

文章编号 1004-924X(2012)06-1365-09

## 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标

修吉宏<sup>1\*</sup>, 黄 浦<sup>1</sup>, 李 军<sup>1,2</sup>, 李友一<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点  
实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**以大面阵彩色 CCD 航测相机为研究对象, 分析其成像过程, 提出了影响相机辐射响应特性的各个因素, 并以此为基础, 建立了辐射响应特性模型。分别在暗场和使用积分球的条件下进行了辐射响应标定实验, 通过组合更改输入辐亮度、曝光时间和 CCD 增益等因素对相机的辐射响应特性进行测量和分析。结果表明, 相机 R、G、B 颜色通道随输入辐亮度变化的辐射响应特性并不相同, 但在工作谱段范围内均呈线性变化趋势。采用最小二乘法对辐射标定数据进行拟合, 一次多项式拟合结果的决定系数  $R^2$  值均可达到 0.999 以上。当输入辐亮度不变时, 相机输出图像灰度值随曝光时间或 CCD 增益的变化呈线性变化趋势, 从而为其它工作条件下辐射响应特性曲线的推演奠定了理论基础。将相机辐射响应标定结果应用于相机调光功能, 成像结果表明, 获得的图像亮度适中, 图像平均灰度值满足调光要求。

**关键词:**航测相机; CCD 相机; 辐射定标; Bayer 阵列

**中图分类号:** V447.3; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1365

## Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera

XIU Ji-hong<sup>1\*</sup>, HUANG Pu<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, LI You-yi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: xiujihong0809@yahoo.com.cn

**Abstract:** Several kinds of factors affecting the radiometric calibration of a large area array color CCD aerial mapping camera were presented through analyzing the process of camera imaging. Then, a model for radiometric calibration was established. The experiments of radiometric calibration were performed by using integrating sphere and in the dark field, respectively, and outputs of radiometric response of the camera were measured and analyzed through combination of changing the input radiance, exposure time, CCD gain and other factors. The experimental results show that the characteristics of radiometric response for R, G and B color channels are different when the input radiance is changed, but it varies linearly in the working spectral range. When the least square method is used to fit the calibration data of radiation, the goodness of fit for first-order polynomial shows that the  $R^2$  is above 0.999. Fur-

收稿日期: 2012-01-19; 修订日期: 2012-02-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (2009AA7010102)

thermore, when input radiometric luminance is constant, the output of the camera varies linearly with the exposure time or CCD gain, which lays the theoretical basis for the deduction of radiation response characteristic curves under the other work conditions. The data from radiometric calibration is applied to the exposure parameters, and experimental results indicate that the lightness of image is appropriate and its average gray value satisfies the requirement for exposure.

**Key words:** aerial mapping camera; CCD camera; radiometric calibration; Bayer color filter array

## 1 引言

航空相机的辐射定标是指确定相机输出信号幅值与到达相机入瞳处的辐射亮度之间的定量关系,即确定相机的辐射响应特性。由于航空测绘不仅需对自然地理要素或者地表人工设施的形状、大小、空间位置进行测定和采集,还需对其属性进行表述及处理,因此辐射定标是航测相机研发和使用过程中的必备环节。只有预先对相机进行辐射响应特性标定,并利用辐射定标的结果对相机获取的原始数字图像进行辐射校正,才能从相机对地拍摄图像数据中定量获取各种地物目标的辐射信息,并反演出地物目标的辐射特性,从而对航测图像进行正确的判读和有效的利用<sup>[1]</sup>。

为了扩大地面目标的覆盖范围,并尽可能减小图像畸变,同时考虑到人眼辨别彩色色调比灰色色调的能力更强,航测相机通常采用大面阵彩色 CCD 探测器,其像元数规模较大,导致数据处理量庞大,且彩色 CCD 中 R、G、B 像元光电响应特性并不相同,这些都增加了大面阵彩色 CCD 相机辐射定标的难度。目前国内针对可见光 CCD 相机的辐射定标多是基于 TDI CCD 探测器<sup>[2-4]</sup>。对于大面阵 CCD 相机,尤其是彩色 CCD 相机辐射定标方法的研究不多。吴波等人在假设 CCD 暗电流等噪声为零的前提下,通过改变曝光时间对商业彩色数码相机进行了光强响应特性标定,并得出多项式光强响应模型优于  $\gamma$  次幂指数响应模型的结论<sup>[5]</sup>;Marta de Lasarte 采用线性校正算法对彩色数码相机进行了非均匀性校正,证明了在辐射标定或校正的过程中,考虑增益和暗电流噪声的重要性<sup>[6]</sup>。上述文献均侧重商用数码相机,其 CCD 阵列像元数规模不大,且在进行响应特性标定或非均匀性校正过程中并没有考虑影响

辐射定标或校正的全部参数的影响。

本文使用积分球对某大面阵彩色 CCD 航测相机进行了实验室内辐射响应标定实验,对影响辐射响应特性的各个因素(包括曝光时间、CCD 增益及输入辐亮度等参数)进行组合,并分析了各参数对相机辐射响应特性的影响。

## 2 辐射响应特性的影响因素

图 1 为相机成像过程示意图,通过分析其成像过程的各个环节,可以发现大面阵彩色 CCD 相机的辐射响应特性受多种因素影响,主要包括以下几类:

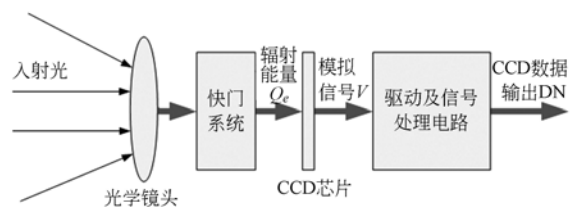


图 1 相机成像过程示意图

Fig. 1 Process of image formation

### 2.1 相机光学系统的影响

光学系统是能量传输、成像、信息传递和变换的重要工具,其在传输能量的过程中,不可避免地会造成光能量的损失,从而导致像面亮度低于物面亮度。造成光能损失的原因主要包括透射面的反射损失、反射面的吸收损失和透过材料内部的吸收损失等。此外,光学系统镜头的加工精度、探测器单元相对光轴的偏离角度<sup>[7]</sup>等因素也会影响相机的辐射响应特性。

### 2.2 CCD 器件固有特性的影响

CCD 本身的结构材料和制造工艺等因素决定 CCD 像元的感光有效面积及对光的灵敏度,同时也决定了 CCD 器件暗电流、散粒噪声等固定模

式噪声的强弱。而对于彩色 CCD 芯片, R、G、B 像元光电响应特性也并不相同,这就决定了辐射定标的处理必须按单个色彩分量分别处理后再进行统一的归一化处理。

### 2.3 CCD 驱动与处理电路的影响

CCD 驱动与处理主要包括 CCD 时序驱动、信号放大处理及 A/D 采集处理等电路。为保证数据输出的快速性, CCD 输出通常采用多通道数据输出方式, 供电电压、时序输出延时、放大器参数、A/D 采集量化噪声、数据传输电缆质量以及电路板设计与制造工艺等均会造成 CCD 像点最终输出数据同真实数据之间的差异。

上述各类影响因素中, 有些仅与自身性能相关, 在系统设计完成后即已固定, 比较容易测定和校正, 而对于其中随相机工作环境条件如工作温度、曝光时间等变化而变化的因素, 则需通过多种工作条件的组合进行测定。

## 3 辐射响应模型

根据前面分析, 在忽略大气环境条件影响的条件下, 相机最终输出的图像灰度值(DN)是受入射辐亮度、光学系统、CCD 光电转换以及电子学系统因素影响的多元函数<sup>[8]</sup>。入射光经光学系统滤光片、光学镜头及快门系统后照射到 CCD 芯片上, 则 CCD 像面处的辐射能  $Q_e(\lambda)$  为:

$$Q_e(\lambda) = \frac{\pi A_d L(\lambda) \tau_0 t}{4 F^2}, \quad (1)$$

式中:  $A_d$  为 CCD 探测器面积;  $F$  为相机的相对孔径数;  $\tau_0$  为光学系统透过率;  $L(\lambda)$  为入射光的辐射亮度;  $t$  为曝光时间。

设相机的光谱响应函数为  $R(\lambda)$ , 则 CCD 输出的模拟信号为:

$$V = Q_e(\lambda) R(\lambda). \quad (2)$$

考虑 CCD 芯片在光电转换过程中不可避免地存在各类 CCD 噪声, 则经过 CCD 驱动及处理电路后, CCD 最终输出的 DN 值可表示为:

$$DN = \frac{\pi A_d \tau_0 L(\lambda) t}{4 F^2} R(\lambda) \cdot G + N_1 + N_2 + N_3, \quad (3)$$

式中:  $G$  为增益放大系数;  $N_1$  为 CCD 光电转换过程中的暗电流噪声;  $N_2$  为与入射辐亮度无关的噪声, 包括读出噪声、量化噪声等;  $N_3$  为与入射辐亮度有关的噪声, 包括光子散粒噪声等。

暗电流噪声是与温度相关的噪声, 且随增益及曝光时间的增加而线性增加<sup>[9-10]</sup>, 而  $N_2$  和  $N_3$  具有平均值为零的特征, 所以可以通过多次取样来消除它们的影响<sup>[11]</sup>, 令  $A = \frac{\pi A_d \tau_0 G t R(\lambda)}{4 F^2}$ , 则

CCD 输出 DN 值可简化为:

$$DN = A \cdot L(\lambda) + N_1. \quad (4)$$

由于  $A$  为受多种因素影响的综合函数, 因此 CCD 输出 DN 值同入射光辐射亮度之间不一定是严格的线性关系, 根据文献[8]中的理论分析及文献[5]中的最终实验拟合结果, 辐射响应模型可用下面的表达式表示:

$$DN = A_0 + A_1 L(\lambda) + A_2 L^2(\lambda) + \dots + A_N L^N(\lambda), \quad (5)$$

式中: DN 为 CCD 输出的图像灰度值;  $A_0$  为以暗电流为主导的 CCD 探测器噪声。

## 4 辐射定标实验的理论分析与设计

### 4.1 辐射定标方法

实验室定标是航空相机辐射定标的主要手段, 根据建立的辐射响应模型对大面阵 CCD 航测相机进行实验室定标实验, 可精确确定相机入瞳处输入辐亮度和数字化输出之间的定量关系。

根据定标用的光源不同, 实验室定标包括平行光管定标、朗泊板定标和积分球定标。平行光管光源只能照明相机少数像元 and 对其定标; 朗泊板定标杂散光大, 影响定标精度。用积分球光源可避免这些缺点, 还具有光源孔径和视场大、亮度均匀的特点, 可以同时提供图像均匀性校正数据<sup>[12]</sup>, 是目前实验室辐射定标时广泛采用的一种定标方法。

### 4.2 定标实验原理

大面阵彩色 CCD 相机采用 Bayer 阵列形式的 CCD 探测器。考虑到 R、G、B 像元对光强响应的不同, 结合式(5)建立的辐射响应模型, 并分别用 R、G、B 来替代式(5)中的系数  $A$ , 建立不同颜色像元的辐射响应模型为:

$$\begin{cases} R_{DN} = R_0 + R_1 L(\lambda) + R_2 L^2(\lambda) + \dots + R_N L^N(\lambda) \\ G_{DN} = G_0 + G_1 L(\lambda) + G_2 L^2(\lambda) + \dots + G_N L^N(\lambda) \\ B_{DN} = B_0 + B_1 L(\lambda) + B_2 L^2(\lambda) + \dots + B_N L^N(\lambda) \end{cases}, \quad (6)$$

式(6)中,  $R_0 \dots R_N$ 、 $G_0 \dots G_N$ 、 $B_0 \dots B_N$  分别为 R、G、

B 三色的辐射校正系数,确定这些校正系数即可实现相机输出 DN 值反演出相机入瞳处的辐射亮度  $L$ , 最终还原出真实的目标景物辐射亮度图像<sup>[8]</sup>。

以红色像元为例,选取  $n$  组不同的入射辐射亮度,可组成多个测量方程,用辐射响应矩阵形式可表示为:

$$\begin{pmatrix} R_{DN1} \\ R_{DN2} \\ R_{DN3} \\ \vdots \\ R_{DNn} \end{pmatrix} = R_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_1 & L_1^2 & L_1^3 & \cdots & L_1^N \\ L_2 & L_2^2 & L_2^3 & \cdots & L_2^N \\ L_3 & L_3^2 & L_3^3 & \cdots & L_3^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_n & L_n^2 & L_n^3 & \cdots & L_n^N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

已知图像输出值  $R_{DNi}(i=1,2\cdots n)$ 、入射辐射亮度  $L_i(i=1,2\cdots n)$ 和暗电流噪声  $R_0$ ,当满足  $n > N$ ,即可解出各个颜色的辐射校正系数  $R_i(i=1,2\cdots n)$ <sup>[5,7]</sup>。

### 4.3 实验组成及实验方法

实验室内采用积分球进行大面阵彩色 CCD 相机辐射定标所需的实验设备包括:积分球、光谱辐亮度计、图像采集卡及用于处理数据的计算机,如图 2 所示。实验包括相机暗电流噪声测量及辐射响应测量两项内容。

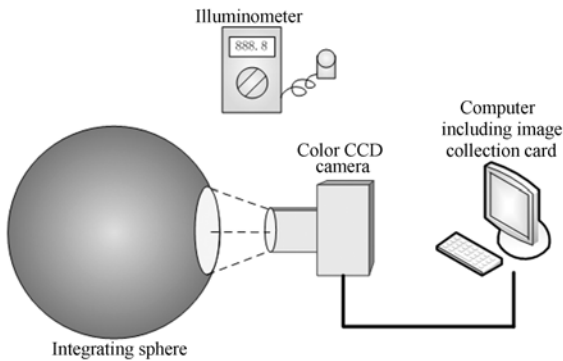


图 2 积分球辐射定标过程示意图

Fig. 2 Process of radiometric calibration using integrating sphere

在进行相机暗电流测量时,需使相机处于暗场(无光)条件。暗电流随温度的变化是一个较复杂的过程<sup>[13]</sup>,考虑到目前多数应用中主要是采取制冷措施来抑制温度对暗电流的影响,当温度恒定时,暗电流受温度的影响可忽略,因此实验过程中不对温度变化引起的暗电流变化进行测定。利

用 CCD 探测器内置的温度传感器通过串口实时获取 CCD 探测器内部温度,当温度变化超过  $2^{\circ}\text{C}$  时,相机关电待冷却后继续测试。将相机置于暗室,盖上镜头盖,分别改变相机曝光(积分)时间和 CCD 增益,测量相机最终输出的图像灰度值。

在进行辐射响应测量实验前,固定相机位置,保证相机光轴垂直于积分球出光口,使积分球出射光充满整个相机视场。出射光线通过相机光学系统照射到焦面处的 CCD 上<sup>[1,14]</sup>,CCD 输出数值经图像采集卡采集处理后,可根据前面建立的辐射校正模型进行进一步分析计算。此时,积分球出口处的辐亮度即为相机的入瞳辐亮度,通过改变积分球内标准灯的点亮数目,来控制积分球输出的辐射亮度,并使用光谱辐亮度计进行测量。实验过程中,为避免外界光源干扰,应保证室内阴暗,整个系统用遮光布盖住。积分球和相机系统至少应预先工作半小时,以保证工作状态稳定。

为验证曝光时间、暗电流噪声、CCD 增益等各相关控制参数对辐射定标系数的影响,在实验过程中,除对积分球输出辐亮度进行更改外,还应对上述参数进行更改,尽可能遍历各种组合状态,其组合方法如图 3 所示。

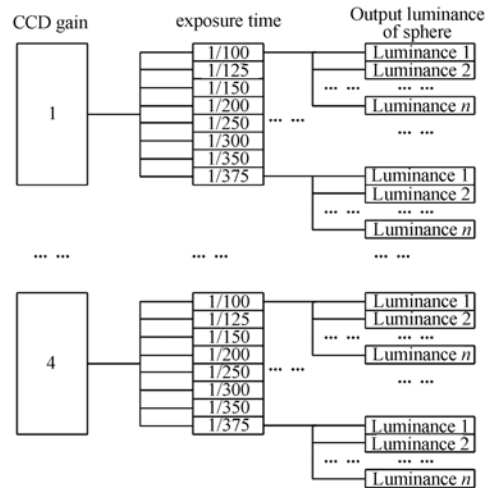


图 3 辐射定标数据组合示意图

Fig. 3 Combination data for radiometric calibration

## 5 实验结果及分析

### 5.1 暗电流测量结果

相机积分时间共分为 8 个档位,CCD 增益参数为 4 级可选,遍历各档积分时间及增益参数,测

量相机输出图像的灰度值。图像输出数据格式为 12 位,即图像数据动态变化范围为 0~4 095。为避免随机噪声对测量结果的影响,每种工作条件下,取 20 帧图像的平均值作为最终结果,并剔除每帧图像中的暗电流最大值,同时为避免白平衡及彩色插值等图像处理过程影响最终测量结果,取相机输出的 RAW 格式图像数据进行测量,并对 R、G、B 像元进行分别处理。在 4 档增益条件下,对不同积分时间与暗电流输出值之间的关系分别进行了标绘,如图 4 所示。

Ralf Widenhorn<sup>[9]</sup>在 5~7 200 s 曝光时间范围内进行暗电流测量,得出大部分像元的暗电流随曝光时间呈线性增长的结论。由于本相机系统在工作时,积分时间仅在 2.7~10 ms 之间变化,因而从图 4 中可发现,图像暗电流输出值随积分时间变化不大,在实际应用中可忽略积分时间对暗电流的影响。

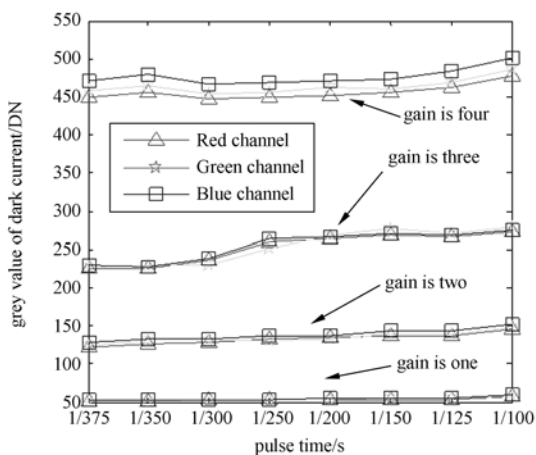


图 4 暗电流随积分时间变化曲线

Fig. 4 Curve of dark current with the integration time

此外,如图 4 所示,当 CCD 增益档位为 1 级时,暗电流噪声平均值约为 50 DN;当 CCD 增益为 4 级时,暗电流噪声平均值超过 450 DN。图像输出暗电流值整体变化趋势为:随 CCD 增益的增加,暗电流值显著增加。

从以上测量结果可以看出,无论是改变积分时间还是 CCD 增益,在某一确定条件下,R、G、B 像元间的暗电流输出值差别不大,在进行暗电流标定时,可不考虑像元的色彩因素。

在各种增益和曝光时间条件下测量得到的相

机暗电流测量值不仅可作为相机图像非均匀性校正时去除暗电流影响的参考值,也可在后续辐射定标过程中,由一种确定工作条件下的辐射响应曲线推演其它工作条件下的辐射响应曲线时,将其作为常数项量值的设定依据。

### 5.2 相机辐射响应特性及拟合结果

根据图 3 所示组合条件进行相机辐射响应标定实验。图 5 中分别采用不同形状的特征点表示增益为 1,曝光时间为 1/250 s 时,R、G、B 通道图像输出灰度值随积分球输出亮度的变化情况。采用最小二乘法对这些特征点分别进行多项式曲线拟合,各阶次曲线拟合结果的决定系数  $R^2$  值均在 0.99 以上,以一次及四次曲线拟合表达式为例,其拟合评估结果见表 1 所示。图 5 中分别采用实线和虚线的形式表示一次及四次多项式拟合结果,由于两条拟合曲线的评估结果接近,因此图 5 中标绘出的各通道的两条拟合曲线基本重合。根据表 1 中的拟合评估结果,两种拟合曲线在用于后续图像数据处理时,能够获得接近的处理精度。考虑到数据反演过程中,其处理数据量庞大,在使用时采用一阶线性拟合结果。

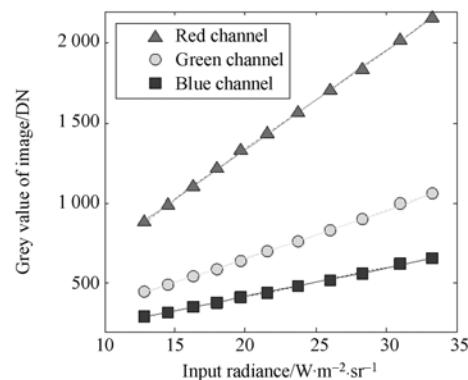


图 5 图像输出平均灰度值随输入辐亮度变化曲线及拟合曲线

Fig. 5 Curves of average gray value of image with the input radiance and the fitted results

从拟合曲线中可以发现,对于相同的输入亮度,红色通道辐射响应特性最高,蓝色通道最低,这主要同 CCD 探测器自身的输出响应特性有关。这种输出响应特性进一步说明在进行图像白平衡、图像插值处理及图像数据反演处理时,各色彩通道的数据应分别进行处理。

表 1 多项式拟合表达式及拟合参数评估

Tab.1 Polynomial fitting function and goodness of fit statistics

通道	拟合表达式	评估结果	
		SSE	R-Square
R	一次 $R=92.71+62.09L$	706.4	0.9996
	$R=0.001681L^4 -$		
	四次 $0.1294L^3+3.343L^2+$	299.4	0.9998
	$29.96L+172.3$		
G	一次 $G=51.2+30.18L$	265.8	0.9994
	$G=-0.0004922L^4+$		
	四次 $0.04191L^3-1.197L^2+$	159.7	0.9996
	$42.97L+14.37$		
B	一次 $B=60.29+17.87L$	79.06	0.9995
	$B=-0.0005052L^4+$		
	四次 $0.04407L^3-1.351L^2+$	56.41	0.9996
	$34.86L-12.5$		

5.3 曝光时间和 CCD 增益对标定的影响

上一节仅得出了在某一特定曝光时间及增益(曝光时间为 1/250 s, CCD 增益为 1)条件下相机的辐射响应曲线,相机在实际成像过程中,需要根据地面景物亮度情况实时调整曝光时间或 CCD 增益。因此,在实验室辐射定标时,应获取各个档位曝光时间和 CCD 增益参数组合条件下的各类辐射响应特性曲线,这无疑增加了实验室定标的工作量。

根据公式(3),不考虑噪声等常数项因素时,曝光时间或 CCD 增益同图像输出灰度值之间为线性比例关系,因此,当输入辐亮度不变,改变曝光时间或 CCD 增益时,图像输出灰度值应呈线性增加。

图 6 所示为积分球输出亮度为 21.559 W/(m<sup>2</sup>·sr),增益为 1,不同曝光时间与图像输出灰度值之间的关系及其拟合曲线,为避免暗电流噪声影响拟合结果,根据前面暗电流测量结果,将各点像元灰度值分别减去暗电流的平均值后再进行拟合。多项式拟合评价结果表明,红色、绿色和蓝色通道一次曲线拟合的 R<sup>2</sup> 值均可达到 0.99 以上。这说明随曝光时间的增加,该相机 R、G、B 通道的图像输出灰度值呈线性变化趋势。

图 7 为积分球输出亮度为 5.027 9 W/(m<sup>2</sup>·sr),曝光时间为 1/125 s,不同 CCD 增益与图像输出灰度值之间的关系曲线。同理,首先根据暗电流测量结果,将各点像元灰度值分别减去各增

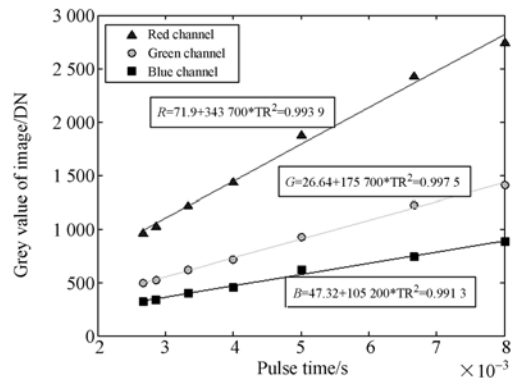


图 6 图像输出平均灰度值随曝光时间变化曲线  
Fig. 6 Curve of average gray value of image with exposure time

益条件下暗电流的平均值后再进行拟合。从图中可以看出,除增益为 4 时红色像元通道的输出灰度值达到饱和外,其它特征点的输出辐射响应输出基本呈线性变化。去除饱和点的影响后进行一次多项式拟合,各通道拟合表达式的决定系数均可达到 0.984 以上,说明在相机输出灰度值未达到饱和的前提下,相机的图像输出值同 CCD 增益之间基本满足线性关系。

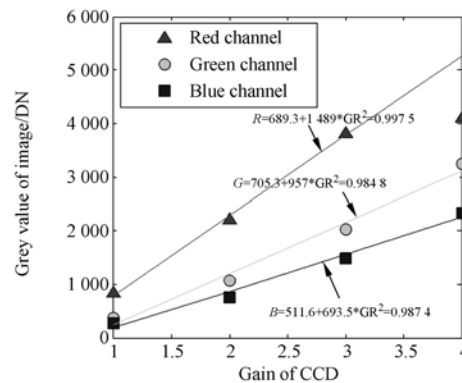


图 7 图像输出平均灰度值随 CCD 模拟增益变化曲线  
Fig. 7 Curve of average gray value of image with CCD gain

上述理论分析和实际实验结果均证明了曝光时间或 CCD 增益同图像输出灰度值之间接近线性关系,因此当已知某一确定条件下的辐射响应曲线,可进行其它条件下的辐射响应特性曲线的推演。

图 8 为增益为 1,曝光时间为 1/100 s 时,R、G、B 通道图像输出灰度值随积分球输出亮度的变化情况。图中以特征点标绘出辐射定标实验获得的实际数据,实线为真实实验数据拟合曲线,虚

线为由表 1 所列一次多项式拟合曲线推导出的响应特性曲线。实验数据拟合曲线及推演曲线的拟合评估结果见表 2,其中推演曲线同实测数据的拟合决定系数  $R^2$  值均在 0.86 以上。同理,利用增益同图像灰度值的线性关系也可进行辐射响应特性的推演,限于篇幅,在此不再赘述。上述实验说明在辐射定标过程中,通过某一组合条件下获得的辐射响应特性曲线推演其它组合条件下的响应特性曲线的方法可行,可大大减少实验室定标的工作量。

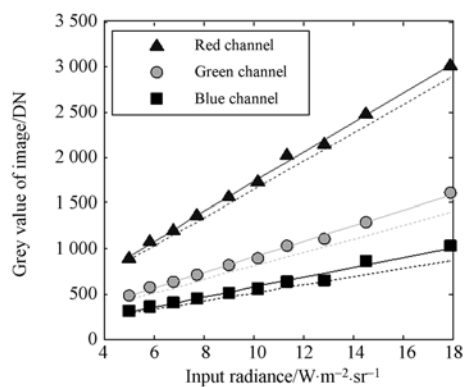


图 8 图像输出平均灰度值随输入辐亮度变化曲线及拟合曲线

Fig. 8 Curves of Average gray value of image with the input radiance and the fitting results

表 2 实验及推演拟合表达式及拟合参数评估

Tab. 2 Experimental and derived fitting function and goodness of fit statistics

通道	拟合表达式	评估结果	
		SSE	R-Square
R	实验拟合 $R=95.69+163.3L$	9 173	0.997 4
	推演拟合 $R=92.71+155.225L$	10 430	0.977 7
G	实验拟合 $G=49.73+85.4L$	9353	0.996 6
	推演拟合 $G=51.2+75.45L$	11 752	0.902 6
B	实验拟合 $B=20.84+54.95L$	3 746	0.996 6
	推演拟合 $B=60.29+44.675L$	6 721	0.867 8

## 6 辐射定标结果的应用

使用相机辐射定标结果指导相机执行检调光任务。根据 CCD 探测器数据手册,当采用 12 位数

据输出时,获得最佳曝光量的图像灰度值一般为 1 080~1 920。将该图像灰度值范围代入辐射定标拟合表达式,可得到各个 CCD 增益和曝光时间条件下获得最佳图像亮度所需的人射辐亮度。

设置相机初始工作时的 CCD 增益和曝光时间默认值,根据相机成像过程中返回的图像灰度值,由辐射定标结果可反演出当前相机入射辐亮度,从而根据入射辐亮度确定获得最佳曝光量所需的 CCD 增益和曝光时间。考虑到 BAYER 阵列的排列方式,且根据实际成像实验,绿色像元的平均灰度值同图像整体灰度值接近,因此,在此采用 G 色彩通道的拟合公式进行处理。



(a) 增益为 1,曝光时间为 1/250 s 时拍摄图像

(a) Image taken CCD gain of 1 and exposure time of 1/250 s



(b) 增益为 1,曝光时间为 1/100 s 时拍摄图像

(b) Image taken by CCD gain of 1 and exposure time of 1/100 s

图 9 实际拍摄图像

Fig. 9 Photographs in practice

图 9 中图(a)是在增益为 1,曝光时间为 1/250 s 时获得的图像,图像平均灰度值为 534 DN,根据表 1 中的辐射定标拟合公式可反演出入射辐亮度约为  $15.997 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。根据表 2 中实验和推演拟合表达式,在该辐亮度值下,可获得的图像灰度值分别为 1 416 DN 和 1 258 DN,均在图像最佳曝光量范围内。设定相机在增益为

1, 曝光时间为 1/100 s 时成像, 如图 9 中图(b)所示, 实际图像平均灰度值为 1 280 DN, 图像亮度适中。利用辐射响应特性的调光方法, 可快速确定相机获得最佳成像曝光量的 CCD 增益和曝光时间, 避免了按档位逐级增加进行调光造成的时间和图像存储容量的浪费。

## 7 结 论

通过对大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射标定实验, 获得了相机的辐射响应特性曲线。最小二乘法拟合结果表明, 相机 R、G、B 三个颜色通道的辐射响应特性均可采用一次多项式曲线形式

进行拟合, 最终拟合结果的决定系数  $R^2$  均可达到 0.999 以上。对曝光时间、CCD 增益参数的测量和分析结果表明, 在 CCD 探测器响应未达到饱和的条件下, 相机输出辐亮度随曝光时间和 CCD 增益的变化呈线性变化趋势, 因此, 可根据实验室标定的某一曝光时间和 CCD 增益组合条件下的辐射响应曲线推演出其它组合条件下的辐射响应曲线。

测量得到的相机辐射响应特性不仅可作为相机工作时调光的依据, 并可用于指导拍摄后地面辐射亮度的反演。同时, 对 R、G、B 颜色通道分别进行测量与分析的结果也可作为对相机输出图像进行白平衡及色彩插值处理的依据。

### 参考文献:

- [1] 郭悦, 刘晓鹏, 杨桦. 空间 CCD 相机的定标方法研究[J]. 光学技术, 2007, 33(11): 237-238.  
GUO Y, LIU X P, YANG H. Analysis of calibration for space CCD camera[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(11): 237-238. (in Chinese)
- [2] 刘亚侠. TDI CCD 相机实验室辐射定标的研究[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 71-74.  
LIU Y X. Research on the laboratory radiometric calibration of the TDI CCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(5): 71-74. (in Chinese)
- [3] 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. Study of the radiation calibration of TDI CCD spatial stereo camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3476-3480. (in Chinese)
- [4] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1420-1428.  
WANG W H, HE B, HAN S L. Real time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1420-1428. (in Chinese)
- [5] 吴波, 符泰然, 程晓舫, 等. 彩色数码相机光强响应特性的标定实验[J]. 光电工程, 2006, 33(6): 101-105.  
WU B, FU T R, CHENG X F, et al.. Calibration experiment for intensity response characteristics of digital color camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(6): 101-105. (in Chinese)
- [6] DE MARTA L, JAUME P, MONTSERRAT A, et al.. Optimized algorithm for the spatial nonuniformity correction of an imaging system based on a charge-coupled device color camera [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(2): 167-174.
- [7] 刘亚侠. TDI CCD 遥感相机标定技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.  
LIU Y X. *Research on the calibration technique of the TDI CCD remote sensing camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2005. (in Chinese)
- [8] 任建伟, 万志, 李宪圣, 等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1186-1190.  
REN J W, WAN ZH, LI X SH, et al.. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1186-1190. (in Chinese)
- [9] WIDENHORN R, DUNLAP J C, BODEGOM E. Exposure time dependence of dark current in CCD imagers[J]. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 2010, 57(3): 581-587.
- [10] WIDENHORN R, HARTWIG I, DUNLAP J C, et

- al.. Influence of illumination on dark current in charge-coupled device imagers[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2009, 18(3):033015-1-8.
- [11] GU Y, ERSON J M, MON K J G C. An approach to the spectral and radiometric calibration of the VIFIS system[J]. *Int J Remote Sensing*, 1999, 20(3):535-548.
- [12] 林德萃. 资源一号卫星 CCD 相机辐射定标和图像辐射校正[J]. *航天返回与遥感*, 2000, 21(2):8-13.
- LIN D L. Radiation calibration of CBERS-1 CCD camera and image radiation correction[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2000, 21(2):8-13. (in Chinese)
- [13] WIDENHOM R, BLOUKE M M, REST A, et al.. Temperature dependence of dark current in a CCD [J]. *SPIE*, 2002, 4669:193-201.
- [14] 杨臧健, 符泰然, 程晓舫, 等. 彩色数字摄像机控制参数影响的标定[J]. *光学技术*, 2008, 34(3):375-378.
- YANG Z J, FU T R, CHENG X F, et al.. Calibration for control parameters of digital color camera[J]. *Optical Techque*, 2008, 34(3):375-378. (in Chinese)

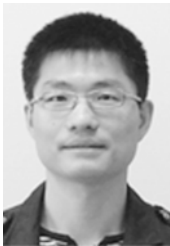
#### 作者简介:



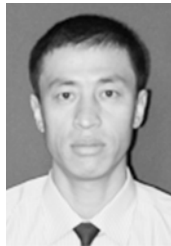
修吉宏(1976—),女,吉林白山人,博士,副研究员,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事航空成像与测量研究;E-mail:xiujihong0809@yahoo.com.cn



李军(1979—),男,辽宁葫芦岛人,博士研究生,2006年于吉林大学获硕士学位,主要从事航空成像与测量技术及数字控制技术研究;E-mail:junly8076@163.com



黄浦(1981—),男,湖北仙桃人,博士,助理研究员,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事航空成像与测量技术及数字控制技术研究;E-mail:hpu8@163.com



李友一(1968—),男,辽宁抚顺人,研究员,硕士生导师,2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事航空成像技术的研究。E-mail:lyy\_980205@yahoo.com.cn