

文章编号: 0253-2239(2003)01-112-05

太阳辐照绝对辐射计与国际比对*

方 伟 禹秉熙 姚海顺 李 哲 弓成虎 金锡峰
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

摘要: 为了测量太阳辐照度和地球辐射, 研制了太阳辐照绝对辐射计(SIAR-1), 对电校准腔型绝对辐射计进行了重要改进, 提高了绝对精度。参加了世界气象组织在瑞士设立的世界辐射中心组织的第九届国际日射计比对, SIAR-1 高于世界辐射基准 0.08%。太阳辐照度监测器(STIM)同 SIAR-1 进行了比对, 结果太阳辐照度监测器三台绝对辐射计之间平均值偏差为 0.11%。SIAR-1 辐射计与太阳辐照度监测器 2 号辐射计在 0.09% 以内符合。结论: 太阳辐照度监测器绝对精度为 0.16%。

关键词: 应用光学; 太阳辐照度; 绝对辐射计; SIAR-1; 国际比对; 太阳辐照度监测器
中图分类号: O432.2 P111.45 文献标识码: A

1 引 言

测量太阳和地球的辐射, 研究地球的辐射收支, 对解释全球气候变迁、天气和环境变化都是十分重要的。测量太阳辐照度还可以换算出太阳常数, 对太阳物理学和高层大气研究都很有意义。

近三十多年来, 为了测量太阳和地球辐射, 利用绝对辐射测量技术, 发展了在空间任何环境下可以以自动遥测方式工作的绝对辐射计, 主要有 ACRs^[1, 2]有源腔型辐射计、PMOs^[3]绝对辐射计、CROMs^[4]等。利用这些仪器在气球、火箭和卫星上进行了多次太阳常数和地球辐射收支测量^[5-7]。

世界气象组织(WMO)在瑞士达沃斯(Davos)设立的世界辐射中心(WRC)建立了世界辐射基准(WRR), 并每五年进行一次国际日射强度计比对(IPC), 查验和定标各国测量辐射仪器的(辐照度)量值标度^[8]。绝对辐射计是电自定标的腔型辐射计, 可以不依赖其它标准就给出测定辐射量[辐照度 W/m^2 , 辐亮度 $W/(m^2 \cdot Sr)$ 或辐通量 W]的绝对量值标度。这种电校准腔型绝对辐射计能够测量电磁波全波长(0.1~100 μm)的辐射, 配置滤光片也可测量各光谱波段的辐射。

太阳辐照绝对辐射计 SIAR-1^[9] (Solar Irradiance Absolute Radiometer)是在空间卫星或地面上, 以自动遥测方式工作的电校准腔型绝对辐射

计。为了提高绝对精度, 对绝对辐射计进行了改进: 1) 把电加热导线埋入锥腔壁里, 使电功率无其它耗散地全部加热腔, 这样电功率与辐射加热腔几乎完全等效; 2) 用无源热电温度传感器代替有源电阻温度传感器, 减少了热抖动。这两点改进提高了绝对精度和稳定性。

SIAR-1 参加 2000 年 9 月至 10 月在瑞士达沃斯世界辐射中心进行的第九届国际日射强度计比对(IPC-IX)^[10], 其绝对精度在 0.08% 以内同世界辐射基准一致, 达到国际最先进水平。太阳辐照度监测器(STIM)^[11-13]由三台与 SIAR-1 相同的绝对辐射计构成, 在实验室内同 SIAR-1 进行了功率比对, 结果太阳辐照度监测器三台绝对辐射计之间平均值偏差为 $\pm 0.11\%$ 。SIAR-1 辐射计与太阳辐照度监测器的 2 号辐射计在 0.09% 以内符合。

2 太阳辐照绝对辐射计 SIAR-1

2.1 结构

太阳辐照度绝对辐射计 SIAR-1 的基本结构如图 1 所示。

接收辐射的探测器件是用电镀工艺特殊制作的薄壁银圆锥腔, 腔内表面涂一薄层镜面反射黑漆, 在锥腔相当于被测辐射照射的区域腔壁里埋入了电加热细导线。在圆锥腔的开口底套进热电堆环, 把两个带热电堆环的圆锥腔(分别称主腔和补偿腔)再套入铝圆筒(热沉)的两端, 使热电堆环的外环同铝筒内壁热接触(但电绝缘)。主腔开口前放了精密加工并测准面积的主光阑。热沉(铝圆筒)延伸顶端安有

* 国家高技术航天领域(863-2)研究成果。

E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2001-12-20; 收到修改稿日期: 2002-03-04

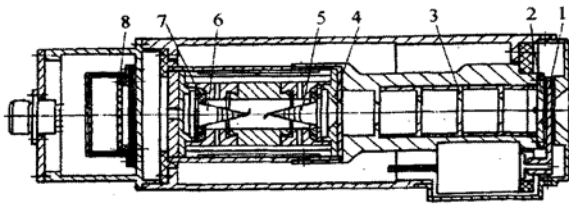


Fig. 1 Diagram of SIAR-1. 1: shutter; 2: field stop; 3: spray stops; 4: primary aperture; 5: primary cavity; 6: secondary cavity; 7: heat-sensitive element; 8: amplifier

视场光阑, 并设置快门。主光阑和视场光阑之间放了几个光阑是为了减少杂散光射入腔内。热沉组件同外壳是绝缘的。

当主腔接收辐射或电加热使锥腔温度升高时, 通过热电堆环上的多对热电偶导线向热沉(铝筒)传热, 锥腔和热沉之间形成恒定温差。这个温差由热电堆的电信号检测出。补偿腔不是被控的, 它不接收辐射也不电加热, 同热沉保持热平衡。其作用是通过补偿腔热电堆引线同主腔热电堆引线反向串联, 补偿热沉温度漂移引起的主腔热电堆输出的漂移。

2.2 测量方式

测量采用交替开、关快门, 使锥腔接收辐射和电加热定标的方法进行。快门打开的接收辐射阶段, 主腔升温, 经过一定时间 t 后, 同热沉达到恒定温差, 热电堆输出稳定的电信号。快门关闭的电定标阶段, 不接收辐射, 在锥腔电阻丝上加电功率, 并调整其大小, 经过同样时间 t 后, 使主腔升温达到与辐射加热相同的温差(即热电堆输出电信号值相等), 用电加热功率(根据加热丝电阻 R 、所加电压 V , 计算出功率 $W = V^2/R$) 定标辐射功率。

电替代定标绝对辐射计的基本物理原理是以接收器上辐射功率热变换和电功率热变换的等效性为基础的, 即

$$P_o = EA\varepsilon, \quad P_e = V^2/R, \quad (1)$$

式中, P_o 为辐射加热功率(W), E 为辐射照度(W/m^2), A 为主光阑面积(m^2), ε 为锥腔吸收率, P_e 为电加热功率(W), R 为锥腔上加热线电阻(Ω), V 为所加电压(V)。根据辐射加热和电加热功率等效性 $P_o = P_e$, 即可定标待测辐射量(照度)

$$E = V^2/(AR\varepsilon), \quad (2)$$

2.3 圆锥腔

锥腔是 30 度角银圆锥腔, 用电铸工艺制造, 开口底直径 $\phi 13$ mm, 壁厚 0.06 mm。锥顶尖延伸

5 mm, 形成内径 0.03 mm 逐步变细的牛角形弯曲光导管, 末端封死, 以避免涂黑时锥尖形成弯月面而增加腔的反射率, 如图 2 所示。

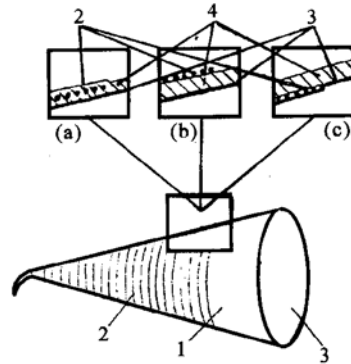


Fig. 2 Diagram of cavity. 1: cavity; 2: heating wires; 3: particular reflecting black paint; 4: silver

腔内表面涂一层很薄的镜反射黑漆。用三种方法实测并在中国测试技术研究院验证的锥腔有效吸收系数为 0.9996~0.9997^[8]。

腔上电加热丝的结构如图 2(a) 所示。在腔壁内相当于辐射照射的区域绕制康铜加热丝。制造过程是用电化学工艺电镀, 银腔壁厚 0.03 mm 时, 双线无感绕制绝缘漆包康铜丝($\phi 0.05$ mm), 然后在其上面再电镀 0.03 mm 厚的银, 使电加热丝全包在腔壁里, 同银腔成为一体。这样, 通过该电阻丝加热的电功率全部加热腔, 无其它热损耗, 同辐射被腔吸收加热的情况等效(需要腔有效吸收率修正)。

在腔上绕制电加热丝有两种传统的方法: 绕在腔壁外表面[如图 2(b)]和腔壁内表面[如图 2(c)], 它们在接收辐射和电加热时热耗散情况的不等效性是明显的。用理论分析或实际测量其不等效性都是困难和复杂的。我们用特殊工艺技术(专利)把电加热丝埋入锥腔壁里, 使辐射和电功率热变换几乎等效, 提高了绝对精度。

2.4 热电温度传感器

图 3 是热电温度传感器及其同锥腔装配示意图。

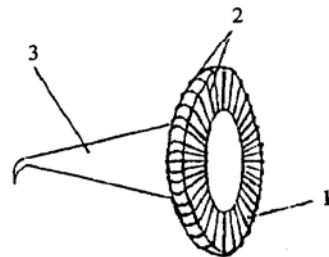


Fig. 3 Diagram of temperature sensing. 1: cirque bracket; 2: thermopile; 3: cavity

在内径 13 mm 的绝缘环上绕制了辐射状排列的 180 对康铜—铜热电堆。其接点一个在内圆(热端),另一个在外圆(冷端)。把锥腔开口底套进热电堆环的内圆,达到热接触。把这一组件套进热沉圆筒里,使热电堆环外圆同热沉接触。

热电堆是无源型温度传感器,同绝对辐射计上常用的有源型电阻温度传感器相比稳定性较高。

3 绝对辐射计精度分析

绝对辐射计是用电替代定标方式测定辐射量值(辐射照度 W/m^2 或辐射通量 W),其标度,是从国际单位制(SI)的七个基本单位之一电流导出的(测量电阻上的电压)。根据绝对辐射计的热力学平衡方程^[1,2],可以推导出辐照度的数学公式,经分析可简化为

$$E = V^2/(A \epsilon R) + \Delta P_{e1}/(A \epsilon), \quad (3)$$

式中 ΔP_{e1} 为观测和电加热阶段主腔从其视场角 FOV_1 接收的辐射差。测量辐照度的不确定度:根据误差公式,最大不确定度为

$$\frac{\partial E(x_i)}{E} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial E(x_i)}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{E(x_i)} \right|$$

标准不确定度为

$$\frac{\sigma E(x_i)}{E} = \left[\sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial E(x_i)}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{E(x_i)} \right|^2 \right]^{1/2}$$

对(3)式微分,最大不确定度为

$$\frac{\partial E}{E} = \frac{\partial A}{A} + \frac{\partial \epsilon}{\epsilon} + \frac{\partial R}{R} + \frac{2\partial V}{V} + \frac{\partial \Delta P_{e1}}{A \epsilon E} + \beta,$$

式中 β 为除(3)式中各项以外,由于光阑衍射、杂散光以及光阑被辐射加热,热膨胀引起的面积(A)变化等产生的不确定度。

主光阑面积 $A = 0.5 \text{ cm}^2$ ($\phi = 8 \text{ mm}$), $\partial A/A = 2.5 \times 10^{-4}$, 腔吸收率 $\epsilon = 0.9996$, $\partial \epsilon/\epsilon = 2 \times 10^{-4}$, 加热丝电阻 $R = 854 \Omega$, $\partial R/R = 1.5 \times 10^{-4}$, 电压 $V = 7.5 \text{ V}$ (用 16 位模-数变换), $2 \partial V/V = 2 \times 10^{-4}$ 。在 SIAR-1 的视场角 $FOV_1, 2\omega = 5^\circ$ 。卫星或地面上测量太阳辐照度可能产生误差最大的情况下,

$$\partial \Delta P_{e1} = 4(\Delta T/T) \Delta P_{e1} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ W}.$$

视场辐射抖动 ($E = 1300 \text{ W/m}^2 = 130 \text{ mW/cm}^2$ 时), $\partial \Delta P_{e1}/(A \epsilon R) = 2 \times 10^{-4}$, β (经计算和分析表明) 小于 5×10^{-4} , 因此最大不确定度 $\partial E/E \leq 1.5 \times 10^{-3}$ 。

标准不确定度 $\sigma E/E \leq 8 \times 10^{-4}$ 。

根据以上分析, SIAR-1 的不确定度可以达到

2×10^{-3} , 即 0.2%。

4 世界辐射基准和国际比对

4.1 世界辐射基准(WRR)

为了统一日射强度计(Pyrheliometer)测量太阳辐照度等辐射的量值标度,1956年曾规定了国际日射强度计标准 IPS56(International Pyrheliometric Scale)。

1974~1975年在瑞士达沃斯物理气象观测站 PMOD (Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos) 设立的世界辐射中心进行了绝对辐射计比对实验,发现 1956 年国际日射强度计标准 IPS56 有系统偏差,并查明了原因。为此重新建立了一个更准确的辐射标准来替代它。当时用十五个参加比对的绝对辐射计确定了新的辐射标准,称为世界辐射基准,1980 年被世界气象组织采纳,同年 7 月开始在全世界作为正式标准实行。世界辐射基准对国际单位制的不确定度为 0.3%,它比 IPS56 值高 2.2%。规定国际日射强度标准 IPS56 时绝对辐射技术尚未发展,因此 IPS56 出现了系统偏差^[14]。

世界辐射基准曾同近年来发展起来的低温辐射计进行两次比对,结果表明:世界辐射基准与低温辐射计符合相当好。因此,世界辐射基准的绝对精度是可信的,至今仍然为辐射测量标准^[8]。

为了保存和传递世界辐射基准的辐照度量值标度,在世界辐射中心用七个绝对辐射计(PMO₂、PMO₅、PAC₃、CROM_{2L}、CROM_{3R}、HF18748、MK67814)建立了世界标准辐射计组,给出每个辐射计的修正系数,使各辐射计的辐射量值读数同世界辐射基准的标度一致,这七个辐射计的长期稳定性是经过考核的,优于 $\pm 0.2\%$ ^[10,14]。

4.2 国际比对

世界气象组织每五年在达沃斯世界辐射中心进行国际日射强度计比对,各国把自己的辐射计拿到达沃斯的世界辐射中心,在晴天同世界标准辐射计组同步跟踪太阳,测量太阳直射光的辐照度,比较同一时刻测量的太阳辐照度值,用该方法查验或定标辐射计的量值标度。

2000年9月25日至10月13日,在瑞士达沃斯世界辐射中心进行了第九届国际日射强度计比对 IPC-IX^[10],82台仪器参加本次国际比对,太阳辐照绝对辐射计(SIAR-1)也参加了这次国际比对。SIAR-1 高于世界辐射基准 0.08%,世界辐射中心给出 SIAR-

1 相对于世界辐射基准的修正系数为 0.9992。

5 太阳辐照度监测器同 SIAR-1 比对

5.1 太阳辐照度监测器结构

我们研制的太阳辐照度监测器结构如图 4 所示。

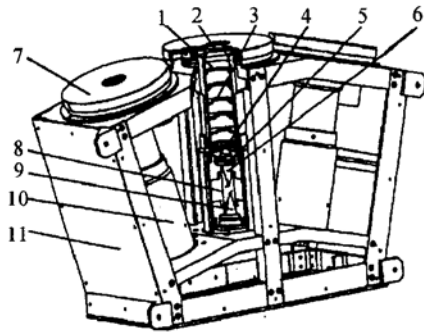


Fig.4 Scale drawing of STIM. 1: field stop; 2: shutter; 3: spray stops; 4: primary aperture; 5: heat-sensitive element; 6: primary cavity; 7: safe case; 8: heat sink; 9: secondary cavity; 10: absolute radiometer; 11: case

我们研制的太阳辐照度监测器由三台相同的半视场角 $\theta = 7.5^\circ$ 的绝对辐射计构成, 三台绝对辐射计呈扇形排布, 中间辐射计轴线同另两个辐射计的轴线成 $\pm 15^\circ$ 。太阳辐照度监测器采用微机控制自动测量。

5.2 比对实验装置

比对实验装置如图 5 所示。

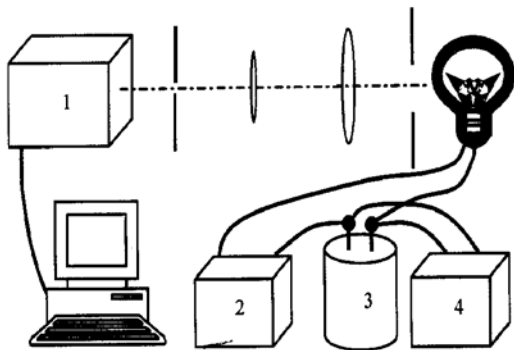


Fig.5 Diagram of comparison experiment. 1: absolute radiometer; 2: regulated power supply; 3: standard resistance; 4: digital multimeter

光源采用 100 W 的卤钨灯, 其电流由大功率稳压源控制, 稳压源电流通过串于电路中的 0.01Ω 标准电阻两端的六位半数字电压表监控, 使稳压源稳定性优于 $\pm 0.03\%$ 。从卤钨灯出射的光线经两个视场限制光阑、小孔光阑、会聚透镜进入要比对的辐射计接收器内。光阑面向光源的一面为经过抛光的亮反射面, 面向辐射计一面为漫反射面。小孔光阑直径 5 mm, 在透镜另一端 150 mm 左右成一边缘清晰

直径约 5 mm 的圆形像斑, 透镜与光阑之间距离可调, 使像斑大小与位置可调。比对时, 把要比对辐射计的主光阑放在像斑处, 使像斑全部落入主光阑内, 且在主光阑中心位置。这样便于不同类型、不同光阑尺寸的辐射计相互之间的比对。

5.3 实验结果

5.3.1 太阳常数监测器的三台绝对辐射计之间的比对

太阳辐照度监测器的三台绝对辐射计测试结果见图 6, 横坐标为测量次序, 纵坐标为测得的功率值, 单位为 mW。

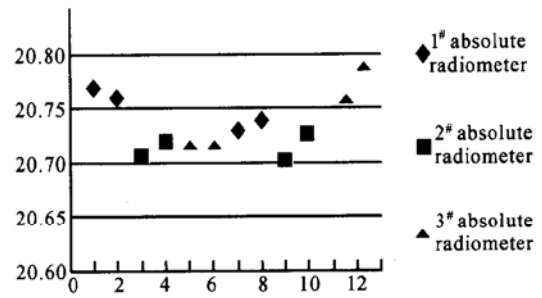


Fig.6 Comparison result between three absolute radiometers of STIM

由图 6 可算出三台之间平均值偏差为 0.11%。

5.3.2 SIAR-1 与太阳辐照度监测器的 2 号绝对辐射计的比对

把 SIAR-1 同太阳辐照度监测器进行了比对, 图 7 为太阳辐照度监测器的 2 号绝对辐射计同 SIAR-1 的比对数据, 单位同图 6。

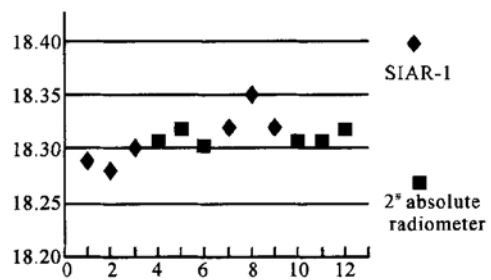


Fig.7 Comparison result between 2nd absolute radiometer of STIM with SIAR-1

由图 7 可算出 SIAR-1 与太阳辐照度监测器的 2nd 辐射计在 0.09% 以内符合。

结论: 太阳辐照度监测器三台绝对辐射计之间平均值偏差为 $\pm 0.11\%$ 。SIAR-1 与太阳辐照度监测器的 2 号辐射计在 0.09% 以内符合。所以可认为太阳辐照度监测器的绝对精度为 $(\sqrt{0.08^2 + 0.11^2 + 0.09^2})\% = 0.16\%$ 。

结束语 太阳辐照绝对辐射计 SIAR-1 制造完成后经过了三年的实验, 考验了它的稳定性, 参加 IPC- IX 国际比对后原样保存, 可作为我国辐射测量的标准。2005 年再参加第十届国际日射强度计比对。

SIAR-1 电加热丝埋入腔壁里的锥腔结构是对绝对辐射计的重要改进, 提高了绝对精度(不确定度)。这是首次参加国际比对就同世界辐射基准一致的主要原因。

由于实验条件的限制, 目前太阳辐照度监测器与 SIAR-1 只进行了功率的比对。我们正在研制大功率的太阳跟踪仪, 准备把 SIAR-1 和太阳辐照度监测器同放在其上, 用太阳光进行辐照度比对。

太阳辐照绝对辐射计也可以用在卫星上测量地球辐射收支。

参 考 文 献

- 1 Willson R C. Active cavity radiometer. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(4): 810~ 817
- 2 Willson R C. Active cavity radiometer type IV. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(2): 179~ 188
- 3 Brus R W. Absolute radiometer (PMO6) and their experimental characterization. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(22): 4173~ 4180
- 4 Crommelynk D. The observation of the solar irradiance and its variations, challenging space metrology. *Solar Physics*, 1981, **74**: 509~ 519
- 5 Mecherikunnel A. A comparative study of solar total irradiance measured by active cavity radiometers. *Metrologia*, 1993, **30**(4): 271~ 273
- 6 Lee III R B. Long-term total solar irradiance variability during sunspot cycle 22. *J. Geophys Res.*, 1995, **100**(2): 1667~ 1675
- 7 Frohlich C. In-flight performance of the VIRGO solar irradiance instruments on SOHO. *Solar Physics*, 1997, **175**: 267~ 286
- 8 Fronlich C. Radiometry at the Rhsikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Center. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(9): 2757~ 2766
- 9 Fang Wei, Jin Xifeng. Development of a compensate dual conical cavity absolute radiometer. *Acta Energiæ Solaris Sinica*(太阳能学报), 1992, **13**(3): 406~ 411 (in Chinese)
- 10 "International Pyrheliometer Comparison IPC- IX 25 September-13 October 2000 Davos, Switzerland Results and Symposium" Working Report No. 197, Metro Swiss, Davos and Zurich, May 2001: 15~ 22
- 11 Fang Wei, Yu Bingxi. A new method of measuring solar constant on polar-orbit satellite. *J. Remote Sensing* (遥感学报), 1997, **1**(4): 241~ 245
- 12 Fang Wei, Yu Bingxi. Easily performed method of solar total irradiance measurement in space. *Proc. SPIE*, 1998, **3501**: 469~ 474
- 13 Fang Wei, Yu Bingxi, Yao Haishun *et al.*. STIM on satellite. The Eleventh National Symposium on Remote Sensing Technology. Haikou, China, May, 1999. 65~ 66
- 14 World Meteorological Organization: Commission for Instruments and Methods of Observation, Abridged Final Report of the Eighth Session, WMO N0590, *Secretariate of the WMO*: 1982, **590**: 10, 71

Solar Irradiance Absolute Radiometer and International Comparison

Fang Wei Yu Bingxi Yao Haishun Li Zhe Gong Chenghu Jin Xifeng
 (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
 The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)
 (Received 20 December 2001; revised 4 March 2002)

Abstract: In order to measure the solar irradiance and the earth radiation, a Solar Irradiance Absolute Radiometer (SIAR-1) is constructed. Two important improvements are made on electro-calibrated cavity absolute radiometer and the absolute accuracy of SIAR-1 is improved. SIAR-1 has completed the international comparison with WRR in WRC, Switzerland during Sept. 25 to Oct. 13 in 2000, the comparison results showed that SIAR-1 is 0.08% higher than WRR. Whereafter, comparison of STIM with SIAR-1 is made. The average standard deviation among three absolute radiometers of STIM is 0.11%, The second absolute radiometer is accordance with SIAR-1 in the range of 0.09%. So it is concluded that the absolute accuracy of STIM is 0.16%.

Key words: applied optics; solar irradiance; absolute radiometer; SIAR-1; international comparison; IPC; STIM