

引用格式: HU You-bo, GAO Dong-yang, LI Jian-jun, *et al.* Experimental Study of Radiometer Based on Spontaneous Parametric Down-conversion Calibration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(6):0630001

胡友勃,高冬阳,李健军,等.基于自发参量下转换定标辐射计的实验研究[J].光子学报,2020,**49**(6):0630001

基于自发参量下转换定标辐射计的实验研究

胡友勃^{1,2},高冬阳³,李健军¹,郑小兵¹

(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,合肥 230031)

(2 中国科学技术大学,合肥 230026)

(3 上海航天控制技术研究所,上海 201109)

摘 要:测量了自发参量下转换的宽光谱分布和时间相关性,搭建了基于自发参量下转换定标的辐射计.在自发参量下转换定标探测效率的基础上推导了光子计数模式的辐亮度测量方程,根据定标原理辐射计可以实时监测和校正仪器的光电衰变.通过插入光学衰减片和更换探测器模拟了辐射计在光路衰变和电路衰变情况下能够修正自身衰变对观测结果的影响,观测辐亮度的一致性优于 0.38%.测量结果为自发参量下转换定标技术应用在未来的气候观测星上定标器等空间平台提供实验依据.

关键词:自发参量下转换;光谱分布;辐射计;光子计数;量子效率

中图分类号:O437

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204906.0630001

Experimental Study of Radiometer Based on Spontaneous Parametric Down-conversion Calibration

HU You-bo^{1,2}, GAO Dong-yang³, LI Jian-jun¹, ZHENG Xiao-bing¹

(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 Sciences and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Shanghai Aerospace Control Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The spectral distribution and time correlation of spontaneous parametric down-conversion were measured, and a radiometer based on spontaneous parametric down-conversion calibration was established. Based on the detection efficiency of spontaneous parametric down-conversion calibration, a radiance measurement scheme in terms of photon count was proposed, the radiometer can correct the degradation of its own response and observe the radiance of the target in real time. By using the experimental technique of inserting optical attenuator and changing detectors, the radiometer can correct its own degradation if observed radiance measurement results under the condition of optical degradation and electronics degradation. The results show that the consistency of observed radiance can meet 0.4%. The measurement results provide experimental basis for the application of spontaneous parametric down-conversion calibration to space platforms.

Key words: Spontaneous parametric down-conversion calibration; Spectral distribution; Radiometer; Photon counting; Quantum efficiency

OCIS Codes: 300.6420; 230.5160; 000.2190

基金项目:国家重点研发计划(No.2018YFB0504602),中科院实验室创新基金(No. CXJJ-17S003)

第一作者:胡友勃(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为高精度光学遥感辐射定标技术. Email: hgdhyb2010@163.com

导师(通讯作者):郑小兵(1969-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为高精度光学遥感辐射定标技术. Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

收稿日期:2019-12-19;录用日期:2020-03-12

0 引言

自发参量下转换 (Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) 被广泛应用于多项领域, 如量子力学的基础研究、量子信息和通信技术的应用、单光子探测器的绝对校准以表征光学材料等. 由于在空间环境中传感器响应的衰变, 传感器难以保持其原有的高精度和稳定性, 当前遥感定标的一种发展趋势是采用自然基本规律和绝对测量方法取代实物标准器, 以减少标准传递链引入的误差, 提升定标的可重复性和准确性^[1].

利用自发参量下转换的无需标准传递可实现光电探测器量子效率绝对定标且不依赖于外部标准^[2]. 2002年, 意大利、美国研究机构开展了自发参量下转换定标方法的首次国际比对实验^[3], 随后法国^[4]、日本^[5]、英国^[6]、中国^[7]等计量机构都进行了相关研究, 验证相关光子定标方法的可靠性. 为了扩宽自发参量下转换的光谱范围, 2008年 BAEK S Y 等开展了 SPDC 光谱分布特性研究, 实验观测到了约 30 nm 带宽的光谱的时间相关特性^[8]. 2013 密歇根州立大学研究了 SPDC 的 450~1 000 nm 的光谱分布^[9], 2016 年中科院安徽光机所高冬阳等利用相机测量了相关光子在 430~860 nm 的圆环分布^[10].

参量下转换定标技术也是实现辐亮度测量的可行手段^[11-13], 众多机构正在开展基于相关光子的量子坎德拉的研究^[14-15]. 本文在自发参量下转换定标绝对探测效率的基础上, 推导了光子计数模式的辐亮度测量方程, 搭建了基于自发参量下转换定标的辐射计. 为了验证辐射计宽光谱和能修正自身衰变对观测结果影响的优点, 测量了自发参量下转换的宽光谱分布和时间相关性, 模拟了辐射计在光路衰变和电路衰变情况下, 对目标光源的辐亮度测量结果的相对偏差优于 0.3%. 为自发参量下转换定标技术应用在未来的气候观测有效载荷、星上定标器等空间平台提供依据.

1 原理

1.1 自发参量下转换光谱

自发参量下转换产生的光子出射角度可以根据动量守恒定律来计算. 对泵浦光与晶体光轴所确定的平面内出射角度进行数值模拟, 如图 1 所示.

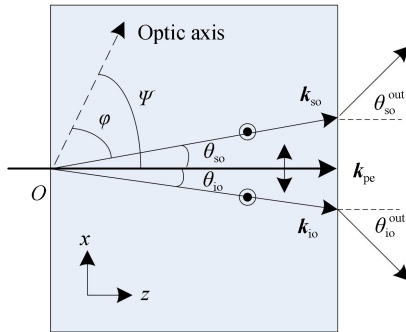


图 1 SPDC 光子出射方向示意图

Fig.1 Diagram of the direction of photon emission generated by SPDC

相关光子的产生过程满足能量和动量守恒定律, 即

$$\begin{cases} \omega_p = \omega_s + \omega_i \\ \mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i \end{cases} \quad (1)$$

为了方便讨论, 将式(1)变为

$$\begin{cases} \omega_{pe} = \omega_{so} + \omega_{io} \\ \mathbf{k}_{pe} = \mathbf{k}_{so} + \mathbf{k}_{io} \end{cases} \quad (2)$$

式中, 下标 p, s 和 i 分别表示泵浦光, 信号光和空闲光. 根据自发参量下转换中的能量守恒定律, 可知信号光 λ_s 与空闲光波长 λ_i 之间的关系为

$$\lambda_s = \frac{\lambda_i \cdot \lambda_p}{\lambda_i - \lambda_p} \quad (3)$$

根据 BBO 晶体的 Sellmeier 方程,可以求解出自发参量下转换产生的光子在晶体内部的出射角 θ_{so} 的表达式为

$$\cos \theta_{so} = \frac{|\mathbf{k}_{pe}|^2 + |\mathbf{k}_{so}|^2 - |\mathbf{k}_{io}|^2}{2|\mathbf{k}_{pe}| \cdot |\mathbf{k}_{so}|} = \frac{\left(\frac{n_p^e(\psi)}{\lambda_p}\right)^2 + \left(\frac{n_s^o}{\lambda_s}\right)^2 - \left(\frac{n_i^o}{\lambda_i}\right)^2}{2\frac{n_p^e(\psi)n_s^o}{\lambda_p\lambda_s}} \quad (4)$$

式中, $n_p^e(\psi)$ 是泵浦光的折射率, n_s^o 和 n_i^o 分别是信号光和空闲光折射率. 根据菲涅尔(Fresnel)折射定律,可计算出自发参量下转换产生的光子在晶体后端面的发散角 θ_i 和晶体内部的出射角 θ_{so} 关系为

$$\theta_i = \arcsin(n_s^o \sin \theta_{so}) \quad (5)$$

当泵浦光的波长 354.6 nm, 相位匹配方式为 I 类, 相位匹配角为 33.1° 时, 根据厂家提供的晶体参数模拟了自发参量下转换光谱的发散角如图 2 所示.

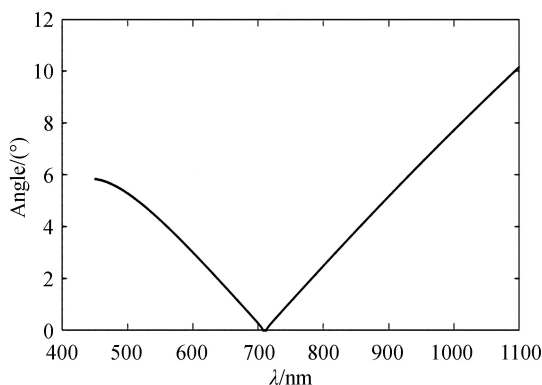


图 2 自发参量下转换的波长与发散角的关系

Fig.2 The relationship between wavelength and divergence angle of SPDC

1.2 辐射计工作原理

辐射计的技术优势主要在于能够自我校准响应度的衰变,且自校准过程无需溯源外部标准,从而使得观测结果与自身响应度衰变无关.光电探测系统在运行过程中不可避免地发生光路和电路的衰变,包括色散器件的位置波段、透过率的衰变、电子学放大增益和探测器响应度的变化等.用 τ 和 δ 分别表示光学和电学的衰变,则系统的响应度定标如图 3 所示.

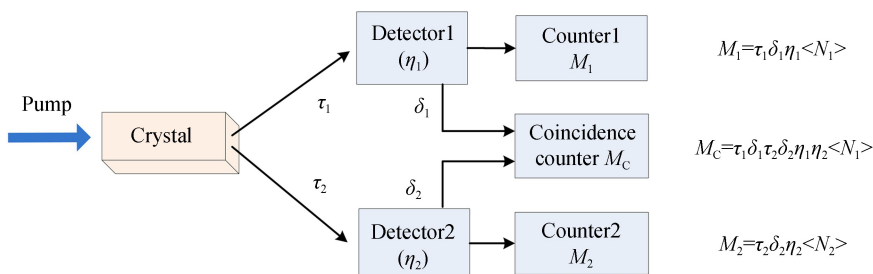


图 3 存在损耗或衰变时的探测器绝对量子效率定标原理

Fig.3 Principle of absolute quantum efficiency calibration for detectors with loss or decay

根据自发参量下转换的相关性可得两路光子探测器的绝对响应度依旧可以利用式(6)和式(7)获得,公式调整为

$$R_1 = M_C / M_2 = \tau_1 \delta_1 \eta_1 \quad (6)$$

$$R_2 = M_C / M_1 = \tau_2 \delta_2 \eta_2 \quad (7)$$

可以看出光子探测系统的绝对响应度包含了系统的光电衰变,当系统发生光电衰变时,这种体制能够获得准确的、实时的绝对响应度,对于处理星上定标难以评估标准器自身变化的技术难题有一定的优越性.

根据定标原理推导了基于光子计数的辐亮度测量方程,搭建了基于自发参量下转换定标的辐射计,辐射计如图 4 所示.辐射计具有自校准和观测两种工作模式,并通过扫描镜进行切换.自校准模式测量通道的响

应度,观测模式根据自校准得到的响应度和测量值反演目标的辐亮度,两种工作模式具有一个共同的光通道.

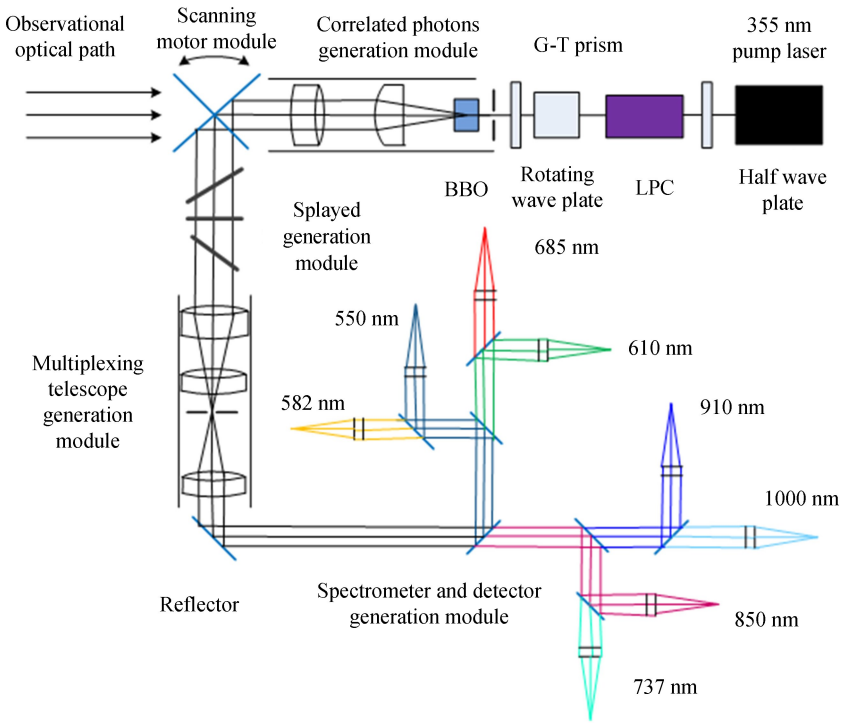


图4 辐射计示意图

Fig.4 Schematic diagram of the radiometer

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,其光子计数速率与有效接收辐射通量关系可表示为

$$N = \frac{\Phi \cdot \lambda}{h \cdot c} \eta \quad (8)$$

式中, N 表示单光子探测器的光子计数速率, Φ 表示单光子探测器接收的有效辐射通量, λ 表示入射波长, η 表示单光子探测器的绝对量子效率, h 表示普朗克常量, c 表示真空中的光速.

辐射计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

$$\Phi = L \cdot S \cdot \Omega \quad (9)$$

式中, L 表示光路入瞳处的光谱辐亮度, Ω 表示光路接收入射光的孔径角, S 表示孔径光阑面积.根据式(6)、(7)得到自发参量下转换产生的光子辐射基准源测量的基本公式,建立了入瞳辐亮度与输出光子计数值之间的对应关系为

$$L = \frac{N}{R} \cdot \frac{h \cdot c}{\Omega \cdot S \cdot \lambda} = \frac{N}{M_C/M_T} \cdot \frac{\theta \cdot h \cdot c}{\Omega \cdot S \cdot \lambda} \quad (10)$$

式中, R 是通道的响应度,可通过自校准模式下得到的符合计数 M_C 和触发计数 M_T 的比值测得; θ 是自校准模式下测量的响应度和观测模式的响应度的修正因子;通过自校准得到通道的响应度和观测模式得到的光子计数值以及其它系统参数值,即可得到观测目标的辐亮度.

结合方程可以看出 L 与光子计数速率 N 和通道响应度成正比例关系.为了验证辐射计能够修正自身衰变对观测结果的影响,在辐射计的光路和电路中分别引入不同衰变来模拟整个系统的光学和电子学响应度衰变.结合方程可以看出在入射光光谱辐亮度稳定的条件下,倘若辐射源通道衰减系数发生变化, R 值和 N 值都会发生相应变化,反演得到的辐亮度值不变.

2 光谱测量和衰变模拟实验

自发参量下转换光谱测量实验如图5所示.泵浦光(354.6 nm, 100 mW 可调)经偏振起偏后正入射至

BBO 晶体产生 I 类非共线自发参量下转换,晶体后放一个准直透镜使自发参量下转换产生的光准直.

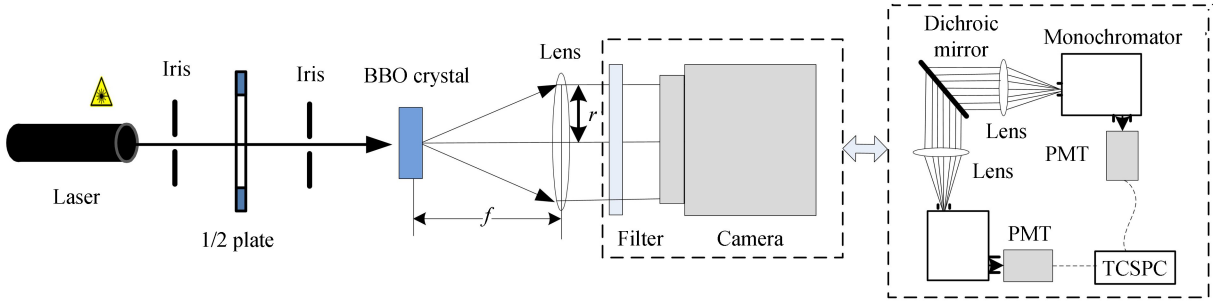


图 5 自发参量下转换光谱测量示意图

Fig.5 Schematic diagram of spontaneous parametric down conversion spectrum measurement

采用微光相机和带通滤光片测量自发参量下转换的光谱分布.相机的光敏面为 13 mm×13 mm 的正方形探测面,相机的响应波长范围是 400 nm~1 000 nm,自发参量下转换产生的光子圆环直径的测量值为 D ,发散角 θ 为

$$\theta = \arctan \left(\frac{D}{2f} \right) \quad (11)$$

测量圆环直径大小,根据圆环直径和晶体到透镜的距离计算得到发散角.考虑到光谱发散角理论值的大小,实验选择的透镜焦距 $f = 40\text{mm}$.

SPDC 的时间相关性在分光色镜分束后进入单色仪,由于光电倍增管的响应波段为 400 nm 至 910 nm 左右,选取探测器能够接收到的最宽波段即 580 nm~910 nm 匹配 SPDC 光子波段,同时选取 600 nm 和 860 nm、630 nm 和 813 nm、685 nm 和 737 nm、580 nm 和 910 nm 匹配波段进行符合测量,观察到测量的符合峰,验证了 SPDC 的宽光谱的相关性.

模拟辐射计的光电衰变实验如图 6 所示.通过对辐射稳定的目标光源(本次实验采用卤钨灯积分球光源,稳定性优于 99.9%)进行观测,引入不同光电衰变情况下辐射计测量结果的相对标准偏差,评估其光电衰变非敏感性.实验选取了一对通道实现光路衰变和电子学衰变.在光路中插入不同透过率的衰减片来实现光路衰变模拟;由于探测器是集成后的模块化产品,无法通过更改参数来模拟电子学衰变,采用更换不同量子效率的探测器来模拟电子学响应度衰变.自校准模式下,通过符合测量得到不同衰减下通道的探测效率;辐射测量模式下扫描镜旋转 90° ,得到不同衰变倍率的光子计数,最终反演得到不同光电衰变情况下目标光源的辐亮度.

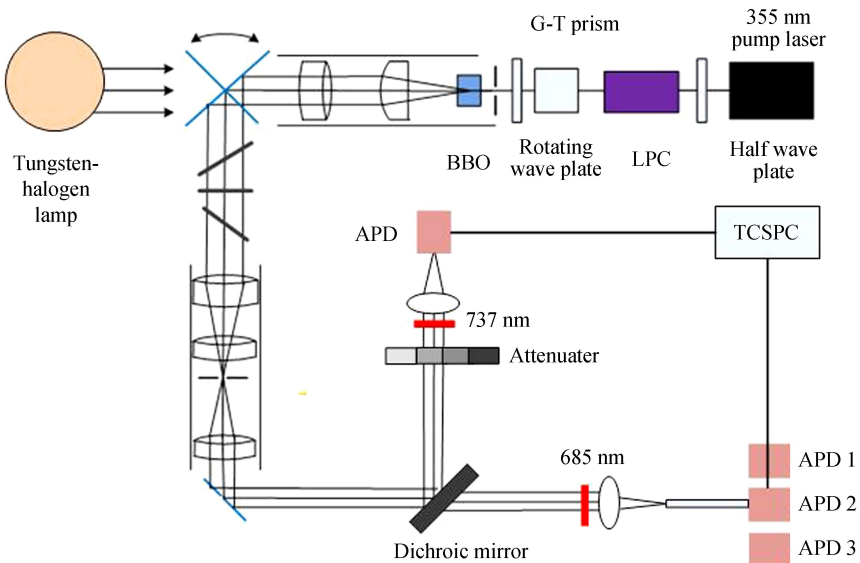


图 6 辐射计光电衰变测试实验图

Fig.6 Experimental diagram of radiometer loss or decay test

3 结果分析

3.1 自发参量下转换光谱

相机的响应波长范围是 400~1 000 nm, 选取了 460~1 000 nm 之间的 9 片滤光片测量不同波长的光子圆环, 测量的圆环大小图片如图 7 所示.

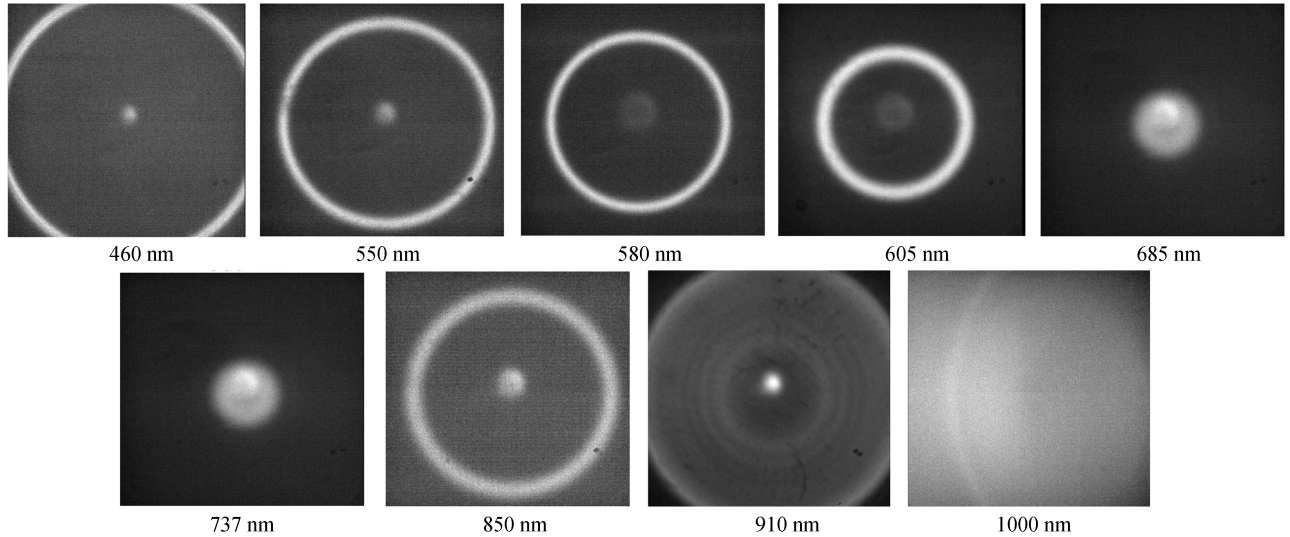


图 7 不同波长的光子圆环图像

Fig.7 Photon ring images with different wavelengths

部分圆环中心的光点是残余泵浦光没有完全截止造成的; 由于 910 nm 滤光片在一些窄带波长具有一定的透过率, 910 nm 滤光片内部有一些小圆环; 1 000 nm 的发散角较大未能拍到完整圆环. 测量圆环直径得到不同波长的发散角, 与理论的测量结果的对比如表 1 所示.

表 1 发散角的理论值和实测值

Table 1 Theoretical value and measured value of divergence angle

Wavelength	Divergence angle	Theoretical value
466nm	5.30	5.6
550nm	4.14	4.2
580nm	3.48	3.6
605nm	2.98	2.8
685nm	1.00	0.6
737nm	1.23	0.4
850nm	3.60	3.1
910nm	5.30	5.1
1000nm	7.50	7.2

表 1 显示自发参量下转换在 466~1 000 nm 波长范围内产生了相关光子发散角的理论值和实测值. 发散角的理论值和实测值在大部分波段的误差较小, 在接近共线波段的误差相对较大. 分析从发散角公式来看接近共线波段产生的相关光子发散角的大小受泵浦光和晶体的相位匹配角影响较大, 由于激光本身的发散角产生的相位匹配条件较多导致这些波段的发散角范围较大.

根据探测器的响应波长, 选取了四对匹配波段进行符合测量并观察到符合峰, 如图 8 所示. 测量结果验证了自发参量下转换的宽光谱和时间相关性, 为实现辐射计的宽波段定标提供依据.

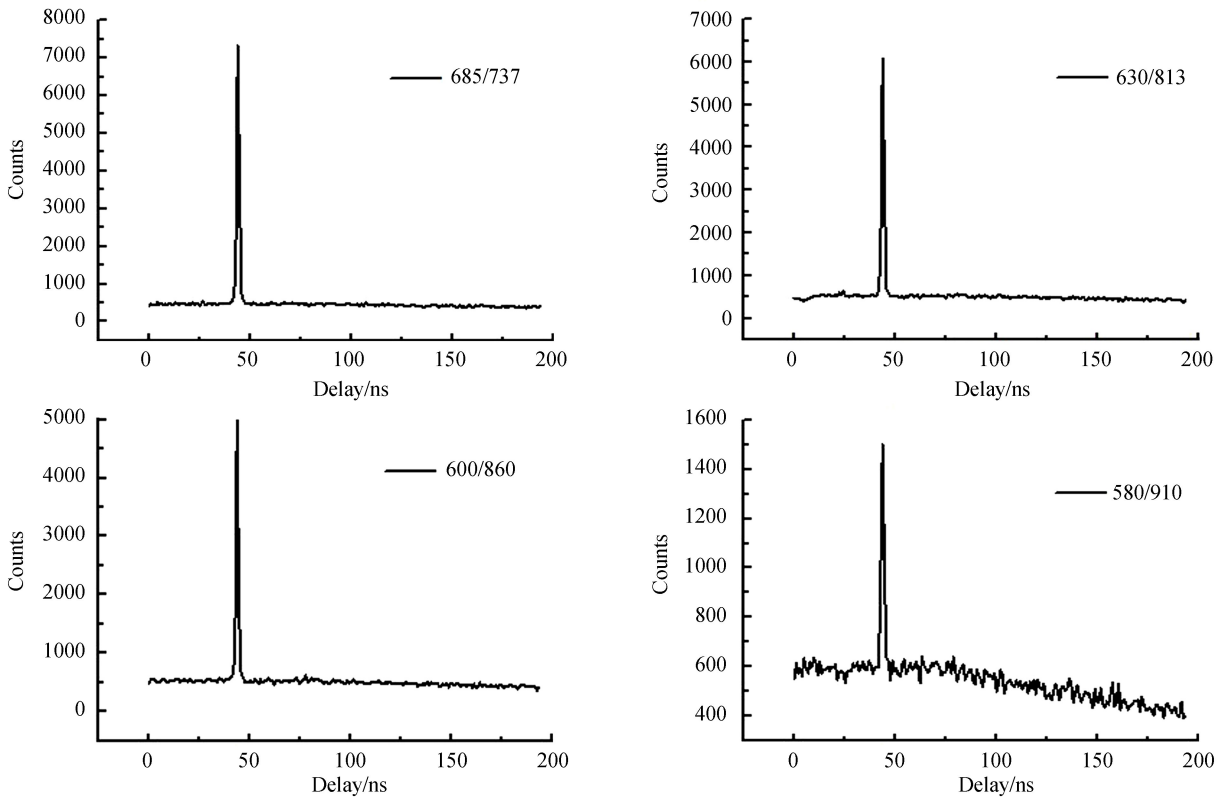


图 8 不同波长的符合峰
Fig.8 Coincidence peaks with different wavelengths

3.2 衰变验证

在光路中插入不同光学中性密度滤光片,模拟辐射计的光学衰变.插入 5 种中性密度滤光片的光学密度大致分别为 OD 0.1,OD 0.2,OD 0.3,OD 0.4,OD 0.5,得到不同的通道探测效率,测量稳定性优于 0.2%.自校准测量后,将扫描镜切换至辐射测量模式,测量不同衰变下通道的输出光子计数值,辐射测量模式下通道的光子计数值非稳定性优于 0.15%,根据辐射计的工作原理,反演得到卤钨灯辐亮度结果如表 2 所示.表明辐射计在 0% ~ 70% 的光学衰变下,反演卤钨灯光源的辐亮度精度优于 0.38%.

表 2 不同光学衰变下辐射计反演的卤钨灯辐亮度

Table 2 Radiance of halogen-tungsten lamp measured by radiometer under different optical decay conditions

Number	Photon counting rate in the observation mode/s	Channel detection efficiency	The radiance of output port/(W · sr ⁻¹ · mm ⁻²)
1	2 368 321	0.086 5	9.27 × 10 ⁻⁹
2	1 846 324	0.067 7	9.22 × 10 ⁻⁹
3	1 456 875	0.053 4	9.18 × 10 ⁻⁹
4	1 267 316	0.046 3	9.22 × 10 ⁻⁹
5	954 342	0.034 7	9.19 × 10 ⁻⁹
Relatively standard uncertainty			0.38%

辐射计还可能发生电子学衰变,通过更换不同量子效率的单光子探测器模拟辐射计的电子学衰变.为保证单光子探测器的位置重复性,选取光纤耦合端光路作为电子学衰变通道.实验测量过程和前面类似,反演的目标辐亮度实验数据如表 3 所示.

由于实验室现有的单光子探测器量子效率相差不大,仅选择了三个探测器模拟电子学衰变.测量结果显示辐射计在发生 70% 电子学衰变时,反演积分球辐亮度波动优于 0.28%.实验误差主要来源于光源功率非稳定性和自校准测量结果的误差.通过光电学衰变模拟实验验证了辐射计能修正自身衰变的影响.

表3 不同电子学衰变下辐射计反演的卤钨灯辐亮度

Table 3 Radiance of halogen-tungsten lamp measured by radiometer under different electronics decay conditions

Number	Photon counting rate in the observation mode/s	Channel detection efficiency	The radiance of output port/(W · sr ⁻¹ · mm ⁻²)
1	2 717 655	0.029 485	1.202×10 ⁻⁸
2	2 696 484	0.029 217	1.203×10 ⁻⁸
3	469 531	0.004 681	1.208×10 ⁻⁸
Relatively standard uncertainty			0.28%

4 结论

本文在自发参量下转换定标绝对探测效率的基础上,推导了光子计数模式的辐亮度测量方程,搭建了基于自发参量下转换定标的辐射计.测量了自发参量下转换 460 nm~1 000 nm 的光谱分布和580 nm~910 nm的时间相关性;辐射计在70%的光电衰变下测量辐亮度值的相对标准偏差优于0.38%,验证了辐射计宽光谱以及修正自身衰变的优点.本文验证了辐射计对辐亮度相对变化的敏感性,由于在自校准模式下通过符合测量得到了通道的响应度和观测模式有细微的不同,包括空间匹配、带宽、线性、偏振等修正因子,需要对一些参数进行测量、修正和评估,下一步将详细分析精度问题并和传统方法进行对比,验证辐射计的绝对测量精度.

参考文献

- [1] FISCHER J, ULLRICH J. The new system of units[J]. *Nature Physics*, 2016, **12**(1): 4-7.
- [2] MIGDALLA L, DATLA R U, SERGIENKO A. Differences explained in correlated - photon metrology techniques[J]. *Physics Today*, 1995, **52**(11): 15-81.
- [3] MIGDALL A, DEGIOVANNI P, RASTELLO M L, *et al.* Intercomparison of a correlated-photon-based method to measure detector quantum efficiency[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(15): 2914-2922.
- [4] GHZA A, RAZET 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.
- [5] ODATE S, YOSHIZAWA A, FUKUDA D, *et al.* Quantum efficiency measurements by bidirectional coincidence counting of correlated photon pairs[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(21): 3176-3178.
- [6] CHUNNILALL C J, THEOCHAROUS E, PORROVECCHIO G, *et al.* Low optical power reference detector implemented in the validation of two independent techniques for calibrating photon-counting detectors [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(21): 20347-20363.
- [7] LV Liang, ZHANG Yan-chao, LIN Yan-dong. Research on absolute calibration of photodetector quantum efficiency using entangle photons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 119-125.
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): 119-125.
- [8] BAEK S Y, KIM Y H. Spectral properties of entangled photon pairs generated via frequency-degenerate type-I spontaneous parametric down-conversion[J]. *Physical Review A*, 2008, **77**(4): 043807.
- [9] HSU F K, LAI C W. Absolute instrument spectral response measurements using angle-resolved parametric fluorescence [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 18538-18552.
- [10] GAO Dong-yang, LI Jian-jun, XIAO Mao-peng, *et al.* Research on the distribution of broad-band correlated photon spectra and the measurement of time-correlation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(5): 1300-1307.
高冬阳, 李健军, 夏茂鹏, 等. 多波段相关光子光谱分布与时间相关性测量实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(5): 1300-1307.
- [11] KLYSHKO D N. Utilization of vacuum fluctuations as an optical brightness standard[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1977, **7**(5): 591-595.
- [12] MIGDALL A, DATLA R, SERGIENKO A, *et al.* Measuring absolute infrared spectral radiance with correlated visible photons: technique verification and measurement uncertainty[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(16): 3455-3463.
- [13] LEMIEUX S, GIESE E, FUECKLE R, *et al.* A primary radiation standard based on quantum nonlinear optics[J]. *Nature Physics*, 2019, **15**: 529-532.
- [14] CHEUNG J Y, CHUNNILALL C J, WOOLLIAM E R, *et al.* The quantum candela: a re-definition of the standard units for optical radiation[J]. *Journal of Modern Optics*, 2007, **54**(2-3): 373-396.
- [15] ZWINKELS J C, IKONEN E, FOX N P, *et al.* Photometry, radiometry and 'the candela': evolution in the classical and quantum world[J]. *Metrologia*, 2010, **47**(5): R15-R32.