分编码孔径解决了探测器分辨率高于编码模板分辨率的问题,实现了 CASSI 系统的探测器分辨率的 100% 利用率。

3.3 重建算法

假设目标场景的高光谱信号 $F \in R^{N \times N \times L}$, 或它的向量表示 $f \in R^{N \cdot N \cdot L}$ 是在 Ψ 域上 S 稀疏的。那么 $f = \Psi\theta$ 可以通过 Ψ 中的 S 个向量线性组合来近似得到。上一节推导的式(13)和式(20)均可以写成矩阵形式:

$$g = H\Psi\theta = A\theta, \quad (21)$$

其中 H 是观测矩阵,是由编码模板的编码孔径函数及色散元件共同决定的, A 为感知矩阵。这个矩阵可以转化成下面的优化问题:

$$\bar{f} = \Psi\{\arg \min_{\theta} \|g - H\Psi\theta\|_2 + \tau \|\theta\|_1\}, \quad (22)$$

其中 θ 是 f 的 S -稀疏表示, τ 是正则化常数^[14]。 Ψ 域由 $\Psi = \Psi_1 \otimes \Psi_2$ 定义,其中 Ψ_1 为二维小波变换基底, Ψ_2 为一维离散余弦变换。

在这里,使用梯度投影稀疏重构(Gradient Projection for Sparse Reconstruction, GPSR)算法作为数据复原的算法^[17]。GPSR 算法的主要思想为在每次迭代过程中收缩方向都是沿着目标函数的负梯度进行的,从而将目标函数的优化转换为二次线性规划问题。

上文针对两种分辨率不匹配提出的解决方法本质上提高了重建数据集的分辨率,也因此引入了较一般系统更多的待处理数据。因此,重建的计算复杂度与增加的空间和光谱分辨率成比例地增加。计算复杂度由特定的重建算法确定。在这种情况下,GPSR 算法每次迭代的复杂度为 $O(KN^4L)$,其中 K 为快照的次数, N^2 为空间分辨率, L 为光谱通道数。因此,两种不匹配情况的复杂度也不同,应用于超分辨编码孔径的算法复杂度为 $O(KN^4P^4L)$;应用于灰度分级编码孔径的算法复杂度为 $O(KN^4Q^4L)$ 。

4 实验结果

4.1 实验设置

本次实验采用的是单色散型光谱维编码的 CASSI 系统,通过原理样机对具有分辨率不匹配的系统进行多帧拍摄,然后进行实验和分析。实验中,DMD 具体参数如下:分辨率为 1024×768 ,微元尺寸为 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$ 。由于装调原因,反射式光栅无法放置于设计位置,因此色散元件采用的是透射式光栅。探测器的分辨率为 656×492 ,像元尺寸为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 。搭建光路如图 5 所示,表 1 为实验系统参数。

为了提高测量精度,可在同一放大倍率下,对不同直径的圆进行直径测量,并分别计算出每一个像素所代表的长度,然后求平均值,将其作为该放大倍率下的比例尺。

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

元件	参数
DMD:	分辨率: 1024×768
空间光调制器 DLP1100	微元尺寸: $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$
探测器:	分辨率: 656×492
GuppyPro F-032C	像元尺寸: $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$
分光原件	透射式光栅
光谱范围	$450 \sim 680 \text{ nm}$
光谱分辨率	$\leq 20 \text{ nm}@540 \text{ nm}$
系统焦距	75 mm
系统 F	4

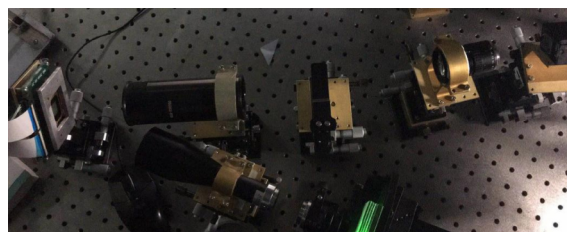


图 5 CASSI 桌面实验系统

Fig. 5 CASSI desktop experiment system

通过 CASSI 桌面样机可以进行 3 组实验。这 3 组实验分别对应于一般的 CASSI,探测器分辨率低于 DMD 分辨率的 CASSI 和探测器分辨率高于 DMD 分辨率的 CASSI 这 3 种情况。采用一般的 CASSI 进行实验时,探测器和编码模板分辨率不同,这将导致无法获得清晰的复原图像,因此需要将编码模板和探测器的像素组合成——对应的像点,即满足关系式 $N = A_1/P_1 = A_2/P_2$ 。在本实验中,一般 CASSI 的参数选择为 $P_1 = 2, P_2 = 3, A_1 = 320, A_2 = 480$ 。此时由于区块分组的原因,探测器接收的图像分辨率仅为 160×160 ,且此时的光谱通道数限制到了 8 个通道。编码模板分辨率高于探测器分辨率(超分辨)情况下,参数为: $P_1 = 1, P_2 = 2, A_1 = 320, A_2 = 160$ 。编码模板分辨率低于探测器分辨率(区块阈值划分)的参数为 $P_1 = 1.5, P_2 = 1, A_1 = 320, A_2 = 480$ 。本次实验选用分辨率为 320×320 开启状态的 DMD 作为编码孔径来完成 3 个实验。最后通过 GPSR 算法对得到的数据进行复原。表 2 为 3 种实验条件下的测量结果对比。

表2 3种实验条件下的测量结果对比

Tab.2 Comparison of measurement results under three experimental conditions

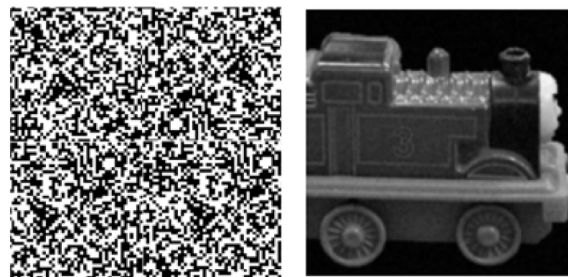
	像素尺寸(μm)		分辨率(像素)		
	Δ_c	Δ_d	编码 孔径	空间 分辨率	光谱 通道
一般 CASSI	27.36	29.7	160×160	160×160	8
超分辨 CASSI	13.68	29.7	320×320	320×320	8
区块阈值划分 CASSI	13.68	9.9	320×320	480×480	24



(a) CASSI 系统恢复图和编码模板
(a) Recovery diagram and coding template of CASSI system



(b) 基于超分辨的 CASSI 系统恢复图和编码模板
(b) Recovery diagram and coding template of CASSI system based on super resolution



(c) 灰度分级的 CASSI 系统恢复图和编码模板
(c) Recovery diagram and coding template of CASSI system based on gray scale

图6 3种情况下测量结果对比图

Fig.6 Comparison of measurement results in three cases

对像面处获得的图像进行重建后选择其中一条光谱带的图像进行对比,如图6所示。从对比图中可以清晰看到,在同样的 DMD 编码孔径分辨率下,一般的 CASSI 系统经过像素重组后编码模板的分辨率下降明显。从测量的复原结果来看,一般的 CASSI 所得到的图像分辨率较低。可以看到采用超分辨技术的 CASSI 和一般的 CASSI 的分辨率是一样的,但由于采用了超分辨技术,前者的测量结果较一般的 CASSI 多了很多细节。而基于区块阈值划分的 CASSI 所得到的测量结果分辨率最高。

4.2 基于压缩感知的超分辨光谱成像的数据立方体重建

采用超分辨原理的 CASSI 系统的编码孔径分辨率为 320×320 。为了模拟低分辨率的探测器,主动将探测器的像元进行分组,每个子像素由 3×3 个探测器像元组成。这样就满足了之前所说的 $N = A_1/P_1 = A_2/P_2$,其中 $P_1 = 1, P_2 = 2, N_1 = 320, N_2 = 160$ 。根据式(13)所给出的离散化探测器接收光强和式(22)所提到的优化问题,运用 GPSR 算法进行数据立方体重建。实验所得到的测量结果和重建结果都和编码模板具有相同的分辨率,并且远高于探测器的分辨率(160×160)。据此,可以证明基于压缩感知的超分辨光谱成像技术使得 CASSI 系统充分利用了编码模板的分辨率。

本次实验的目标场景为玩具小火车。将一般的 CASSI 系统获得的数据立方体与基于压缩感知的超分辨光谱成像技术得到的结果进行对比,如图7(彩图见期刊电子版)所示。这张对比图选择了 450, 470, 485, 550 以及 620 nm 波段的恢复图像,5 个通道的光谱图像进行对比,可以明显的看出运用了超分辨思想的 CASSI 的光谱图像成像质量明显优于一般的 CASSI 系统,且细节较丰富。

为确认测量结果的正确性,现选择原始目标场景的 3 个点,采用一般的 CASSI 系统、超分辨 CASSI 系统和 ASD 公司的 Field Spec Por 3 地物光谱仪采集这 3 个点的光谱特征曲线,并进行对比。图8为原始目标场景和地物光谱仪 Hi-Res NG 在 3 个点处的特征曲线。

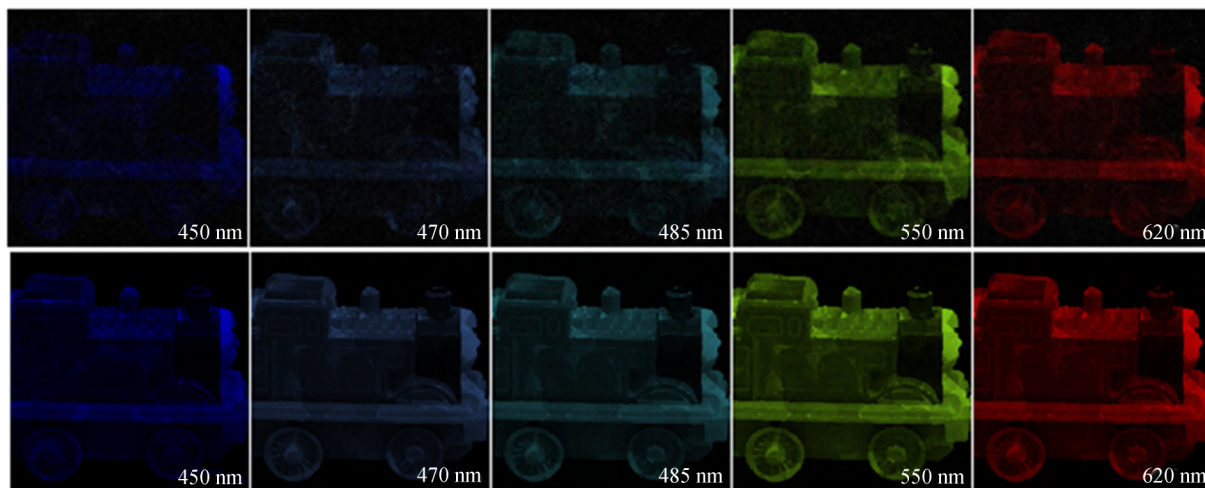


图 7 一般的 CASSI 系统(上)与改进型(下)重建结果对比

Fig. 7 Comparison results of general CASSI system (up) and improved reconstruction (down)

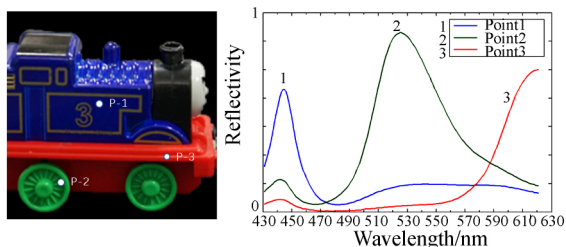


图 8 目标场景和地物光谱仪在 3 个点处的特征曲线

Fig. 8 Characteristic curves of target scene and ground-object spectrometer at three points

图 9 为一般的 CASSI 系统、超分辨 CASSI 系统和 ASD 公司的 FieldSpec Por3 地物光谱仪 Hi-Res NG 在这 3 个点的光谱特征曲线对比图。分别计算与光谱仪特征曲线平均相似度后,一般的 CASSI 系统为 68.47%,超分辨 CASSI 系统为 81.36%,相似度提升了 12.89%。根据实验对比结果,可确定改进的 CASSI 系统的光谱曲线与地物光谱仪的光谱特征曲线更贴合。

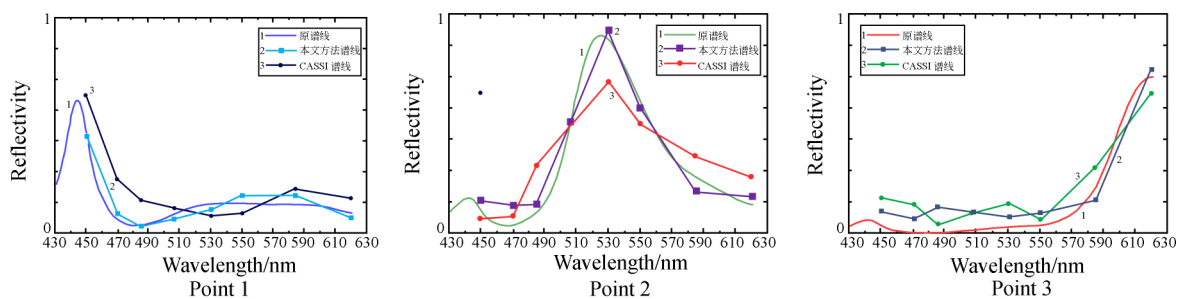


图 9 一般 CASSI 系统、超分辨 CASSI 系统及商用光谱仪的光谱曲线对比

Fig. 9 Comparison of spectral curves of a general CASSI system, a super-resolution CASSI system and a commercial spectrometer

4.3 基于区块阈值划分的 CASSI 数据立方体重建
第三组实验进行的是基于区块阈值划分的 CASSI 系统成像测试。此时 DMD 的分辨率依旧为 320×320 ,为了使编码模板分辨率低于探测器分辨率,在这里探测器分辨率取 480×480 。即实验参数为 $P_1 = 1.5, P_2 = 1, A_1 = 320, A_2 = 480$ 。根据式(20)所建立的模型,将编码模板进行微元拆分和区块阈

值划分处理后,得到与探测器具有相同分辨率的编码孔径,编码模板及其区块阈值划分处理后的示意图如图 10 所示。通过 GPSR 算法进行数据立方体重建,最终的实验测量所得的图像空间分辨率为 480×480 。这说明探测器的分辨率得到了充分利用。在这个实验中,在得到高空间分辨率的同时,还可以得到 24 个光谱通道的光谱图像。

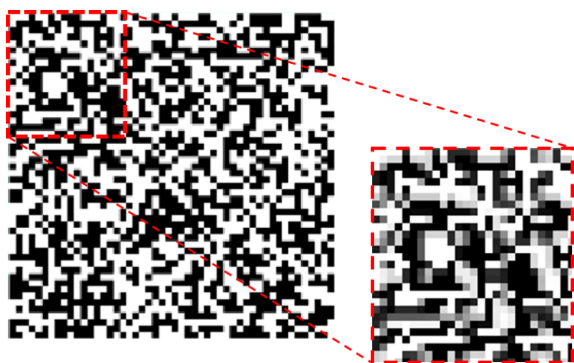


图 10 编码模板及其区块阈值划分处理后的示意图

Fig. 10 Schematic diagram of coding template and its block threshold partitioning

为了明确该方法的复原效果,将一般的 CASSI 系统获得的数据立方体与基于区块阈值划分的

CASSI 系统得到的数据立方体进行对比,如图 11 所示。这张对比图选择了 450,470,485,550 以及 620 nm,5 个通道的光谱图像进行对比,可以明显看出运用了区块阈值划分的 CASSI 的光谱图像成像质量明显优于一般的 CASSI 系统。

现选择原始目标场景的 Point 1 ~ Point 3,将一般的 CASSI 系统、基于区块阈值划分的 CASSI 系统和 ASD 公司的 Field Spec Por 3 地物光谱仪在这 3 个点的光谱曲线进行对比,如图 12 所示。分别计算与光谱仪特征曲线的平均相似度,一般的 CASSI 系统为 68.47%,基于区块阈值划分编码模板的 CASSI 系统为 85.76%,相似度提升了 17.29%。可确定改进的 CASSI 系统的光谱曲线与商用光谱仪的光谱曲线更贴合。

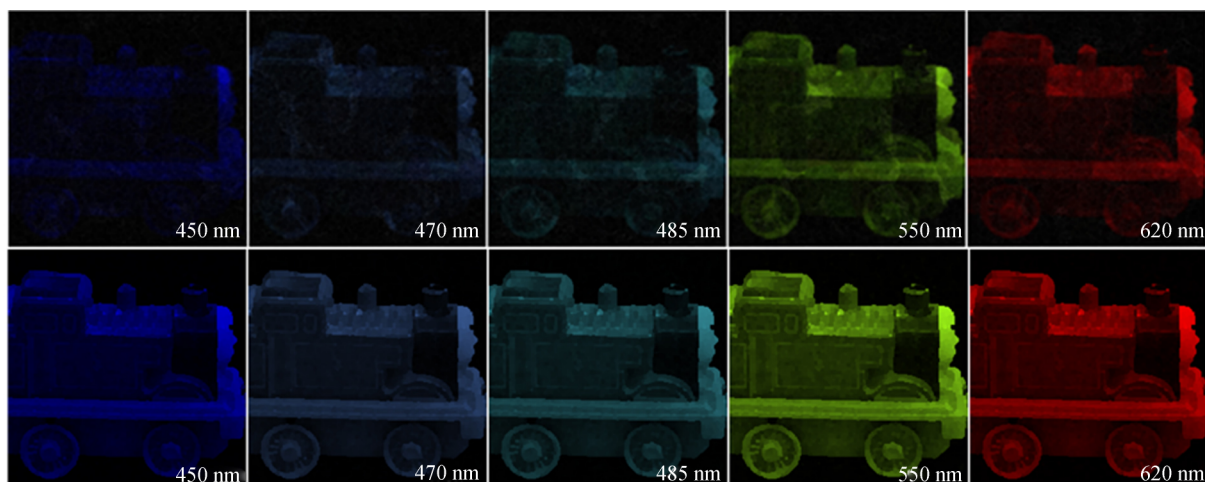


图 11 一般的 CASSI 系统(上)与改进型(下)重建结果对比

Fig. 11 Comparison of reconstruction results of general CASSI system(up) and modified CASSI system(down)

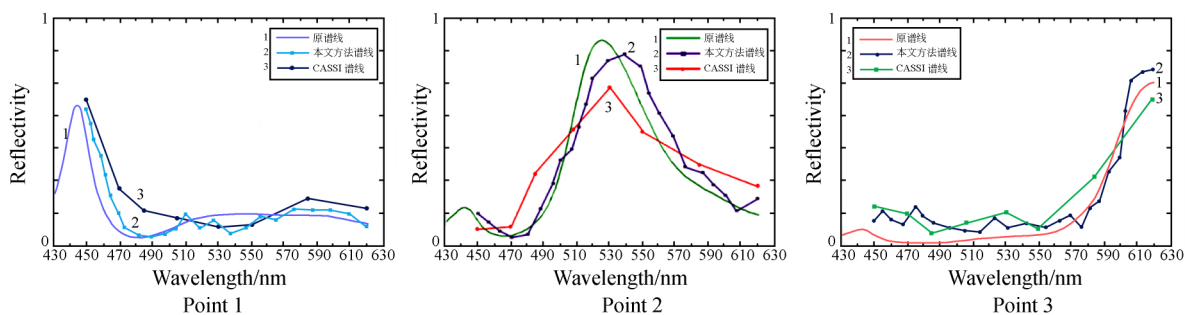


图 12 一般 CASSI 系统、区块阈值划分 CASSI 系统及 ASD 光谱仪的光谱曲线对比

Fig. 12 Comparison of spectral curves of a general CASSI system, a block threshold partitioning CASSI system and ASD spectrometer

5 结 论

本文分析了 CASSI 系统出现的编码模板和探测器分辨率不匹配的成因和结果,针对两种不匹配情况:编码模板分辨率大于探测器分辨率和编码模板分辨率低于探测器分辨率的两种情况,进行了数学模型的推导。运用超分辨理论解决编码模板分辨率大于探测器分辨率的问题,完成超分辨因子与压缩感知理论的嵌套,利用 GPSR 算法进行数据立方体重建,实验结果表明运用基于

超分辨理论的 CASSI 系统所测得的光谱图像更精准,内容更丰富,并且充分利用了编码模板的高分辨率特征。运用区块阈值划分的思想解决编码模板分辨率低于探测器分辨率的问题,将分辨率低的编码模板在理论上重新拆分和区块阈值划分,并进行模型推导,利用 GPSR 算法进行数据立方体重建,实验结果表明,采用基于区块阈值划分的编码孔径的 CASSI 系统具有更高的空间分辨率和光谱分辨率。本文所述解决方法在应用中解决了分辨率不匹配的问题。

参考文献:

- [1] PRIETO-BLANCO X, MONTERO-ORILLE C, COUCE B, *et al.*. Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9156-9168.
- [2] SPERLING B A, HOANG J, KIMES W A, *et al.*. Time-resolved surface infrared spectroscopy during atomic layer deposition [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(9): 1003-1012.
- [3] MONTERO-ORILLE C, PRIETO-BLANCO X, GONZÁLEZ-NÚÑEZ H, *et al.*. Two-wavelength anastigmatic Dyson imaging spectrometers [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2379-2381.
- [4] YOSHIDA Y, OGUMA H, MORINO I, *et al.*. Mountaintop observation of CO₂ absorption spectra using a short wavelength infrared Fourier transform spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(1): 71-79.
- [5] 梅风华, 李超, 张玉鑫. 光谱成像技术在海域目标探测中的应用 [J]. *中国光学*, 2017, 10(6): 708-718.
MEI F H, LI CH, ZHANG Y X. Application of spectral imaging technology in maritime target detection [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 708-718. (in Chinese)
- [6] 闫歌, 许廷发, 马旭, 等. 动态测量的高光谱图像压缩感知 [J]. *中国光学*, 2018, 11(4): 550-559.
YAN G, XU T F, MA X, *et al.*. Hyperspectral image compression sensing based on dynamic measurement [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(4): 550-559. (in Chinese)
- [7] 谭翠媚, 许廷发, 马旭, 等. 图-谱结合的压缩感知高光谱视频图像复原 [J]. *中国光学*, 2018, 11(6): 949-957.
TAN C M, XU T F, MA X, *et al.*. Graph-spectral hyperspectral video restoration based on compressive sensing [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 949-957. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] WAGADARIKAR A, JOHANN, WILLETT R, *et al.*. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): B44-B51.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] WU Y H, CHEN C H, WANG ZH M, *et al.*. Fabrication and characterization of a compressive-sampling multispectral imaging system [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(12): 123201.
- [13] NAYAR S K, BRANZOI V, BOULT T E. Programmable imaging using a digital micromirror array [C]. *Proceedings of 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE*, 2004.
- [14] SCHUSTER N, FRANKS J. Challenges, constraints and results of lens design in 8-12micron waveband for bolometer-FPAs having a pixel pitch 12micron [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8704: 870424.

- [5] CHANG H, YEUNG D Y, XIONG Y. Super-resolution through neighbor embedding [J]. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2004: 275-282.
- [6] ARGUELLO H, CORREA C V, ARCE G R. Fast lapped block reconstructions in compressive spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): D32-D45.
- [7] FIGUEIREDO M A T, NOWAK R D, WRIGHT S J. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(4): 586-597.

作者简介:



刘铭鑫(1991—),男,吉林辽源人,博士研究生,主要从事计算成像及光学设计方向研究。E-mail: 13261531101@163.com



张 新(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计,灵巧光学的光机一体化设计,计算成像方向研究,E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4 开本;刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04; 国内外公开发行,邮发代号: 国内 12-140,国外 BM6782。

- | | |
|-------------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 美国工程索引(Ei) 数据库 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 美国 ESCI 数据库 | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目: 微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型: 学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061

传 真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)