

光谱成像仪 CCD 焦平面组件非均匀性校正技术研究

薛利军^{1,2} 李自田¹ 李长乐¹ 计忠瑛¹ 崔 艳^{1,2} 王忠厚¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 分析了光谱成像仪 CCD 焦平面的非均匀性机理和各种非均匀性校正算法, 提出两点多段的非均匀性校正算法, 该算法避免了两点校正算法的低准确度和多点校正算法的大运算量。在光谱成像仪上的应用结果表明, 两点多段的非均匀性校正算法具有运算量小、准确度高、实用性强的优点。

关键词 光谱成像仪; CCD 焦平面; 非均匀性; 线性校正; 两点多段校正法

中图分类号 TP773 **文献标识码** A

0 引言

光谱成像技术能获得被测目标的空间和光谱信息, 在航空航天遥感、军事侦察、环境监测、资源勘测等领域具有重要的应用价值。光谱成像仪 CCD 焦平面探测器是各种光谱成像仪的核心部件。由于光谱成像仪 CCD 焦平面探测器各个像元对光强和光谱响应度的不均匀性, 使得光谱成像仪的成像质量较差, 直接影响到仪器的光谱分辨率。本文主要讨论光谱成像仪 CCD 焦平面对光强响应的不均匀性。光谱成像仪 CCD 焦平面探测器的响应非均匀性问题不同于一般的图像噪音, 一般的图像噪音是瞬态随机噪音。探测器的非均匀性是一种固定图形噪音 (Fixed Pattern Noise)。它是由于探测器的加工工艺、材料、温度和偏置情况等多种因素所造成的。

为了改善成像质量和光谱分辨率, 就需要对光谱成像仪 CCD 焦平面进行非均匀性校正。本文首先分析传统的非均匀性校正算法, 然后提出二点多段线性校正算法, 并给出校正的效果。

1 产生非均匀性的原因

图 1 反映了从一个 512×256 像元的面阵 CCD

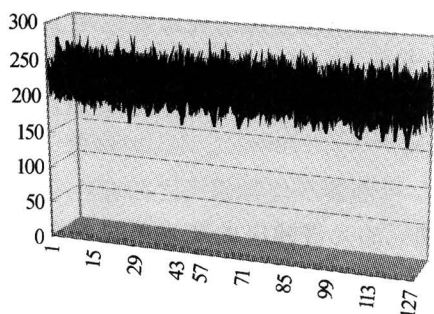


图 1 光谱成像仪 CCD 焦平面器件的非均匀性 (128×32 元)
Fig. 1 The non-uniformity of hyper-spectral CCD imager (128×32 pixels)

中抽取一块像元的典型的响应不均匀性状况。

分析光谱成像仪 CCD 焦平面探测器的非均匀性产生原因对于建立校正算法模型是很重要的。以下就器件自身、器件工作状态和外界因素等三个方面来分析非均匀性的来源。

1.1 器件自身非均匀性

器件自身非均匀性是光谱成像仪 CCD 焦平面探测器非均匀性的主要组成部分。受目前的材料制造及工艺所限, CCD 器件的材料中会出现掺杂不均、厚度不等和探测元尺寸不均等各种缺陷, 造成不同探测单元之间参量的不同, 从而引起探测元响应的差异。探测元产生的光生电荷信号必须被注入到读出电路实现输出。同样由于材料和制造工艺水平的制约, 各个耦合传输通道的参量也不尽相同, 使得探测单元和读出电路之间的信号耦合以及读出电路的电荷传输效率都存在着差异, 这些都将引起器件响应输出信号的非均匀性。

1.2 CCD 暗电流的不均匀性

暗电流的大小与光照强度无关, 而与 CCD 像素的本征材料、大小、温度等有关。CCD 暗电流的主要成分有: 1) 耗尽区内通过复合中心的热产生; 2) 通过表面态的热产生; 3) 通过本征跃迁过程的热产生; 4) 在耗尽区边界的扩散电流。在室温下, 边界扩散电流可以忽略, 以体内、表面复合中心贡献为主, 本征产生贡献比它们小一个数量级以上。

1.3 工作状态引入的非均匀性

光谱成像仪 CCD 焦平面探测器的驱动信号和成像系统的光能量等与光谱成像仪工作状态相关, 这些相关条件的变化将直接对探测单元的光学增益、注入效率、读出电路的增益等方面产生影响, 从而影响到整个光谱成像仪 CCD 焦平面探测器响应的均匀性。

1.4 与外界输入相关的非均匀性

光谱成像仪中光学系统光路的均匀性和像差等因素、环境特性的随机变化以及外界的电磁干扰等

多种外界因素均可对焦平面器件阵列元的工作参量和工作性能产生影响,从而导致器件输出信号的非均匀性.

2 传统校正法

目前常见的非均匀性校正算法有点校正和自适应校正两大类.点校正包含一点校正、两点校正、多点校正3种^[1,2];自适应校正主要有基于场景的校正法、神经网络算法等^[3~5].

2.1 一点校正法

一点校正法是最早的非均匀性校正算法.针对增益系数不均匀和偏置不均匀两种情况,一点校正法也可分为两种.

增益系数不均匀校正,选取光照度 φ_1 为定标点,对探测器所有像元的响应值 V_i 求其平均,见式(1),将探测器各像元的响应 V_i 校正为其平均响应(也就是所谓的理想响应) V_s .根据假设,能够求得校正因子式(2)

$$V_s = \sum_{i=1}^N V_i / N \quad (1)$$

$$a_i = \frac{V_i}{V_s} \quad (2)$$

标定出校正因子 a_i 以后就可以进行图像的非均匀性校正了.

偏置不均匀的校正时上面的方法只是对探测器响应的增益系数不均匀性进行了校正,而对于探测器各单元的偏置不均匀性则采用另一种算法.选取光照度 φ_1 为定标点,对探测器所有的 N 个像元的响应值 V_i 求其平均,同式(1),则在任意光照度 φ 下,每个像元的输出 $V(\varphi)$ 可以校正为 $V'(\varphi)$.

$$V'(\varphi) = V(\varphi) - V(\varphi_1) + V_s(\varphi_1) \quad (3)$$

显然,一点校正法对于增益不均匀性和偏置不均匀性二者是不能兼顾的,由此产生了二点校正法.

2.2 两点校正法

两点校正法考虑了探测器的增益不均匀性、偏置不均匀性、热噪音、暗电平等因素,通常情况下,当入射光照度为零的时候,探测器的响应输出不为零,也就是通常所说的暗电平.但是,两点校正法仍然是一种线性校正算法.它和一点校正法一样假设探测器的响应输出和光照度呈线性关系

$$V = k\varphi + b \quad (4)$$

这样只需要在2种光照度 φ_1 和 φ_2 下定标,就可以确定校正因子 k, b .然后可以利用校正因子进行非均匀性补偿,则在任一光照度下,每个像元的输出 $V(\varphi)$ 可以校正为 $V'(\varphi)$

$$V_s(\varphi_1) = k_j V_j(\varphi_1) + b_j, V_s(\varphi_2) = k_j V_j(\varphi_2) + b_j$$

$$k_j = \frac{V_s(\varphi_2) - V_s(\varphi_1)}{V_j(\varphi_2) - V_j(\varphi_1)}, b_j = V_s(\varphi_1) - k_j \times V_j(\varphi_1)$$

$$V_j(\varphi) = k_j \times V_j(\varphi) + b_j, j \text{ 为探测器像元数.}$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

2.3 多点校正法

多点校正法比二点校正法更进一步,它考虑了探测器响应度的非线性.它根据光谱成像仪系统工作的动态范围,选择几个不同的光照度 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_m$,分别对每个探测单元进行定标.其目的就是要找到任意光照度下,探测器的响应输出与光照度之间的函数映射关系.根据定标获得的 m 个点 $(V_i, \varphi_i), i = 1, 2, 3, \dots, m$,利用多项式插值算法就可以求得校正函数

$$V = f(\varphi, \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m) \quad (6)$$

该种算法特点是准确度高,但问题是计算量很大,在实时性要求较高的红外成像系统中很难采用这种算法,图2是3种点校正算法的原理图.

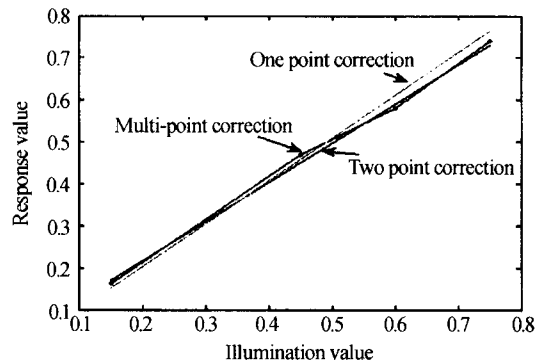


图2 点校正算法原理

Fig. 2 The principle of point correction algorithm

3 二点多段线性校正算法研究

通过分析以上三种算法可知这三种算法各有优缺点,一点校正法和两点校正法具有算法简单、定标方便、运算量小的优点,但准确度过低,基本没有多少实用价值;而多点校正算法是多项式插值算法,虽然准确度高,但运算量大,在工程应用上,还存在一些问题.为此,结合工程实际,提出二点多段线性校正算法,并在光谱成像仪中进行了应用,取得了较好的效果.

CCD 探测器不仅各像元之间不存在非均匀性,而且每个像元的光谱响应曲线也不是严格一致的.因此,研究探测器响应的非线性是十分必要的.所谓二点多段的校正法就是将光谱成像仪系统的工作范围分成 m 段来进行定标(这一点和前面分析过的多点校正法是一样的),然后在每一段内采用线性近似的办法来处理.也就是用折线来逼近理想的曲线,如图3(图中光照度和响应值都经过归一化).在动态

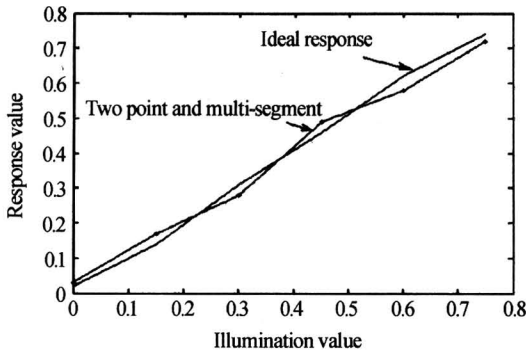


图3 两点多段校正法原理

Fig. 3 The principle of two-point multi-section method

范围内选取 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_m$ 不同的 $m+1$ 个光照等级, 对 N 个探测器像元分别进行定标, 得到对应的响应值 $V_j(\varphi_i)$ ($i=0, 1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, N$), 则可以得出校正参量 k_{ij}, b_{ij} .

$$k_{i,j} = \frac{V_s(\varphi_{i-1}) - V_s(\varphi_i)}{V_j(\varphi_{i-1}) - V_j(\varphi_i)}$$

$$b_{i,j} = V_s(\varphi_i) - k_{ij} \times V_j(\varphi_i) \quad (7)$$

式中 i 为光照度等级; $i=0, 1, 2, \dots, m; j$ 为 CCD 探测器像元数; $j=0, 1, 2, \dots, N$

校正的时候需要读入参量表 $V_j(\varphi_i)$ ($i=0, 1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, N$), 校正参量 $k_{i,j}, b_{i,j}$ 对于任意光照 φ 条件下, 第 j 个探测器像元的响应值 $V_j(\varphi)$ 可以校正为 $V'_j(\varphi)$.

首先需要判断 $V_j(\varphi)$ 在 $V_j(\varphi_i)$ ($i=0, 1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, N$) 中属于哪一个区间段, 设

$$V_j(\varphi_{i-1}) < V_j(\varphi) \leq V_j(\varphi_i) \quad (8)$$

则

$$V'_j(\varphi) = k_{i,j} \times V_j(\varphi_i) + b_{i,j} \quad (9)$$

成像光谱仪工作谱段为 $0.45 \sim 0.95 \mu\text{m}$, 包含多个谱段, 下面以具有 N 个像元的可见光谱段为例来说明两点多段的校正法的实现步骤.

1) 利用定标设备积分球获取 N 个像元在 $m+1$ 个不同光照度条件下的响应. $DN_{i,j}$ ($i=0, 1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, N$), 这一步骤的目的是利用统计平均的办法来消除测量的误差.

2) 因为探测器具有非均匀性, 所以同一辐照度下各个像元的响应 $DN_{i,j}$ ($i=0, 1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, N$) 是不一样的. 期望平均值 $EXDN_i$ 为

$$EXDN_i = \frac{\sum_{j=1}^N DN_{i,j}}{N}, i=0, 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

3) 计算校正参量 $a_{i,j}, b_{i,j}$ 工程实际当中, 光照度是很难量度的, 也是没有必要去量度的. 因此只需要求得每个像元的响应 $DN_{i,j}$ 是与期望值 $EXDN_i$ 的关系即可.

$$EXDN_i = a_{i,j} DN_{i,j} + b_{i,j}, i=1, 2, 3, \dots, N \quad (11)$$

该式表明第 j 个像元的响应值与期望值的关系, 对于二点多段校正法, 校正因子 $a_{i,j}, b_{i,j}$ 可用下式进行计算

$$a_{i,j} = \frac{EXDN_{i-1} - EXDN_i}{DN_{i-1,j} - DN_{i,j}}$$

$$b_{i,j} = EXDN_i - a_{i,j} DN_{i,j},$$

$$i=0, 1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, N \quad (12)$$

4) 根据 3) 求得校正因子 $a_{i,j}, b_{i,j}$, 就可以对图像进行校正. 对于图像第 j 个像元的响应 $ImageDN_j$, 首先判断其属于哪一个光照度区间

$$DN_{i-1,j} < ImageDN_j \leq DN_{i,j} \quad (13)$$

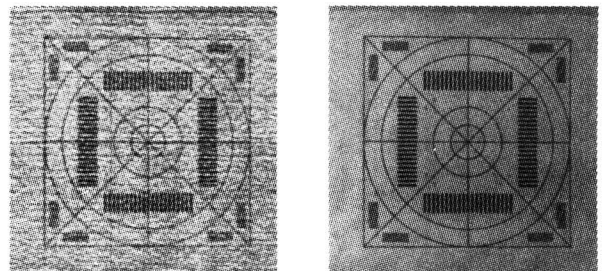
求得 i . 然后选择校正参量 a_{ij}, b_{ij} , 得校正期望值

$$DN'_j = a_{i,j} ImageDN_j + b_{i,j} \quad (14)$$

即完成了对一个像元的非均匀性校正.

该二点多段的非均匀性校正算法可以用于软件校正也可以用于硬件校正, 运算量不大, 对系统要求不高, 实时性好. 定标以后只需保存校正参量 $a_{i,j}, b_{i,j}, DN_{i,j}$ 到文件, 校正的时候读取到内存即可. 对于硬件校正, 则固化到 LUT 表中, 通过查表算法读取校正参量. 在光谱成像仪中利用二点多段法进行了实时的非均匀性校正, 证明该方法运算量不大, 但效果很好.

图 4 可以看出, 原始图像由于探测器的非均匀性, 图像上留下了很多噪音和条纹, 经过二点多段法校正后, 噪音和条纹已经不很明显, 图像也更清晰了, 这对光谱成像仪的光谱复原计算有重要意义.



(a) Original image

(b) Correctional image

图4 二点多段校正法效果分析

Fig. 4 Result of non-uniformity correction using 2-Point multi-section method

4 结论

CCD 焦平面器件是光谱成像系统的核心部件, 解决探测器的非均匀性校正问题对于提高系统的性能十分重要. 与各种非均匀性校正算法综合比较, 二点多段的非均匀性校正算法运算量小, 实时性好, 软硬件实现简单方便, 具有很强的实用价值和推广意义.

参考文献

- 1 王钰, 陈钱, 殷德奎, 等. 实时红外图像非均匀性校正技术

- 研究. 红外与毫米波学报, 1999, **18**(2): 151~155
Wang Y, Chen Q, Yin D K, et al. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **18**(2): 151~155
- 2 王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究. 红外与毫米波学报, 2003, **22**(6): 415~418
Wang Y M, Chen J X, Liu Y N, et al. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **22**(6): 415~418
- 3 拜丽萍, 殷世民, 刘上乾. 一种新的基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法. 光子学报, 2004, **33**(1): 109~112
Bai L P, Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 109~112
- 4 代少升, 袁祥辉. 基于 DSP 的红外焦平面阵列非均匀性实时压缩校正研究. 光子学报, 2004, **33**(4): 469~471
Dai S S, Yuan X H. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 469~471
- 5 相里斌, 计忠瑛, 黄旻, 等. 空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究. 光子学报, 2004, **33**(7): 850~853
Xang L B, Ji Z Y, Hang M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 850~853

Study on The Hyper-Spectral CCD Imager non-uniformity Correction Algorithm

Xue Lijun^{1,2}, Li Zitian¹, Li Changle¹, Ji Zhongying¹, Cui Yan^{1,2}, Wang Zhonghou¹

1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-01-27

Abstract Based on analyzing the mechanism of the Hyper-Spectral CCD Imager's non-uniformity and several non-uniformity correction algorithms. The method of two-point multi-section for Hyper-Spectral CCD Imager's non-uniformity correction was presented. The two-point multi-section method has higher precision than two-point correction algorithm and has lower operation load than multi-point correction algorithm. The appliance of the two-point multi-section method to Hyper-Spectral Imager showed that the method has the merit of low operation load, high precision and strong practicability.

Keywords Hyper-spectral imager; CCD; Non-uniformity; Liner correction; Two-point multi-section method



Xue Lijun was born in 1975 and received the B. S. degree in 1998 from Xi'an Jiaotong University. Now he is a M. S. candidate in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences. His interests include image manipulation and high speed television.