

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0200-03

# 单光子探测器的绝对定标方法

冯瑜, 郑小兵, 乔延利, 李健军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 介绍了一种实现绝对定标单光子探测器量子效率的方法。该方法是利用自发参量下转换产生的纠缠光子对绝对定标单光子探测器量子效率。它的定标不确定度与传统方法相比, 具有较好的一致性。同时, 利用这一方法也使实现“无标准传递”的辐射定标成为可能。

**关键词** 非线性光学; 绝对定标; 纠缠光子; 单光子探测器; 量子效率

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

## Absolute Calibration Method for Single-Photon Detectors

FENG Yu, ZHENG Xiao-bing, QIAO Yan-li, LI Jian-jun

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

**Abstract** Introduced an absolute calibration method of quantum efficiency for single-photon detectors. Entangled photons produced by spontaneous parametric down conversion are used in absolute calibration of quantum efficiency for single-photon detectors in this method. It could allow an uncertainty comparable with traditional methods. Furthermore, it makes that possible for realization of standard-less radiometric calibration.

**Key words** non-linear optics; absolute calibration; entangled photons; single-photon detectors; quantum efficiency

## 1 引言

辐射定标,是指建立光辐射传感器的输出与相应已知的、用国际单位制(SI)表示的辐射标准之间的定量关系。它是辐射度学和光度学的主要研究内容。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,或者光电转换的量子效率。近年来,由于定量化遥感等领域的要求不断提高,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。它在许多基础研究中发挥着关键作用。

一方面,目前光辐射传感器的定标通常采用基于辐射源和基于探测器的方法<sup>[1]</sup>。它们的共同点是:需要建立高精度的初级标准以及不同精度等级的标准器和建立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,但也限制了标准的工程可复现性和精度的有效提高。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

传感器精度有效提高的瓶颈之一,这在红外波段表现尤为突出。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%<sup>[2]</sup>。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,而不依赖于某个探测器或某种传递过程。

另一方面,近年来单光子探测器在许多重要科技领域的应用被发现,而这些应用又需要精确测定探测器的量子效率。经典定标方案是将光源衰减至单光子水平,而由此引入的高插入损耗成为限制该方法定标不确定度的主要方面<sup>[3]</sup>。

出于以上两个方面的应用考虑,由参量下转换产生的纠缠光子不仅可以使实现“无标准传递”的辐射定标成为可能;同时,它也为绝对定标单光子探测器的量子效率提供了一种可行的方法。

## 2 实验原理

当一束抽运激光入射到非线性晶体时,由于晶

**基金项目:** 国家自然科学基金(60378027)资助课题。

**作者简介:** 冯瑜(1977-),男,辽宁抚顺市人,中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感实验室博士研究生,主要从事探测器辐射定标的方法研究。E-mail: yfeng@aiofm.ac.cn

体内的参量下转换效应,抽运光子在晶体中衰变为一对光子(见图 1)。由 Manley-Rowe 关系,每湮没一个高频光子,同时要产生两个低频光子。此过程满足能量守恒和动量守恒定律(相位匹配条件)

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

式中  $\omega$  代表频率,  $k$  代表晶体内的波矢,脚标 p, s, i 分别表示属于抽运光、信号光和空闲光。

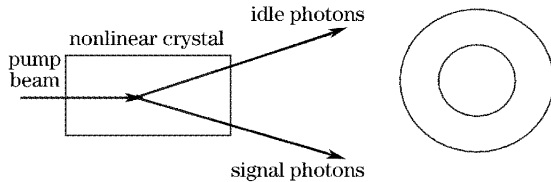


图 1 非线性晶体参量下转换示意图  
(右侧的圆环为光斑形状)

Fig. 1 Sketch map of spontaneous parametric down-conversion in nonlinear crystal (the right figure is the spot of down-conversion photons)

这些成对辐射的光子具有在方向、波长、偏振上的纠缠特性。另外,同一个光子对的光子仅仅是在几十飞秒内同时产生的。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。这样利用符合测量技术,就可以实现绝对测量探测器的量子效率<sup>[4]</sup>,原理如图 2 所示。

假设  $N$  是给定时间内晶体中产生的纠缠光子对的总数,  $N_s, N_i, N_c$  分别是同一时间内信号光探测器、空闲光探测器以及符合计数的平均值。很明显,有以下的关系式

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

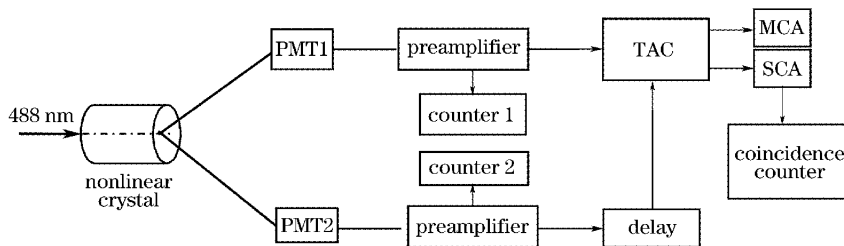


图 3 利用纠缠光子绝对定标单光子探测器量子效率的实验装置示意图

Fig. 3 Frame sketch of experimental setup of absolute calibration in quantum efficiency of single photon detector by using entangled photons

#### 4 实验结果讨论

事实上,在图 3 所示的实验装置中,要把同一个相关光子对精确地送入两个探测器的灵敏区域是非常困难的。为了克服这一困难,我们对两个光路采

取了不同的处理方法。为获得所需要带宽内的下转换光,在两个光路上使用了不同带宽的干涉滤光片。带宽小的一路作为参考探测器,带宽大的一路作为待定标探测器。这样做的目的是为了捕获所有与

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

因此,就可以求出两探测器的量子效率

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

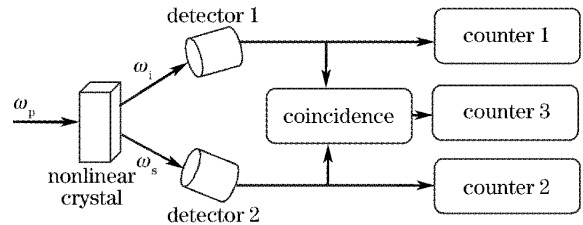


图 2 绝对定标单光子探测器量子效率原理图

Fig. 2 Principle frame of absolute calibration in quantum efficiency for single photon detectors

#### 3 实验装置

为了获得实验所需要的纠缠光子对,使用短波长连续激光(波长 488 nm,功率 20 mW 的氩离子激光器)抽运 BBO 晶体(6 mm × 4 mm × 12 mm),采用 I 类非共线非简并相位匹配方式。当晶体光轴与抽运光角度为 36.4°时,输出波长分别为 603 nm 和 2.54 μm。两个探测器都使用光电倍增管,符合测量装置采用时间幅度转换器(TAC)系统。将两探测器的输出转换为与二者时间间隔成正比的脉冲信号,再通过多道分析器(MCA)测量脉冲的幅度分布,经单道分析器(SCA)选择在符合窗口时间内的脉冲获得符合计数。根据(4)式,就可以计算出待定标探测器的量子效率,图 3 为实验装置示意图。

参考探测器探测到的光子纠缠的光子。因此就打破了系统的平衡,而不能实现两个探测器的同时定标。

两路探测器的输出信号分别经前放电路放大。参考通道的输出分为两路:一路输出给时间-幅度转换器作为 start 输入端的触发脉冲;另一路送计数器 1 计数。待定标通道输出也分为两路:一路信号经过延时电路后,输出给时间-幅度转换器作为 stop 输入端的触发脉冲;另一路送计数器 2 计数。从时间-幅度转换器输出的信号同样分为两路:一路信号送到多道分析器,用于测量脉冲幅度的分布,在计算机中存贮和分析;另一路信号经单道分析器选择后,落在符合时间窗口内的脉冲送符合计数器计数。

另外需要注意的是:所测量的单光子探测器量子效率并不是纯粹的探测器本身的量子效率,而是包括空间和光谱选择组件在内的测量装置的整体量子效率。如果想要标定探测器自身的量子效率,就必须引入修正因子,该修正因子要包括测量装置中除探测器以外的其他元件造成的光学损失。作为原理验证实验,这一项并不是本文的主要研究内容。

目前实验装置正在改进中,前期获得的数据不确定度较大,仅能从原理上验证此方法。但根据国外有关的报道,利用纠缠光子对方法对单光子探测器定标的实验结果与基于探测器的传统方法比较,差异仅约为 0.6%<sup>[5]</sup>,具备了相当好的一致性。

与传统的基于辐射源和基于探测器的方法相比,利用纠缠光子对的方法绝对定标单光子探测器量子效率的方案具有以下优点:

1)它是具有准确可复现性的绝对定标过程;

2)无需标准传递链,减少了因标准传递带来的误差;

3)参考传感器的量子效率对定标结果无影响;

4)能够获得“可见-红外”相关光子对,实现用高精度可见波段传感器定标红外波段传感器。

## 5 结 论

介绍了一种绝对定标单光子探测器量子效率的方法,进行了原理验证实验。该方法是利用参量下转换产生的光子对所具有的在方向、波长、偏振上的纠缠特性。即:在某一方向观察到一个光子就可以在它的共轭方向上观察到另一个确定的光子。与传统定标方法比较显示了较好的一致性,证实了利用该方法绝对定标探测器量子效率的可行性。对方案的细节进一步深入研究并调整完善实验装置后,测量不确定度有望减小。它不依赖于任何其他标准传递链,原理上为实现“无标准传递”的辐射定标提供了可能的手段,它将是值得我们研究和发展的一项绝对定标技术。

## 参 考 文 献

- 1 W. R. Blevin. Optical radiometry— one hundred years after Stefan and Boltzmann [C]. *Proc. the 2nd International Conference Held*, eds., N. P. Fox and D. H. Nettleton, 1988. 1~9
- 2 M. King, R. Greenstone. EOS Reference Handbook [M]. eds., EOS Project Science Office, NASA, 1999
- 3 G. Brida, M. Genovese, M. Gramegna *et al.*. Single-photon detector calibration by means of conditional polarization rotation [J]. *Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(2):488~492
- 4 D. N. Klyshko. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors [J]. *Sov J. Quantum Electron.*, 1980, **10**(9): 1112~1116
- 5 G. Brida, S. Castelletto, C. Novero *et al.*. Quantum-efficiency measurement of photo-detectors by means of correlated photons [J]. *Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(10): 1623~1627