

doi:10.3788/gzxb20154409.0911002

基于光谱关联修正多光谱相机的带外响应

李旭阳, 易红伟, 贺天兵

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要: 多光谱遥感可以同时获取地面景物的几何信息和光谱信息, 在光学遥感领域具有广泛的应用前景, 但多光谱相机的蓝色谱段更易出现带外响应. 本文通过建立多光谱遥感相机光谱响应的数学模型, 分析了蓝色谱段易于出现带外响应的原因, 并根据多光谱遥感相机采用的时间延时积分电荷耦合器件的各谱段光谱响应之间的关系, 基于各谱段间的光谱响应关联, 提出了蓝色谱段带外响应的修正方法, 通过对各种典型地物的统计得到了去除带外响应的修正公式, 对典型地物进行修正后的残差可以小于 4%, 能够满足多光谱遥感相机的应用需求. 带外响应的修正结果表明: 基于多光谱相机谱段间的光谱关联修正方法对不同地物具有较好的适应性, 可以有效地修正蓝光谱段的带外响应.

关键词: 多光谱遥感; 带外响应; 光谱关联; 修正

中图分类号: TP722

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0911002-5

Modified Multispectral Camera out-band Response Base on Correlation Spectrum

LI Xu-yang, YI Hong-wei, HE Tian-bin

(Xi'an Institute of Optics and Precision Machinics, CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: Multispectral remote sense camera can obtain geometric and spectral properties of the surface scenery, and will be widely used in optical remote sense fields, but the blue spectrum of multispectral camera is more prone to out-band response. The paper established a mathematical model of multispectral remote sense camera's spectral response, analyzed the reason of the blue band out-band response, and proposed blue spectrum out-band response correction method according to each spectral response relationship of multispectral remote sense camera used Time-Dealy-Integration Charge-Coupled-Device. Through statistics of typical objects obtain the correction formula of correction blue spectrum out-band response, the corrected residuals can be smaller than 4%, can meet the application requirement of multispectral remote sense camera. The correction results show that the correction method based on each spectral response has better applicability in correcting the blue spectrum out-band response.

Key words: Multispectral Remote Sense; Out-band Response; Correlation Spectrum; Correction

OCIS Codes: 110.4234; 280.0280; 280.4778; 280.4991

0 引言

多光谱遥感成像技术是利用不同光谱谱段获取同一地物目标的不同谱段图像, 通过不同谱段间图像的融合, 可以得到地表景物的几何信息和光谱信息, 因此具有广泛的应用前景. 多光谱遥感目前已在国土资源调查与监测、防灾减灾、农林水利、生态环境、城市规划

与建设等领域得到广泛应用^[1].

多光谱遥感相机一般具有从蓝光谱段直到近红外谱段的成像能力, 典型的多光谱相机具有蓝、绿、红和近红外四个谱段. 随着大尺寸晶圆和硅片加工工艺的提高, 多光谱电荷耦合器件 (Charge Couple Device, CCD) 可以在同一个晶圆上刻蚀出来, 可以实现在一个电荷耦合器件内探测多个光谱的目标, 实现方式是将

基金项目: 中国科学院西部之光资助项目

第一作者: 李旭阳 (1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学遥感技术. Email: lixuyang2004@126.com

收稿日期: 2015-01-25; **录用日期:** 2015-05-07

<http://www.photon.ac.cn>

多条电荷耦合器件阵线封装在一起,再采用在窗口镀膜分光的方法使每条线阵探测不同的光谱.此种方法大大减小了各谱段间的配准误差^[2],在多光谱遥感相机上得到了广泛应用.但由于目前滤光片的带外抑制能力所限会导致多光谱时间延时积分电荷耦合器件(Multispectral Delay Integral-CCD, TDI-CCD)会存在一定的带外响应.本文针对多光谱遥感相机的带外响应采用基于多光谱相机各谱段之间的光谱关联去除多光谱相机的带外响应.

1 产生带外响应的原因

多光谱相机的光学系统常采用全反射或折反射光学系统^[3-5],成像的光谱谱段范围通常从蓝光谱段直到近红外谱段,典型的多光谱相机具有蓝(B_1 :450~520 nm)、绿(B_2 :520~590 nm)、红(B_3 :630~690 nm)和近红外(B_4 :770~890 nm)四个谱段.各个谱段的光谱响应与 TDI-CCD 的量子效率和滤光片的透过率成正比^[6-7],即

$$R(\lambda) \propto QE(\lambda) \times T(\lambda) \quad (1)$$

式中: $R(\lambda)$ 为 TDI-CCD 的光谱响应, $QE(\lambda)$ 为 TDI-CCD 的量子效率, $T(\lambda)$ 为有效光谱范围内的透过率.

对于蓝、绿、红和近红外四谱合一的 TDI-CCD 传感器,在 450~900 nm 范围内的量子效率如图 1.

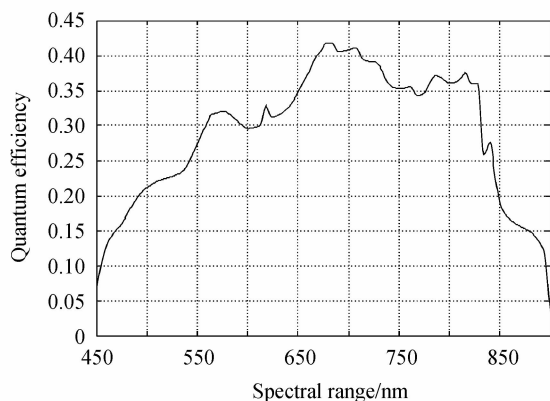


图 1 TDI-CCD 的量子效率

Fig. 1 TDI-CCD Quantum Efficiency

四个多光谱谱段滤光片的光谱透过率如图 2.

由图 1 可知:蓝光谱段的量子效率较低,而绿光和红光谱段的量子效率较高.为了使各谱段的带外响应达到设计要求,则对蓝光谱段的滤光片带外抑制能力提出了更高的要求.因此,在各谱段滤光片带外抑制比基本一致的情况下,蓝光谱段更容易出现带外响应,由图 1 和图 2 可得到 TDI-CCD 的蓝光谱段的归一化光谱响应,如图 3.

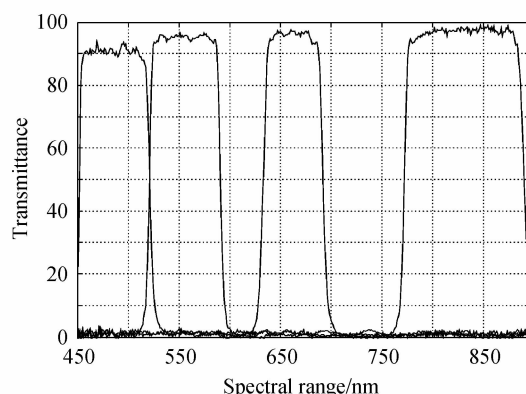


图 2 滤光片的透过率

Fig. 2 Filter Transmittance

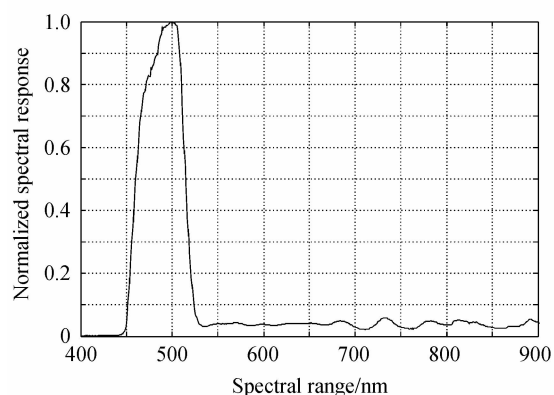


图 3 蓝光谱段的归一化光谱响应

Fig. 3 The normalized spectral response of blue spectrum

2 基于光谱关联修正带外响应的方法

多光谱相机各谱段在有效光谱范围内的量化输出由相机的光谱响应、有效光谱范围和积分时间决定^[8],即

$$DN \propto T_{int} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \times L(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中: DN 为相机每个谱段的量化输出, $R(\lambda)$ 为相机的光谱响应, $L(\lambda)$ 为相机的入瞳辐亮度, T_{int} 为积分时间.

当 TDI-CCD 的蓝、绿、红和近红外四个谱段的积分级数分别为 8/8/4/4 时,各个谱段的光谱响应如图 4.

由图 4 可知蓝光谱段的量化输出所对应的入瞳辐亮度将远大于景物在 450~520 nm 谱段内的入瞳辐亮度.其蓝光谱段的实际输出包含了多光谱相机系统在蓝光(450~520 nm)、绿光(520~590 nm)、红光(630~690 nm)和近红外(770~890 nm)等各谱段的响应,因此多光谱 B_1 谱段的实际输出可近似表示为^[9]

$$DN_{B_1} = DN_{蓝} + DN_{绿} + DN_{红} + DN_{近红外} + \dots \quad (3)$$

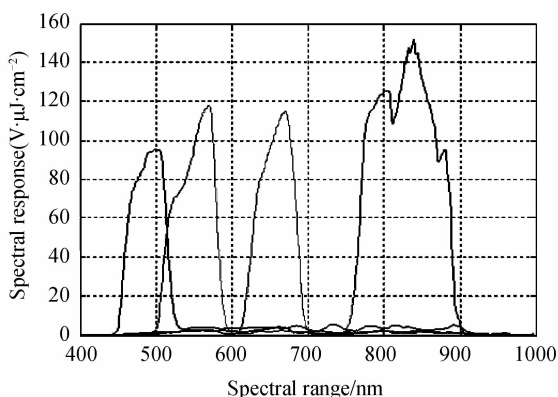


图4 各谱段的光谱响应

Fig. 4 The spectral response of each spectrum

对于蓝光谱段,结合式(1)和式(2),蓝光谱段的量化输出可写成

$$DN_{B_1} = T_{int} \left(\int_{450}^{520} R_{B_1}(\lambda) L_{B_1}(\lambda) d\lambda + \int_{520}^{590} R'_{B_1}(\lambda) L_{B_1}(\lambda) d\lambda + \int_{630}^{690} R'_{B_1}(\lambda) L_{B_1}(\lambda) d\lambda + \int_{770}^{890} R'_{B_1}(\lambda) L_{B_1}(\lambda) d\lambda + \dots \right) \quad (4)$$

式中: $R_{B_1}(\lambda)$ 为 B_1 在450~520 nm谱段范围内的响应; $R'_{B_1}(\lambda)$ 为 B_1 在520~590 nm谱段范围内的带外响应; $R'_{B_1}(\lambda)$ 为 B_1 在630~690 nm谱段范围内的带外响应; $R'_{B_1}(\lambda)$ 为 B_1 在770~890 nm谱段范围内的带外响应。

B_1 谱段在 B_2 、 B_3 、 B_4 谱段的有效光谱范围内的量化输出分别为

$$DN'_{B_2} = \int_{520}^{590} R'_{B_1}(\lambda) L_{B_2}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$DN'_{B_3} = \int_{630}^{690} R'_{B_1}(\lambda) L_{B_3}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

$$DN'_{B_4} = \int_{770}^{890} R'_{B_1}(\lambda) L_{B_4}(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

而对于 B_2 、 B_3 和 B_4 谱段,其在各自有效谱段范围内的量化输出分别为

$$DN_{B_2} = \int_{520}^{590} R_{B_2}(\lambda) L_{B_2}(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

$$DN_{B_3} = \int_{630}^{690} R_{B_3}(\lambda) L_{B_3}(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

$$DN_{B_4} = \int_{770}^{890} R_{B_4}(\lambda) L_{B_4}(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

式中: R_{B_2} 为 B_2 在520~590 nm光谱范围内的响应, R_{B_3} 为 B_3 在630~690 nm光谱范围内的响应, R_{B_4} 为 B_4 在770~890 nm光谱范围内的响应。

由 B_2 、 B_3 和 B_4 谱段的量化输出和光谱响应曲线及式(8)~(10)可得到在相应谱段的入瞳辐亮度 $L_{B_2}(\lambda)$ 、 $L_{B_3}(\lambda)$ 和 $L_{B_4}(\lambda)$,进而根据式(5)~(7)也可以得到 B_1 谱段的带外响应在 B_2 、 B_3 和 B_4 有效光谱范围内的输出。

B_1 谱段的带外响应在 B_2 、 B_3 和 B_4 有效光谱范围内的量化输出与 B_2 、 B_3 和 B_4 谱段在各自有效光谱范围内的量化输出的比值为

$$\alpha_{B_2} = \frac{DN'_{B_2}}{DN_{B_2}} \quad (11)$$

$$\alpha_{B_3} = \frac{DN'_{B_3}}{DN_{B_3}} \quad (12)$$

$$\alpha_{B_4} = \frac{DN'_{B_4}}{DN_{B_4}} \quad (13)$$

式中: α_{B_2} 是 B_1 谱段带外响应在 B_2 谱段的修正系数; α_{B_3} 是 B_1 谱段带外响应在 B_3 谱段的修正系数; α_{B_4} 是 B_1 谱段带外响应在 B_4 谱段的修正系数。

因此式(1)可改写成

$$DN_{B_1} = DN_{B_1} - \alpha_{B_2} \times DN_{B_2} - \alpha_{B_3} \times DN_{B_3} - \alpha_{B_4} \times DN_{B_4} \quad (14)$$

式中: DN'_{B_1} 为去除带外响应后的量化值; DN_{B_1} 为 B_1 谱段的量化输出; DN_{B_2} 为 B_2 谱段的量化输出; DN_{B_3} 为 B_3 谱段的量化输出; DN_{B_4} 为 B_4 谱段的量化输出。

3 基于地物反射率统计的修正系数

多光谱遥感相机所观测的地物目标具有复杂性和多样性,不同地物目标的光谱反射率也存在较大的差异,因此修正系数应针对不同地物具有较好的普适性,典型的12种地物的光谱反射率曲线如图5。

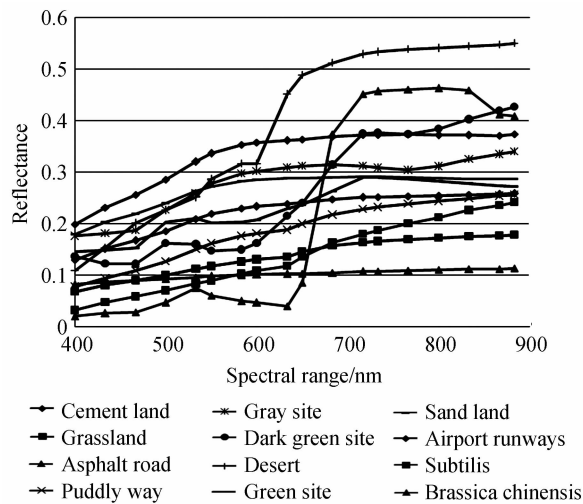


图5 不同地物的光谱反射率

Fig. 5 The spectral reflectance of different ground objects

由于到达相机入瞳的辐亮度与地物的反射率成正比,因此式(1)可修改成

$$DN \propto \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \times Ref(\lambda) \times E(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

式中: $Ref(\lambda)$ 为地物的光谱反射率, $E(\lambda)$ 为地物目标的照度。

由式(3)~式(15)可得到:计算得到在不同地物反射率下 B_1 谱段的带外响应在 B_2 、 B_3 和 B_4 谱段的修正系数分别如图6。

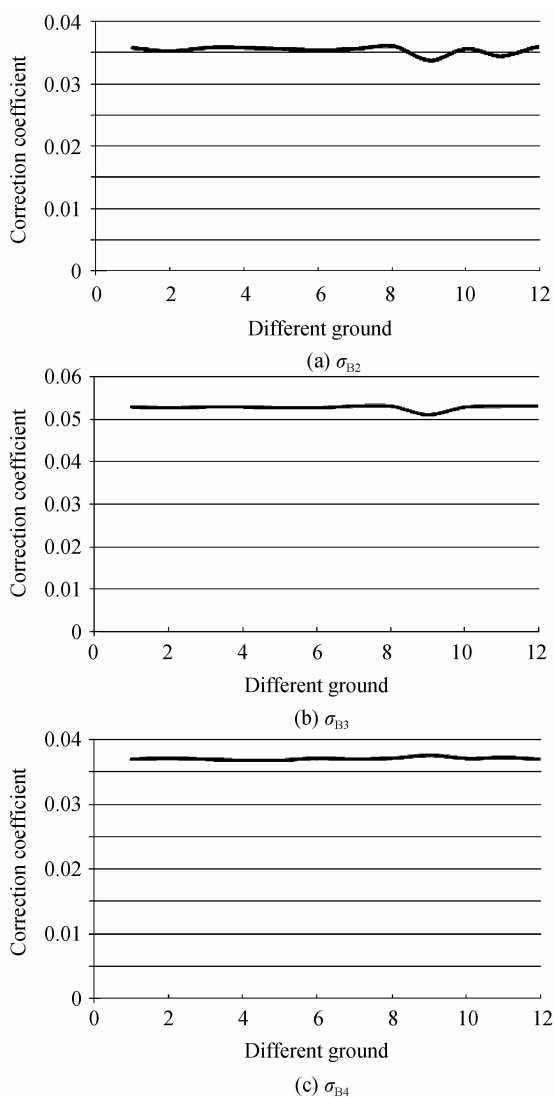


图 6 B₁ 谱段在 B₂、B₃、B₄ 谱段的修正系数
Fig. 6 The B₁ spectrum correction coefficient in the B₂, B₃, B₄ spectrum

而根据不同地物得到的修正系数的均值和方差如表 1 所示.

表 1 修正系数的均值与方差
Table 1 The mean and variance of correction coefficient

No.	Correction term	Average	Variance
1	α_{B_2}	0.035 3	0.000 6
2	α_{B_3}	0.052 7	0.000 5
3	α_{B_4}	0.037 1	0.000 2

由表 1 可知:各个修正项的修正系数的方差较小,因此可以以修正系数的平均值作为最终的修正系数,即 $\alpha_{B_1} = 0.035 3, \alpha_{B_2} = 0.052 7, \alpha_{B_3} = 0.037 1$.

因此由表 1 可得到 B₁ 谱段带外响应的修正公式为

$$DN_{B_1} = DN_{B_1} - 0.0353 \times DN_{B_2} - 0.0527 \times DN_{B_3} - 0.0371 \times DN_{B_4} \quad (16)$$

4 修正效果的评价

对于多光谱遥感相机,各个谱段的带外响应对谱

段自身的影响可以表示为

$$B_1 = \frac{B_{1\text{带外响应}}}{B_{1\text{全谱段的光谱响应}}} \times 100\% \quad (17)$$

由式(17)和图 4 可计算得到 B₁ 谱段的带外响应为总响应的 9.31%.

为了评价针对不同地物去除带外响应后的修正效果,采用式(18)计算修正后的残余带外响应.

$$B_{1\text{per}} = \frac{B_{1\text{修正后的带外响应}}}{B_{1\text{修正后 B}_1\text{谱段的响应}}} \times 100\% \quad (18)$$

根据式(16)和式(18)对 12 种典型地物进行 B₁ 谱段带外响应修正,修正后的残差如表 2 所示.

表 2 B₁ 谱段修正后的残差
Table 2 The corrected residuals of B₁ spectrum

No.	Typical objects	The corrected residuals of B ₁ spectrum
1	Cement Land	2.77%
2	Grassland	3.01%
3	Asphalt road	2.96%
4	Puddly way	2.73%
5	Gray site	2.23%
6	Dark green site	3.34%
7	Desert	3.01%
8	Green site	3.42%
9	Sand land	2.98%
10	Airport runways	3.43%
11	subtilis	3.36%
12	Brassica chinensis	3.92%

由表 2 可知:对不同地物修正后的最大残差为 4% 左右,可以较好地去除 B₁ 谱段的带外响应,修正算法针对不同的地物具有较好的适应性.修正后产生残差的原因在于: B₁ 谱段的带外响应在 520~900 nm 的光谱范围内是连续的,在 B₂、B₃ 和 B₄ 谱段的光谱范围分别为 520~590 nm、630~690 nm 和 770~890 nm.因此 B₁ 谱段在 590~630 nm 和 690~770 nm 和 890~900 nm 这三个谱段的带外响应是无法进行修正和去除的,即使修正后仍然存在一定的残差.

5 结论

目前在多光谱遥感相机中所使用的四谱合一的 TDI-CCD,由于 B₁ 谱段蓝光的量子效率较低,绿光和红光和量子效率较高,在滤光片带外抑制能力一致时 B₁ 谱段更容易出现带外响应.需要进一步降低 B₁ 谱段的带外响应时,则需要对 B₁ 谱段滤光片的带外抑制比提出了更高的要求.

本文基于目前镀膜工艺所使用的滤光片,导致多光谱 TDI-CCD 的 B₁ 谱段的带外响应较大,采用基于多光谱谱段间的光谱响应关联方法进行了 B₁ 谱段带外响应的修正方法的研究,通过对不同地物的统计得到了去除带外响应的修正公式,对不同地物 B₁ 谱段带外响

应的修正结果也表明:该修正方法对不同地物具有较好的普适性。

参考文献

- [1] FAN Bin, CAI Wei-jun, ZHANG Xiao-hong, *et al.* Technology of the multi-spectral camera of ZY-3 satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, **33**(6): 75-84. 范斌,蔡伟军,张孝弘,等. “资源三号”卫星多光谱相机技术[J]. *航天返回与遥感*, 2012, **33**(6): 75-84.
- [2] GUO Yue, YANG Hua. Image rectification of multispectral CCD camera registration[J]. *Optical Technology*, 2003, **29**(2): 229-231. 郭悦,杨桦. 多光谱 CCD 相机配准的图像校正[J]. *光学技术*, 2003, **29**(2): 229-231.
- [3] LI Xu-yang, LI Ying-cai, MA Zhen, *et al.* Optical system design of light-small CCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 994-997. 李旭阳,李英才,马臻,等. 轻小型 CCD 相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6): 994-997.
- [4] 潘君华. 光学非球面的设计、加工与检验[M], 苏州大学出版社, 2004, **12**: 130-138.
- [5] LI Xu-yang, YANG Hong-tao, HE Tian-bing, *et al.* Design of a new type on-axis three-mirror anastigmat optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 31-35. 李旭阳,杨洪涛,贺天兵,等. 新型三反射光学系统设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 31-35.
- [6] ROBERT D F. Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems[J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(4): 574-585.
- [7] ROBERT D F, BRADLEY D P. Modeling the optical transfer function in the imaging chain[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(8): 083103.
- [8] STEVE A C, JABIN T B. PICASSO: an end-to-end image simulation tool for space and airborne imaging system. [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, **4**(4): 1-36.
- [9] SCHOBBERL M, BRUCKNER A. Photometric limits for digital camera systems[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, **21**(2): 020501.