

光纤模式混合器在差分吸收光谱 系统中的应用研究*

司福祺[†] 刘建国 谢品华 张玉钧 李 昂 秦 敏
李玉金 冀 科 李素文 刘文清

(中国科学院环境光学与技术重点实验室, 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2005 年 12 月 13 日收到; 2006 年 2 月 22 日收到修改稿)

差分吸收光谱技术(DOAS)已经发展为监测对流层痕量气体的重要技术, 一般采用光电倍增管(PMT)作为探测器. 由于光电二极管阵列(PDA)在多道探测及像元灵敏性方面的优势, 采用 PDA 代替扫描探测装置将能改善系统剩余噪声, 提高系统性能. 但实际应用中由于使用收发一体 Cassegrain 望远镜造成灯谱与大气谱结构不统一, 在消除 PDA 像元间差异的过程中给系统带来误差, 从而导致剩余噪声的标准偏差达到 1.4×10^{-3} . 根据光纤扰模原理在系统中加入自制光纤模式混合器很好的解决了上述难题, 在实际应用中起到良好的作用, 系统剩余噪声的标准偏差为 3.4×10^{-4} .

关键词: 差分吸收光谱, 扰模, 模式混合器, 剩余噪声

PACC: 8670L

1. 引 言

差分吸收光谱(DOAS)技术自 Platt 等^[1,2]测量大气痕量气体以来, 已成功地应用于对流层和平流层痕量气体的测量, 目前是一种研究大气痕量气体及气溶胶的有力手段^[3-7]. DOAS 技术根据气体分子的“指纹”吸收特性, 能够观测在紫外和可见谱段有特征吸收的许多分子, 如 NO_2 , NO , NH_3 , ClO , IO , O_3 , SO_2 , CS_2 , HCHO 和芳香烃有机物. DOAS 技术有几处重要的优势, 首先, 是上面提到的可以利用一台仪器观测多种物质, 这点在确定多种物质的化学耦合及野外实验等方面有很大的优势; 其次, 因为 DOAS 技术使用实验测定的标准截面做参考, 无需使用标准气体进行校准; 第三, 大气成分在几百到几千米长的范围内被测量, 与点式仪器相比结果更具普遍性. 最后, 有些物质如硝酸基仅能通过 DOAS 技术测量, 同时这项技术还具有探测未知大气物质的特性.

在 DOAS 测量系统中通常采用 PMT 和扫描装置进行探测^[3,4], 这种扫描探测系统由于大气湍流的影

响限制了它的积分时间, 同时机械的色散原件导致其探测光谱范围的局限, 不能同时完成多种物质的测量. PDA 由于其能同时获取整个谱段的光谱信息, 具有同时监测多种气体组分的能力, 另外由于其在测量期间同时记录整条光谱因此克服了扫描探测系统无法消除的大气湍流所造成的闪烁噪声. 还由于其在像元上的优越性, 理论上采用 PDA 替换扫描探测系统, 将会改善系统性能. 但实际应用中发现, 如果只是简单的用 PDA 代替 PMT, 由于收发一体的 Cassegrain 望远镜的使用造成在测量大气时发射和接收的光均匀圆形光环, 而测量氙灯谱时为圆形光斑, PDA 的使用需要对其像元间的差异进行校正, 这里采用的方法为大气谱除以灯谱, 如上所述, 灯谱与大气谱结构的不统一, 给系统带来误差, 增大剩余噪声, 影响其探测下限.

实验中, 根据光纤扰模原理, 设计出光纤模式混合器, 将光纤中传输的高阶模态进行混合使输出为圆形光斑解决了灯谱与大气谱结构不统一的问题^[8]. 在实际应用中通过对 SO_2 , O_3 气体的监测发现, 该方法将系统的测量噪声的标准偏差由 $6 \times$

* 国家高技术研究发展计划(863)(批准号:2005AA641010)和科学院创新基金(批准号:KJCX2-SW-H08)资助的课题.

[†] E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

10^{-4} 降为 1.4×10^{-4} ,对于剩余噪声的标准偏差则由 1.4×10^{-3} 降为 3.4×10^{-4} ,提高了 4—5 倍,改善了系统的性能.

2. 实验描述

2.1. DOAS 测量系统

PDA-DOAS 系统结构如图 1 所示.系统采用收发一体的望远镜,光源被设计在望远镜内部,使整个系统结构紧凑,小巧.仪器的工作过程是氙灯发出的光由望远镜中的主镜 M 准直为平行光射向远处的角反射镜,从角反射镜反回的光被主镜会聚,经次镜 M_1 再次反射后,最后聚集在光纤的入射端面.光通过光纤耦合到光谱仪的入射狭缝,经光谱仪分光后,被 PDA 接收并转换为电信号,输出的电信号经 A/D 转换后通过串口传给 PC 机中进行处理.

探测器选用的是日本滨松公司的型号为 C5964-1010 的 1024 像元的 PDA,每个像元高 2.5 mm,宽 $25 \mu\text{m}$.

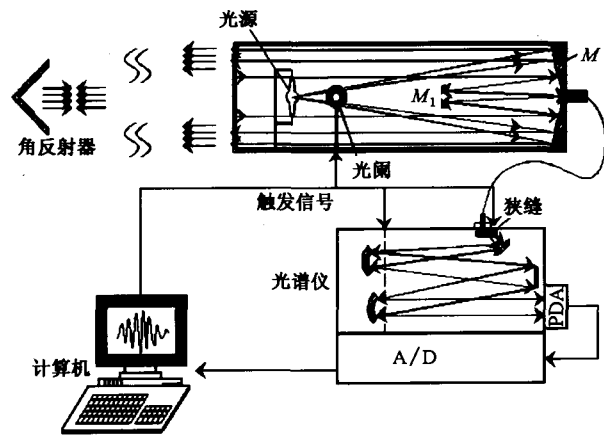


图 1 DOAS 系统结构图

2.2. 初始测量结果

图 2 为简单的用 PDA 代替 PMT 系统后的剩余噪声的标准偏差计算结果,大气差分吸收谱(经过对数运算,多项式拟合去除慢变化后的差分吸收谱)在去除 SO_2 和 O_3 的吸收后,剩余噪声的峰峰值为 7.7×10^{-3} ,标准偏差高达 1.4×10^{-3} ,与传统 PMT-DOAS 系统 10^{-4} 量级相比有较大差距.

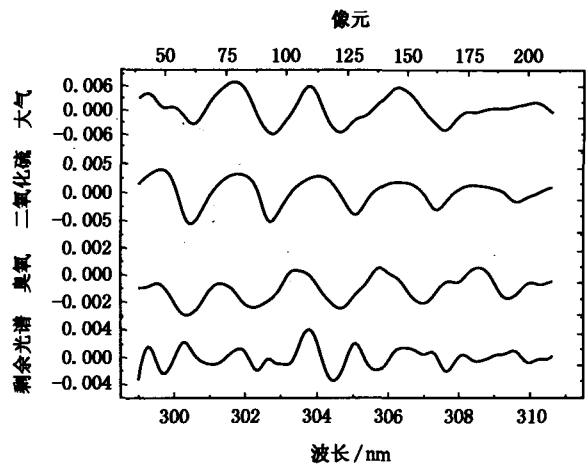


图 2 初始系统的剩余噪声的标准偏差计算过程

3. 问题分析

3.1. Cassegrain 望远镜的影响

系统中使用的是 Cassegrain 型望远镜,通过光路的另一端放置的角反射器将发射和接收设计成一体.为了实现望远镜的收发功能,将望远镜的主镜分为两部分使用,如图 3 所示.外环被用来作为发射使用,中间一部分是用来接收返回的光.由于望远镜内光学元件在光轴上的遮挡,因此,出射光斑不是一个满圆形,而是一个环状,当光线通过角反射器返回被望远镜接收到的也为光环,即测量大气时光纤传导的为光环.而当望远镜测灯时,图 1 中的光阑转动,挡住灯射向望远镜主镜的光线,仅使光线通过光阑上的小孔和 M_1 间的缝隙入射到光纤中,这时光纤传输的为圆形光斑.这样收发一体的望远镜设计就造成了测灯和测大气时光谱仪接收的光线结构不同.

3.2. PDA 对系统的影响

PDA 用于 DOAS 系统测量光谱的一个主要问题是存在像元间的个体差异这个原理性的缺点.差分吸收光谱法从大气痕量气体所产生的吸收线得到的差分光学密度在 0.1%—0.001% 的量级,尽管光电二极管阵列能够在一次读出同时记录下很宽的一段光谱而越来越被广泛用作 DOAS 探测器,但这一类型的光学多道分析仪在单元像元上的灵敏度差异却在 1% 的量级^[9];此外,水汽和尘埃也导致产生 PDA 的固定结构.因此如何从测量的大气光谱中正确去

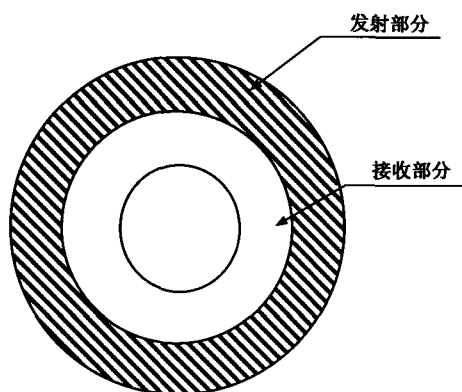


图3 望远镜主镜功能示意图

除 PDA 的固定结构是非常重要的. 对于较小光学密度的测量, 低于像元与像元差异 1—3 个量级, 像元与像元间的差异必须校准. 对于 DOAS 仪器, 在准确保持不变的照明下记录单独的像元的灵敏度参考谱是很困难的. 到目前为止, 有以下的方法用于修正 PDA 的固定结构: 第一, 参考光路在每次测量大气光谱后测量氙灯的光谱; 第二, 采用多通道扫描技术, 这种方法的思想是将多道探测与扫描技术相结合^[10,11].

在这里系统采用的第一种方法校正 PDA 像元间的差异, 即用大气光谱除以相应的氙灯谱来移去 PDA 像元的固定结构. 这种方法的实际灵敏度在很大程度上取决于单个像元的照明情况, 即入射角度以及整个像元面的光强分布. 但是在 DOAS 系统中, 如前所述, 由于参考光路与大气测量光路的不同, 造成灯谱与大气谱结构不统一, 因此, 对于较小的吸收由于参考光谱与测量光谱之间像元灵敏度的不匹配而受到限制, 两条光谱相除只移去了 PDA 像元的固定结构却带来了由于测量光路不同造成的剩余噪声.

4. 解决方案

4.1. 实验室验证

根据第三部分的分析, 造成 PDA-DOAS 系统巨大剩余噪声的原因就是测灯与测大气时光谱仪接收的光信息的不同, 即在测灯时系统接收的为光斑信号, 而在测大气时为光环信号. 如果能将上述两种时刻的光信息同一化就可以降低 PDA-DOAS 系统的剩余噪声, 在这里, 系统采用光纤扰模的技术将测大气时的光环信号转换为光斑信号.

当光纤传导光信号时, 如果光纤受到外力造成

曲率半径较小的弯曲, 此时, 由于在光纤内部的不同模式光信号传输距离的改变而造成不同高阶模态的混合. 在这里, 系统采用这种光纤扰模的原理设计出简单的光纤扰模器, 并在实验中进行验证实验. 图 4 是实验室验证实验的示意图, 光源采用的 HeNe 激光器作为实验光源, 光纤采用单根 200 μm 的紫外石英光纤, 数值孔径为 0.22 ± 0.002 .

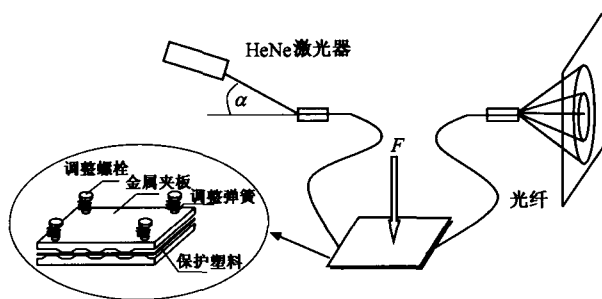


图4 实验室模拟实验示意图

图 4 中的光纤模式混合器由两层带凹凸结构的金属夹板、塑料保护层、以及调整螺母和弹簧组成. 将光纤经塑料保护层放入两层金属夹板间, 调整螺母给光纤加力, 使之产生弯曲形变, 从而发生扰模效应, 改变光纤内传输光线的模式.

实验中, 首先使 α 为 0 度, 即激光水平进入光纤中, 此时在接收板上出现圆形光斑, 后改变 α , 则有环形光环出现, 此时的情形与 PDA-DOAS 测大气时相同. 调整螺母, 给金属夹板施加压力, 使光纤产生形变, 接收板上的环形光环将逐渐均匀化, 最后形成亮度均匀的光斑. 这时, 无论怎样调整 α ($< 8^\circ$), 在接收板上都只会出现光斑, 而不是光环. 这说明, 系统设计的光纤模式混合器改变了光纤中传输光信号的模式, 起到使高阶模态混合输出光斑的作用.

4.2. 实际应用

实际应用中, 在图 1 的基础上加上光纤模式混合器, 即将传输光纤上加上光纤模式混合器, 使光信号实现均匀化.

图 5 为测量大气时使用光纤模式混合器前后光纤出射端输出的光斑照片, (a) 为没有使用光纤模式混合器时的光斑形状, (b) 为使用后的形状. 从图上可以看出, 在使用光纤模式混合器后光斑形状由光环转换为光斑, 这说明光纤模式混合器改变了光纤中传输光信号的模式, 起到使高阶模态混合输出光斑的作用.

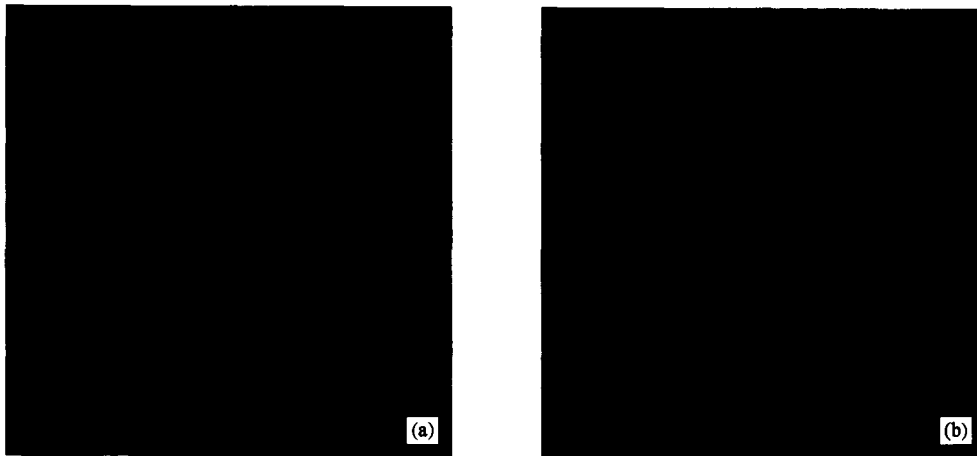


图 5 (a)没有使用光纤模式混合器时的光斑;(b)使用模式混合器后的光斑

图 6 为加上光纤模式混合器之后系统剩余噪声标准偏差的计算过程.从图上可以看出在去除 SO_2 和 O_3 的吸收后,相比图 2,系统的剩余噪声的标准偏差有了极大的改善,峰峰值为 1.4×10^{-3} ,经过计算系统剩余噪声的标准偏差为 3.4×10^{-4} .

而本系统在进行系统剩余结构计算中(即为灯谱除以灯谱后的剩余谱)发现,系统的剩余结构的标准偏差约为 3.4×10^{-4} ,所以加入光纤模式混合器之后系统的剩余噪声约为系统的剩余结构,说明光纤模式混合器的加入解决了由于灯谱和大气谱形状不一给系统带来的影响.

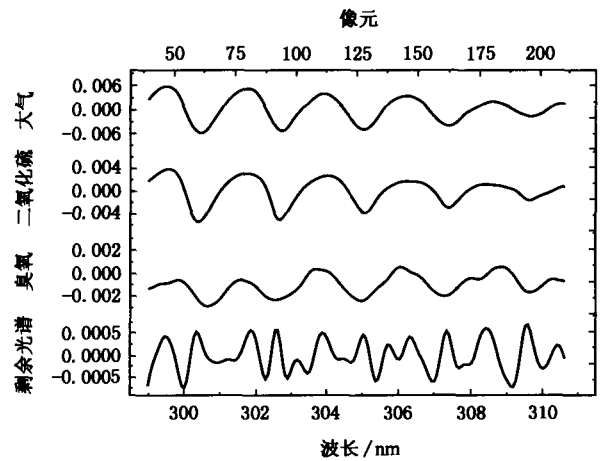


图 6 光纤模式混合器使用后系统剩余噪声的标准偏差的计算过程

4.3. 测量噪声的标准偏差对比

根据实际应用,加入光纤模式混合器后系统的剩余噪声的标准偏差有了 4—5 倍的改善,证实了该方法的可行性,为了进一步说明模式混合器对系统的影响,本实验同时对系统的测量噪声的标准偏差

进行了对比.

所谓系统的测量噪声的标准偏差即为排除大气

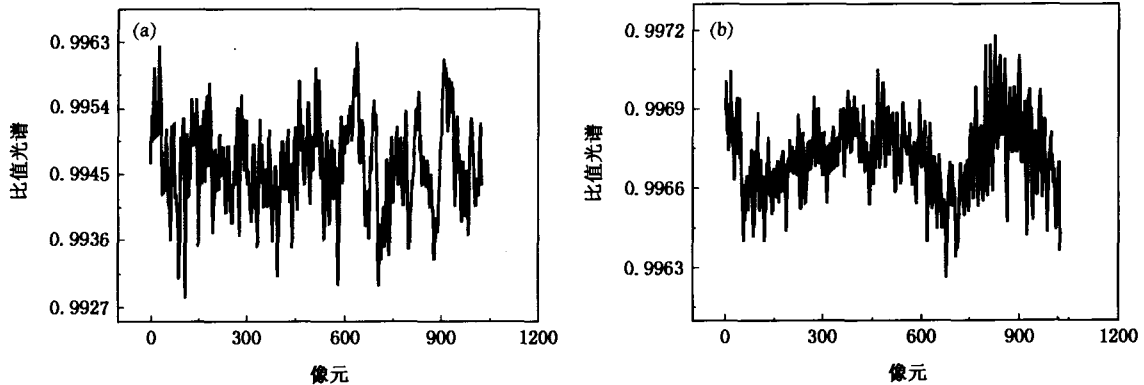


图 7 测量噪声的标准偏差结果对比 (a)为没有加模式混合器时的比值光谱,此时的标准偏差为 6×10^{-4} ; (b)为加入模式混合器时的比值光谱,与其相对应的标准偏差为 1.4×10^{-4}

干扰所得到的测量谱与灯谱之间的比值光谱的标准偏差,它可以比较客观的反映仪器的性能.具体做法是,将角反射器放在离望远镜很近的地方,大约 1 m 左右(此时可以近似认为仪器探测的大气污染物浓度均为零值,这样便可以排除了由于大气组分的变化对仪器性能造成的影响),用此时测得的光谱与灯谱相比,得到的比值光谱的标准偏差作为系统的测量光谱的标准偏差.图 7 为两组测量数据,(a)为没有加模式混合器时的比值光谱,此时的标准偏差为 6×10^{-4} .(b)为加入模式混合器时的比值光谱,与其相对应的标准偏差为 1.4×10^{-4} ,两种相对比,可以看出加入模式混合器,系统的测量噪声的标准偏差有很大的改善.

5. 结 论

由于 PDA 在多道探测方面的优势越来越多的被应用于 DOAS 系统中.然而因为收发一体望远镜的影响造成灯谱与大气谱的形状不统一,在消除 PDA 像元间差异的过程中给系统带来误差,影响了系统的精度及灵敏度.为了解决这个难题,本文根据光纤扰模原理设计出简单可靠的光纤模式混合器,在实验室验证有效后,进行实际大气探测,结果发现系统剩余噪声的标准偏差由 1.4×10^{-3} 降为 3.4×10^{-4} ,而测量噪声的标准偏差由 6×10^{-4} 降为 1.4×10^{-4} ,极大地改善了系统的性能,为系统监测微量气体提供了有利保障.

- | | |
|--|--|
| [1] Platt U, Perner D 1979 <i>J. Geophys. Res.</i> 84 6329 | 4959 |
| [2] Platt U, Perner D 1980 <i>J. Geophys. Res.</i> 85 7453 | [7] Si F Q, Liu J G, Xie P H <i>et al</i> 2005 <i>Chinese Physics</i> 14 2360 |
| [3] Qi F, Liu W Q, Zhou B <i>et al</i> 2003 <i>Acta Phys. Sin.</i> 52 2197 (in Chinese) [齐 峰、刘文清、周 斌等 2003 物理学报 52 2197] | [8] Stutz J, Platt U 1997 <i>Appl. Opt.</i> 36 1105 |
| [4] Zhou B, Liu W Q, Qi F <i>et al</i> 2001 <i>Acta Phys. Sin.</i> 50 1818 (in Chinese) [周 斌、刘文清、齐 峰等 2001 物理学报 50 1818] | [9] Mount G, Sanders R, Brault J 1992 <i>Appl. Opt.</i> 31 8518 |
| [5] Kim K H, Kim M Y 2001 <i>Atmospheric Environment</i> 35 4059 | [10] Knoll P, Singer R, Kiefer W 1990 <i>Appl. Spectrosc.</i> 44 776 |
| [6] Si F Q, Kuze H, Yoshii Y <i>et al</i> 2005 <i>Atmospheric Environment</i> 39 | [11] Brauers T, Hausmann M, Brandenburger U <i>et al</i> 1995 <i>Appl. Opt.</i> 34 4472 |

Application of fiber mode mixer in differential optical absorption spectroscopy*

Si Fu-Qi[†] Liu Jian-Guo Xie Pin-Hua Zhang Yu-Jun Li Ang Qin Ming

Li Yu-Jin Dou Ke Li Shu-Wen Liu Wen-Qing

(*Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(Received 13 December 2005; revised manuscript received 22 February 2006)

Abstract

Differential optical spectroscopy (DOAS) has become an important method for determination of tropospheric trace gases, using the photomultiplier (PMT) as detector. The use of photodiode array (PDA) detectors enhances DOAS system considerably owing to PDA's higher sensitivity and advantage in multi-channel application. When the PMT is simply replaced by PDA, a difference between lamp spectrum and atmosphere spectrum, as well as unwanted standard deviation of residual noise as much as 1.4×10^{-3} appears after corrected for the pixel response. A fiber mode mixer, based on fiber disturb mode principle was developed and tested. This new device reduces the standard deviation to 3.4×10^{-4} in field experiments.

Keywords: DOAS, disturb mode, mode mixer, residual

PACC: 8670L

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (Grant No. 2005AA641010) and the Informatization Construction of Knowledge Innovation Projects of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJCX2-SW-H08).

[†] E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn