

基于S矩阵编码的短波红外高光谱成像验证及噪声分析

唐国良^{1,2}, 李春来^{1,3}, 刘世界^{1,2,3}, 徐睿¹, 徐艳^{1,2}, 袁立银^{1,3*}, 王建宇^{1,2,3*}

(1. 中国科学院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. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 借助于称重测量原理的噪声抑制效果, 提出了一种基于S矩阵狭缝阵列的短波红外光谱成像方法, 通过构建S矩阵狭缝阵列替换光谱成像系统的单狭缝, 实现空、谱信息的混叠测量。对该系统的探测器噪声和光子噪声进行了分析, 计算了系统噪声抑制效果。仿真结果表明, 该方法在弱光条件下可有效地降低噪声水平, 提高成像质量。搭建了原理样机进行成像实验, 对一均匀面目标成像, 通过对比单狭缝成像数据, 使用S矩阵狭缝阵列的光谱成像方法在23%和10%探测器势阱光强下信噪比分别提升了9%和21%。

关键词: 计算成像; S矩阵狭缝阵列; 弱光高光谱成像; 噪声分析

中图分类号: TP751 文献标识码: A

Noise model analysis and verification of short wave hyperspectral imaging system based on S-matrix coding

TANG Guo-Liang^{1,2}, LI Chun-Lai^{1,3}, LIU Shi-Jie^{1,2,3}, XU Rui¹, XU Yan^{1,2},
YUAN Li-Yin^{1,3*}, WANG Jian-Yu^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

3. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

Abstract: Based on the noise suppression effect of weighing measurement principle, a short-wave infrared spectral imaging method based on S-matrix slit array was proposed. By constructing S-matrix slit array to replace the single slit of spectral imaging system, the aliasing measurement of spatial and spectral information was realized. The detector noise and photon noise of the system were analyzed and the noise suppression effect was calculated. The simulation results show that this method can effectively reduce the noise level and improve the imaging quality of low light conditions. The principle prototype was built for imaging experiment. The imaging target was a homogeneous object. By comparing the imaging data onto a single slit, the spectral imaging method of the S-matrix slit array was used to increase the SNR by 9% and 21% respectively under 23% and 10% detector potential well light intensity.

Key words: computation imaging, S-matrix slit array, weak light spectral imaging, noise analysis

PACS: 42.30.Va

引言

短波红外光谱范围覆盖 1.0~2.5 μm , 是高光谱

遥感成像的重要波段, 在对地观测、红外天文、矿物勘探等领域有广泛应用^[1-2]。在航天方面, 具备高分

收稿日期: 2021-02-03, 修回日期: 2021-05-08

Received date: 2021-02-03, Revised date: 2021-05-08

基金项目: 中国科学院青年促进会(2017286), 国家自然科学基金(6160523), 高分辨率对地观测系统重大专项(GFZX04014308)

Foundation items: Supported by Youth Innovation Promotion Association(2017286), National Natural Science Foundation of China(6160523), Major Project of High Resolution Earth Observation System(GFZX04014308)

作者简介(Biography): 唐国良(1993-), 男, 山东郓城人, 博士。主要研究领域为高光谱成像、计算光谱成像。E-mail: 18463758401@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn, yuanliyin@mail.sitp.ac.cn

分辨率成像能力的短波红外高光谱成像系统一般采用狭缝+光栅(或棱镜)的色散型分光体制^[3],最为典型的是我国于2018年发射的高分五号可见短波高光谱相机^[4]。仪器一般采用二维面阵探测器,单次成像采集获得地物的一维空间和一维光谱信息,通过卫星平台连续运行扫描获取地表场景的三维数据立方体。随着技术的发展和需求的提高,系统要同时兼顾高空间分辨率、高光谱分辨率和高辐射分辨率(也可称高信噪比),导致研制难度加大。另一方面,相比较可见光波段,短波红外谱段的太阳光能量较低是导致系统信噪比低的另一原因。增大积分时间是提升系统信噪比的有效手段,文献[4]介绍了一种以传统成像体制实现高分辨率短波红外高光谱成像的方法,采用凝视补偿的方法增大对部分场景的探测时间,但是这种方法扫描镜的回扫过程会导致地面场景的漏扫,难以实现连续成像。因此,有必要开展新成像技术体制的研究,以解决短波红外通道高空间、高光谱和高辐射分辨率难以同时兼顾的探测难题,实现弱光条件下的高信噪比成像。

在推扫式光谱成像系统中,狭缝的存在很大程度上影响了成像的信噪比,其主要原因为狭缝较窄,影响了整个系统的光通量,由此可知,增大光通量是提高系统信噪比最直接的方法。基于此目的,计算层析光谱成像技术(CTIS)、傅里叶光谱成像技术(FTIR)等多种高通量成像系统相继出现^[5-6]。另外,压缩感知理论的提出为高光通量光谱成像系统提供了新思路,2006年Rice大学提出了基于压缩感知的单像素相机成像模型(Single Pixel Imager, SPI),并成功实现了原理验证,通过对空间编码信息的组合测量,有效提高了单次数据获取时的信息光强^[7],基于压缩感知的高光谱成像(Compressive Sensing Hyper Spectral Imager, CHSI)系统在SPI的基础上增加了分光部件,实现了对空间和光谱的同时测量^[8],随后进一步设计了基于编码孔径的光谱成像系统(Coded Aperture Snapshot Imager, CASSI)^[9-11],使用面阵探测器接收经过编码模板调制后的空谱混叠数据,进而反解得到完整的光谱数据立方体。以上成像体制都是在压缩感知理论模型支持下,直接获取欠采样得原始数据,但该方法是在目标稀疏前提下依托重构算法获得原始信号,如果目标场景复杂,或者稀疏度不高,重建结果会存在严重失真。为了提高CASSI的成像质量,2013年清

华大学提出了一种高空间分辨率和光谱分辨率的混合摄像系统,通过将彩色相机数据与空间降采样光谱相机数据融合,实现高空间分辨率的视频光谱成像^[12]。其光谱仍使用降采样的方式采集,这在气体探测等简单场景下是可行的,但不适用于遥感中对地物的精细成像。

如果能够以全采样(不压缩)的方式对空谱混叠数据进行采集并重建,便有可能在不丢失信息的前提下,同时兼顾高空间、高光谱和高辐射分辨率。近年来,提高光谱测量仪器的信噪比成为一个热点方向,2007年Wagadarikar A A等人验证了基于Hadamard矩阵编码产生的谱重构具有最佳的信噪比^[13],随着数字微镜阵列(DMD)产品性能越来越高,该组件也逐步应用于Hadamard光谱仪^[14-15],但是由于DMD组件反射角度固定(12°),这使得系统光路复杂度增加,另外,DMD无法在整个短波谱段保持较高反射效率,因此采用DMD的光谱仪在信噪比提升方面很难达到预期效果。另外,从噪声模型机理上分析,由于光子噪声的存在,Hadamard光谱成像系统的噪声抑制效果也存在瓶颈^[16-17],限制了信噪比的提升。

综上可知,基于CASSI模型的光谱成像系统能提升系统光通量,但系统使用随机编码导致信息恢复准确度不稳定,且压缩采样的方式容易造成场景信息丢失,而在另一方面,Hadamard编码方式实现全采样,信息准确度优于CASSI。综合两种成像方式,本文提出一种基于称重测量原理的S矩阵狭缝阵列成像(S-Matrix Array-Slit Spectral Imaging, SASI)方法,系统使用阵列狭缝实现较高的光通量,可以较好地应用于短波红外,同时实现高空间、高光谱、高辐射分辨率。本文详细分析了该方法对成像信噪比的影响,并通过仿真证明该方法在弱光照环境下的信噪比提升效果;在此基础上搭建基于S矩阵编码狭缝的短波红外高光谱成像原理样机,得到的实验数据与仿真结果一致,证明本文所述光谱成像技术是一种定量遥感高光谱成像新方法,具有较大的实际应用前景。

1 称重测量原理与高光谱成像模型设计

推扫式光谱成像仪通常使用棱镜或者光栅作为分光器件,通过狭缝选择成像目标的一维空间信息进入分光器件,然后在探测器上获得一维空间和光谱信息。狭缝的宽度直接影响空间分辨率,在不超过衍射极限条件下,狭缝宽度越小空间分辨率越

高,但是减小狭缝宽度会导致系统光通量降低,导致成像信噪比降低。为解决空间分辨率与光谱分辨率相互制约的问题,本文提出了基于称重测量原理的编码狭缝高光谱成像系统,使用狭缝阵列实现多通道光谱测量,实现高分辨率高光谱成像。

1.1 称重测量原理

称重测量是工程中一种常用的信号间接测量手段,多用于小信号的精确测量。称重测量方法本质的上是对信号的组合测量,然后通过对测量信号的反解恢复原始信号。最早在1976年Sloane N J A等在文献[18]中讨论了称重测量方法在光学探测中的应用前景,随后称重测量在多通道光谱探测、鬼成像等领域都有着较为广泛的应用^[19-20]。

一般的成像过程都可统一由式(1)表示,式中 ψ 表示信号的量化值, ψ 为 n 维列向量, $e=(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n)^T$ 表示在信号采集过程中的噪声(记方差为 ε); A 表示 $n*n$ 的测量矩阵; f 为探测器获得的测量值(同为 n 维列向量), f 可表示为:

$$f = A\psi + e \quad (1)$$

式(1)中 A 为满秩矩阵,故 A 的逆矩阵 A^{-1} 一定存在,通过矩阵反解得到恢复后的信号 $\bar{\psi}$:

$$\bar{\psi} = A^{-1}f = \psi + A^{-1}e \quad (2)$$

假设噪声 e 符合高斯分布,结合统计学相关计算,Sloane等在1976年推导了测量矩阵与噪声的数学模型^[25],结果如式(3),其中 $(*)^{-1}$ 表示矩阵的逆; $\text{tr}(*)$ 表示矩阵的迹;则测量后的信号噪声方差 $\hat{\varepsilon}$ 为:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{n} \text{tr}((A^T A)^{-1}) \quad (3)$$

记 $\chi = \text{tr}((A^T A)^{-1})$ 为信号测量过程中的噪声因子, χ 的大小只与测量矩阵有关。

传统的成像过程本质上是一种“点对点”成像,即探测器的各像元点与成像目标各点一一对应,测量矩阵 $A = I$ (I 表示 $n*n$ 单位矩阵)。通过式(3)可知传统成像噪声均方差为 $\hat{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{n} \text{tr}((I^T I)^{-1}) = \frac{\varepsilon}{n} n = \varepsilon$,即噪声的方差不变。

在称重测量中,一般选用Hadamard矩阵(又称 H 矩阵)作为测量矩阵。Hadamard矩阵常用在通信、信息论和信号处理中,它是由“+1”“-1”组成的满秩矩阵,阶数符合 $n, n/12$ 或 $n/20$ 为2的幂^[25]。当测量矩阵 $A = H$ (H 表示 $n*n$ 的Hadamard矩阵), f_H 表示根据 H 矩对信号 ψ 的组合测量值。代入式(3)得

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{n} \text{tr}((H^T H)^{-1}) = \frac{\varepsilon}{n} * 1 = \frac{\varepsilon}{n}$$

为 ε/n 。

称重测量原理在光电系统的应用过程中,通过空间光调制的方法实现信息编码的测量,即通过“透过”与“不透过”实现“1”“0”编码; H 矩阵是由“+1”“-1”组成,工程中“-1”难以实现,故实际上通常使用与 H 矩阵性质相似的 S 矩阵代替。 S 矩阵的构造方法分为直接法与间接法。直接法通过将 H 矩阵的“-1”变成“1”、“1”变成“0”,并去除矩阵的首行和首列元素实现;间接法又分为 m 序列循环编码方法^[24]、双素数变换法等,本文在工程实现中需要通过一维编码狭缝的循环位移实现二维编码,故采用 m 序列循环编码法构造 S 矩阵(记作 S_m), S_m 的阶数可选 $n = \{3, 7, 11 \dots 4m - 1, m \in \mathbb{Z}^*\}$ 。

由上述分析可以看出,噪声的大小与 $\frac{\chi}{n}$ 线性相关, $\frac{\chi}{n}$ 越小,则噪声的方差越小,即表示测量矩阵对噪声的抑制效果越明显。经计算, n 阶 H 矩阵的噪声因子恒为1(n 为阶数),而不同阶数的 S 矩阵差异较大。 n 阶 S_m 矩阵和 H 矩阵的噪声因子如图1所示,通常情况下应选择 $\chi < 4$ 。

由于组合测量过程中测量值为多个信号值的叠加,增强了系统对弱小信号的探测能力;另外,组合测量所使用的测量矩阵为满秩矩阵,因此在理论上实现了数据的全采样,不丢失成像信息。但阶数增大同样意味着信号量的增大,导致待测信号更容易超出系统量程,因此为保证测量系统具备良好的动态范围,测量矩阵的阶数不宜过大。

1.2 成像原理及数学模型介绍

本文提出基于 S 矩阵的编码狭缝成像系统,使

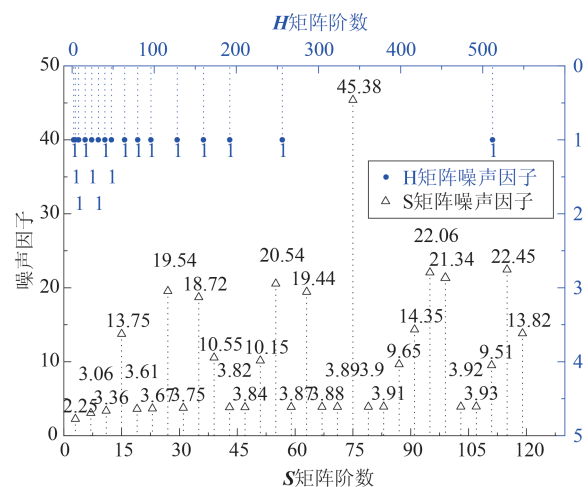


图1 H 矩阵与 S 矩阵的噪声因子 χ 的大小

Fig. 1 Noise factor (χ) of H matrix and S matrix

用 S 矩阵狭缝阵列替换传统单狭缝,借助称重测量原理恢复高信噪比光谱图像信息。图2为阵列狭缝成像原理图。

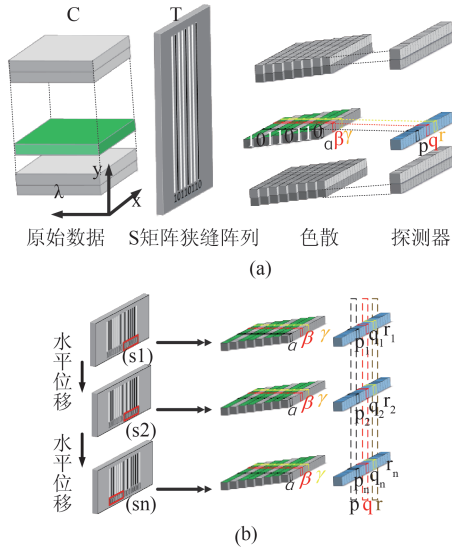


图2 阵列狭缝成像原理图(a)成像过程数学模型示意图, (b)阵列狭缝编码为 s_1, s_2, \dots, s_n 时的数据混叠过程
Fig. 2 Principle of array slit imaging (a) schematic diagram of mathematical model of imaging process (b) data aliasing when array slits are encoded as s_1, s_2, \dots, s_n

成像原理如图2(a)所示,记 C 为待测场景原始信号,阵列狭缝可表示为 T , C 经过望远镜在 T 所在平面成像,对应编码为“1”(狭缝位置)的场景信号透过狭缝,经过分光组件,在探测器形成空谱混叠的图像。根据称重测量原理,系统需变换 T 中阵列狭缝的排列顺序实现多次测量。图2(b)展示了数据的多次测量过程, α, β, γ 为垂直于探测器平面的 n 维列向量,构建 S 矩阵 $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$,则第 i 次编码为 s_i ,对应为 S 矩阵的第 i 行, p_i, q_i, r_i 表示编码为 s_i 时 α, β, γ 在探测器的投影信号,即

$$\begin{cases} p_1 = s_1^T \alpha \\ p_2 = s_2^T \alpha \\ \vdots \\ p_n = s_n^T \alpha \end{cases}, \begin{cases} q_1 = s_1^T \beta \\ q_2 = s_2^T \beta \\ \vdots \\ q_n = s_n^T \beta \end{cases}, \begin{cases} r_1 = s_1^T \gamma \\ r_2 = s_2^T \gamma \\ \vdots \\ r_n = s_n^T \gamma \end{cases} \quad (4)$$

记 $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$, $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, $r = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T$,在探测器采样过程中加入噪声 e ,则探测器实际获得数据为:

$$\begin{cases} p = S\alpha + e_p \\ q = S\beta + e_q \\ r = S\gamma + e_r \end{cases} \quad (5)$$

其中 S 矩阵为满秩矩阵,混叠数据立方体是对场景

高光谱信息的全采样,通过矩阵反解,可得:

$$\begin{cases} \alpha' = S^{-1}p = \alpha + S^{-1}e_p \\ \beta' = S^{-1}q = \beta + S^{-1}e_q \\ \gamma' = S^{-1}r = \gamma + S^{-1}e_r \end{cases} \quad (6)$$

式中, α', β', γ' 即是恢复后的场景高光谱数据,将数据按照对应位置重组即可获得光谱数据立方体。

2 系统噪声分析

目前在成像光谱系统中大量使用的CCD探测器和红外焦平面探测器将目标入射到探测器的辐射功率转换为光子数,再由探测器的光谱量子效率得到探测器的激发信号电子数 $N_s(\lambda)$,即^[21]:

$$N_s(\lambda) = \frac{Q(\lambda)T_{\text{int}}}{hc} \eta(\lambda) \quad (7)$$

式中, $\eta(\lambda)$ 表示探测器的光谱量子效率, h 为普朗克常数; c 为光速; T_{int} 为探测器的积分时间。若不考虑不同波段间的差异,在积分时间 T_{int} 一定的前提下,光子数 Q 与电子数 N_s 线性相关。

高光谱成像系统噪声主要包括光子噪声、读出噪声、热噪声和放大器噪声等。对于采用焦平面器件的高光谱成像系统,影响系统性能的主要是光子噪声和探测器的读出噪声^[22]。光子噪声由探测器的光子起伏及载流子流动的不连续性和随机性引起,当光通量较大时,探测器像元在单位时间内接收到的光子数是一个符合泊松分布的随机量,并且光子数变化引起的电子数的变化符合同样规律,且满足^[23],

$$\sigma_s^2 = N_s \quad (8)$$

式中, σ_s^2 为电子数随机涨落的方差(下文统称为光子噪声), N_s 为探测器像元在最小独立探测时间内激发的平均电子数,当光通量足够大时光子噪声可认为符合连续的高斯分布^[23]。

读出噪声电子数(下文统称为读出噪声)只与探测器有关,不随信号变化。 S 矩阵狭缝阵列光谱成像系统通过多条狭缝实现组合测量,但是在有效增加系统的光通量的同时,光子噪声也会增加。记单狭缝条件下光子噪声方差为 $\varepsilon_{\text{ss}} = \sigma_s^2$,读出噪声方差为 $\varepsilon_{\text{sr}} = \sigma_w^2$, ε_{As} 、 ε_{Ar} 分别为阵列狭缝条件下的光子噪声和读出噪声。 S 矩阵可近似认为由等比例的“0”“1”组成,假设成像目标能量在空间上分布均匀,则当测量矩阵的阶数为 n 时,通光量增大 $\frac{n}{2}$,根据上节对称重测量原理噪声抑制效果的分析,系统光子噪声方差为:

$$\varepsilon_{As} = \frac{n}{2} \varepsilon_{SS} = \frac{\chi}{2} \varepsilon_{SS} \quad (9)$$

读出噪声方差为:

$$\varepsilon_{Ar} = \frac{\chi}{2} \varepsilon_{sr} \quad (10)$$

上述推导可以看出,使用阵列狭缝的成像方式虽然在数据获取阶段增大了光子噪声,但由于使用称重测量的成像方式又对噪声有一定的抑制作用,导致最终的噪声方差为 $\frac{\chi}{2} \varepsilon_{SS}$ (与 n 值无关);另一方面,当 n 增大时,读出噪声的抑制能力增大。相比于光子噪声,阵列狭缝对读出噪声表现出更加明显的抑制效果。从信噪比的角度分析,在只考虑光子噪声的情况下,单缝成像信噪比为:

$$\text{SNR}_{SS} = \frac{N_s}{\sqrt{\varepsilon_{SS}}} \sqrt{N_s} \quad (11)$$

阵列狭缝成像时光子噪声方差变为单狭缝的 $\frac{\chi}{2}$ 倍,则阵列狭缝成像信噪比为:

$$\text{SNR}_{as} = \frac{N_s}{\sqrt{\frac{\chi}{2} \varepsilon_{SS}}} = \frac{\text{SNR}_{SS}}{\sqrt{\frac{\chi}{2}}} \quad (12)$$

对于采用焦平面探测器的单狭缝高光谱成像系统,光子噪声与读出噪声均可看作白噪声,且相互独立,因此系统总噪声方差为各自方差的加和,由式(9-10)看出,使用阵列狭缝成像时,虽然增大了光通量导致光子噪声增大,但是光子噪声对信噪比的影响不随矩阵阶数的变化而变化;另一方面,阵列狭缝可有效地降低读出噪声的大小。当信号逐渐变弱,光子噪声减小,此时读出噪声的比重会增加,阵列狭缝成像方式信噪比会超过单狭缝。

式(13-14)分别代表单狭缝和阵列狭缝成像模式下对应的成像信噪比(SNR),选取矩阵大小 $n=19$,通过表1可知 $\chi=3.61$,探测器满势阱信号电子数为 10 Me^- (参考Xeneth公司XEVA-2.35-320短波红外相机),取探测器读出噪声电子数方差 $\varepsilon_{sr}=(800)^2$ (根据Xeneth短波相机参数文档,探测器噪声取 $800e^-$),由式(13)、(14)获得两种采集方式SNR变化。由前文可知,Hadamard矩阵的 $\chi=1$ 且与阶数无关。图3给出Hadamard矩阵、S矩阵和单位矩阵不同阶数(n)下的成像信噪比。可以看出,当信号较小时,使用阵列狭缝信噪比高于单狭缝,且随着 n 的增加,阵列狭缝在弱光下的成像SNR逐渐变好;Hadamard矩阵的信噪比始终高于其他两者,但因为矩

阵中存在“-1”,导致 H 矩阵在光电系统中很难实现。图3(a)给出了使用三种矩阵情况下信噪比随信号电子数(N_s)的变化曲线,图3(b)为不同 n 值下S矩阵狭缝阵列成像SNR相对于单狭缝的增量,光强越弱,增量越大。

$$\text{SNR}_{\text{single}} = \frac{N_s}{\sqrt{\varepsilon_{sr} + \varepsilon_{SS}}} = \frac{N_s}{\sqrt{\varepsilon_{sr} + N_s}} \quad (13)$$

$$\text{SNR}_{\text{array}} = \frac{N_s}{\sqrt{\frac{\chi}{2} \varepsilon_{sr} + \frac{\chi}{2} \varepsilon_{SS}}} = \frac{N_s}{\sqrt{\frac{\chi}{2} \varepsilon_{sr} + \frac{\chi}{2} N_s}} \quad (14)$$

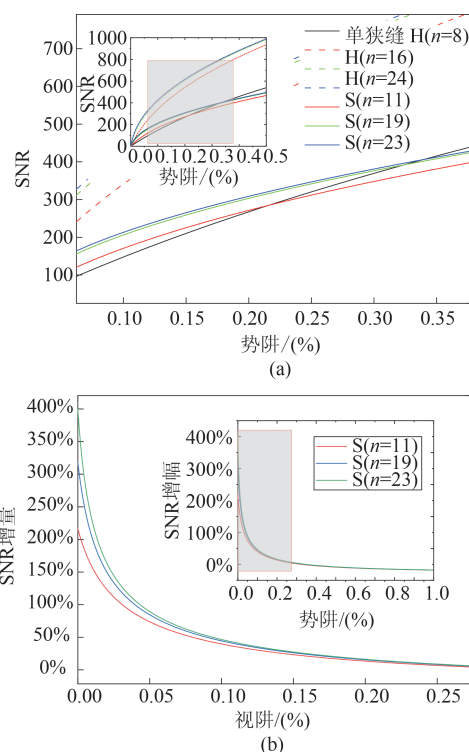


图3 不同测量矩阵信噪比分析 (a)信噪比随信号电子数(N_s)的变化曲线,(b)SNR增量与光强关系

Fig. 3 Analysis of SNR with different measurement matrices (a) The change curve of SNR with signal electron number (N_s), (b) the relationship between SNR increment and light intensity

3 仿真分析

3.1 SASI系统仿真分析

仿真数据采用上海技物所机载全谱段高光谱成像仪(PHI)飞行数据,数据内容包括道路、草地、海岸线和海水等,数据光谱范围包括 $900 \sim 1700 \text{ nm}$ 。从原始数据中选取短波波段 $103 \times 200 \times 150$ (光谱维)的三维数据,噪声使用MATLAB自带Randn函数生成。使用信噪比SNR(Signal Noise Ratio)、结构相似

性 SSIM (Structural Similarity) 对空间维重构效果进行评价; 使用梯度光谱角度匹配法 GSAM (Gradient Spectral Angle Model)、光谱均方误差 SMSE (Spectrum Mean-Square Error) 对光谱维进行评价。

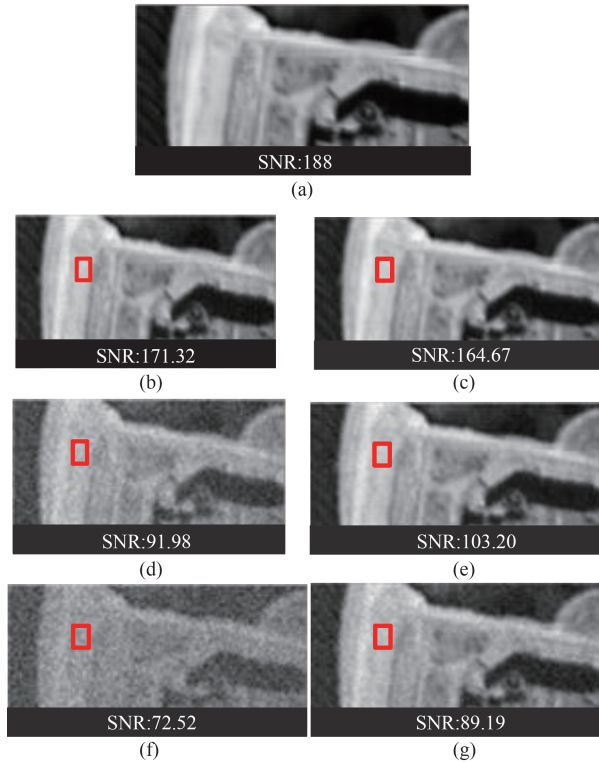


图4 空间成像仿真结果 (a)原图, (b)单狭缝-光强较强, (c)阵列狭缝-光强较强, (d)单狭缝-光强一般, (e)阵列狭缝-光强一般, (f)单狭缝-光强较弱, (g)阵列狭缝-光强较弱
Fig. 4 Space imaging simulation results (a) Original image, (b) single slit - Strong light intensity, (c) array slit - Strong light intensity, (d) single slit- Normal light intensity, (e) single slit- Normal light intensity, (f) single slit - Weak light intensity, (g) array slit - Weak light intensity

首先构建循环 S 矩阵, 进行 S 矩阵阵列狭缝成像过程仿真。根据系统不同噪声的物理性质, 在探测器采集过程中加入一定大小的白噪声作为读出噪声和光子噪声。其中读出噪声方差固定, 光子噪声方差大小随信噪比的增大呈根号倍增大。为模拟在不同光强下的成像效果, 令原始数据立方体信号的光强为单位光强 I , 将光强为 $0.1I$ 、 $0.2I$ 、 \dots 、 I 看作不同光强下的信号大小, 挑选 1 、 $0.5I$ 、 $0.2I$ 分别表示强光、一般和弱光条件下信号强度。图3为三种光强下单一波段 (1220 nm) 的空间恢复结果, 选取图像中较均匀波段, 计算区域内各个像元的标准差作为噪声, 像元均值作为信号, 计算公式为:

$$\text{SNR}(\lambda) = \frac{\overline{\text{DN}}(\lambda)}{\text{std}(\text{DN}_i(\lambda) - \overline{\text{DN}}_i(\lambda))}, \quad (15)$$

式中, $\overline{\text{DN}}_i(\lambda)$ 为单一波段的信号均值, $\text{std}(\ast)$ 表示其噪声的大小。

SSIM 是衡量两幅图像相似度的一种指标。假设给定的两张图像 im_1 和 im_2 , 其中 im_1 为原始图像, im_2 为重建的图像, 则 SSIM 计算公式为

$$\text{SSIM}(\text{im}_1, \text{im}_2) = \frac{(2v_{\text{im}_1}v_{\text{im}_2} + c_1)(2\sigma_{\text{im}_1\text{im}_2} + c_2)}{(v_{\text{im}_1}^2 + v_{\text{im}_2}^2 + c_1)(\sigma_{\text{im}_1}^2 + \sigma_{\text{im}_2}^2 + c_2)}, \quad (16)$$

其中, v 为图像的均值, σ_{im_1} 为图像 im_1 的方差, σ_{im_2} 为图像 im_2 的方差, $\sigma_{\text{im}_1\text{im}_2}$ 为 im_1 和 im_2 的协方差, $c_1=0.01$, $c_2=0.03$ 。

表1 单狭缝、阵列狭缝、CASSI(100%)不同光强下成像信噪比和 SSIM 评价结果

Table 1 Imaging SNR and SSIM evaluation results of single slit and array slit and CASSI(100%) imaging under different light intensities

波段/nm	成像方式	SNR	SSIM
光强较强	单狭缝成像	171.32	0.9918
	阵列狭缝成像	164.67	0.9935
	CASSI(100%)	112.28	0.9895
光强一般	单狭缝成像	91.98	0.9548
	阵列狭缝成像	103.20	0.9485
	CASSI(100%)	87.09	0.9523
光强较弱	单狭缝成像	72.52	0.8951
	阵列狭缝成像	89.19	0.9146
	CASSI(100%)	63.39	0.9215

通过计算得出强光、一般和弱光下单狭缝信噪比 (SNR) 为 171.32、91.98 和 72.52, 阵列狭缝信噪比为均值 164.67、103.20 和 89.19, 相比较单狭缝信噪比分别提升 -3.7% 、 12.2% 和 23.8% , 从结果上看, 在光强充足的情况下, 单狭缝的成像信噪比更好, 但随着光强的减弱, 阵列狭缝的成像质量将高于单狭缝。表1的 SSIM 结果也表明, 阵列狭缝成像方式没有导致图像出现结构上的失真, 证明本方法实现了信息的无丢失恢复。

使用梯度光谱角度匹配法 (GSAM)、光谱均方误差 (SMSE) 评价光谱曲线的恢复的准确性和噪声大小, 其中, GSAM 用于评价光谱相似度, 计算方法如式 (17), 其中 \mathbf{x}_1 、 \mathbf{x}_2 为两条光谱, 将光谱曲线的梯度信息纳入计算中, 增强了光谱吸收峰等“指纹”特征在光谱相似度评价体系中的重要性, 值为 1 时表

示两条光谱完全相同。

$$GSAM = \frac{\langle x_1, x_2 \rangle}{\|x_1\| \|x_2\|} \quad (17)$$

SMSE用于评价光谱噪声水平,SMSE越小,说明噪声值越小。表2给出了在弱光条件下(0.2I)空间两点(Spatial1、Spatial2)光谱质量评价结果,从光谱维的评价结果可知,两种成像方式都能准确的恢复光谱信息,并且使用阵列狭缝能明显降低噪声。

通过以上仿真结果表明,使用阵列狭缝的光谱成像方式可以有效的抑制噪声,使空间维和光谱维成像效果都有明显的提升,尤其是在信号值较小时,信噪比提升更加明显。

表2 单狭缝、阵列狭缝、CASSI(100%)不同空间点光谱成像效果

Table 2 Single slit and array slit CASSI(100%) spectral imaging effects of different spatial points

	成像方式	GSAM	SMSE
空间点1	单狭缝成像	0.7555	154.1753
	阵列狭缝成像	0.8163	31.7089
	CASSI(100%)	0.5112	320.0283
空间点2	单狭缝成像	0.9171	151.7028
	阵列狭缝成像	0.9418	30.6606
	CASSI(100%)	0.6595	423.6264

3.2 SASI与CASSI系统对比实验

本节仿真了SASI系统、CASSI成像结果。测量矩阵使用二值随机矩阵,矩阵大小为 $M \times N$,其中 $M < N$,且采样率 $\eta = \frac{M}{N} * 100\%$ 。需要说明的是,CASSI通常用于压缩测量,而SASI系统为100%采集成像,为保证客观性,仅将SASI数据与CASSI系统100%采样重构数据做对比。

使用峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)用来评价单波段图像前后劣化程度,图5表述了当光强变化时I矩阵、H矩阵、S矩阵和CASSI(100%)重建同一波段下(1220 nm)图像的PSNR变化情况。CASSI系统重构算法使用压缩感知最常用的正交匹配追踪算法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP),使用离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)将信号稀疏化;H矩阵和S矩阵通过与相应的逆矩阵相乘获得重建图像。计算图像PSNR如图5。

从图中可以看出,在各光强情况下符合 $PSNR(H) > PSNR(S) > PSNR(CASSI)$,证明了使用H矩阵

或S矩阵成像效果均优于100%采样的CASSI系统;另外,当光强较大时,单狭缝(I-Matrix)的PSNR大于SASI系统(S-Matrix),但是当光强低于一定值时,使用阵列狭缝会得到更好的成像效果,这证明了在光强较弱时,读出噪声代替光子噪声占据主导地位,而阵列狭缝抑制读出噪声更有效。通常计算CASSI系统成像PSNR时不考虑光子噪声的影响,但这在光强较大时是不可行的,图5给出100%采样下的CASSI单波段图像的PSNR,说明,在考虑光子噪声的前提下,CASSI系统的信噪比相对前三者并无优势。

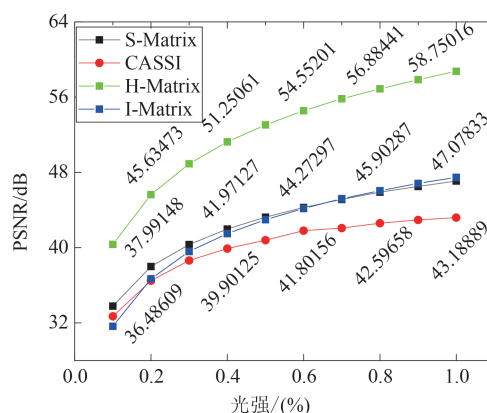


图5 不同光强下的峰值信噪比

Fig. 5 SNR of single slit and array slit with different light intensity

4 系统设计与成像实验

4.1 系统介绍

根据第2章对系统数学模型的描述,搭建SASI系统原理样机。图6(a)为系统的光路原理图,(b)为探测器部分的细节放大,(c)为实际搭建的原理样机。系统望远镜为YAMAKO公司的SWL系列短波镜头,焦距为50 mm,F数为2.0,光谱范围为900~1700 nm;分光器为芬兰SPECIM公司SWIR高光谱色散元件,探测器为XEVA-2.35-320短波红外相机,光谱响应范围为850~2300 nm,相机分辨率为320×256,像元尺寸为30 μm×30 μm;编码板使用不锈钢+光刻加工工艺,狭缝尺寸误差<0.1 μm,单个狭缝宽度为30 μm。将S矩阵阵列狭缝放置于望远镜的后焦面上,并固定在高精度电控位移台上,位移台移动控制编码板的水平移动;在采集的过程中,为保证只有参与编码的信号通过成像系统,在S矩阵狭缝阵列与光谱仪组件间、靠近S矩阵狭缝阵列放置光阑。场景目标经过望远镜在阵列狭缝所

在平面成像,经过阵列狭缝的空间调制,狭缝对应位置的信号进入光谱仪组件进行分光,在探测器处形成多个狭缝所对应场景光谱信息的混叠信号,由于在探测器和步进电机之间通过脉冲信号同步,故在探测时便已知混叠信号所对应的编码顺序,通过数据处理可重构原始数据立方体。

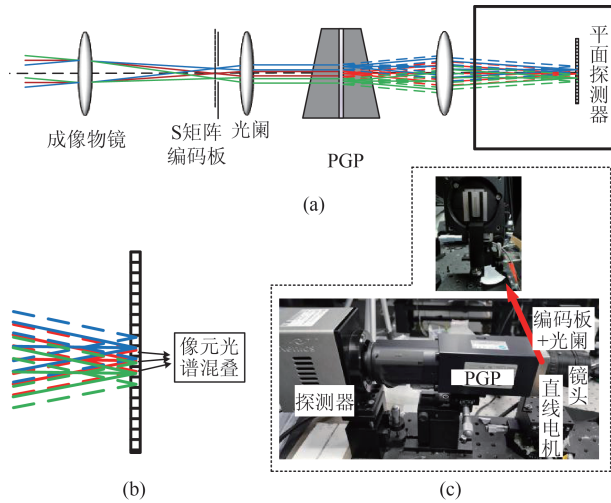


图6 SASI系统原理及实物图(a)系统原理图,(b)探测器部分放大,(c)原理样机实物图

Fig. 6 S-matrix coding short-wave infrared spectroscopy imaging system (a) System schematic diagram, (b) partial amplification of the detector, (c) physical drawing of the principle prototype

4.2 S矩阵编码实现方式

阵列狭缝中狭缝的排列方式根据循环S矩阵生成,矩阵由“0”“1”组成,任一行的编码都可由其首行循环位移得到。本系统通过 m 序列循环编码方法构造循环S矩阵,图7展示了阵列狭缝实现编码的过程。首先构造19阶循环S矩阵,使用S矩阵首行元素确定编码板中狭缝所在位置(“0”表示无狭缝,“1”表示有狭缝),为了实现位移编码,按首行顺序连续放置两组狭缝阵列。阵列狭缝中可分为编码区域和待编码区域,使用步进电机控制编码板依次经过编码区域,步进电机每移动一个狭缝宽度会输出同步信号,触发探测器实现一次曝光,成像过程包括19次曝光。光阑紧贴编码板放置,宽度等于19条狭缝的宽度,可以保证在每次曝光时只有在光阑范围内的狭缝(即编码区域的狭缝)参与编码。为了对比阵列狭缝与单狭缝的成像质量,在编码板的最右侧设计单狭缝作为对比实验。

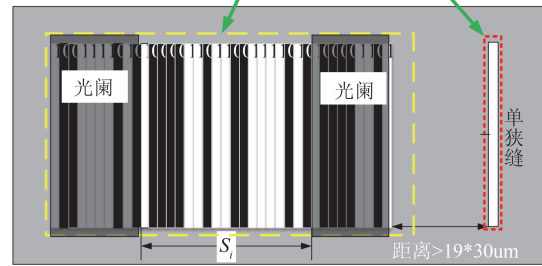
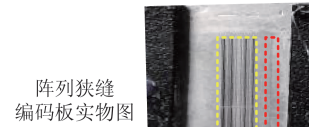


图7 阵列狭缝构造原理图

Fig. 7 Principle of array slit construction

4.3 实验结果及其分析

启动电控位移台带动编码板水平移动,位移台产生脉冲信号触发短波相机同步曝光。采集并重构原始数据,同时采集单狭缝数据作为对比。去除探测器坏点并且矫正非均匀性,获得单狭缝和阵列狭缝采集模式下光谱三维数据立方体。分光组件可认为色散后的光谱在空间上线性变化,因此,确定典型中心波长所在位置,便可通过线性拟合确定探测器各个像元的中心波长。本实验选择 $(1\ 220\pm 10)\text{nm}$ 、 $(1\ 410\pm 10)\text{nm}$ 、 $(1\ 550\pm 10)\text{nm}$ 三个波长作为典型波长。

在镜头前加 $1\ 410\ \text{nm}$ 滤光片,使用单狭缝模式和阵列狭缝模式对积分球成像。如图8展示了使用 $(1\ 410\pm 10)\ \text{nm}$ 窄带滤光片的光谱成像结果,单狭缝成像光谱可作为参考标准,可以看出使用阵列狭缝重建的图像在 $1\ 410\ \text{nm}$ 信号最强,由此证明阵列狭缝成像光谱重建的是准确的。

对积分球成像,验证系统在不同光强下的信噪比。实验中将积分球调到合适光强,分别取积分时间 $t=3\ \text{ms}$ 、 $t=1\ \text{ms}$ (对应单狭缝时探测器平均势阱为23%、10%),取每个波段均值作为对应波段图像实际DN值,计算单狭缝与阵列狭缝模式下各波段的信噪比(SNR),计算不同光强下信噪比如图8所示。

通过第2节对噪声的分析可知,阵列狭缝成像系统的信噪比提升效果会随着光强的减弱而越来越明显,由图9可以看出,在探测器23%、10%势阱

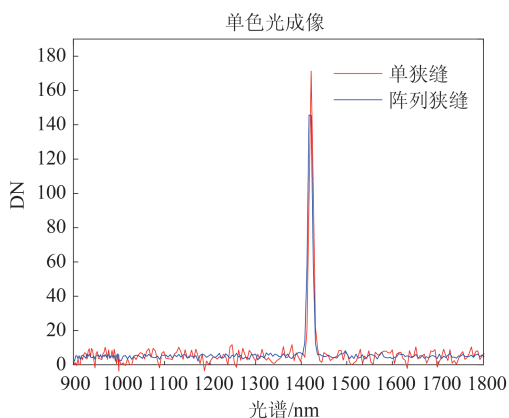


图8 单色光光谱成像结果

Fig. 8 Imaging results of monochromatic light spectrum

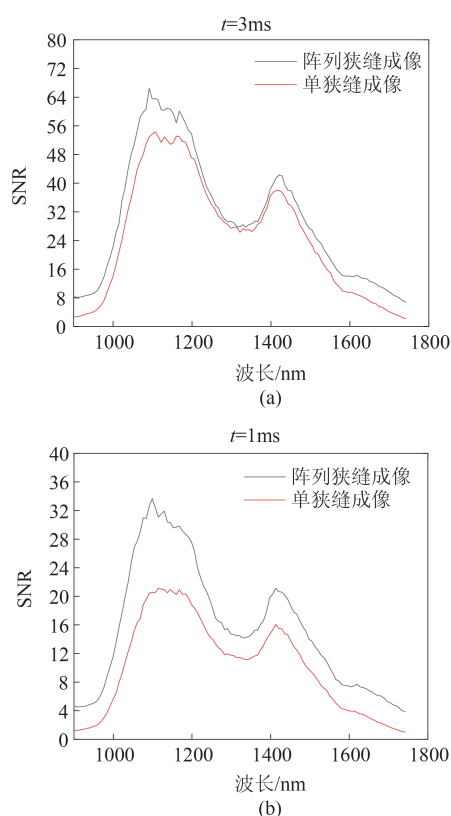


图9 不同光强下各波段SNR(a)20%势阱光强,(b)10%势阱光强

Fig. 9 SNR at different light intensities (a) 20% potential well, (b) 10% potential well

所对应光强下,阵列狭缝成像SNR高于单狭缝模式,这与第2节分析结果吻合。选取1 200~1 600 nm波段计算信噪比,23%、10%势阱光强下SNR较单狭缝提升9%、21%。

以鸡蛋果叶为成像目标验证其在实际成像中的效果,空间信息恢复效果如图10所示,图10(a)为手机相机所拍摄的实物图,图10(b)、(c)分别是使

用单狭缝和阵列狭缝空间恢复结果,其中,由于单次成像的视场较小,阵列狭缝的成像结果是通过多次改变成像角度拼接而成。选择中心波长为1 232.4 nm、1 352.2 nm和1 675.7 nm三个波段展示两种方法的成像差异,选择相对均匀区域(图中红色框内)计算信噪比区域长宽分别为 n_1, n_2 ,计算得单狭缝 $SNR_1=54.98$ 、 $SNR_2=68.53$ 、 $SNR_3=51.96$,阵列狭缝 $SNR_1=63.51$ 、 $SNR_2=71.52$ 、 $SNR_3=67.85$ 。可以看出使用阵列狭缝的信噪比在不同波段均大于单狭缝相应值;使用标准差评价所选区域噪声大小,标准差std的计算式如式(18),其中 d 为像素点的DN值, \bar{d} 为区域内所有像素的均值,在图12光谱曲线中可以看到光谱能量在900~1 700 nm两端较低,中间较高,其主要原因是中间部分短波透镜的透射率较高、分光器件分光效率较高、探测器在这一波段量子效率较高三个原因造成的。通过图11单狭缝和阵列狭缝std图可知,阵列狭缝在光能量较弱波段的std明显小于单狭缝,但是在中间波段这一优势变小,这与第2、3节的分析仿真结果相吻合。

$$\text{std} = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} (d_{ij} - \bar{d})^2 / (n_1 + n_2 - 1)}, \quad (18)$$

图12为图像中两个不同物体的光谱曲线,其中点a为白色纸的光谱反射曲线,点b为叶片的光谱反射曲线。单狭缝的光谱曲线是直接获得的,没有重建过程,因此可认为光谱数据是准确的。在单狭缝的数据中选取与a、b相邻的多点曲线平均作为均值曲线,分别画出各点均值曲线、单狭缝和阵列狭缝成像曲线,通过观察两者光谱包络可看出使用阵列狭缝的光谱曲线重构与均值曲线结果一致,证明SASI系统重构的光谱是准确地。另外,从曲线也能明显看出两种成像方式所表现噪声差异。

5 结论

为了提高短波红外高光谱成像系统的信噪比,进行了基于S矩阵阵列狭缝高光谱成像实验和噪声研究。借助于称重测量原理,在传统单狭缝+光栅分光的基础上,提出了基于S矩阵的阵列狭缝高光谱成像方法,该方法使用S矩阵狭缝阵列代替单狭缝,增大光通量,提高了对弱信号的探测能力。另外,通过对空谱信号编码,获得空谱混叠信息,可有效地抑制探测器噪声。文章对系统噪声进行了详细分析,并通过仿真实验和搭建原理样机两种方式加以验证,实验结果证明:使用S矩阵狭缝阵列的短

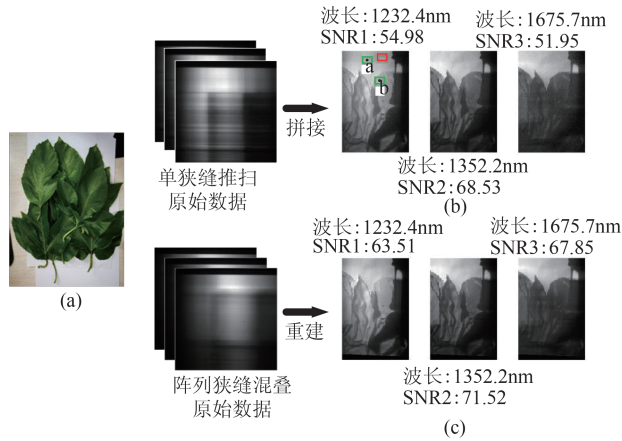


图10 空间信息恢复结果

Fig. 10 Spatial information recovery results

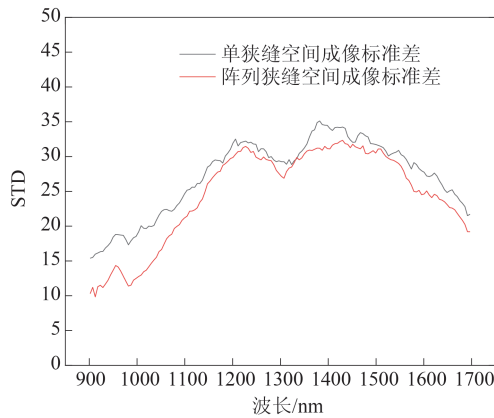


图11 单狭缝和阵列狭缝各波段标准差曲线

Fig. 11 Single slit and array slit waveband std curve

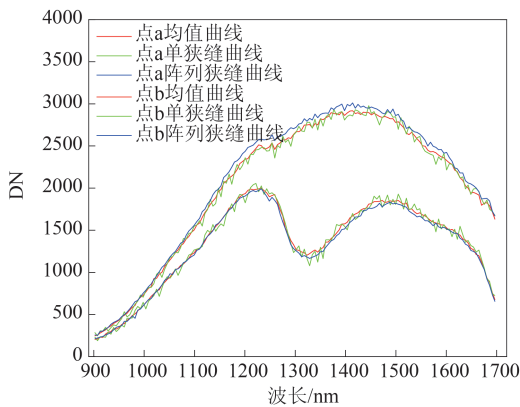


图12 光谱信息恢复结果

Fig. 12 Spectral information recovery effect

波高光谱成像系统可实现信息的无丢失恢复,并且使信噪比得到明显提升。通过对比单狭缝23%、10%势阱光强成像,基于S矩阵的阵列狭缝成像方法在同一光强下信噪比提升为9%、21%。该技术有望实现夜间、阴雨天等弱短波信号下高空间、谱间

和辐射分辨率光谱成像。

需要指出的是,尽管本方法在短波红外波段等弱信号场景下有较明显的提升效果,然而在实际的应用过程中,成像动态范围难以提高,成像过程中单个探测器接收到的信号能量相比于单狭缝方法增大了一个数量级,等价于系统所能探测的最大光强降低一个数量级,因此限制了对强信号的测量。

References

- [1] WANG Yue-Ming, LANG Jun-Wei, WANG Jian-Yu. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, (王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望. *激光与光电子学进展*) 2013, **50**(001):72-79.
- [2] Xue J R, Su B F. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications [J]. *Journal of Sensors*, 2017, 2017(1):1-17.
- [3] Hagen N, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies [J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(9): 090901.
- [4] LIU Yin-Nian, SUN De-Xin, HU Xiao-Ning, et al. Development of visible and short-wave infrared hyperspectral imager onboard GF-5 satellite [J]. *Journal of Remote Sensing*, (刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 高分五号卫星可见短波红外高光谱相机设计与研制[J]. *遥感学报*, 2019, **24**(4):333-344.
- [5] Descour M, Dereniak E. Computed-tomography imaging spectrometer: experimental calibration and reconstruction results [J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(22):4817-4826.
- [6] [1] Berthomieu C, Hienerwadel R. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy [J]. *Photosynthesis Research*, 2009, **101**(2-3):157-170.
- [7] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, **25**(2):83-91.
- [8] Sun T, Kelly K. Compressive sensing hyperspectral imager [C]//Computational Optical Sensing and Imaging. Optical Society of America, 2009: CTuA5.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Ma C, Cao X, Tong X, et al. Acquisition of high spatial and spectral resolution video with a hybrid camera system [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2014, **110**(2):141-155.
- [13] Wagadarikar A A, Gehm M E, Brady D J. Performance comparison of aperture codes for multimodal, multiplex spectroscopy [J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(22):4932-4942.
- [14] Sun X, Hu B, Li L B, et al. An engineering prototype of Hadamard transform spectral imager based on Digital Mi-

- cro-mirror Device[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(1):210-217.
- [15] Lu Z, Zhang J, Liu H, *et al.* The improvement on the performance of DMD Hadamard transform near-infrared spectrometer by double filter strategy and a new Hadamard mask[J]. *Micromachines*, 2019, **10**(2):149.
- [16] Yue J, Han J, Li L, *et al.* Denoising analysis of spatial pixel multiplex coded spectrometer with Hadamard H-matrix[J]. *Optics Communications*, 2018, **407**:355-360.
- [17] Yue J, Han J, Zhao Z, *et al.* Breaking through the limitations of multiplexing based on Hadamard transform [J]. *Optics Communications*, 2019, **460**:125211.
- [18] Sloane N J A, Harwit M. Masks for Hadamard transform optics, and weighing designs [J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(1):107-14.
- [19] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature photonics*, 2019, **13**(1): 13-20.
- [20] Wu H, Ryczkowski P, Friberg A T, *et al.* Temporal ghost imaging using wavelength conversion and two-color detection[J]. *Optica*, 2019, **6**(7): 902-906.
- [21] Gureyev T E, Paganin D M, Kozlov A, *et al.* Complementary aspects of spatial resolution and signal-to-noise ratio in computational imaging [J]. *Physical Review A*, 2018, **97**(5): 053819.
- [22] Anna G, Goudail F. Optimal Mueller matrix estimation in the presence of Poisson shot noise [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(19):21331-40.
- [23] WANG Jian-Yu, WANG Yue-Ming, LI Chun-Lai. Noise model of hyperspectral imaging system and influence on radiation sensitivity [J]. *Journal of Remote Sensing*, (王建宇, 王跃明, 李春来. 高光谱成像系统的噪声模型和对辐射灵敏度的影响. *遥感学报*) 2010, **14**(4): 607-620.
- [24] Liu X J, Xia S T. Constructions of quasi-cyclic measurement matrices based on array codes [C]// IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2013.
- [25] Sloane N J A, Harwit M. Masks for Hadamard transform optics, and weighing designs [J]. *Applied optics*, 1976, **15**(1): 107-114.