

基于 RC 模型的线阵探测器串扰图像复原方法

杨天远*, 余恭敏, 杨小乐, 行麦玲, 周峰

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 针对线阵探测器串扰导致的响应异常、暗信号拖尾的现象,进行了串扰的产生机理分析,建立了复原串扰图像信号波形的 RC 模型,并在此基础上提出了一种串扰图像复原方法。该方法在串扰 RC 模型的基础上,以恢复信号正常响应和消除暗信号拖尾为目标,建立了优化目标函数,并以不同频率的靶标响应曲线为基础,对模型参数进行了迭代,获得了各个图像频率下复原综合效果最优时的模型参数。得到串扰模型参数后,计算出相应的复原函数,通过频域运算对图像进行复原。对实验室实测的扫描相机线阵探测器红外图像进行了复原,结果显示,所提算法能有效复原不同图像频率下不同靶标图像的正常响应,降低了拖尾暗信号的影响,提升了图像质量。

关键词 探测器; 线阵探测器; 信号串扰; 图像复原; 频域运算

中图分类号

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2304001

Method for Crosstalk Image Restoration of Linear Array Detector Based on RC model

Yang Tianyuan*, Yu Gongmin, Yang Xiaole, Xing Mailing, Zhou Feng

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract Aiming at the phenomena of abnormal response and dark signal tailing caused by crosstalk of a linear array detector, we analyze the mechanism of crosstalk generation, establish the RC model which can reproduce the crosstalk image signal waveform. On this basis, we further propose a crosstalk image restoration method. This method is based on the crosstalk RC model and the objective is to recover the normal signal response and eliminate the dark signal tailing. The optimization objective function is established. Based on the target response curves of different frequencies, the model parameters are iterated to obtain the corresponding model parameters when the comprehensive effect of restoration is optimal for each image frequency. After the parameters of the crosstalk model are obtained, the corresponding restoration function is calculated, and the image is restored by the operations in the frequency domain. The infrared images of the linear array detector scanning camera acquired in the laboratory are restored and the results show that the proposed method can effectively restore the normal response of different targets under different image frequencies, reduce the effect of tailing dark signals, and improve the image quality.

Key words detector; linear array detector; signal crosstalk; image restoration; frequency domain operation

OCIS codes 040.1240; 110.3010; 100.2000

1 引 言

信号串扰广泛存在于各类成像系统中,串扰的产生原因有多种,有光串扰和电子串扰等^[1-2]。在各类串扰中,探测器电子串扰是典型的一类^[3-5]。在探测器读出电路以及相应的视频电路中,都有可能产生信号串扰。随着集成电路技术的迅猛发展和应用需求的提高,电子仪器和设备的集成度越来越高,尤其是天基红外系统探测器,其设计规模不断增大,读

出电路的功能越来越复杂,灵敏度越来越高^[6]。虽然在设计时充分考虑了相应的串扰控制措施,但是由于电路规模和复杂性等原因,信号串扰仍难以完全消除。对于高灵敏度探测系统,信号串扰的影响更为严重^[7-9]。

针对不同类型的探测器串扰,可设计对应的串扰控制措施。金革等^[10]提出通过加强电源滤波、不同通道采用差异化器件、杂散辐射屏蔽等方式减少多通道信号系统的串扰;李大宇等^[11]对由探测元间

收稿日期: 2020-05-29; 修回日期: 2020-06-30; 录用日期: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61701023)

* E-mail: yangtianyuan@163.com

的接地电阻引起的多元红外光导探测器的电子学串音进行了分析,提出需要通过减小接地电阻的阻抗、增大偏置电路的电阻等方式来降低电子学串扰。对无法抑制的图像串扰,可采取相应的方法进行图像复原。针对中分辨率成像光谱仪(MODIS)图像的串扰问题,Sun等^[12-14]提出了基于线性近似和月球观测的串扰订正算法、改进的非线性系数串扰订正算法等。针对某推扫型高光谱相机的串扰现象,陶东兴等^[15]利用白色定标地物对串扰进行标定,消除了串扰对光谱维和空间维数据的影响。陈慧伟等^[16]利用建立的通道间串扰的相关性模型,对某多光谱相机的通道间串扰进行了修正。针对风云三号(FY-3D)卫星MERSI信号串扰,肖达等^[17]基于月球点光源成像特性,采用线性近似订正算法进行了图像修正。上述方法从图像串扰现象出发,建立了相应的假设模型,并依据图像统计的方法进行了模型参数修正,但大多数方法中的复原模型与串扰机理相关性不强。

本文分析了线阵探测器图像串扰产生的原因,针对性地提出了基于电阻-电容(RC)系统的串扰图像数学模型,进一步建立了图像串扰的修正方法,并通过实验室测试图像进行了验证。经验证,所提方法对寄生电容产生的探测器串扰图像具有较好的复原效果。

2 线阵探测器串扰模型

2.1 现象描述

利用某扫描型红外相机对靶标进行成像,成像结果如图1所示,其中横轴方向对应不同的探测器像元,纵轴方向对应每个像元的时间序列图像。在扫描方向上,能量均匀分布的杆靶标区域经成像系统后能量分布变得不均匀,同时,杆靶标出现了暗信号拖尾现象。由于图像经过减底处理,拖尾区域的

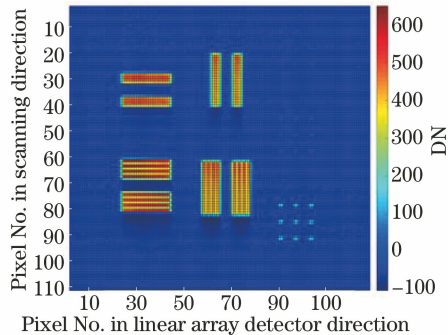


图1 扫描线阵相机的杆靶标图像

Fig. 1 Bar target image of scanning linear array camera

数字化值(DN)为负值。

图1中59号探测器像元对杆靶标的成像结果如图2所示。可以看出,杆靶标的响应和杆靶标后端的本底响应均变得不正常,正常的图像响应信号受到了串扰。

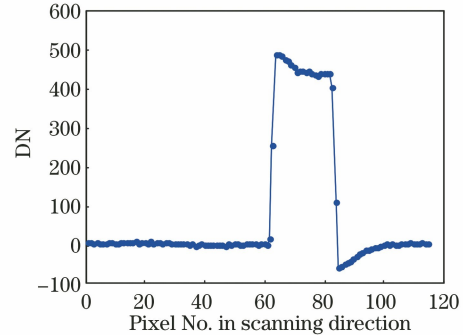


图2 探测器像元对杆靶标的响应

Fig. 2 Response of detector pixel to bar target

探测器串扰对图像质量的影响主要有两点,一方面,串扰会对靶标自身的响应产生影响,使其无法正常对应物方;另外一方面,在响应较高区域的后面有暗影,这会影响暗影处的物方响应。这些现象严重影响了相机的辐射和几何标定,严重时会造成图像信息的缺失。

2.2 RC系统的串扰模型

经分析,上述信号串扰是由探测器电路的寄生电容引起的。所研究相机具有线阵探测器规模大、读出电路功能复杂、电路元件布局紧凑和响应灵敏度高特点,虽然在设计时充分考虑了电路板的布局,但寄生电容产生的影响仍难以完全消除。针对寄生电容对探测器输出电平的影响,可以采用RC模型进行描述,如图3所示,其中 R 、 C 分别为电阻和电容值, Q_0 为零时刻的电容器的电荷, $e_1(t)$ 为输入电压, $e_2(t)$ 为输出电压, $i(t)$ 为电流, t 为时刻。

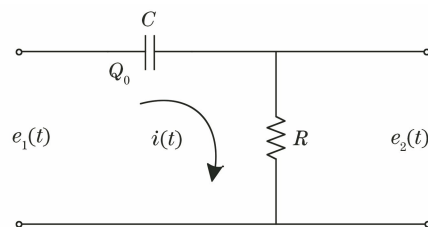


图3 RC模型

Fig. 3 RC model

此时输入电压及输出电压分别为

$$e_1(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + \frac{Q_0}{C} + i(t)R, \quad (1)$$

$$e_2(t) = i(t)R. \quad (2)$$

可以求得

$$e_2(t) = e_1(t) - \frac{1}{RC}e_1(t) \cdot \exp(-t/RC) - \frac{Q_0}{C}\exp(-t/RC)。 \quad (3)$$

考虑输入 $e_1(t)$ 是脉宽为 t_p 的脉冲情况,如图 4 所示。

$$e_1(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{t_p}\right), \quad (4)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗口函数; τ 为脉冲开始时刻。

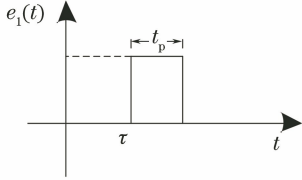


图 4 脉冲输入示意图

Fig. 4 Schematic of pulse input

此时 RC 系统后的响应为

$$e_2(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{t_p}\right) \exp[-(t-\tau)/RC] - U(t-t_p-\tau) \{ \exp[-(t-\tau)/RC] - 1 \} \cdot \exp[-(t-t_p-\tau)/RC], \quad (5)$$

式中: U 为脉冲函数的响应系数。响应对应的波形如图 5 所示。

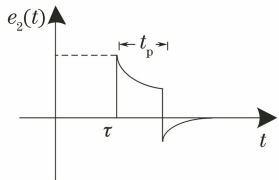


图 5 脉冲输出示意图

Fig. 5 Schematic of pulse output

可以发现,此波形与图 2 杆靶标的形状高度吻合,经验证,采用合适的参数可以对靶标的串扰形状

进行复现,由于串扰复现与后文靶标复原互为逆运算,此处不再赘述。本文在 RC 模型的基础上,设计了串扰图像复原方法,并对串扰图像进行了复原。需要说明的是,本文所提模型是针对探测器模拟电路的信号串扰,所研究相机的数字视频电路的信号串扰相比探测器模拟电路的信号串扰是十分微弱的,不在本文讨论范畴内。

3 串扰图像的复原方法

3.1 复原原理

采用频域运算的方法对串扰图像进行复原。对 (3) 式进行拉普拉斯变换,变换结果为

$$E_2(s) = E_1(s) \left[-\frac{1}{RC} \times \frac{1}{s+1/(RC)} + 1 \right] - \frac{Q_0}{C} \times \frac{1}{s+1/RC}, \quad (6)$$

式中: $E_2(s)$ 为频域图像序列; $E_1(s)$ 为复原图像序列对应的频域序列; s 为频率。

所以

$$E_1(s) = \frac{E_2(s) + \frac{Q_0}{C} \times \frac{1}{s+1/(RC)}}{-\frac{1}{RC} \times \frac{1}{s+1/(RC)} + 1}。 \quad (7)$$

一般情况下, $Q_0 = 0$ 。为了提升串扰图像的复原效果,可将 $E_1(s)$ 修正为

$$E_1(s) = \frac{E_2(s)}{-\frac{a_0}{RC} \times \frac{1}{s+1/(RC)} + 1}, \quad (8)$$

式中: a_0 为修正系数。

再对 $E_1(s)$ 进行拉普拉斯反变换即可得到 $e_1(t)$ 。因此串扰图像的复原方法为:首先对串扰图像每个探测器像元的时间序列图像进行拉普拉斯变换,获得频域图像序列 $E_2(s)$;然后利用求得的串扰参数计算得到复原图像序列对应的频域序列 $E_1(s)$;最后将复原图像的频域序列进行拉普拉斯反变换即得到复原图像,具体流程如图 6 所示。

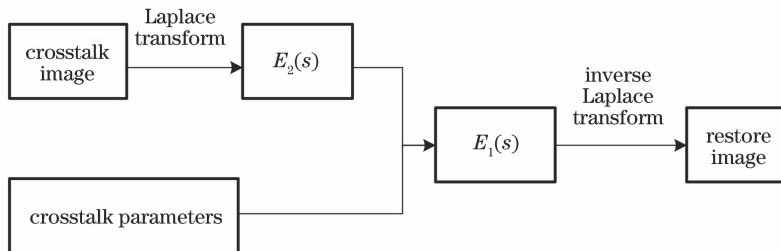


图 6 串扰图像的复原流程

Fig. 6 Flow chart of crosstalk image restoration

从复原方法可知,串扰图像复原的关键在于串扰模型参数的求解。

3.2 参数求解方法

由(8)式可知,串扰模型参数有两个,它们分别为

$$P_1 = a_0, \quad (9)$$

$$P_2 = \frac{1}{RC}. \quad (10)$$

求解串扰模型参数的思路是通过迭代不同的串扰参数,利用图6所示的串扰图像复原流程对指定图像进行复原,通过评价不同参数对应的复原结果求得最优解。因此,首先需要建立评价复原结果的优化目标函数。基于前文关于探测器串扰对图像响应影响的分析,图像复原的目标有两个:1)图像中不同频率的靶标响应接近实际物方响应;2)拖尾暗影区域复原至均匀且接近于0。

针对不同的图像复原需求,设计优化目标函数 T_1 、 T_2 、 T_3 ,分别为

$$T_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [k_t(i)]^2}{n}}, \quad (11)$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [k_b(i)]^2}{n}}, \quad (12)$$

$$T_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [x(i,j)]^2}{m \cdot n}}, \quad (13)$$

式中: $k_t(i)$ 为顶部曲线采用最小二乘法拟合后的斜率; n 为曲线条数; $k_b(i)$ 为底部曲线采用最小二乘法拟合后的斜率; $x(i,j)$ 为第*i*条曲线第*j*元的响应; m 为曲线计算区域像元个数。

T_1 、 T_2 、 T_3 函数分别为靶标区域复原后的响应均匀性函数、靶标拖尾区域复原后的响应均匀性的函数和靶标拖尾区域复原后响应残差的函数。当三个函数取得最小值时,即对应靶标区域的响应均匀,信号拖尾区域响应均匀且 DN 均值接近 0。

建立综合优化目标函数为

$$T = \epsilon_1 T_1 + \epsilon_2 T_2 + \epsilon_3 T_3, \quad (14)$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 为优化权重,依据实际优化需求进行调整。

选择图像中不同频率靶标对应的探测器时间序列图像,通过迭代 P_1 和 P_2 参数,求得 T 最小时的参数组合。

4 实验验证

采用某扫描型红外相机的短波线阵探测器进行测试与复原结果验证。

4.1 参数计算

通过选择刃边靶标在不同空间频率下的响应序列,对参数进行标定。刃边靶标的响应图像如图7所示。

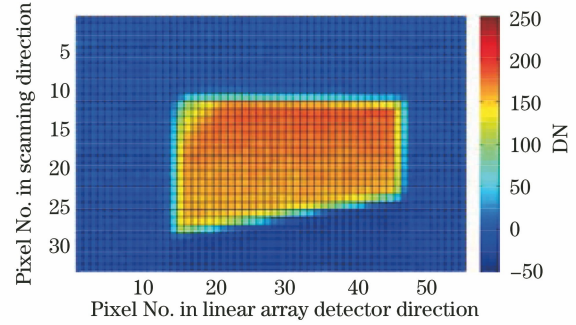


图7 刃边靶标图像

Fig. 7 Edge target image

选择刃边靶标区域第15~46号像元的时间响应序列进行串扰模型参数的标定。以探测器第20、25、30、35号像元为例,响应曲线如图8所示。

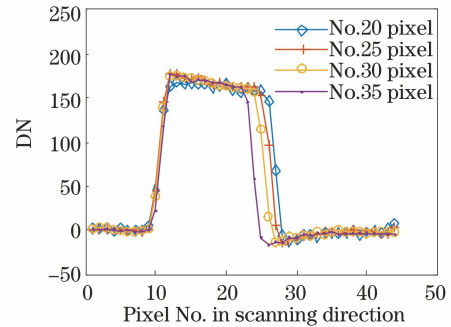


图8 探测器各元对刃边靶标的响应

Fig. 8 Response of each detector pixel to edge target

在(14)式中,优化权重 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 均选为 1/3,则 T 的拟合结果随 P_1 、 P_2 的变化如图9所示。

由拟合结果得到,当 $P_1 = 9.1$ 、 $P_2 = 20.6$ 时, T 有最小值。因此可采用此组参数对图像进行复原。

4.2 图像复原结果

在4.1节选取的参数下,通过3.1节的方法,对测试的杆靶标和孔靶标进行了图像复原。

4.2.1 杆靶标的复原结果

图10为杆靶标的复原结果,可以看出,杆靶标响应区域的均匀性得到改善拖尾的暗影得到了改善。

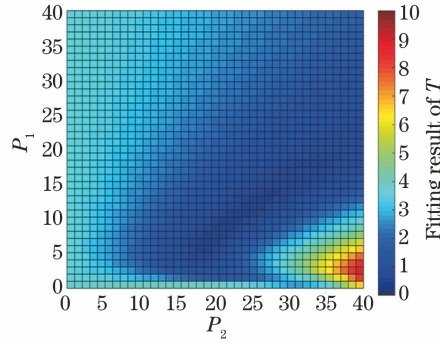


图 9 不同 P_1 和 P_2 下 T 的拟合结果

Fig. 9 Fitting results of T under different P_1 and P_2

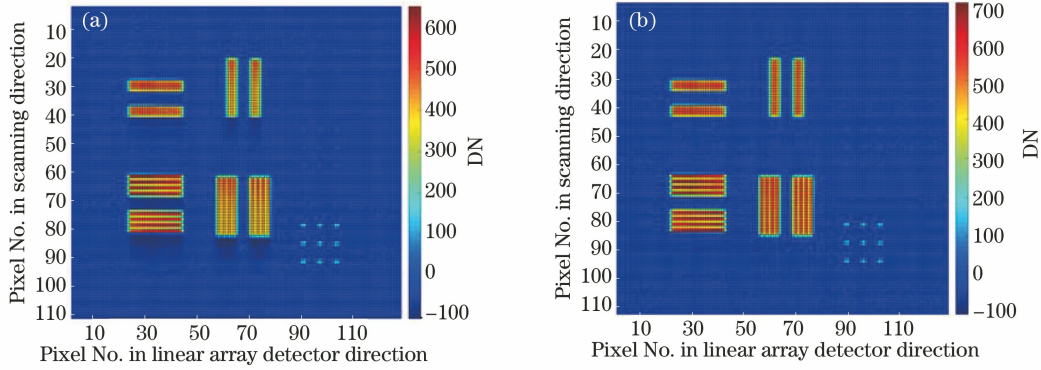


图 10 杆靶标图像复原前后结果。(a)复原前;(b)复原后

Fig. 10 Results before and after bar target image restoration. (a) Before restoration; (b) after restoration

图 11 为图 1 中 59 号探测器像元复原前后的响应。

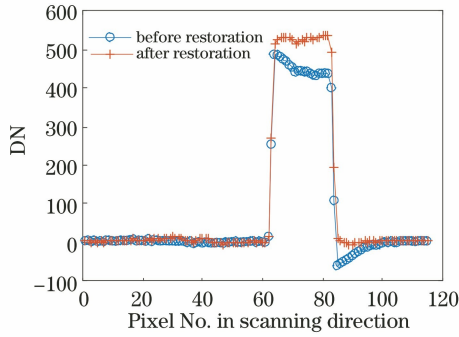


图 11 探测器像元复原前后的响应

Fig. 11 Responses of before and after detector pixel restoration

以复原后靶标响应区域的 DN 均值为标准值, 拖尾区域的标准值设为 0, 则靶标响应区域标准值 R_{sg} 以及复原前后的最大偏差 D_{mg} 、平均偏差 D_{ag} 、最大偏差比 D_{mgr} 、平均偏差比 D_{agr} 分别为

$$R_{sg} = \frac{\sum_{i=s_{ng}}^{e_{ng}} x(i)}{e_{ng} - s_{ng} + 1}, \quad (15)$$

$$D_{mg} = \max(|x(i) - R_{sg}|), i = s_{ng}, s_{ng} + 1, \dots, e_{ng}, \quad (16)$$

$$D_{ag} = \frac{\sum_{i=s_{ng}}^{e_{ng}} |x(i) - R_{sg}|}{e_{ng} - s_{ng} + 1}, \quad (17)$$

$$D_{mgr} = \frac{D_{mg}}{R_{sg}}, \quad (18)$$

$$D_{agr} = \frac{D_{ag}}{R_{sg}}, \quad (19)$$

式中: $x(j)$ 为探测器第 j 个像元的响应; s_{ng} 为计算区域起始坐标; e_{ng} 为计算区域结束坐标。

拖尾区域标准值 R_{si} 以及复原前后的最大偏差 D_{mi} 、平均偏差 D_{ai} 、最大偏差比 D_{mir} 、平均偏差比 D_{air} 分别为

$$R_{si} = 0, \quad (20)$$

$$D_{mi} = \max(|x(i)|), i = s_{ni}, s_{ni} + 1, \dots, e_{ni}, \quad (21)$$

$$D_{ai} = \frac{\sum_{i=s_{ni}}^{e_{ni}} |x(i)|}{e_{ni} - s_{ni} + 1}, \quad (22)$$

$$D_{mir} = \frac{D_{mi}}{R_{sg}}, \quad (23)$$

$$D_{air} = \frac{D_{ai}}{R_{sg}}, \quad (24)$$

式中： s_{ni} 为计算区域起始坐标； e_{ni} 为计算区域结束坐标。表 1 和表 2 分别为采用本文算法复原前后杆靶标区域和杆靶标拖尾区域的最大偏差、最大

偏差、平均偏差、最大偏差比和平均偏差比。可以看出，本文复原方法可对此杆靶标串扰图像进行有效复原。

表 1 杆靶标区域图像的复原结果

Table 1 Results of image restoration in bar target region

R_{sg}	Before restoration				After restoration			
	D_{mg}	D_{ag}	D_{mgr}	D_{agr}	D_{mg}	D_{ag}	D_{mgr}	D_{agr}
528.88	97.51	79.76	18.44%	15.08%	15.95	4.74	3.02%	0.90%

表 2 杆靶标拖尾区域图像的复原结果

Table 2 Results of image restoration in bar target tailing region

R_{si}	Before restoration				After restoration			
	D_{mi}	D_{ai}	D_{mir}	D_{air}	D_{mi}	D_{ai}	D_{mir}	D_{air}
0	60.63	17.72	11.46%	3.35%	9.54	3.85	1.80%	0.73%

4.2.2 刃边靶标复原结果

图 12 为孔靶标图像的复原结果，可以看出，响应区域的均匀性得到改善，拖尾的暗影也得到了

改善。

刃边靶标第 20、25、30、35 号像元复原前后结果如图 13 所示。

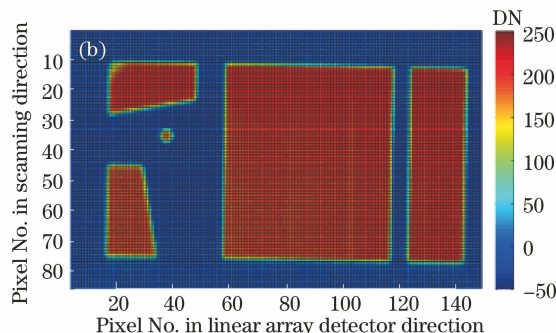
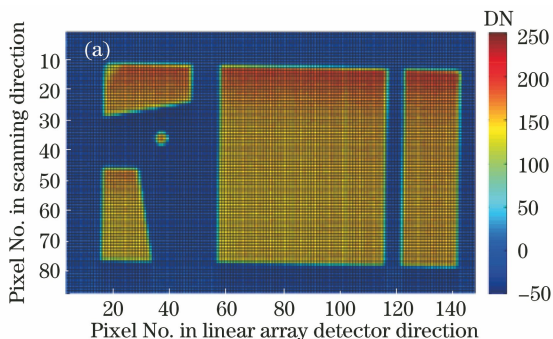


图 12 孔靶标图像复原前后的结果。(a)复原前；(b)复原后

Fig. 12 Results of before and after hole target image restoration. (a) Before restoration; (b) after restoration

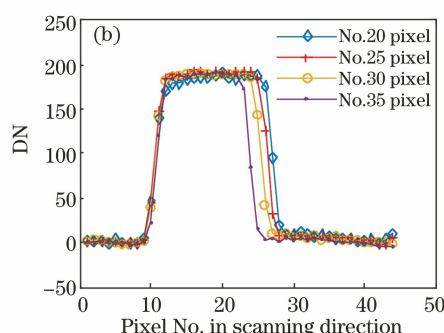
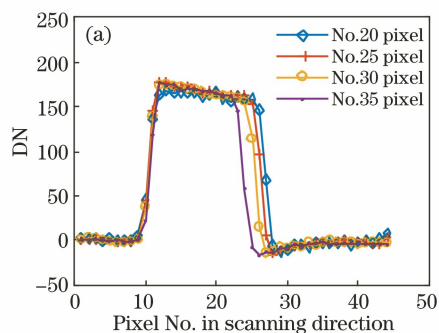


图 13 刃边靶标复原前后的响应。(a)复原前；(b)复原后

Fig. 13 Responses of before and after edge target restoration. (a) Before restoration; (b) after restoration

表 3 和表 4 分别为采用本文算法复原前后刃边靶标区域和刃边靶标拖尾区域的最大偏差、最大偏差、平均偏差、最大偏差比和平均偏差比。可以看出，本文复原方法可对此刃边靶标串扰图像进行有效复原。

主要原因是探测器串扰在线列方向和扫描方向均有可能出现，而本文仅建立了扫描方向的复原函数并进行了图像的复原。因此，对于靶标分布更为密集和复杂的刃边靶标区域，靶标之间的相互影响比杆靶标更大，对图像拖尾的信号干扰更为严重，因此对于拖尾区域，刃边靶标的复原结果不及杆靶标。

对复原后的偏差比进行比较，刃边靶标拖尾区域的复原结果不及杆靶标复原结果。经分析，

表 3 刃边靶标区域图像的复原结果

Table 3 Results of image restoration in edge target region

Pixel number	R_{sg}	Before restoration				After restoration			
		D_{mg}	D_{ag}	$D_{mgr}/\%$	$D_{agr}/\%$	D_{mg}	D_{ag}	$D_{mgr}/\%$	$D_{agr}/\%$
20	204.19	41.68	34.58	20.41	16.94	6.62	1.75	3.24	0.86
25	205.47	44.44	35.04	21.63	17.05	3.82	1.43	1.86	0.70
30	202.89	42.37	34.57	20.88	17.04	3.15	1.26	1.55	0.62
35	205.18	46.57	34.47	22.70	16.80	4.51	1.08	2.20	0.53

表 4 刃边靶标拖尾区域图像的复原结果

Table 4 Results of image restoration in edge target tailing region

Pixel number	R_{si}	Before restoration				After restoration			
		D_{mi}	D_{ai}	$D_{mir}/\%$	$D_{air}/\%$	D_{mi}	D_{ai}	$D_{mir}/\%$	$D_{air}/\%$
20	0	23.49	10.62	11.50	5.20	6.50	3.03	3.18	1.48
25	0	18.97	10.10	9.23	4.92	8.54	4.31	4.16	2.10
30	0	18.49	9.22	9.11	4.54	7.63	4.16	3.76	2.05
35	0	19.38	10.18	9.45	4.96	10.47	7.32	5.10	3.57

5 结 论

对线阵探测器串扰的产生机理进行了分析,建立了串扰图像的数学模型,依据串扰模型进行了图像复原。结果显示,所提方法可以有效降低探测器串扰对图像质量的影响,有效还原图像信息。在实际应用中,探测器的串扰还包括数字化电路的串扰等多种类型,需要在复原结果上进行精细调整。因此,可以将所提方法进行优化,并针对线列方向和扫描方向不同的串扰特点,分步骤进行图像复原。同时,所提方法对线阵探测器帧间响应串扰的修复同样具有参考意义。

参 考 文 献

- [1] Long W, Wang R, Xu Z J. Research status and development of crosstalk in the infrared imaging systems [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100004.
龙弯, 王睿, 许中杰. 红外成像系统中串扰效应的研究现状与进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 100004.
- [2] Bernal M P, Burr G W, Coufal H, et al. Balancing interpixel cross talk and detector noise to optimize areal density in holographic storage systems [J]. Applied Optics, 1998, 37(23): 5377-5385.
- [3] Liang H L, Cai Y, Yao Y, et al. Electrical crosstalk of multi-element photoconductive HgCdTe detectors [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1997, 16(1): 76-80.
梁宏林, 蔡毅, 姚英, 等. 多元光导碲镉汞探测器的电串音 [J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(1): 76-80.

- [4] Stevens E, Komori H, Doan H, et al. Low-crosstalk and low-dark-current CMOS image-sensor technology using a hole-based detector [C] // 2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference—Digest of Technical Papers, February 3-7, 2008, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2008: 10047790.
- [5] Nelson R D, Schechter D. Line spread function, crosstalk, and modulation transfer function for silicon IR detector arrays [J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(6): 4262-4269.
- [6] Casey E J, Kafesjian S L. Infrared sensor modeling for improved system design [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2743: 23-34.
- [7] Xu N, Wu R H, Hu X Q, et al. Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1228001.
徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1228001.
- [8] Wang L, Hu X Q, Zheng Z J, et al. Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in south and north poles [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0212003.
王玲, 胡秀清, 郑照军, 等. 联合南北极冰雪目标的 FY-3A/MERSI 辐射定标跟踪监测 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0212003.
- [9] Fan A, Xu N, Xu T F, et al. Identification and normalization of image gain of FY-3A MERSI shortwave infrared bands [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1111001.
樊阿馨, 徐娜, 许廷发, 等. FY-3A MERSI 短波红外通道图像增益突跳自动识别和归一 [J]. 光学学

- 报, 2018, 38(11): 1111001.
- [10] Jin G. The crosstalk in multi-channel system [J]. Electronic Measurement Technology, 1999, 22(1): 1-3. 金革. 多通道系统中的信号串扰现象[J]. 电子测量技术, 1999, 22(1): 1-3.
- [11] Li D Y, Duan X H, Wei H D. Study on electrical crosstalk of multi-element infrared photoconductive detectors[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 952-955. 李大宇, 段星辉, 魏焕东. 多元红外光导探测器电子学串音研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 952-955.
- [12] Sun J Q, Xiong X X, Li Y H, et al. Evaluation of radiometric improvements with electronic crosstalk correction for terra MODIS band 27 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6497-6507.
- [13] Sun J, Madhavan S, Xiong X, et al. Electronic crosstalk in Terra MODIS thermal emissive bands [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9607: 96070V.
- [14] Sun J, Madhavan S, Wenny B N, et al. Terra MODIS band 27 electronic crosstalk: cause, impact, and mitigation [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8176: 81760Z.
- [15] Tao D X, Jia G R, Zhao H J, et al. Analysis of optic crosstalk correction for pushbroom hyperspectral data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(11): 3141-3146. 陶东兴, 贾国瑞, 赵慧洁, 等. 推扫型高光谱数据光串扰校正方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 3141-3146.
- [16] Chen H W, Zhao H J, Jia G R. Image crosstalk correction method of the infrared multispectral camera [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(7): 1337-1342. 陈慧伟, 赵慧洁, 贾国瑞. 红外多光谱相机的图像串扰校正方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1337-1342.
- [17] Xiao D, Xu N, Hu X Q, et al. On-orbit detection and correction of crosstalk effect of FY-3D MERSI-II signals [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1011001. 肖达, 徐娜, 胡秀清, 等. FY-3D MERSI-II 信号串扰效应在轨检测及订正[J]. 光学学报, 2020, 40(10):1011001.