

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.04.008

双通道自校准辐射计与辐亮度标准探测器的 比对实验研究

白米粒^{1,2}, 李健军¹, 高冬阳¹, 胡友勃¹, 谢臣瑜¹, 闫静¹, 郑小兵¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室 安徽 合肥 230031;
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 基于自发参量下转换的高精度自校准辐射基准源是目前卫星遥感定标的研究热点。介绍了双通道自校准辐射计的工作原理并搭建了实验装置, 展开了与传统辐亮度标准探测器的比对实验验证。采用 736.9 nm 激光导入积分球的单色均匀辐亮度光源, 将双通道自校准辐射计和辐亮度标准探测器分别对积分球出口辐亮度进行探测, 测得绝对辐亮度分别为 $4.69 \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{mm}^2)$ 和 $5.19 \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{mm}^2)$, 二者之间的相对偏差为 9.63%, 验证了研制的双通道自校准辐射计的原理可行性。

关键词: 辐射定标; 自校准辐射计; 辐亮度标准探测器; 辐亮度; 相对偏差

中图分类号: TP722.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)04-0296-07

Comparison Experiment of Two-Channel Self-Calibration Radiometer and Radiance Standard Detector

BAI Mil^{1,2}, LI Jianjun¹, GAO Dongyang¹, HU Youbo¹, XIE Chenyu¹,
YAN Jing¹, ZHENG Xiaobing^{1*}

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: High-precision self-calibration radiation reference source based on spontaneous parametric down-conversion is the research hotspot of satellite remote sensing calibration. The principle of two-channel self-calibration radiometer was introduced, and a set of experimental device was established. The experimental

基金项目: Supported by National High Technology Research and Development Program of China (国家 863 计划, 2015AA123702), Director Foundation of Chinese Academy of Sciences (中国科学院院长基金, AGHH201503)

作者简介: 白米粒 (1994 -), 女, 湖北天门人, 研究生, 主要从事高精度光学辐射定标方面的研究。

E-mail: 1154067536@qq.com

导师简介: 郑小兵 (1969 -), 男, 安徽合肥人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学、辐射定标等方面的研究。 **E-mail:** xzbzheng@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-03-07; **修改日期:** 2018-05-07

verification was carried out by comparing with traditional radiometric standard detector. Monochromatic uniform radiance light source with 736.9 nm laser was used by integrating sphere, then the radiance at the outlet of integrating sphere was detected by two-channel self-calibration radiometer and radiance standard detector respectively. The measured absolute radiances results were $4.69 \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{mm}^2)$ and $5.19 \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{mm}^2)$, and the relative deviation was 9.63%. The feasibility of the principle of two-channel self-calibration radiometer was verified.

Key words: radiation calibration; self-calibration radiometer; radiation standard detector; radiance; relative deviation

1 引言

星载超高精度辐射基准源目前不仅已应用于全球资源勘探、全球气候变化观测等方面,也应用到了在轨卫星的定标检验等航空航天方面。在一些特殊的空间遥感应应用领域,例如对全球气候变化的监测,需时刻保持对微小变化的绝对观测精度和长期一致性,辐射基准源作为定标标准对微小偏差进行校准,对绝对辐射定标提出了超高精度和稳定性的要求。受限于辐射基准量值传递的环节误差,现有的可见光~近红外波段有效载荷的绝对精度仅稳定在3%~7%左右,进一步提高精度的潜力非常有限。将空间对地观测的绝对精度提高到3%以内甚至更高,必须研究和应用新型工作体制的辐射基准源技术^[1]。

目前国际上遥感定标技术的发展方向之一是以客观物理效应替代实物标准器,以此降低实物标准器逐级传递时引入的累积误差,保证基准的可复现性和精度。采用自发参量下转换效应^[2-4]研制基于相关光子的双通道自校准辐射计,不依赖外部辐射功率基准,避免了累积误差,可实现绝对辐射观测,且观测结果与衰减损耗无关。

本文开展基于新体制双通道自校准辐射计的研究,搭建了双通道自校准辐射计与辐亮度标准探测器的比对实验装置,通过辐射观测与自校准两种工作模式的切换,开展对双通道自校准辐射计的自身绝对响应度定标和对目标辐亮度的测量^[5-7],完成双通道自校准辐射计与辐亮度标准探测器的比对实验,验证双通道自校准辐射计的绝对测量精度水平。

2 自校准辐射计的工作原理

2.1 自校准原理

双通道自校准辐射计实现自校准是基于自发参量下转换非线性的过程,当一个高能光子作用 I 类非线性晶体时,将以一定的概率分裂成两个不同频率的低能光子,满足能量守恒和动量守恒定律。尽管光子对的产生是随机的,但这两个自发参量下转换光子几乎是同时产生的,如图 1 所示。

该转换过程满足相位匹配条件,即动量守恒和能量守恒条件

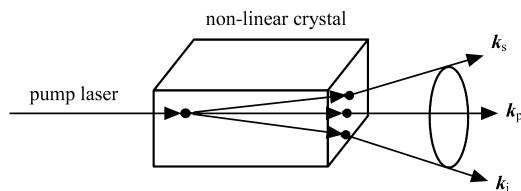


图 1 基于自发参量下转换的相关光子产生示意图

Fig.1 Schematic diagram of correlated photon production based on spontaneous parametric down-conversion

$$k_p = k_s + k_i, \quad (1)$$

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (2)$$

式中 k 为光子波矢, ω 为光子频率, 下标 p, s 和 i 分别表示泵浦光、信号光和空闲光。

泵浦光虽然在转换成信号光和空闲光时没有能量损失, 但光电探测系统在实际运行过程中, 不可避免地发生光电电路的衰变损耗, 其原因可能是色散器件透过率的衰变、电子学放大增益的变化等^[8]。如果用 τ 表示光子传输过程中的损耗系数, 则绝对测量探测器量子效率原理如图 2 所示。

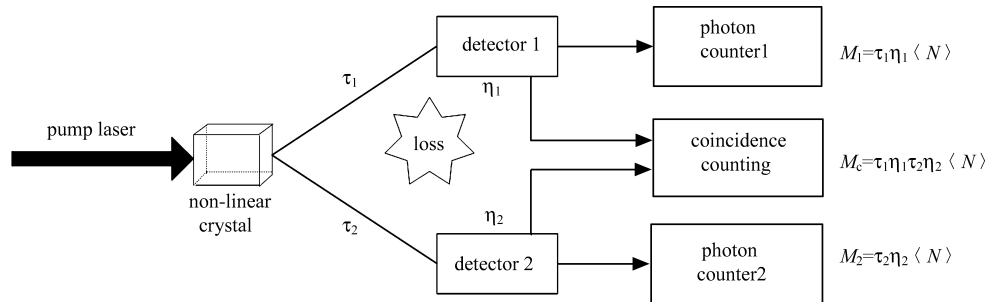


图 2 自发参量下转换双光子绝对测量量子效率原理图

Fig.2 Principle diagram of two-photon absolute quantum efficiency measurement based on spontaneous parametric down-conversion

利用两个单光子探测器分别接收信号光光子和空闲光光子, 将光脉冲转换为电脉冲, 利用光子计数器进行计数, 实现两个通道的光子脉冲计数, 则

$$M_1 = \tau_1 \eta_1 \langle N \rangle, \quad (3)$$

$$M_2 = \tau_2 \eta_2 \langle N \rangle, \quad (4)$$

式中 η 为光电探测器的量子效率, $\langle N \rangle$ 为单位时间内产生的光子对, M 为有效触发计数值, 下标 1 和 2 分别表示 1 通道和 2 通道。

由于光子是成对产生的, 因此在探测器 1 处必定有一个信号光子 (但不一定被探测器 1 记录到), 对于每一次被探测器 2 探测到的事件, 通过符合电路来检测探测器 1 是否探测到相应事件, 符合通道的光电脉冲数目 M_c , 下标 c 表示符合通道, 则

$$M_c = \tau_1 \tau_2 \eta_1 \eta_2 \langle N \rangle. \quad (5)$$

根据式 (3)~(5), 可得到通道 1、2 的量子效率 ε , 分别为

$$\varepsilon_1 = \frac{M_c}{M_2} = \tau_1 \eta_1, \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{M_c}{M_1} = \tau_2 \eta_2. \quad (7)$$

可以看出, 通道的量子效率自动地包含了探测系统的衰变, 这是自校准工作体制的基础和技术特色。无论系统发生怎样的变化, 采用这种体制将始终能够获得准确的、实时的通道量子效率, 这种新方案从原理上解决了以往星上定标难以评估标准器自身变化的技术难题。

2.2 自校准辐射计工作原理

利用自校准工作原理研制出的双通道自校准辐射计的总体设计方案如图 3 所示。

目标观测模式下, 自校准辐射计的工作体制与目前多光谱空间遥感器基本相同, 主要差别在于探测器采用了光子计数型的光电探测器, 其输出的信号脉冲数与有效接收辐射通量关系可表示为

$$N = \frac{\Phi \lambda}{hc} \eta \quad (8)$$

式中 N 为单位时间内单光子探测器输出的信号脉冲数, Φ 为单光子探测器接收的有效辐射通量, λ 为入射波长, η 为单光子探测器的绝对量子效率, h 为普朗克常量, c 表示真空中的光速。

探测器接收的有效辐射通量 Φ 与光路入瞳处的光谱辐亮度, 以及光路中的几何参数的关系可以表示为

$$\Phi = LS\Omega\tau, \quad (9)$$

式中 L 为光路入瞳处的光谱辐亮度, Ω 为光路接收入射光的孔径角, S 为孔径光阑面积。

其中,

$$S\Omega = \pi \frac{r_1^2}{d^2} \pi r_2^2 = \frac{\pi^2 r_1^2 r_2^2}{d^2}, \quad (10)$$

式中 r_1 是孔径光阑的半径, r_2 是视场光阑半径, d 是视场光阑与孔径光阑之间的距离。

由此可推导出入瞳光谱辐亮度 L 与单位时间内探测器输出脉冲数率 N 的关系表达式为

$$L = \frac{N}{\varepsilon} \cdot \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{d^2}{\pi^2 r_1^2 r_2^2}, \quad (11)$$

式 (11) 是自校准辐射计目标观测模式与自校准模式的关系表达式, 给出了入瞳光谱辐亮度与探测器输出脉冲数的对应关系。

3 比对实验方案

3.1 实验设计

如图 4 所示, 利用双通道自校准辐射计与标准辐亮度探测器开展比对实验。比对装置由双通道自校准辐射计、单色均匀辐亮度光源产生装置和辐亮度标准探测器组成。双通道自校准辐射计分成相关光子产生部分和共用部分, 相关光子产生部分由 355 nm 激光器、激光功率稳定器、半波片、G-T 棱镜、非线性共线 BBO 晶体和准直透镜组成, 提供实验要测试的 736.9 nm 和 685 nm 的相关光子。共用部分由分色片、滤光片、聚焦透镜、探测器和光子计数器组成, 通过扫描镜的切换保证辐射测量光路和自校准光路的传输等效。单色均匀辐亮度光源产生装置主要由可调谐激光器及积分球组成, 积分球辐射出均匀的光源进入共用部分。辐亮度标准探测器由 Trap 探测器和辐亮度筒组成, 测量积分球出口辐亮度。

实验时, 自校准模式下, 355 nm 泵浦激光通过光阑、激光功率稳定器 LPC 后稳定功率, 经过半波片、格兰泰勒棱镜对泵浦光进行起偏。再经过光阑和半波片, 半波片用于改变泵浦光的偏振态, 测量背景

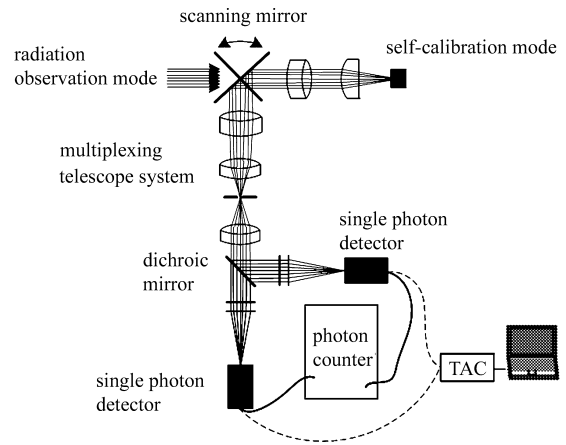


图 3 双通道自校准辐射计总体设计方案

Fig.3 Overall design scheme of two-channel self-calibration radiometer

计数。激光正入射至相位匹配角为 33.1° 的 I 类共线 BBO 晶体中心, 发生自发参量下转换效应, 产生波长为 685 nm 和 736.9 nm 的相关光子对。因波长为 685 nm 的相关光子带宽较窄, 波长为 736.9 nm 的相关光子带宽较宽, 相关光子产生速率较高^[9], 选取 736.9 nm 波长作为本实验的比对波长。BBO 晶体后端面出射的相关光子具有一定的发散角, 经过准直透镜 ($f=100$ mm) 准直平行, 扫描镜转折光路。通过 705 nm 的分色片分离相关光子, 透射端波长为 736.9 nm 作为 1 通道, 反射端波长为 685 nm 光子作为 2 通道。1 通道内, 光子经过 430 nm 的截止滤光片和 737 nm 的带通滤光片, 通过聚焦透镜 ($f=75$ mm) 聚焦在单光子探测器光敏面上。2 通道内, 光子经过 430 nm 的截止滤光片和 658 nm 的带通滤光片, 通过聚焦透镜 ($f=75$ mm) 聚焦在单光子探测器光敏面上。两个探测器都与光子计数器连接, 实时显示单光子探测器接收到的光子脉冲数。

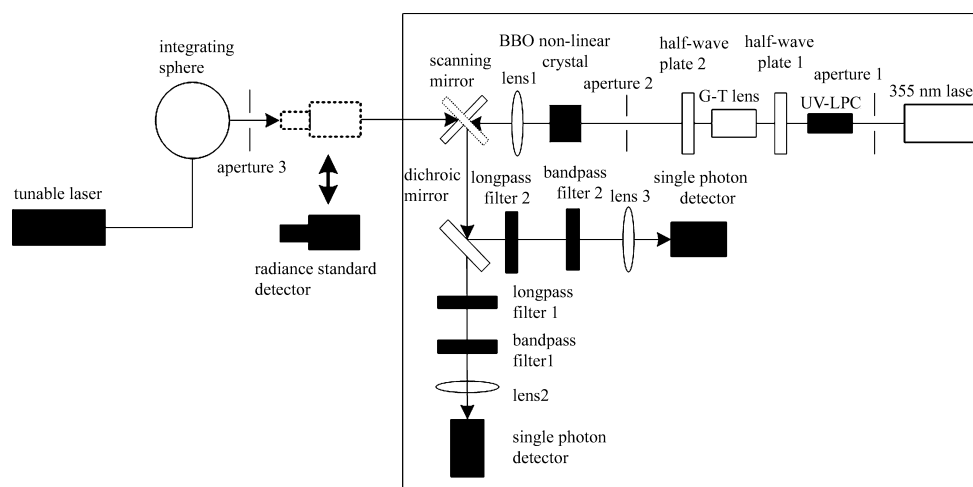


图 4 比对实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of comparison experimental setup

转动扫描镜 90° 切换到辐射观测模式。可调谐钛宝石激光器输出一束波长为 736.9 nm 的单体激光, 入射到消相干积分球内, 可以形成均匀的辐亮度光源, 再进入与自校准模式的复用光路, 获得辐射模式下的输出信号脉冲数 N 后, 在积分球出光口中心处接入辐亮度标准探测器, 测量输出电压。

3.2 实验数据处理方法

首先在自校准模式下, 利用双通自校准辐射计测量在波长 736.9 nm 时通道量子效率 ε , 切换到辐射观测模式下获得该波长下的光子数率 N , 通过式 (11) 建立的数字化光子计数输出量与入瞳输入辐亮度对应关系获得积分球光源辐亮度。

最后将辐亮度标准探测器切换到积分球出光口中心位置, 获得输出电压 V , 辐射观测入射光源的辐亮度与辐亮度标准探测器的辐通量响应的关系表达为^[10]

$$L'(\lambda) = \frac{V}{\pi^2 a^2 c^2} H^2 \frac{1}{R_{\Phi}(\lambda)}, \quad (12)$$

式中, $L'(\lambda)$ 为光源的辐亮度, a 为孔径光阑半径, c 为视场光阑半径, H 为两光阑之间的距离, V 为标准探测器输入电压, $R_{\Phi}(\lambda)$ 为标准探测器的辐通量响应度。

将两种仪器测出的积分球光源辐亮度进行比对, 通过相对偏差评估自校准辐射计的原理可行性。其中, 相对偏差为

$$u = |L - L'|/L'. \quad (13)$$

4 实验结果和分析

4.1 实验结果

双通道自校准辐射计测量的 736.9 nm 波长下的辐亮度具体数据如表 1 所示。

表 1 双通道自校准辐射计测量结果

Table 1 Measurement results of two-channel self-calibration radiometer

Parameter name	Data
Quantum efficiency in 736.9 nm channel	0.550304
Radiation observation count rate	11062813 count/s
Aperture radius	4.1 mm
Field stop radius	90.1 mm
Distance between two apertures	74.9 mm
Measurement of radiance by self-calibration radiometer	$4.69 \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{mm}^2)$

辐亮度标准探测器测量 736.9 nm 波长下的辐亮度具体数据如表 2 所示。

表 2 辐亮度标准探测器测量结果

Table 2 Measurement result of radiance standard detector

Parameter name	Data
Aperture radius	5.190 mm
Field stop radius	2.024 mm
Distance between two apertures	162.018 mm
Output voltage	0.18 V
Gain resistance	$10^9 \Omega$
Radiant flux response	0.5917 A/W
Measurement of radiance by radiation standard detector	$5.19 \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{mm}^2)$

对比在两种模式下对同一单色波长 736.9 nm 测得的绝对辐亮度, 将表 1、2 中的数据代入式 (13), 获得相对偏差 u 为 9.63%。

4.2 实验结果分析

通过比对双通道自校准辐射计和传统的溯源至低温辐射计的辐亮度标准探测器测得的积分球单色辐亮度, 两者相对偏差 u 为 9.63%, 说明了双通道自校准辐射计的原理可行性。

测量结果的误差来源主要有以下三个方面:

1) 自校准模式测量通道量子效率精度不足。由于自校准模式下泵浦杂散光截止效果不理想, 相关光子信号与泵浦杂散光背景的比值仅为 5:1, 背景触发和意外符合计数较大。

2) 双通道自校准辐射计孔径几何参数测量不精确。双通道自校准仪器的孔径光阑半径、视场光阑半径、两光阑之间的距离参数是由实验室直尺测量的, 测量过程中存在误差。

3) 辐亮度标准探测器测量微弱辐亮度光源存在信噪比不足。由于激光导入积分球光源进入标准探测器的光通量较低, 标准探测器产生的光电流为皮安量级, 标准探测器的绝对辐通量响应度是在微瓦量级定标的, 存在大动态范围非线性响应误差^[11]。

5 结 论

在相关光子计数新型体制下,实现了与辐亮度标准探测器的比对实验研究,分别测得 736.9 nm 波长的辐亮度,比对结果显示相对偏差为 9.63%,说明了自校准辐射原理的可行性。并分析了测量结果,对后续利用相关光子计数新体制对遥感定标提供了依据。目前还存在一些问题有待解决,如怎样提高自校准辐射计的通道量子效率测量精度,后续工作将从有效抑制泵浦杂散光,提高意外符合的比值、精确测量自校准辐射计视场光阑和孔径光阑直径等问题入手,进一步提高新型自校准辐射计的辐亮度测量精度。

参考文献:

- [1] Li Zhigang. High Accuracy spectroradiometric standard light source based on detector standard [J]. *China Optics*, 2015, **8**(6): 909-918(in Chinese).
李志刚. 基于探测器标准的高精度光谱辐射标准光源 [J]. *中国光学*, 2015, **8**(6): 909-918.
- [2] Louisell W H, Yariv A, Siegman A E. Quantum fluctuations and noise in parametric processes. [J]. *Physical Review A*, 1961, **124**(6): 1646-1654.
- [3] Hiroshima T, Ishizaka S. Local and nonlocal properties of Werner states [J]. *Physical Review A*, 2000. **62**(4): 044302.
- [4] Shor P W, Smolin J A, Terhal B M. Nonadditivity of bipartite entanglement follows from a conjecture on bound entangled Werner states [J]. *Physical Review Letters*, 2001, **86**(12): 2681-2684.
- [5] Klyshko D N. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1980, **10**(9): 1112-1117.
- [6] Czitzrovszky A, Sengienko A, Jani P, et al. Measurement of quantum efficiency using correlated photon pairs and a single-detector technique [J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 617.
- [7] Lv Liang, Zhang Yinchao, Lin Yandong. Research on absolute calibration of photodetector quantum-efficiency using entangled photons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112004(in Chinese).
吕 亮, 张寅超, 林延东. 纠缠光子法绝对定标光电探测器量子效率的研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0112004.
- [8] Feng Shaohui, Liang Linmei, Tian Chenglin, et al. Simplified method of absolute self-calibration of the quantum efficiency of single-photon detectors [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2004, **10**(4): 176-179(in Chinese).
冯少晖, 梁林梅, 田成林, 等. 单光子探测器量子效率绝对自身标定方案 [J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(4): 176-179.
- [9] Gao Dongyang, Xia Maopeng, Li Jianjun, et al. Measurement of photon count rate based on broad-band parametric down-conversion [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, **10**(6): 482-487(in Chinese).
高冬阳, 夏茂鹏, 李健军, 等. 宽波段参量下转换的相关光子速率分布测量研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2015, **10**(6): 482-487.
- [10] Zou Peng, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, et al. Research on calibration of radiance detector based on trap detector [J]. *Acta optica Sinica*, 2013, **33**(7): 0712002(in Chinese).
邹 鹏, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于陷阱探测器的辐亮度探测器定标方法研究 [J]. *光学学报*, 2013, **33**(7): 0712002.
- [11] Chang Juntao, Wu Ling'an. Absolute self-calibration of the quantum efficiency of single-photon detectors [J]. *Acta Physics Sinica*, 2003, **52**(5): 1132-1136(in Chinese).
常君弢, 吴令安. 单光子探测器量子效率的绝对自身标定方法 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(5): 1132-1136.