

文章编号 1004-924X(2013)04-0870-06

小视场绝对辐射计视场测量及修正项计算

杨振岭, 方伟*, 王凯, 姜明, 宋宝奇

(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:风云三号 A 星和 B 星上搭载的太阳辐射监测仪由于视场较大而引入较多不确定因素, 因此风云三号 C 星太阳辐射监测仪采用小视场绝对辐射计来跟踪太阳测量。本文研究了小视场绝对辐射计视场带来的修正因素。计算了 C 星太阳辐射监测仪由视场光阑和主光阑确定的视场大小; 基于此视场计算值, 给出了仪器辐照度测量值随光源入射角变化的理论曲线; 并且利用实验室搭建的视场测量装置, 对此变化曲线进行了实际测量。结果表明, 测量曲线与理论曲线的相对偏差平均为 1%~2%, 接近测量装置的极限精度, 从而验证了视场计算值的准确性。利用计算视场评价了在轨测量时辐射计与冷空间背景的辐射交换修正项, 结果显示, 小视场会对太阳辐射测量产生 2.023 W/m^2 的冷空间背景修正, 相对太阳辐照度测量精度要求, 修正项计算标准差可以忽略。

关键词: 太阳辐射监测仪; 绝对辐射计; 视场测量; 辐射交换

中图分类号: V443.5; TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0870

Field of view measurement and correction term calculation for small-field radiometer

YANG Zhen-ling, FANG Wei*, WANG Kai, JIANG Ming, SONG Bao-qi

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

* Corresponding author, E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

Abstract: Solar Irradiance Monitor (SIM) on the FY-3C satellite was designed to be a Small-field-of-view Radiometer (SFoV-R) with a precise solar pointing system to decrease the measurement uncertainty derived from the wide field-of-view of SIM on FY-3A and FY-3B satellites. To obtain the measurement uncertainty derived from the SFoV-R, the field-of-view of SFoV-R on FY-3C satellite determined by a view-limiting aperture and a precision aperture was calculated. Based on this field-of-view, a theoretical change curve of the measured irradiance incidence angle was achieved. Then, an actual measurement of the change curves was performed. The result indicates that the relative deviation on an average between the theoretical and measured change curves is 1%–2%, which is close to the limit accuracy of the measuring installation and proves the veracity of the calculated values for field-of-view. The correction term of radiation exchange between space and the radiometer is estimated to be 2.023 W/m^2 based on the calculated field-of-view. Experiments show that the standard deviation of

收稿日期: 2012-11-12; 修订日期: 2013-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61077080)

this correction term can be neglected compared to the requirement of solar irradiance measurement accuracy.

Key words: solar irradiance monitor; absolute radiometer; field-of-view measurement; radiation exchange

1 引言

风云三号 A 星和 B 星上搭载的太阳辐射监测仪^[1],由 3 台相同的太阳辐照度绝对辐射计^[2-3](Solar Irradiance Absolute Radiometer, SIAR)扇形排列组成,它不跟踪太阳,而是在太阳经过辐射计视场时进行测量,所以每台 SIAR 的无遮拦视场较大。这种宽视场扫描式的测量模式省去了二维太阳跟踪系统,减小了仪器的体积、质量和功耗,提高了可靠性;但是宽视场会给诸如太空背景辐射交换^[4]、光源不同入射角带来的杂散光^[5]以及入射角变化时辐射计的响应^[6]等修正项带来更多的不确定因素,因此,风云三号 C 星太阳辐射监测仪采用小视场绝对辐射计来跟踪太阳测量。该绝对辐射计的设计指标为 ±1.5° 的无遮拦视场,并由二维太阳精确指向系统保证测量时太阳光始终沿着辐射计的光轴方向入射。为了研究小视场绝对辐射计视场带来的修正因素,本文首先根据设计参数,计算了 C 星太阳辐射监测仪的视场,给出了仪器辐照度测量值随光源入射角度变化的理论曲线;然后设计了视场测量方案,并实际测量了不同光源入射角度时仪器辐照度测量的响应曲线,评价了测量曲线和理论曲线的符合程度,验证了计算视场的准确性;最后根据设计值和实际测量情况,计算了辐射计视场带来的修正项。

2 小视场绝对辐射计视场设计

绝对辐射计视场是由主光阑和视场光阑共同确定的,风云三号 C 星太阳辐射监测仪的小视场绝对辐射计的前端光阑结构如图 1 所示。它由视场光阑、主光阑以及二者之间的 4 块消杂光光阑组成,消杂光光阑的设计不影响辐射计视场。主光阑精密孔径为 d ,视场光阑孔径为 D ,二者间距为 L ,根据图 1 定义 3 个半视场角 θ_1, θ_2 和 θ_3 ,分别为:

$$\theta_1 = \arctan \left[\frac{D+d}{2L} \right], \quad (1)$$

$$\theta_2 = \arctan \left[\frac{D}{2L} \right], \quad (2)$$

$$\theta_3 = \arctan \left[\frac{D-d}{2L} \right], \quad (3)$$

其中: $2\theta_1$ 为辐射计全视场,即太阳光斑在此角度入射时刚刚开始进入接收腔; $2\theta_2$ 为半强度视场,即太阳光斑在此角度入射时被遮挡一半; $2\theta_3$ 为无遮拦视场,即太阳光斑在此角度入射时会全部进入接收腔。

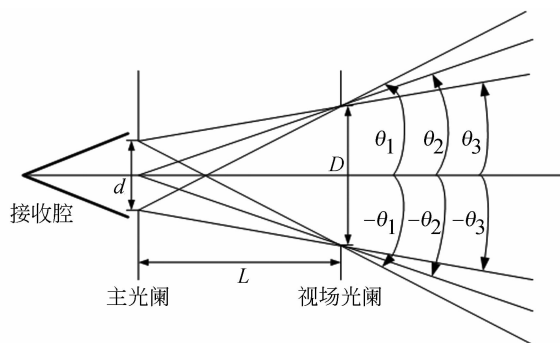


图 1 小视场绝对辐射计前端光阑结构示意图
Fig. 1 Framework of optical stop of FY-3C radiometer

当太阳从辐射计视场 $-\theta_1 \sim \theta_1$ 越过时,辐射计接收腔接收到的太阳辐射功率的变化是较复杂的函数形式,但是可以近似表示为图 2 所示的梯形^[6-7]。计算出 θ_1, θ_2 和 θ_3 的值即可描绘出辐射计接收的功率随入射角度变化的归一化理论曲线。

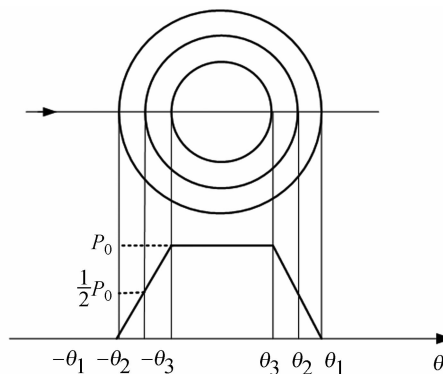


图 2 辐射计视场上的功率变化
Fig. 2 Change of power in field of view of radiometer

由于 C 星太阳辐射监测仪采用的二维指向系统使辐射计始终指向太阳,考虑到 $32'$ 的太阳张角以及为指向系统和卫星运动的角度偏差预留足够的余量,同时最大限度地降低辐射计视场带来的不确定因素,小视场绝对辐射计的无遮拦视场设计为 $\pm 1.5^\circ$ 。限制辐射计视场的主光阑和视场光阑的直径分别为 8 mm 和 13.3 mm,主光阑和视场光阑相距 100 mm。由此可以计算出辐射计视场,分别为:

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{13.3+8}{200} \right) = 6.079^\circ,$$

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{13.3}{200} \right) = 3.805^\circ,$$

$$\theta_3 = \arctan \left(\frac{13.3-8}{200} \right) = 1.518^\circ.$$

主光阑面积是计算辐照度的重要参数,其加工精度要求:圆度为 0.002 mm;视场光阑的直径和两光阑间距的加工极限误差为 0.05 mm,加工误差符合正态分布,极限误差为标准差的 3 倍,因此, $\sigma_D = \sigma_L = 0.017$ mm。由于辐射计视场较小,其视场角的标准差可以近似表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta_1} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \theta_1}{\partial D \sigma_D} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_1}{\partial d \sigma_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_1}{\partial L \sigma_L} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_D}{2L} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_d}{2L} \right)^2 + \left(\frac{(D+d)\sigma_L}{2L^2} \right)^2} = 0.005^\circ, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta_2} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \theta_2}{\partial D \sigma_D} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial L \sigma_L} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_D}{2L} \right)^2 + \left(\frac{D\sigma_L}{2L^2} \right)^2} = 0.005^\circ, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta_3} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \theta_3}{\partial D \sigma_D} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_3}{\partial d \sigma_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_3}{\partial L \sigma_L} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_D}{2L} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_d}{2L} \right)^2 + \left(\frac{(D-d)\sigma_L}{2L^2} \right)^2} = 0.005^\circ. \end{aligned} \quad (6)$$

3 小视场绝对辐射计无遮拦视场测量

实验室搭建了测量绝对辐射计无遮拦视场角的装置。根据图 2 的描述,无遮拦视场角的测量是要描绘出光源在不同角度入射时辐射计测量值的变化曲线。测量装置中光源由太阳模拟器提供,即准直角 0.5° 的模拟太阳光,辐照度为 0.15 个太阳常数,光斑直径为 100 mm,辐照度面的均

匀度为 $\pm 3\%$,辐照度的稳定度为 1%。角度测量由 C 星太阳辐射监测仪二维指向系统中的太阳敏感器实现^[8]。太阳敏感器的安装平面与辐射计的出口平面平行,其光轴与辐射计光轴平行,角度测量误差为 0.006° 。测量装置如图 3 所示。

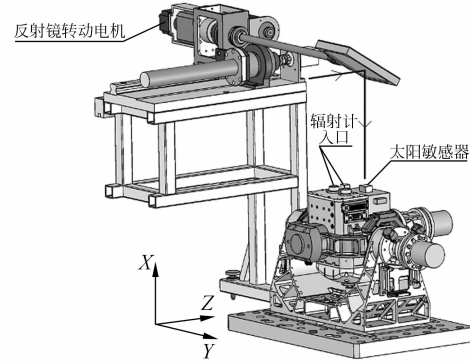


图 3 辐射计视场测量装置示意图

Fig. 3 Schematic of measurement setup for field of view of FY-3C radiometer

C 星太阳辐射监测仪放置在地面上,调节二维转台使辐射计的入口平面水平;放置在水平导轨上的反射镜将太阳模拟器的水平出射光垂直反射到辐射计内。水平导轨上的电机驱动反射镜能够沿 Z 方向运动,反射镜转动电机能够改变反射镜的角度,进而改变反射光入射到辐射计的角度。由于 C 星太阳辐射监测仪辐射计两通道的入口距离太阳敏感器的入口较远,太阳模拟器的出射光斑不能够同时覆盖辐射计入口和太阳敏感器入口,所以在水平导轨上固定两个位置 X_1 和 X_2 。当反射镜位于 X_1 位置时,反射光斑中心照射在太阳敏感器入口处,由太阳敏感器测量入射光角度;然后不改变反射镜的反射角度,将其平移到 X_2 位置处,使辐射计两通道入口位于反射光斑中间,在此入射角度下测量辐照度响应值。

由于 C 星太阳辐射监测仪是由二维指向系统控制辐射计始终指向太阳测量的,指向精度为 $\pm 0.1^\circ$,所以太阳始终在辐射计的无遮拦视场内,视场角的测量主要用于确定辐射计的无遮拦视场内入射角度的变化对辐射计辐照度响应的影响。图 4 给出了归一化的实验测量曲线和由计算值确定的理论曲线,图 5 给出了归一化实验测量值和理论曲线的残差。从图 4 和图 5 可以看出,实验测得的辐射计两通道辐照度响应随入射角度变化

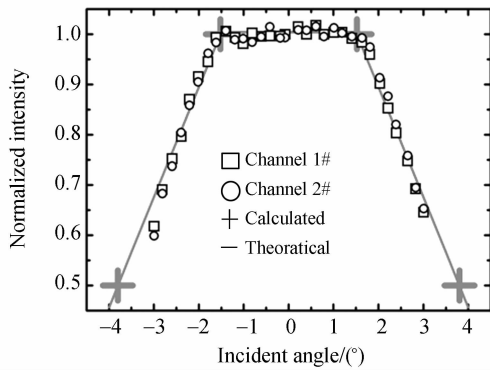


图 4 实验测量值以及由计算值给出的理论曲线
Fig. 4 Experimental and theoretical curves based on calculated field of view

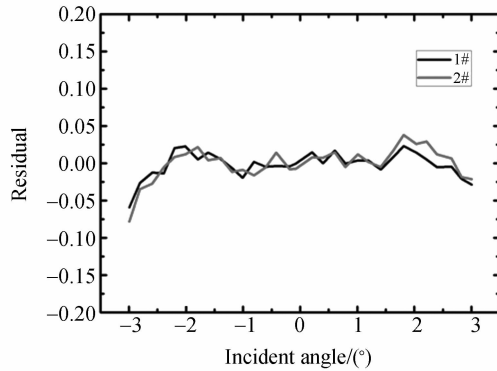


图 5 两通道实验测量值与理论值的残差
Fig. 5 Residual of measured and calculated curves of two channels

的曲线与由计算视场角得到的理论曲线符合较好。在评价实验测量值与理论值的符合程度时, 考察了某一入射角度下归一化的实验测量值 y 相对于理论值 Y 的相对偏差 r , 对于每个测量点有:

$$r_i = \left| \frac{y_i - Y_i}{Y_i} \right| \times 100\% . \quad (7)$$

求对此相对偏差的平均值和标准差, 可得到两个通道的实验测量曲线和理论曲线的相对偏差:

$$r(1\#) = (1.48 \pm 0.31)\% \\ r(2\#) = (1.91 \pm 0.39)\% .$$

实验曲线与理论曲线的相对偏差在 1% ~ 2% 之间, 这说明计算视场是准确可靠的。表 1 给出了无遮拦视场内变化入射光角度测得的两通道辐照度响应。理论上在无遮拦视场内, 辐射计测量的辐照度响应是常数, 然而两通道的实际测量

值均有 1% 左右的相对误差, 其中, 通道 2 的相对误差较大。利用直流稳压电源(安捷伦 N5770A) 为卤钨灯供电, 产生一个高稳定性的辐射光源, 两个通道分别正对光源测量, 以考察两通道的测量重复性, 其重复性均在 0.05% 以下^[9]。由此可以推断, 表 1 中出现的 1% 左右的相对误差是由入射光强度的稳定性带来的。测量时, 由于反射镜的测角位置 X_1 和测辐照度位置 X_2 是固定的, 可以忽略光源面均匀度带来的误差, 所以只剩下太阳模拟器出射光稳定度这一误差来源。表 1 中两通道辐照度测量值的相对误差与太阳模拟器 1% 的出射光稳定度相当, 所以图 4 中实验曲线和理论曲线的相对偏差主要是由太阳模拟器出射光的稳定度带来的, 且接近测量装置的精度极限。

表 1 无遮拦视场内变化入射光角度时两通道辐照度响应
Tab. 1 Irradiance responses of two channels with incidence angle changed within slop angle

测量值	入射光角度 / (°)	1# 通道辐照度 / (W · m ⁻²)	2# 通道辐照度 / (W · m ⁻²)
1	1.410	67.826	66.529
2	1.192	68.658	66.988
3	1.009	68.639	67.686
4	0.791	68.375	66.520
5	0.608	69.566	67.872
6	0.401	68.392	67.349
7	0.212	69.414	67.407
8	-0.075	68.366	66.372
9	-0.183	68.129	66.349
10	-0.418	68.155	67.833
11	-0.608	68.072	66.501
12	-0.808	68.533	65.789
13	-1.009	67.078	66.272
14	-1.192	67.943	66.100
15	-1.393	68.790	67.335
平均值		68.396	66.860
标准差		0.610	0.674
相对误差		0.89%	1.01%

4 辐射计视场带来的修正项计算

为了得到精确的太阳辐照度值, 太阳辐照度绝对辐射计的在轨测量数据需要经过日地平均距离、温度漂移、黑体腔吸收率下降以及视场带来的与冷空间环境的辐射交换、杂散光等修正^[10]。C 星太阳辐射监测仪由二维精密太阳指向系统保证

绝对辐射计始终正对太阳测量,因此可以忽略不同角度观测太阳时视场带来的杂散光影响^[5],其它修正项与文献[10]和文献[11]相同。本文计算了小视场绝对辐射计视场与冷空间环境的辐射交换修正项及其误差,并评价了此修正项及其误差对太阳常数测量精度的贡献。

辐射计视场与太空冷空间背景的辐射交换修正项表示为^[4,10]:

$$E_s = \sigma(T_1^4 - T_s^4) \sin^2 \omega, \quad (8)$$

式中: $\sigma=5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,为玻尔兹曼常数; T_1 为辐射计黑体腔温度; T_s 为冷空间背景温度, $T_s=4 \text{ K}$; ω 为辐射计半强度视场半角。

辐射计黑体腔的工作温度为 300 K,冷空间背景的温度与之相比可以忽略。由于小视场绝对辐射计视场的计算值与实验测量值符合较好,根据视场计算结果计算出 C 星太阳辐射监测仪绝对辐射计视场与冷空间背景辐射交换修正项,为:

$$E_s = 2.023 \text{ W/m}^2.$$

根据误差传递公式:

$$\sigma_{E_s}^2 = \left[\frac{\partial E_s}{\partial T_1} \sigma_{T_1} \right]^2 + \left[\frac{\partial E_s}{\partial \omega} \sigma_{\omega} \right]^2,$$

其中:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_s}{\partial T_1} &= 4\sigma T_1^3 \sin^2 \omega, \\ \frac{\partial E_s}{\partial \omega} &= 2\sigma T_1^4 \sin \omega \cos \omega. \end{aligned} \quad (9)$$

由于黑体腔接收光辐射使温度改变 1 K,使用计算的视场标准差可得到冷空间背景修正的标

准差为:

$$\sigma_{E_s} = 0.027 \text{ W/m}^2.$$

根据采用美国 SORCE 卫星上的太阳辐照度监测仪 TIM^[12]测量的太阳常数 1361 W/m^2 ,此修正项所占比重为 0.15%,修正项标准差对测量精度的贡献为 0.002%。对仪器测量精度而言,此修正项的计算精度是可以忽略的。

5 结 论

根据风云三号 C 星太阳辐射监测仪绝对辐射计视场的设计参数,本文计算了绝对辐射计视场,给出了辐射计测量辐照度随光源入射角度变化的理论曲线,并利用实验室搭建的测试装置,实际测量了辐射计测量辐照度随入射角度的变化。结果表明,实验测量曲线与基于计算视场得到的理论曲线符合较好。根据计算视场,考察了小视场绝对辐射计在轨测量太阳辐照度时视场与太空冷空间背景的辐射交换这一主要修正项。此修正项在太阳辐照度测量中所占比重仅为 0.15%,其计算精度相对于仪器测量精度而言是可以忽略的。

6 致 谢

感谢王玉鹏,叶新,杨东军在风云三号 C 星太阳辐射监测仪项目的研制工作,以及王红睿在在轨太阳模拟测试系统方面的研制工作。

参考文献:

- [1] 方伟,禹秉熙,王玉鹏,等. 太阳辐照绝对辐射计及其在航天器上的绝对辐射测量[J]. 中国光学,2009,2(1):23-28.
FANG W, YU B X, WANG Y P, et al. Solar irradiance absolute radiometers and solar irradiance measurement on spacecraft [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2009, 2(1): 23-28. (in Chinese)
- [2] WANG H R, FANG W. Solar irradiance absolute radiometer with ability of automatic solar tracking [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3):252-258.
- [3] WANG H R, WANG Y P. Spaceborne radiometer for measuring total solar irradiance [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):555-565.
- [4] 禹秉熙,方伟,王玉鹏. 卫星上绝对辐射计观测太阳时与太空的辐射交换[J]. 光学学报,2005,25(8):1048-1052.
YU B X, FANG W, WANG Y P. The radiation exchange between the space and the absolute radiometer along with the solar observation on spacecraft [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(8): 1048-1052. (in Chinese)
- [5] 王玉鹏,方伟,禹秉熙. 宽视场绝对辐射计的杂散光特性[J]. 光学精密工程,2008,16(3):433-437.
WANG Y P, FANG W, YU B X. Stray light characteristics of WFOV absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 433-437. (in Chinese)
- [6] 禹秉熙,方伟,王玉鹏. 卫星宽视场绝对辐射计太阳

- 越过视场时入射光变化与腔温响应函数[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4):353-358.
- YU B X, FANG W, WANG Y P. Radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):353-358. (in chinese)
- [7] 王伟. 太阳辐照度监测仪比对应与校正研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
- WANG W. *Inter-Comparison and Correction of Solar Irradiance Monitor*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [8] 王红睿, 王玉鹏, 方伟. 智能双模式太阳跟踪器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1605-1611.
- WANG H R, WANG Y P, FANG W. Intelligent solar tracker with double modes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1605-1611. (in Chinese).
- [9] 王玉鹏, 方伟, 弓成虎, 等. 双腔互补型绝对辐射计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11):1662-1667.
- WANG Y P, FANG W, GONG CH H, *et al.*. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1662-1667. (in Chinese)
- [10] 方伟. 双腔互补型绝对辐射计[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- FANG W. *Dual Cavity Inter-Compensate Absolute Radiometer (DCICAR)* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [11] 王伟, 方伟, 禹秉熙, 等. FY-3 卫星太阳辐射监测仪星上测量校正因子的研究[J]. 长春理工大学学报, 2003, 26(3):87-91.
- WANG W, FANG W, YU B X, *et al.*. Research on calibrated factors of STIM on FY-3 satellite[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2003, 26(3):87-91. (in Chinese)
- [12] KOPP G, LAWRENCE G, ROTTMAN G. The total irradiance monitor (TIM): science results [J]. *Solar Physics*, 2005, 230:129-139.

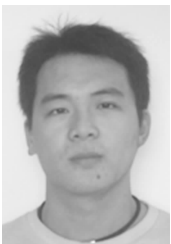
作者简介:



杨振岭(1983—),男,江苏徐州人,助理研究员,2006年,2011年于哈尔滨工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事绝对辐射计、低温辐射计方面的研究。E-mail: yangztl@ciomp. ac. cn



方伟(1965—),女,辽宁朝阳人,博士,研究员,博士生导师,1987年于山东大学获得学士学位,1997年,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事辐射计量及空间光学遥感仪器的研究。E-mail: fangw@ciomp. ac. cn



王凯(1985—),男,山东东阿人,助理研究员,2007年,2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学精密仪器结构的设计工作。E-mail: calerkai@163. com



姜明(1986—),男,黑龙江五常人,研究实习员,2008年,2011年于北京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机械结构的设计工作。E-mail: jiangming8631@126. com



宋宝奇(1985—),男,辽宁抚顺人,研究实习员,2008年,2011年于北京大学分别获得学士、硕士学位,主要从事太阳辐射监测仪电子学软件的设计工作。E-mail: songbaoqipku04@126. com