

文章编号: 1672-8785(2018)08-0018-06

基于列相关的热红外高光谱遥感图像 非均匀性校正

李忠原^{1,2,3} 刘成玉¹ 邵红兰^{1,2} 谢 锋^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所中国科学院空间主动光电重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 上海科技大学, 上海 200120)

摘 要: 由于探测单元之间响应不一致、电子增益和偏置发生变化、焦平面污染和损伤等因素, 推扫式热红外成像光谱仪获取的图像常常表现为图像列之间不均匀, 条带噪声严重, 影响了热红外高光谱遥感图像的后续处理和应用。结合推扫式成像光谱仪非均匀性的来源和成因, 以相邻地物的相关性为理论基础, 提出了适用于热红外高光谱遥感图像的非均匀性校正方法。该方法的步骤是, 首先逐波段对原始热红外高光谱遥感图像进行标准矩匹配校正, 得到标准矩匹配校正图像; 然后, 以标准矩匹配校正图像为基础, 选择相邻两列像元中相同的地物像元; 最后, 用两列中相同的地物像元, 通过线性回归得到后一列的校正系数, 并对其进行校正, 顺次遍历一个波段的所有列, 完成一个波段图像的非均匀性校正。按照此过程, 遍历一幅热红外高光谱遥感图像的所有波段, 完成一幅热红外高光谱遥感图像的非均匀性校正。将该方法应用于推扫式热红外光谱成像仪实际获取图像的非均匀性校正中。结果表明, 相比矩匹配方法, 在保证非均匀性校正效果的情况下, 本文方法的各列均值和标准差更符合实际情况。

关键词: 推扫式; 热红外高光谱遥感图像; 非均匀性; 列相关

中图分类号: TP751.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.08.004

Non-uniformity Correction of Thermal Infrared Hyperspectral Remote Sensing Image Based on Column Correlation

LI Zhong-yuan^{1, 2, 3}, LIU Cheng-yu¹, SHAO Hong-lan^{1, 2}, XIE Feng^{1*}

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Techniques, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083, China;

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

3. Shanghai Tech University, Shanghai 200120, China)

收稿日期: 2018-07-18

作者简介: 李忠原(1988-), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 主要从事红外高光谱数据处理与应用研究。

***通讯作者:** E-mail: xf@mail.sitp.ac.cn

Abstract: Due to the factors such as inconsistent response between detection elements, changes in electronic gain and offset, and focal plane contamination and damage, the images obtained by a push-broom thermal infrared imaging spectrometer often exhibit the phenomena of non-uniformity between image columns and severe strip noise. This may affect the subsequent processing and application of thermal infrared hyperspectral remote sensing images. According to the source and cause of non-uniformity of the push-broom imaging spectrometer, a non-uniformity correction method for thermal infrared hyperspectral remote sensing images is proposed on the basis of correlation of adjacent columns. The steps are as follows: Firstly, standard moment matching correction is conducted for the original thermal infrared hyperspectral remote sensing image band by band to obtain a standard moment matching corrected image. Then, on basis of the standard moment matching corrected image, the pixels with same features in the adjacent two pixel columns are selected. Finally, by using the pixels with same feature in the two columns, the correction coefficient of the latter column is obtained though linear regression. The latter column is corrected and all columns in one band are sequentially traversed to complete the non-uniformity correction of one band image. According to this process, the non-uniformity correction of a thermal infrared hyperspectral remote sensing image is completed by traversing all bands of a thermal infrared hyperspectral remote sensing image. The method is applied to the non-uniformity correction of the image obtained by the push-broom thermal infrared spectroscopy imager. The results show that compared with the moment matching method, the average value and standard deviation of each column in the image corrected by the proposed method are more consistent with the actual situation if the non-uniformity correction effectiveness is ensured.

Key words: push-sweep; thermal infrared hyperspectral remote sensing image; non-uniformity; column correlation

0 引言

线阵推扫式热红外光谱成像是当前最流行的热红外高光谱传感器之一。其结构特点是,热红外焦平面的每一行对应一个波段,每一行有一定数量(成百上千)的探测单元,随着成像光谱仪的运动,以行(帧)为单位获取热红外高光谱遥感图像。对于某一波段来说,其成像方式可以概括为线阵推扫方式。这种成像方式常常会因为探测单元之间响应不一致、电子增益和偏置的变化、焦平面污染和损伤等因素,产生严重的条带噪声,即图像列之间不均匀,严重影响热红外高光谱遥感图像的后续处理和应用。

国内外对可见近红外、短波红外高光谱图像非均匀性校正方法的研究比较多。这些校正方法大致可分为基于定标的校正方法和基于场景的校正方法两大类。基于定标校正的主要实施方式是,在传感器成像时同步获取至少两个能级的覆盖全视场的均匀参考目标图像,一般在传感器上设置专用于非均匀性的定标装置。根据获取的不同能级的均匀参考目标图像,采

用两点法或多点法计算每个探测单元的非均匀性校正系数,对高光谱图像进行校正^[1-4]。

基于场景的校正方法主要是在高光谱图像获取完后完全依靠或部分依靠图像自身信息去除条带噪声。这类方法往往需要对图像信息进行一定的条件假设,若场景符合假设条件,则校正效果良好。基于场景校正方法主要有直方图匹配法^[5,6]、改进的两点法^[7]、卡尔曼滤波法^[8,9]、列相关法^[11,12]、矩匹配法^[13,14]、列中值匹配法^[15]、改进的矩匹配法^[16-20]、邻域插值法及其改进方法^[21]、自适应扩散模型^[22]、傅里叶变换法^[23]、统计学习法^[24]等。相比于定标的校正方法,基于场景的校正方法因不需要特殊的硬件设计,对数据处理人员来说容易实现,其关注度要远高于基于定标的校正方法。另外,基于场景的校正也常用于求基于定标校正的残余误差^[25]。

目前,大多数适用于可见近红外、短波红外高光谱图像非均匀性校正的方法并不适用于热红外高光谱遥感图像。例如,实用性较强和效果较好的列中值匹配法需要先减掉暗电流数

据。矩匹配法适应性强,但容易改变光谱形状。列相关法可最接近实际地估算出传感器探测单元的响应系数,但如何选择相邻两列辐射亮度最接近的像元是一个难点。因此,亟需针对推扫式热红外成像光谱仪的成像点,开发适用于推扫式热红外成像光谱仪所获取的热红外高光谱遥感图像的非均匀性校正方法,解决推扫式热红外高光谱遥感图像的非均匀性校正问题。

因此,本文提出了一种适用于推扫式热红外高光谱遥感图像的非均匀性校正方法。该方法基于热红外高光谱图像的列相关,以标准矩匹配校正图像为基础,选择相邻两列中辐射亮度最接近的像元。对于相邻两列原始数据,以前一列为基准,用两列中相同的地物像元,通过线性回归得到后一列的校正系数,并对后一列进行校正。用实际获取的航空机载热红外高光谱遥感图像进行了校正实验。

1 方法

一般情况下,推扫式成像光谱仪的各个探测单元对入瞳辐射亮度的响应为线性。由于探测单元之间的响应不一致、电子增益和偏置发生变化、焦平面污染和损坏等因素的影响,不同探测单元的响应系数不同,在图像上表现为列之间不均匀,即条带噪声。对于推扫式成像光谱仪,条带噪声是一种固定模式噪声,在一定时间范围内,可以认为每个探测单元的响应系数基本不变。则某一个波段任意一列高光谱图像的像元值(信号值)与入瞳辐射亮度的关系可表示为

$$D_{i,j,k} = a_{i,k}L_{i,j,k} + b_{i,k} \quad (1)$$

式中, $D_{i,j}$ 为原始像元值; i 、 j 为列、行号; k 为波段号; a_i 和 b_i 为第 i 列(或探测单元 i) 响应系数; $L_{i,j,k}$ 为入瞳辐射亮度。

假设相邻两列中相邻像元的入瞳辐射亮度相等,根据式(1)可以得出,其中一个像元的像元值与另一个像元的像元值呈线性关系,可以表示为

$$D_{i+1,j,k} = A_{i+1,k}D_{i,j,k} + B_{i+1,k} \quad (2)$$

$$A_{i+1,k} = \frac{a_{i+1,k}}{a_{i,k}} \quad (3)$$

$$B_{i+1,k} = -\frac{a_{i+1,k}}{a_{i,k}}b_{i,k} + b_{j,k} \quad (4)$$

式中, A_i 、 B_i 为校正系数。也就是说,在满足假设条件的情况下,只要能寻找到 2 个以上相邻两列中入瞳辐射亮度相同的像元,求出校正系数 A_i 和 B_i ,就可以校正两列之间的非均匀性,如此循环就可以完成整幅图像的非均匀性校正。

在响应系数未知的情况下,找出相邻两列中辐射亮度相等的像元对并非易事。因此,结合矩匹配法提出了适用于推扫式热红外高光谱遥感图像的非均匀性校正方法,如图 1 所示。该方法首先逐波段对原始热红外高光谱遥感图像进行标准矩匹配校正,得到标准矩匹配校正

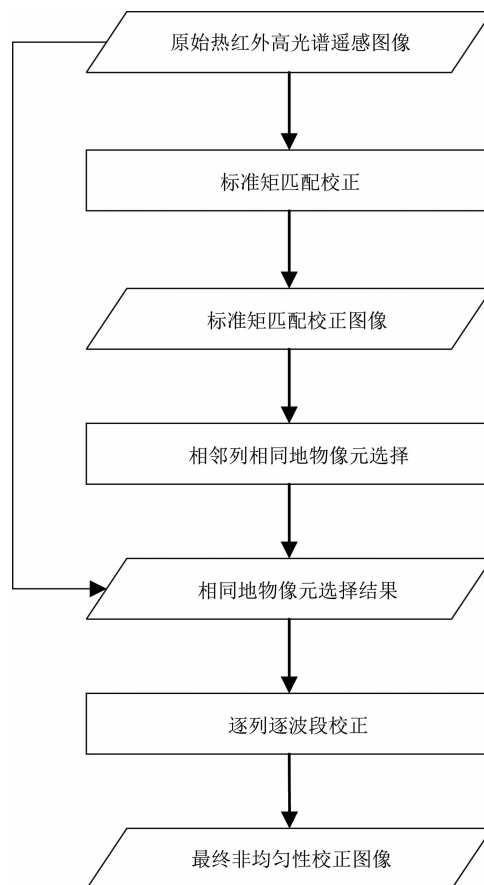


图 1 推扫式热红外高光谱图像非均匀性校正的流程

图像;然后,以标准矩匹配校正图像为基础,选择相邻两列像元中相同的地物像元;最后,对于相邻两列原始数据,以前一列为基准,用两列中相同的地物像元,通过线性回归得到后一列的校正系数,并对后一列进行校正。顺次遍历一个波段的所有列,完成一个波段图像的非均匀性校正。

2 数据与数据处理

2.1 数据

所使用的热红外高光谱成像光谱仪由中国科学院上海技术物理研究所研制,其光谱范围为 $8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$,共 181 个波段,光谱采样间隔为 25 nm,FWHM 为 50 nm 左右。热红外高光谱成像光谱仪为推扫式成像光谱仪,扫描行共计 320 个探测单元,视场角为 14° 。所获取数据的空间分辨率为 2 m,飞行高度为 2000 m。成像时间为 2015 年 6 月 6 日,成像地点位于中国浙江省舟山市市区($122^\circ 19' 15''$, $29^\circ 55' 17''$ 附近)。

2.2 数据处理

按照提出的推扫式热红外高光谱图像非均匀性校正流程,在实施具体的热红外高光谱数据非均匀性校正时,按照如下流程:

(1)选择待校正的推扫式热红外高光谱图像,逐波段对原始热红外高光谱遥感图像进行标准矩匹配校正,得到标准矩匹配校正图像。计算方法为

$$D'_{i,j} = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} D_{i,j} + \mu_r - \frac{\sigma_r}{\sigma_i} \mu_i, \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, i, j \in Z \quad (5)$$

式中, $D'_{i,j}$ 为矩匹配校正后的像元值; $D_{i,j}$ 为原始像元值; i, j 为列、行号; M, N 分别为列数和行数; μ_i 和 μ_r 分别为第 i 列和参考列的均值; σ_i 和 σ_r 分别为第 i 列和参考列的标准方差。

(2)以标准矩匹配校正图像为基础,选择相邻两列像元中相同的地物像元。对某一波段,选择方法为

$$\phi_i = \{j \mid \text{abs}(D'_{i,j} - D'_{i-1,j}) \leq T, 2 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, i, j \in Z\} \quad (6)$$

式中, ϕ_i 为所选择相邻两列像元中相同的地物像元集; $D'_{i,j}, D'_{i-1,j}$ 为标准矩匹配校正像元值; T 为阈值; $\text{abs}(\cdot)$ 取绝对值。

(3)对于相邻两列原始数据,以前一列为基准,用两列中相同的地物像元,通过线性回归得到后一列的校正系数,计算方法为

$$\{A_i, B_i\} = \text{regress}(D_{i,j}, D_{i-1,j}), j \in \phi_i \quad (7)$$

式中, A_i, B_i 为校正系数; $\text{regress}(\cdot, \cdot)$ 为线性回归。根据校正系数对后一列进行校正,顺次遍历一个波段的所有列,完成一个波段图像的非均匀性校正。计算方法为

$$\hat{D}_{i,j} = A_i \cdot D_{i,j} + B_i \quad (8)$$

式中, $\hat{D}_{i,j}$ 为校正后的像元值; $D_{i,j}$ 为原始像元值;按照此流程,遍历所选择的热红外高光谱遥感图像的所有波段,完成热红外高光谱遥感图像的非均匀性校正。

3 结果与分析

从图 2 可以看出,无论是目视,还是定量计算,用矩匹配法和本文方法校正的结果非常接近。从图像的均匀性上来说,矩匹配法已经将原始图像中的条带噪声基本消除。在条带噪声的去除率方面,本文方法并无很大的提高。然而,非均匀性校正的目标并不完全是消除条带噪声,而是在消除条带噪声的同时,也要保证不引入噪声,保证图像的像元值分布和光谱尽量接近真实值。对比标准矩匹配法校正结果的各项均值和标准差(图 3 和图 5)与本文方法校正结果的均值和标准差(图 4 和图 6),本文方法的各项均值和标准差不尽相同,差异更大,更符合实际情况。

4 结论

针对推扫式热红外光谱成像仪所获取的热红外高光谱遥感图像的非均匀性特点,提出了适用于推扫式热红外高光谱遥感图像的非均匀性校正方法。该方法基于相邻两列成像地物的相关性,借助于矩匹配法选出相邻两列像元中相同的地物像元。对于相邻两列的原始数据,以前一列为基准,用两列中相同的地物像元,

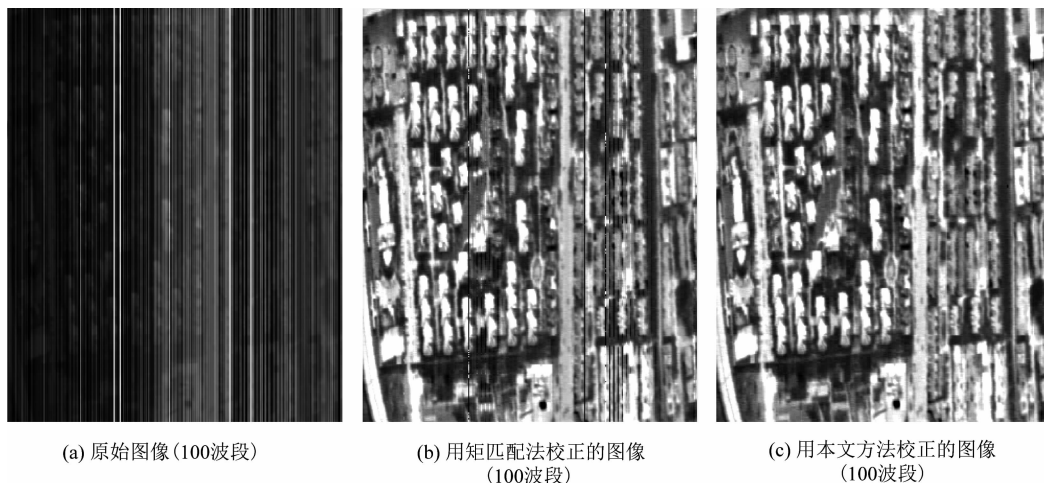


图 2 原始图像和用不同方法校正的图像示例

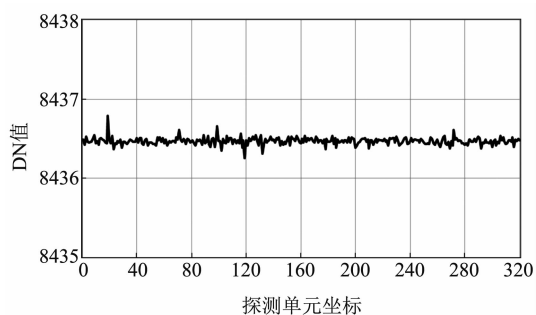


图 3 矩匹配法校正结果中各列均值示例

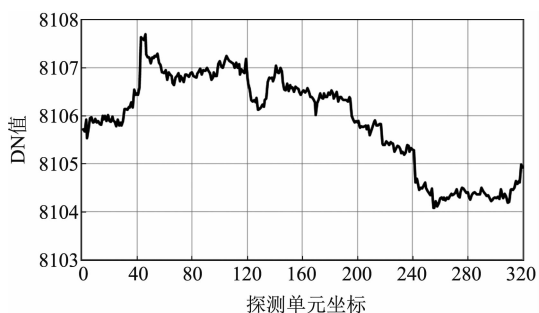


图 4 本文方法校正结果中各列均值示例

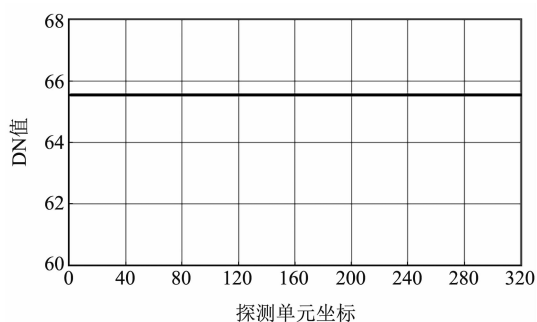


图 5 矩匹配校正结果中各列标准差示例

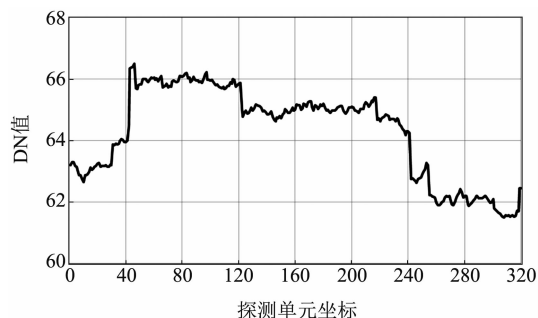


图 6 本文方法校正结果中各列标准差示例

通过线性回归得到后一列的校正系数,并对后一列进行校正。将该方法应用于推扫式热红外光谱成像仪实际获取的热红外高光谱图像的非均匀性校正中,对于条带噪声的去除率,本文方法与矩匹配方法校正效果相当;但本文方法的各列均值和标准差比矩匹配方法更符合实际情况。

参考文献

[1] 刘则洵,全先荣,任建伟,等. CCD 相机输出非均匀性线性校正系数的定标 [J]. 红外与激光

工程,2012,41(8):2211-2215.

[2] 张春雷,向阳. 超光谱成像仪图像均匀性校正 [J]. 中国光学,2013,6(4):584-590.

[3] Pesta F, Bhatta S, Helder D, et al. Radiometric Non-uniformity Characterization and Correction of Landsat 8 OLI Using Earth Imagery-based Techniques [J]. Remote Sensing, 2014, 7(1): 430-446.

[4] 郑亮亮,金光,曲宏松,等. 多通道宽响应域 TDI CCD 成像系统的非均匀性校正 [J]. 光学学报,2017,37(11):113-121.

[5] Tendero Y, Gilles J, Landeau S, et al. Efficient

- Single Image Non-uniformity Correction Algorithm [C]. *SPIE*, 2010, **7834**: 78340E.
- [6] Tendero Y, Gilles J. ADMIRE: a Locally Adaptive Single-image, Non-uniformity Correction and Denoising Algorithm: Application to Uncooled IR Camera [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83531O.
- [7] Hu B L, Hao S J, Sun D X, et al. A Novel Scene-based Non-uniformity Correction Method for SWIR Push-broom Hyperspectral Sensors [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, **131**: 160–169.
- [8] Torres S N, Vera E M, Reeves R A, et al. Adaptive Scene-based Nonuniformity Correction Method for Infrared-focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2003, **5076**: 130–140.
- [9] 李庆, 刘上乾, 赖睿, 等. 一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 720–723.
- [10] Averbuch A, Liron G, Bobrovsky B Z. Scene Based Non-uniformity Correction in Thermal Images Using Kalman Filter [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, **25**(6): 833–851.
- [11] 刘畅, 李绘卓, 范勇, 等. 多路 CCD 成像不均匀性校正算法 [J]. *光电工程*, 2009, **36**(3): 120–124.
- [12] 任建乐, 陈钱, 顾国华, 等. 红外焦平面阵列条纹非均匀性校正方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(8): 1987–1990.
- [13] Xie Y S, Wang J N, Shang K. An Improved Approach Based on Moment Matching to Destriping for Hyperion Data [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, **10**: 319–324.
- [14] Horváth G. Moment Matching-based Distribution Fitting with Generalized Hyper-Erlang Distributions [C]. Berlin: International Conference on Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications, 2013.
- [15] Fischer A D, Thomas T J, Leathers R A, et al. Stable Scene-based Non-uniformity Correction Coefficients for Hyperspectral SWIR Sensors [C]. Montana: 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007.
- [16] 刘正军, 王长耀, 王成. 成像光谱仪图像条带噪声去除的改进矩匹配方法 [J]. *遥感学报*, 2002, **6**(4): 279–284.
- [17] 秦雁, 邓孺孺, 何颖清, 等. 分段线性动态矩匹配条带去除 [J]. *中国图象图形学报*, 2012, **17**(11): 115–123.
- [18] Kumar A. Sensor Non Uniformity Correction Algorithms and its Real Time Implementation for Infrared Focal Plane Array-based Thermal Imaging System [J]. *Defence Science Journal*, 2013, **63**(6): 589–598.
- [19] 祝善友, 张桂欣, 巩彩兰, 等. 基于方差补偿矩匹配的红外图像非均匀性校正方法 [J]. *光学学报*, 2013, **33**(12): 87–92.
- [20] 张一舟, 许廷发, 刘子伟, 等. 基于 Savitzky-Golay 加权拟合的红外图像非均匀性条带校正方法 [J]. *中国光学*, 2014, **8**(1): 51–59.
- [21] Cao Y, Li Y. Strip Non-uniformity Correction in Uncooled Long-wave Infrared Focal Plane Array Based on Noise Source Characterization [J]. *Optics Communications*, 2015, **339**: 236–242.
- [22] 陈世伟, 杨小冈, 张胜修, 等. 基于自适应扩散模型的单帧红外条纹非均匀性校正算法 [J]. *中国光学*, 2016, **9**(1): 106–113.
- [23] 姬弘楨, 李春来, 金健, 等. 热红外高光谱图像非均匀性校正方法研究 [J]. *科学技术与工程*, 2016, **16**(21): 238–242.
- [24] Torres S N, Hayat M M. Kalman Filtering for Adaptive Nonuniformity Correction in Infrared Focal-plane Arrays [J]. *JOSA A*, 2003, **20**(3): 470–480.
- [25] 洪闻青, 杨南生, 王晓东, 等. 红外焦平面联合非均匀性校正算法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 81–86.