光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022112201

消除光学渐晕的FPGA实时校正系统

谢虹波*，张延坤，田利峰，费　强，谢新旺，孙景旭

（季华实验室，广东 佛山 528200）

摘　要： 光学渐晕效应存在于大部分光学成像系统，严重影响成像质量。如何有效改善光学渐晕效应是航天光学遥感器设计的要点。采用辐射定标方法量化成像系统中光学渐晕效应的影响，并获得校正系数。采用多项式拟合方法对校正系数进行优化，拟合后校正系统减少约3个数量级，大大降低了对嵌入式系统存储资源的需求。通过多项式拟合方法有效减少了校正系数，对光学渐晕效应改善效果良好，校正前相机的非均匀性误差为13.2%，校正后非均匀性误差降至3.8%，满足一般成像系统对响应非均匀性的要求。该方法校正系数少，适合在基于FPGA处理器中实现，实时性强，资源占用少，具有工程实用价值。

关键词： 信息处理；折反式光学系统；光学渐晕效应；二次多项式拟合；FPGA

中图分类号： TP391.41；O439　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0455－05

FPGA Real-time Correction System for Eliminating Optical Vignetting

XIE Hongbo，ZHANG Yankun，TIAN Lifeng，FEI Qiang，XIE Xinwang，SUN Jingxu

（Jihua Laboratory，Foshan 528200，CHN）

Abstract： The optical vignetting effect exists in most optical imaging systems，which seriously affects the imaging quality. How to effectively improve the optical vignetting effect is the key point in the design of aerospace optical remote sensors. A radiometric calibration method was used to quantify the influence of the optical vignetting effect in the imaging system and to obtain the correction coefficients. The correction coefficients were optimized by polynomial fitting method，and the correction system was reduced by about three orders of magnitude after fitting，which greatly reduced the demand for storage resources of the embedded system. The polynomial fitting method effectively reduced the correction coefficients and improved the optical vignetting effect. The non-niformity error of the camera before correction is 13.2%，and after correction，the non-uniformity error is reduced to 3.8%，which meets the requirements of general imaging systems for response non-uniformity. The method is suitable for implementation in FPGA-based processors with fewer correction coefficients，high real-time performance and low resource consumption，and has practical engineering value.

Key words： information processing；refractive and reflective optical systems；optical vignetting effect；quadratic polynomial fitting；FPGA

0　引言

在光学成像中，离轴视场的通光量相比于近轴视场逐渐减少，这种现象称之为光学渐晕。光学渐晕会导致不同角度入射光线的通光量不同，探测器输出信号也不均匀，使得最终图像在颜色、亮度方面

收稿日期：2022－11－22.

基金项目：广东省重点领域研发计划项目(2018B030328001).

* **通信作者：**谢虹波　**E-mail：**xiehb@jihualab.com

失真，严重影响图像的实用价值。2012 年 Coralie 等[1]从光度学的角度分析了理想光学渐晕效应，发现由中心到边缘视场的照度值随入射角度的余弦四次方衰减，也称为余弦渐晕。渐晕效应在近轴视场影响小，在离轴角度较大时影响比较明显。Yu 等[2]提出利用查找表来消除渐晕的算法。李炜等[3]提出基于二维高斯曲面拟合的补偿方法。何凯[4]利用逐行拟合的方法进行复原。丁莹等[5]基于相机的响应函数，构建了渐晕效应补偿模型，并通过实验验证了该方式的有效性，但是该方法在嵌入式平台上实现起来比较困难。

辐射定标主要用于确定成像系统输出量与入射光信号之间的定量关系，通过辐射定标与辐射校正的方式使得成像系统表现出整画面的一致性，提高物体影像的真实性。常用的辐射校正方法可以分为两大类，一类是线性校正，一类是非线性校正。线性校正是指相机像素输出与光辐射亮度之间满足线性关系，具体的校正方法有单点式、两点式以及多点式，其中两点式比较常用[6-8]。非线性校正方法有多项式拟合[9-10]、直方图校正[11]、深度学习法等[12]。

本文从光学成像的原理出发，解释了光学渐晕效应产生的机理，并提出从图像处理的角度去消除光学渐晕的方法。文章中采用辐射定标的方式去获取实际系统中光响应特性，通过辐射校正的方式消除光学渐晕。然后通过多项式拟合的方式大大降低了校正系数的存储量，更适合在嵌入式平台部署。

1 成像系统及非均匀性校正

1.1 RC 折反式光学系统

本文以常用的 RC 折反式光学系统为研究对象[13]，其光路图如图 1 所示。

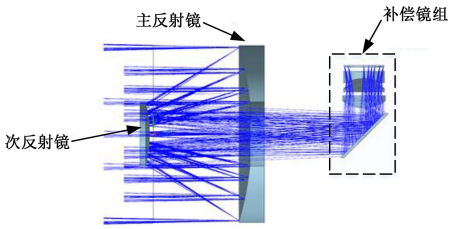


图 1 同轴 RC 折反式光学系统光路图

光学系统首先是用较大的主反射镜将光线汇聚到前端的次镜上，次镜再将光线聚焦到像面前的补偿镜组上，如图 1 所示。在补偿镜组与次镜之间设置消杂光光阑，这样可消除光学系统 90% 以上杂光。折反射式光学系统的焦距由两反系统决定，后端补偿镜组为无焦系统，用于矫正前光学结构的像差，因此不需要矫正色散和二级光谱。

光学渐晕效应指成像系统离轴像点与近轴像点的通光强度不同，如图 2 中近轴 A 和离轴 B 两个物点在像面上成像，对应相同物点区域，由于光阑的影响，两个角度的物点通光量不同，离轴角度越大，通光量越小，渐晕效应越明显。在实际工程中，由于受系统尺寸、成本、成像需求等约束，往往通过后期处理来减弱光学渐晕的影响。

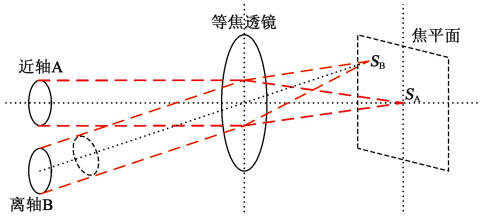


图 2 光学渐晕示意图

1.2 非均匀性测量及评价

辐射定标的目的是获取光学相机接收的辐射量与相机输出的数字量之间的定量转换关系，从而得到相机的光响应特性。辐射校正是基于辐射定标的结果对相机性能进行优化，以获取更真实的目标信息。光学渐晕效应会导致离轴视场成像响应度偏低，通过辐射定标和辐射校正可以得到最终相机的整体响应特性。针对面阵相机的像元级辐射定标和校正，本文采用定标法，并基于在实验室内采集的样本得到对应像元的校正系数。其数学模型如下：

$$Y(i,j)=X(i,j)S(i,j,C(i,j)) \tag{1}$$

式中，$X(i,j)$为原始图像灰度值，$Y(i,j)$为校正后的辐射灰度值，$S(i,j,C(i,j))$为定标系数，i,j 为像素坐标，$C(i,j)$为试验训练数据。

辐射校正的前提是获取对应的定标系数，因此需要采集一定量的训练数据 $C(i,j)$，也就是实验室辐射定标需要采集的数据。

通常单个像元对辐射亮度的响应近似为线性关系，可表达为：

$$DN_{i,j}=R_{i,j}\cdot L+b_{i,j} \tag{2}$$

式中，$R_{i,j}$ 为像素响应度，$b_{i,j}$ 为像素偏置。

不同像元的响应特性可能不同。辐射校正的目的就是使得每个像元的响应曲线一致，最终得到校正前后像素 DN 值之间的关系如下：

$$DN'_{i,j}=k_{i,j}(DN_{i,j}-b_{i,j}) \tag{3}$$

式中，$DN'_{i,j}$ 为校正后的灰度值，$DN_{i,j}$ 为校正前的灰度值，$b_{i,j}$ 为对应像素的暗噪声，$k_{i,j}$ 为每个像

素的校正系数。

响应非均匀性 P_{RNU} 通常采用两种方法进行计算，即计算其标准均方根偏差和峰峰值。本文采用标准均方根偏差法进行非均匀性计算。

$$P_{\mathrm{RNU}}=\frac{1}{\overline{V_{\mathrm{o}}}}\sqrt{\frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}(\overline{V_{oi}}-\overline{V_{\mathrm{o}}})^{2}}\times 100\% \quad (4)$$

式中，$\overline{V_{\mathrm{o}}}$ 为像元平均输出信号，M 为光敏面像元数目，$\overline{V_{oi}}$ 为第 i 像元的输出信号。

2　校正系数分析及校正实现

2.1　校正系数统计分析

本文研究的 RC 折反式光学相机，其等效焦距为 500 mm，工作于面阵全局曝光模式，像素尺寸为 2.8 μm，有效像素大小为 5 000×4 600，可实现在轨道 500 km 下对地 2.8 m 分辨率成像，相机尺寸为 290.0 mm×107.7 mm×116.7 mm，重量约 2 kg。

相机的响应非均匀性可以通过辐射定标实验得到，辐射定标可以得到整个相机响应度与光强度的定量关系。实验室内通常是采用积分球光源，它的特点是输出能量大，具有良好的面均匀性和朗伯特性，可提供充满遥感器视场和空间均匀分布的漫反射光源[14]。辐射定标装置图如图 3 所示。

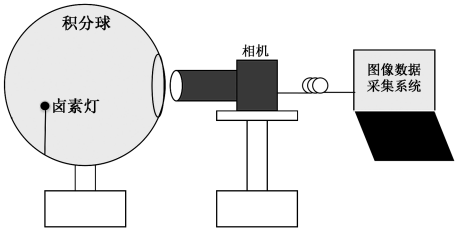


图 3　辐射定标装置示意图

辐射定标流程如下：

(1)准备好可覆盖相机光谱范围的卤素灯及积分球，搭建漫反射光源；(2)将光学相机入瞳放置于积分球开口处，以保证入瞳处近似为均匀光源；(3)搭建图像自动采集装置，该装置应具备本底、不同曝光时间和增益下图像的自动采集及保存功能；(4)制作采集数据矩阵表，根据采集矩阵表开始采集，得到各种条件下的采集样本；(5)对测试样品进行分析，采用常用的多点法统计出每个像元的校正系数。对每个像元进行独立校正，通过辐射定标方法逐个得到各像元的校正系数。

从式(3)可知，每个像元的校正系数包括线性因子(斜率)以及偏置(截距)，通过该方法可以得到每个像素的校正系数。面阵成像的总校正系数个数为 $2mn$，根据工程经验，本文采用 3 字节表征校正系数，因此总的校正系数数据量为 $6mn$ 字节。

基于辐射定标得到的校正系数是逐像元进行的，该方式简单准确，在离线校正系统中比较适用，而航天光学遥感器的辐射校正一般要求在星上完成，做到实时校正，逐像元校正由于涉及大量的校正系数，对星上实时处理系统的硬件存储资源要求比较高，系统开发复杂，不适用于在轨星上处理，尤其是微纳卫星，因此有必要对校正系数进行优化。

理想的光学渐晕效应造成成像视场光强响应满足余弦的四次方关系，也称余弦渐晕，直接采用余弦规律对校正系统进行拟合可以简化校正系数，减少数据量，但是对于 FPGA 数字处理平台，余弦函数的实现比较复杂，不适用于 FPGA 处理器。本文采用泰勒展开方法对余弦函数进行表征，实际拟合时根据拟合效果与实现难易程度、资源使用率等多因素选择多项式的长度。

利用多项式进行校正系数的优化以行为单位进行处理，图 4 是其中一行像素对应的校正系数倒数($1/K$)的分布情况，图 4 显示 $1/K$ 分布接近两条曲线。经分析，一条对应奇数列像素的校正系数，一条对应偶数列像素校正系数，奇数列和偶数列校正系数各自独立分布。对比探测器的设计架构，奇数列像素与偶数列像素是通过独立的读出像素，因此两者的响应曲线存在差异，这解释了一行像素 $1/K$ 系数存在两条分布曲线的规律。

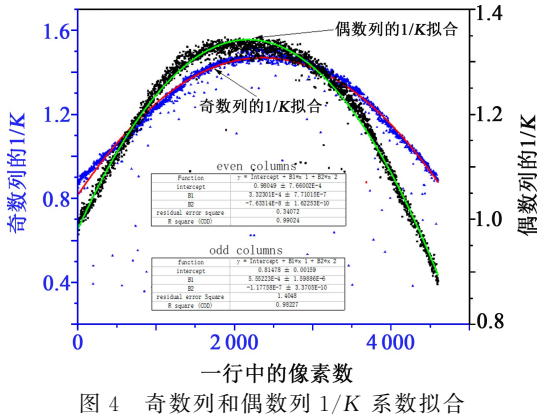


图 4　奇数列和偶数列 $1/K$ 系数拟合

考虑奇数列和偶数列像素校正系数的分布规律，分别对两者进行独立优化，根据泰勒展开多项式进行拟合优化，经过对比采用二次多项式进行优化即可得到比较符合分布规律的拟合结果。二次多项式拟合，方程如下：

$$y_m = A_m x^2 + B_m x + C_m \quad (5)$$

式中，m 为行编号，每一行独立拟合；A_m，B_m 和 C_m 分别为第 m 行的拟合曲线系数。

上述拟合剔除了极个别分布异常的点，拟合结果中 R 平方均在 98%以上，反映 K 系数的倒数符合二次分布。以上优化结果表明二次多项式拟合方式实现了较好的优化效果，相比于余弦分布拟合方式，二次多项式更易于在基于大量乘累加计算资源的 FPGA 处理器中实现，可实现在轨星上实时校正，可移植性更好。

3 FPGA 实时校正系统

航天工程中大多数控制系统是基于 FPGA 处理器，其全可编程、并行处理、精确的时序控制以及低功耗等特点更适合在高可靠性及可追溯性系统中。在成像系统中，一般采用 FPGA 芯片作为探测器驱动及控制芯片，本文采用 Xilinx 公司的 K7 系列 FPGA 作为成像探测器的主控芯片。辐射校正或光学渐晕修正属于成像系统的前端处理，在成像探测器主控芯片中完成比较合适。

成像驱动器如图 5 所示，硬件模块由三块电路板堆叠构成，整体外形更紧凑。成像驱动的软件包括图像采集（Acquisition）、图像重组（Recombination）、辐射校正（Calibration）、打包输出（Output）以及遥测遥控（Command Control）等。辐射校正即光学渐晕效应的修正，第 2 章节采用多项式拟合方法优化校正系数，奇数列和偶数列独立进行，每一行的校正系数由原来的像素个数减少为 6 个系数，即二次多项式的 3 个系数 A_m，B_m 和 C_m，例如成像幅宽为 5000 像素时，该拟合优化方法可直接减少 3 个数量级数据。

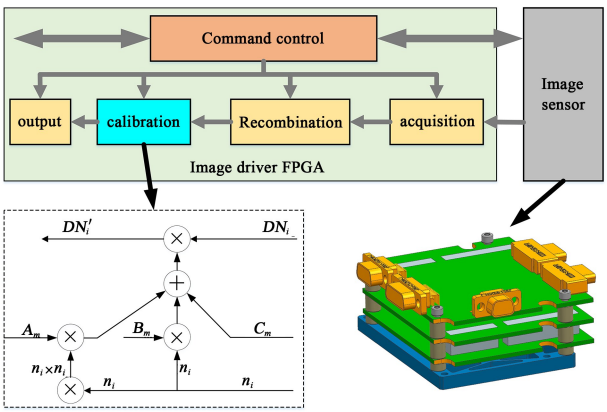


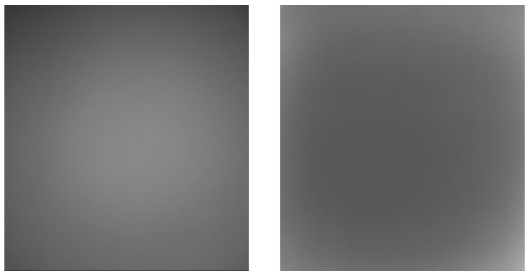
图 5 成像驱动器构成框图

辐射校正过程如下：在实时成像过程中，每一帧图像进来，经过图像采集模块和图像重组模块，再进行辐射校正，校正因子通过二次多项式计算得到，为像素的列编号，原始像素灰度值与计算输出的校正因子相乘得到校正后像素值，校正后的图像数据再输出。辐射校正模块由于涉及大量的乘累加运算，可采用 FPGA 内部的 DSP 资源进行加速运算，校正过程不会产生额外的延时。

4 试验结果及分析

本文研究的 RC 折反式光学相机，像元分辨率为 2.8 μm，成像幅宽为 5 000×4 600，成像焦距为 500 mm，成像视场角为 1.6°，辐射校正前存在光学渐晕效应，经过多项式拟合校正后光学渐晕效应得到明显改善。如图 6 所示，在辐射校正前，存在明显的光学渐晕效应。从量化结果来分析，用标准均方根偏差计算响应非均匀性 P_{RNU}，约为 13.2%。采用多项式拟合的方式进行校正后非均匀性 P_{RNU} 降低至 3.8%，校正效果比较明显。采用拟合的方式去除掉一些异常点，使得图像更平滑。

在工程实用角度上，采用 FPGA 作为实时处理系统，基于多项式拟合计算校正因子的方式可以比较方便地在 FPGA 处理器上实现。本系统中全幅宽为 5 000×4 600，需要存储的二次多项式系数一共是 90 k 字节。本系统中 FPGA 片上存储 BRAM 资源为 1.375 M 字节，满足上述校正系数的存储需求。该校正模型最终在 FPGA 中资源使用量统计如表 1 所示。从表 1 可以看出，采用拟合方式后，整个成像驱动程序占用系统资源较少，其中存储资源相对较多，为 59%，满足航天设计规范中对资源使用量不超过 70%的要求。



（a）原始图像 （b）校正图像

图 6 辐射定标采集图片

表 1 FPGA 主要资源使用情况列表

种类	寄存器	查找表	RAMB16	RAMB8	DSP48
使用率/%	5	10	59	2	8

5　结论

本文提出了一种通过后期图像处理来解决光学成像系统中大视场成像引入的光学渐晕效应的方法，减少前端光学设计的难度。文中通过辐射定标的手段获得成像系统整幅宽的响应特性，并通过多点法得到所有像素点的校正系数。为了在嵌入式系统中实现辐射校正，对辐射校正系数进行了多项式拟合，这样大大减少了辐射校正系数。将辐射校正算法内嵌在成像驱动器中，用 FPGA 作为主处理器，实现在成像驱动层面的辐射校正，使系统更紧凑。采用辐射定标和辐射校正的方式在图像处理层面消除光学渐晕效应，非均匀性误差从校正前的 13.2%降低至 3.8%，效果比较明显。采用多项式拟合的方式降低了校正系数对系统存储的需求。拟合后的校正数据量相比于原始数据减少了接近 3 个数量级。从工程运用的角度来说，拟合后的校正算法更适合部署在基于 FPGA 的实时系统中。

参考文献：

[1] Cauwerts C, Deneyer A, Bodart M. Comparison of the vignetting effects of two identical fisheye lenses[J]. Leukos, 2012, 8(3): 181-203.

[2] Yu W. Practical anti-vignetting methods for digital cameras [J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2004, 50(4): 975-983.

[3] Zheng Y, Lin S, Kang S B, et al. Single-image vignetting correction from gradient distribution symmetries[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 35(6): 1480-1494.

[4] 李　炜，黄心汉，王　敏，等. 基于二维高斯曲面拟合的图像灰度补偿算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2004，32(2)：43-45.
Li Wei, Huang Xinhan, Wang Min, et al. A compensation algorithm of image based on Gaussian quadrics fitting[J]. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition), 2004, 32(2): 43-45.

[5] 丁　莹，范静涛，权　巍，等. 视觉系统光学渐晕效应非线性补偿方法[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2017，57(7)：702-706.
Ding Ying, Fan Jingtao, Quan Wei, et al. Nonlinear compensation for optical vigetting in vision systems[J]. Tsinghua Univ. (Sci & Technol.), 2017, 57(7): 702-706.

[6] 王成龙，王春阳，谷　健，等. 一种基于定标的非均匀性校正改进算法[J]. 中国光学，2022，15(3)：498-507.
Wang Chenglong, Wang Chunyang, Gu Jian, et al. An improved non-uniformity correction algorithm based on calibration[J]. Chinese Optics, 2022, 15(3): 498-507.

[7] 董建婷，杨小乐，董　杰，等. 面阵 CMOS 图像传感器响应非均匀性校正方法研究[J]. 半导体光电，2012，33(4)：570-574，578.
Dong Jianting, Yang Xiaole, Dong Jie, et al. Research on response nonuniformity correction of area CMOS image sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(4): 570-574, 578.

[8] 南童凌，沈宏海，杨名宇，等. 一种长波红外探测器的快速辐射定标方法[J]. 激光与光电子学进展，2017，54(12)：425-433.
Nan Tongling, Shen Honghai, Yang Mingyu, et al. Fast radiometric calibration method for long wave infrared detectors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 425-433.

[9] 徐文文，周建勇，唐遵烈，等. 二次曲线拟合实现红外图像非均匀性校正[J]. 半导体光电，2009，30(5)：763-766.
Xu Wenwen, Zhou Jianyong, Tang Zunlie, et al. Non-uniformity correction of IRFPA based on quadratic curve fitting [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(5): 763-766.

[10] Yang W P, Zhang Y, Zhang Z L. Non-uniformity correction algorithm based on polynomial fit estimation[J]. British J. of Appl. Science & Technol., 2015, 11: 1-9.

[11] 张　兵，张　浩，陈正超，等. 一种基于图像统计量的相对辐射纠正算法[J]. 遥感学报，2006，10(5)：630-635.
Zhang Bing, Zhang Hao, Chen Zhengchao, et al. A new method of relative radioactive correction based on image statistic [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2006, 10(5): 630-635.

[12] 陆余洋君. 基于神经网络的红外焦平面非均匀性校正算法研究与 FPGA 实现[D]. 合肥：中国科学技术大学，2021.
LuYu Yangjun. Research on algorithms of nonuniformity correction on infrared focal plane array based on neural networks and FPGA implementation[D]. Hefei: University of Science and Technol. of China, 2021.

[13] 韩培仙，金　光，钟　兴，等. 基于轴向梯度折射率校正镜的折反式光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展，2016，53(2)：022202.
Han Peixian, Jin Guang, Zhong Xing, et al. A two-mirror catadioptric optical system with an axial gradient-index correction lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 022202.

[14] 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 Jianwei, Wan Zhi, Li Xiansheng, et al. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1186-1190.

作者简介：

谢虹波(1991—)，男，博士，主要从事空间光学遥感器成像系统及量子通信系统方面的研究。