

基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整

武星星 刘金国 周怀得 张博研

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 空间相机摄影过程中,通常采用较小的固定增益以避免图像饱和,导致获取的图像存在整体偏暗、图像层次不丰富等问题。提出一种基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整方法,根据当前的航天器位置和时间等实时计算星下点处的太阳天顶角,通过非线性拟合建立太阳天顶角与对目标最大反射率对应的地物成像时相机入瞳辐亮度之间的函数关系,进而完成对增益的实时计算和调整。与卫星工具包(STK)仿真和MODTRAN计算结果的对比实验表明,在太阳天顶角取 $[20^\circ, 70^\circ]$ 时辐亮度拟合误差小于等于 $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,相对误差小于等于 2.2% 。计算和仿真得到太阳天顶角之差约为 $0.39^\circ (3\sigma)$ 。在轨成像实验结果表明,太阳天顶角为 62.5° 时增益调整后图像灰度层次从98提高到183,信息熵提高约 19.2% ,图像灰度层次更加丰富,使目标更容易辨识。

关键词 遥感;空间相机;增益;太阳天顶角

中图分类号 V445.8 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0328001

Automatic on-Orbit Adjusting Gains of Space Camera Based on Lighting Conditions

Wu Xingxing Liu Jinguo Zhou Huaide Zhang Boyan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract During the imaging process of space camera, small fixed gains are often used to avoid image saturation. As a result, obtained images have problems such as dark as a whole, short of digital number levels. An automatic on-orbit adjusting gains method of space camera based on lighting conditions is put forward. In this method sun zenith angle at substellar point is calculated in real time according to current position of spacecraft and time. Function relationship between sun zenith angle and radiance at entrance pupil of space camera corresponding to maximum reflection index of targets is established by non-linear curve fitting. In this way real-time calculation and adjustment of gains are realized. Results of contrastive experiment with results of simulation by satellite tool kit (STK) and computation by MODTRAN indicate that radiance fitting errors are no more than $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ as sun zenith angle belongs to $[20^\circ, 70^\circ]$. Relative errors are no more than 2.2% . Difference error between calculated sun zenith angles and those simulated is about $0.39^\circ (3\sigma)$. Results of on-orbit imaging experiments indicate that digital number levels are improved from 98 to 183 and entropies are improved about 19.2% after adjusting of gains as sun zenith angle is 62.5° . Targets will be easier to be recognized as more digital number levels can be obtained.

Key words remote sensing; space camera; gain; sun zenith angle

OCIS codes 280.4788; 110.3000; 110.5200

1 引言

在空间相机对地摄影时,在可见光到近红外光谱范围(380~2500 nm)内地物目标的反射率存在显著的差别,如海水的反射率约为0.05,而冰雪的

反射率最高可达0.8。同时光照条件随航天器、地球和太阳之间的相对位置等变化,导致空间相机入瞳处的辐亮度存在较大的变化。为了避免获取的遥感图像中感兴趣的目标处出现饱和现象而无法分

收稿日期: 2013-08-27; 收到修改稿日期: 2013-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61108066)、吉林省科技发展计划(20130101028jc)

作者简介: 武星星(1980—),男,博士,副研究员,主要从事空间遥感成像技术等方面的研究。

E-mail: starglare@126.com

辨,空间相机通常需要满足饱和辐亮度的要求,即当相机入瞳辐亮度小于饱和辐亮度时输出的图像不能饱和。饱和辐亮度可由用户要求的目标最大反射率和可能的最佳光照条件计算得到。

目前在空间相机的设计过程中,主要通过调整空间相机成像电路的元器件参数和视频处理器的增益,使相机输出的图像在饱和辐亮度条件下接近饱和^[1]。成像电路参数在元器件焊接后即固定,而在空间相机的在轨摄影过程中增益也一般不调整或根据获取的图像进行季节性的人工调整。这样虽然满足了饱和辐亮度的要求,但从获取的遥感图像看,存在部分图像整体偏暗、图像层次不丰富等现象,而且在不同时间拍摄的另一地物目标的图像灰度差别大^[2-3]。

目前已提出的增益调整方法主要通过摄影过程中,对获取的图像数据或成像传感器输出的模拟电压进行统计分析而后对增益进行调整^[4-6]。然而由于空间相机多采用推扫方式进行摄影,摄影过程中每个时刻拍摄的地物目标各不相同,经常有高反射率目标夹在大量低反射率目标之中,在单次摄影过程中覆盖的地物目标相距可达上千公里。由于下一时刻要拍摄的地物目标的类型和反射率是未知的,而且航天器、地球和太阳之间的相对运动导致摄影过程中光照条件不断变化。因此对前一刻获取的图像数据或成像传感器输出的模拟电压进行统计分析得到的增益未必适用于下一时刻的地物目标,从而出现增益本应减小却增大的情况,导致图像出现饱和或达不到调整目的。

在对相机输出图像的数字量化输出值与相机入瞳辐亮度和增益之间关系进行分析的基础上,提出一种基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整方法,既满足用户要求的目标最大反射率,又考虑摄影过程中太阳光照条件的变化,使光照条件较差情况下获取的图像仍然灰度层次丰富。并以某空间相机为例,通过与 MODTRAN 计算结果、卫星工具包 (STK) 仿真结果进行对比分析和在轨成像实验,验证空间相机增益在轨自动调整方法的性能。

2 基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整方法

当空间相机的光谱范围在可见光和近红外波段时,其光响应特性通常可以视为是线性的,则图像的数字量化输出值与相机入瞳辐亮度和增益等之间的关系可以表示为^[7]

$$D(L,G) = R_f \cdot G \cdot L + B, \quad (1)$$

式中 D 为数字量化输出值, L 为相机入瞳辐亮度, G 为增益, R_f 为成像传感器以及预放电路等模拟前端的光响应度, B 为暗信号偏移量。从(1)式可以看出,由于 R_f 和 B 在成像传感器与成像电路参数确定后基本不变,相机入瞳辐亮度 L 越大,增益 G 越大,则数字量化输出值 D 越大。当 D 超过该空间相机量化位数对应的最大值后,即出现图像饱和现象。当固定采用较小的增益时,虽然可以满足饱和辐亮度要求,但当光照条件较差而使相机入瞳辐亮度 L 较小时,由于数字量化输出值 D 很小而导致图像整体偏暗且灰度层次不丰富,这限制了空间相机每一轨的有效摄影时间。

对(1)式进行分析可知,为了使相机输出的图像既不饱和,灰度层次又丰富,需要自动调整相机的增益,使之与相机入瞳处可能的最大辐亮度相适应。本实验提出的基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整方法的基本思想为,空间相机在轨摄影时,通过航天器总线接收航天器的当前位置和时间码,实时计算当前对目标最大反射率对应的地物成像时的相机入瞳辐亮度 L_c ,根据 L_c 对当前增益进行自动调整。

空间相机从太空垂直对地摄影时的入瞳辐亮度主要由空间相机的光谱范围、星下点处的太阳天顶角、地物目标的反射率和大气条件等决定^[8]。由于云雨天气下拍摄的图像的可用率很低,因此在本实验中相机入瞳辐亮度的计算都基于晴朗大气条件。而空间相机的光谱范围和用户要求的最大目标反射率是已知的,则 L_c 只随星下点处的太阳天顶角而变化。使用 MODTRAN 大气辐射传输工具可以得到不同星下点处的太阳天顶角 θ_c 对应的相机入瞳辐亮度 L_c ^[9]。由于根据用户要求的最大目标反射率得到 L_c 并进行增益的调整,因此当视场内地物非均匀,即反射率存在较大变化时仍可以保证图像不会出现饱和。通过非线性拟合的方式建立太阳高度角 θ_c 和相机入瞳辐亮度 L_c 之间的函数关系,在轨摄影时利用拟合后的函数关系由星下点处的太阳天顶角 θ_c 直接计算得到相机入瞳辐亮度 L_c ,可以避免耗时的查询或插值过程,提高增益调整的实时性。

当天顶角大于 90° 时,太阳位于地物目标的地平线以下,相机入瞳处辐亮度接近为 0,无论如何调整增益都无法使图像达到实用效果,而且 MODTRAN 大气辐射传输工具可能无法得到正确输出,因此在后续计算中当天顶角大于 90° 时取天顶角为 90° 。经过

对不同光谱范围和地物目标反射率对应数据的大量实验后发现,采用以下函数模型可以取得比其他大多数函数模型都好的拟合效果,即

$$L_c = a_1 \sin(b_1 \theta_c + c_1) + a_2 \sin(b_2 \theta_c + c_2) + a_3 \sin(b_3 \theta_c + c_3), \quad (2)$$

式中 $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3$ 和 c_3 为通过拟合得到的参数。因此在基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整方法中使用(2)式所示的函数模型。

空间相机在轨工作中需要从航天器总线接收航天器的当前位置和时间码等并插入图像辅助数据,以便地面处理时使用。因此可以利用接收到的航天器的当前位置和时间码等来计算星下点处的太阳天顶角。设航天器在 WGS-84 坐标系下的当前坐标为 $(X_{ECF}, Y_{ECF}, Z_{ECF})$, 则星下点处的经度 λ 和纬度 δ 可以计算得到,即

$$\lambda = \arctan \frac{Y_{ECF}}{X_{ECF}}, \quad (3)$$

$$\delta = \arctan \left[\frac{Z_{ECF}}{\sqrt{X_{ECF}^2 + Y_{ECF}^2}} (1 - e^2) \right], \quad (4)$$

式中 e 为地球的偏心率,采用 WGS-84 地球椭球模型,对应 e 取 0.081819190842621。

目前已有多位学者如 Michalsky、Blanco-Muriel、Meeus 等提出了太阳天顶角的计算方法,但多数计算的不确定度超过 $\pm 0.01^\circ$, 且仅适用某些特定年份,如 Michalsky^[10] 提出的太阳天顶角计算方法仅适用公元 1950~2050 年。Reda 等对 Meeus 提出的太阳天顶角的计算方法进行改进,使之在公元 2000~6000 年期间的计算不确定度优于 $\pm 0.0003^\circ$, 因此在本实验中采用该方法计算太阳天顶角。未考虑大气折射时星下点处的太阳高度角 e_0 为^[11]

$$e_0 = \arcsin(\sin \delta \sin \delta' + \cos \delta \cos \delta' \cos H'), \quad (5)$$

式中 δ 为星下点处的纬度,可以由(4)式计算得到。 δ' 为星下点处的太阳赤纬, H' 为星下点处地方时角。 δ' 的计算需要用到太阳黄经和黄赤交角, H' 的计算需要用到格林威治平恒星时和星下点的经度 λ , 而太阳黄经、黄赤交角和格林威治平恒星时都要根据当前时刻对应的儒略日来计算^[12], 因此需要将空间相机从航天器总线接收到的时间码转换为当前时刻对应的儒略日。而目前航天器通常以某一时刻为计时基准,时间码为从计时基准到当前时刻的累加秒值,则当前时刻对应的儒略日 J_c 。由(6)式计算:

$$J_c = J_b + \frac{S_c}{86400}, \quad (6)$$

式中 J_b 为计时基准对应的儒略日, S_c 为时间码。

大气折射引起的太阳高度角偏差 Δe 为

$$\Delta e = \frac{1.02}{60 \tan[e_0 + 10.3/(e_0 + 5.1)]}, \quad (7)$$

则星下点处的太阳天顶角

$$\theta_c = \pi/2 - e_0 - \Delta e. \quad (8)$$

在得到星下点处的太阳天顶角 θ_c 后,代入拟合得到的(2)式对应的函数模型,计算当前对目标最大反射率对应的地物成像时的相机入瞳辐亮度 L_c 。设用户要求的饱和辐亮度为 L_{\max} , 在空间相机的实验室辐射定标时,在积分球输出的辐亮度为 L_{\max} 时调整空间相机的增益,使图像的数字量化输出值从小增加至最大值,得到最大数字量化输出值对应的增益倍数 G_{\max} 。设空间相机所用视频处理器能够设置的最小和最大增益倍数分别为 G_{DOWN} 和 G_{UP} , 则当前的增益倍数 G_c 的计算公式为

$$G_c = \begin{cases} G_{\text{UP}}, & \frac{G_{\max} L_{\max}}{L_c} > G_{\text{UP}}, \\ \frac{G_{\max} L_{\max}}{L_c}, & G_{\text{DOWN}} \leq \frac{G_{\max} L_{\max}}{L_c} \leq G_{\text{UP}}, \\ G_{\text{DOWN}}, & \frac{G_{\max} L_{\max}}{L_c} < G_{\text{DOWN}}. \end{cases} \quad (9)$$

将(9)式计算得到的当前增益倍数 G_c 转换为对应的码值后,通过空间相机内部总线发送至视频处理器,使相机的增益倍数调整为 G_c 。空间相机在轨摄影期间每次收到航天器的当前位置和时间码后重复以上过程,实现增益的在轨自动调整。

3 实验验证

为了对基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整方法进行验证,以某空间相机为例,依次通过与 MODTRAN 计算结果、STK 仿真结果进行对比分析和在轨成像实验,对空间相机增益在轨自动调整方法的性能进行验证。

该空间相机的光谱范围为 510~690 nm, 用户要求的目标最大反射率为 0.5, 要求的饱和辐亮度 L_{\max} 为 42.236 W/(m²·sr)。根据光谱范围和目标最大反射率,使用 MODTRAN 计算晴朗大气条件下,星下点处太阳天顶角 θ_c 取 $0^\circ, 1^\circ, \dots, 90^\circ$ 时与目标最大反射率对应的相机入瞳辐亮度 L_c , 计算结果如图 1 中原始数据所示。为了用计算得到的原始数据拟合(2)式对应的函数模型,采用 Matlab 曲线拟合工具箱中提供的信赖区域(Trust-Region)法来完

成这一非线性拟合过程,将拟合得到的参数代入(2)式得到

$$L_c = 61.58\sin(0.005623\theta_c + 2.433) + 36.13\sin(0.06393\theta_c - 0.002887) + 28.79\sin(0.06917\theta_c + 2.966). \quad (10)$$

根据(10)式得到的相机入瞳辐亮度随太阳天顶角变化曲线以及原始数据如图1所示。从图1可以看出,拟合后的曲线和原始数据的变化趋势一致。

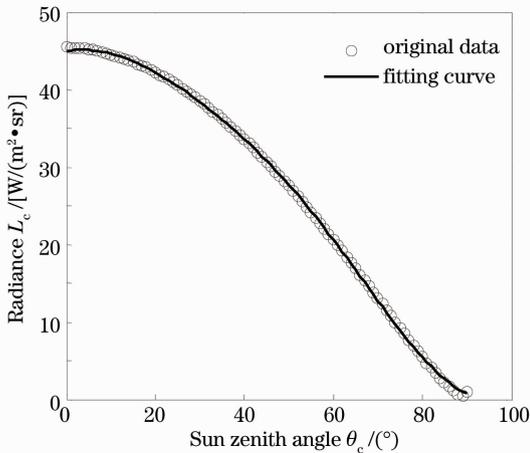


图1 相机入瞳辐亮度随太阳天顶角变化曲线
Fig.1 Change of radiance at entrance pupil of camera along with sun zenith angle

图2为拟合误差曲线,可以看出,太阳天顶角 θ_c 在 $[0^\circ, 20^\circ]$ 范围内拟合结果与原始数据辐亮度之差 $\Delta L_c \leq 0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, θ_c 在 $[70^\circ, 90^\circ]$ 范围内拟合结果与原始数据辐亮度之差 $\Delta L_c \leq 0.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。空间相机摄影通常采用的太阳天顶角范围为 $[20^\circ, 70^\circ]$,在 $[20^\circ, 70^\circ]$ 范围内辐亮度之差 $\Delta L_c \leq 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,相对误差小于等于2.2%,说明用本实验提出的函数模型来表征相机入瞳辐亮度与太阳天顶角之间的非线性关系是可行的。

卫星工具包(STK)提供了航天器飞行期间星

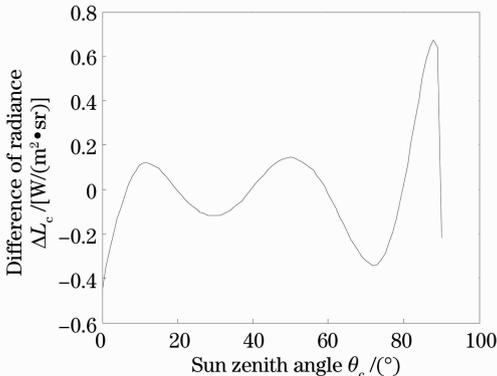


图2 拟合误差曲线
Fig.2 Curve of fitting errors

下点处太阳高度角的仿真功能,由于太阳天顶角和太阳高度角互为余角,进而可以得到太阳天顶角,可用于验证空间相机增益在轨自动调整方法中太阳天顶角计算的准确性。根据搭载该空间相机的航天器的轨道参数,在STK中建立航天器和空间相机模型进行仿真。航天器采用太阳同步圆轨道,轨道高度500 km,仿真起始时刻为UTC时间为2012-05-06T14:10:02,共仿真6000 s。仿真后输出各个时刻航天器在WGS-84坐标系下的坐标、时间码和星下点处的太阳高度角。由航天器在WGS-84坐标系下的坐标和时间码,根据(3)~(8)式可以计算得到各个时刻的太阳天顶角,而将仿真得到的太阳高度角进行转换也可以得到各个时刻的太阳天顶角。图3为太阳天顶角计算结果和STK仿真结果对比。

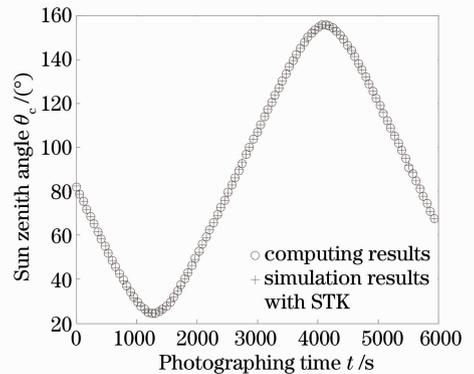


图3 太阳天顶角计算和STK仿真结果对比
Fig.3 Comparison of sun zenith angles obtained by computation and simulation with STK

从图3可以看出,太阳天顶角计算结果和STK仿真结果一致,经统计计算和仿真得到太阳天顶角误差约为 $0.39^\circ (3\sigma)$,说明空间相机增益在轨自动调整方法中太阳天顶角的计算方法是准确可靠的。将计算得到的不同时刻的太阳天顶角代入(2)式,可以得到不同时刻对目标最大反射率对应的地物成像时的相机入瞳辐亮度 L_c ,而根据STK仿真得到的太阳天顶角使用MODTRAN工具也可以得到不同时刻的相机入瞳辐亮度。图4为辐亮度计算结果与STK和MODTRAN仿真结果对比。从图4可以看出,摄影过程中相机入瞳辐亮度随摄影时间而变化,辐亮度计算结果与STK和MODTRAN仿真结果基本一致。

在该空间相机的实验室辐射定标时,设置积分球输出的辐亮度与用户要求的饱和辐亮度相同,即 $42.236 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。调整空间相机的增益,使图像的数字量化输出值从小增加至最大值,得到图像的

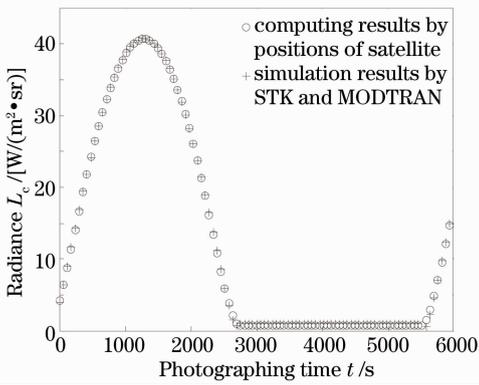


图4 辐亮度计算结果与 STK 和 MODTRAN 仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of radiances obtained by computation and simulation with STK and MODTRAN

最大数字量化输出值对应的增益倍数 G_{\max} 为 1.2589。需要注意当积分球光源的光谱分布和太阳光谱分布不完全相同时,会导致遥感器在轨成像时的输出和实验室辐射定标时存在差异^[13-15]。由于仅凭一种光源难以准确再现太阳光谱,所用积分球应采用氙灯和溴钨灯相结合的双光源方式,用滤光片对光源光谱进行截止和校正,使合成的光谱符合国际照明委员会测定的太阳光谱分布曲线^[16]。该空间相机所用视频处理器为 OM7560A,对应能够设置的最小增益倍数 G_{DOWN} 为 1,能够设置的最大增益倍数 G_{UP} 为 63.0957,将 G_{\max} 、 G_{UP} 、 G_{DOWN} 和实时计算得到的当前时刻的相机入瞳辐亮度 L_c 代入(9)式,即可得到当前时刻的增益倍数 G_c 。

图5为计算得到的不同摄影时刻的增益倍数,可以看出图5中增益倍数的变化与图3和图4中太阳天顶角和相机入瞳辐亮度的变化相适应。当太阳天顶角较小、相机入瞳辐亮度较大时, G_c 较小,避免出现图像饱和。随着太阳天顶角逐渐变大而相机入瞳辐亮度变小时, G_c 逐渐增大,避免图像整体偏暗,增加图像的灰度层次。本实验所用视频处理器 OM7560A 增益倍数 G_c 与对应的增益设置码值 N_c 的关系为

$$N_c = 400 \lg G_c. \quad (11)$$

相机控制器通过内部总线将码值 N_c 发送给视频处理器,完成当前摄影时刻的增益调整。由于空间相机从航天器总线接收的航天器当前位置和时间码等信息由航天器上搭载的 GPS 接收机产生,1 s 更新一次,因此空间相机增益在轨自动调整的最高频率为每秒调整增益一次。空间相机通常采用数字信号处理器(DSP)作为相机控制器的核心控制单元。

以某空间相机所用的数字信号处理器 SMQ320C32 为例,经 DSP 仿真器和示波器测量,在该处理器上完成单次的增益计算和调整耗时约 4.8 ms,远小于 1 s,因此可以满足实时性要求。

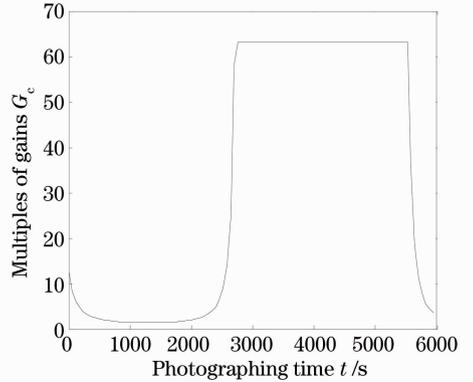


图5 不同摄影时刻的增益倍数

Fig. 5 Gain multiples at different photographing time

某在轨运行的空间相机摄影时可以通过地面上注程控指令对增益进行调整,通过该空间相机开展在轨成像实验,对在轨增益自动调整方法进行验证。具体过程为,在该空间相机某次摄影前通过 STK 进行精密轨道仿真,得到该次摄影过程中某一时刻的航天器位置等信息,根据本实验提出的方法计算该时刻的增益,通过上注程控指令使将相机的增益在摄影开始前调整为计算得到的结果,摄影后对该摄影时刻的图像进行判读和对比。图6为在轨成像实验结果,其中图6(a)为未调整增益时获取的某一地物目标的遥感图像。图6(b)为根据本实验方法调整增益后获取的同一地物目标的遥感图像。

从图6(a)可以看出,增益调整前获取的图像整体偏暗,根据下传的图像辅助数据中的航天器位置和时间码等计算得到该图像中心位置对应的太阳天顶角约为 62.5° 。而图6(b)中增益调整后获取的图像明显灰度层次更加丰富,有利于目标的辨识。图7为与图(6)对应的增益调整前后图像直方图的对比结果,表1为增益调整前后图像灰度统计结果。

从图7可以看出,未进行增益调整时,图像直方图中大量的像元的灰度都分布在 20~50 之间,形成一个陡峭的尖峰,因而图像整体偏暗。进行增益调整后,图像直方图中尖峰明显变平缓,各像元灰度在整个量化范围内更加均匀地分布,说明图像有更丰富的亮部和暗部细节。

从表1可以看出,未进行增益调整时图像灰度的最大值为 113,仅为最大量化值 255 的一半左右,进行增益调整后图像灰度的最大值为 215,更有效

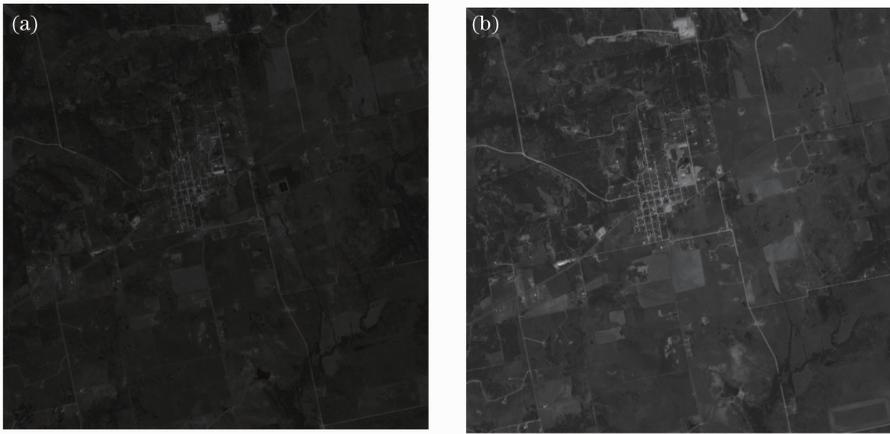


图 6 在轨成像实验结果。(a)增益调整前图像；(b)增益调整后图像

Fig. 6 Results of on-orbit imaging experiments. (a) Before adjusting gains; (b) after adjusting gains

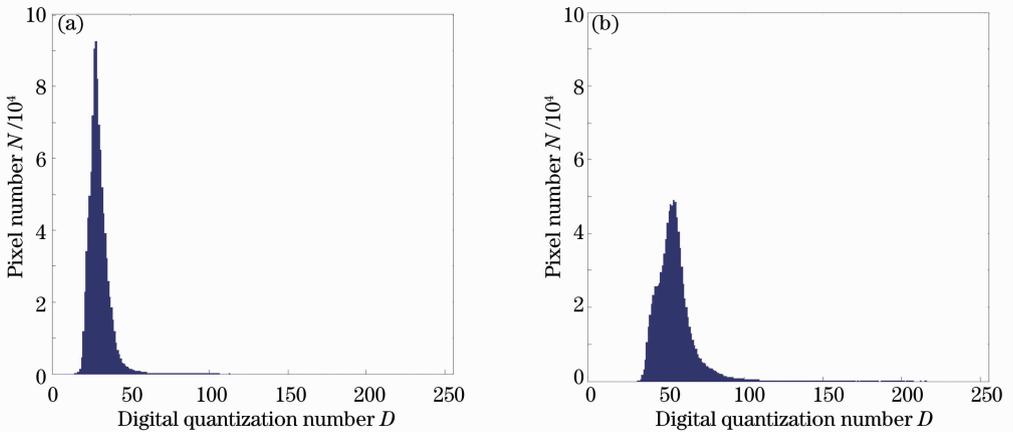


图 7 图像直方图对比。(a) 增益调整前；(b) 增益调整后

Fig. 7 Comparison of image histograms. (a) Before adjusting gains; (b) after adjusting gains

表 1 增益调整前后图像灰度统计结果

Table 1 Statistic results of image digital numbers before and after adjusting gains

Statistic results of image digital numbers	Before adjusting gains	After adjusting gains
Max	113	215
Mean	29.74	55.29
Min	15	32
Gray level	98	183
Comentropy	4.48	5.34

地利用了视频处理器的动态范围。而进行增益调整后灰度层次从 98 提高到 183, 图像的灰度层次得到有效提高。通常用图像的信息熵作为图像信息量的评价指标, 从表 1 可以看出, 进行增益调整后图像的信息熵从 4.48 提高到 5.34, 提高了约 19.2%, 说明图像中包含的信息量更大, 细节更丰富。同时由于增益的调整考虑摄影过程中太阳光照条件的变化, 在不同时间拍摄的同一地物目标的图像灰度接近,

有利于后续应用中的图像比对和变化检测。

4 结 论

针对空间相机摄影时为避免图像饱和而采用固定增益, 导致获取的图像存在整体偏暗、灰度层次不丰富等问题, 提出一种基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整方法。通过非线性拟合建立太阳天顶角与对目标最大反射率对应的地物成像时相机入瞳辐亮度之间的函数关系, 根据当前的航天器位置和时间等对增益进行实时计算和调整。与 STK 仿真和 MODTRAN 计算结果的对比实验表明, 在太阳天顶角取 $[20^\circ, 70^\circ]$ 时辐亮度拟合误差小于等于 $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 相对误差小于等于 2.2%。计算和仿真得到太阳天顶角之差约为 $0.39^\circ (3\sigma)$ 。在某空间相机控制器上完成单次的增益计算和调整耗时约 4.8 ms, 满足实时性要求。在轨成像实验结果表明, 太阳天顶角为 62.5° 时进行增益调整后灰度层次从

98 提高到 183, 信息熵提高约 19.2%, 图像灰度层次更加丰富, 信息量更大, 使目标更容易辨识。

参 考 文 献

- 1 Li Zhiyong, Yang Xiaojun. Consideration on designing of dynamic range for TDI CCD camera on remote sensing satellite [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2011, 32(1): 24-27.
李智勇, 杨校军. 关于遥感卫星 TDI CCD 相机动态范围设计的思考[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(1): 24-27.
- 2 Xue Xucheng, Shi Junxia, Lü hengyi. Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(4): 857-863.
薛旭成, 石俊霞, 吕恒毅. 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.
- 3 He Hongyan, Wang Xiaoyong, Fu Xingke. Study on the designing of the dynamic range of remote satellite's CCD camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2008, 29(1): 39-42.
何红艳, 王小勇, 付兴科. 遥感卫星 CCD 相机的动态范围设计考虑[J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(1): 39-42.
- 4 Yan Weibin, Zhao Bin. CCD auto gain regulation based on DSP [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 23(3): 74-80.
颜伟彬, 赵斌. 基于数字信号处理器的 CCD 自动增益调整[J]. *传感器技术*, 2004, 23(3): 74-80.
- 5 Zhang Mingchao, Zhou Yue, Yan Feng, *et al.*. Automatic gain control of SBUV-ICCD [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(2): 496-502.
章明朝, 周跃, 闫丰, 等. “日盲”紫外增强型 CCD 的自动增益控制[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 496-502.
- 6 Peng Nina, Chen Dayu, Wang Kun, *et al.*. Real-time automatic gain control algorithm based on linear TDICCD 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.
- 7 Zhang Junqiang, Yan Changxiang, Xin Jiuyuan. Effect of spectral-line shift on radiometric measurement accuracy of spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 33(2): 0212001.
张军强, 颜昌翔, 辛久元. 谱线漂移对星载成像光谱仪辐射测量精度的影响[J]. *光学学报*, 2012, 33(2): 0212001.
- 8 Fu Qiang, Xiangli Bin, Jing Juanjuan. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0211001.
付强, 相里斌, 景娟娟. 基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0211001.
- 9 M R Pandya, D B Shah, H J Trivedi. Simulation of at-sensor radiance over land for proposed thermal channels of imager payload onboard INSAT-3D satellite using MODTRAN model [J]. *Earth Syst Sci*, 2011, 120(1): 19-25.
- 10 J J Michalsky. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950 \ 2050) [J]. *Solar Energy*, 1988, 40(3): 227-235.
- 11 I Reda, A Andreas. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications [R]. Springfield: USA National Renewable Energy Laboratory, 2008. 1-56.
- 12 M Blanco-Muriel, D Alarcon-Padilla, T Lopez-moratalla, *et al.*. Computing the solar vector [J]. *Solar Energy*, 2001, 70(5): 431-441.
- 13 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Hongzhuang, *et al.*. Study on calibration environment of spectral responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0312001.
张振铎, 王淑荣, 李宏壮, 等. 空间紫外遥感仪器光谱响应度定标环境的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0312001.
- 14 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.*. On-orbit radiometric calibration based on gray-scale tarps [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212007.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0212007.
- 15 Zhai Wenchao, Li Jianjun, Zheng Xiaobing, *et al.*. Research on method of calibrating sun channels of sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412004.
翟文超, 李健军, 郑小兵, 等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412004.
- 16 Su Shi, Zhang Guoyu, Fu Yun, *et al.*. New development of solar simulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070003.
苏拾, 张国玉, 付芸, 等. 太阳模拟器的新发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 070003.

栏目编辑: 张 腾