

多通道宽响应域 TDI CCD 成像系统的 非均匀性校正

郑亮亮^{1,2}, 金 光¹, 曲宏松¹, 张贵祥¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)成像系统多通道间存在响应非均匀问题,开展了基于辐射定标的校正方法研究。结合成像系统的信号处理流程,推导了响应非均匀性校正的理论模型,提出了一种基于加权最小二乘的定标校正方法,分别在 1/4、1/2 和 3/4 饱和响应处采集三组图像数据,并利用高斯加权函数对三组通道间的校正参数进行加权最小二乘拟合,从而获得优化的校正参数。利用 TDI CCD 成像系统进行实验验证,结果表明,系统的响应非均匀性(1/2 饱和响应处)由原来的 4.09%降低至 0.85%,并优于两点校正法的 1.93%,同时该方法在宽响应域内均获得了良好的校正效果,具有精度高、实用性强等特点,可应用于机载、星载等相机载荷,为获取高质量的遥感图像数据奠定技术基础。

关键词 成像系统; 非均匀性校正; 加权最小二乘法; 时间延迟积分电荷耦合器件

中图分类号 TN386.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1111001

Non-Uniformity Correction for Multi-Channel TDI CCD Imaging System in Wide Response Range

Zheng Liangliang^{1,2}, Jin Guang¹, Qu Hongsong¹, Zhang Guixiang¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China;

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

Abstract There is a problem of non-uniformity response between multiple channels for a time-delayed integration (TDI) charge-coupled device (CCD) imaging system. Due to this problem, a correction method research based on radiometric calibration is conducted. A theoretical model for correction is deduced according to the flow of signal processing. A correction method is proposed based on weighted least square, which needs to acquire three sets of image data in 1/4, 1/2 and 3/4 saturation. Three sets of correction parameters are fitted by weighted least square using Gaussian weighting function to achieve the optimized parameters. The experimental verification is carried out using a TDI CCD imaging system. The results show that the photo response non-uniformity reduces from 4.09% to 0.85%, which is better than 1.93% obtained by two-point correction method. And it has a good performance in wide response range with advantages of high precision and good practicability. This method can be applied in many kinds of airborne or spaceborne camera payloads and lay the technical foundation to achieve high-quality remote sensing image data.

Key words imaging systems; non-uniformity correction; weighted least square fitting; time-delayed integration charge-coupled device

OCIS codes 110.2970; 110.4280; 040.1490; 040.1520

收稿日期: 2017-05-22; 收到修改稿日期: 2017-06-12

基金项目: 国家 973 计划(2016YFB0501202)

作者简介: 郑亮亮(1982—),男,博士研究生,副研究员,主要从事光学遥感器成像电子学方面的研究。

E-mail: adqe@163.com

导师简介: 金 光(1958—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事星载光学仪器、小卫星总体技术方面的研究。

E-mail: jing@ciomp.ac.cn

1 引 言

时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)传感器是一种具有时间延迟积分功能的光电耦合器件,其利用对同一目标进行多次积分曝光的方式,增强目标信号的收集,从而提高探测的灵敏度,具有低噪声、高动态范围等特点,因而被广泛地应用于航空侦察、空间探测等遥感领域。由于 TDI CCD 的像元数较多,为使传感器具有高行频、高效率输出的工作能力,通常采用多个通道并行输出的方式。但由于 CCD 器件材料、生产工艺及输出放大器之间存在差异,从而导致各通道像元的光电响应会不一致,因此各通道输出的视频信号之间存在一定的非均匀性。这种响应非均匀性(PRNU)会严重影响拍照图像的成像质量与显示效果,无法满足所期望的指标要求,因此必须对 TDI CCD 成像系统进行非均匀性校正^[1]。

目前常用的非均匀性校正方法分为两类:1)基于辐射定标的非均匀性校正,如单点法、两点法和分段多点法等^[1-4];2)基于场景的非均匀性校正,如小波变换法、直方图匹配法、矩匹配法等^[5-8]。前者属于系统在实验阶段进行的校正方法,通过校正,系统即可获取高质量的图像数据;后者则是系统在实际应用中,由于图像数据存在非均匀性噪声而开展的各种算法研究。系统所拍摄的每幅图像均需处理,工作量较大,属于后处理方式。因此,基于辐射定标的校正方法是实现响应非均匀校正的首选。

单点校正法是最早出现的非均匀性校正方法。该方法在一种辐射照度条件下,主要利用偏移量进行补偿,实现响应的非均匀性校正,具有一定的局限性^[4]。两点校正法是一种常用的非均匀响应定标校正方法,即在两种辐射照度条件下,通过设置增益与偏置两参数实现校正,通常可以获得较好的校正效果,但不足之处在于该方法需要有偏置校正参数,而该参数会影响系统对暗目标成像时的实际输出^[9]。多点校正法则采用多点定标分段校正,即把定标区间划分成很多段,每段区间再利用两点法进行校正,但由于定标点多,计算量大,因此实现较为复杂^[2-3]。

本文针对上述常规定标校正方法的不足,根据 TDI CCD 成像系统的信号处理流程,建立了非均匀性校正的理论模型,为在宽响应域内实现理想的非均匀性校正,提出了一种基于加权最小二乘的定标校正方法,实现优化校正参数的获取。实验证明,该方法在宽响应域内均获得良好的校正效果,优于常用的两点校正法,满足成像系统的使用要求。

2 PRNU 模型及其校正方法

2.1 光电 PRNU 定义

光电 PRNU 是光电成像系统的重要指标,通常利用成像系统输出的数字量(DN)进行定义,即系统中各像元输出信号的均方差与其平均响应的比值:

$$U_{\text{PRN}} = \frac{\sigma_P}{\bar{P}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 σ_P 表示所选像元区域的均方差,表示为

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}{N}}, \quad (2)$$

式中 N 是所选区域内像元的总数, P_i 表示像元 i 的灰度值, \bar{P} 表示所选像元区域的平均灰度,定义为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}. \quad (3)$$

一般情况下,利用 CCD 成像系统在 50% 饱和曝光量下所拍摄的图像数据进行计算,此时的 PRNU 表征系统的 PRNU。

2.2 TDI CCD 成像系统 PRNU 模型

根据 CCD 的光电转换原理,理想的 CCD 像元的光电响应模型为^[10]

$$y_i = \eta x_i^r + q, \quad (4)$$

式中 y_i 为第 i 个像元的输出信号, x_i 为输入的光照度, η 为响应度, r 为光电转换系数, q 表示噪声。由于转换因子 r 接近于 1, 因此(4)式可简化为

$$y_i = \eta x_i^r + q \approx \eta x_i + q, \tag{5}$$

可见 CCD 的输出信号与输入的光照度之间可近似为线性关系。

理想情况下, 均匀光照射不同像元的光电响应与噪声应该是一致的, 但实际上, 受材料、生产工艺、输出放大器等因素影响, 不同像元的响应度和噪声是不同的, 因此在均匀光的照射下, 不同像元输出的信号电压有差异, 这就是 PRNU。目前, 同一输出通道像元间的 PRNU 指标已达到了较高水平, 响应差异通常小于 1%, 可忽略不计, 但由于输出放大器间仍存在一定的差异, 导致通道间的非均匀性还是较明显, 也是需重点解决的问题。不同通道的像元响应模型可表示为

$$y_k = \eta_n x_k + q_k, \tag{6}$$

式中 η_n 为传感器输出通道 n 的响应度, k 表示通道 n 内的第 k 个像元, q_k 为像元 k 的噪声。

某型号 TDI CCD 的组成如图 1 所示, 其每行有 4096 个有效像元, 分别利用通道 OS1~OS8 输出, 因此每个通道输出 512 个像元, 即 $k=1, \dots, 512, n=1, \dots, 8$ 。

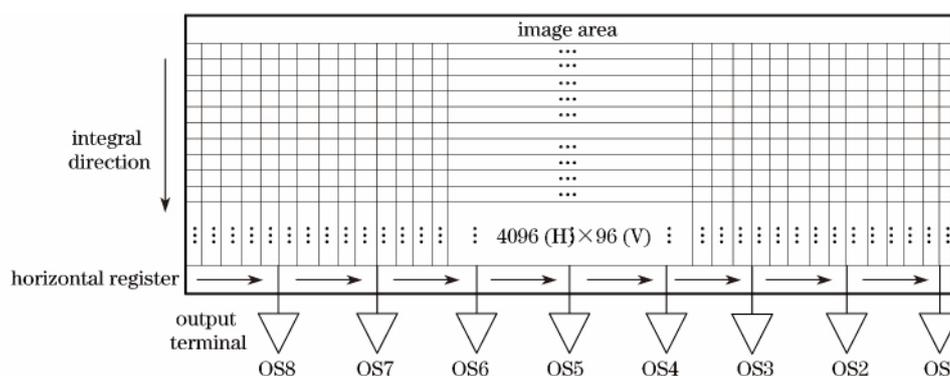


图 1 TDI CCD 组成示意图

Fig. 1 Sketch map of a TDI CCD

TDI CCD 成像系统的信号处理流程如图 2 所示。CCD 传感器每个输出通道都对应着一路预放单元与一路视频处理电路^[1]。首先 CCD 传感器通过光电转换生成感光电荷; 再由每个输出通道的读出电路将其转换为模拟视频电压信号输出; 然后经过预放单元进行预处理, 主要进行阻抗匹配; 再将模拟视频信号送至视频处理电路。视频处理电路集成了相关双采样(CDS)、可编程增益放大器(PGA)和模拟/数字(A/D)转换器等电路模块, 相关双采样模块对 CCD 输出的模拟信号在一个像元周期内采集两次, 输出有效的模拟电压信号, 再利用可编程增益放大器进行放大调整, 最后由 A/D 转换器量化输出数字信号。现场可编程门阵列(FPGA)电路将该信号进行缓存, 然后以约定的格式将图像数据输出, 最终显示出所采集的图像。

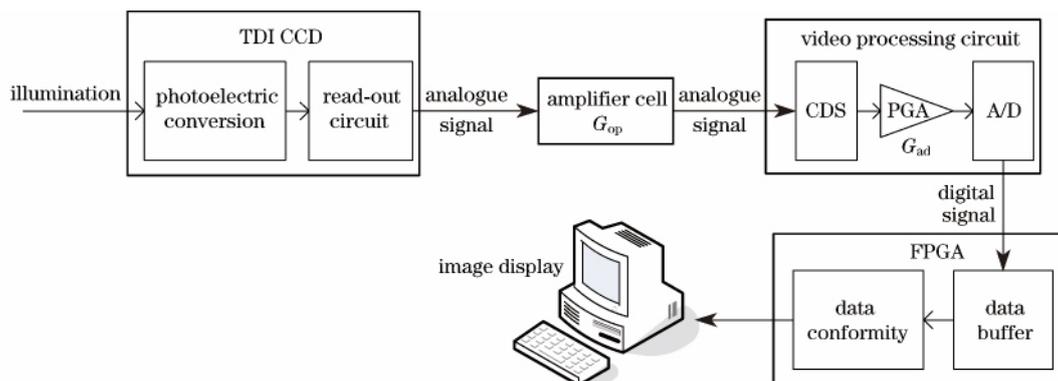


图 2 TDI CCD 成像系统信号处理流程

Fig. 2 Signal processing flow of TDI CCD imaging system

根据上述信号处理流程分析可知,影响成像系统 PRNU 的主要因素除 TDI CCD 传感器以外,还有预放电路与视频处理电路。预放电路主要是利用运算放大器对 CCD 每个通道输出的模拟视频信号进行放大和阻抗匹配,从而便于后端视频处理电路进一步的量化处理,其放大的倍数由外围的电阻决定。视频处理电路是整个系统进行模数转换的枢纽,可编程增益放大器可通过三线串口进行设置。假设每个通道预放电路的放大倍数为 G_{opn} , 视频处理电路的放大倍数为 G_{adn} , 则不同通道的像元响应模型变化为

$$y_k = G_{opn} G_{adn} \eta_n x_k + G_{opn} G_{adn} q_k \quad (7)$$

2.3 PRNU 校正方法

在均匀光照射下,设输入照度为 x , 则实际的像元响应与期望的像元响应分别为

$$y_n = G_{opn} G_{adn} \eta_n x + G_{opn} G_{adn} q_n, \quad (8)$$

$$y = G_{op} G_{ad} \eta x + G_{op} G_{ad} q. \quad (9)$$

因此,将(8)式代入到(9)式中,可得到期望响应值 y 与实际响应值 y_n 的关系为

$$y = \frac{\eta G_{op} G_{ad}}{\eta_n G_{opn} G_{adn}} y_n + G_{op} G_{ad} \left(q - \frac{\eta}{\eta_n} q_n \right). \quad (10)$$

由于噪声 q, q_n 的影响较小, $\left(q - \frac{\eta}{\eta_n} q_n \right)$ 接近于零,可忽略其影响,因此(10)式可变为

$$y = \frac{\eta G_{op} G_{ad}}{\eta_n G_{opn} G_{adn}} y_n = a_n y_n, \quad (11)$$

式中 a_n 为待定的比例参数。因此只要确定合理的比例参数 a_n , 即可实现 PRNU 噪声的有效抑制。利用归一化方法可分析计算出比例校正参数。假设成像系统捕获某照度的均匀光图像数据为

$$\mathbf{I}_{mn} = \begin{bmatrix} DN_{11} & DN_{12} & \cdots & DN_{1n} \\ DN_{21} & DN_{22} & \cdots & DN_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ DN_{m1} & DN_{m2} & \cdots & DN_{mn} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 m 表示采集图像的行数, DN_{mn} 表示第 m 行、第 n 通道像元响应的平均值。对矩阵 \mathbf{I}_{mn} 再按照输出通道求 m 行像元响应的平均值,可得行向量

$$\mathbf{M} = \left(\frac{1}{m} \sum_{l=1}^m DN_{l1}, \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m DN_{l2}, \cdots, \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m DN_{ln} \right) = (m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_n), \quad (13)$$

式中 l 为图像的行变量, m_1, m_2 与 m_n 分别表示通道 1, 2 及通道 n 的平均响应。因此,设系统响应的期望值为 m^* , 可得比例校正参数 $a_n = \frac{m^*}{m_n}$, n 个通道对应的校正参数向量为 $\left(\frac{m^*}{m_1} \quad \frac{m^*}{m_2} \quad \cdots \quad \frac{m^*}{m_n} \right)$, 则以响应 m^*

为基准,对不同的输出通道进行辐射校正,可得校正后的图像数据为

$$\mathbf{I}'_{mn} = \begin{bmatrix} DN_{11} \frac{m^*}{m_1} & DN_{12} \frac{m^*}{m_2} & \cdots & DN_{1n} \frac{m^*}{m_n} \\ DN_{21} \frac{m^*}{m_1} & DN_{22} \frac{m^*}{m_2} & \cdots & DN_{2n} \frac{m^*}{m_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ DN_{m1} \frac{m^*}{m_1} & DN_{m2} \frac{m^*}{m_2} & \cdots & DN_{mn} \frac{m^*}{m_n} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

上述处理方法使成像系统在某一照度条件下,实现了 PRNU 的校正,但在实际应用中,一般要求系统的灰度响应值在系统线性响应区的 30%~70%, 即一个宽的响应范围^[8]。因此为实现在宽响应域内有效抑制 PRNU, 确定优化的校正参数, 选取三组测试点, 分别对应于 1/4, 1/2 和 3/4 饱和响应, 可获取一个 3×8 的参数校正矩阵:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{18} \\ a_{21} & & a_{28} \\ a_{31} & \cdots & a_{38} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中任意元素 a_{jn} 表示第 j 组响应第 n 个通道的校正参数, $j=1,2,3, n=1,2,3, \dots, 8$ 。

3 基于加权最小二乘法的校正参数估计

最小二乘法是一种用于模型参数估计的常用方法,是实际观测值与模型计算值误差平方和最小的最优估计算法^[9,12]。该方法具有原理直观、算法简单、收敛性能好等优点。当所采集数据点的重要性不尽相同时,则需要根据采集点的重要性赋以相应的权重,从而实现与期望曲线的优化拟合,这种基于最小二乘法的改进拟合方法即为加权最小二乘法。

针对 2.3 节中获取的三组测试数据,利用归一化方法获得了 3×8 的参数校正矩阵。非均匀性校正的最终目的是为每个通道确定一组优化的校正参数,并能够适应更宽的响应范围,而每个通道在三种辐射条件下,有三个不完全相同的校正参数。由于 CCD 响应输出随辐射照度等参数变化基本为线性关系,结合(11)式分析,这三个参数在理论上应为一组直线,因此针对每个通道的校正参数进行加权线性拟合,可求解出校正参数的线性拟合函数,再选取 $1/2$ 饱和响应处的函数值,即是该通道的优化校正参数。

对于数据采集点 $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$, 存在目标线性拟合函数 $\varphi(x) = a_0 + a_1x$, 为使在所有采集点的方差和最小,其应满足:

$$(\hat{a}_0, \hat{a}_1) = \arg \min_{a_0, a_1} \sum_{i=1}^N [\varphi(x_i) - y_i]^2. \quad (16)$$

为提高拟合精度,引入加权因子 W_i , 对于重要的数据点可以增大其加权因子,即加权最小二乘法,其实现原理为

$$(\hat{a}_0, \hat{a}_1) = \arg \min_{a_0, a_1} \sum_{i=1}^N W_i [\varphi(x_i) - y_i]^2. \quad (17)$$

每个通道校正参数的线性拟合模型为

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N W_i & \sum_{i=1}^N W_i x_i \\ \sum_{i=1}^N W_i x_i & \sum_{i=1}^N W_i x_i^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N W_i y_i \\ \sum_{i=1}^N W_i x_i y_i \end{bmatrix}. \quad (18)$$

因此,可得其具体解为

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N W_i & \sum_{i=1}^N W_i x_i \\ \sum_{i=1}^N W_i x_i & \sum_{i=1}^N W_i x_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N W_i y_i \\ \sum_{i=1}^N W_i x_i y_i \end{bmatrix}. \quad (19)$$

根据(19)式可计算出优化的线性拟合表达式,但前提是还需要选择合理的加权因子 W_i 。由于中间灰度响应区域是重要的图像采集区域,并且 PRNU 参数的计算定义在中间灰度处,因此该点的参数相对于 $1/4$ 和 $3/4$ 饱和响应下的校正参数更有价值,即该点的权重应该相对更大。同时为在宽响应域内获得良好的校正效果,还要兼顾 $1/4$ 和 $3/4$ 饱和响应下的校正参数。综合上述要求,选择高斯函数作为本文算法的权重函数,具有良好的单峰性与对称性:

$$W_i = \exp\left[-\frac{(z_i - z_o)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (20)$$

式中 z_i 为数据点 x_i 的灰度值与系统最大灰度值之间的比值, $z_o = 1/2$, 表示系统最大灰度响应的 $1/2$, σ^2 为高斯函数的方差参数,可根据具体情况调整,其通常的取值范围为 $\sigma \in (0, 1)$ 。 σ^2 越大,权重值越大,反之则权重值越小。

因此,利用高斯函数将所采集的数据点进行加权,再利用(19)式进行求解,能够获得更理想的非均匀性

校正参数,实现在宽响应域内的 PRNU 校正,获取均匀响应的图像数据。

4 成像实验与结果

TDI CCD 成像系统的实验框图如图 3 所示,成像系统由 CCD 焦平面电路与视频处理电路组成,配套的测试系统包括通信控制系统、图像采集系统与电源系统。通信控制系统主要负责设置拍照参数,发送遥控指令与接收遥测状态,图像采集系统完成图像数据的实时采集与显示,电源系统则主要为成像系统提供直流稳压电源。

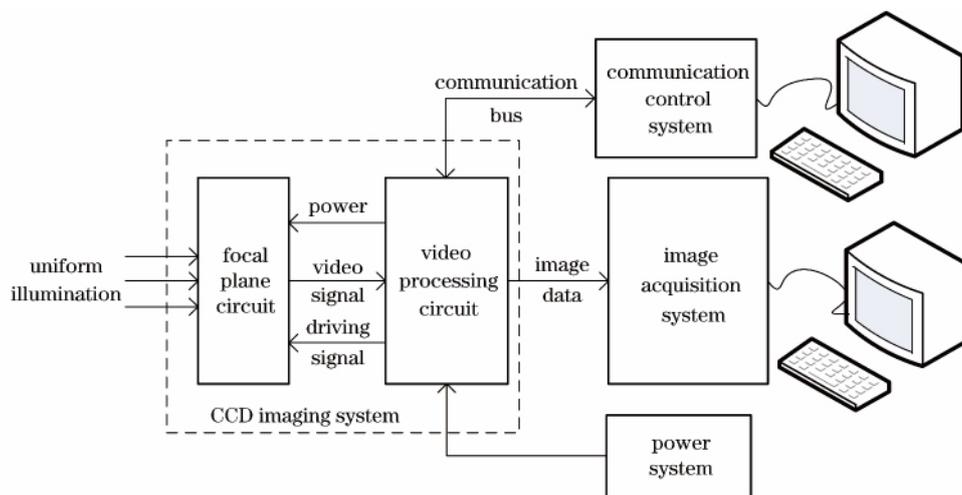


图 3 TDI CCD 成像系统实验框图

Fig. 3 Diagram of TDI CCD imaging system

利用均匀光照射成像系统的 CCD 焦平面,调整光源的亮度,使系统响应达到 1/4 饱和输出,该成像系统的饱和输出为 1023 DN。系统所拍原始图像如图 4(a)所示,其具体的灰度分布如图 4(b)所示。

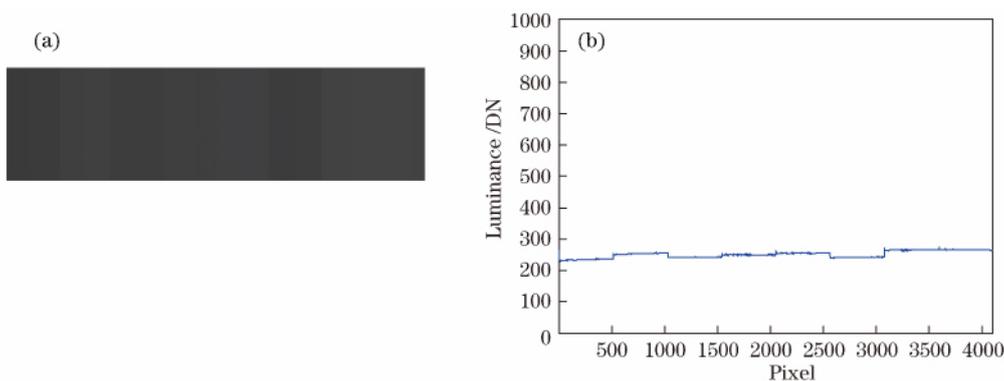


图 4 1/4 饱和时成像系统的响应输出。(a) 1/4 饱和时原始图像数据;(b) 1/4 饱和时灰度分布图

Fig. 4 Response output of imaging system under 1/4 saturation. (a) Raw image data of 1/4 saturation ; (b) gray distribution of 1/4 saturation

保持成像系统的状态不变,增大光源的亮度,分别使系统响应达到 1/2 和 3/4 饱和输出,系统所拍的原始图像分别如图 5(a)和图 6(a)所示,相应的具体灰度分布分别如图 5(b)和图 6(b)所示。

由图 4~6 可知,在相同的辐射照度下,不同通道间的响应存在差异,并且当辐射照度越强时,通道间的响应相差越大。分别利用两点定标校正法与本文方法进行非均匀性校正,其中两点定标校正法基于 1/4 与 3/4 饱和图像数据进行分析,利用本文方法校正时,通过测试实验,选择出高斯加权函数的参数 σ ,以达到较高的校正精度,此处 $\sigma=0.2$,对应的 1/4、1/2 和 3/4 饱和图像校正参数的权重值分别为 0.5、1 和 0.5,因此可分别获得两种方法各通道的校正参数,实现成像系统非均匀响应的校正。

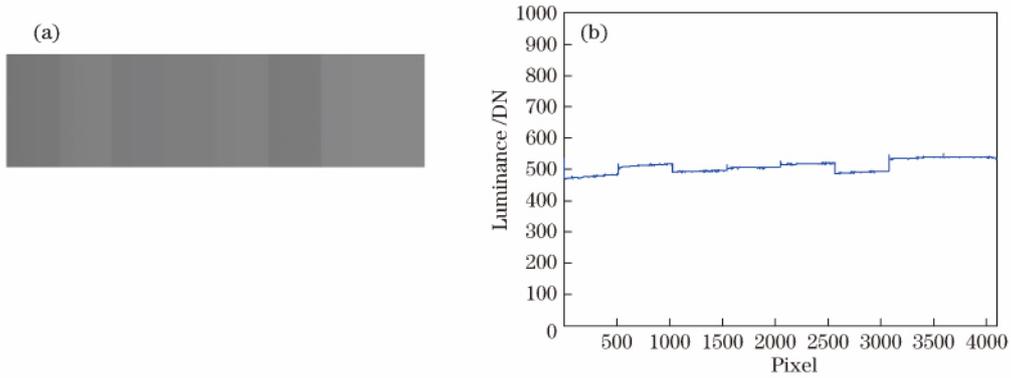


图 5 1/2 饱和时成像系统的响应输出。(a) 1/2 饱和时原始图像数据;(b) 1/2 饱和时灰度分布图
Fig. 5 Response output of imaging system under 1/2 saturation. (a) Raw image data of 1/2 saturation ;
(b) gray distribution of 1/2 saturation

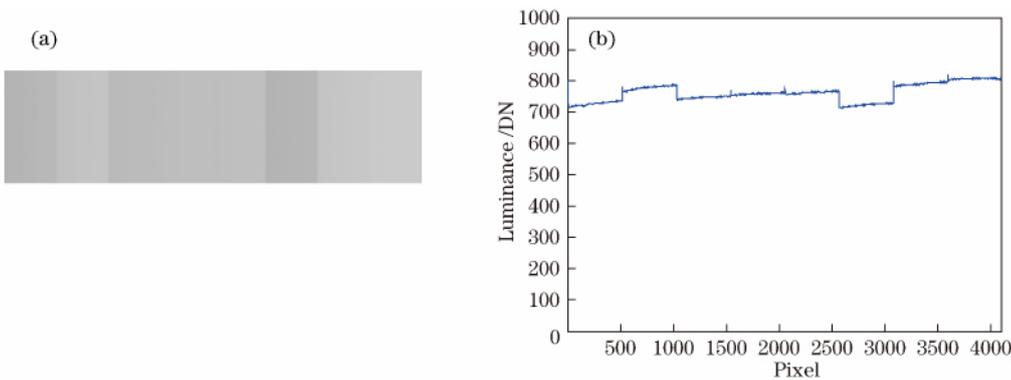


图 6 3/4 饱和时成像系统的响应输出。(a) 3/4 饱和时原始图像数据;(b) 3/4 饱和时灰度分布图
Fig. 6 Response output of imaging system under 3/4 saturation. (a) Raw image data of 3/4 saturation ;
(b) gray distribution of 3/4 saturation

利用(1)式分别计算三种照度下原始图像与校正后图像的 PRNU,具体数据如表 1 所示。

表 1 PRNU 校正结果

Table 1 Correction results of PRNU

Luminance saturation	PRNU / %		
	Raw data	Two-point correction	Proposed method
1/4	4.40	1.78	1.28
1/2	4.09	1.93	0.85
3/4	3.69	1.18	0.97

由表 1 可知,利用基于加权最小二乘的定标校正方法,使得成像系统的非均匀性在系统的宽响应范围内均获得较好的校正效果,最小非均匀性达到了 0.85%,比传统的两点校正法具有更高的校正精度,而且不存在两点校正法的偏置问题。

成像系统利用本文方法进行非均匀性校正后,在 1/2 饱和灰度的情况下,系统所采集的原始图像与灰度分布分别如图 7(a)、(b)所示,此时系统响应的非均匀性为 0.85%。在相同拍照条件下未进行校正的图 5(a),非均匀性为 4.09%。可以看出,校正后图像的均匀性效果得到了明显提高,满足成像系统在轨拍照的使用要求。

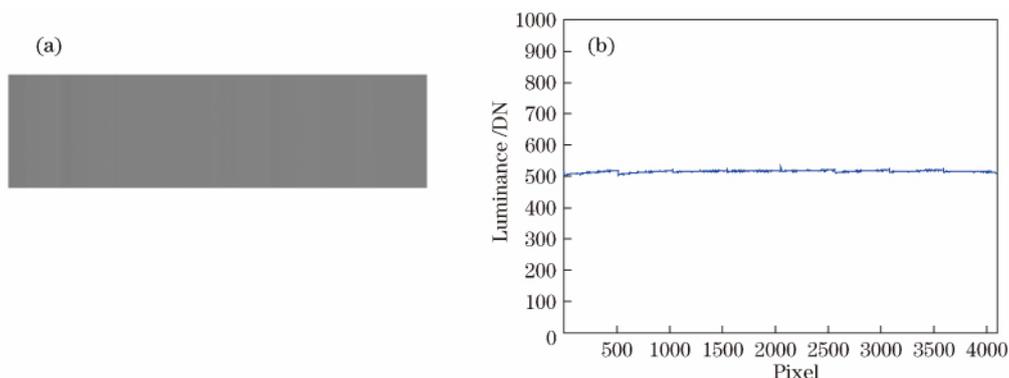


图7 本文方法校正后1/2饱和时系统的响应输出。(a)1/2饱和时原始图像数据;(b)1/2饱和时灰度分布图

Fig. 7 Response output of imaging system calibrated by the proposed method under 1/2 saturation.

(a) Raw image data of 1/2 saturation ; (b) gray distribution of 1/2 saturation

5 结 论

利用加权最小二乘定标校正法能够实现多通道 TDI CCD 成像系统 PRNU 的高精度校正。在 1/4 饱和~3/4 饱和响应范围内,系统的非均匀性由 4.4%降低至 1.28%,即在宽响应域内取得了良好的校正效果,满足成像系统的使用要求。加权最小二乘定标校正法是基于最小二乘拟合思想提出的,关键在于针对不同重要性的数据采集点赋以相应大小的权重,从而获得优化的校正参数,以实现更精确的校正。该方法可推广应用于多种航空、航天光学遥感相机,为获取高质量的遥感图像数据奠定技术基础。

参 考 文 献

- [1] Zheng Liangliang. Correction of non-uniformity response for multiple output TDI CCD imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(S): 145-150.
郑亮亮. 多通道 TDI CCD 成像系统的非均匀性校正[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S): 145-150.
- [2] Liu Yanyan, Li Guoning, Zhang Yu, *et al.* Detection and correction of response non-uniformity based on visible light area CCD[J]. Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays, 2010, 25(5): 759-763.
刘妍妍, 李国宁, 张瑜, 等. 可见光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正[J]. 液晶与显示, 2010, 25(5): 759-763.
- [3] Lin Hui, Liu Lili, Tian Xinfeng, *et al.* Correct non-uniformity of scientific grade CCD in measuring laser near field distributing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2108-2111.
蔺辉, 刘立力, 田新锋, 等. 强激光近场分布测量中科学级 CCD 的非均匀性校正[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2108-2111.
- [4] Quan Xianrong, Li Xiansheng, Ren Jianwei, *et al.* Nonuniformity correction of TDI CCD camera based on radiation luminance revises[J]. Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays, 2011, 26(3): 379-383.
全先容, 李宪圣, 任建伟, 等. 基于辐射亮度反演的 TDI CCD 相机的响应非均匀性校正[J]. 液晶与显示, 2011, 26(3): 379-383.
- [5] Yang Zhongdong, Li Jun, Paul Menzel W, *et al.* De-stripping for MODIS data via wavelet shrinkage[C]. SPIE, 2003, 4895: 187-199.
- [6] Gadallah F L, Csillag F, Smith E J M. Destripping multisensor imagery with moment matching[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(12): 2505-2511.
- [7] Han Ling, Dong Lianfeng, Zhang Min, *et al.* Destripping hyperspectral image based on an improved moment matching method[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3333-3338.
韩玲, 董连凤, 张敏, 等. 基于改进的矩匹配方法高光谱影像条带噪声滤波技术[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3333-3338.
- [8] Yu Yi, Chang Songtao, Wang Min, *et al.* Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1932-1938.
余毅, 常松涛, 王旻, 等. 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1932-1938.
- [9] Cheng Wansheng, Zhao Jie, Cai Hegao. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD[J]. Optics and

Precision Engineering, 2008, 16(2): 314-318.

程万胜, 赵杰, 蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(2): 314-318.

- [10] Li T, He M, Lei N, *et al.* TDI CCD non-uniformity correction algorithm[C]. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009: 1483-1487.
- [11] Zheng Liangliang, Zhang Guixiang, He Xiaojun, *et al.* Research on response model of TDI CCD image system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1104001.
郑亮亮, 张贵祥, 贺小军, 等. TDI CCD 成像电路系统响应模型的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1104001.
- [12] Yi Dayi, Shen Yunbao, Li Youfa. Method of calculation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002.
易大义, 沈云宝, 李有法. 计算方法 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.