

基于三波段光学成像系统的地物辐亮度系数测量

郭帮辉^{1,2} 黄剑波¹ 刘建卓¹ 王健¹ 孙强¹

(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 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为了对地面目标的辐亮度系数进行测量,研制了一套包含紫外、可见光和近红外三个波段的光学成像系统,用积分球对其辐亮度响应进行标定,得到辐亮度与图像灰度值和探测器积分时间的拟合方程。提出了一种地面目标辐亮度系数测量方法,采用两块不同辐亮度系数的漫反射板作为参照物,建立辐亮度方程组,最终求解得到的目标辐亮度系数表达式中将不含气象参数项。利用研制的三波段光学成像系统,对绿草地的辐亮度系数进行测量,使用辐亮度系数分别为0.99、0.50、0.20、0.10的四块漫反射板,测得草地的紫外、可见光和近红外波段的辐亮度系数分别为0.070、0.184和0.429。

关键词 成像系统;辐亮度系数;三波段;紫外波段;近红外波段;辐亮度标定;漫反射板

中图分类号 TN23; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0612003

Measurement of Radiance Factor of Ground Target Using Triple-Band Optical Imaging System

Guo Banghui^{1,2} Huang Jianbo¹ Liu Jianzhuo¹ Wang Jian¹ Sun Qiang¹

(¹ Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to measure radiance factor of ground targets, a triple-band optical imaging system which contains bands of ultraviolet, visible and near infrared is developed. Radiance response characteristic of the triple-band optical imaging system is calibrated using an integrating sphere. The fitted equations between radiance and gray level of image, and between radiance and integration time of detector are got. A method of measurement of radiance factor of ground targets using two diffuser plates with different radiance factors as references to establish radiance equations is put forward, by which there would not be any atmospheric parameter in the expression of radiance factor of ground targets. An outdoor measurement of radiance factor of green grass using the triple-band optical imaging system is made. During the measurement, four diffuser plates with the radiance factors of 0.99, 0.50, 0.20 and 0.10 are used. From the measurement, the radiance factors of green grass in the bands of ultraviolet, visible and near infrared are got, which are 0.07, 0.184 and 0.429 respectively.

Key words imaging systems; radiance factor; triple-band; band of ultraviolet; band of near infrared; radial brightness calibration; diffuser plate

OCIS codes 120.4820; 260.7190; 260.3060; 230.1980

1 引言

随着光电成像技术的快速发展,对地面目标的

光电探测,已由单波段系统逐渐升级为多波段系统。多波段系统能够获得目标和背景的多个波段的光谱

收稿日期: 2013-12-12; 收到修改稿日期: 2014-01-17

基金项目: 吉林省科技厅发展计划项目(20125092)、中国科学院院地合作项目(2011CJT0004)

作者简介: 郭帮辉(1983—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事精密光电测量系统方面的研究。

E-mail: gbhyxl@163.com

导师简介: 孙强(1972—),男,研究员,博士,主要从事精密光电测量系统、红外成像系统等方面的研究。

E-mail: sunqiang_sklaol@yahoo.com.cn(通信联系人)

辐射特征,从而提高目标的探测概率,因而在空间光学遥感和军事侦察领域得到广泛应用^[1-3]。

光电探测系统通过测量目标的光谱辐亮度系数和几何特征来识别目标^[4-6]。目前,光电探测系统在测量地面目标的辐亮度系数时,需要实时测量气象参数,根据大气传输模型,计算大气对光波的衰减系数,并结合光学测量系统的状态参数和探测器响应,计算目标的光谱辐亮度系数^[7-9]。此种辐亮度系数测量方法的测量精度与气象参数的测量精度和所使用的大气传输模型的准确度有很大关系。而且,测量气象参数增加了整个辐亮度系数测量工作的难度。

为避免测量气象参数,对传统的辐亮度系数测量方法进行改进,研制了一套紫外、可见光和近红外三波段光学成像系统,用于测量地面目标的辐亮度系数。在测量过程中,使用两块不同辐亮度系数的漫反射板作为参照物,在目标辐亮度系数测量结果中没有大气参数项,降低了测量难度。

2 辐亮度系数测量原理

2.1 光波在大气中传输

空气中存在各种大气分子、气溶胶粒子和云雾粒子,光波在大气中传输时,这些大气微粒对光波的作用效果分为三种:消光、吸收和散射^[10-12],总称为大气对光波的衰减。考虑大气对光波的衰减,光波辐亮度 $L(\lambda, s)$ 的传输方程为^[13]

$$dL(\lambda, s) = -k(\lambda, s)\rho(s)[L(\lambda, s) - J_v(\lambda, s)]ds, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, s 为光波传输路径长度, $k(\lambda, s)$ 为消光系数, $\rho(s)$ 为吸收系数, $J_v(\lambda, s)$ 为附加源函数。对(1)式积分,得 $s = R$ 处的光波辐亮度:

$$L(\lambda, R) = L(\lambda, 0)\exp\left(-\int_0^R k\rho ds\right) + \left[\int_0^R k\rho J_v \exp\left(\int_0^s k\rho ds\right) ds\right] \exp\left(-\int_0^R k\rho ds\right), \quad (2)$$

式中 $L(\lambda, 0)$ 为 $s = 0$ 时的光波辐亮度。设路径长度为 R 时的大气透射率为

$$\tau(R, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \exp\left(-\int_0^R k\rho ds\right), \quad (3)$$

式中 x_1 为大气能见度, x_2 为大气压, x_3 为大气温度, x_4 为大气湿度, x_5 为风速,这些因素影响光在大气中的透射率,使经目标反射后到达光学系统入瞳处的光波的辐亮度值下降。为便于描述,将 $\tau(R, x_1,$

$x_2, x_3, x_4, x_5)$ 简写为 $\tau(R, x_i)$ 。

设路径长度为 R 时的气柱亮度为 $L_v(\lambda, R)$, 则:

$$L_v(\lambda, R) = \left[\int_0^R k\rho J_v \exp\left(\int_0^s k\rho ds\right) ds\right] \exp\left(-\int_0^R k\rho ds\right), \quad (4)$$

光波在水平路径上传输,可以认为大气消光系数、散射系数和气柱所受到的自然照明强度 J_v 不随路程 s 变化,即 $\tau(R, x_i) = \exp(-k\rho R)$, 可得:

$$L(\lambda, R) = L(\lambda, 0)\tau(R, x_i) + L_v(\lambda, \infty)[1 - \tau(R, x_i)], \quad (5)$$

式中 $L_v(\lambda, \infty)$ 为 $R = \infty$ 时的气柱亮度,也被称为天空背景亮度。

2.2 辐亮度系数测量

辐亮度系数定义为在相同光照条件下,在指定的方向上和限定的立体角 ω 范围内,当 ω 趋于 0 时,物体反射的辐亮度与完全漫反射体反射的辐亮度之比,以 $Y(\lambda)$ 表示。辐亮度为 $L(\lambda, 0)$ 的光波入射到物体表面,被物体表面反射之后,经过路径长度为 R 的大气,传输到光学测量系统入瞳时的辐亮度为 $L(\lambda, R)$:

$$L(\lambda, R) = L(\lambda, 0)\tau(R, x_i)Y(\lambda) + L_v(\lambda, \infty)[1 - \tau(R, x_i)], \quad (6)$$

当测量物体在某个波段范围内的辐亮度系数时,最终计算得到的结果是物体在该波段范围内的平均辐亮度系数,为便于描述,将(6)式简写为

$$L = L_0\tau Y + L_v(1 - \tau), \quad (7)$$

(7)式中有 4 个变量,仅用一块漫反射板,无法测出被测目标的辐亮度系数。考虑天空背景亮度及大气对光波的衰减效应,提出用两块不同反射系数的漫反射板来测量目标的辐亮度系数。建立以下方程组:

$$\begin{cases} L_{\text{obj}} = L_0\tau Y_{\text{obj}} + L_v(1 - \tau) \\ L_1 = L_0\tau Y_1 + L_v(1 - \tau) \\ L_2 = L_0\tau Y_2 + L_v(1 - \tau) \end{cases}, \quad (8)$$

式中 L_{obj} 为光学系统测量得到的被测目标辐亮度, Y_{obj} 为被测目标的辐亮度系数, L_1 为光学系统测量得到的漫反射板 1 的辐亮度, Y_1 为漫反射板 1 的辐亮度系数, L_2 为光学系统测量得到的漫反射板 2 的辐亮度, Y_2 为漫反射板 2 的辐亮度系数。求解(8)式,得:

$$Y_{\text{obj}} = \frac{L_{\text{obj}} - L_1}{L_1 - L_2}(Y_1 - Y_2) + Y_1, \quad (9)$$

式中,漫反射板 1 的辐亮度系数 Y_1 和漫反射板 2 的辐亮度系数 Y_2 可通过实验标定得到。在相同光照条

件下,利用经过辐亮度标定的光学系统,通过测量得到目标的辐亮度 L_{obj} 、漫反射板 1 的辐亮度 L_1 和漫反射板 2 的辐亮度 L_2 ,由(9)式可以计算出被测目标的辐亮度系数,并且(9)式不包含大气透射率 τ 和天空背景亮度 L_s ,因此,利用此测量方法,不用测量大气参数,也能测量地物目标的辐亮度系数。

3 三波段辐亮度系数测量系统

3.1 三波段光学成像系统

研制了一套紫外(UV)、可见光(VIS)和近红外(NIR)三波段光学成像系统,用于地物目标的三波段辐亮度系数测量,其参数如表 1 所示。

表 1 主要技术指标

Table 1 Main specifications

Field of view	7.6°
Effective focallength	60 mm
F/#	3
Waveband	UV: 300~380 nm
	VIS: 380~760 nm
	NIR: 760~1000 nm

光学系统结构如图 1 所示。紫外、可见光和近红外三个波段的光学系统共用同一光学窗口,利用胶合棱镜进行分光,在棱镜的胶合面上镀有特殊设计的分色膜。入射光束经过光学窗口,到达第一个棱镜的胶合面时,300~380 nm 的紫外光束反射,反射的紫外光束被紫外光学成像镜头聚焦到紫外 CCD 靶面,形成目标的紫外图像;入射光束中的 380~1000 nm 的可见光和近红外光经过第一个棱镜的胶合面时,90% 以上的光波透射,然后到达第二个棱镜的胶合面,380~760 nm 的可见光反射,反射的可见光光束

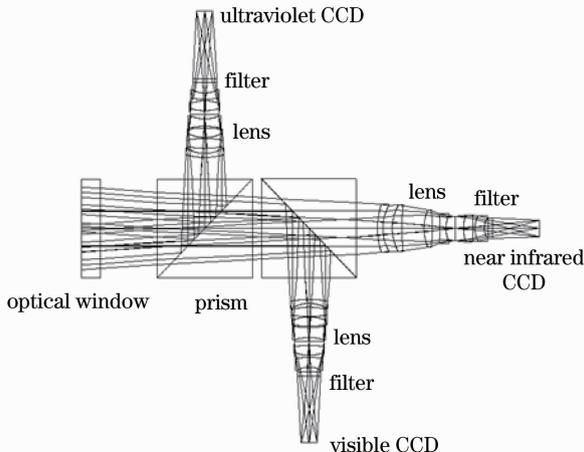


图 1 光学系统结构

Fig. 1 Structure of optical system

经过可见光成像镜头,聚焦到可见光 CCD 靶面,形成目标的可见光图像;760~1000 nm 的近红外光束经过第二个棱镜透射后,被近红外光学成像镜头聚焦到近红外 CCD 靶面,形成目标的近红外图像。

3.2 辐亮度标定

光学系统在进行辐亮度标定之后,才能用于目标的辐亮度测量。光学系统的辐亮度标定过程,能建立图像灰度与目标辐亮度、光学系统的光圈数、探测器的积分时间和增益之间的函数关系式。研制的光学成像系统,在使用过程中,光圈数恒定不变,探测器的增益也始终不变,因此,在辐亮度标定过程中,只需建立图像灰度与目标辐亮度和探测器的积分时间之间的函数关系。

光学系统辐亮度标定装置如图 2 所示。标定设备主要由积分球光源、光谱辐射计、计算机等组成。在标定过程中,调节积分球光源的功率和光阑开口尺寸,使其输出不同的辐亮度值,利用光谱辐射计实时测量积分球光源输出的辐亮度值 L ,同时,记录光学系统的探测器在不同积分时间 t 时的图像灰度值 G ,采集大量实验数据,利用最小二乘拟合法,可以得到紫外、可见光和近红外三个波段的辐亮度定标方程:

$$L_{UV} = 0.9862 \frac{G - 9.0058}{0.1984t} + 0.1909, \quad (10)$$

$$L_{VIS} = 0.9914 \frac{G - 9.7736}{1.9376t} + 0.0193, \quad (11)$$

$$L_{NIR} = 0.9893 \frac{G - 1.9839}{0.7776t} + 0.0495, \quad (12)$$

(10)~(12)式中 L_{UV} , L_{VIS} , L_{NIR} 分别是紫外、可见光和近红外波段的辐亮度。式中辐亮度 L 的单位是 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$,积分时间 t 的单位是 ms,取值范围是 0~64 ms,图像灰度 G 取值范围是 0~255。

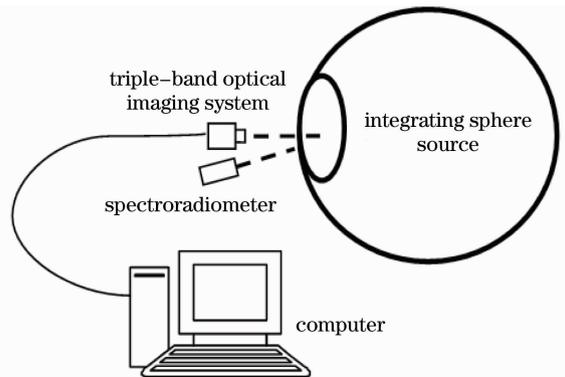


图 2 辐亮度标定实验装置

Fig. 2 Experimental facility of radiance calibration

4 辐亮度系数测量室外实验

2013年9月12日在单位院内,利用上述三波段光学成像系统对草地的辐亮度系数进行测量,测量时间为下午15:00~16:15,测量时天气晴朗,天空无云彩遮挡。测量过程中,三波段光学成像系统放置在20 m高的楼顶上,此光学系统与被测目标之间的距离大约为300 m,在被测目标附近放置4块漫反射板,在所拍图像中,从左至右,其辐亮度系数依次为:0.1,0.2,0.5和0.99。实拍图像如图3、图4和图5所示,图3是紫外波段图像,图4是可见光波段图像,图5是近红外波段图像。



图3 绿草地紫外波段辐亮度系数测量

Fig. 3 Measurement of radiance factor of green grass in the band of ultraviolet

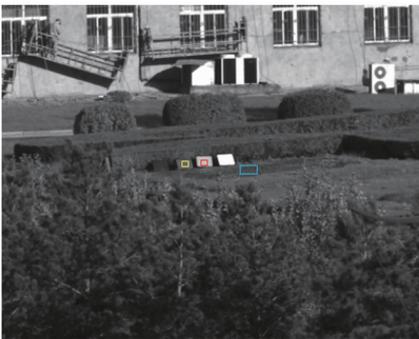


图4 绿草地可见光波段辐亮度系数测量

Fig. 4 Measurement of radiance factor of green grass in the band of visible

根据(9)式,只需两块漫反射板,就能消除大气衰减和天空背景亮度对辐亮度系数测量精度的影响,而在实际测量过程中,使用了4块不同辐亮度系数的漫反射板,主要原因是:草地在紫外、可见光和近红外波段的辐亮度系数差别很大,为了减小测量误差,应该避免目标和漫反射板的图像灰度值太低和接近饱和的情况,对不同的波段进行测量时,选用不同的漫反射板。例如:草地的紫外波段辐亮度系数测量时,选用辐亮度系数为0.1和0.2的漫反射板;草地的可见光波段辐亮度系数测量时,选用辐亮



图5 绿草地近红外波段辐亮度系数测量

Fig. 5 Measurement of radiance factor of green grass in the band of near infrared

度系数为0.2和0.5的漫反射板;草地的近红外波段辐亮度系数测量时,选用辐亮度系数为0.5和0.99的漫反射板。

在测量过程中,三波段光学成像系统能同时保存被测目标和漫反射板的三个波段的图像,在图像中,选择被测目标区域和漫反射板区域,可以得到被选区域的平均灰度值,将这些灰度值和相机的积分时间分别代入(10)~(12)式中,计算得到被测目标和漫反射板三个波段的辐亮度值,再将此辐亮度值和漫反射板的辐亮度系数代入(9)式,即可计算出被测目标的辐亮度系数。

利用以上测量方法,对绿草地进行三波段辐亮度系数测量,结果如表2所示,经三次测量取平均值,得到绿草地的紫外、可见光和近红外波段辐亮度系数分别是0.070、0.184和0.429。

表2 绿草地的三波段辐亮度系数测量结果

Table 2 Results of radiance factor of green grass in three bands

Bands	Radiance factor			
	No. 1	No. 2	No. 3	Average
Ultraviolet	0.068	0.073	0.069	0.070
Visible	0.186	0.172	0.193	0.184
Near Infrared	0.441	0.418	0.427	0.429

5 结 论

从理论上分析了目标辐亮度系数测量方法,提出以两块不同辐亮度系数的漫反射板作为参照物,在目标辐亮度系数表达式中,不包含大气透射率和天空背景亮度,因此,无需测量大气参数,即可测量得到地物目标的辐亮度系数。使用自行研制的经过辐亮度标定的三波段光学成像系统,于2013年9月12日对草地的辐亮度系数进行测量,得到草地的紫外、可见光和近红外波段的辐亮度系数分别为

0.070、0.184 和 0.429。

参 考 文 献

- 1 Li Bo, Sun Chongshang, Tian Dapeng, *et al.*. Developments of foreign airborne reconnaissance camera [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2013, (2): 24–27.
李 波, 孙崇尚, 田大鹏, 等. 国外航空侦察相机的发展情况 [J]. *现代科学仪器*, 2013, (2): 24–27.
- 2 Xu Hong, Wang Xiangjun. Application of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13–17.
许 洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 13–17.
- 3 Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.*. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, (4): 117–128.
高海亮, 顾行发, 余 涛, 等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展 [J]. *遥感信息*, 2010, (4): 117–128.
- 4 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1178–1182.
张己化, 姚东升, 谈 斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析 [J]. *光学学报*, 2008, 28(6): 1178–1182.
- 5 G Themelis, J S Yoo, V Ntziachristos. Multispectral imaging using multiple-bandpass filters [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(9): 1023–1025.
- 6 S Way, R Kerr, J Imamura, *et al.*. Design and testing of a dual band enhanced vision system [C]. *SPIE*, 2003, 5074: 612–619.
- 7 He Yinghong, Ma Zhen, Zhao Baochang, *et al.*. Optical system design of space sensor with two long focal length lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3027–3033.
贺应红, 马 臻, 赵葆常, 等. 实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 3027–3033.
- 8 Xue Qingsheng. Optical design of spaceborne low-distortion and super-wide-angle Gerosol imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 41(1): 15–20.
薛庆生. 星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计 [J]. *光子学报*, 2012, 41(1): 15–20.
- 9 Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.*. Radiometric calibration and validation of CCD cameras on HJ-1 satellite [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(5): 682–688.
巩 慧, 田国良, 余 涛, 等. HJ-1 星 CCD 相机场地辐射定标与真实性检验研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(5): 682–688.
- 10 Xu Bo, Huang Yinbo, Fan Chengyu, *et al.*. Calculation of equivalent absorption coefficient of uniformly mixed hygroscopic aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0101001.
徐 博, 黄印博, 范承玉, 等. 吸湿性均匀混合气溶胶粒子等效吸收系数计算分析 [J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0101001.
- 11 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 12 Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by one internal-mixed model for aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0629001.
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种内混合气溶胶粒子模型光散射的等效性 [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0629001.
- 13 Jin Weiqi, Hu Weijie. *Radiometry, Photometry, Chroma and Measurements* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011. 109–110.
金伟其, 胡威捷. *辐射度、光度与色度及其测量* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011. 109–110.

栏目编辑：张浩佳