

# 低分辨率测光指导高分辨成像自适应调光

曹旗磊, 董丽丽, 赵明, 许文海

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

**摘要** 目前航天遥感相机还不能预先获取场景光谱辐射信息,也就不能根据场景内容调整曝光参数。为此,提出一种“测光、解算、成像”的自适应调整曝光参数方法。为减轻测光相机实际应用时对航天遥感相机重量的影响,提出了应用大尺度测光相机进行测光,并提出了依据低分辨率图像指导高分辨率成像的方法。首先,对典型场景曝光统计特征随尺度的变化规律进行统计;其次,利用大尺度测光图像进行尺度合并,并计算各尺度下的曝光时间;然后,通过多项式拟合建立尺度与曝光时间之间的函数关系,进而确定原尺度对应的曝光参数,从而实现用大尺度测光相机指导航天遥感相机成像。无人机数据结果表明,该方法适用于各种典型场景,且利用大尺度拟合确定的曝光参数与用原尺度图像确定的曝光参数误差小于4%。卫星照片数据表明,测光尺度比超过90倍时,利用大尺度拟合确定的曝光参数与用原尺度图像确定的曝光参数误差小于6%,仍能够准确指导高分辨相机成像。

**关键词** 遥感; 曝光统计特征; 曝光参数; 误差

**中图分类号** V445.8 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.092802

## Low Resolution Metering Guide for High Resolution Imaging Adaptive Exposure

Cao Qilei, Dong Lili, Zhao Ming, Xu Wenhai

Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

**Abstract** At present, the space remote sensing camera still can not obtain the scene spectral radiance information in advance, so it can not adjust the exposure parameters according to the scene content. To this end, a method for adaptively configuring exposure parameters is proposed, which is realized by metering, calculating and imaging. In order to reduce the influence of metering camera on space remote sensing camera weight in practical application, the paper presents the application of a large-scale metering camera for metering, and a method of high resolution imaging based on low resolution image is proposed. Firstly, the change rule between the statistical characteristics of exposure of typical scenes and the scale. Large-scale metering image is used to conduct scale merging, and the exposure time of each scale is calculated. The function relationship between scale and exposure time is established by polynomial fitting, and the exposure parameters corresponding to the original scale are determined, so as to realize the imaging of space remote sensing camera with large-scale metering camera. According to the statistical results of unmanned aerial vehicle, the method can be applied to several typical scenes, the exposure parameter error between the value determined by large-scale fitting and the value determined by original scale image is less than 4%. Satellite picture data show that the error between the exposure parameters determined by large-scale fitting and the exposure parameters determined by the original scale image is less than 6% when the metering scale ratio is more than 90 times, but it still can accurately guide high-resolution camera imaging.

**Key words** remote sensing; characteristic of exposure statistics; exposure parameter; error

**OCIS codes** 280.4788; 230.0250; 040.1490; 110.1085

**收稿日期:** 2017-04-14; **收到修改稿日期:** 2017-04-25

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2014BAB12B03)、中央高校基本科研业务经费(3132016209, 3132016351)、交通运输部建设科技项目(2014328204050)

**作者简介:** 曹旗磊(1989—),女,博士研究生,主要从事光电信息检测与处理方面的研究。E-mail: caoqilei\_2013@163.com

**导师简介:** 许文海(1956—),男,博士,教授,主要从事光电信息检测与处理方面的研究。

E-mail: whxu@dlmu.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

时间延迟积分电荷耦合器件(TDI CCD)航天遥感相机不能预先获得场景信息,不能根据当前场景内容实时调整曝光参数,使有的图像曝光合适,而有的图像信息集中在低灰度区,图像存在整体偏暗、细节丢失等问题。针对上述问题,现已提出在航天遥感相机前增加测光相机,预先对目标场景进行曝光统计,实现航天遥感相机的自适应曝光<sup>[1]</sup>。航天遥感系统的重量是一个重要指标,要实现测光相机的工程化应用,仍需要对测光相机尺度等实际应用问题进行研究。

为了提高对地观测的空间分辨率,航天遥感相机一般采用大口径长焦镜头,具有大体积和高复杂度的特点。而测光相机在航天遥感相机之前,采用前倾斜摄影的方式捕获目标图像,其与航天遥感相机是完全独立的光学系统,测光相机如采用与航天遥感相机相同的镜头,航天遥感系统的重量、体积等将很难满足技术要求。所以需要利用大尺度的测光相机来预先估计拍摄场景辐照度,为航天遥感相机提供调光依据。

测光相机尺度越小,越能够满足航天遥感系统的重量要求。但是图像的曝光统计特征会随着测光相机尺度发生变化,如果曝光统计特征不准确,会影响自适应调光的准确度。除此之外,自适应调光的准确度还与曝光算法相关,目前普通数码相机的曝光算法<sup>[2-10]</sup>主要有基于灰度平均值的调光算法,基于感兴趣区域的调光算法,基于灰度均值与峰值的调光算法和基于图像熵的调光算法等。在上述自适应调光中,图像的曝光特征统计是指通过统计图像灰度平均值或加权平均值来分析目标场景的平均亮度信息,然后以“灰度中值”为参考灰度值来调节相机曝光量,使相机输出图像的灰度趋近于“灰度中值”。然而航天遥感成像目标丰富,很难区分感兴趣区域。为了避免目标饱和,航天遥感图像要满足饱和和点阈值要求,上述算法不能控制饱和和点阈值,不适用于航天遥感相机。

改进的基于灰度直方图的调光算法能够满足航天遥感相机获得的场景高辐射亮度不饱和的要求<sup>[1]</sup>。但测光相机尺度与成像相机尺度相差较大时,曝光统计特征变化较大,依据此曝光统计特征来指导成像相机的曝光参数,会使曝光参数与实际情况产生较大偏差。所以需要为测光相机寻找合适的尺寸,并探究曝光时间随测光相机尺度变化的规律,使其能够实现场景测光,又能避免载荷过大。

本文从工程实际出发,根据改进的基于直方图的调光方法,求出不同尺度测光图像下的曝光参数,在分析曝光参数随测光相机尺度变化规律的基础上,利用多项式拟合的方法建立曝光参数与尺度的关系函数模型;选择满足所期望的测光相机尺度,对其进行尺度合并,得到拟合曲线,根据拟合曲线确定原尺度对应的曝光参数,从而实现用大尺度测光相机指导航天遥感相机成像。

## 2 调光原理

对于相机来说,统计入瞳处辐照度与统计灰度平均值并无太大区别,因为其目标图像采集与实际成像用的是同一个图像传感器,不需要将信号分开进行单独处理<sup>[11]</sup>。而根据互补金属氧化物半导体(CMOS)测光图像统计出的特征值对 TDI CCD 进行调光参数的设置时,由于 CMOS 的图像对光能量的响应与 TDI CCD 不同,利用 CMOS 图像的灰度值调整 TDI CCD 的曝光参数显然有些不合理,需根据入瞳处辐照度进行调光。

依据测光图像和 CMOS 成像模型可确定航天相机入瞳处的辐照度。CMOS 数字输出图像的表达式<sup>[11]</sup>为

$$G = E \times t \times A_D \times Q \times \frac{\lambda_m}{h \times c} \times g, \quad (1)$$

式中  $G$  为图像灰度值,  $E$  为 CMOS 焦平面的辐照度,  $t$  为积分时间,  $A_D$  为探测器像元面积,  $Q$  为平均量子效率,  $\lambda_m$  为中心波长,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $g$  为增益。CMOS 焦平面的辐照度  $E$  与航天相机入瞳处的辐照度  $L$  的关系<sup>[11]</sup>为

$$E = L \times \frac{\pi \times \tau_0}{4F^2} \times (1 - \epsilon), \quad (2)$$

式中  $\tau_0$  为光学系统透射率,  $F$  为光学系统相对孔径,  $\epsilon$  为面遮拦因子。根据(1)式和(2)式可得  $L$  与  $G$  间的关系式为

$$L = \frac{G \times 4F^2 \times h \times c}{\pi \times \tau_0 \times (1 - \epsilon) \times A_D \times t \times Q \times \lambda_m \times g}. \quad (3)$$

CMOS 曝光成像的参数是已知的,根据 CMOS 图像利用(3)式可以求出航天相机入瞳处的辐照度。

当图像饱和点占总像素百分比的阈值为  $s$  时,高辐照度  $L_{\text{high}}$  为<sup>[1,12]</sup>

$$L_{\text{high}} = \sum_0^{m \times s} L_i / (m \times s), \quad (4)$$

式中  $L_i$  为从高到低排列的入瞳辐照度值,  $m$  为图像总的像素数。

TDI CCD 航天遥感相机的成像数学模型表达式为

$$G = E \times t_{\text{int}} \times R_{\text{CCD}} \times M \times g, \quad (5)$$

式中  $t_{\text{int}}$  为积分时间,  $R_{\text{CCD}}$  为响应度,  $M$  为积分级数。

将饱和点阈值对应的高辐照度  $L_{\text{high}}$  设置为饱和灰度值,调节  $M$  和  $g$  可控制输出图像满足饱和点的阈值要求,从而满足航天遥感相机的成像要求。

在上述分析过程中,认为测光相机与航天遥感相机的入瞳前高辐射亮度值是相同的。而在实际运用时,每个低分辨率像元的入瞳前能量是高分辨  $n \text{ pixel} \times n \text{ pixel}$  的入瞳能量和,如图 1 所示。入瞳前高辐射照度可能会发生变化,如何用低分辨率测光图像指导高分辨率相机成像是本文要研究的主要内容。下节将主要探讨尺度变化与曝光特征统计值的关系。

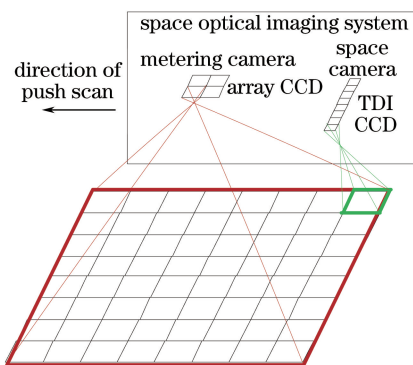


图 1 不同尺度下像元成像示意图

Fig. 1 Sketch map for pixel imaging at different scales

### 3 尺度变化与曝光统计特征的关系

尺度变化是将某一尺度上所获得的知识 and 现象扩展、转换到另一个尺度上来表达<sup>[13-14]</sup>。尺度根据相同幅面所涵盖的空间范围的相对大小分为大尺度和小尺度,大尺度对应于低的空间分辨率,小尺度则对应于高的空间分辨率。采用局部平均法可由高分辨率影像生成一系列低分辨率影像,具体如图 2 所示。局部平均法是设置一定大小的窗口,将窗口内的所有像元值的均值作为相应尺度转换后的低分辨率遥感图像的像元值,然后将窗口滑动,依次计算下一个尺度转换后图像中的像元值。

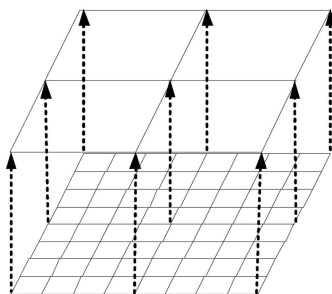


图 2 高分辨生成低分辨示意图

Fig. 2 Schematic of high resolution converted to low resolution

研究尺度变化与曝光参数的关系,其基本思路是解算相同视场下不同尺度下影像数据的灰度高端信息等曝光统计特征量,探究其变化规律。统计灰度高端信息  $G_{\text{high}}$  的表达式为

$$G_{\text{high}} = \sum_0^{m \times s} G_i / (m \times s), \quad (6)$$

式中  $G_i$  为从高到低排列的灰度值。

实验环境如图 3 所示,实验是在能见度为 25,8,4,2 km 的不同的天气条件下进行的。利用不同天气条件下无人机获取的停车场、道路、草地、建筑、船舶等典型场景的图像,图像空间分辨率为 0.01 m,图像尺寸为 2048 pixel×2048 pixel,对图像进行尺度合并得到各尺度下的图像,部分结果如图 4 所示。典型场景曝光统计特征随尺度变化关系如图 5 所示。

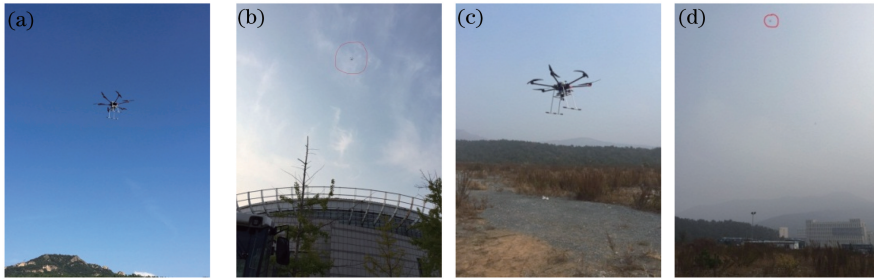


图 3 各种天气环境下飞行实验图。能见度分别为(a) 25 km;(b) 8 km;(c) 4 km;(d) 2 km

Fig. 3 Flight experiment pictures of various weather conditions. Visibilities are

(a) 25 km, (b) 8 km, (c) 4 km, (d) 2 km, respectively

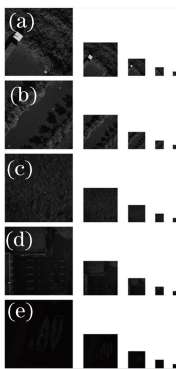


图 4 典型场景各尺度图像。

(a)停车场;(b)道路;(c)草地;(d)建筑;(e)船舶

Fig. 4 Images at scales of typical scenarios.

(a) Parking; (b) road; (c) grass; (d) building; (e) ship

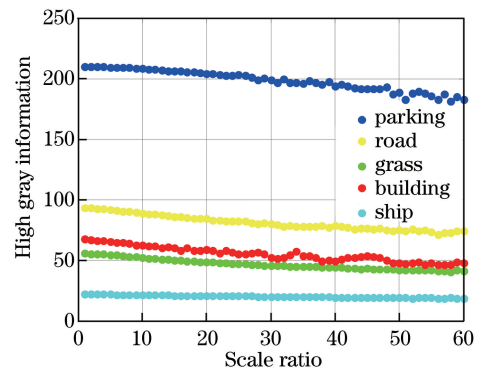


图 5 典型场景曝光统计特征随尺度变化关系

Fig. 5 Relationship between the statistical characteristics of exposure and scale of typical scenarios

从图 5 中看出,随着尺度比的增加,图像高端灰度信息有下降的趋势。而下降的幅度受场景中地面反射率、物体尺度、阴影和大气透射率等因素的影响,很难通过建模的方式对其进行精确定量的计算。但通过对不同天气条件下大量场景进行分析,发现各天气条件下每个场景都可通过多项式拟合的方法确定出尺度比与曝光统计特征的函数关系。依据此函数关系可实现准确提取曝光特征,正确指导高分辨率相机曝光参数的设置。

#### 4 多项式拟合确定曝光参数及误差分析

无人机实验时,测光相机与成像相机是相互独立的两个相机,测光相机的尺寸为 256 pixel×256 pixel,成像相机的尺寸为 2048 pixel×2048 pixel。

依据上述的统计规律,利用大尺度测光图像通过尺度合并,得到尺度比与曝光时间的关系式,求出尺度比为 1 的曝光时间,从而确定出高分辨率下相机的曝光时间。

首先利用全分辨率图像计算最佳曝光时间;再对全分辨率图像进行尺度合并,得到尺度不同的图像,将尺度合并后的图像作为测光图像,计算不同尺度下的最佳曝光时间;以此拟合全分辨率下曝光时间随尺度变化的曲线关系。

选择满足所期望的测光相机尺寸(设定为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ ), 对其进行尺度合并, 利用合并后的图像, 统计  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  下曝光时间随尺度变化的关系, 进行曲线拟合。根据拟合曲线计算尺度为 1 时的最佳曝光时间; 将此曝光时间与根据全分辨率图像计算的最佳曝光时间进行比较, 得到大尺度拟合确定的曝光参数的误差。部分结果如 5 所示。

图 6 中, 蓝线为全分辨率下曝光时间随原尺度变化的拟合曲线, 其表达式为  $y = 0.0101x^2 + 0.5364x + 445.47$ , 红线为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  下曝光时间随尺度变化的拟合曲线, 其表达式为  $y = 0.0027x^2 + 0.8069x + 442.91$ 。根据全分辨率计算的最佳曝光时间为  $0.447 \text{ ms}$  (如图中蓝点所示), 大尺度拟合确定的曝光参数为  $0.444 \text{ ms}$  (如图中红点所示), 大尺度拟合确定的最佳曝光时间与全分辨率确定的最佳曝光时间的误差为  $0.67\%$ 。

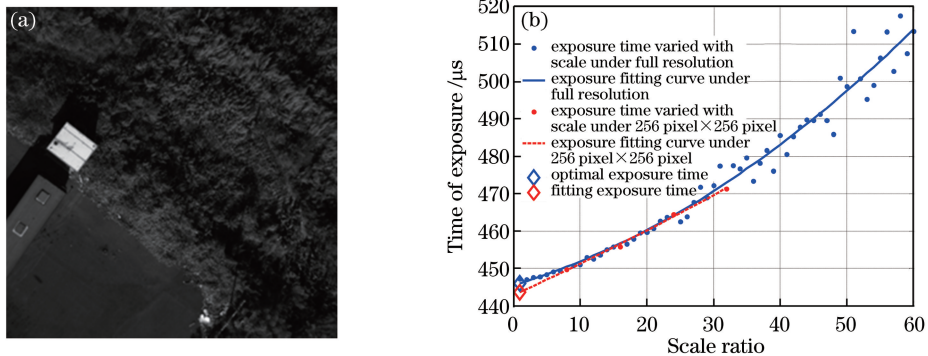


图 6 第一组尺度比分析结果。(a) 图像分析; (b) 尺度比随曝光时间的变化

Fig. 6 Analysis result of scale ratio for the first group. (a) Image analysis; (b) change of scale ratio with exposure time

图 7 中, 蓝线为全分辨率下曝光时间随原尺度变化的拟合曲线, 其表达式为  $y = -0.04582x^2 + 7.68x + 985.1$ , 红线为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  下曝光时间随尺度变化的拟合曲线, 其表达式为  $y = 0.02664x^2 + 5.675x + 993.9$ 。根据全分辨率计算的最佳曝光时间为  $1.005 \text{ ms}$ , 大尺度拟合确定的曝光参数为  $1.000 \text{ ms}$ , 大尺度拟合确定的最佳曝光时间与全分辨率确定的最佳曝光时间的误差为  $0.5\%$ 。

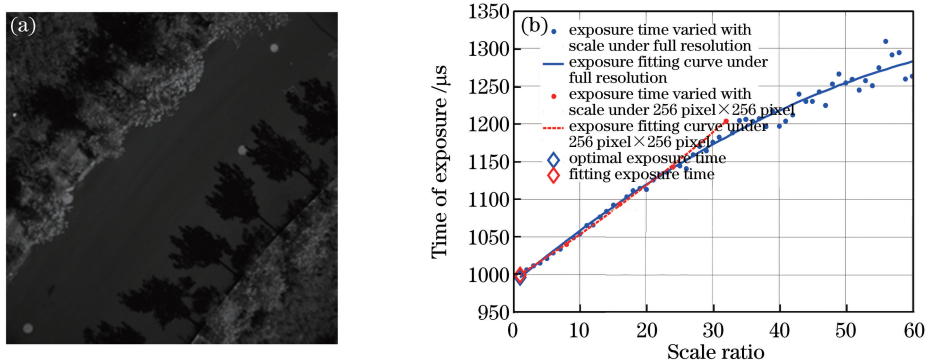


图 7 第二组尺度比分析结果。(a) 图像分析; (b) 尺度比随曝光时间的变化

Fig. 7 Analysis result of scale ratio for the second group. (a) Image analysis; (b) change of scale ratio with exposure time

图 8 中蓝线为全分辨率下曝光时间随原尺度变化的拟合曲线, 其表达式为  $y = -0.09156x^2 + 15.91x + 1647$ , 红线为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  下曝光时间随尺度变化的拟合曲线, 其表达式为  $y = -0.1944x^2 + 20.41x + 1606$ 。根据全分辨率计算的最佳曝光时间为  $1.682 \text{ ms}$ , 大尺度拟合确定的曝光参数为  $1.626 \text{ ms}$ , 大尺度拟合确定的最佳曝光时间与全分辨率确定的最佳曝光时间的误差为  $3.3\%$ 。

通过对无人机实际拍摄的图像分析能够看出, 提出的利用大尺度拟合确定的曝光参数与用原尺度图像确定的曝光参数误差小于  $4\%$ 。

上述实验中测光相机与成像相机的尺度比为 8, 而实际应用当中, 希望测光相机与航天遥感的尺度比能够更大。

为了确定上述规律, 用空间分辨率为  $1 \text{ m}$ , 图像像素数为  $23793 \text{ pixel} \times 23793 \text{ pixel}$  的卫星照片进行验

证。满足预期期望的测光相机尺寸(设定为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ )。发现卫星照片曝光时间随尺度变化能够拟合成六项式曲线,对  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的测光图像进行拟合,也能够拟合成六项式曲线。如图 8 所示。

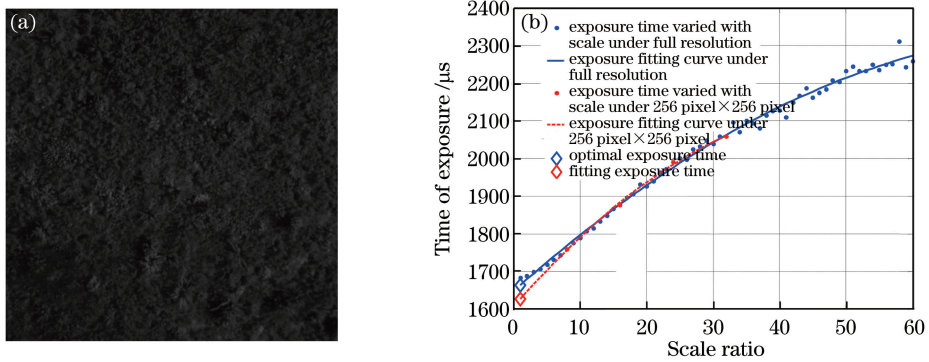


图 8 第三组尺度比分析结果。(a)图像分析;(b)尺度比随曝光时间的变化

Fig. 8 Analysis result of scale ratio for the third group. (a) Image analysis; (b) change of scale ratio with exposure time

图 9(a)中,蓝线为全分辨率下曝光时间随原尺度变化的拟合曲线,其表达式为  $y = -15.52x^6 + 16.05x^5 + 34.65x^4 - 6.649x^3 - 84.96x^2 + 197.8x + 3429$ ,红线为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  下曝光时间随尺度变化的拟合曲线,其表达式为  $y = -79.39x^6 - 50.41x^5 + 224.2x^4 + 173.2x^3 - 202.4x^2 + 86.96x + 3666$ 。根据全分辨率计算的最佳曝光时间为  $2.45 \text{ ms}$ (如图中蓝点所示),大尺度拟合确定的曝光参数为  $2.32 \text{ ms}$ (如图中红点所示),大尺度拟合确定的最佳曝光时间与全分辨率确定的最佳曝光时间的误差为  $5.3\%$ 。

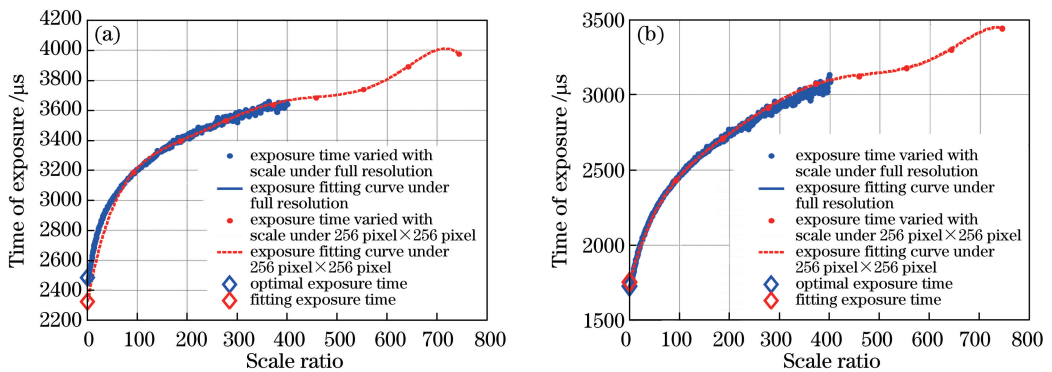


图 9 第四组尺度比分析结果。(a)北京市结果;(b)上海市结果

Fig. 9 Analysis result of scale ratio for the fourth group. (a) Result of Beijing; (b) result of Shanghai

图 9(b)中,蓝线为全分辨率下曝光时间随原尺度变化的拟合曲线,其表达式为  $y = -15.26x^6 + 10.34x^5 + 31.18x^4 + 12.53x^3 - 81.9x^2 + 249x + 2745$ ,红线为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  下曝光时间随尺度变化的拟合曲线,其表达式为  $y = -53.74x^6 - 39.73x^5 + 177.4x^4 + 181.2x^3 - 222.5x^2 + 151.3x + 3108$ 。根据全分辨率计算的最佳曝光时间为  $1.71 \text{ ms}$ (如图中蓝点所示),大尺度拟合确定的曝光参数为  $1.75 \text{ ms}$ (如图中红点所示),大尺度拟合确定的最佳曝光时间与全分辨率确定的最佳曝光时间的误差为  $2.3\%$ 。

通过对卫星照片的分析能够看出,测光相机尺度比超过 90 倍时,提出的利用大尺度拟合确定的曝光参数与用原尺度图像确定的曝光参数误差小于  $6\%$ ,能够准确指导高分辨相机成像。

## 5 结 论

对测光相机尺度进行研究,并提出一种依据低分辨率图像指导高分辨率成像的方法。以曝光统计特征随尺度的变化规律为基础,利用大尺度测光图像通过多项式拟合的方式,确定高分辨率下的曝光时间。实验结果表明:方法适用于多个典型场景;在测光尺度比超过 90 倍时,利用大尺度拟合确定的曝光参数与用原尺度图像确定的曝光参数误差小于  $6\%$ 。该方法可减轻增加测光相机对航天遥感系统重量的压力,为实际应用提供支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Cao Qilei, Dong Lili, Zhao Ming, *et al.* Adaptive exposure of space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 0822003.  
曹旗磊, 董丽丽, 赵明, 等. 空间相机自适应曝光[J]. *光子学报*, 2016, 45(8): 0822003.
- [2] Yang Zuoting, Ruan Ping, Zhai Bo. Auto-exposure algorithm for scenes with high dynamic range based on image entropy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(6): 742-746.  
杨作廷, 阮萍, 翟波. 基于图像熵的高动态范围场景的自动曝光算法[J]. *光子学报*, 2013, 42(6): 742-746.
- [3] Yang Haitao, Chang Yilin, Wang Jin, *et al.* A new automatic exposure algorithm for video cameras using luminance histogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 841-847.  
杨海涛, 常义林, 王静, 等. 一种基于亮度直方图的自动曝光控制方法[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 841-847.
- [4] Su Hongwu, Yang Xiaojun, Li Zhe, *et al.* Automatic adjust light systems based on combined average gray with peak gray[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1): 158-160.  
苏宏武, 杨小君, 李哲, 等. 基于平均和峰值灰度加权的自动调光系统[J]. *光子学报*, 2006, 35(1): 158-160.
- [5] Huang Hui, Zhou Jin. Information sciences auto-exposure for CCD camera based on FPGA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 426-433.  
黄辉, 周进. 基于现场可编程门阵列的 CCD 相机自动调光[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 426-433.
- [6] Rahman M T, Kehtamavaz N, Razighi Q R. Using image entropy maximum for auto exposure [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2011, 20(1): 013007.
- [7] Peng Nina, Chen Dayu, Wang Kun, *et al.* Real-time automatic gain control algorithm based on linear TDI CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1370-1375.  
彭妮娜, 陈大羽, 王琨, 等. 采用线阵 TDI CCD 相机的实时自动增益控制算法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1370-1375.
- [8] Xue Xucheng, Shi Junxia, Lü Hengyi, *et al.* Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4): 857-863.  
薛旭成, 石俊霞, 吕恒毅, 等. 空间遥感相机 TDI CCD 积分级数和增益的优化设置[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 857-863.
- [9] Wu Xingxing, Liu Jinguo, Zhou Huaide, *et al.* Automatic on-orbit adjusting gains of space camera based on lighting conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0328001.  
武星星, 刘金国, 周怀得, 等. 基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0328001.
- [10] Li Xiansheng, Ren Jianyue, Ren Jianwei, *et al.* Establishment of image model for on-board space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1852-1858.  
李宪圣, 任建岳, 任建伟, 等. 空间相机在轨成像模式的建立[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1852-1858.
- [11] Yuan Hangfei. Research on adaptive automatic exposure for spaceborne remote sensing camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.  
袁航飞. 航天相机星上自适应调光的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [12] Cao Qilei, Zhao Ming, Dong Lili, *et al.* Optimization of remote sensing camera and its parameters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 032802.  
曹旗磊, 赵明, 董丽丽, 等. 航天遥感相机及参数优化方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 032802.
- [13] Hu Ting. The study of scale effects in typical objects' feature extraction from remote sensing image [D]. Xi'an: Northwestern University, 2010.  
胡婷. 遥感图像典型地物特征提取的尺度效应研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [14] Ming Dongping, Wang Qun, Yang Jianyu. Spatial scale of remote sensing image and selection of optimal spatial resolution[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4): 529-537.  
明冬萍, 王群, 杨建宇. 遥感影像空间尺度特性与最佳空间分辨率选择[J]. *遥感学报*, 2008, 12(4): 529-537.