

文章编号: 0253-2239(2010)05-1315-06

一种新型的红外辐亮度绝对定标方法研究

卢云君 李健军 张 伟 郑小兵

(中国科学院合肥物质科学研究院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 介绍了一种新型的辐亮度绝对定标的方法原理和实验装置。采用 355 nm 激光抽运偏硼酸钡(BBO)晶体, 产生两个下转换光子波长分别为 532.75 nm 和 1064 nm。利用这对可见-红外下转换相关光子对在时间、空间上的高度相关性, 在红外下转换光子方向注入 1064 nm 待测激光光源, 通过测量 532.75 nm 的下转换光子信号的光子计数, 实现 1064 nm 激光光源辐亮度的绝对定标, 并将红外波段的测量转移到了可见光谱区域内。改变待测激光光源的功率, 实验结果显示具有较好的线性。实验过程中设置输入光功率为 3.39 mW, 在对系统的各项损耗和效率进行评估的基础上, 测量得到相应的辐亮度大小为 $4.09 \times 10^{17} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 相对不确定度为 4.78%。

关键词 遥感; 绝对定标; 参量下转换; 辐亮度; 相关光子

中图分类号 O432 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1315

Investigation of a New Absolute Calibration Method of IR Radiance Calibration

Lu Yunjun Li Jianjun Zhang Wei Zheng Xiaobing

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Anhui, Hefei 230031, China)

Abstract A new absolute method of radiance calibration was introduced, including the principle and its experimental setup. An ultraviolet laser (355 nm) was used to pump the nonlinear crystal BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$), producing two correlated-photons whose wavelengths were 532.75 nm and 1064 nm, respectively. The under-calibrated laser was injected along the propagation of the infrared down-converted photons. With the high correlativity of the two VIS-IR correlated photons, through the measurement of the visible down-converted photons, the radiance of the injected laser source can be calculated, allowing the radiance of an infrared source can be measured with the high-quality visible detectors. The measurement result shows good linearity at different power of injected laser. At last, based on the estimate of the efficiency factor of the system, the radiance at a fixed power of 3.39 mW was calibrated, with the result $4.09 \times 10^{17} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ and its relative uncertainty 4.78%.

Key words remote sensing; absolute calibration; parametric down-conversion; radiance; correlated photons

1 引 言

近年来, 由于空间遥感、环境监测等领域的定量化水平不断提高, 光辐射定标成为保证遥感数据精度和可利用价值的重要支撑技术。它在大气层外太阳总辐射的长期监测、全球热量平衡与气候变化和海洋

初级生产力的评估等基础研究中发挥着基础性的关键作用。目前在可见波段实验室的定标精度能够达到 0.03% 的水平^[1]。而在短波红外波段(1~2.5 μm)初级标准辐亮度标准的精度可达 0.2%, 但国内外空间遥感器在这一波段的精度很难优于 5%^[2]。

收稿日期: 2009-03-26; 收到修改稿日期: 2009-07-06

基金项目: 中国科学院创新基金(CXJJ-09-S16)资助课题。

作者简介: 卢云君(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事基于参量下转换的光辐射精密测量方面的研究。

E-mail: luyj668@163.com

导师简介: 郑小兵(1969—), 博士, 研究员, 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等方面的研究。E-mail: xbzhen@aiofm.ac.cn

红外定标精度的落后有其机理和技术方面的原因,主要在于:1)由于受到工作环境温度的影响,通常情况下红外探测器的探测率低于可见光探测器,造成了较差的噪声等效功率;2)由于红外器件的结构非均匀性、光敏面的不完整性、非线性等原因,器件之间的个别差异明显,影响了标准量值传递的可靠性;3)红外探测器往往需要配置复杂和昂贵的致冷器件,限制了在不同工作平台的应用可行性。

相关光子定标方法是一种新型的辐射定标方法,将红外光和抽运光在非线性晶体内混合产生三波混频效应,将红外光子信号转移到可见光信号进行测量,由于采用可见光探测器“间接”测量红外光信号,新型定标方法在原理上应具有更高的定标精度。1976年美国国家宇航局(NASA)戈达德空间飞行中心的 Abbas 等^[3]预言利用相关光子方法实现短波红外到中波红外天文目标的观测。1978年美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室的 Gurski 等^[4]利用参量上转换定标技术成功实现了 3.2~5.0 μm 的红外光与 1.064 μm 的抽运光混频产生 0.8~0.88 μm 的可见光子。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-可见相关光子对,报道了定标不确定度优于 3%^[5,6]。中国科学院安徽光机所开展了相关光子高精度定标光电探测器量子效率研究,在 633,702 和 789 nm 报道的定标不确定度优于 5.8%^[7,8]。在相关光子红外辐射度定标方法中,国外实验室大多选择参量介质为 I 类晶体,非共线相位匹配方式,这样容易造成待测的红外辐射源与抽运源耦合效率降低。若采用共线相位匹配方式,可以提高红外辐射源与抽运源的耦合效率,也即晶体中发生受激参量下转换。

本文首先从理论上推导利用相关光子方法实现红外辐射定标的原理。利用 II 类 BBO 晶体的共线相位匹配技术,实现对待测激光光源的单体辐射度的绝对定标。描述了实验方案,分析了实验系统中各项光学损耗以及耦合因子,并对定标不确定度进行了相应的评估。

2 定标原理

任何一种辐射源,其辐亮度与其单位模式光子数之间满足

$$L_\lambda = L_\lambda^0 \langle n_\lambda \rangle, \quad (1)$$

式中 $\langle n_\lambda \rangle$ 为辐射源的单位模式光子数,也即光子简并度,是处于一个模式中的光子数。 L_λ^0 是单位模式

光子数为 1 时辐射源的辐亮度大小。对于线偏振辐射源来说, L_λ^0 大小为 hc^2/λ^5 ;对于完全非偏振辐射源来说, L_λ^0 的大小为 $2hc^2/\lambda^5$ 。主要是由于非偏振光波因偏振态的不同而导致模式数是线偏振光的 2 倍^[9]。 h 为普朗克常数, c 为真空中的光速大小, λ 为波长。因此,测量单位模式光子数就直接给出辐射源的辐亮度大小。

利用自发参量下转换和受激参量下转换就可以实现单位模式光子数的测量。参量下转换过程如图 1 所示。当一束抽运激光入射到非线性晶体上时,会以一定的转换效率自发分裂为频率为 ω_s 的信号光子和频率为 ω_i 的闲频光子,这个过程满足能量和动量守恒条件,也即相位匹配条件:

$$\begin{cases} \omega_p = \omega_s + \omega_i, \\ \mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i, \end{cases} \quad (2)$$

式中 ω_p , ω_s 和 ω_i 分别代表抽运光、信号光和闲频光的频率; \mathbf{k}_p , \mathbf{k}_s 和 \mathbf{k}_i 分别代表抽运光、信号光和闲频光的波矢。

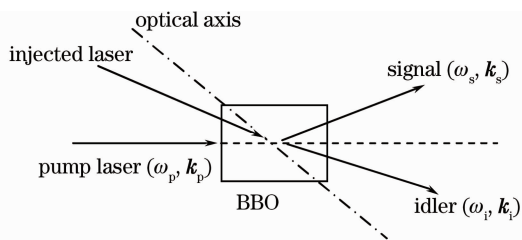


图 1 自发参量下转换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the spontaneous parametric down-conversion

这种自发参量下转换过程产生的两下转换光子总是同时的,具有时间、空间和偏振等高度的相关性。因此,探测到其中一个光子,就可以确定另一个光子的存在。本文正是利用这种相关性,采用紫外激光抽运非线性晶体产生可见-红外相关光子对,通过测量可见下转换光子来实现对红外下转换光子的测量。

单独对信号光和闲频光从概念上进行区分是没有意义的,两者的地位是对等的。假设可见下转换光子为信号光,红外下转换光子对应为闲频光。考虑最一般的情形,即在信号光和闲频光的方向均有激励光源,则晶体的输出端信号光的光子数为^[10]

$$N_s = GN_s^{\text{in}} + (G-1)(N_i^{\text{in}} + 1), \quad (3)$$

式中 G 表示增益, N_s^{in} 表示沿着信号光方向输入的光子数, N_i^{in} 表示沿着闲频光方向输入的光子数, N_s 表示晶体输出端信号光的光子数。对于本实验,是将待测激光沿着闲频光方向入射到晶体上,则此

一步减小晶体中散射光对测量结果的影响。

信号提取部分:探测器采用日本滨松的 R2949 型光电倍增管。参量下转换光场属于极弱光场,采用光电倍增管进行探测时,其输出信号呈现的是一系列相互分立的电流脉冲。将此脉冲信号进行放大、甄别以后,送至计数器进行脉冲计数。

4 实验结果

4.1 受激参量下转换与待测激光光源的偏振态关系

在图 2 中,待测激光的偏振态是垂直的,经过分束镜反射后仍保持垂直方向不变,通过 1064 nm 半波片后变成水平偏振光。晶体的主截面在水平面内,光入射到晶体中为 e 光,满足参量下转换相位匹配条件。保持抽运激光功率和待测激光功率不变,通过改变待测激光偏振方向和半波片主轴方向之间的夹角,测量相应的信号下转换光子的光子计数值。当夹角为 45° 时,对应的待测激光是水平偏振,入射到晶体上时为 e 光,从图 3 中可以看出信号光子计数值达到最大;夹角为 0° 和 90° 时,光的偏振态保持不变,入射到晶体中为 o 光,与红外下转换光子的偏振方向垂直,此时信号光子计数值最小。由此可以看出受激参量下转换过程对待测激光具有偏振敏感性。

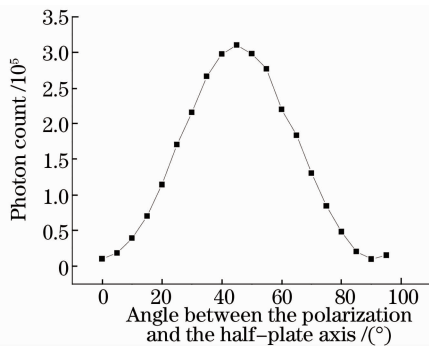


图 3 受激参量下转换对待测激光的偏振敏感性测试曲线

Fig. 3 Polarization sensitivity curve of measured laser based on excited parametric down-conversion

4.2 单位模式光子数的测量结果

将快门关闭,测量自发参量下转换光子信号,然后旋转抽运光路上的半波片,改变抽运光的偏振态,破坏参量下转换的相位匹配条件,测量自发参量下转换情形下的背景计数并加以扣除后就可以得到自发参量下转换情形时的光子计数 N_s^{off} ;打开快门,按照同样的方法测量得到 N_s^{on} 。然后根据(6)式就能得到单位模式光子数大小。

保持抽运激光功率约 13 mW 不变,改变待测激光的光功率大小,测量相应的单位模式光子数,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,单位模式光子数的大小与辐射源的光功率之间是正比关系。采用线性拟和,可以得到其拟和方程如下:

$$y = 21.614x + 2.022, \quad (9)$$

式中 x 代表晶体前端待测激光功率的大小, y 代表测量的单位模式光子数大小。拟和的相关系数为 0.993。

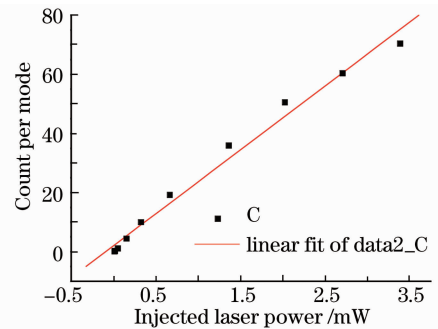


图 4 改变待测激光功率,单位模式光子数的测量结果

Fig. 4 Photon counts per mode at different injected laser power

4.3 待测源辐亮度的绝对测量结果以及不确定度评估

4.3.1 待测源辐亮度的测量结果

抽运光功率仍选择 13 mW,由(2)式得到单位模式光子数为 70.38。同时,挡住分束镜前的抽运激光,用标准探测器测量晶体前端面处待测激光的光功率为 3.39 mW。

由于本实验中待测源为线偏振激光,因此,由(7)式计算得到辐亮度为 $3.06 \times 10^{15} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。此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效的那部分激光的辐亮度。而对于晶体前面入射光束,需要考虑晶体损耗、耦合因子以及带宽修正因子。

1) 晶体损耗

晶体损耗包含了两个部分:1)晶体的入射端面对待测激光的反射;2)晶体内部对下转换信号光子的吸收和散射损耗。前者直接由厂家提供,大小为 5.46%;后者是通过晶体的整体透射率,结合前后端面的反射系数就可以求出晶体的吸收和散射损耗。由于受激下转换过程是在整个晶体区域内发生的,因此,对下转换的吸收和散射损耗采用半长度内的损耗来代替,最终得到相应的损耗系数为 0.07%。

2) 耦合因子^[11]

耦合因子描述的是待测光源中真正起到受激参量下转换作用的效率。它的评价包含了两个方面。

首先,待测辐射源在晶体中与抽运光的重合程度。只有那些落在抽运激光区域的待测激光才会对受激参量下转换有贡献。其次,在抽运光和待测激光重合的区域,还需要考虑相位匹配条件,即待测激光与红外下转换光子(1064 nm 闲频光子)的方向重合程度。

对于 II 类共线相位匹配情形,下转换光子和抽运激光的方向是相同的,而待测激光和抽运激光在晶体前端是调共轴的。因此,待测激光与红外下转换光子方向的重合程度很高,实验中测量值为 0.9999(9)。此外,由于抽运激光和待测激光均是垂直入射,二者在晶体内的夹角也很小,在晶体内待测激光和抽运激光的重合程度可以近似为它们在晶体入射端面的重合程度。将两个光斑在晶体端面的重合面积比上两个光斑在晶体端面上的总面积,得到面积重合因子为 0.4778。

3) 带宽修正因子

由于红外待测激光是窄带激光,根据相位匹配条件,与其对应的可见下转换光子的带宽也很窄。而在可见下转换光路上进行信号提取时,所加的干涉滤光片带宽要比此带宽大很多。因此,光电倍增管探测的光子就包含了与红外源相对应的波长(1064 nm 闲频光子)不相关的下转换光子,从而导致测量光子数比实际的信号光子数要大。

根据(6)式,单位模式光子数可表示为

$$n_i^{\text{in}} = \frac{N_s^{\text{on}} - N_s^{\text{off}}}{N_s^{\text{off}}}, \quad (10)$$

可以看出,分子不受带宽大小的影响,与红外源不相关的下转换光子在两次相减中抵消掉;而分母明显与带宽的选取直接相关。因此,需要考虑这种带宽对单位模式光子数测量所带来的影响。具体的修正方法是将单位模式光子数乘以一项修正因子 $A_{\Delta\lambda}$ ^[5]:

$$A_{\Delta\lambda} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_i}, \quad (11)$$

其中 $\Delta\lambda_s$ 是可见下转换光子光路上实际测量的光谱带宽; $\Delta\lambda_i$ 是与待测红外辐射源相关的可见下转换光子所对应的光谱带宽。对于待测的 1064 nm 激光器,其光谱范围约为 0.2 nm,抽运光波长一定,信号光子波长为 532 nm,根据相位匹配条件可以得到对应的信号下转换光子光谱带宽为 0.05 nm。Andover 公司 532 nm 干涉滤光片带宽的 3 nm,代入(11)式中可得到带宽修正因子为 60。

4.3.2 待测源辐亮度测量的不确定度评估分析

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。本文所有被测量的结果都是取多次测量的平均值,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (12)$$

式中 n 为测量次数, x_i 为第 i 次测量结果。

根据“测量不确定度评定与表示”,测量结果的标准不确定度在数值上等于均值的标准偏差,即

$$u_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (13)$$

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

$$u_{rx} = \frac{u_x}{\bar{x}}. \quad (14)$$

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

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (15)$$

则 y 的合成不确定度为

$$u_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 u_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 u_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 u_{x_n}^2. \quad (16)$$

辐亮度的测量包括(7)式中的自发参量下转换和受激参量下转换的所带来的不确定度,其对辐亮度不确定度的评估方法如下:

$$U_{rL} = \frac{U_L}{L} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{N_s^{\text{on}}}{N_s^{\text{on}} - N_s^{\text{off}}}\right)^2 u_{rN_s^{\text{on}}}^2 + \left(\frac{N_s^{\text{off}}}{N_s^{\text{on}} - N_s^{\text{off}}}\right)^2 u_{rN_s^{\text{off}}}^2 + u_{rN_s^{\text{off}}}^2}, \quad (17)$$

同理,辐亮度系统效率的各项因子也是按照上述方法进行评估。最后得到联合不确定度结果如表 1 所示。

综上,得到修正后的辐亮度结果为 $4.09 \times 10^{17} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,相对不确定度为 4.77%。修正过程结果如表 2 所示,不确定度的评估结果如表 2 所示。对于激光光源来说,由于其线宽很窄,发散角很小等特点,导致其辐亮度很高。若激光的发散角为 2 mrad,线宽为 0.2 nm,对于直径为 2 mm 的激光来说,根据辐亮度的定义可以估算其亮度在 $10^{16} \sim 10^{18}$ 量级左右 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$]。与表 1 中最终的辐亮度结果的量级也是接近的。

表 1 辐亮度测量结果的不确定度(相对标准不确定度)

Table 1 Uncertainty of the radiance measurement (relative standard deviation)

Photon counts of spontaneous parametric down-conversion	Photon counts of parametric amplification	Crystal loss	Overlap factor	Combined uncertainty
0.0096	0.0422	4.198×10^{-4}	≤ 0.02	0.0477

表 2 辐亮度测量结果的修正

Table 2 Correction of the radiance measurement result

Injected laser power /mW	Radiance before crystal / $[10^{15} \text{ W} /(\text{m}^2 \cdot \text{sr})]$	Crystal loss		Overlap factor		Band-with factor	Ultimate radiance before the crystal / $[10^{17} \text{ W} /(\text{m}^2 \cdot \text{sr})]$
		Reflection of the front face	Absorption and scattering of the half crystal length	directional overlap	Spatial overlap		
3.39	3.06	0.0055	0.0007	0.9999(9)	0.4778	60	4.09

5 结 论

介绍了一种新型的绝对定标光源辐亮度的方法。利用参量下转换光子之间的相关特性,即探测到其中一个信号光子的存在,就可以确定另一个闲频光子的存在。待测激光叠加在闲频光路上,由于这种相关特性,导致了信号光路上光子也发生相应的变化。通过测量信号光子数的变化,可以得到待测激光的辐亮度大小。

与传统的基于标准辐射源和基于标准探测器的辐亮度定标方法相比,基于参量下转换效应的辐亮度测量方法具有以下的几个优势:1)它实现的是一种绝对的无标准传递的测量,不需要外部绝对的参考标准,即探测器的量子效率不需要定标;2)通过产生可见—红外相关光子对,实现了将红外波段的辐射测量转移到了可见波段;3)由于这种方法测量辐亮度不需要测量面积和立体角因子,因此可以用于发散角很小的辐射源的测量,同时还减少了测量过程中的不确定度来源。

参 考 文 献

- Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 749~752
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器[J]. *光学学报*, 2000, **21**(6): 749~752
- M. King, etc. 1999 EOS Reference Handbook, EOS Project

Science Office[R]. NASA, 1999

- M. M. Abbas, T. Kostiuk, K. W. Ogilvie. Infrared upconversion for astronomical applications [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(4): 961~970
- T. R. Gurski, H. W. Epps, S. P. Maran. Upconversion of broadband infrared spectra [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(8): 1238~1242
- G. Brida, S. Castelletto, C. Novero. Parametric amplification for radiance measurements [J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 247~250
- E. Dauler, A. Migdall, N. Boeuf *et al.*. Measuring absolute infrared spectral radiance with correlated photons: new arrangements for improved uncertainty and extended IR range [J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 295~300
- Feng Yu, Zheng Xiaobing, Li Jianjun *et al.*. Optical radiometric calibration based on correlated photons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 457~460
冯 瑜, 郑小兵, 张 伟等. 基于相关光子的光辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 457~460
- Jianjun Li, Xiaobing Zheng, Yunjun Lu *et al.*. Quantum efficiency calibration of opto-electronic detector by means of correlated photons method [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(7): 472~475
- Chen Yuqing, Wang Jinghuan. Principle of Laser [M]. Hangzhou: the Press of Zhejiang University, 1992. 18~19
陈钰清, 王静环. 激光原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 18~19
- W. H. Louisell, A. Yariv, A. E. Siegman. Quantum fluctuations and noise in parametric processes I [J]. *Phys. Rev.*, 1961, **124**: 1646~1654
- 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