

双通道自校准光谱辐射源光电探测效率的定标

高冬阳^{1,2} 胡友勃¹ 刘 岩¹ 郭园园¹ 夏茂鹏¹ 李健军¹ 郑小兵^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所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 230031

摘要 基于相关光子的新定标技术,设计了一种自校准光谱辐射源原理样机,该原理样机兼有自校准和目标观测功能,其中观测通道光电探测效率的精确测量是目标观测精度的有效保证。搭建了两通道自校准光谱辐射源原理样机,通过相关光子定标原理实验测量了观测通道的光电探测效率,其测量不确定度优于0.35%。自校准光谱辐射源能够对观测通道的光电探测效率进行实时自校准,观测通道中的任一光学元件透射率的变化不会影响目标的辐亮度测量精度。在待定标通道探测器之前插入一片衰减片来模拟观测通道光电探测效率的改变,以及自校准光谱辐射源对观测通道衰变的敏感度。通过测量插入衰减片前后的光子计数或者符合计数,计算得到衰减片的实际透射率为20.12%,与插入衰减片前后观测通道光电探测效率20.11%的变化率一致,两者相对偏差优于0.049%。实验结果表明,自校准机制下光谱辐射源能够精确监测观测通道光电探测效率的衰变情况。验证了自校准光谱辐射源设计的合理性与可行性,为后续的多通道自校准光谱辐射源原理样机的研制及辐射定标提供技术基础。

关键词 光谱学; 自校准光谱辐射源; 光电探测效率; 相关光子; 不确定度

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1130001

Photoelectric Detection Efficiency Calibration of Double Channel Self-Calibration Radiation Reference Source

Gao Dongyang^{1,2} Hu Youbo¹ Liu Yan¹ Guo Yuanyuan¹
Xia Maopeng¹ Li Jianjun¹ Zheng Xiaobing^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Based on new calibration technique of photon correlation, a prototype of self-calibration radiation reference source (SRRS) is designed. This prototype combines the self-calibration and observation target function. The precision of observation for target can be guaranteed by accurate measurement of detection efficiency in observation channel. A two-channel self-calibration spectral radiation prototype is established, and the photoelectric detection efficiency of observation channel is measured through the principle of correlated photon calibration. The measurement uncertainty of 0.35% for detection efficiency is obtained. SRRS can realize self-calibration for photoelectric detection efficiency of observation channel. Transmittance changes of any optical element in the observation channel don't affect the measurement accuracy of radiance of the objectives. An attenuator is inserted into the observation channel to simulate the sight path photoelectric detection efficiency changes, so as to verify the sensitivity of calibration spectra from the radiation source on the decay of the observation channel. By measuring the photo count or coincidence count before and after inserting the photon attenuation, the actual transmittance of 20.12% of the attenuator is calculated, and it is in accordance with the change rate (20.11%) of the photoelectric

收稿日期: 2016-04-20; **收到修改稿日期:** 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(11204318,1275173)、国家 863 计划(2015AA123702)

作者简介: 高冬阳(1990—),男,博士研究生,主要从事高精度光学传感器辐射定标技术方面的研究。

E-mail: dyanggao@163.com

导师简介: 郑小兵(1969—),男,博士,研究员,主要从事高精度光学辐射计量方面的研究。

E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn(通信联系人)

detection efficiency for observation channel before and after inserting the attenuator. The relative deviation between the two is less than 0.049%. Experimental results show that the radiation spectrum from the self-calibration mechanism can accurately monitor the decay of observation channel photoelectric detection efficiency. Rationality and feasibility of the SRRS design are preliminarily verified, which provides the technical basis for subsequent multi-channel self-calibration spectral radiation prototype development and calibration of radiation.

Key words spectroscopy; self-calibration radiation reference source; photoelectric detection efficiency; correlated photon; uncertainty

OCIS codes 260.2510; 300.6170; 040.1490; 300.6280; 300.6420

1 引 言

利用传统方法定标卫星传感器的精度通常稳定在 3%~7%^[1],传统方法的特点是保证所有光辐射探测器都可以溯源到共同的基准,但该特点限制了探测器精度的有效提高。另一方面,如果需要进行分光谱的定标,必须精细测量分光器件(单色仪、滤光片等)在其通光波段内的光谱透射率,这也是限制精度提高的一项重要因素。

近三十年来,基于相关光子的新型定标工作机制的研究为提高空间对地观测的绝对精度提供了一种有效的方案,可将精度提升至 3%以内甚至更高^[2-6]。由于相关光子对的纠缠特性,这种定标过程建立在一种在任何时间和地点都可以准确重现的物理过程上,即自发参量下转换过程。该定标过程不依赖于某个标准器,如同长度米,可以依据特定的激光波长进行准确度量(光在真空中 1/299792458 s 的时间间隔内所行路程的长度),而无需像过去一样经过一系列的环节和巴黎的米原尺进行比较。

目前,发达国家的计量部门已经逐步将基于相关光子的定标技术向高精度和工程应用端发展,相关光子的测量不确定度也在逐步降低,2007 年美国国家标准与技术研究院研究表明,相关光子的测量不确定度可以优于 1.8%,与传统方法定标结果相比差异小于 1.4%^[7],然而将高精度的相关光子定标技术工程化和实用化的方案未经报道。中国科学院安徽光学精密机械研究所郑小兵等^[6,8-9],从提高在轨业务卫星的定标绝对精度和定标工程效益角度,以及满足长期气候观测等超高精度的定标需求出发,基于前期技术的积累^[6,8-9]在国际上首次提出一种基于相关光子的自校准光谱辐射源(SRRS)方案,该方案兼有星上标准器和自主观测功能,能够在不依赖于外部基准的条件下,实现绝对辐射观测,且观测结果与载荷衰变无关。SRRS 的最大优势在于不需要对定标装置中的光学分光元件的光谱透射率进行精细测量。

本文在 SRRS 项目的背景下,介绍并搭建了双通道原理样机的自校准光路辐射定标装置,研究基于相关光子的定标技术测量原理样机的自校准光路探测效率及其测量不确定度,并在相关光子绝对定标原理的基础上,提出一种待定标光路中光学元件透射率测量方案。实验测量结果初步验证了自校准光谱辐射源设计的合理性,以及自校准光谱辐射源在原理上的可行性。

2 定标理论

自发参量下转换产生的相关光子对在量子光学计量领域,特别是在单光子探测器量子效率绝对定标方面有着重要的应用,其装置如图 1 所示,其中 SPD 为单光子探测器;DUT 为待测探测器; N 为通道计数,下标 1、2、c 分别代表 1、2 以及符合通道; N_0 代表自发参量下转换产生的光子数。

当触发通道探测到一个光子时,待定标端也会探测到一个与之相关的光子。假设通道的透射率为 τ ,单

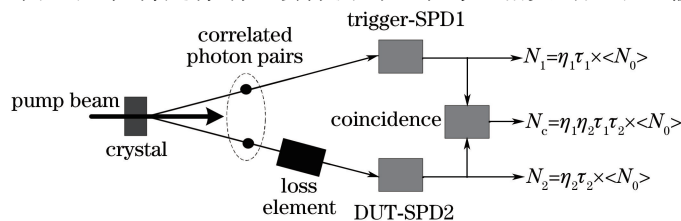


图 1 相关光子定标装置

Fig. 1 Experiment setup of correlated photo calibration

光子探测器量子效率为 η , 出射的相关光子数为 $\langle N_0 \rangle$, 考虑到探测器的暗计数和空间走离背景光引起的计数 N_b , 那么触发通道、DUT 通道以及符合测量输出的光子计数值 N 可表示为

$$\begin{aligned} N_1 &= \eta_1 \tau_1 \langle N_0 \rangle + N_{b1}, \\ N_2 &= \eta_2 \tau_2 \langle N_0 \rangle + N_{b2}, \\ N_c &= \eta_1 \tau_1 \eta_2 \tau_2 \langle N_0 \rangle + N_{ac}. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 N_{ac} 为意外符合计数率。

从(1)式可以看出, DUT 通道的光电探测效率 $\eta_2 \tau_2$ 可以表示为^[10]

$$\eta_2 \tau_2 = \frac{N_c - N_{ac}}{N_1 - N_{b1}}. \quad (2)$$

同时从(1)、(2)式可以看出, DUT 通道中的待测光学损耗元件透射率 T 可以通过测量单光子计数率和符合计数率来获得。这两种方法的计算公式可以分别表示为

$$\begin{aligned} T_{sc} &= \frac{N_2^T - N_{b2}^T}{N_2^0 - N_{b2}^0}, \\ T_{cc} &= \frac{N_c^T - N_{ac}^T}{N_c^0 - N_{ac}^0} \times \frac{N_1^0 - N_{b1}^0}{N_1^T - N_{b1}^T}. \end{aligned} \quad (3)$$

式中, 上标 T, 0 分别代表光路中是否有待测光学元件; 下标 sc 和 cc 分别代表单光子计数方法和符合测量方法; 1 通道是触发通道, 2 通道是待测通道, 待测光学元件放在 2 通道。理想情况下, $T_{sc} = T_{cc}$ 。这两种测量方法获得的透射率结果与待测元件的透射率 T 值大小以及整个通道的探测效率 $\eta\tau$ 无关, 通过实验测量单光子计数率或者符合计数率的变化就能实现透射率的绝对测量。

3 定标实验设计

辐射基准源原理样机的光路设计方案如图 2 所示。它主要由 PUMP 模块、参量下转换 (PDC) 模块、观测与自校准复用光路 (OSO) 模块和多路光子计数 (MPC) 模块等单元构成。PUMP 模块主要提供产生相关光子对的抽运源; PDC 模块主要收集宽波段相关光子, 并将其变成平行光; OSO 模块是原理样机在观测目标和自校准两种工作机制下的复用光路; MPC 模块用于分束的多路光子计数与符合探测。该原理样机的主要功能是实现地物目标的辐亮度绝对观测。在观测目标之前, 通过自发参量下转换产生的相关光子对实现整个通道的探测效率绝对测量。在求得通道的探测效率之后, 45°扫描镜旋转 45°, 这时原理样机工作在目标观测机制下。测量通道的光子计数, 可以实现目标绝对辐亮度的精确测量。该原理样机的优势在于能够实时监测探测通道的衰变, 在测量目标前对通道的探测效率进行一次自校准。设计的工作是针对原理样机的自校准工作机制, 实现通道探测效率的精确测量。根据(2)式, 需要将单光子计数器连接至光子计数和符合探测装置中, 如图 3 所示, 其中 TAC 为时间幅度转换器, SCA 为单通道分析仪, MCA 为多通道分析仪。

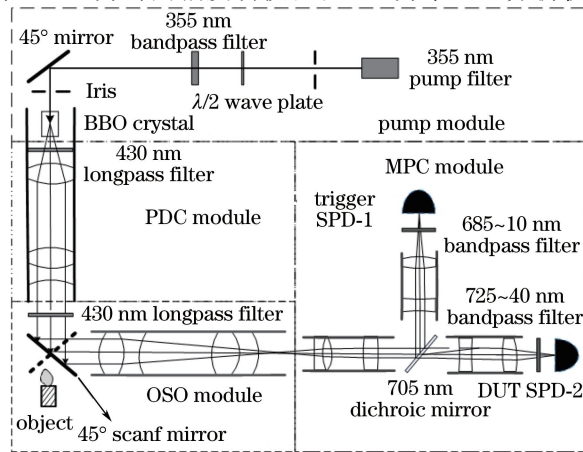


图 2 辐射基准源原理样机的光路设计

Fig. 2 Optical path design of radiation reference source prototype

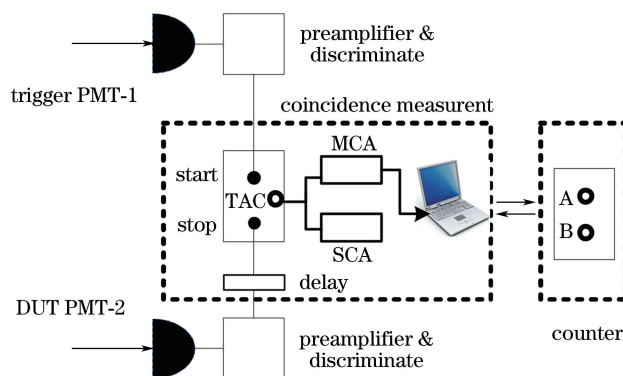


图 3 光子计数及符合探测示意图

Fig. 3 Schematic diagram of photon count and coincidence measurement

实验中,355 nm(1 mW)抽运光经半波片和 355 nm 带通滤光片后正入射至 BBO 晶体(相位匹配角为 37.25° ,尺寸为 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,前表面镀 355 nm 增透膜,后表面镀 450~1000 nm 增透膜)中心,产生 I 类非共线宽波段自发参量下转换过程。其中,半波片用来改变抽运光的偏振方向,测量背景计数率;355 nm 带通滤光片用来消除 532 nm 光。

成对的相关光子经过 PDC 模块、 45° 扫描镜、OSO 模块以及 MPC 模块后分别送至光电倍增管(PMT)探测器光敏面。在触发通道,PMT 前放置 4 mm 光阑、685 nm 带通滤光片以及 355 nm 截止滤光片;在待定标通道,PMT 前放置 725 nm 带通滤光片以及 532 nm 截止滤光片。PMT 输出信号经过前置放大器和甄别器后,输出的晶体管-晶体管逻辑(TTL)电平信号用于符合测量和光子计数。其中,甄别器的甄别阈值依据 PMT 输出的脉冲高度分布特性来确定,设置为 $-500\text{ mV}\sim -5\text{ V}$ 。符合测量系统用于观察相关光子的符合峰和测量符合计数以及光子对的时间间隔,它由延迟器、TAC、SCA、MCA 组成。其中,改变延迟器延迟时间可以测量意外符合计数。多通道计数器可以同步记录触发计数、待定标计数、有效触发计数以及符合计数。

4 分析与讨论

4.1 待定标通道探测效率测量

选择 685 nm 和 736.9 nm 两个波段的相关光子进行符合测量,测量时间均设置为 10 s。实验测量了自校准光路在 736.9 nm 波段的探测效率。待定标延迟 40 ns,观测到的符合曲线如图 4 所示,通过 SCA 的电平调节选择符合峰的全高宽作为符合计数值,测量到的相关计数值如表 1 所示。

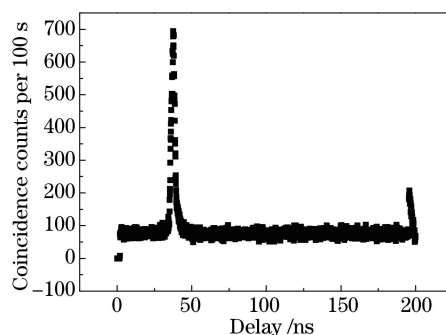


图 4 符合测量曲线

Fig. 4 Coincidence measurement curve

相比传统方法,原理样机的优势是实时监测探测通道的探测效率的衰变。在图 2 所示的待定标通道探测器之前,放置一片吸收型中性密度滤光片(NDF),测量到的光子计数和符合计数如表 2 所示。

表 1 光子计数和符合计数测量值

Table 1 Photon count and coincidence count measurements

Number	Coincidence counts	Valid trigger counts	Accidental coincidence counts	Valid trigger background counts	DUT counts	DUT background counts
1	5321	491749	2820	27369	6615720	558218
2	5161	487952	2909	27092	6624778	555346
3	5303	490150	2873	26978	6599178	553318
4	5278	488099	2868	26872	6580464	556457
5	5178	490424	2885	27090	6582065	556569
6	5200	488924	2903	26805	6574389	556862
7	5274	488561	2814	26859	6590935	557656
8	5264	485855	2795	26774	6610429	556673
9	5099	488617	2768	26833	6586683	557034
10	5267	488946	2771	27110	6609522	558194
Average value	5234.5	488927.7	2840.6	26978.2	6597416.3	556632.7
Standard uncertainty	71.27	1598.76	53.41632	186.73	17039.76	1448.79
Relatively standard uncertainty	0.0136	0.0033	0.0188	0.0069	0.0026	0.0026
Channel detect efficiency $\eta_2 \tau_2$	0.5182%					

表 2 待定标探测器前插入中性密度衰减片后,光子计数和符合计数测量值

Table 2 Photon count and coincidence count measurements after inseting NDF in front of DUT

Number	Coincidence counts	Valid trigger counts	Accidental coincidence counts	Valid trigger background counts	DUT counts	DUT background counts
1	1129	493285	618	26818	1394228	106222
2	1098	491516	576	26829	1393217	105985
3	1127	494637	630	26651	1394697	104656
4	1097	489679	595	26683	1393690	104276
5	1077	489901	572	26584	1401481	104630
6	1075	490411	643	26960	1389623	105563
7	1117	493189	660	26536	1396487	105273
8	1093	494771	607	26612	1396265	104643
9	1084	491884	644	27003	1393375	104350
10	1110	491618	611	26637	1391753	103582
Average value	1100.7	492089.1	615.6	26731.3	1394481.6	104918
Standard uncertainty	19.51	1835.73	29.31	161.57	3176.41	825.15
Relatively standard uncertainty	0.0177	0.0037	0.04761	0.0060	0.0023	0.0079
Channel detect efficiency $\eta_2 \tau_2'$	0.1042%					

由于在待定标 PMT 前放置的带通滤光片带宽可以完全覆盖与触发端光谱匹配的带宽,且 PMT 光敏面为 $6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,能够将相关光子全部接受,因此,在计算通道探测效率时没有考虑非相关的相关光子进入触发通道。表 1、表 2 中给出的通道探测效率是根据(3)式计算的结果,两次测量的通道探测效率的比值 $\sigma(\sigma = \eta_2 \tau_2 / \eta_2 \tau_2')$ 为 20.11%。理论上,该比值 σ 应等于插入的 NDF 透射率值 T 。

为了验证探测效率计算的合理性和有效性,利用(3)式和表 1、表 2 中的数据,对待定标探测器前放置的 NDF 的透射率进行了计算,其中通过待定标光子计数的变化数值计算出来的透射率 T_{sc} 为 21.35%,通过符合计数和有效触发计数的变化数值计算出来的透射率 T_{cc} 为 20.12%。值得注意的是,触发通道的滤光片的带宽为 $\Delta\lambda_1 = 10 \text{ nm}$ (光谱范围为 $670 \sim 680 \text{ nm}$),根据能量守恒定律,待定标端匹配带宽为 $\Delta\lambda_2 = 12 \text{ nm}$ (光谱范围为 $731 \sim 743 \text{ nm}$)。 σ 和 T_{cc} 测量值是指 NDF 在 $\Delta\lambda_2$ 带宽内的平均透射率, T_{sc} 值是指带通滤光片的全谱段光谱范围为 $705 \sim 745 \text{ nm}$ 的平均透射率。这正是 σ 和 T_{cc} 测量值非常接近(相对偏差优于 0.49%),而 T_{sc} 与 σ 和 T_{cc} 具有较大差异(相对偏差为 5.7%)的主要原因。

使用分光光度计^[11]对上述的 NDF 光谱透射率进行了测量,获取的透射率曲线如图 5 所示。从图 5 中可知, $\Delta\lambda_2$ 带宽内的平均光谱透射率为 19.51%。对比四种计算方法的测量结果,如表 3 所示。其中 T_t 是利用传统方法测量获得的光谱透射率值,它与其他三种方法测量值的差异比较明显,实验条件是测量结果差异的主要原因。这是因为光学元件的透射率强烈依赖于测试环境的温度、测量光束入射角、偏振方向以及辐射功率等^[12],表 3 中方法 1~3 的测量结果是针对相关光子在特定出射方向、偏振方向以及皮瓦量级辐射功率等条件下的测量结果,它与方法 4 的测量条件(mW 量级辐射功率、正入射、25 °C 和非偏光源等)相差较大。透射率测量值 σ 、 T_{sc} 、 T_{cc} 和 T_t 的比较,间接证明了实验测量结果的有效性。

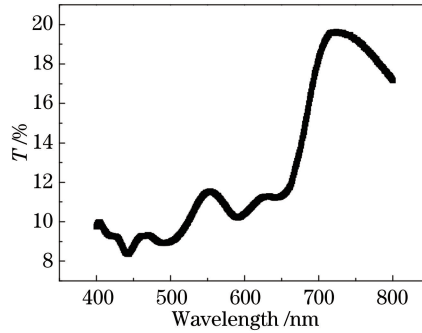


图 5 传统方法获取的 NDF 光谱透射率曲线

Fig. 5 NDF spectrum transmittance curve obtained by traditional method

表 3 四种计算方法获取的 NDF 透射率值

Table 3 NDF transmittance values obtained by four methods

Number	Method	Value
1	σ	20.11%
2	T_{cc}	20.12%
3	T_{sc}	21.35%
4	T_t	19.51%

4.2 测量不确定度分析

采用 A 类评估方法,对研究主体(通道探测效率 $\eta_2\tau_2$ 和 NDF 透射率)的测量不确定度进行分析。计算结果 y 的测量不确定度可以用合成标准不确定度表示^[13],即

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j), \quad (4)$$

式中,每个独立的物理量 x_k 的标准不确定度 $u(\bar{x}_k)$ 表示测量结果 \bar{x}_k 的分散性,其表达式为

$$u^2(\bar{x}_k) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2, \quad (5)$$

式中 $c_i = \partial f / \partial x_i$, 称为灵敏系数,表示因变量 y_i 与自变量 x_i 变化量的关系; $r(x_i, x_j) = u(x_i, x_j) / (u(x_i)u(x_j))$, 称为相关系数,表示自变量 x_i 和 x_j 的相关程度;协方差 $u(x_i, x_j) = \langle x_i x_j \rangle - \langle x_i \rangle \langle x_j \rangle$ 。

根据表 1 所测数据,在待定标端前不加衰减片的条件下,得到的通道探测效率的不确定度如表 4 所示,上标“0”代表待定标通道未加衰减片。

同样地,根据表 1、表 2 中待定标的光子计数值,实验测量的 NDF 透射率的不确定度如表 5 所示。上标“T”、“0”分别代表待定标通道加了衰减片和未加衰减片。

5 结 论

搭建了双通道的自校准光谱辐射源,并测量了通道的探测效率,获取了 0.35% 相对标准不确定度。实验验证了通道探测效率在光学元件透射率衰变前后的灵敏度,结果表明目标辐亮度绝对值与观测通道的衰变

表 4 测量的通道探测效率 $\eta_2 \tau_2$ 不确定度

Table 4 Measured uncertainty of channel detection efficiency $\eta_2 \tau_2$

Symbol	Description	Average value \bar{x}_i	Sensitivity coefficient c_i	Standard uncertainty $u(x_i)$	Uncertainty contribution $c_i \times u(x_i)$
N_c^0	Coincidence counts	523.45 s ⁻¹	2.06×10^{-6}	7.13 s ⁻¹	1.47×10^{-5}
N_1^0	Valid trigger counts	48892.77 s ⁻¹	-1.12×10^{-8}	159.88 s ⁻¹	1.79×10^{-6}
N_{ac}^0	Accidental coincidence counts	284.06 s ⁻¹	-2.06×10^{-6}	5.34 s ⁻¹	1.09×10^{-5}
N_{b1}^0	Valid trigger background counts	2697.82 s ⁻¹	1.12×10^{-8}	18.67 s ⁻¹	2.09×10^{-7}
$r^0(N_c^0, N_1^0)$	Correlation between N_c^0 and N_1^0	0.19	—	—	3.16×10^{-6}
$u^0(\eta\tau)$	Combined standard uncertainty		1.81×10^{-5}		
$u^0(\eta\tau) / \eta\tau$	Relatively standard uncertainty		0.35%		

表 5 测量的 NDF 透射率 T_{sc} 不确定度

Table 5 Measured uncertainty of NDF transmittance T_{sc}

Symbol	Description	Average value \bar{x}_i	Sensitivity coefficient c_i	Standard uncertainty $u(x_i)$	Uncertainty contribution $c_i \times u(x_i)$
N_2^T	DUT counts ^T	139448.16 s ⁻¹	1.66×10^{-6}	317.64 s ⁻¹	5.26×10^{-4}
N_2^0	DUT counts ⁰	659741.63 s ⁻¹	3.53×10^{-7}	1703.98 s ⁻¹	6.02×10^{-4}
N_{b2}^T	DUT background counts ^T	10491.8 s ⁻¹	-1.66×10^{-6}	82.51 s ⁻¹	1.37×10^{-4}
N_{b2}^0	DUT background counts ⁰	55663.27 s ⁻¹	-3.53×10^{-7}	144.88 s ⁻¹	5.12×10^{-5}
$u(T_{sc})$	Combined standard uncertainty		81.264×10^{-5}		
$u(T_{sc}) / T_{sc}$	Relatively standard uncertainty		0.38%		

无关,这是相关光子定标技术的优势体现。利用自校准光谱辐射源绝对定标了光学元件的透射率,其相对标准不确定度优于 0.38%。该透射率值是在皮瓦量级辐射光条件下测量的结果,利用相关光子为实现微弱光条件下光学元件透射率绝对测量提供一种有效的方案。论文的研究结果将为扩展自校准光谱辐射源原理样机的通道数提供技术基础,并为自校准定标实验提供指导。

由于在观测目标时无需知道 PMT 的量子效率,只需知道通道的探测效率,因此本文并未报道 PMT 的绝对量子效率。通道光学元件透射率评估是探测效率定标结果与真值差异比较的关键因素,透射率的精确测量将会大大提高定标结果的有效性,这是下一步的工作内容。

参 考 文 献

- 1 Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, *et al.* Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 616-623.
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 616-623.
- 2 Polyakov S V, Migdall A L. Quantum radiometry[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(9):1045-1052.
- 3 Brida G, Castelletto S, Novro C. Measurement of quantum efficiency of photodetectors by parametric fluorescence[J]. *Metrologia*, 1998, 35(4): 379-401.
- 4 Cheung J Y, Chunnillal C J, Thomas P J, *et al.* Photon-counting measurement challenges[C]. *SPIE*, 2007, 6583: 65830G.
- 5 Ghazi-Bellouati A, Razeta A, Bastie J, *et al.* Detector calibration at INM using a correlated photons source[J]. *European Physical Journal Applied Physics*, 2006, 35: (3)211-216.
- 6 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun, *et al.* Quantum efficiency calibration of opto-electronic detector by means of correlated photons method[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(7): 472-475.
- 7 Polyakov S V, Migdall A L. High accuracy verification of a correlated photon-based method for determining photon-counting detection efficiency[J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1390-1404.
- 8 Gao Dongyang, Hu Youbo, Liu Yan, *et al.* Space distribution of type-I spontaneous parametric down-conversion spectra cicle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0319001.
高冬阳, 胡友勃, 刘 岩, 等. I类自发参量下转换光谱圆环空间分布[J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 0319001.

- 9 Feng Yu, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, *et al.* Research in absolute calibration of single photon detectors by means of correlated photons[J]. Chinese Optics Letters, 2000, 4(6): 315-317.
- 10 Klyshko D N. Use of two-photon light for absolute calibration of photonelectric detectors[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1980, 10(11): 1112-1116.
- 11 Fan Yihui, Hui Huanqiang. Discussing principium and apply for range spectrophotometer[J]. Metrology & Measurement Technique, 2006, 33(12): 11-12.
范以辉, 惠焕强. 浅谈分光光度法和分光光度计的原理及其应用[J]. 计量与测试技术, 2006, 33(12): 11-12.
- 12 Zhang Z M, Gentile T G, Migdall A L, *et al.* Transmittance measurements for filters of optical density between one and ten[J]. Applied Optics, 1997, 36(34): 8889-8895.
- 13 Brida G, Castelletto S, Degiovanni I P, *et al.* Quantum efficiency and dead time of single-photon counting photodiodes: a comparison between two measurement techniques[J]. Metrologia, 2003, 37(5): 625-628.