

均匀背景中的动态小目标光谱数据获取方法研究

王建威^{1,2}, 赵 剡¹, 李伟艳², 裴琳琳², 孙建颖², 孙成明², 吕群波², 刘扬阳²

1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

2. 中国科学院光电研究院中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094

摘要 光谱是一种可以表征物质特性的光学信息, 利用光谱成像仪可以获取处于视场范围内的物质的光谱图像, 成熟的光谱成像技术均需要通过多次采集才能够获取完整的光谱图像数据立方体, 相应系统的时间分辨率比较低, 不适用于动态目标的光谱获取。快照式光谱成像在动态目标光谱成像方面具有较大的优势, 其中编码孔径快照光谱成像技术是一种将压缩感知计算方法融入到光谱成像过程和图谱重构过程中的光谱成像技术, 在采样过程中完成数据压缩, 具有高通量优势, 可以利用单次曝光的混叠数据, 重构出目标光谱数据立方体, 实现快照式成像, 使得对动态的目标进行监测成为可能。实现监测需要目标的信息满足稀疏性的假设, 实际目标很难满足这样的条件, 重构误差比较大, 不利于对动态的小目标进行监测和识别。针对均匀背景中动态小目标的光谱数据获取, 提出一种双色散通道的编码孔径光谱成像方法, 系统由两个通道组成, 每个通道均包含一个光谱仪, 其色散方向互相垂直, 并共用一个前置望远镜系统和编码孔径。该系统可以实时观测均匀背景区域中的动态小目标。由于两个通道的色散方向互相垂直, 可以从背景中分离出小目标的位置和相对应的编码。假设目标出现在视场中前后, 背景的辐射特性变化很小, 利用目标出现前的数据计算出背景光谱; 目标出现后, 通过帧间差分运算, 消除背景辐射的影响, 提取出目标位置对应色散区域中数据, 利用约束最小二乘算法, 重构运动小目标的光谱数据立方体。进行光谱数据重构, 进行背景光谱补偿后, 获得完整的动态小目标光谱数据。文章对成像过程建立了数学模型, 并对重构方法进行了仿真验证, 结合编码孔径的统计特征, 使目标随机出现在不同的位置, 统计重构光谱的峰值信噪比概率分布, 并调整目标尺寸, 分析目标尺寸对重构精度的影响, 最后与编码孔径成像系统的两步软阈值迭代算法重构结果进行了对比。结果表明, 这种方法在均匀背景中, 采用随机编码矩阵进行编码, 目标尺寸小于 5×5 个像元时, 相对于编码孔径成像系统, 提高了目标的信息重构精度和概率, 并且极大的减小了运算量, 可以实现对运动目标的实时监测。

关键词 光谱成像; 编码孔径; 运动目标

中图分类号: TM93

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)07-2013-05

引言

高光谱成像技术出现初期, 利用色散元件分光, 由狭缝控制光谱成像仪的光谱分辨率, 但单次曝光只能获取一维空间信息和一维光谱信息, 需要通过扫描获取另一维空间信息, 而且狭缝的存在使得进入光学系统的绝大部分的光线无法利用。虽然数据获取速度慢, 能量利用率低, 但由于其强大的信息获取能力, 在各个领域被广泛应用。随着技术的发展, 基于干涉原理的高光谱成像技术^[1-3]逐步成熟, 具有多通道、高通量的特点。干涉型高光谱成像技术突破了狭缝对

能量的限制, 但仍然需要通过扫描才能获取完整的光谱图像数据。此外, 滤光片型光谱成像技术^[4-5]实现高光谱分辨率成像, 同样存在数据获取效率低的问题。

探测器和计算性能提升的同时, 以上三种光谱成像技术在信噪比、空间和光谱分辨率等方面也有了很大提升^[6-7], 但都不能摆脱时间分辨率低的限制, 采集完整光谱数据立方体消耗时间长, 使之不适用于运动目标的光谱图像实时观测。要实现此目的, 必须提高时间分辨率, 通过单次曝光获取光谱数据立方体。为了提高高光谱成像技术的时间分辨率, 研究者提出了包括计算层析光谱成像技术^[8]、编码孔径光谱成像技术(CASSI)^[9-10]、光场多光谱成像技术^[11-12]以及

收稿日期: 2018-06-03, 修订日期: 2018-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61635002)资助

作者简介: 王建威, 1987年生, 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院工程师

e-mail: wjw@aoe.ac.cn

基于复分棱镜的光谱成像技术^[13]等技术。其中计算层析光谱成像技术和光场多光谱成像技术,均都需要大面阵探测器,而空间分辨率较低,对探测器的利用率比较低,空间分辨率和光谱分辨率之间相互制约,同时计算层析成像还有失锥问题无法避免^[14];编码孔径光谱成像技术在一次像面插入编码模板,成像的过程对光谱图像信息进行了压缩混叠,在观测信息足够稀疏的情况下可以高概率重构,但对于实际应用中涉及的目标,通常稀疏度不能满足高概率重构的条件,重构图像的分辨率远远低于光学系统的分辨率。复分棱镜光谱成像技术同光场多光谱成像技术同样需要通过大面阵探测器,用于接收多个谱段的图像,在现有探测器规模限制下,其空间分辨率受到很大的制约。限于目前高光谱成像系统的空间分辨率,很多重要的运动目标均是大小为几个像元的小目标,如船只或太空目标,在这种情况下,准确获取运动目标的光谱,上述几种光谱成像技术均无法满足要求。

本研究从运动小目标的特点出发,基于 CASSI 系统,提出一种双通道的局部编码光谱成像方法,通过帧间差分去除背景的影响,确定目标的位置及编码矩阵,实现运动目标的局部编码,不但减小了计算量,而且在保证分辨率不变的前提下,提高了重构精度。建立数学模型,设计重构算法,并通过实验仿真对该方法进行了验证,结合统计分析方法分析了重构光谱数据的期望准确性。

1 光谱成像模型

为了解决光谱成像模型问题,提出了光学系统如图 1 所示。

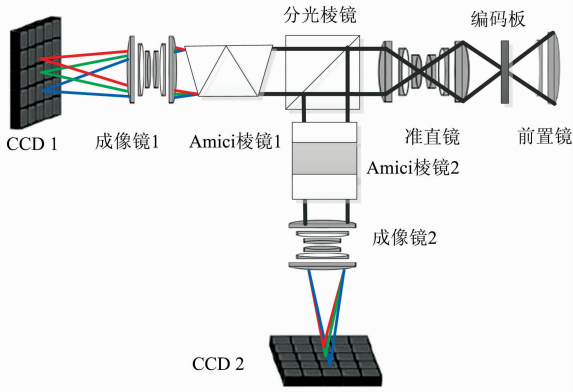


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Optical system schematics

图 1 中分光棱镜将平行光分为两束,分别由两个色散方向垂直的 Amici 棱镜进行分光,最后由成像镜将不同波长的像投影在探测器的不同位置,形成两种不同的混叠图像。假设一次像面上的光谱信息为 $O(x, y, \lambda)$, 编码模板的透过率为 $M(x, y)$, 色散元件使单波段图像在探测器上投影的偏移量为 $R(\lambda)$, 光谱仪部分的放大率为 1。则两个探测器上的能量分布分别为式(1)和式(2)

$$G_1(x, y) = \int O(x - R(\lambda), y, \lambda) M(x - R(\lambda), y) d\lambda \quad (1)$$

$$G_2(x, y) = \int O(x, y - R(\lambda), \lambda) M(x, y - R(\lambda)) d\lambda \quad (2)$$

由于编码模板和探测器输出的图像都是离散的,因此可以改写为离散形式[式(3)和式(4)]

$$G_1(m, n) = \sum_{k=1}^s O(i - R(\lambda_k), j, \lambda_k) M(i - R(\lambda_k), j) \quad (3)$$

$$G_2(m, n) = \sum_{k=1}^s O(i, j - R(\lambda_k), \lambda_k) M(i, j - R(\lambda_k)) \quad (4)$$

两个探测器分别记录了目标被调制,并产生横向和纵向色散后的能量分布,根据两组数据,可以判断目标的相对位置,以及对应的编码模板,如图 2 所示。

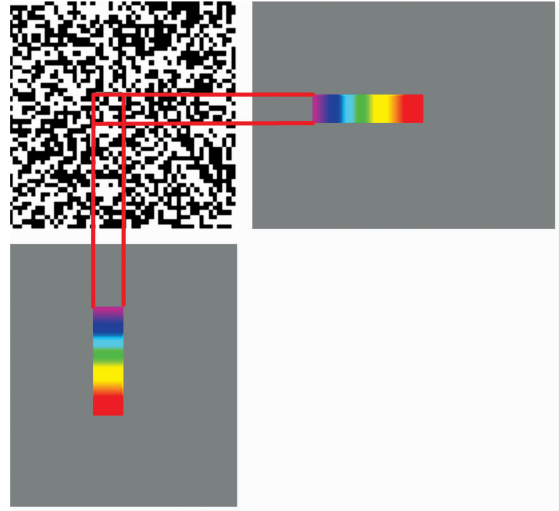


图 2 判断目标相对位置及对应编码模板的示意图

Fig. 2 The schematic diagram of determining the position of the target on the sensor and the corresponding coding sub-aperture

2 重构方法

假设在运动目标未出现前,观测的背景信息为 $O_b(i, j, \lambda_k)$, 观测数据为 $G_1(m, n)$ 和 $G_2(m, n)$ 。运动目标出现后观测区域的信息为 $O_v(i, j, \lambda_k)$, 观测的数据为 $G'_1(m, n)$ 和 $G'_2(m, n)$, 可用式(5)和式(6)表示

$$G'_1(m, n) - G_1(m, n) = \sum_{k=1}^s [O_v - O_b] M(i - R(\lambda_k), j) \quad (5)$$

$$G'_2(m, n) - G_2(m, n) = \sum_{k=1}^s [O_v - O_b] M(i, j - R(\lambda_k)) \quad (6)$$

由于运动目标比较小,因此式(5)和式(6)等号两侧的大部分为 0, 只有目标所在位置不为 0, 提取目标所在位置对应的编码为 M_{sub} , 记两个通道获得的数据差分后不为 0 的部分为 G_1^{v-b} 和 G_2^{v-b} , 对应观测区域目标与背景信息的差分目标信息为 O_{v-b} , 则

$$G_1^{v-b}(r, s) = \sum_{k=1}^s O_{v-b}(p - R(\lambda_k), q, \lambda_k) M_{\text{sub}}(p - R(\lambda_k), q) \quad (7)$$

$$G_2^{v-b}(r,s) = \sum_{k=1}^S O_{v-b}(p,q-R(\lambda_k),\lambda_k)M_{\text{sub}}(p,q-R(\lambda_k)) \quad (8)$$

式(7)和式(8)相对于式(3)和式(4)的规模减小很多,在求解速度和重构概率方面都有比较大的优势。

联立式(7)和式(8)两个方程组,可将式(7)和式(8)改写为

$$y = Ax \quad (9)$$

式(9)中 y 为 $G_1^{v-b}(r,s)$ 和 $G_2^{v-b}(r,s)$ 组成的向量, A 为变换矩阵, x 为目标与背景的差值向量。若方程(9)是适定方程,则可以得到准确的解。但其适定与否取决于目标位置所对应的编码,而由于编码是随机的,无法精确的分析方程的特征。引入统计分析方法,在仿真实验中对重构结果的 peak signal-to-noise ratio(PSNR)进行分析。

3 仿真实验及讨论

仿真过程采用自研高光谱成像仪获取的天空的高光谱图像数据作为背景,数据大小为 $512 \times 512 \times 30$, 编码模板采用 512×512 大小的随机编码模板,根据模型仿真成像过程,加入占像元数为 3×3 的目标,如图 3(a-f),目标出现后与背景的光谱混叠图像进行差分运算,得到图 4(a)和(b)两组数据,除运动目标所在区域,其他部分的背景信息的影响均被消除,从而可以识别出运动目标相对探测器所在的位置,并根据相对位置提取所对应的编码矩阵和差分响应数据,完成光谱图像重构。重构后的光谱是目标与背景光谱的差值,由于背景是比较均匀的,其光谱可以精确重构,将两者相加获得运动目标的完整光谱图像数据。

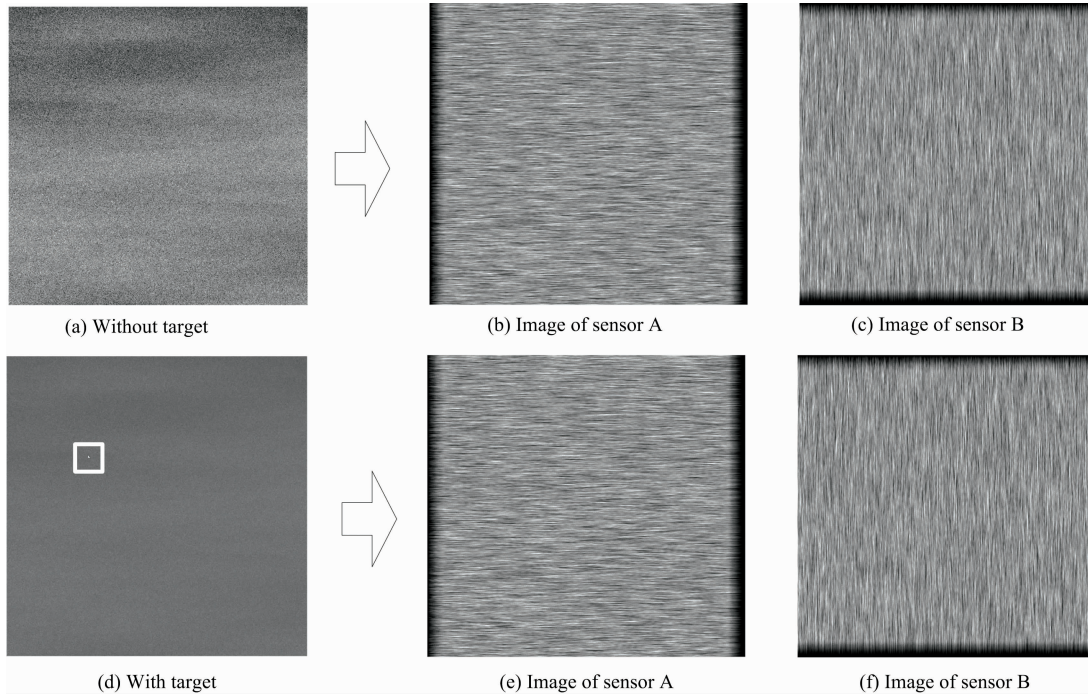


图 3 成像过程仿真

Fig. 3 Imaging process simulation

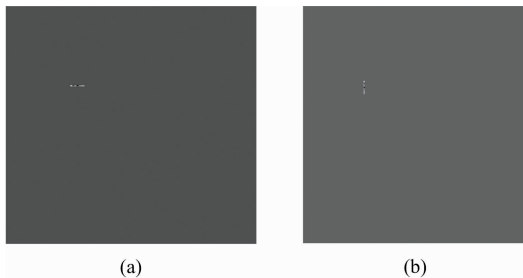


图 4 差分图像 (a)Sensor A 获得数据 (b)Sensor B 获得数据

Fig. 4 Differential image (a) data from sensor A (b) data from sensor B

由于编码模板有一半编码孔不透光,因此单次重构不能获取目标全部位置的光谱数据,但经过多帧重构数据叠加后,得到所有 9 个位置的光谱数据如图 5(a-i),重构结果比较好,编码最优的时候 PSNR 可以达到 60 db 以上。如果使用 TwIST 算法重构,通过设置合适的正则化参数,可以获得运动目标的位置信息,如图 6(a)和(b),但目标的光谱信息误差比较大,无法识别出其光谱特征。

为了更加全面的分析所描述均匀背景中运动小目标的光谱成像方法,分别对不同条件下重构数据的 PSNR 的密度分布进行了分析,通过改变运动目标的尺寸,随机出现在视场内不同的位置,重复仿真实验 100 次,统计分析,不同条件下重构光谱的 PSNR 期望值,如表 1 所示。

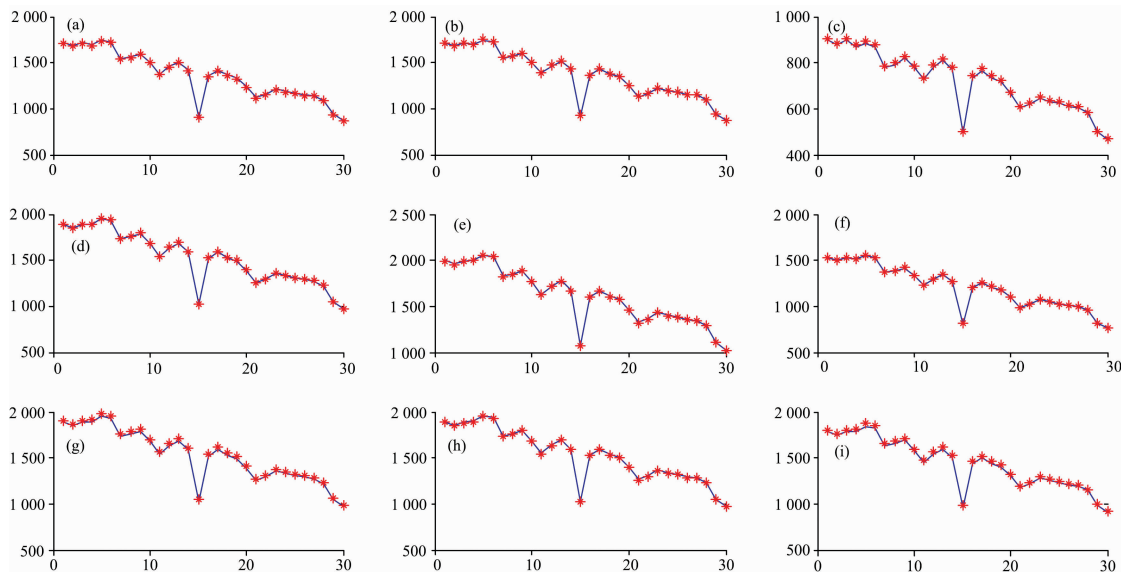


图 5 运动目标的重构光谱曲线

Fig. 5 Recovery spectrum of moving target

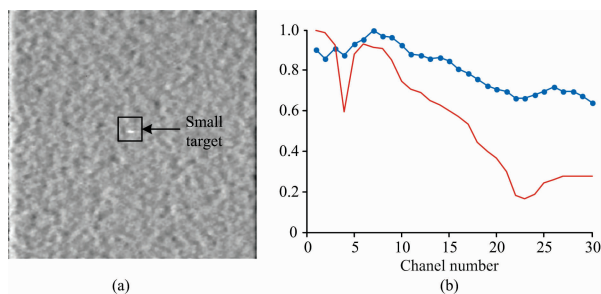


图 6 TwIST 算法重构结果

(a): 重构单波段图像; (b): 重构结果与原始数据对比

Fig. 6 The reconstruction results of TwIST algorithm

(a): Reconstruction results of single-band images;

(b): Compared with the original data

表 1 说明, 在目标不大于 5×5 个像元时, 可以期望获得的运动目标的光谱数据具有比较高的可信度, 期望 PSNR 可以达到 25 db 以上, 目标越小, 精度越高。本文没有对多个目标进行分析, 主要由于均匀背景中出现多个目标时, 可以看成是稀疏的目标, 根据表 1 的数据, 在同样的重构精度下, 稀疏度越大, 可观测的目标尺寸越大, 只要多个目标分布的稀疏性达到一定的要求, 就可以以比较高的精度重构其光谱数据。

表 1 不同条件下重构光谱的 PSNR 期望值 (db)

Table 1 The expected value of PSNR of reconstructed spectrum under different conditions

m	n	K=0.4				K=0.5			
		2	3	4	5	2	3	4	5
1		51.58	50.95	47.64	45.12	51.25	50.17	47.25	44.88
2		51.62	45.85	45.54	41.45	47.64	42.28	41.64	36.16
3		48.21	43.50	39.05	38.98	42.40	39.30	35.29	30.80
4		45.89	39.21	36.19	34.08	38.89	34.03	28.33	28.40
5		43.16	36.52	32.00	29.77	38.05	32.35	25.17	25.46

4 结 论

在特殊情境下, 运动的小物体会成为重要的观测目标, 需要实时获取高光谱图像的技术。针对小运动目标的监测提出一种基于双通道的局部编码光谱成像方法, 可以在均匀背景中实时获取运动的小目标的光谱图像和位置。由于背景信号的干扰, 光谱数据的稀疏性并不满足 RIP 条件, 利用压缩感知原理重构光谱数据存在比较大的误差。本工作提出的方法, 通过设置合理的谱段数和编码模板的稀疏性, 可以在比较大的概率下准确获得目标的光谱图像。虽然应用范围比较小, 但可以实时高概率的重构运动小目标的光谱图像, 对于特殊情况下的应用具有比较大的价值。

References

[1] XIANGLI Bin, ZHAO Bao-chang, XUE Ming-qiu(相里斌, 赵葆常, 薛鸣球). Acta Optica Sinica(光学学报), 1998, 18(1): 18.
 [2] Itoh K, Ohtsuka Y. Journal of The Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision, 1986, 3(1): 94.
 [3] Wang Wei, Chen Jiapin, Aleksandar Zivkovic, et al. Sensors, 2016, 16(10): 1611.
 [4] Nahum Gat. Wavelet Applications III. Florida: Orlando, 2000. 4056.
 [5] James T Daly, W Andrew Bodkin, William J Schneller, et al. Photodetectors: Materials and Devices V. California: San Jose, 2000. 3948.

- [6] Sellar R, Boreman G. *Applied Optics*, 2005, 44(9): 1614.
- [7] WANG Yue-ming, LANG Jun-wei, WANG Jian-yu(王跃明, 郎均慰, 王建宇). *Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展)*, 2013, 50(1): 010008.
- [8] Michael W Kudenov, Julia Cravenjones, Riley W Aumiller, et al. *Optical Engineering*, 2012, 51(4): 044002-1.
- [9] Gehm M, John R, Brady D. *Optics Express*, 2007, 15(21): 14013.
- [10] Wagadarikar A, John R, Willett R. *Applied Optics*, 2008, 47(10): B44.
- [11] Su L, Zhou Z, Yuan Y. *Optik*, 2015, 126(9): 877.
- [12] ZHOU Zhi-liang(周志良). *Research on Light Field Imaging Technology(光场成像技术研究)*. University of Science and Technology of China(中国科学技术大学), 2012.
- [13] Gorman A, Fletcherholmes D, Harvey A. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5602.
- [14] Nathan Hagen, Michael W Kudenov. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 090901.

Spectrum Acquisition of Dynamic Small Objects in Uniform Background

WANG Jian-wei^{1,2}, ZHAO Yan¹, LI Wei-yan², PEI Lin-lin², SUN Jian-ying², SUN Cheng-ming², LÜ Qun-bo², LIU Yang-yang²

1. School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. The Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract Spectrum is a kind of optical information that represents the properties of the material. By using spectral imager, the spectral image of the objects can be obtained in the field of view. At present, mature spectral imaging techniques require multiple snapshot to get a complete spectral image data cube. The time resolution of the corresponding system is relatively low, which is not suitable for the spectral acquisition of dynamic target, and the acquisition of dynamic target spectrum requires a snapshot imaging technique. Snapshots of spectral imaging has great advantage in dynamic target spectral imaging, the coded aperture snapshot spectral imaging (CASSI) technology is one method that integrates a compressive perceptual computation methodology into the spectral imaging procedure and the data cube reconstruction process. In the process of imaging, the data compression is completed, and CASSI has the advantage of high throughput. It is possible to reconstruct the target spectral data cube and realize the snapshot imaging by using the single exposure data, which makes it possible to monitor the dynamic target. But the targets information is difficult to prove the sparse hypothesis of this method, leading to a large reconstruction error, which is unfavorable to the monitoring of dynamic small targets. On the basis of CASSI, a new method of double dispersion channel coding aperture spectral imaging system is presented, which is used to obtain the spectral data of dynamic small targets in uniform background. The system consists of two channels, each containing a spectrometer whose dispersion directions are perpendicular to each other, and shares a front-end telescope system and coded aperture. Because the dispersion directions of the two channels are perpendicular to each other, the position of the small target and the corresponding coding can be separated from the background for spectral data reconstruction. So this new system can observe small dynamic targets in uniform background area in real time. Assuming that the radiation characteristic of the background changes little before and after the target appears in the field of view, the background spectrum can be calculated using the data before the target appears. And the target spectrum can be recovered through specific algorithm by utilizing the separated data and background spectrum. An imaging process mathematical model is established, and the reconstruction method has been tested. The target was made to randomly appear in a different position, and the PSNR probability distribution of the reconstructed spectrum was speculated. After adjusting the target size, the influence of target size on the reconstruction accuracy was analyzed. At last, the results were compared with the results of TwIST method reconstruction of coded aperture imaging system. Results show that this method improves the precision of target information recovery accuracy, and greatly reduces the computational complexity to realize real-time monitoring for moving targets when target with less than 5×5 pixels in homogeneous background.

Keywords Spectral imaging; Code aperture; Motional object

(Received Jun. 3, 2018; accepted Nov. 16, 2018)