基于参量下转换的 3.39 μm 中红外辐射源定标实验

盛文阳[1,2],李健军[2],夏茂鹏[2],庞伟伟[2],高冬阳[2],郑小兵[2]

(1. 安徽大学 物理与材料科学学院,安徽 合肥 230031;
2. 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)

摘 要:介绍了一种新型的基于参量下转换实现红外辐射源绝对辐亮度的定标方法。参量下转换过程产生 0.631 μm 和 3.39 μm 波段的一对相关光子,通过测量自发参量下转换和受激参量下转换两个过程中在 0.631 μm 波段光子的计数比值,可以获取 3.39 μm 的单位模式平均光子数,并进一步导出红外光源的辐亮度。介绍了定标原理、实验装置,分析了主要的测量不确定性因素,定标结果表明 OPO 激光器光谱辐亮度的合成标准不确定优于 1.18%。初步证实了通过探测可见波段光子计数实现红外辐射源的辐亮度定标的原理可行性。研究结果将有望应用于基于受激参量下转换的红外波段高精度定标以及红外 OPO 激光器等领域。

关键词:遥感定标; 红外辐亮度; 参量下转换; 准相位匹配; PPLN 晶体
中图分类号:O432.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.1004001

Investigation of 3.39 μm IR radiance calibration based on parametric down-conversion

Sheng Wenyang[1,2], Li Jianjun[2], Xia Maopeng[2], Pang Weiwei[2], Gao Dongyang[2], Zheng Xiaobing[2]

(1. School of Physics & Material Science, Anhui University, Hefei 230031, China; 2. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: A new absolute calibration method based on the parametric down-conversion was introduced. In the parametric down-conversion process, two correlated-photons were produced whose wavelengths were 0.631 μm and 3.39 μm, the average photon countsper mode of the 3.39 μm were obtained by measuring the ratio of 0.631 μm photon counts in the two processes including the spontaneous parametric down-conversion and the stimulated parametric down-conversion, and further radiance of the infrared source could be calculated. In this paper, the calibration principle and experimental device were described and the uncertainty of this method was analyzed. The results show that relative combined uncertainties of a OPO laser was better than 1.18% and prove the feasibility of radiance calibration of the infrared

收稿日期:2016-02-10; **修订日期**:2016-03-20
基金项目:国家 863 计划(2015AA123702);国家自然科学基金(11204318,61275173)
作者简介:盛文阳(1991-),女,硕士生,主要从事光学遥感器高精度辐射定标等方面的研究。Email:wenyang_sheng@126.com
导师简介:郑小兵(1969-),男,研究员,博士生导师,博士,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。Email:xbzheng@aiofm.ac.cn

radiation by detecting the photon counting in the visible band. The study results are expected to be used in the field of high precision calibration of infrared band based on stimulated parametric down-conversion and infrared OPO laser and other fields.

Key words: remote sensing calibration; IR radiance; parametric down-conversion; quasi-phase-matching; PPLN crystal

0 引 言

红外辐射是红外遥感信息的基本载体，而红外辐射定标是客观评价红外有关仪器的重要途径，是红外遥感信息定量化的关键技术之一。目前对中波红外辐射源的定标装置一般放置在液氮制冷的杜瓦罐中，通过构建低温环境进行红外弱信号的探测。由于该装置具有体积大，操作周期较长，不易携带的缺点，限制了红外定标技术的进一步发展。

基于上述原因，迫切需要发展一种不依赖低温制冷技术却能够实现中波红外辐亮度高精度定标的新型定标技术。它的优点主要体现在以下几个方面：(1) 整个定标过程是绝对的，测量结果不依赖于某一标准传递过程；(2) 无需测量空间立体角、光斑面积等几何因子等参数就能够实现红外辐射源的系统级定标；(3) 可采用可见光波段响应的探测器代替红外波段的探测器，且可见探测器不需要使用液氮或液氦制冷。由此可见利用新型定标技术定标红外辐射源辐亮度具有巨大的应用前景。

将参量下转换方法用于辐亮度定标的实验研究开始于 20 世纪 90 年代[1]，法国 INM[2]、意大利 IEN[3]、英国 NPL[4]和美国 NIST[5]等研究小组致力于分析定标不确定度来源和提高基于参量下转换定标技术不确定度的研究。1998 年意大利的 IEN 研究小组和美国的 NIST 研究小组分别采用激光光源和红外氩弧灯源作为红外信号源，制备出红外–可见非共线相关光子对，报道了定标不确定度优于 3%[6-8]。在国内，中国科学院安徽光学精密机械研究所首先开展了受激参量下转换方法定标 1 064 nm 近红外激光器辐亮度的实验研究，报道其相对标准不确定度为 5.87%[9]，随后该单位又定标了中温黑体辐射源辐亮度，报道了 1.53%的测量不确定度[10]。上述报道从实验上证明了该方法的可行性。上述报道都是针对近红外激光器辐亮度进行定标，为将该新型定标测量波段往中、远红外波段扩展，文中在前期的工作基础上，开展了中红外辐射源定标实验。文中利用自发参量下转换和受激参量下转换的两个过程，完成对连续波长可调谐(OPO)激光器在 3.39 μm 波段辐亮度的定标。实验中非线性介质选择的是周期性极化 PPLN 晶体，它的大非线性系数和其采用共线相位匹配方式可保证种子光与泵浦光在晶体端面完全重合，采用该种方式可获取最大的耦合效率，测量过程的信噪比高达 58 773:1，合成不确定度达到 1.18%。文中研究结果初步验证：基于参量下转换实现红外辐射源定标技术的可行性，该定标结果和物理模型为下一步常温黑体的辐射定标提供了实验依据。

1 定标理论模型

测量辐射源辐亮度的基本原理是基于自发参量下转换和受激参量下转换两个过程。当晶体前端面只有泵浦光并且泵浦光的偏振方向与晶体的主界面平行时发生自发参量下转换；待测辐射源发射的光与泵浦光在晶体前端面耦合时发生受激参量下转换，下转换过程满足能量和动量守恒。图 1 是基于参量下转换的原理示意图。

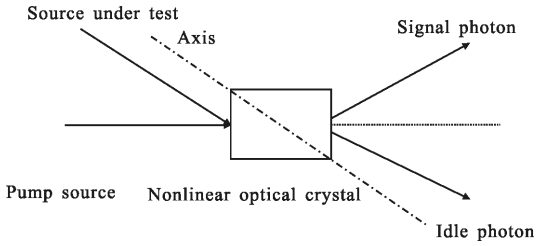

图 1 参量下转换原理示意图

Fig.1 Schematic figure of parametric down-conversion theory

针对参量下转换辐射定标的技术特点，要实现中长波红外辐射源的辐亮度定标，必须满足特定的相位匹配条件[11-12]。将待测源一路的下转换光子定为空闲光路，与之相关的另一下转换光路定为信号光路。这种新型定标方法是将对红外波段(空闲光)的

定标，转移到便于探测且探测技术较成熟的可见光波段上进行，而此时实验的目的主要集中在探测可见光波段(信号光)的光子数。G 表示增益因子，在空闲光方向加入待测辐射源光源，可得到受激下转换过程中的信号光子数[13]：

$$N^{\text{stim}}=(G-1)(N_i^{\text{in}}+1) \tag{1}$$

若在空闲光方向不加红外辐射源，则自发参量下转换时信号光子数为：

$$N^{\text{spont}}=(G-1) \tag{2}$$

结合公式(1)、(2)，可以推导待测红外光源单位模式的平均光子数 R 为：

$$R=N_i^{\text{in}}=\frac{N^{\text{stim}}}{N^{\text{spont}}} \tag{3}$$

根据公式(3)，只要测量自发参量下转换(不加待测光源)的信号光子数 N^{spont} 和受激参量下转换(加注待测光源)的信号光子数 N^{stim}，就可以得到红外待测光源的单位模式的平均光子数，R 与辐亮度之间是呈线性关系的。由公式(4)可见红外种子光源的单位模式平均光子数从微观上反映了它的光谱辐亮度[9-10]。

$$L_\lambda=\frac{hc^2}{\lambda^5}\left(\frac{N^{\text{stim}}}{N^{\text{spont}}}-1\right) \tag{4}$$

此式是整个实验系统的理论依据。h 为普朗克常数；c 为真空的光速大小；λ 为波长。这也为通过测量单位模式平均光子数推导辐亮度大小提供了理论依据。

2 定标装置

根据上述的理论模型，搭建了基于参量下转换定标红外辐射源辐亮度测量装置，如图 2 所示。

实验装置可以划分为三个模块，分别是准直泵浦光源和红外光源入射晶体模块、相关光子产生模块以及信号光子探测模块。

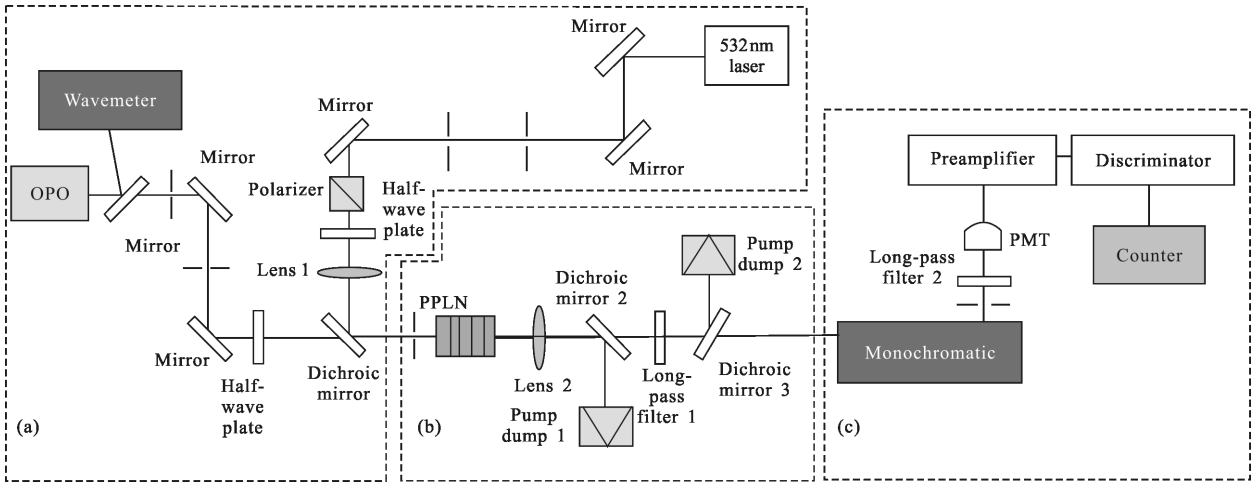

图 2 基于参量下转换红外辐亮度定标实验装置图

Fig.2 Experimental setup of infrared radiance calibration system based on the parametric amplification

图 2 中(a)是准直泵浦光源和红外种子光源共线入射非线性晶体中的部分。该部分的主要目的是将泵浦光和种子光共线准直入射晶体，并且使两者偏振态符合受激参量下转换的相位匹配条件。选择 532 nm 连续单波长激光器 (相干公司 Verdi-v18，线宽 ≤50 MHz)为泵浦源，泵浦光经两个小孔光阑、532 nm 的高反镜入射格兰泰勒棱镜中。两个小孔光阑保证了泵浦光光束的准直输出以及消除部分非高斯成分。再经 532 nm 半波片、长焦透镜 1(f=245 mm)聚焦入射 PPLN(50 mm×3 mm×1.5 mm)晶体。透镜 1 用于聚焦泵浦光并约束泵浦光的光斑直径小于 PPLN 晶体的高度，保证泵浦光完全入射 PPLN 晶体。

红外辐射源采用的是 OPO 激光器(OS 4500-HP+)输出的窄带线宽激光束作为种子光源。种子光源经平折镜、小孔光阑、折叠镜、镀银反射镜、半波片(硒化锌)，二向色镜准直入射 PPLN 晶体内。平折镜的作用是将一部分的种子光反射入射波长计(Bristol 621 MIR)中，进行波长实时检测，保证了红外波长输入的准确性。折叠镜的功能是调整种子光的高度，保

证了种子光与泵浦光具有相同的垂直高度，实现两者在垂直方向重合。半波片的作用是改变种子光的偏振方向。通过在 PPLN 晶体前放置一个小孔光阑，只需将两者调整为准直光后完全透过该小孔光阑，即保证种子光和泵浦光能够在晶体内完全重合。

图 2(b)所示的是参量下转换的产生、残余泵浦光的消除以及信号光准直入射单色仪的部分。非线性晶体选择的是 PPLN(周期性极化铌酸锂)晶体。种子光经过 690 nm 二向色镜 1 透射，532 nm 泵浦光经二向色镜 1 反射，两束光共线入射 PPLN 晶体，在晶体内部发生耦合效应，产生受激参量下转换的过程。由于泵浦光和信号光子共线，以泵浦光为准直光进行光路调节，采用倒序的方式在光路中依次放置透镜 2、567 nm 二向色镜、550 nm 长通滤光片、567 nm 的二向色镜、单色仪。透镜 2(f=90 mm)的作用是将产生的相关光子聚焦入射单色仪中。两个 576 nm 二向色镜和 550 nm 的长通滤光片的作用是消除泵浦光；通过将 567 nm 的二向色镜 45°放置，可避免泵浦光在多片镜子间来回反射增加的背景辐射。

图 2(c)为可见波段的相关光子探测部分。单色仪(卓立汉光 Omni-λ3005)的作用是选择相关光子的输出波长。在探测器 PMT 前面放置 3 mm 孔径光阑和 550 nm 的长通滤光片用于提高测量信噪比。探测器采用滨松的 R2949 型光电倍增管(PMT)，其输出信号是一系列相互分立的脉冲信号。将脉冲信号进行放大、甄别后，送至 994 计数器进行光子计数。将单色仪和探测器置于一个密封的黑箱子里，来减小杂散光对探测结果的影响。

3 测量结果及不确定度分析

3.1 参量下转换的光子速率与半波片的角度的关系

为了分析泵浦光的偏振特性对光子速率产生的影响，需要测量相关光子的输出光子速率与半波片的旋转角度的关系，以此来验证自发、受激参量下转换过程是否产生以及探测最大信噪比的位置。图3 所示为自发参量下转换和受激参量下转换的光子速率与半波片旋转角度的关系。

根据图 3 所示关系可知，当半波片旋转 45°时，自发参量下转换和受激参量下转换产生的光子计数速率均是最大值。这是由于参量下转换过程具有严格的偏振取向性，即只有一个特定的偏振方向的泵浦光与晶体作用产生参量下转换过程。通过改变泵浦光的偏振状态，它在特定偏振方向上的振幅投影值与半波片旋转角度呈三角函数($\sin^2 2\theta$)变化。

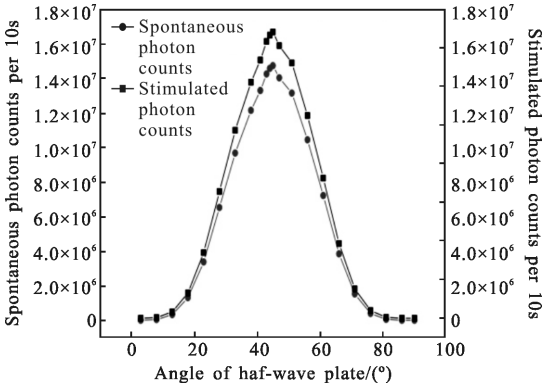

图 3 相关光子速率与半波片旋转角度关系

Fig.3 Photon counts versus the rotation angle of half-wave plate

3.2 受激参量下转换和自发参量下转换过程中可见波段光子计数率

图 4(a)、(b)所示分别为自发参量下转换过程所测光子计数和信噪比以及受激参量下转换过程测量

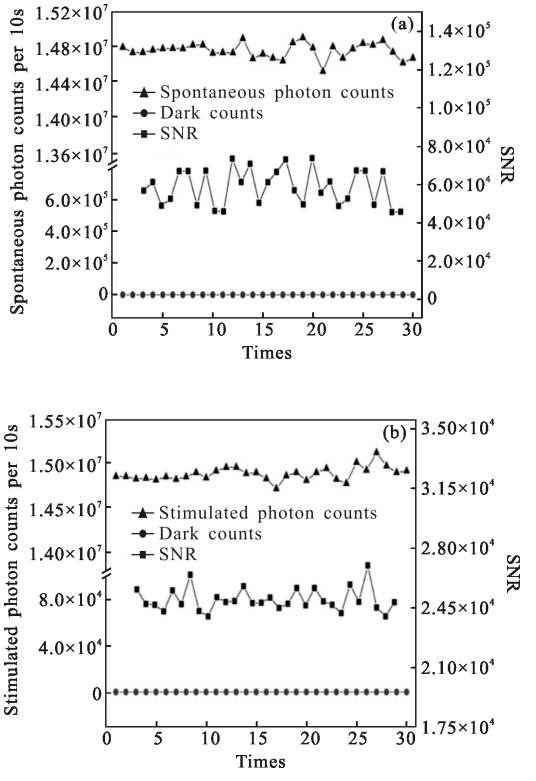

图 4 自发和受激参量下转换过程的光子速率与信噪比

Fig.4 Spontaneous parametric down-conversion and stimulated parametric down-conversion and SNR

的光子计数和信噪比,实验中泵浦光和 OPO 激光光源到达晶体前端面功率分别为 17 mW 和 1.48 mW。首先是没有加注 OPO 红外激光光源时,自发参量下转换探测到的信号光的平均光子数为 14 745 430;加注 OPO 红外激光光源后,产生了一个参量放大的过程,其信号光的平均光子数为 14 935 448,两个过程的信噪比分别为 61 987:1 和 62 765:1。此时的 R 值为 0.012 8。可以看出,所测量的受激参量下转换产生的信号光子数增幅较小,为获取准确的计数值,下面要对光子计数测量值进行修正。

3.3 光子计数率的非线性校正

根据 PMT 的物理特性,在高速的光子速率下会出现非线性效应和脉冲堆积效应, 其测量值已无法代表其真实值。为了判断上述测量值是否进入了 PMT 的非线性区,需要测量不同功率下的输出光子速率曲线, 这里的功率是指泵浦光入射晶体前所测功率值,其测量结果如图 5 所示。

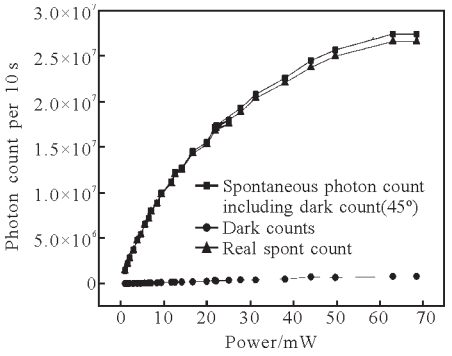

图 5 自发参量下转换光子数与泵浦激光功率的关系曲线图

Fig.5 Spontaneous parametric down-conversion photon counts at different pump powers

由图 5 可以看出,单光子探测器 PMT 在入射光子速率较低时为线性, 入射光子速率较高时为非线性。光子速率越高,非线性误差越大。实验中泵浦光入射晶体前的功率为 17 mW,由图 5 可以判断,光子计数进入了 PMT 的非线性区域。

对光子计数进行死时间校正并扣除脉冲堆积效应的影响,初步获得真实光子计数值,可以用下式表示:

$$N_c=\frac{N_t}{1-N_t\cdot\tau_d} \tag{5}$$

式中:N_t 表示测量的光子计数;τ_d 表示 PMT 的等效死时间为 33 ns[14];N_c 表示低功率下的真实光子计数。根据公式(5)对图 4(a)、(b)进行修正,修正结果如图 6(a)、(b)所示。

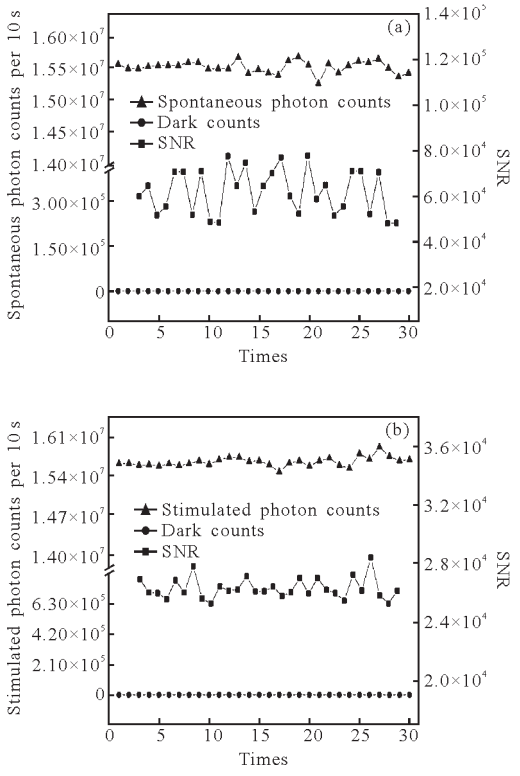

图 6 校正后自发参量下转换过程和受激参量下转换过程的光子速率与信噪比

Fig.6 Photon counts of spontaneous parametric down-conversion and stimulated parametric down-conversion and SNR after redress

图 6(a)、(b)所示分别为自发参量下转换过程以及受激参量下转换过程经过非线性修正后的光子计数值和信噪比。校正后自发参量下转换过程的平均光子计数为 15 499 677,受激参量下转换矫正后的光子计数为 15 709 758,两个过程的信噪比分别为 61 754:1 和 62 300:1,此时的 R 值为 0.013 5。

实验过程中, 自发参量下转换过程和受激参量下转换过程产生的相关光子信噪比在 104 量级,该套系统的高信噪比对后期辐亮度定标精度的提高具有重要的意义。

3.4 红外激光辐亮度结果比对及其不确定度分析

3.4.1 测量结果与传统方法比对

泵浦光和 OPO 激光光源到达晶体前端面功率分别为 17 mW 和 1.48 mW,根据公式(4)计算得到OPO 激光器在 3.39 μm 处的辐亮度为1.48×10^9(W/m^3·sr),

此时计算的辐亮度大小仅仅指的是入射到晶体中对受激参量下转换有贡献的那部分激光的辐亮度,不足以表示 OPO 激光器在此波段的真实辐亮度大小。由不确定度传递定律,红外辐射源光谱辐亮度的测量不确定度主受晶体的损耗、耦合因子 α、透镜的透过率 τ_l、带通滤光片的透过率 τ_t、二向色镜的透过率 τ_{ft}、晶体的透过率 τ_{ct}、两参量下转换过程的背景噪声等因素的影响[14-16]。因此,基于以上几个方面影响的考虑,辐亮度的计算公式应该修正为:

$$L_\lambda=\frac{1}{\alpha\cdot\tau}\cdot\left(\frac{N_c^{\text{stim}}-N_a}{N_c^{\text{spont}}-N_b}-1\right)\frac{hc^2}{\lambda^5} \tag{6}$$

其中,泵浦激光和待测激光均是垂直入射,二者在晶体内的夹角也比较小,在晶体内待测红外激光和泵浦激光的重合度可以近似地用它们在晶体前端面的重合程度来表示。将两个光斑在晶体前端面的重合面积比上两个光斑在晶体前端面的总面积,由于红外激光器入射晶体前端面的光斑直径远大于泵浦光照射晶体端面的光斑直径,面积重合因子近似为 1,即耦合因子为 1。由于实验采用多片中心密度滤光片,相关光子在多片滤光片之间来回反射形成了多光束干涉现象,使整个系统的透过率大于滤光片透射率的乘积。因此,需要采用多光束干涉理论对系统的透过率进行修正。假设有两片中性密度滤光片,两片的透过率分别为 τ_1、τ_2,根据多光束干涉理论,整个系统的透射率为:

$$\tau_s=\frac{\tau_1\tau_2}{1-(1-\tau_1)(1-\tau_2)} \tag{7}$$

式中:τ_s 表示整个系统的透射率。将实验系统晶体后放置的透镜 2、二向色镜 2 和 3 以及 550 nm 长通滤光片的透射率根据公式(7)反向叠加循环计算,得到修正后的系统透射率为 0.538,N_a 对应的是受激参量下转换时 PMT 测量的背景光子计数;N_b 是自发参量下转换时的背景光子计数。OPO 激光器辐射实际模式光子数为 0.013 5±0.011 8 photon/mode。综上,可得修正后的 3.39 μm 红外辐射源的辐亮度为 3.63×10^9(W/m^3·sr)。利用传统方法计算:

$$L_\lambda=\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}A\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}\cos\theta} \tag{8}$$

式中:P=1.48 mW,发散角 θ=2 mrad,激光器距离晶体前端面约 5 m,光束直径 2 mm,得到的辐亮度为 3.79×10^9(W/m^3·sr)。实验测量值与计算值两者的相对标准偏差为 4.22%。可以初步证实利用相关光子理论进行辐亮度定标的可行性。

3.4.2 不确定度分析过程

根据辐亮度测量方程,使用国家计量技术规范 JJF1059 -1999 的“测量不确定度评定与表示”进行计算。文中所有被测量的结果都是取多次测量的平均值,即

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{9}$$

式中:n 为测量次数;x_i 为第 i 次测量结果。

根据“规范”,测量结果的类标准不确定度在数值上等于均值的标准,即

$$u_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})}{n(n-1)}} \tag{10}$$

通常使用的是相对标准不确定度,即标准不确定度与均值的比值,以便进行数据对比。

$$u_{rx}=\frac{u_x}{\bar{x}} \tag{11}$$

如果被测量是通过非直接方法得到的,则其不确定度根据不确定度的传递定律得到。例如若被测量

$$y=f(x_1,x_2,\cdots,x_n) \tag{12}$$

则 y 的合成不确定度为:

$$u_y^2=\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2u_{x_1}^2+\left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2u_{x_2}^2+\cdots+\left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2u_{x_n}^2 \tag{13}$$

文中所有测量结果及其不确定度均严格依据上述规范获得。辐亮度的测量包括公式(6)中的自发参量下转换和受激参量下转换所带来的不确定度,其对辐亮度不确定度的评估方法如下:

$$U_{rL}=\frac{U_L}{L}\sqrt{\left(\frac{N_s^{\text{on}}}{N_s^{\text{on}}-N_s^{\text{off}}}\right)^2u_{rN_s^{\text{on}}}^2+\left(\frac{N_s^{\text{off}}}{N_s^{\text{on}}-N_s^{\text{off}}}\right)^2u_{rN_s^{\text{off}}}^2+u_{rN_s^{\text{off}}}^2} \tag{14}$$

表 1 中受激/自发比率(R-1)的不确定度是分别对受激和自发辐射光子数 30 次测量计数值相对标准偏差的平方和的均方根,则各相对标准不确定度的平方和的平方根即为最终的相对标准不确定度,综合考虑元器件的不确定度以及测量计数的相对标准不确定度,得到合成不确定度为 1.18%。

定标过程中的最大不确定度来源于信号光路的光子计数和背景计数的不确定度,采用功率控制器 LPC 稳定泵浦光功率和抑制实验室环境背景光,有望进一步降低测量的不确定度从而提高定标精度。

表 1 辐亮度测量结果的修正及不确定度

Tab.1 Correction and uncertainty of the radiance measurement

Uncertainty factor	Value	Relative standard uncertainty
Band-pass filter transmittance τ_t	0.745	0.000 5
Dichoric filter transmittance τ_{fi}	0.95	0.000 5
External transmittance of crystal τ_{ct}	0.991	0.000 2
Lens transmittance τ_l	0.933	0.000 2
Overlap factor α	1	–
Stimulated/spontaneous ratio without background counts $R-1$	0.013 5	0.011 8
Uncertainty of the radiance measurement	–	0.011 82

4 结 论

介绍了一种新型的绝对定标中红外辐射源辐亮度的方法,该测量过程是一种绝对的定标过程,不依赖于某一标准传递过程。根据其理论模型,利用可见波段探测器来标定红外辐射源的辐亮度, 不需要精确知道红外探测器的量子效率和测量红外光路的光子计数, 只需要对可见波段相关光子数进行数学统计,得到单位模式光子数,就可以反演红外辐射源的辐亮度。该方法具有精度高、信噪比好、动态范围大等优点。文中建立了基于参量下转换的中红外辐射定标系统,报道了优于 1.18%的合成不确定度。

参考文献:

[1] Klyshko D N. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors [J]. ***Sov Q E***, 1980, 10 (11): 1112-1116.

[2] Ghazi-Bellouati A, Razeta A, Bastie J, et al. Detectorcalibration at INM using a correlated photons source [J]. ***Eur Phys J Appl Phys***, 2006, 35(3): 211-216.

[3] Brida G, Castelletto S, Novro C. Measurement of quantum efficiency of photo detectors by parametric fluorescence [J]. ***Metrologia***, 1998, 35(4): 379-401.

[4] Cheung J Y, Chunnilall C J, Thomas P J, et al. Photon-counting measurement challenges[C]//SPIE, 2007, 6583: 65830G.

[5] Polyakov S V, Migdall A L. High accuracy verification of a correlated photon-based method for determining photon-counting detection efficiency [J]. ***Opt Express***, 2007, 15(4): 1390-1404.

[6] Lu Liang, Zhang Yinchao, Lin Yandong, et al. Research on absolute calibration of photo detector quantum-efficiency using entangled photons [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2012, 32 (1): 0112004. (in Chinese)

[7] Alan Migdall, Raju Datla, Alexander Sergienko, et al. Measuring absolute infrared spectral radiance with correlated visible photon: technique verification and measurement uncertainty[J]. ***Appl Opt***, 1998, 37(16): 3455-3463.

[8] Brida G, Castelletto S, Novero C, et al. Quantum-efficiency measurements of photodectors by means of correlated photons [J]. ***J Opt Soc Am B***, 1999, 16(6): 1623-1627.

[9] Lu Yunjun, Li Jianjun, Zhang Wei, et al. Investigation of a new absolute calibration method of IR radiance calibration[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2010, 30(5): 1315-1320. (in Chinese)

[10] Xue Xiangqun, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, et al. Investigation of mid-infrared radiance calibration based on parametric amplification [J]. ***Journal of Atmospheric and Environmental Optics***, 2010, 5(5): 358-365. (in Chinese)

[11] Zhang Baigang, Yao Jianquan, Zhang Hao, et al. Angle-tuned signal-resonated optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. ***Chinese Optics Letters***, 2003, 6(20): 346-349.

[12] Martin M Fejer, Magel G A, Dieter H Jundt, et al. Quasi-Phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances [J]. ***Jounal of Quantum***, 1992, 28 (11): 2631-2654.

[13] Shashi Prabhakar, Salla Gangi Reddy, Aadhi A, et al. Spatial distribution of spontaneous parametric down-conversion photons for higher order optical vortices [J]. ***Optics Communication***, 2014, 326: 64-69.

[14] Fei Yetai. Error Theory and Data Processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese)

[15] Brida G, Genovese M. Possibility of absolute calibration of analog detectors by using parametric down-conversion: a systematic study[J]. ***Opt Soc Am B***, 2006, 23(10): 2158-2193.

[16] Xia Maopeng, Li Jianjun, Gao Dongyang, et al. Detection of multimode spatial correlation of entangle photons to calibrate photomultiplier quantum-efficiency [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2015, 35(6): 151-158. (in Chinese)