

文章编号: 0253-2239(2007)03-0457-4

基于相关光子的光辐射定标方法研究^{*}

冯 瑜 郑小兵 张 伟 李健军 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感室, 合肥 230031)

摘要: 为提高定标精度, 提出一种基于相关光子的光辐射定标方法, 它是一种独立于基于辐射源和基于探测器的定标方法。利用 351.1 nm 的激光抽运 BBO 晶体产生的相关光子, 建立了一套基于相关光子的光辐射定标系统, 分析了它的原理和实验装置, 给出符合测量系统, 并对结果进行了讨论。结果表明, 该系统定标的光电倍增管 (R2949) 在 702.2 nm 的量子效率为 $(5.960 \pm 0.003)\%$, 与其在这一波长的量子效率典型值的相对误差约为 1.0%, 测量结果的相对合成标准不确定度为 2.61%。

关键词: 遥感; 辐射定标; 相关光子; 量子效率; 参变下转换

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Optical Radiometric Calibration Based on Correlated Photons

Feng Yu Zheng Xiaobing Zhang Wei Li Jianjun Qiao Yanli

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: A method of optical radiometric calibration based on correlated photons was proposed to improve calibration precision. It was independent of the methods based on radiometric source or detectors. With 351 nm laser to pump β -Barium Borate (BBO) crystal, a radiometric calibration system based on correlated photons had been set up, and its principle and experimental setup were analyzed. Coincident metrical system was given, and the experimental result is discussed. The results showed that the calibrated quantum efficiency of photomultiplier (R2949) at 702 nm was $(5.96 \pm 0.003)\%$, the relative error of experimental result was about 1.0% with respect to the typical quantum efficiency of photomultiplier (R2949) at this wavelength, and relative combined uncertainty of the results was about 2.61%.

Key words: remote sensing; radiometric calibration; correlated photons; quantum efficiency; parametric down-conversion

1 引 言

在遥感研究中, 辐射定标一般指确定光辐射传感器的响应率或量子效率。近年来, 由于定量化遥感等领域要求不断提高, 光辐射传感器的定标成为保证遥感数据精度和可利用价值的基础支撑技术。目前光辐射定标通常采用基于辐射源和基于探测器两种方法^[1], 它们的共同点是需要建立高精度的初级标准以及直至用户的标准传递链。标准传递链保证了各种传感器的响应可以溯源到一个共同基准, 但同时也限制了标准的工程可复现性, 且由于要

根据不同的定标要求设计传递链, 不但增加了定标系统设计难度, 还造成精度随传递环节的增加而逐级降低。

从国内外的研究结果看, 标准传递过程是限制定标精度有效提高的瓶颈之一, 这在红外波段表现得尤为突出。例如: 在短波红外波段, 初级光谱辐亮度标准的精度可达到 0.2%, 但国内外空间传感器在这一波段的精度很难优于 5%^[2]。从提高精度的角度出发, 希望光辐射探测器的定标建立在一种可在任何时间和地点准确重现的客观物理过程上, 而

^{*} 国家自然科学基金(60378027)资助课题。

作者简介: 冯 瑜(1977—), 男, 辽宁抚顺人, 博士研究生, 主要从事探测器辐射定标的方法研究。E-mail: yfeng@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969—), 男, 安徽合肥人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光辐射测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和光学海洋学等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2006-03-29; 收到修改稿日期: 2006-08-17

不依赖于某个探测器或某种传递过程。

为此,本文提出由参变下转换产生的相关光子实现“无标准传递”的辐射定标的方法,可利用高精度的可见波段探测器定标红外探测器,为解决提高定标精度问题提供了可行的方法。

2 原 理

参变下转换现象是在一定条件下、用抽运激光照射某些非线性晶体时,晶体中会同时成对辐射具有方向、波长、偏振相关特性的光子。此过程满足能量和动量守恒定律:

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

其中 ω 为频率, \mathbf{k} 为晶体内的波矢,脚标 p,s,i 分别对应抽运、信号和空闲光。

在某一个方向观察到一个光子(信号光)就意味着在它的共轭方向上另一个光子(空闲光)的存在。D. N. Klyshko 提出了利用相关光子定标探测器量子效率的方法^[3],其原理如图 1 所示。假设 N 为给定时间内晶体中产生的相关光子对的总数, N_s, N_i, N_c 分别为信号光、空闲光探测器以及符合计数的平均值, η_s, η_i 分别为信号和空闲光探测器量子效率。很明显,

$$N_s = \eta_s N, \quad N_i = \eta_i N, \quad (2)$$

根据两探测器的统计独立性,符合计数值应为

$$N_c = \eta_s \eta_i N. \quad (3)$$

因此,信号光、空闲光探测器的量子效率

$$\eta_s = \frac{N_c}{N_i}, \quad \eta_i = \frac{N_c}{N_s}. \quad (4)$$

可以看出,信号光探测器量子效率的测量与空闲光探测器的量子效率无关,也不需要任何其他的参考标准,反之亦然。

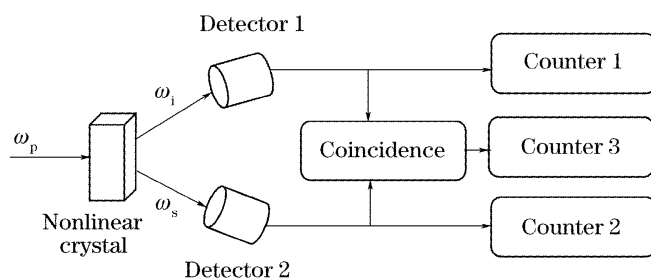


图 1 相关光子定标探测器量子效率原理图

Fig. 1 Principle of calibration in quantum efficiency for detector based on correlated photon

3 实验装置

实验装置的光路部分如图 2 所示。钛宝石激光器输出的 702.2 nm 激光,经过倍频装置后输出为垂直偏振的 351.1 nm 抽运光,在抽运光路中放置 351 nm 的 $\lambda/2$ 波片,用于抑制相关光子产生,从而测量背景噪声。

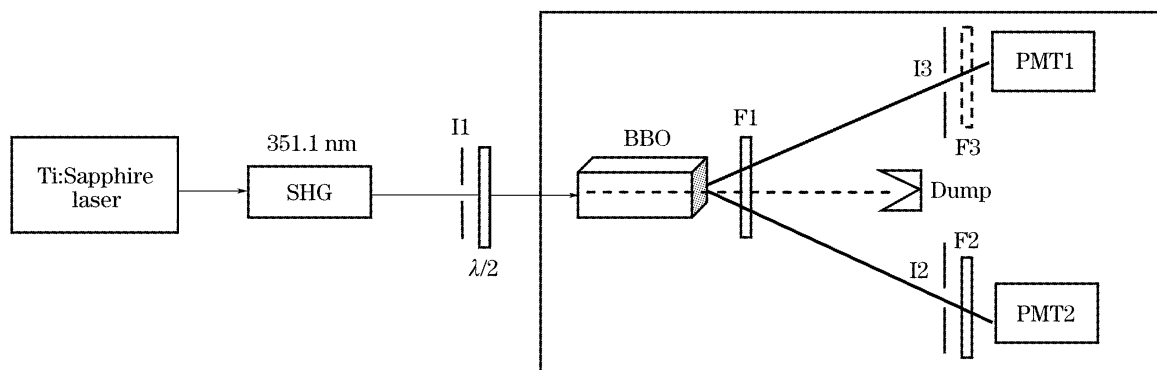


图 2 基于相关光子定标探测器量子效率的实验装置。F1:玻璃滤光片,F2,F3:波长 702.2 nm 的干涉滤光片。

I2,I3:的直径分别为 4 mm 和 10 mm 的光阑。PMT1,PMT2:光电倍增管

Fig. 2 Experimental setup of calibration in quantum efficiency of detector based on correlated photons. F1: glass filter, F2, F3: interference filters at 702.2 nm. The diameter of iris I2 is 4 mm, and diameter of iris I3 is 10 mm. PMT1, PMT2: photomultipliers

使用 BBO(6 mm×4 mm×12 mm)晶体作为产生相关光子的非线性晶体。将 BBO 晶体放置在多维调整架上,采用 I 类简并非共线相位匹配方式。当抽运光波长为 351.1 nm 时,相关光子波长应均为 702.2 nm。计算出此时抽运光与光轴夹角应为 36.4°,且相关光子分布在以抽运光为轴,锥顶角为

5°的圆锥面上。我们计算了 BBO 晶体的相位匹配角与输出相关光子波长的关系曲线,如图 3 所示。

在晶体后面放置的玻璃滤光片 F1,主要是为了滤除抽运光,光路后面的一个吸收腔也是起到这一作用的。相关光子还要分别经过光阑 I2 和 I3,以及峰值波长在 702.2 nm 的干涉滤光片 F2、F3,才能被

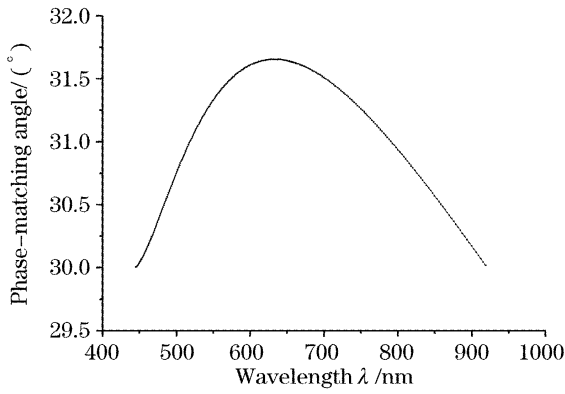


图 3 相位匹配角与相关光子波长的关系曲线

Fig. 3 Curve of phase-matching angle versus wavelength of correlated photons

光电倍增管 PMT1 和 PMT2 探测到。我们模拟了垂直于抽运光传播方向的截面上相关光子的图像,如图 4 所示。

根据(4)式,可知,只要同时记录两探测器的计

数输出和符合计数,就可以分别计算出两探测器的量子效率。在实验中,为了让一路探测器尽可能多地接收到与另一路相关的光子,我们在探测器 PMT2 的光路中使用了较小的光阑和较窄带宽的干涉滤光片,而在另一路探测器 PMT1 中使用了相对大的光阑和较宽带宽的干涉滤光片。光阑 I2 和 I3 的直径分别为 4 mm 和 10 mm,干涉滤光片 F2、F3 的带宽分别为 1 nm 和 10 nm。这样就打破了系统的平衡,而不能实现同时标定两路探测器。使用小孔径光阑和窄带宽滤光片的 PMT2 这一路称为参考通道,而 PMT1 的一路为待定标通道,也就是我们最后测得探测器量子效率的一路。

为了降低环境中杂散光对实验的干扰以及防止强光损伤探测器,我们设计了一个暗箱体,把从 BBO 晶体开始直到探测器信号输出接口的所有实验装置都固定在其中。

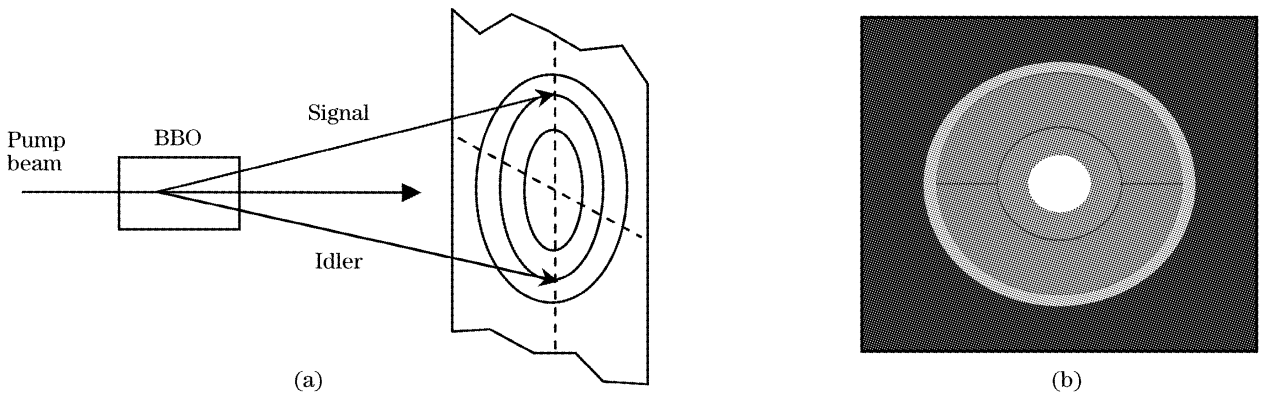


图 4 BBO 晶体产生(a)相关光子的示意图和(b)相关光子的模拟图像

Fig. 4 (a) Sketch map of correlated photons produced by BBO crystal; (b) emulational image of correlated photons

4 符合测量系统

我们在实验中使用的探测器 PMT1 和 PMT2 均为滨松公司生产的型号为 R2949 的光电倍增管。符合计数的测量是通过基于时间幅度转换器(TAC)组成的系统来完成。

当光电倍增管探测到相关光子并在阳极产生脉冲信号后,为了提高信噪比、有效抑制噪声,两探测器的输出信号需分别经前置放大器放大,再经窗选工作方式下的鉴别器,滤除幅值过高和过低的噪声信号后,送给双通道计数器分别计数。同时,两路信

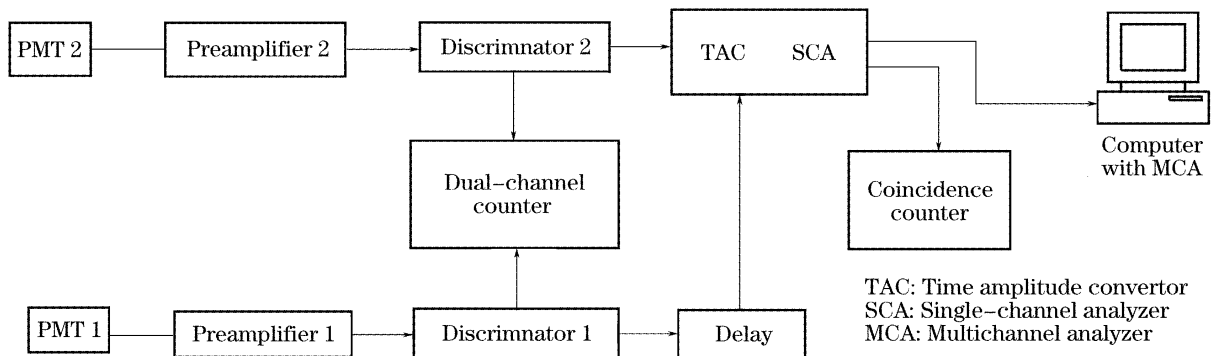


图 5 符合测量系统示意图

Fig. 5 Scheme of system used to measure coincidence counts

TAC: Time amplitude convertor
SCA: Single-channel analyzer
MCA: Multichannel analyzer

号又分别被送入时间幅度转换器的开始和停止输入端,其中,PMT1 信号送到时间幅度转换器的停止输入端前,要经过 25 ns 的延时。时间幅度转换器将产生一个幅度与两输入信号时间间隔成正比的脉冲信号。该输出信号送给计算机中的多道分析器(MCA),多道分析器将不同幅值的时间幅度转换器输出信号按照相应的道址分类计数,并生成脉冲信号的幅度分布图。两路相关信号会在多道分析器输出的分布图中产生一个明显高于不相关信号的符合峰值。同时,多道分析器的输出信号经过内嵌的单道分析器(SCA),满足单道分析器设定阈值(即相应的符合时间)内的信号被选出,即为符合计数。多道分析器的这一功能,使我们可将其生成的脉冲幅度分布图中满足单道分析器设定阈值的部分(即符合峰值)截取出来,便于分析比较。整个符合测量系统如图 5 所示。

5 结果与讨论

如前所述,我们以 PMT2 探测器作为参考,定标 PMT1 探测器的量子效率。以 10 s 作为计数时间,分别测量了 10 组参考探测器的总计数速率和背景计数速率以及符合计数速率和偶然符合速率。多道分析器输出的符合峰值如图 6 所示,横轴为通道间延时,纵轴为相关信号的计数值。

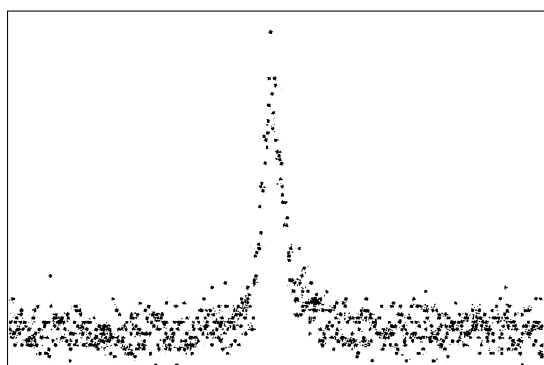


图 6 多道分析器输出的符合峰值

Fig. 6 Profile of coincidence counts from MCA

由双路计数器得到的 PMT2 单路计数的平均值为 3886.6 ± 48.9 (cps),由符合计数器测得的符合计数的平均值为 171.35 ± 2.5 (cps)。根据(4)式,计算 PMT1 的量子效率为: $(4.41 \pm 0.002)\%$,其中置信系数 $k=2$,测量结果的相对合成标准不确定度为 1.93%。这里需要注意的是,由于探测器 PMT1 前加入了玻璃滤光片和干涉滤光片,所以与(4)式略有不同的是还要扣除滤光片透射率对结果的影响。滤光

片的总透射率为 74%,当修正了透射率的影响后,求出光电倍增管 PMT1 的量子效率应为 $(5.96 \pm 0.003)\%$,测量结果的相对合成标准不确定度为 2.61%。

为了验证基于相关光子光辐射定标方法测量探测器量子效率的正确性,以滨松公司给出的 R2949 的光谱响应曲线^[4]作为参考,可知,在 702.2 nm 波长附近,R2949 的量子效率约为 5.9%。我们的测量结果与该参量的相对误差约为 1.0%,具备了较好的一致性。

根据国外的有关报道,基于相关光子方法定标探测器量子效率与基于探测器的传统方法比较,最好的差异约为 0.6%^[5],虽然我们的验证只是使用探测器量子效率的典型值,但仍能说明测量结果具备较好的准确性。

6 结 论

建立了一套基于相关光子方法定标探测器量子效率的光辐射定标系统,其探测器均采用光电倍增管,并标定了倍增管在 702 nm 波长的量子效率为 $(5.96 \pm 0.003)\%$,结果的相对合成标准不确定度为 2.61%。以滨松公司给出的 R2949 的光谱量子效率为参考,测量结果与参考值的相对误差约为 0.85%,具备了较好的一致性。为进一步验证相关光子方法以及该实验系统,我们正在拟定其与基于探测器的光辐射定标系统的比对实验。相关光子方法是一项相当值得研究的辐射测量技术,在改进和完善实验装置后,测量不确定度有望进一步减小。而且它不依赖于任何其他标准传递链,原理上可实现“无标准传递”的辐射定标,很可能成为辐射定标技术未来的发展方向。

参 考 文 献

- 1 W. R. Blevin. Optical radiometry-one hundred years after Stefan and Boltzmann[C]. *Proceedings of the 2nd International Conference Held*, eds., N. P. Fox, D. H. Nettleton, 1988. 1~9
- 2 M. King, R. Greenstone. *EOS Reference Handbook* [M]. eds., EOS Project Science Office, NASA, 1999. 89~150
- 3 D. N. Klyshko. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors[J]. *Sov J. Quant. Electron.*, 1980, **10**(9): 1112~1116
- 4 Hamamatsu Photonics K. K. Specification of Photomultiplier R2949[R]. 1998. 1~4
- 5 G. Brida, S. Castelletto, C. Noviero *et al.*. Quantum-efficiency measurement of photo-detectors by means of correlated photons[J]. *Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(10): 1623~1627