

文章编号 1004-924X(2010)07-1476-07

# FY-3A 太阳辐射监测仪的程控设计与实现

弓成虎, 方 伟

(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:**介绍了载于 FY-3A 气象卫星用来监测太阳辐照度变化的太阳辐射监测仪(SIM)的工作原理,描述了该监测仪的系统组成和工作模式。SIM 由 3 台相同的太阳辐照绝对辐射计(SIAR)按一定角度排列构成测量三通道,3 个通道可单独或同时进行测量,对获得的数据进行对比、查验和校正。分别介绍了太阳辐射监测仪的 3 种工作模式,即通道自测模式、太阳辐射测量模式和冷空间测量模式,在此基础上对其执行的在轨运行任务进行了分析说明。讨论了程控设计要点与实现,给出了 SIM 采用各测量模式获得的遥感数据。FY-3A 太阳辐射监测仪从 2008 年 6 月开始执行在轨测量,得到的实验结果表明,设计的测量模式合理,运控参数有效,全部软件功能均已实现,测量得到的太阳辐照度与同国际同期卫星 SORCE/TIM 的测量数据在 0.2% 以内相符。

**关键词:** FY-3A 卫星; 太阳辐射监测仪; 太阳辐照绝对辐射计; 程控设计

**中图分类号:** TP311.1; TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1476

## Software design and implementation for solar irradiance monitor on FY-3A satellite

GONG Cheng-hu, FANG Wei

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** The working principle of the Solar Irradiance Monitor (SIM) boarded on FY-3A meteorological satellite for monitoring solar irradiance was introduced and its system construction and working modes were described. The SIM was composed of three solar irradiance absolute radiometers (SIAR). The three SIARs were arranged with a certain angle to form three measuring channels to survey the solar irradiance simultaneously or independently and to compare, prove and correct the data obtained. Three kinds of working modes of the SIM were described, and then the tasks of SIM on-orbit was analyzed in detail. Furthermore, the software design and implementation of SIM were introduced and remote sensing data obtained on orbit with different measurement modes were given. The SIM on FY-3A has been worked normally on orbit from June 2008, and experimental results demonstrate that the measurement modes are reasonable, parameters for control and running are validity, and the task of monitoring solar irradiance are supported by the software functions designed. Moreover, the solar irradiance measured by the SIM is well coincident with that simultaneously measured by SORCE/TIM

收稿日期: 2010-03-18; 修订日期: 2010-06-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40675083)

in 0.2%.

**Key words:** FY-3A satellite; Solar Irradiance Monitor(SIM); Solar Irradiance Absolute Radiometer (SIAR); software design

### 1 引 言

2008 年 5 月 27 日,我国第二代极轨气象卫星风云三号首发星(FY-3A 星)成功发射。2008 年 6 月 4 日,FY-3A 星携带的我国自主研发的太阳辐射监测仪(SIM)<sup>[1-4]</sup> 开机,进入正常工作状态。太阳辐射监测仪主要任务是长期监测太阳辐射照度的变化,为气候变化研究提供精确的太阳辐射资料。SIM 投入在轨应用,形成太阳辐射照度产品,从根本上改变了我国太阳辐射测量和研究的现状。

SIM 由 3 台相同的太阳辐射绝对辐射计(Solar Irradiance Absolute Radiometer, SIAR)<sup>[5-7]</sup> 按一定角度排列构成其三通道,在卫星上 3 台 SIAR 朝着飞行方向安装,在卫星从地球阴影飞出的北极附近,辐射计在太阳扫过其视场的时间内进行太阳辐射照度测量<sup>[8-9]</sup>。3 台 SIAR 中 2 台进行例行测试,另 1 台定期同另 2 台同时测量,以便对长期工作的两通道进行稳定性考核。当 3 台 SIAR 视场相互重叠时,可同时进行太阳辐射照度测量,对数据进行比对、查验、校正,考核仪器的稳定性,便于对太阳辐射照度及其变化进行长期测量监视。

SIAR 是双锥腔补偿型绝对辐射计,其工作原理是利用光电等效性,用可精确测量的电功率标定未知的人射光辐射功率<sup>[5]</sup>。该辐射计 2 次参加国际日射计比对,已达到世界同类仪器先进水平,SIAR-2a、SIAR-2b 置于瑞士世界(辐射)标准组 WSG 上,与 WSG 仪器同步测试 6 年,长期稳定性良好。SIAR 在神舟三号飞船上进行了 5 个月的飞行实验,目前作为风云三号气象卫星的有效载荷已在轨工作 1 年多,获得的数据与国际上同期卫星测得的数据符合良好<sup>[7]</sup>。

针对 SIM 在轨模式而设计的太阳辐射监测仪测控及通讯软件的主要任务包括:测量、数据源包下传及运行参数修改等,根据星载仪器的工作模式,其软件在设计上具有智能测量、自动容错等特点,尽可能降低了人工干预的频度。

本文主要描述 FY-3A 太阳辐射监测仪工作模式、程控软件设计与实现,并给出了在轨验证结果。

### 2 工作原理及测量模式

#### 2.1 工作原理

SIM 工作原理框图如图 1。SIM 的 3 台 SIAR 各自配有放大器和快门电机驱动电路,加热腔的电路也设计成 3 套相对独立的部分,数据采集、电校准、数据处理与控制、通讯等电路为 1 套电路,用开关来选择相应的绝对辐射计进行测量,3 台 SIAR 可同时进行测量或单独测量。

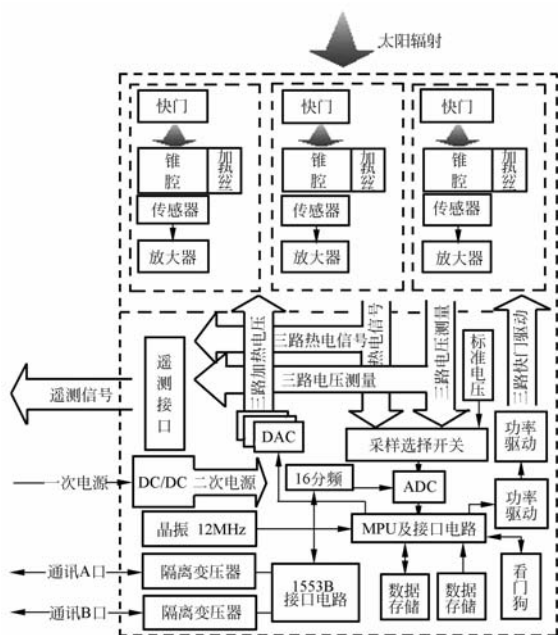


图 1 太阳辐射监测仪系统框图  
Fig. 1 System schematic of SIM

太阳辐射监测仪采用 LM199 作为基准电压源,每个测量模式的每个测量阶段的采样值都要与基准电压源的采样值进行比对,以得到准确的采样电压值来标定不同阶段所加的电功率。

#### 2.2 工作模式

太阳辐射监测仪主要工作模式有 3 种:通道

自测试模式、太阳辐射测量模式及冷空间测量模式。

### 2.2.1 通道自测试模式

仪器加电后经初始化预热即按照固化程序设置同时进行 3 个通道的自测试,也可根据需要通过对数据注入或内部指令启动某通道的自测试,目的是计算出各个通道的灵敏度,判断仪器工作是否正常。通道自测试流程见图 2,快门始终处于关闭状态。

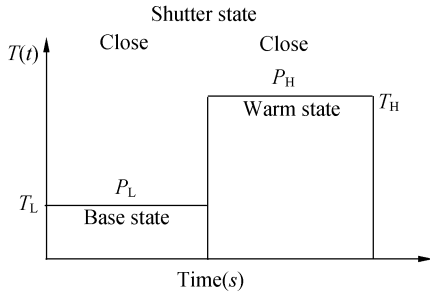


图 2 自测试模式

Fig. 2 Self test mode

偏置阶段:加 1 个较低的偏置电压  $V_L$ ,则

$$V_L = \frac{D_L(V)}{D_S(V)} \cdot V_S, \quad (1)$$

$$P_L = \frac{V_L^2}{R}, \quad (2)$$

式中: $D_L(V)$ 为加偏置电压  $V_L$  时的电压采样值, $D_S(V)$ 为基准电压采样值。

热保持阶段:加 1 个较高的热保持电压  $V_H$ ,则

$$V_H = \frac{D_H(V)}{D_S(V)} \cdot V_S, \quad (3)$$

$$P_H = \frac{V_H^2}{R}, \quad (4)$$

式中: $D_H(V)$ 为加热保持电压  $V_H$  时的电压采样值。

然后计算得到响应度,

$$S = \frac{P_H - P_L}{T_H(t_m) - T_L(t_m)}, \quad (5)$$

式中: $T_H(t)$ 为加热保持电压  $V_H$  时的热电输出采样数组, $T_H(t_m)$ 为加热保持电压  $V_H$  时的热电输出稳定值, $T_L(t)$ 为加偏置电压  $V_L$  时的热电输出采样数组, $T_L(t_m)$ 为加偏置电压  $V_L$  时的热电输出稳定值。

### 2.2.2 冷空间测量模式

要获得准确的太阳辐照度  $E_S$ ,在用电定标得

到的功率  $E_{S_1} = P_e/A$  以外还得加  $E_c = \sigma(T_1^4 - T_S^4) \sin^2 \omega$ ,也就是辐射计快门和冷空间  $T_S = 4K$  之间的辐射交换<sup>[10]</sup>。这是绝对辐射计视场内除了  $32''$  的太阳光斑以外  $4K$  冷空间辐射被辐射计接收的“负辐射”,即腔向冷空间的辐射。冷空间测量可根据需要通过数据注入或内部指令启动某通道的冷空间测量模式。

冷空间测量模式见图 3。

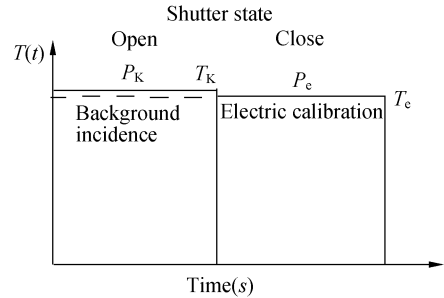


图 3 冷空间测量模式

Fig. 3 Background test mode

冷空间观测阶段:快门开启,加电压  $V_K$ ,

$$V_K = \frac{D_K(V)}{D_S(V)} \cdot V_S, \quad (6)$$

$$P_K = \frac{V_K^2}{R}, \quad (7)$$

式中: $D_K(V)$ 为加电压  $V_K$  时电压采样值; $D_S(V)$ 为基准电压采样值。

电校准阶段:关闭快门锥腔加  $V_e$  电压进行电跟踪,这时使  $T_e(t_m)$  与  $T_K(t_m)$  接近,跟踪完成后可计算出电定标功率  $P_e$  和响应度  $S$ :

$$V_e = \frac{D_e(V)}{D_S(V)} \cdot V_S, \quad (8)$$

$$P_e = \frac{V_e^2}{R}, \quad (9)$$

$$S = \frac{P_e}{T_e(t_m)}. \quad (10)$$

式中: $D_e(V)$ 为电定标电压采样值, $T_e(t)$ 为电定标热输出采样数组, $T_e(t_m)$ 为电定标热输出稳定值。

最后计算冷空间的辐照度。

$$E_c = \frac{P_e - P_K}{A} - [T_e(t_m) - T_K(t_m)] \cdot S = (T_K(t_m) \cdot$$

$$S - P_K)/A = \left( \frac{T_K(t_m)}{T_e(t_m)} \cdot P_e - P_K \right) / A, \quad (11)$$

式中: $A$ 为光阑面积, $T_K(t)$ 为观测空间背景时热

电输出采样数组;  $T_K(t_m)$  为观测空间背景时热电输出稳定值;

### 2.2.3 太阳辐射测量模式

太阳辐射测量是仪器的主要工作模式,仪器经加电初始化和自测试后 3 个通道进入巡回扫描空间辐射状态,有太阳辐射进入视场即进入该轨道周期的太阳辐射测量。太阳辐射测量模式见图 4。在等待状态,当太阳进入射辐射计视场时自动开始测量。

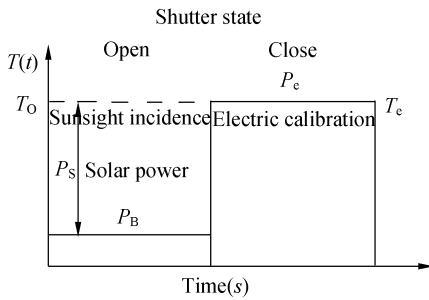


图 4 太阳测量模式  
Fig.4 Solar test mode

观测太阳阶段:入射的太阳辐射功率  $P_s$ ,同时又加了电功率  $P_B$ ,即这时 SIAR 锥腔上加的总功率为  $P_0 = P_s + P_B$ 。

$$V_B = \frac{D_B(V)}{D_S(V)} \cdot V_S, \quad (12)$$

$$P_B = \frac{V_B^2}{R}. \quad (13)$$

式中:  $D_B(V)$  为观测太阳时锥腔加热丝电压的采样值,  $D_S(V)$  为基准电压采样值。

电校准阶段:采样结束后关闭快门锥腔加  $V_e$  电压进行电跟踪,这时使  $T_e(t_m)$  与  $T_0(t_m)$  接近(有微小差别),跟踪完成后可计算出电定标功率  $P_e$  和响应度  $S$ :

$$V_e = \frac{D_e(V)}{D_S(V)} \cdot V_S, \quad (14)$$

$$P_e = \frac{V_e^2}{R} \quad (15)$$

$$S = \frac{P_e}{T_e(t_m)}, \quad (16)$$

式中:  $D_e(V)$  为电定标电压采样值,  $T_e(t)$  为电定标热电输出采样数组,  $T_e(t_m)$  为电定标热电输出稳定值;

最后,可根据以上结果得出太阳辐照度结果。

$$E_s = E_{s_1} - E_e, \quad (17)$$

$$E_{s_1} = \frac{P_e - P_B}{A} - \frac{1}{A} [T_e(t_m) - T_0(t_m)] \cdot s = [T_0(t_m) \cdot S - P_B] / A = \left[ \frac{T_0(t_m)}{T_e(t_m)} P_e - P_B \right] / A, \quad (18)$$

式中:  $A$  为主光阑面积,  $T_0(t)$  为观测太阳时热电输出采样数组,  $T_0(t_m)$  为观测太阳时热电输出稳定值,  $E_e$  为通过注入或内部指令启动冷空间测量得到的空间背景的辐照度值。

## 3 程控设计与实现

### 3.1 运控功能

太阳辐射监测仪测控及通讯软件严格按照软件工程化要求进行研制<sup>[11]</sup>,其运控功能软件的数据流如图 5 所示。总线控制器发送广播时间、数据注入、内部指令给运控软件,运控软件向总线控制器发送服务请求以及数据源包。运控软件在测量过程中先保存测量数据到数据源包缓存区,然后再向总线控制器发送。

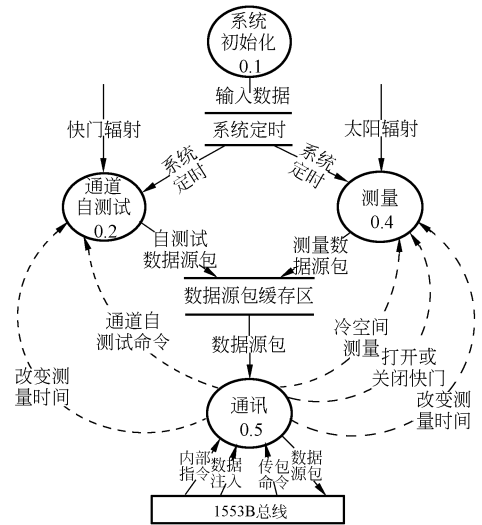


图 5 运控软件数据流图

Fig.5 Data flow chat of operation and control software

运控软件包含两个模块:星上通讯和测量控制,每个模块下含有子模块。星上通讯模块完成与总线控制器进行消息交换,包括接收广播时间、注入内部指令、发送遥感数据。测量控制模块是运控功能实现的执行模块,负责运行参数读取和

校验,各种测量模式的转换、执行及数据保存等。

运控功能软件具有以下特点:

(1)智能测量:处于工作状态的通道巡回扫描空间辐射,每个轨道当太阳辐射进入视场达到测量阈值后自动进行该轨道的太阳辐射测量周期,还可人为选择模式,通过数据注入或内部指令启动某通道的冷空间测量或自测试,增强了在轨测量的灵活性;

(2)自动容错:自动判定数据注入指令内容,采用三选二容错设计,能对其进行校验避免错误注入影响仪器运行。

针对太阳辐射监测仪在轨运控功能进行分析,其主要任务可划分为 3 个方面:测量、数据源包下传及运行参数修改。

### 3.2 数据测量及下传

#### 3.2.1 通道自测试

该模式可通过数据注入或内部指令启动某通道的自测试,工作过程如第 2 章所述,  $T_H(t)$ ,  $T_L(t)$ ,  $D_S(V)$ 。  $S$  等过程和结果数据按格式存入数据源包。

#### 3.2.2 冷空间测量

该模式可通过数据注入或内部指令启动某通道的冷空间测量,工作过程如第 2 章所述,  $T_K(t)$ ,  $T_c(t)$ ,  $D_S(V)$ ,  $E_c$  等过程和结果数据按格式存入数据源包。可在需要时启动某通道的冷空间测量或自测试,在满足测量条件的前提下可灵活掌握注入时间。

#### 3.2.3 太阳辐射测量

卫星出阴影区后,有太阳辐射进入辐射计视场后即进行 1 次太阳辐射测量。工作过程如第 2 章所述,  $T_O(t)$ ,  $T_c(t)$ ,  $D_S(V)$ ,  $E_{S_1}$  等过程数据和结果数据按格式存入数据源包。每轨均可进行一次太阳辐射测量,即每天有 14 次测量周期。

#### 3.2.4 数据下传

每次测量完成后即形成测量数据源包存入数据源包缓存区,并向卫星数管系统发送服务请求,入站后由数传系统顺次下传。

在轨测量的模式信息如表 1。所有保存数据必须有其状态信息(包括测量模式,通道标识,测

量开始时间等),以便数据后续处理。

表 1 太阳辐射监测仪测量模式信息

Tab. 1 Information of SIM measurement mode

测量模式	太阳测量	冷空间测量	自测试
采样间隔/s	5	5	5
采样次数(默认)	72	72	72
跟踪间隔/s	5	5	5
跟踪次数(默认)	60	60	60
每组测量次数每轨	1	1	1
数据量	512 Byte×3	512 Byte×1	512 Byte×1
频度	每轨 1 次	1 个注入 1 次	1 个注入 1 次

### 3.3 模式转换

太阳辐射监测仪在轨运行时的测量模式按照既定的程序执行(工作通道巡回扫描空间入射辐射变化,当有太阳辐射进入视场后即开始太阳辐射测量)。根据需要可由内部指令或数据注入启动某通道的冷空间测量或自测试模式,执行一次后仍按照既定程序执行。如果目标通道正处于测量中时,注入或内部指令选择的模式必须等待当前模式执行完毕才能响应。

### 3.4 运行参数修改

运行参数包括全局性参数和相关模式参数。全局性参数修改包括:测量采样时间的改变,采样时间可在 2~6 min 之间选择,系统默认时间为 6 min。相关模式下参数修改包括:开启或关闭某通道,三个通道中两个长期工作,另一个作为参考通道定时开启。

## 4 在轨测试结果

太阳辐射监测仪入轨后工作正常,指令响应无误,数据接收正确。通过数据注入对运行参数进行了调试,使得仪器正常工作,最终获得了太阳辐照度遥感数据。

图 6 为在轨实测的通道自测试曲线,  $T_H(t)$  为加高电压  $V_H$  时热电输出采样数组,  $T_L(t)$  为加低电压  $V_L$  时热电输出采样数组,从图中曲线可以看出实测与设计预期结果一致,可以证明仪器工作稳定,满足设计要求。

图 7 为在轨单次测量太阳辐照度曲线,  $T_O(t)$  为观测太阳时热电输出采样数组,  $T_c(t)$  为电

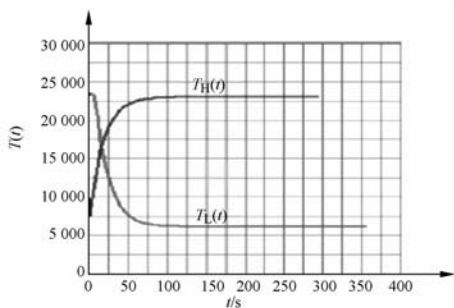


图6 在轨通道自测试曲线

Fig. 6 Single self test by SIM on-orbit

定标热电输出采样数组,经一定时间稳定后与设计预期结果一致,满足设计要求。

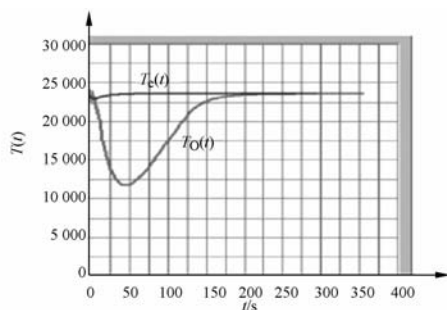


图7 在轨测量太阳辐照度曲线

Fig. 7 Single solar test by SIM on-orbit

图8为在轨测量空间背景图例, $T_K(t)$ 为观测空间背景时热电输出采样数组, $T_e(t)$ 为电定标

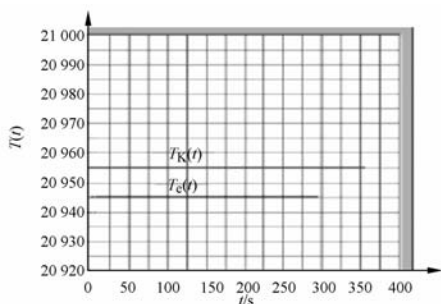


图8 在轨测量空间背景图例

Fig. 8 Single background test by SIM on-orbit

热电输出采样数组,从图中曲线可以看出实测与设计预期结果一致,说明4K冷空间背景辐射十分稳定,测量过程满足设计要求。

图9为在轨测量的太阳辐照度初步处理结果,从图中可看出太阳辐照度测量结果在世界气象组织推荐的 $(1\ 367 \pm 7)\text{ W/m}^2$ 范围之内,满足测量不确定度0.5%的指标要求,同国际同期卫星SORCE/TIM测量数据在0.2%以内相符。

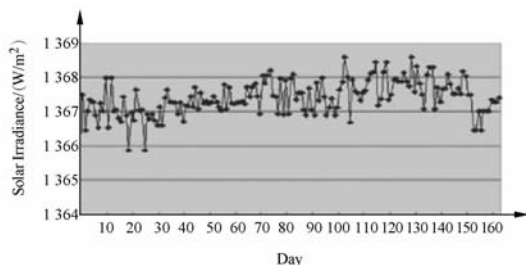


图9 SIM在轨测量太阳辐照度结果

Fig. 9 Solar irradiance measured by SIM in-orbit

## 5 结论

本文介绍了太阳辐射监测仪的工作模式,根据在轨运控任务需求进行了分析,实现了多种测量模式和功能完备的程序设计。FY-3A星太阳辐射监测仪在轨工作正常,测量模式的转换、执行准确,运控参数设置有效,软件功能已全部实现,性能稳定,满足使用要求。得到的遥感数据结果表明程控设计在轨运行正常,太阳辐照度测量结果同国际同期卫星SORCE/TIM测量数据在0.2%以内相符。太阳辐射监测仪软件的设计与实现为在轨太阳辐射监测任务提供了支持与保证。

## 参考文献:

- [1] FANG W, YU B X, YAO H S, *et al.*. Development of STIM[J]. *SPIE*, 2003, 4895: 218-224.
- [2] 徐博明. 气象卫星有效载荷技术[M]. 北京: 宇航出版社.
- XU B M. *Efficiency Load Technology on Weather Satellite* [M]. Beijing: Publishing Company on

Space Navigation. (in Chinese)

- [3] 王伟, 方伟, 禹秉熙, 姚海顺. FY-3卫星太阳辐照度监测仪星上测量校正因子的研究[J]. *长春理工大学学报*, 2003, 16(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, 16(3): 87-91.
- [4] 方伟, 王玉鹏. 紫外辐照对绝对辐射计锥腔吸收率

- 的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 775-780.
- FANG W, WANG Y P. The influence of UV radiation to the absorptivity of cavity of absolute radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 353-358. (in Chinese)
- [5] 方伟, 金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制[J]. 太阳能学报, 1992, 13(3): 406-411.
- FANG W, JIN X F. Development of a compensate dual-conical cavity absolute radiometer [J]. *Acta Energiae Solaris Sinca.*, 1992, 13(3): 406-411. (in Chinese)
- [6] 方伟, 禹秉熙, 姚海顺. 太阳辐照绝对辐射计(SIAR-1)与国际比对[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 112-116.
- FANG W, YU B X, YAO H S. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1): 112-116. (in Chinese)
- [7] 方伟, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. SIARs 及其在航天器上的太阳辐照度测量 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 23-28.
- FANG W, YU B X, WANG Y P, et al.. SIARs and solar irradiance measurement on spacecraft[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(1): 23-28. (in Chinese)
- [8] 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. The 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)
- [9] WANG Y P, FANG W, YU B X. The simulation measurement experiment and calibration for Solar Total Irradiance Monitor on board [J]. *SPIE*, 2006, 6031: 603118-1-6.
- [10] 禹秉熙, 方伟, 王玉鹏. 卫星上绝对辐射计观测太阳时同太空背景的辐射交换[J]. 光学学报, 2005, 25(8): 1048-1052.
- 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]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(8): 1048-1052. (in Chinese)
- [11] 王家华. 软件工程[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2003.
- WANG J H. *Software Engineering* [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2003. (in Chinese)

#### 作者简介:



弓成虎(1972—),男,黑龙江哈尔滨人,副研究员,1995年于长春理工大学获得学士学位,主要从事微弱信号检测及空间遥感技术的研究。E-mail: gongch@163.com

#### 通讯作者:



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