

基于线阵探测器错位成像的超分辨遥感技术

吴泽鹏 成飞 曲耀斌 黄业平

上海卫星工程研究所, 上海 200240

摘要 为了提升光学遥感成像系统的空间分辨率,提出了基于线阵探测器错位成像的超分辨遥感技术,给出了线阵探测器错位排列方式以及获得错位低分辨率图像后的超分辨重建算法。根据光学相机成像原理,构建了代价函数用于正则化的迭代求解。实验中针对超分辨因子为2的情形,进行了错位成像仿真以及超分辨重建。实验结果表明,在采用4组线阵探测器错位的情况下,传统插值投影方法获得的重建图像在等效的奈奎斯特频率处,系统调制传递函数(MTF)计算值为0.01,而所提基于正则化的方法MTF为0.28,相比原始单列探测器在奈奎斯特频率处MTF为0.13也有较大提升。无论是图像视觉效果还是MTF统计结果都验证了所提方法的有效性。该技术在遥感成像领域具有较大的工程应用价值。

关键词 遥感; 遥感成像; 线阵探测器; 错位成像; 超分辨重建

中图分类号 TP75 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.062802

Super-Resolution Remote Sensing Technology Based on Line-Array Detector Dislocation Imaging

Wu Zepeng Cheng Fei Qu Yaobin Huang Yeping

Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

Abstract In order to improve the spatial resolution of optical remote sensing systems, a super-resolution remote sensing technique based on line-array detectors dislocation imaging is proposed. The dislocation arrangement of line-array detectors is presented and the super-resolution reconstruction algorithm is introduced to post-process the dislocated low-resolution images. A cost function is built based on the optical camera imaging theory. In the case of super-resolution factor is 2, the simulation experiments are conducted and the reconstruction methods are applied. Experimental results show that when four dislocated line-array detectors are deployed, the modulation transfer function(MTF) value at the equivalent Nyquist frequency of the reconstructed image is only 0.01 using the traditional interpolation, and the projection method while the MTF value at the same frequency is 0.28 using the proposed regularized reconstruction method. Besides, compared to the single line-array case with the MTF of 0.13 at the real Nyquist frequency, the proposed method also has a great promotion. Both image visual effect and statistical results of MTF validate the effectiveness of the proposed technique. This technology has great application value in the field of remote sensing imaging.

Key words remote sensing; remote sensing imaging; line-array detectors; dislocation imaging; super-resolution reconstruction

OCIS codes 280.4788; 040.1240; 110.3010; 100.6640

1 引言

在航天遥感领域,空间分辨率是衡量光学成像系统的一项重要指标。空间分辨率大于9 m的可见波段遥感图像上仅能粗略识别大型舰船,而2.5~4.5 m分辨率下即可识别大型民航飞机、火车等,分辨率达到0.4~0.75 m时,可以识别轿车、旅行车,当分辨率优于0.2 m时,能够看清车辆雨刷、铁路道钉。所以,空间

收稿日期: 2015-01-24; 收到修改稿日期: 2016-01-31; 网络出版日期: 2016-05-18

作者简介: 吴泽鹏(1988—),男,硕士,工程师,主要从事空间光学遥感成像系统设计及图像处理方面的研究。

E-mail: wuzepeng@mail.ustc.edu.cn

分辨率的提升对光学遥感有着极其重大的意义^[1-2]。

光学遥感相机的空间分辨率与相机光学系统的口径、焦距、相机探测器尺寸、卫星轨道高度等因素相关。而目前光学遥感仪器受系统体积、重量、加工难度等的限制,光学系统的口径和焦距难以大幅增加^[3],而探测器的尺寸也不可能无限地缩小,尤其是红外探测器,缩小其尺寸将导致其灵敏度等性能受到制约,故而对于光学遥感成像仪器,很难通过传统的方式提升空间分辨率^[4-5]。

利用探测器错位成像^[6-7],能够在不改变光学系统口径、焦距、探测器尺寸的前提下,使用超分辨率重建^[8-10],以较小的成本提升遥感图像分辨率,有利于实现光学遥感相机的轻小化。莱卡公司航空遥感相机 ADS40 即具有线阵探测器错位成像模式,可以获得具有更高空间分辨率的图像^[11]。故而采用多组线阵探测器错位成像来实现超分辨率对地光学遥感,在航天遥感领域具有较大的研究意义以及不可忽视的工程应用价值^[12-13]。

本文提出了一种基于线阵探测器错位成像的遥感成像技术,能够以较小的成本获得更高的空间分辨率。首先给出了错位成像模式下焦面线阵探测器的部署方法,然后根据遥感光学系统的成像过程及错位方式,构建了代价函数用于正则化迭代求解,从而可以通过多组探测器捕获的低分辨率图像重建出高分辨率图像。最后,对所提方法进行了错位成像仿真和超分辨率重建的仿真实验。实验结果表明,采用同样的超分辨率重建算法,4 组错位探测器的重建效果要优于仅采用 2 组探测器错位成像。在采用 4 组线阵探测器错位成像的情况下,传统插值投影方法获得的重建图像在等效的奈奎斯特频率处,调制传递函数(MTF)计算值为 0.01,而所提基于正则化的方法 MTF 为 0.28,相比原始单列探测器在奈奎斯特频率处 MTF 为 0.13 也有较大提升。所提方法能够有效提升遥感图像的空间分辨率,改善图像质量。

2 探测器错位成像设计

线阵探测器由一排离散的探测器组成,以矩形探测器为例,线阵探测器形状如图 1 所示。探测器感光区域尺寸为 $d_H \times d_V$,相邻探测器单元之间的间隔为 w 。采用线阵探测器,通过沿轨或垂轨扫描获得地面目标的二维图像。

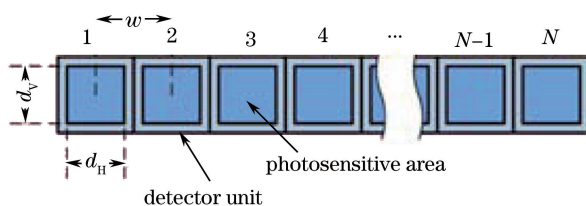


图 1 线阵探测器示意图

Fig. 1 Sketch map of line-array detector

光电遥感成像系统一般为探测器受限系统,地面像素分辨率取决于探测器尺寸、光学系统焦距以及轨道高度。受灵敏度要求、加工工艺等限制,探测器尺寸很难成倍缩小,而光学系统焦距的增加也会带来成像系统体积、重量的较大增加,故而依赖缩小探元尺寸、增加焦距来提升空间分辨率的成本较大、实现困难。

提高空间分辨率的本质是增加图像包含的信息,而最直接的增加图像信息的方法就是从采集端获取更丰富的信息。线阵探测器错位成像即是通过增加探测器,获取了目标场景的更多信息,从而可以重建出具有更高分辨率、更高图像解释尺度的遥感图像。

线阵探测器错位成像示意图如图 2 所示。在光电遥感相机焦面上沿扫描方向排列 P ($P \geq 2$) 组线阵探测器,相邻组线阵探测器在垂直扫描方向错开 n_i 距离,沿扫描方向错开 m_i 距离,距离设置与错位方式相关,可以根据需要进行设置

图 3 中分别列出了几种简单的错位方式所对应的采样网格,其中图 3(a)表示使用两组线阵探测器扫描成像,在垂直扫描方向错位 0.5 倍像素间隔,在沿扫描方向错位 2 倍像素间隔,那么在同样的采样时序控制下,遥感图像采样中心位置仅在垂直扫描方向错位 0.5 pixel。图 3(b)则对应在垂直扫描方向以及沿扫描方向均错位 0.5 pixel。图 3(c)中使用 4 组线阵探测器,采样密度为使用单个探测器成像时候的 2 倍。

使用 P 组线阵探测器,则可以获取目标场景的 P 幅低分辨率图像,需要通过超分辨率重建获取高分辨率图像。

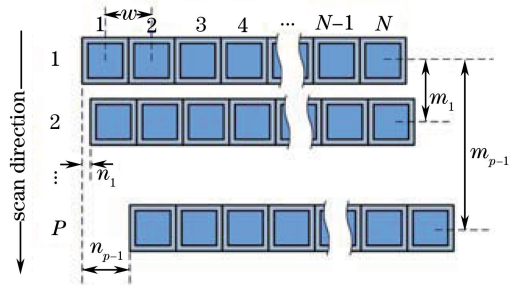
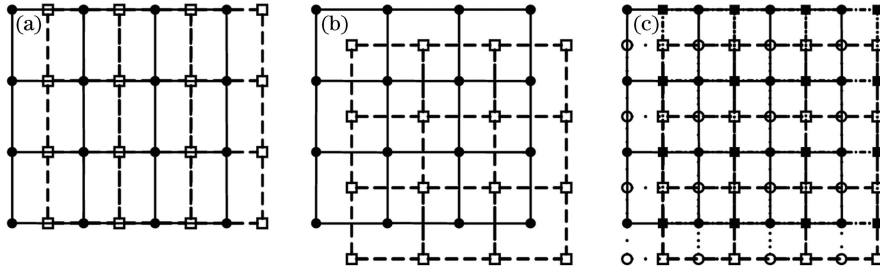


图2 线阵探测器错位成像示意图

Fig. 2 Sketch map of dislocated line-array detectors

图3 三种错位模式。(a) $P=2, n_1=\omega/2, m_1=2\omega$; (b) $P=2, n_1=\omega/2, m_1=3\omega/2$;
(c) $P=4, n_1=\omega/2, m_1=3\omega/2, n_2=\omega/2, m_2=2\omega, n_3=0, m_3=3\omega/2$ Fig. 3 Three types of dislocation mode. (a) $P=2, n_1=\omega/2, m_1=2\omega$; (b) $P=2, n_1=\omega/2, m_1=3\omega/2$;
(c) $P=4, n_1=\omega/2, m_1=3\omega/2, n_2=\omega/2, m_2=2\omega, n_3=0, m_3=3\omega/2$

3 超分辨重建

有着连续亮度函数 $o(x, y)$ 的目标场景由于光学系统的衍射极限、离焦、大气扰动等因素, 图像会存在模糊。而传感器内部以及信号传输中不可避免地引入噪声。从线性理论出发可以知道, 模糊过程可以用与点扩展函数 $h(x, y)$ 的卷积来描述, 最终由探测器采样得到数字图像 $z(i, j)$, 该过程可表示为

$$z(i, j) = D[h(x, y) * o(x, y)] + n(i, j), \quad (1)$$

式中 $D[\cdot]$ 表示降采样函数, $*$ 表示卷积, n 为加性噪声, 该模型中噪声综合了探测器内部噪声、检测噪声以及模型误差等各项因素。降采样函数 $D[\cdot]$ 取决于相机光学系统、探测器的参数设计。

传统重建方法是在插值基础上开展的, 通过如图 3 所示的采样网格, 将低分辨率图像投影至高分辨率图像网格上。而采样网格的通过事先测定的探测器排布位置或者通过低分辨率图像的亚像素级匹配获得。这种重建方法的优点在于算法简单、运算量小, 缺点在于未考虑真实的成像模型, 重建效果较差。

通过 P 幅低分辨率图像 $Z_k (k=1, 2, 3, \dots, P)$ 重建高分辨率图像 o , 根据成像原理, 构建参照模型为

$$z_k = D\{h * W_k[o]\} + \eta_k, \quad (2)$$

式中 $W_k[\cdot]$ 表示由于探测器错位最终导致图像位置变化, η_k 表示噪声。根据(2)式来求解高分辨率图像 o 的过程为求解逆问题, 为了克服逆问题的病态性, 采用正则化的迭代求解方式^[14], 构建代价函数为

$$E(o, h) = \sum_{k=1}^P \|D\{h * W_k[o]\} - z_k\|^2 + \lambda_o Q(o) + \lambda_h Q(h), \quad (3)$$

式中等号右边第一项为保真项, 来源于(2)式的参考模型, $\|\cdot\|$ 表示 L_2 范数, 其余项为约束项, 用于抑制逆问题求解的病态性, 其中约束项 $Q(\cdot)$ 为平滑项, 采用全变分正则项形式, 即

$$Q(o) = \sum_i \sum_j \|\nabla o(i, j)\|, \quad (4)$$

式中 ∇ 表示梯度算子, λ_o, λ_h 分别为约束项对应的权重因子。

由于在(2)式中, 存在 o 与 h 两个独立的变量, 而且(3)式所示的代价函数相对于每个变量都是凸函数,

故而在最小化问题求解时,可以采用交替最小化的方法,第 $t(t \geq 1)$ 次迭代中

$$\begin{cases} o^{(t)} = \operatorname{argmin}_o E[o, h^{(t-1)}] \\ h^{(t)} = \operatorname{argmin}_h E[o^{(t)}, h] \end{cases}, \quad (5)$$

式中初始值 $h^{(0)}$ 可以选择 Delta 函数。

4 错位成像仿真实验及性能评估

4.1 错位成像仿真

若任务需求超分辨因子为 α ,即要求当原始线阵探测器能够实现的地面像素采样间隔为 l 时,重建得到的图像地面像素间隔为 l/α 。从理论角度考虑,设置越多组线阵探测器获取更多的低分辨率图像,对于重建图像效果越有利。而从工程应用的角度,排布越多的探测器对光学系统设计、电子学、数传、图像后处理等都提出了更多的资源需求,故而不可能无限地增加探测器组数。

为了分析不同错位方式下的重建图像效果,进行了实验室仿真实验。通过模拟探测器错位获得对应图 3(c)中 4 幅低分辨率图像如图 4 所示。

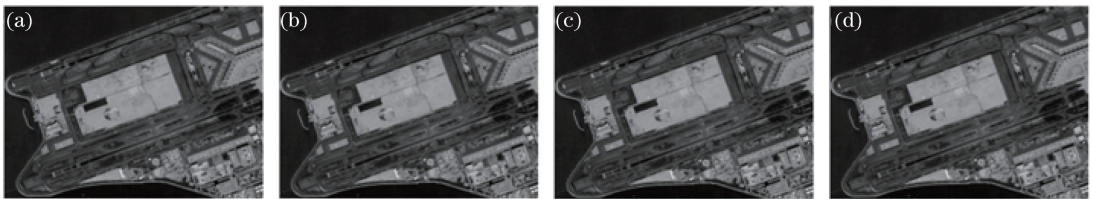


图 4 错位成像模式获得的 4 幅低分辨率图像

Fig. 4 Four low-resolution images obtained in dislocation imaging mode

若仅以其中两幅作为已知,则对应图 3(a)、(b)所示的 $P=2$ 情形。以 $\alpha=2$ 为目标,分别使用 1.2 节给出的重建算法进行超分辨重建,重建图像如图 5 所示。

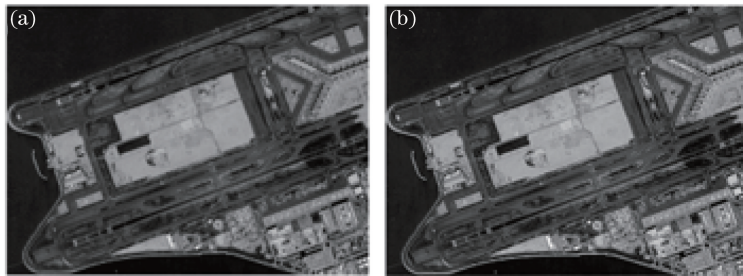


图 5 (a) $P=2$ (水平错位)和(b) $P=4$ 重建得到的高分辨率图像

Fig. 5 Reconstructed high-resolution images using (a) $P=2$ (horizontal dislocation) and (b) $P=4$

通过图 4 与图 5 的图像视觉质量对比可以发现,重建后的图像质量显著提高,而且以 4 幅低分辨率图像重建后的效果要优于两幅图像的重建效果。通过仿真实验,一方面验证了所提超分辨重建算法的有效性,另一方面也验证了错位成像在提升遥感图像分辨率、改善图像质量方面的效能。

4.2 性能分析

以 $\text{MTF}^{[15]}$ 作为遥感图像质量的一项量化评价依据,分别统计原始低分辨率图像以及重建得到的高分辨率图像的 MTF 。实验中,超分辨因子 $\alpha=2$,传统直接插值投影方法选用双线性插值方式。以图 6 分辨率靶标图像作为目标,通过倾斜刃边法^[16-17]计算垂直方向的 MTF ,结果如图 7 所示。

图 7 中横坐标表示归一化的空间频率,以原始低分辨率图像的采样频率进行归一化,那么原始低分辨率图像的奈奎斯特频率对应归一化频率为 0.5,而超分辨因子 $\alpha=2$ 重建得到的高分辨率图像,等效的奈奎斯特频率对应归一化频率为 1 的位置。分别统计这两处典型位置的 MTF ,结果如表 1 所示。

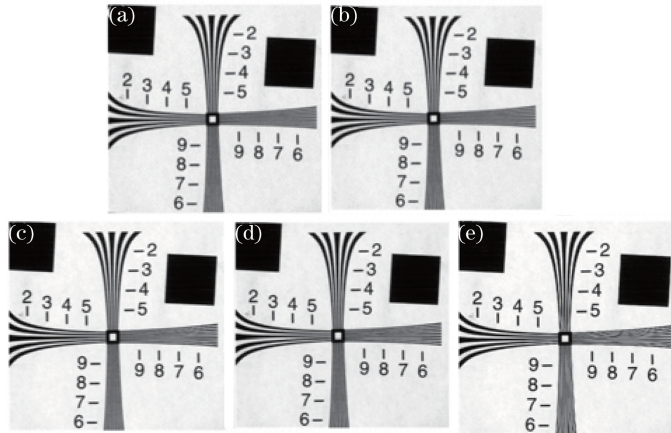


图 6 靶标图像在错位成像模式下的重建。(a) 低分辨率图像；(b) $P=4$, 直接插值投影；(c) $P=2$ (对角错位), 正则化迭代求解；(d) $P=2$ (水平错位), 正则化迭代求解；(e) $P=4$, 正则化迭代求解

Fig. 6 Reconstruction of standard target images using dislocation imaging technique. (a) Low-resolution image; (b) direct interpolation projection when $P=4$; (c) regularized iterative method when $P=2$ (bidiagonal dislocation); (d) regularized iterative method when $P=2$ (horizontal dislocation); (e) regularized iterative method when $P=4$

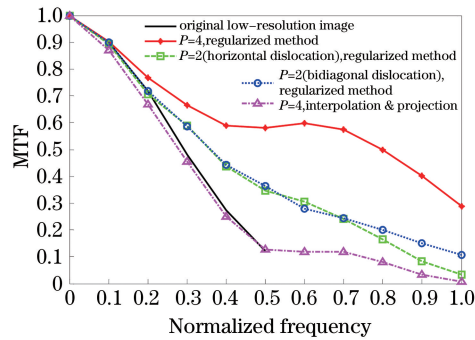


图 7 靶标图像的 MTF 计算结果

Fig. 7 Results of MTF using standard target images

表 1 靶标图像的 MTF 统计结果

Table 1 MTF statistical results using standard target images

	MTF@0.5	MTF@1.0
Original low-resolution image	0.13	—
Reconstructed image using interpolation & projection method	0.13	0.01
Reconstructed image using regularized		
Iterative method when $P=2$ (horizontal dislocation)	0.34	0.03
Reconstructed image using regularized		
Iterative method when $P=2$ (bidiagonal dislocation)	0.36	0.10
Reconstructed image using regularized iterative method when $P=4$	0.58	0.28

由图 7 及表 1 结果可以看出,通过正则化迭代求解获得的图像 MTF 要显著高于直接插值投影的方法,而且 $P=4$ 的重建图像要比 $P=2$ 时的重建图像 MTF 更高,这与直观目视效果也是一致的。相比原始低分辨率图像 0.5 奈奎斯特频率处 MTF 为 0.13,而采用 4 组探测器错位成像,重建图像等效的 1.0 奈奎斯特频率处 MTF 为 0.28,表明本文方法在超分辨重建的同时还改善了图像中的模糊现象,大大提升了遥感系统的空间分辨能力。

通过上述分析过程可知,在超分辨因子 $\alpha=2$ 的条件下, $P=4$ 的重建图像要比 $P=2$ 的重建图像 MTF 更高。通过相同的分析仿真手段可以得到 $P=8$ (或更多的线性探测器组合) 的重建图像 MTF 优于 $P=4$ 的情况。值得提出的是,在航天光学遥感相机实际工程设计过程中,受限于光学系统焦面尺寸和装调技术,错

位成像探测器数目不能无限增加, $P=4$ 是较为合理的设计。

5 结 论

针对目前航天光学遥感相机很难提升空间分辨率的问题,提出了基于线阵探测器错位成像的超分辨遥感技术,分析了线阵探测器错位排列方式以及获得错位图像后的超分辨重建算法。依据遥感光学系统的成像模型,结合错位成像方式,构建了代价函数用于正则化迭代求解。利用仿真实验对所提方法进行了仿真,并通过所提的正则化迭代求解的方法实施了遥感图像的超分辨重建。实验结果表明,采用同样的超分辨重建算法,4组错位探测器的重建效果要优于仅采用两组探测器错位成像。在采用4组线阵探测器错位成像的情况下,传统插值投影方法获得的重建图像在等效的奈奎斯特频率处,MTF计算值为0.01,而所提基于正则化的方法MTF为0.28,相比原始单列探测器在奈奎斯特频率处MTF为0.13也有较大提升。所提方法能够有效提升遥感图像的空间分辨率,改善图像质量。该技术能够以较小的成本获得更高的空间分辨率,在遥感成像领域具有较大的工程应用价值。

参 考 文 献

- 1 Park S C, Park M K, Kang M G, *et al.*. Super-resolution image reconstruction: A technical overview[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 21-36.
- 2 Chen Jian, Gao Huibin, Wang Weiguo, *et al.*. Correlation theory of super-resolution restoration method[J]. Chinese Optics, 2014, 7(6): 897-910.
陈 健, 高慧斌, 王伟国, 等. 超分辨率复原方法相关原理研究[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 897-910.
- 3 Cao Xiaotao, Sun Tianyu, Zhao Yunlong, *et al.*. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope[J]. Chinese Optics, 2014, 7(5): 739-748.
曹小涛, 孙天宇, 赵运隆, 等. 空间大口径望远镜稳像系统发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 739-748.
- 4 Zhou Jinghong, Zhou Cui, Zhu Jianjun, *et al.*. A method of super-resolution reconstruction for remote sensing image based on non-subsampled contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0110001.
周靖鸿, 周 隼, 朱建军, 等. 基于非下采样轮廓波变换遥感影像超分辨重建方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0110001.
- 5 Zhang Hui, Xu Hui, Lin Liangkui. Super-resolution method of closely spaced objects based on sparse reconstruction using single frame infrared data[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0411001.
张 慧, 徐 晖, 林两魁. 基于稀疏重构的空间邻近目标红外单帧图像超分辨方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0411001.
- 6 Xu Shaoxiong, Chen Changzheng, Sun Bin, *et al.*. High-resolution imaging by bi-linear CCD shifting sampling[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0908002.
徐少雄, 陈长征, 孙 斌, 等. 双线阵 CCD 错位采样高分辨成像[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0908002.
- 7 Li Yapeng, He Bin. Modulation transfer function assessment of spaceborne linear charge-coupled device subpixel imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 121102.
李亚鹏, 何 斌. 星载线阵电荷耦合器件错位成像的调制传递函数评估[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121102.
- 8 Yang Wenbo, Zhu Ming, Liu Zhiming, *et al.*. Super-resolution reconstruction of sub-pixel imaging achieved by three linear array detectors[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2247-2258.
杨文波, 朱 明, 刘志明, 等. 基于3线阵探测器的亚像元成像超分辨率重构[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2247-2258.
- 9 Mu Shaoshuo, Zhang Ye, Jia Ping. Super-resolution imaging of multi-frame sub-pixel images based on self-learning LLE[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(9): 2677-2686.
穆绍硕, 张 叶, 贾 平. 基于自学习局部线性嵌入的多幅亚像元超分辨成像[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2677-2686.
- 10 Wang Ling, Zhang Ping, Feng Huajun, *et al.*. An inversion analysis method based on multi-shift imaging for improvement of CCD imaging resolution[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(3): 62-65.

- 王 凌, 张 平, 冯华君, 等. 用多次移位成像提高 CCD 成像分辨力的反演解析法[J]. 光电工程, 2003, 30(3): 62-65
- 11 Mairal J, Elad M, Sapiro G. Sparse representation for color image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(1): 53-69.
- 12 Beck A, Teboulle M. Fastgradient-based algorithms for constrained total variation image denoising and deblurring problems[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(11): 2419-2434.
- 13 Michailovich O V. An iterative shrinkage approach to total-variation image restoration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(5): 1281-1299.
- 14 Sroubek F, Milanfar P. Robust multichannel blind deconvolution via fast alternating minimization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1687-1700.
- 15 Li Yapeng, He Bin. Quantitative evaluation of image quality of CCD subpixel imaging using MTF[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 443-447.
- 李亚鹏, 何 斌. 采用 MTF 定量评估 CCD 错位成像的成像像质[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 443-447.
- 16 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891-2897.
- 李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891-2897.
- 17 He Xiaojun, Zhang Guixiang, Zheng Liangliang, *et al.*. Testing error analysis of high resolution camera modulation transfer function[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(S1): 89-94.
- 贺小军, 张贵祥, 郑亮亮, 等. 高分辨率相机传函测试误差分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 89-94.