

# 反射镜拼接相机渐晕消除方法

张 宇<sup>1</sup>, 韩双丽<sup>1</sup>, 张 柯<sup>1</sup>, 武奕楠<sup>1</sup>, 金龙旭<sup>1</sup>, 于 浩<sup>2</sup>

(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. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 分析了反射镜拼接相机渐晕现象产生的原因, 得出渐晕能量分布数学模型。利用 MATLAB 对数学模型进行仿真, 得出能量分布曲线; 利用渐晕数学模型求出渐晕区域后, 采用函数逼近法拟合出渐晕区域内各点的补偿因子曲线, 得出补偿因子和亮度值的关系; 通过对辐射定标图像和外场成像图像处理后, 很好地消除了渐晕现象。

**关键词:** 反射镜拼接; 渐晕; 辐射定标

**中图分类号:** TH703; TP391

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI20112806.0023

## Methods of Vignette Elimination in Reflecting-mirror-jointed Camera

ZHANG Yu<sup>1</sup>, HAN Shuang-li<sup>1</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>, WU Yi-nan<sup>1</sup>, JIN Long-xu<sup>1</sup>, YU Hao<sup>2</sup>

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

2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to solve the vignette phenomenon in the central visual field of the reflecting-mirror-jointed camera, the reasons of the vignette phenomenon were analyzed, and the vignette energy distribution mathematics model was obtained. The vignette energy distribution curve was got using the mathematics model with MATLAB. At the same time, considering the veiling glare of the joint reflecting mirrors and the CCD responding heterogeneity, the radicalization calibration experiment for the CCD camera was carried out. The vignette area was shown by the mathematics model, with function approach law to draft the compensation factor curve of each point in the vignette area, reaching the relation of the compensation factor and the brightness value. Handling the radicalization calibration image and the outfield image, the vignette phenomenon was solved very well.

**Keywords:** reflect jointed; vignette; radicalization calibration

\*基金项目: 国家863计划基金资助项目 (No.863-2-5-1-13B)

## 1 引言

航天遥感相机是目前对地观察的主要技术手段,随着航空航天事业的飞速发展,用户对信息获取量的要求越来越高,航天遥感相机的光学系统也从单一的 CCD 成像器件发展成为了多片 CCD 成像器件拼接的结构。CCD 的拼接包括机械直接拼接、视场交错拼接、多镜头拼接、棱镜拼接和反射镜拼接等多种方式<sup>[1]</sup>,前两种属于机械拼接手段,后三种是光学拼接手段。对几种拼接方法的优缺点对比可以看出,光学系统采用反射镜拼接的方式,优势在于能量利用率高、拼接精度高、无色差、温度敏感性好、且无长度限制,是多 CCD 拼接主要的发展方向。但是,由于其自身的特殊光学结构,采用反射镜拼接,在拼接中心处会产生渐晕现象,影响成像质量。

常用的渐晕消除方法有:

## (1) 查表法

查表法算法简单,实现容易,效果比较明显,但是需要较大的存储空间存储补偿因子。同时,查表法对于图像渐晕消除具有很大的局限性,必须每次拍摄时的条件都相同,条件不同时,需要对照不同的补偿因子。这对于航空航天相机实际应用来说很难做到,故一般不采用 LUT 方法进行补偿<sup>[2]</sup>。

## (2) 逐行扫描法

逐行扫描法是一种无需事先对相机进行标定、直接利用获取后的图像进行分析的一种渐晕消除方法,其利用数据逐行进行拟合,拟合出整幅图片灰度变化的趋势后进行恢复<sup>[3]</sup>。该方法虽然可以在未知相机各个参数以及拍照条件的情况下使用,但对于亮度变化比较明显、图像细节丰富的区域来说,这种方法实际上对图像造成了一定的模糊<sup>[4]</sup>。由于反射镜拼接渐晕现象的发生位置在中心视场,因此图像细节丰富,该方法也不适用于反射镜拼接渐晕消除。

本文在分析反射镜拼接渐晕产生原因的基础上,提出了反射镜拼接结构中光场能量分布模型,并通过辐射定标试验结果,验证了反射镜拼接渐晕

模型。最后,利用辐射定标数据,采用函数逼近法对渐晕现象进行了补偿。

## 2 反射镜拼接方法中的渐晕分析

## 2.1 CCD 反射镜拼接方法中的渐晕能量分布模型

CCD 反射镜拼接是利用分光反射镜将像平面分割成空间分离的两个甚至多个像面,可在各个像平面交错布置多个 CCD,并使交错相邻两片 CCD 边界处像元满足重叠要求,形成等效的大视场探测器。

下面针对反射面 CCD 上拼接处产生渐晕现象的数学模型建立过程加以描述。如图 1 所示,对于成像在反射面 CCD 上的无穷远处的点 A 和点 B 来说,经过光学系统后,光线应汇聚于反射面像点 A' 和 B' 上。但是,由于光路中存在反射镜,因此对于 A 来说,有一部分光线没有经过反射镜反射,而是直接投影在反射镜后。对于 A 来说相当于这部分的光能量损失掉了,所以在图像上反映就是该点的数码值偏暗。当反射镜的位置与 CCD 像面所在平面的位置固定时,根据几何关系可知:对于视场角大于 B 对应的视场角  $\omega$  的所有点,所有的光线都能通过反射镜反射到位于上面的反射面 CCD 上,因此没有能量损失,所以视场角  $> \omega$  的所有点可认为没有渐晕。

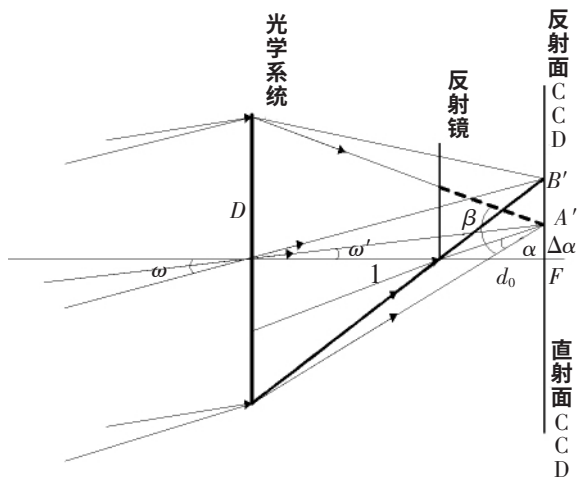


图 1 反射面 CCD 渐晕产生示意

根据余弦定理和已知条件可求出  $\alpha, \beta$  角大小:

$$\cos \alpha = \sqrt{(2fd + \Delta aD + 2\Delta a^2) / (4f^2 + 4\Delta a^2 + 4\Delta aD + D^2)} \quad (1)$$

$$\cos\beta = \frac{\sqrt{(4f^2 - D^2 + 4\Delta a^2) / (4f^2 + D^2 - 4\Delta a^2)}}{\sqrt{(4f^2 + 4a^2 + 4aD + D^2)}} \quad (2)$$

其中,  $D$  为光学系统口径,  $f$  为光学系统焦距,  $d_0$  为反射镜到像面的距离,  $\Delta a$  为像面上渐晕点距离视场中心的距离。

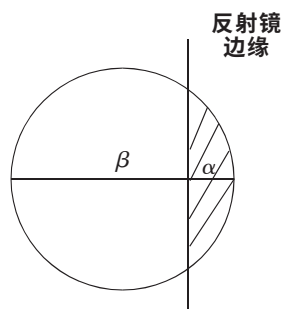


图2 渐晕区域光能量分配示意图

点光源在像面上的能量分布为一个圆斑<sup>[5]</sup>。对于反射面成像点  $A'$  来说, 反射面 CCD 接受的能量应为整个光斑的能量, 但由于  $\alpha$  角内的能量没有被反射, 所以对应的点  $A'$  的能量仅为整个光斑能量与  $\alpha$  角所对面积能量的差值。如图 2 所示, 当光学系统和 CCD 像面位置  $l$  固定后, 点光源所成的光斑大小即为一个固定值, 设光斑圆的直径为  $d$ , 则角  $\alpha$  和角  $\beta$  所对应的光斑面积比为:

$$S_\beta : S_\alpha = \left\{ \frac{d}{4} \arcsin \left[ \frac{2\Delta a(l-d_0)}{d_0 d} \right] - \sqrt{\left( \frac{d}{4} \right)^2 - \left( \frac{\Delta a(l-d_0)}{d_0} \right)^2} \frac{\Delta a(l-d_0)}{d_0} \right\} \quad (3)$$

设  $E$  为无限远处发光点能量,  $E'$  为成像点  $A'$  能量, 则

$$E' : E = S_\beta : S_\alpha \quad (4)$$

$$E' = E \left\{ \frac{d}{4} \arcsin \left[ \frac{2\Delta a(l-d_0)}{d_0 d} \right] - \sqrt{\left( \frac{d}{4} \right)^2 - \left( \frac{\Delta a(l-d_0)}{d_0} \right)^2} \frac{\Delta a(l-d_0)}{d_0} \right\} \quad (5)$$

式 (5) 为反射面 CCD 渐晕区域内任意一点  $A'$  获得的能量值。对直射面内渐晕区域任意一点的渐晕能量分析如图 3 所示。

分析方法和反射面 CCD 渐晕能量分布分析方法相同, 对于透射面上一点  $A'$ ,  $\alpha$  角所包括的光能量

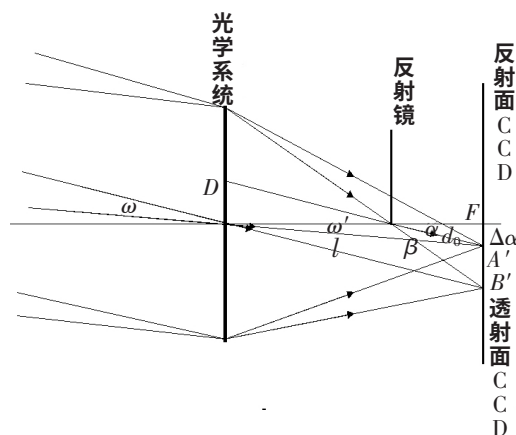


图3 直射面 CCD 渐晕产生示意图

被反射镜反射, 并未交与  $A'$ , 所以  $A'$  点的能量也是  $\beta$  减去  $\alpha$  的能量。同理, 只有当视场角  $> \omega$  的轴外点, 才能避免渐晕现象的发生。

## 2.2 CCD 反射镜拼接方法中的直边衍射渐晕能量分布

在反射镜拼接方法渐晕能量分布的问题上, 还应该考虑到直边衍射给图像带来的影响。直边衍射是当光垂直照射到具有直线边缘的不透明障碍物时, 在后面的光屏上得到的是直线边缘的影子, 仔细观察可看到边界处有复杂的衍射图样。

$$I(x_0, y_0) = \frac{1}{4} \{ [C(\omega_2) - C(\omega_1)]^2 + [S(\omega_2) - S(\omega_1)]^2 \} \cdot [C(\eta_2) - C(\eta_1)]^2 + [S(\eta_2) - S(\eta_1)]^2 \} \\ = \frac{1}{4} \left\{ \left[ \frac{1}{2} - C(\omega_1) \right]^2 + \left[ \frac{1}{2} - S(\omega_1) \right]^2 \right\} \cdot \left\{ \left[ \frac{1}{2} - \left( -\frac{1}{2} \right) \right]^2 + \left[ \frac{1}{2} - \left( -\frac{1}{2} \right) \right]^2 \right\} \quad (6)$$

其中,  $\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{\pi z}} (x_1 - x_0) = -\sqrt{\frac{k}{\pi z}} x_0 (x_1 = 0)$ , 根据计算后的结果分析可得出, 在几何影处光强约为无直边衍射屏时的 1/4。对光学系统轴上的点来说, 实际成像能量为原来的 1/4, 几何影内的能量被反射到反射镜, 能量小于 1/4。

公式 (6) 分析了光轴上的点渐晕现象光场分布情况, 对于反射镜拼接系统而言, 入射光所在平面并非都是垂直于反射面的, 当入射光线所在入射面与反射镜边缘法线成  $\theta$  角时, 直边衍射的能量分布

按改进型衍射理论<sup>[6]</sup>进行计算;当入射角为 $\theta$ 时,衍射能量由直射面能量和反射面能量两个部分组成,如公式(7)所示:

$$E_{\text{衍射}} = E_{\text{直射}} + E_{\text{反射}} \quad (7)$$

其中:

$$E_{\text{直射}} = -e_x \frac{jkE_i}{2\pi} e^{j\frac{\pi}{4}} \int_{x=0}^0 \exp(jkx\cos\theta) \frac{\exp(-jkR_1)}{\sqrt{kR_1}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) dx \quad (8)$$

$$E_{\text{反射}} = -e_x \frac{jkE_i}{2\pi} e^{j\frac{\pi}{4}} \int_{x=-\infty}^{\infty} \exp(jkx\cos\theta) \frac{\exp(-jkR_1)}{\sqrt{kR_1}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) dx - e_x \frac{jkE_i}{2\pi} e^{j\frac{\pi}{4}} \int_{x=-\infty}^{\infty} \exp(jkx\cos\theta) \frac{\exp(-jkR_1)}{\sqrt{kR_1}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) dx \quad (9)$$

根据稳相法和边界点法<sup>[7]</sup>,在高频近似情况下,对(9)式进行近似简化为:

$$E = \frac{kE_i}{\sqrt{2\pi}} e^{j\frac{\pi}{4}} \left( \int_{x=-\infty}^{\infty} e^{jkx\cos\theta} \frac{e^{jkR_1}}{\sqrt{kR_1}} \sin\frac{\theta}{2} dx - \int_{x=0}^{\infty} e^{jkx\cos\theta} \frac{e^{jkR_1}}{\sqrt{kR_1}} \sin\frac{\theta}{2} dx \right) \quad (10)$$

式(10)为入射角为 $\theta$ 时直边衍射能量分布公式。其

中, $R_1$ 为反射镜边缘距离直射 CCD 成像点的距离,黑色实线部分为衍射区,如图4所示。

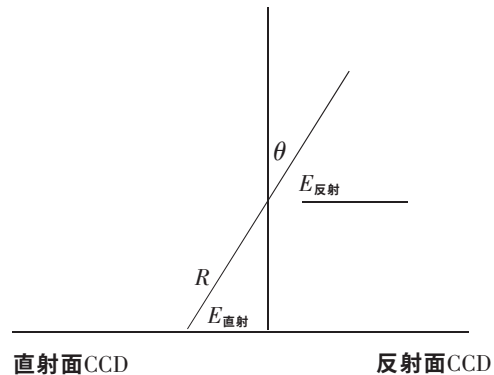


图4 入射角为 $\theta$ 时直边衍射渐晕分布图

由此可见,反射镜拼接中渐晕现象的产生由两部分组成:遮挡能量分散和直边衍射。其中,由于反射镜遮挡导致的能量分散是渐晕产生的主要原因<sup>[8]</sup>。直边衍射的光强振荡对于单色光和干涉光比较明显。对于含有多个波长光的可见光来说,直边衍射光强振荡对渐晕的影响不大,我们只计算了临界刀口边缘的衍射能量分布,对于整个区域的衍射振荡可以忽略不计。

总结两个部分可以得出总的渐晕分布公式:

$$\left\{ \begin{aligned} & E \left[ \frac{d}{4} \arcsin\left(\frac{2\Delta a(l-d_0)}{d_0 d}\right) - \sqrt{\left(\frac{d}{4}\right)^2 - \left(\frac{\Delta a(l-d_0)}{d_0}\right)^2} \frac{\Delta a(l-d_0)}{d_0} \right] \text{能量分配} \\ & \frac{kE_1}{\sqrt{2\pi}} e^{j\frac{\pi}{4}} \left( \int_{x=-\infty}^{\infty} e^{jkx\cos\theta} \frac{e^{jkR_1}}{\sqrt{kR_1}} \sin\frac{\theta}{2} dx - \int_{x=0}^{\infty} e^{jkx\cos\theta} \frac{e^{jkR_1}}{\sqrt{kR_1}} \sin\frac{\theta}{2} dx \right) \text{轴外点直边衍射} \\ & \frac{E_{\infty}}{2} \{ [C(\omega) + S(\omega) + 1] + i[S(\omega) - C(\omega)] \} \text{轴上点直边衍射} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

针对公式(11),利用MATLAB进行公式拟合可以得出渐晕能量分布图,计算反射面渐晕能量分布如图5所示。

图5中纵坐标为光能量幅值,横坐标为CCD像元到中心点的距离。通过对相机进行辐射定标实验,记录图片分析图像数据,将各点数码值拟合成一条曲线,如图6所示。

对比发现,两条曲线基本吻合,从而得出在可见光作为光源的情况下,上述渐晕分布数学模型正

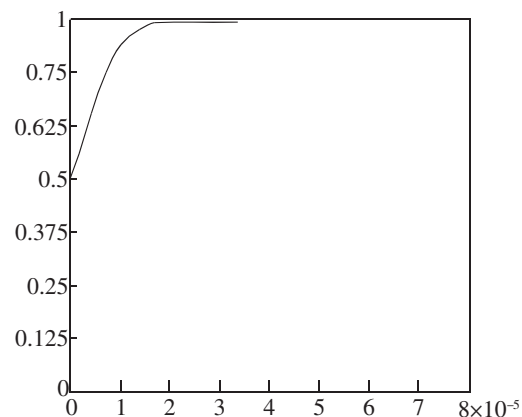


图5 直射面渐晕能量分布曲线

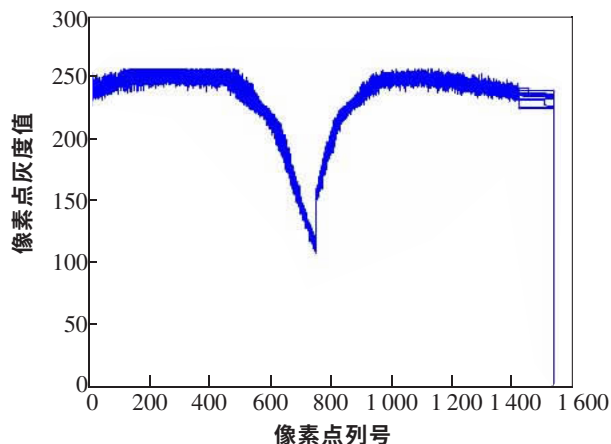


图6 渐晕区域DN值曲线

确地描述了反射镜拼接相机的渐晕分布。

### 3 成像实验及渐晕消除处理结果

数学模型的建立对光学系统拼接起到了指导作用,通过数学模型计算出渐晕在两个 CCD 像面上的临界点  $B_1$  和  $B_2$ ,如图 7 所示。

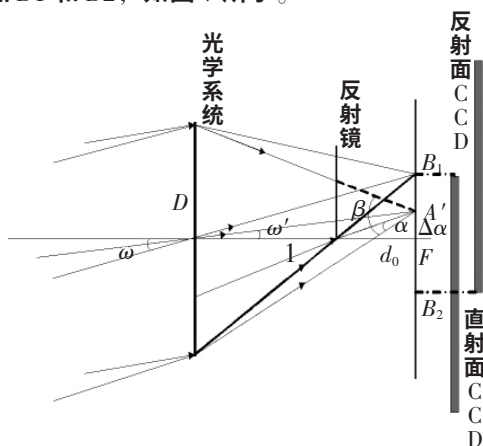


图7 反射镜拼接像元搭接示意图

由于实际理论计算时没有考虑 CCD 响应非均匀性和反射镜棱边散射杂光的影响,因此,单纯利用理论公式补偿数码值消除渐晕的方法在实际工程应用中具有一定的局限性。在实际工程中可以采用辐射校正的方法进行渐晕消除。图 8 为实际外场成像图片,从图中可以看出,采用反射镜拼接结构的相机在中心视场处产生了非常明显的渐晕现象。图中左半侧图像为反射 CCD 成像图片,右半侧图像为直



图8 未经复原的成像图片

射 CCD 成像图片。反射 CCD 渐晕现象比较严重,是由于反射镜自身反射率以及对直边衍射能量分布而言,反射面衍射能量小于直射面衍射能量。对于反射镜边缘产生的杂散光,由于杂散光问题涉及到反射镜制作工艺、环境变化等问题,研究起来相对复杂,同时也不是反射镜拼接中渐晕现象产生的主要原因<sup>[9]</sup>,因此在本文中不做详细分析。对于杂散光产生的影响,也同样可以通过辐射校正的方法进行消除<sup>[10-11]</sup>。

通过数学模型得出最大渐晕临界点位置,减去重叠区域后,求出渐晕分布的区域,即可对该区域的数码值进行补偿。

在暗室中,使用积分球对 CCD 相机进行定标,可以得到多种照度均匀光照射下相机的成像效果。图 9 列出了两种照度下的定标图片,渐晕现象单独呈现出来。为了能够更加准确地拟合出所需要的定标图像,需要测得多幅不同照度下的成像图片,为下面的图像处理提供数据条件。

为了去除随机噪声影响,在每个照度下,用相机进行多次成像,本文对 50 次成像结果求平均值,得出每个照度下同一个点的  $I_{ref}(r)_{(i,j)}$  和各个照度下的

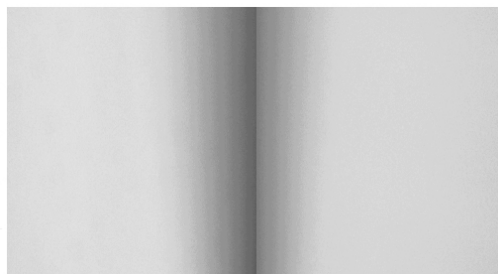
$I_{ref\ average}$ 。按  $k(r) = \frac{I_{ref}(r)_{(i,j)}}{I_{ref\ average}}$  计算该点补偿因子。对 8 个

照度下同一个点的渐晕补偿因子计算,得出结果如表 1。

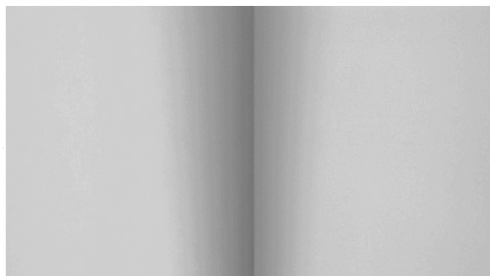
将表 1 中的结果按最小二乘法拟合,得出该点补偿因子与该点亮度之间的曲线,如图 10。

利用 MATLAB 中的函数 `polyfit()`,采用最小二





(a)



(b)

图9 对相机进行定标得到不同照度下的图片

表1 补偿因子计算结果

| 数码值 | 补偿因子     |
|-----|----------|
| 114 | 0.875 66 |
| 196 | 0.784 62 |
| 268 | 0.768 51 |
| 405 | 0.743 33 |
| 492 | 0.733 31 |
| 609 | 0.730 20 |
| 742 | 0.727 67 |
| 937 | 0.725 07 |

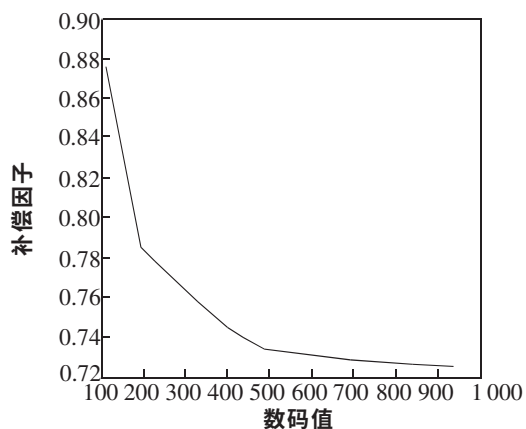


图10 补偿因子多项式拟合曲线

乘法对给定数据进行多项式拟合。令曲线满足

$$y=ax^2+bx+c;$$

$$>>x=[114\ 196\ 268\ 405\ 492\ 609\ 742\ 937];$$

$$>>y=[0.875\ 66\ 0.784\ 62\ 0.768\ 51\ 0.743\ 33\ 0.733\ 31$$

$$0.730\ 20\ 0.727\ 67\ 0.725\ 07];$$

$$>> n=2;$$

$$>> p=polyfit(x,y,n)$$

计算结果:

$$a=-0.002, b=-0.005, c=0.900\ 6。$$

该点补偿因子曲线为:

$$y=-0.002x^2-0.005x+0.900\ 6$$

将渐晕区域每个像素的曲线参数值  $a$ ,  $b$ ,  $c$  存入 FPGA 内开辟的存储区。对渐晕图像进行补偿时, 将获得的渐晕图像中渐晕区域各点的数码值带入相对应的补偿因子公式, 得出补偿因子后计算原始图像数码值, 从而完成渐晕消除。利用这种方法对定标图像和外场成像图片分别进行恢复, 得到图 11, 图 12 所示的结果。从图中可以看出, 本方法较好地消除了反射镜拼接中产生的渐晕现象。

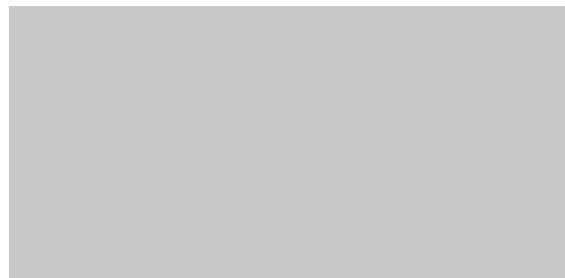


图11 渐晕消除后的辐射定标图像



图12 渐晕消除后的外场图像

## 4 结 论

本文从能量分配和直边衍射两个角度对反射镜拼接过程中产生的渐晕现象进行了分析, 得出渐晕能量分布数学模型。利用 MATLAB 仿真出该模型曲线, 与实际定标图片数据比对, 验证了该模型的正确性。由于工程中需要考虑 CCD 响应非均匀性以及

反射镜杂光, 因此需要对相机进行辐射定标实验。利用渐晕数学模型求出渐晕区域后, 对该区域的所有像素数码值进行恢复。采用函数逼近法拟合出渐晕区域内各点的补偿因子曲线, 得出补偿因子和亮度值的关系。根据渐晕点的数码值求出补偿因子后, 计算出恢复后的数码值。通过对辐射定标图像和外场成像图像处理后, 很好地消除了渐晕现象。

## 参考文献

- [1] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 何凯, 赵红颖, 刘晶晶. 航空遥感影像渐晕复原方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(6): 1447-1450.
- [3] 冯强, 霍俊彦, 杨海涛. 一种新颖的图像抗渐晕技术[J]. 电子科技, 2007, 10(8): 67-70.
- [4] 姚启钧. 光学教程[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [5] 梁华秋, 张永炬. 直边衍射光强分布的实验验证[J]. 大学物理实验, 2002(9): 9-12.
- [6] 钱晓凡, 胡涛, 张晔. 基于 MATLAB 的衍射场模拟计算[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2004(6): 132-135.
- [7] 祁建霞, 董军, 苗润才. 利用改进型衍射理论对直边衍射效应的解释[J]. 光子学报, 2007(6): 91-92.
- [8] 王志坚, 刘冬梅, 付跃刚, 著. 光学工程基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.
- [9] Wonpil Yu. Practical anti-vignetting methods for digital cameras[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003: 975-983.
- [10] Kim Y N, Sim D G. Vignetting and illumination compensation for omni-directional image generation on spherical coord[C]. *IEEE. on Computer Society, New York*, 2006: 342-349.
- [11] He Kai, Tang Ping-Fan, Liang Ran. Vignetting image correction based on Gaussian quadrics fitting[C]. *IEEE. 2009 Fifth International Conference on Natural Computation, TianJin*, 2009: 465-469.

作者简介: 张宇(1981-), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 2010年于中科院长春光机所获得博士学位, 主要从事CCD图像采集与处理系统研究。E-mai: zhangyu004115@126.com