

文章编号 1004-924X(2017)01-0073-11

复合面阵 CCD 摄影相机的实验室辐射定标

李 晶*, 赵建科, 昌 明, 呼新荣

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要:为消除复合面阵 CCD 摄影相机全像面辐射定标时存在的严重渐晕现象和解决多片 CCD 之间相对定标目标值选取困难的问题,提出了一种适用于多片 CCD 的实验室辐射定标方法。该方法对每个像素进行暗信号标定后,修正渐晕区的像素灰度值,通过选取合适的全像面相对定标目标灰度值,最终实现对复合面阵 CCD 摄影相机的辐射定标。通过分析渐晕区的灰度分布特征,提出了适用于所有曝光时间和辐亮度下的灰度修正方法。分别计算每片 CCD 灰度值与输入辐亮度之间的多项式拟合系数,选取全局拟合误差最小的一组系数计算对应辐亮度下相对定标目标的灰度值。通过本方法辐射定标后,复合面阵 CCD 摄影相机的全像面非均匀性由大于 20% 降至优于 2%,绝对定标精度为 4.23%。该结果表明本文提出的辐射定标方法适用于多片面阵 CCD 的辐射定标,定标精度满足航空相机的辐射定标需求。

关键词:辐射定标;非均匀性;渐晕;复合面阵 CCD

中图分类号:TH761.6;TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172501.0073

Radiometric calibration of photographic camera with a composite plane array CCD in laboratory

LI Jing*, ZHAO Jian-ke, CHANG Ming, HU Xin-rong

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: lijing@opt.ac.cn

Abstract: To eliminate the serious vignetting phenomenon and to solve the difficulty of choosing a relatively positioning target value problems among CCDs during the radiometric calibration of the whole image plane of the photographic camera with a composite plane array CCD, a method for radiometric calibration of multi-CCDs was proposed. After the dark signal calibration on each pixel, the gray value of the pixel in the vignetting area was revised, and by choosing the appropriate relative calibration target gray value of the whole image plane, the radiometric calibration of the photographic camera with a composite plane array CCD was eventually completed. Through analysis of the gray distribution characteristics of vignetting area, the gray correction method for all kinds of exposure time and radiance was proposed. With calculation of fitting coefficient between each CCD gray value and the input radiance respectively, the coefficient with global minimum fitting error was chosen to calculate the relative calibration target gray value corresponding to radiance. After the radiometric calibration using this method, the non-uniformity of the whole image plane of the photographic camera

收稿日期:2016-06-02;修订日期:2016-08-01.

基金项目:中科院创新基金资助项目(No. Y154451ZZ0);中科院仪器功能创新资助项目(No. Y490N31C01)

with a composite plane array CCD is reduced from above 20% to better than 2%, and the accuracy of the absolute calibration is 4.23%. The result indicates that the proposed calibration method is appropriate for the calibration of composite planes array CCD. The accuracy of the calibration satisfies the radiometric calibration requirement of aerial cameras.

Key words: radiometric calibration; non-uniformity; vignetting; composite plane array CCD

1 引言

随着地球表面探测、测绘的需求日益增加,航空相机向着大视场高分辨率的方向发展^[1]。受到制造工艺的限制,单片电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)的尺寸无法满足大视场航空相机的需求。目前,国际上普遍采用 CCD 拼接的方式扩大成像视场,该方式一般分为机械式拼接和光学拼接^[2]。机械式拼接是将多片 CCD 以机械直线拼接或交错拼接的方式组成相机的像面。光学式拼接相机是利用分光元件将全视场分为若干个子视场,每个子视场对应一个面阵 CCD,最终将所有 CCD 所成的像拼接起来得到全视场的图像。根据分光元件的不同,光学式拼接又可以分为折射式拼接、半反半透式拼接和反射式拼接^[2]。为了提高光能利用率并避免引入像差,反射式拼接光学相机得到了广泛应用,但该拼接方式的拼接范围存在渐晕的问题^[3],这会极大地影响航空相机的成像质量。

航空相机需要对地面目标进行拍摄成像,除获取目标的形状信息外,还要获取目标的辐射信息用于反演出目标的辐射特性,然而相机 CCD 响应不均匀性会严重影响高精度航空相机的辐射信息^[4-5]。航空相机的辐射定标可将相机的输出信号与相机入瞳的辐亮度之间建立定量关系^[6-9],根据 CCD 获取的图像信号可以反推出目标物体的辐亮度,从而获取目标的辐射特性。此外,在实验室辐射定标的过程中,反射拼接式复合面阵 CCD 获取的图像同样存在渐晕现象,由于像面由多片 CCD 组成,每片 CCD 通道的非均匀性很大。在辐射定标过程中,消除渐晕可以有效提高复合面阵相机的辐射定标效率。消除渐晕的传统方法主要有查表法、逐行扫描法和函数逼近法^[10-14]。其中,查表法通过计算不同辐亮度条件下每个渐晕区像素的补偿因子,对获取图像进行查表修正。这种方法的缺点是过于繁琐,需要建立各种辐亮度下的渐晕补偿因子库,实际辐亮度条件与实验

室辐射定标的辐亮度偏差会严重影响渐晕修正效果。逐行扫描法是直接利用获取后图像进行分析的一种渐晕消除方法,拟合出整幅图片的灰度变化趋势后进行恢复。由于这种方法需要对获取的目标图像进行逐行拟合计算,因此计算量巨大。函数逼近法利用查表法的结果,将各个像素点的补偿因子由图像中心向边缘的变化趋势描绘出来,再利用公式来逼近这条变化曲线。与查表法类似,这种方法的修正效果依赖于实际辐亮度与实验室辐射定标辐亮度的偏差。

本文对一个像面由 12 片面阵 CCD 组成的航空摄影相机进行了实验室辐射定标。针对多面阵拼接 CCD 存在的渐晕现象,以及多片 CCD 片间相对定标时平场目标值选取的难题,根据获取的实验室辐射定标图像,分析渐晕区与非渐晕区的分布特征,提出了一种适用于多片面阵 CCD 的辐射定标方法。该辐射定标方法包括逐像素暗信号标定、片间平场目标值优化选取及片内渐晕修正的相对定标和绝对定标 4 个过程。通过本方法辐射定标后,复合面阵 CCD 摄影相机的全像面不均匀性大幅降低,并且绝对定标精度满足航空相机实验室定标的要求,为后续的场地定标奠定了良好的基础。

2 复合面阵相机辐射定标原理

2.1 辐射定标原理

辐射定标是建立相机输出信号与相机入瞳的辐亮度之间定量关系的过程。单个 CCD 像素的工作原理^[15]如图 1 所示,在一定曝光时间内若干光子 n_p 激发单个像素产生若干电子 n_e ,这些电子与暗噪声 n_d 一起被系统获得。

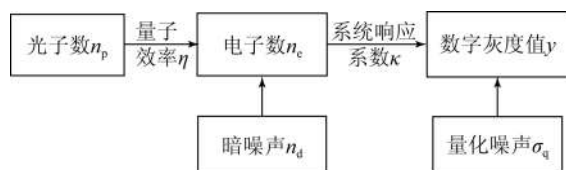


图 1 单个 CCD 像素的工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of single CCD pixel

CCD 获取的灰度值 y 可以表示为:

$$y = \kappa(n_e + n_d), \quad (1)$$

其中 κ 为系统响应系数。

根据辐射原理,式(1)中的 n_e 表示为:

$$n_e = \eta n_p = \eta \frac{AEt_{\text{exp}}}{hc/\lambda}, \quad (2)$$

其中: η 为量子效率, A 为单个像素的面积, E 为传感器的表面照度, t_{exp} 为曝光时间, h 为普朗克常量, c 为光速, λ 为入射光的波长。定义暗信号 y_{dark} 为:

$$y_{\text{dark}} = \kappa n_d. \quad (3)$$

根据式(1)~式(3),有:

$$y = y_{\text{dark}} + \kappa \eta \frac{\lambda A}{hc} E t_{\text{exp}}. \quad (4)$$

由式(4)可以看出,固定曝光时 CCD 响应灰度值与感光面的照度呈线性分布。需要指出的是,式(4)中的 y_{dark} 并不是常数,其表达式为:

$$y_{\text{dark}} = y_{d,0} + y_1 t_{\text{exp}}, \quad (5)$$

其中: $y_{d,0}$ 为曝光时间为 0 时的灰度值, y_1 定义为暗电流。暗电流随温度的增加而增加,可以表示为:

$$y_1 = y_{1,\text{ref}} \cdot 2^{(T - T_{\text{ref}})/T_d}, \quad (6)$$

式中: T_{ref} 为参考温度, $y_{1,\text{ref}}$ 为参考温度下的暗电流, T 为实际温度, T_d 为产生两倍暗电流的温度间隔。可见温度稳定的情况下,暗信号随曝光时间线性增加。通过获取若干曝光时间的暗信号,可以得出暗信号关于曝光时间的线性关系,这是辐射定标的第一个过程。经过暗信号的标定,CCD 获取的信号灰度值为:

$$y_0(i, j) = y(i, j) - y_{\text{dark}}(i, j), \quad (7)$$

其中 (i, j) 表示 CCD 上的第 (i, j) 个像素。

同一片 CCD 内像元响应特性的不一致导致相同照度下像元之间灰度值的差异,因此要先对灰度值进行相对定标^[5],相对定标也称为平场,原理如图 2 所示。



图 2 CCD 相对定标原理示意图

Fig. 2 Principle schematic of CCD relative calibration

这一过程是将整片 CCD 的灰度均值设为目标灰度值,每个像元均经过相对定标修正,得到相同照度下相同的灰度值,即有:

$$y_1 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_0(i, j)}{m \cdot n} = k(i, j) \cdot [y(i, j) - y_{\text{dark}}(i, j)], \quad (8)$$

式中 y_1 为经过暗信号修正的 CCD 灰度均值。辐射定标的光源为均匀面光源,因此入射 CCD 感光面的辐照度与辐亮度呈线性关系。不过若考虑 CCD 像元间量子效率和响应系数的差异及其他多种因素的影响,CCD 输出灰度值与辐亮度之间并非是严格的线性关系^[13],将辐射光源的辐亮度 L 和相对定标灰度值表示为:

$$y_1 = b + \sum_{k=1}^n a_k L^k. \quad (9)$$

通过调整辐射光源的不同辐亮度 L ,用最小二乘法或奇异值分解等方法求解系数 (a_1, a_2, \dots, a_n) 和 b 。此过程即为辐射定标中的绝对定标过程。

2.2 复合面阵 CCD 渐晕原理

由于制作工艺的限制,单个 CCD 的像素有限,为满足相机大视场高分辨率的要求,往往将多片 CCD 进行拼接。由于机械式拼接无法实现无缝拼接并且结构复杂,目前常用的拼接方法为光学拼接。光学拼接又分为外光路拼接以及内光路拼接^[2]。其中,外光路拼接采用多镜头技术,该方法对光的能量利用率很高、不需要后续的图像处理技术,但是它的体积重量大、结构复杂。内光路拼接需要使用光学分光元件,根据不同的分光元件将分光方法分为折射式分光法、半透半反式分光法和反射式分光法 3 种^[2]。折射式分光法会引入额外像差,半透半反式分光法的光能量利用率低,拼接的 CCD 片数越多,光能损失越多。反射式分光具有不引入额外像差、光能利用率较高的优势,因此广泛应用在大视场航空相机上。

通过反射镜的光束全部能通过系统进行成像,但是部分轴外光束会因反射镜的遮挡而无法到达成像像面,导致像面边缘光照度有所下降,产生渐晕现象,如图 3 所示。

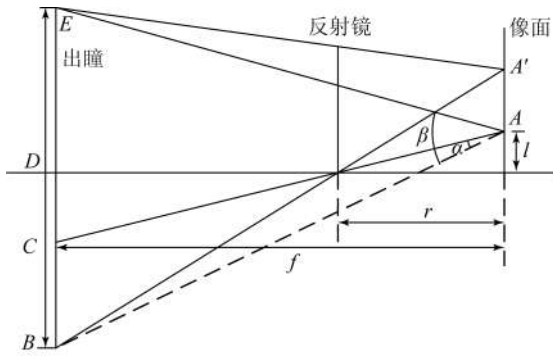


图 3 渐晕原理示意图

Fig. 3 Principle of vignetting with one mirror

拉伸反射镜光路,可以看出像面 A'点被全部通过光瞳的光照亮,而 A 点处由于反射镜的遮挡,在光瞳出射角度 β 内 α 角的范围内光束无法照亮 A 点,造成 A 点的照度小于 A'点的照度,即产生了渐晕现象。以单片反射镜为例,分析渐晕区系数。设光学系统焦距为 f ,渐晕点距离视场中心 l ,反射镜距离像面 r ,则有:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{2fr + lD + 2l^2}{\sqrt{4f^2 + 4l^2 + 4lD + D^2}} \right],$$

$$\beta = \arccos \left[\frac{4f^2 - D^2 + 4l^2}{\sqrt{(4f^2 + D^2 - 4l^2)(4f^2 + 4lD + 4l^2 + D^2)}} \right]. \quad (9)$$

根据渐晕系数的定义, A 点处的渐晕系数 t 可以表示为:

$$t = \frac{S_\alpha}{S_\beta} = \frac{1}{\pi} \arccos \left[\frac{2l(f-r)}{rD} \right] - \frac{8l(f-r)}{\pi r D^2} \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left[\frac{l(f-r)}{r} \right]^2}. \quad (10)$$

从式(10)可以看出,各点的渐晕系数与光学系统焦距 f 、出瞳尺寸 D 以及该点到视场中心的距离 l 有关。当光学系统参数确定时,渐晕区的各位置渐晕系数仅与 l 有关。渐晕区范围 L 表示为:

$$L \leq \frac{rD}{2(f-r)}, \quad (11)$$

同理,可计算多片反射镜拼接的渐晕系数和渐晕区范围。

若要实现复合面阵 CCD 整个像面的均匀性校正,除了要在单片 CCD 内部进行辐射定标外,还需要针对 CCD 拼接区域的渐晕进行处理。综合上述分析可知,不同像素位置的渐晕系数不同,因此渐晕区内的均匀性校正需要逐个像素进行计算。

3 复合面阵 CCD 辐射定标方法与实验

复合面阵 CCD 由 12 片面阵 CCD 通过光学拼接组成,等光程像面投影如图 4 所示。图中外围矩形框为虚拟焦面,0~11 表示 12 片 CCD 的序号,按照 3 行 4 列拼接为全视场像面。每片 CCD 由 $6\,024 \text{ pixel} \times 8\,008 \text{ pixel}$ 组成,灰度显示为 16 位,即饱和灰度值为 65 535,增益为 1 倍。从图中可以看出,相邻 CCD 之间均存在交叠区域,这部分区域将在辐射定标和成像过程中存在渐晕,渐晕在相对定标过程中进行消除。

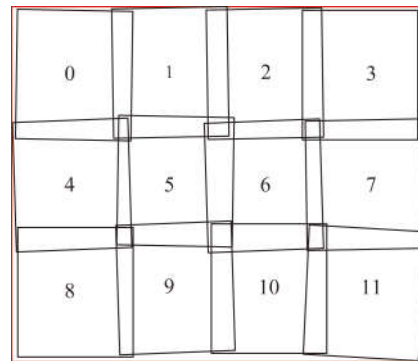


图 4 12 片 CCD 在虚拟焦面上的投影示意图

Fig. 4 Projection of 12 CCDs in virtual focal plane

如图 5 所示,实验室辐射定标装置由太阳模拟器、光谱辐射计和被测相机组成。太阳模拟器为 Labsphere 公司的 USS-7600 直径为 410.4 cm (76 inch) 的积分球,面均匀性优于 98%,输出辐亮度最高可达 $350 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$,光谱波段为 $0.35 \sim 2.5 \mu\text{m}$,输出非线性 $\leq 1\%$,色温在 $6\,000 \sim 3\,000 \text{ K}$ 可调,用于提供辐亮度可调的均匀面光源,出光口直径为 1 m,大于复合面阵相机的入瞳尺寸。使用 ASD 公司型号为 FSP350-1050P 的光谱辐射计,光谱波段为 $0.35 \sim 1.050 \mu\text{m}$;光谱辐亮度测量范围为 $0.02 \sim 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1})$ 。被测相机与光谱辐射计探头并排放置在太阳模拟器的出光口,通过控制器调节太阳模拟器的输出辐射亮度,使用光谱辐射计实时测量被测相机入瞳处的辐亮度。被测相机的工作波长为 $0.48 \sim 0.70 \mu\text{m}$,入瞳处辐亮度等于测试获取的光谱辐亮度在被测相机工作波长范围内的积分。

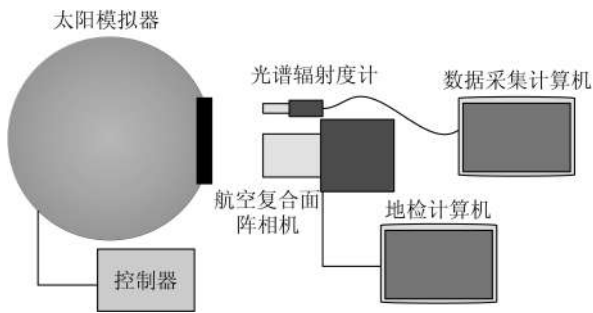


图 5 复合面阵相机实验室辐射定标装置示意图

Fig. 5 Laboratory radiometric calibration devices of photographic camera with a composite plane array CCD

实验室辐射定标过程包括暗信号标定、相对定标和绝对定标 3 个主要过程。由于复合面阵相机使用反射式拼接像面,在相对定标过程中需要对像面的渐晕区域进行灰度值修正。此外,全像面相对定标的目标灰度值选取应一致,因此需要对 12 片 CDD 的相对定标目标灰度值进行合理选取。在相对定标目标灰度值选取的过程中同时获取绝对定标系数。

3.1 暗信号

复合面阵相机标定暗信号过程如下:太阳模拟器辐亮度调为 $0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$,同时对被测相机入瞳进行遮挡,按线性改变被测相机的曝光时间:由 50 ms 开始,依次递减 2 ms 直至 4 ms,采集 12 片 CCD 在每个曝光时间下的图像。考虑到每个像素之间的性能差异,按照式(5)对每个像素进行暗信号标定。图 6 为 4~7 号 CCD 某一像素在不同曝光时间下的灰度值,从图中可以看出暗信号随曝光时间不呈线性变化,CCD 像元暗信号随曝光时间的变化不剧烈。对于 16 位 CCD 来说,暗信号灰度值小于饱和灰度值的 0.5%。因此在辐射定标过程中,可将暗信号作为一个常数计算,取所有曝光时间下的灰度平均值作为每个 CCD 像素的暗信号,即有:

$$y_{\text{dark},(i,j)} = \frac{\sum_{k=1}^n y_{\text{dark},(i,j)}(k)}{n}, \quad (12)$$

式中: (i, j) 表示第 i 行第 j 列像素, k 表示第 k 个曝光时间, n 为曝光时间的种类。

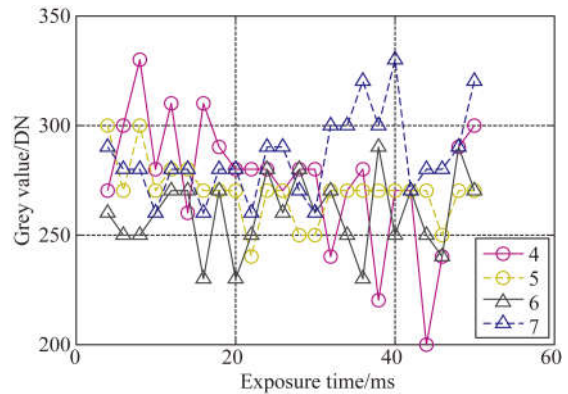


图 6 4~7 号 CCD 某一像素在不同曝光时间下的灰度曲线

Fig. 6 Curve of certain pixels DN of 4~7 CCD under different exposure time

3.2 相对定标与绝对定标

定标实验装置按图 5 搭建,实验装置如图 7 所示,复合面阵相机与光谱辐射度计探头并排放置在口径大于相机入瞳的太阳模拟器的出光口前。设置复合面阵相机的曝光时间最短,调节太阳模拟器的输出辐亮度,至获取复合面阵相机灰度图饱和,利用光谱辐射度计实时测量此时的辐亮度 $L = 15.62 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$ 。为实现高效的辐射定标,控制太阳模拟器亮度由高到低变化一个周期,在同一亮度下改变复合面阵相机的曝光时间,以获取相同曝光时间下不同辐亮度的辐射定标图像。控制中太阳模拟器的输出辐亮度在 $0 \sim 15.62 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$ 呈线性变化,采集 8 个辐亮度下的辐射定标图像。



图 7 复合面阵相机辐射定标实验图

Fig. 7 Experimental radiometric calibration of photographic camera with a composite plane array CCD

图 8 为曝光时间为 12 ms、辐亮度为 $15.62 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$ 下的定标灰度图像。从图中看出,除了单片 CCD 边缘的无效像素以外,在 CCD 拼接的交界部分存在严重的渐晕现象,即在相邻 CCD 交界附近图像的灰度值大幅衰减。去除 CCD 边缘的无效像素后,绘制图 7 中虚线行和列的灰度曲线分别如图 9(a)和图 9(b)所示。从图 9 看出,靠近视场边缘的 CCD,如 4 号和 7 号 CCD 在获取图像的整个行方向区域内的均匀性相比中心 5,6 号 CCD 差,1 号和 9 号 CCD 在获取图像的整个列方向区域内的均匀性相比中心 5 号 CCD 差。此外,图 9(a)中 6 号 CCD 灰度值普遍低于其他 CCD,因此可以看出各片 CCD 之间的辐射响应特性存在差异。

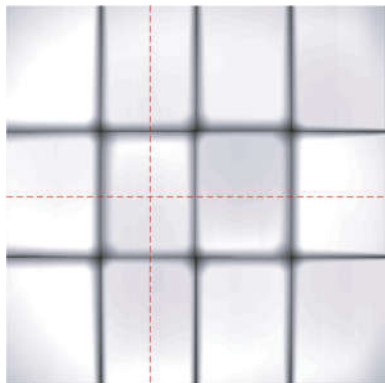
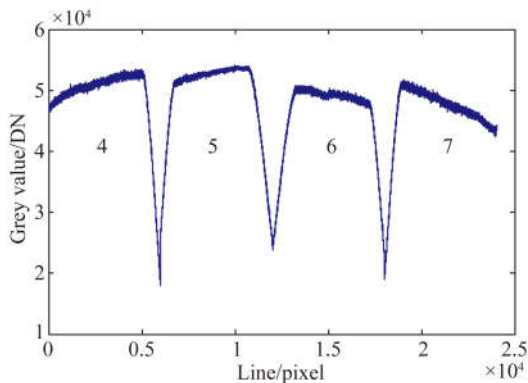


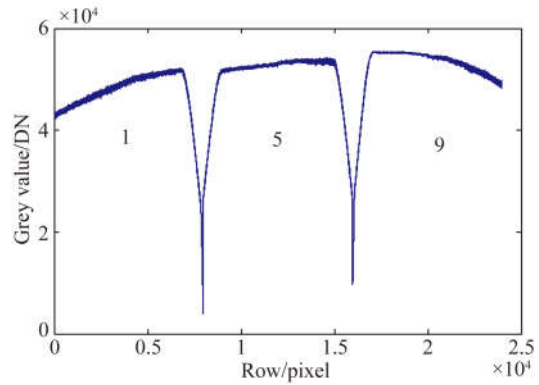
图 8 曝光时间为 12 ms、辐亮度为 $15.62 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$ 时的辐射定标灰度图

Fig. 8 Grayscale of radiometric calibration with exposure time of 12 ms and radiance of $15.62 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$



(a)虚线行像素的灰度曲线图

(a)Grey curve of pixels in imaginary line



(b)虚线列像素的灰度曲线

(b)Grey curve of pixels in imaginary row

图 9 辐射定标单一行列的灰度曲线

Fig. 9 Grey curves of pixels in red line or row

3.2.1 渐晕区灰度修正

为了探究渐晕区域的特征,以行方向为例,画出同一辐亮度条件下 4~7 号 CCD 的 7 100, 7 300, 7 500, 7 700 和 7 900 行的灰度曲线如图 10 所示。图中虚线之间为行方向的渐晕区域,虚线为渐晕区与非渐晕区的分界处。从图中可以看出,行方向相邻两个 CCD 均存在渐晕区,同时渐晕区内的灰度分布为线性变化。

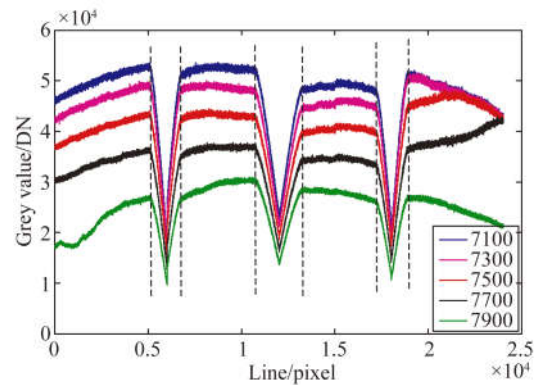


图 10 4~7 号 CCD 不同行的灰度曲线

Fig. 10 Curves of grey value of different lines in 4—7 CCDs

此外,在同一辐亮度条件下,行渐晕区域中的列像素是固定的。改变辐亮度,绘制 4~7 号 CCD 第 7 100 行的灰度曲线,如图 11 所示,虚线为渐晕区与非渐晕区的分界处。从图中看出不同辐亮度下,行渐晕区域也是固定的。

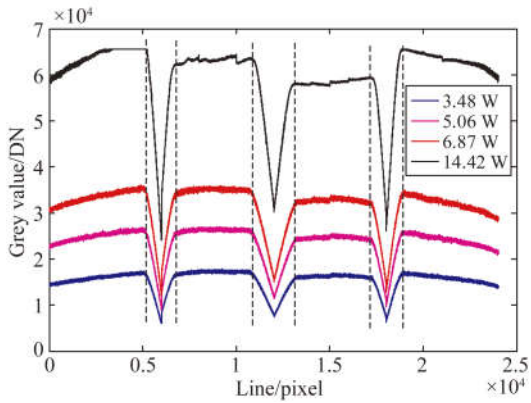
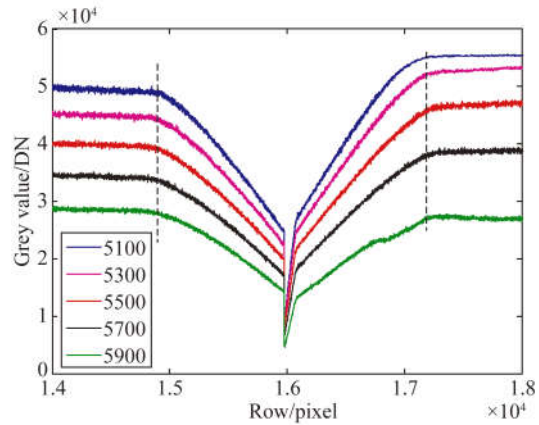


图 11 不同辐亮度下 4~7 号 CCD 第 7 100 行的灰度曲线
Fig. 11 Curves of grey value of line 7 100 in 4—7 CCDs under different radiances

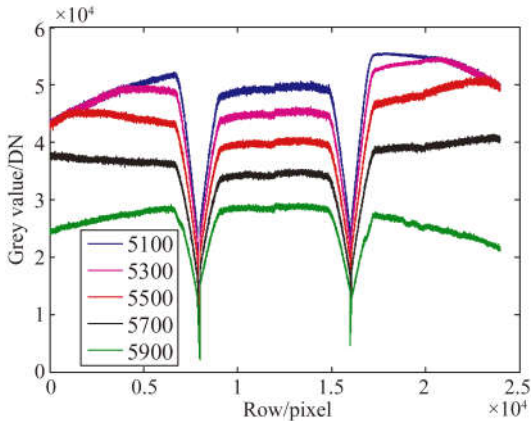
相比行方向渐晕区,列方向渐晕区的灰度曲线比较复杂。图 12(a)为 1,5,9 号 CCD 列渐晕区的灰度曲线,将 CCD 交接部分放大如图 12(b)和 12(c)所示。可以看出,尽管列渐晕区域是固定的,但是渐晕区域内的灰度值不是单一的线性关系,1 号和 9 号 CCD 的渐晕区均存在两个不同的线性渐晕区域。



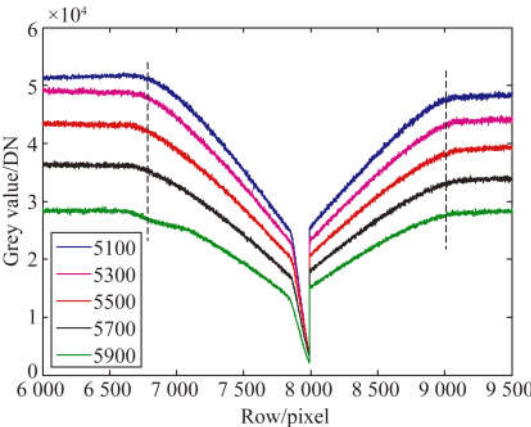
(c)5,9 号 CCD 渐晕区不同行的灰度曲线
(c)Curves of grey value of different rows in vignetting area between CCD 5,9

图 12 1,5,9 号 CCD 不同行的灰度曲线
Fig. 12 Curves of grey value of different rows in CCD 1,5,9

改变辐亮度,绘制 1,5,9 号 CCD 的 5 500 列灰度图曲线如图 13 所示。由图可知,不同辐亮度下列渐晕区域也是固定的。综合图 10~图 13 得出结论:复合面阵相机渐晕区内每条灰度曲线的斜率不一致,无法以行或列为单位进行渐晕区域的灰度修正,同时列方向渐晕区的灰度值无法用单一函数表示,因此渐晕区域灰度值需要以像素为单位一一修正。



(a)1,5,9 号 CCD 不同行的灰度曲线
(a)Curves of gray value of different rows in CCD 1,5,9



(b)1,5 号 CCD 渐晕区不同行的灰度曲线
(b)Curves of gray value of different rows in vignetting area between CCD 1,5

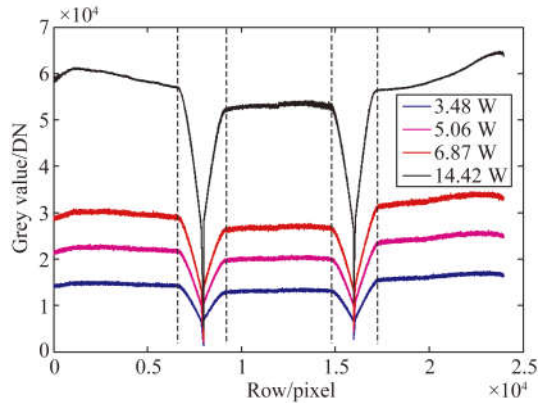


图 13 1,5,9 号 CCD 不同辐亮度下第 5 500 列的灰度曲线
Fig. 13 Curves of grey value of row 5 500 in 1,5,9 CCD under different radiances

绘制不同辐亮度下渐晕行区域和渐晕列区域内固定像素的灰度曲线,分别如图 14(a)和 14(b)所示。从图中可以看出,在渐晕区域内,灰度值随辐亮度呈线性变化。综合上述对渐晕区灰度值特征的分析, k 号 CCD 渐晕区的修正公式为:

$$Y_k = k_{1,k}(i, j) DN_k(i, j) + b_{1,k}(i, j), \quad (13)$$

其中： $k_{1,k}(i,j)$ 和 $b_{1,k}(i,j)$ 为 k 号 CCD 渐晕区第 i 行第 j 列像素的修正系数， $DN_k(i,j)$ 为 k 号 CCD 渐晕区第 i 行第 j 列像素的灰度值， Y_k 为 k 号 CCD 非渐晕区的灰度均值。通过对不同辐亮度下的 Y_k 和 $DN_k(i,j)$ 构建上述方程求解每个像素对应的修正系数 $k_{1,k}(i,j)$ 和 $b_{1,k}(i,j)$ 。

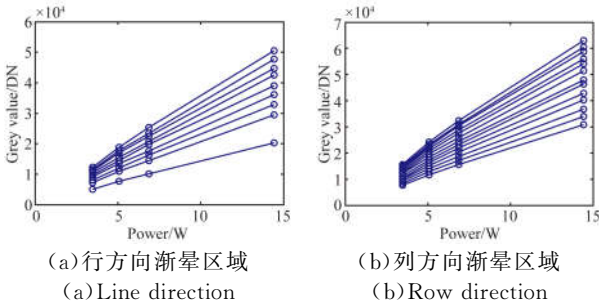


图 14 不同辐亮度下单个像素的灰度曲线
Fig. 14 Curves of grey value of single pixels under different radiance in vignetting area

3.2.2 相对定标目标灰度值选取

相对定标的目的是使相同辐亮度下全视场内的 CCD 中每个像素的灰度值相等。由于复合面阵相机由 12 片 CCD 组成像面，在完成渐晕区域灰度修正后，需要对 12 片 CCD 同时进行相对定标，这样会给目标灰度值的选取带来困难。曝光时间为 12 ms 时不同辐亮度下每片 CCD 的灰度均值变化曲线如图 15 所示。从图中可以看出，所有 CCD 的灰度均值随辐亮度的变化趋势基本一致，但是每个 CCD 在同一辐亮度下的灰度均值有所差异。

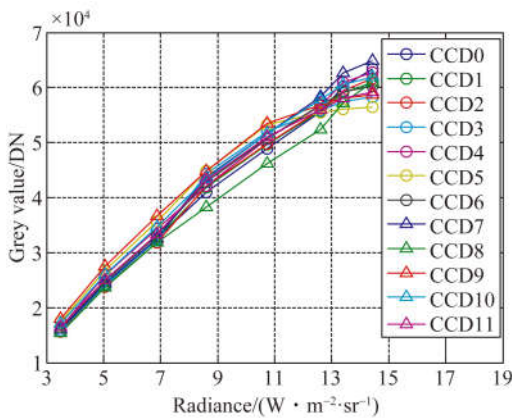


图 15 12 个 CCD 图像的灰度平均值与输入辐亮度变化曲线
Fig. 15 Variation of mean grey value of 12 CCD images with input radiance

为了确定每个辐亮度下的相对定标目标灰度值，将每个 CCD 不同辐亮度下的灰度值进行多项式拟合，通过奇异值分解计算得到 12 片 CCD 的 12 组拟合系数。分别计算每个 CCD 对应辐亮度的拟合灰度平均值，计算每组拟合系数获得的灰度均值与实际均值的方差，选取方差最小的那组拟合系数计算得到的灰度值作为全部 12 片 CCD 相对定标的目标灰度值。分别使用 1~3 阶多项式对实际的灰度均值和辐亮度进行拟合，每组多项式系数的拟合误差如图 16 所示，具体数值如表 1 所示。

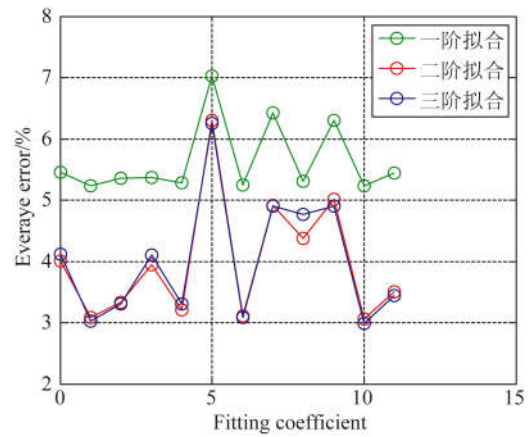


图 16 不同拟合阶数的拟合误差
Fig. 16 Fitting errors of different fitting orders

由此可知，1~3 阶拟合误差方差的最小拟合系数均为第 10 号 CCD 的拟合系数，随着拟合阶数的增加拟合误差减小。但是由于 3 阶拟合误差与 2 阶拟合误差的最大偏差仅为 0.39%，为了节省辐射定标时间，这里采用 2 阶拟合。此时的拟合系数同时也是该曝光时间下的绝对定标系数。在渐晕区灰度修正和相对定标目标灰度值确定后，根据式(11)求解全视场 12 片 CCD 中所有像素的相对定标系数。相对定标效果可以用相机非均匀性 (Photo Response Non-Uniformity, PRNU) 表征^[15]，它表示 CCD 像元在 50% 饱和曝光量下的输出信号的均方差与均值之比，即有：

$$PRNU = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [DN(i,j) - \overline{DN}]^2}{m \cdot n}} \times 100\%, \tag{14}$$

其中： $DN(i,j)$ 为第 i 行第 j 列像素的灰度值， \overline{DN} 为灰度均值， m,n 分别为整个像面的行数和列数。

表 1 不同拟合阶数的拟合误差
Tab.1 Fitting errors of different fitting orders (%)

CCD 拟合系数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 阶拟合误差	5.46	5.24	5.36	5.36	5.28	7.03	5.24	6.42	5.31	6.30	5.23	5.44
2 阶拟合误差	4.01	3.08	3.33	3.95	3.21	6.30	3.11	4.92	4.38	5.02	3.07	3.50
3 阶拟合误差	4.12	3.03	3.31	4.11	3.30	6.25	3.08	4.90	4.77	4.91	2.99	3.45

4 实验结果与分析

如 3.1 节所述,按照式(12)计算出系统的暗信号,再根据式(13)对 12 片 CCD 图像进行渐晕区灰度修正。以图中的一行灰度值为例,修正后的灰度曲线如图 17 所示。从图中可以看出,渐晕区灰度值得到良好修正,该行的 PRNU 由修正前的 14.32%降至 4.22%。

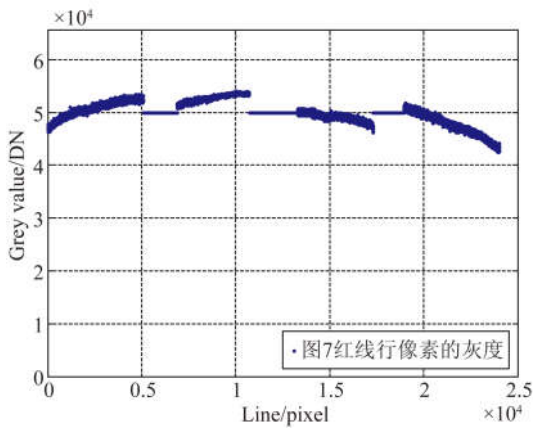


图 17 渐晕区修正后灰度值曲线

Fig.17 Curves of grey value in vignetting area after correction

渐晕灰度修正后,继续对整个像面进行相对定标计算。根据 3.2.2 节中的描述,选取 12 片 CCD 灰度和辐亮度拟合系数中整个像面拟合误差最小的 10 号 CCD 拟合系数求得相对定标目标的灰度值。计算出曝光时间为 12 ms 时,不同辐亮度 L 下的灰度目标值 DN。根据相对定标中目标的灰度值计算像面中每个像素的相对定标系数,完成相对定标工作。选取辐亮度为 $8.61 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$ 下没有参加定标计算的图 18(a)作为验证图像,辐射定标结果如图 18(b)所示。由图可知,CCD 之间的渐晕区域得到了良好的修正,整个像面亮度均匀。按式(14)计算出相机的 PRNU 由相对定标

前的 20.49%降低至相对定标后的 1.22%。

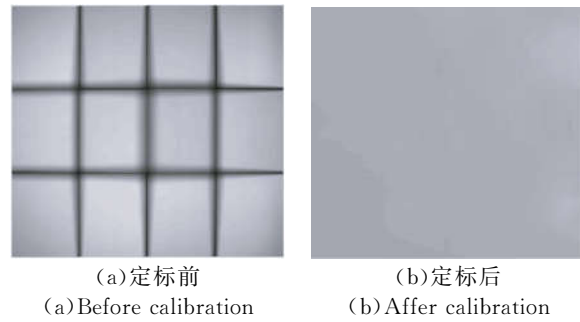


图 18 辐射定标结果

Fig.18 Result of radiometric calibration

在选取相对定标目标灰度值的过程中,已经建立了曝光时间为 12 ms 时灰度值与输入辐亮度之间的 2 阶多项式关系,此多项式系数同时为该曝光时间下的绝对定标系数。以此类推,可以计算出不同曝光时间下的绝对定标系数。以线性度表征绝对定标精度,测试入射能量的响应变化规律。改变辐亮度输入,并通过光谱辐射计正确测定,同时记录相应的输出(DN),然后计算输出对输入的线性度为:

$$u_1 = \max \frac{DN(i, j) - (a_2 \cdot L^2 + a_1 \cdot L + b)}{DN(i, j)} \times 100\%, \tag{15}$$

其中 (a_1, a_2) 和 b 均是绝对定标系数。经过绝对定标后,系统的线性度 $u_1 = 4.23\%$ 。

5 结 论

本文针对复合面阵 CCD 组成相机进行辐射定标,解决了多面阵拼接 CCD 存在的渐晕现象,以及多片 CCD 在片间相对定标时存在的平场目标值选取困难的问题。通过分析获取的实验室辐射定标图像中渐晕区与非渐晕区的分布特征,提

出了一种适用于多片面阵 CCD 的辐射定标方法。通过逐像素暗电流标定、片间平场目标值优化选取及片内渐晕修正的相对定标和绝对定标 3 个过程。通过本方法辐射定标后,复合面阵 CCD 摄影

相机的全像面非均匀性由大于 18% 降至优于 2%,绝对定标精度为 4.23%。标定结果表明,本文提出的辐射定标方法适用于多片面阵 CCD 的辐射定标,可服务于大视场航空遥感系统。

参考文献:

- [1] 任焕焕,阮萍,何建伟,等. TDI-CCD 空间立体相机辐射定标研究[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3476-3480.
REN H H, RUAN P, HE J W, *et al.*. Study of the radiometric calibration of TDI-CCD spatial stereo camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3476-3480. (in Chinese)
- [2] 陶明慧. 基于反射镜拼接的图像渐晕处理技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
TAO M H. *Research on the Vignetting Correction Method of Mosaic Images Based on Reflector* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [3] BOIVIN L P. Radiometric errors caused by diffraction from circular apertures: edge effects [J]. *App. Opt.*, 1977, 16(2): 377-384.
- [4] 乔闹生. CCD 非线性及其校正研究[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2305-2309.
QIAO N SH. Nonlinearity of CCD and its adjustment [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2305-2309. (in Chinese)
- [5] 李宪圣,叶钊,任建伟,等. 空间相机异常响应图像处理方法[J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 557-562.
LI X SH, YE ZH, REN J W, *et al.*. Processing method for abnormal response of space camera image in orbit [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 557-562. (in Chinese)
- [6] 孙景旭. 大口径光学有效载荷辐射定标技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
SUN J X. *Research on Radiometric Calibration for Large-aperture Space Optical Remote Sensor* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [7] 郑亮亮,金光,曲宏松,等. 高信噪比星载 CCD 成像电路系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2027-2036
ZHENG L L, JIN G, QU H S, *et al.*. Space-borne CCD imaging circuit system with high signal-to-noise ratio [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 2027-2036. (in Chinese)
- [8] 何玲平,陈波,张宏吉,等. 极紫外波段空间相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1036-1041.
HE L P, CHEN B, ZHANG H J, *et al.*. Radiation calibration of EUV space cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1036-1041. (in Chinese)
- [9] 赵维宁,胡秀清,方伟,等. 卫星光学仪器辐射交互定标方法的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1921-1931.
ZHAO W N, HU X Q, FANG W, *et al.*. Development and applications of intercalibration for satellite optical instruments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1921-1931. (in Chinese)
- [10] 张星祥,任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 740-745.
ZHANG X X, REN J Y. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 740-745. (in Chinese)
- [11] 宁永慧,郭永飞. TDICCD 拼接相机的像元响应非均匀性校正方法[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 386-394.
NING Y H, GUO Y F. Correction of pixel response non-uniformity in TDICCD mosaic camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 386-394. (in Chinese)
- [12] 吴厚德,许文海. 多输出 CCD 接缝的校正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 454-461.
WU H D, XU W T. Correction of seams for multiple output CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 454-461. (in Chinese)
- [13] 修吉宏,黄浦,李军,等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1368-1373.
XIU J H, HUANG P, LI J, *et al.*. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,

20(6):1368-1373. (in Chinese)

- [14] 刘洪兴,李宪圣,李晓杰,等. 反射式拼接 CCD 相机渐晕图像校正[J]. 光电工程,2015,42(2):9-14.
LIU H X, LI X SH, LI X J, *et al.*. Correction of vignetting image for reflector-based mosaic CCD

camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015,42(2):9-14. (in Chinese)

- [15] EMVA Standard 1288. Standard for characterization of image sensors and cameras [S]. European Machine Vision Association,2012.

作者简介:



李 晶(1987—),女,河北石家庄人,博士,助理研究员,2015 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学检测与辐射定标方面的研究。E-mail: lijing@opt.ac.cn



赵建科(1975—),男,陕西宝鸡人,硕士,高级工程师,1999 年于中国计量学院获得学士学位,2009 年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事航天航空相机及光学跟踪测量设备总体指标测试的工作。E-mail: zjk@opt.ac.cn

(本栏目编辑:曹 金)