

光热干涉法测量大气气溶胶粒子吸收特性的仿真分析

李树旺^{1,2} 邵士勇^{1*} 梅海平¹ 饶瑞中^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

摘要 大气气溶胶粒子吸收虽然一般比较微弱,但对地球辐射收支平衡、高能激光在大气中的传输具有重要影响,因而该吸收特性的准确测量越来越受到重视。针对光热测量技术,通过分析气溶胶因吸收激励激光能量产生的温度分布和折射率变化,给出了光热干涉的相位变化量与有效吸收系数、作用时间的关系;阐述了利用相位载波(PGC)算法获得相位变化信息的方式;以强、中、弱3种吸收特性的气溶胶为例,说明了不同激励激光波长下的光热效应;通过仿真计算及误差分析,展示了PGC算法在解调精度和抗噪上的优势;对解调算法进行了初步的实验验证。

关键词 大气光学;气溶胶吸收特性;有效吸收系数;光热干涉法;相位载波算法

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1101004

Simulation of Atmospheric Aerosol Particle Absorption Characters Based on Photo-Thermal Interferometry

Li Shuwang^{1,2} Shao Shiyong¹ Mei Haiping¹ Rao Ruizhong^{1,2}

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The absorption of atmospheric aerosol particle is weak, but it affects earth's radiation balance and atmospheric high energy laser transfer, so its precise measurement is paid more and more attention. By the analysis alteration of temperature distribution and refractive index which induced by pumping laser, the relationship of photo-thermal phase, effective absorption coefficient and excited time is deduced. Then phase generated carrier (PGC) algorithms for measuring phase change information is declared. It is also calculated that several photo-thermal effect of three typical aerosols with different absorbing capabilities which irradiated by pumping laser at two wavelengths. Then, the superiority of PGC algorithms is displayed, including its demodulation precision and noise elimination with calculation and error analysis. The experimental research of PGC algorithms is done.

Key words atmospheric optics; aerosol absorption character; effective absorption coefficient; photo-thermal interferometry; phase generated carrier algorithms

OCIS codes 010.1030; 010.1100; 010.1290

1 引言

气溶胶光吸收在地球大气系统中的直接、半直接辐射强迫作用中扮演着重要角色,气溶胶对于辐射强迫的贡献依然是全球气候变化模型中最不确定的成分。随着各种近地面激光工程应用的日益增多,如何避免气溶胶光吸收引起的光学传输性能恶化问题日渐凸显。因此,精确测量气溶胶粒子的光吸收系数对于提

收稿日期: 2015-05-14; 收到修改稿日期: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(41205022, 41475024, 41205010)

作者简介: 李树旺(1988—),男,博士研究生,主要从事气溶胶光学特性等方面的研究。E-mail: lswang6@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 饶瑞中(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光大气传输、大气湍流、光辐射与图像的大气传播等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: shaoshiyong@aiofm.ac.cn

高气候模型的准确度、加深光在大气中的传输研究等方面均有着重大的实际意义^[1-10]。

目前广泛应用的大气气溶胶吸收系数的测量方法主要是滤膜采样法(积分片法、颗粒物烟尘吸收光度计、多角度吸收光度计等^[11-12]),该方法通过滤膜富集气溶胶粒子后进行测量,该过程破坏了气溶胶的自然悬浮状态,同时忽略多次散射、后向散射、界面反射等,导致测量结果与实际大气气溶胶偏差较大。大气气溶胶的物化特征时空分布具有不均匀性和可变性,因而实时在线原位测量十分必要。光热干涉法(PTI)通过干涉直接获得因气溶胶粒子吸收激励激光能量引发空气热膨胀所导致的折射率起伏来实时得到吸收系数,测量的是气溶胶粒子吸收光能后产生的热扩散效应,因此对气溶胶粒子的散射光不敏感,可有效回避多次散射等影响,同时可维持气溶胶粒子的自然状态,有效克服了滤膜采样技术存在的缺陷,具有灵敏度高,响应速度快等优点,是一种潜力巨大的气溶胶吸收系数原位测量方法^[13]。目前本课题组正努力发展一种光纤式光热干涉测量方法为气溶胶吸收系数的实时测量提供新的途径。

本文从光热效应引起的折射率改变出发,给出了表征折射率改变的相位变化量随时间的变化,介绍了光热干涉相位变化量的相位载波(PGC)调制解调方法,仿真模拟了强、中、弱3种吸收特性下有效吸收系数和相位变化量的演变,并模拟实际实验场景,利用PGC方式解调出代表不同吸收特性的相位变化量,初步实验表明仿真结果符合实际情况,为光热干涉法的发展提供了良好的基础。

2 光热干涉法

光纤式结构光热干涉法获取气溶胶吸收系数的过程如图1所示,可分为3个阶段:第1阶段为调制激光信号生成阶段,包括高频载波激光与激励激光。第2阶段为相位差信号生成阶段,当气溶胶粒子受周期性调制激励激光照射时,光热效应使其吸收光能并迅速升温,达到热平衡后会通过热传导使周围空气受热膨胀,导致折射率发生周期性变化;采用一体化双光路差分结构,其中第1路置于激励区域,光纤中一部分光经准直器端面后反射回光纤内作为参考光,另一部分光透过准直器端面作为探测光两次穿过激励区域后再次回到光纤内与参考光形成干涉,两者存在随折射率变化而变化的相位差 $\Delta\varphi$,进而引起输出光强变化,第2路置于参考区域,探测背景信号,两路差分可有效消除外界环境影响。第3阶段为相位差信号解调阶段,通过对干涉仪输出光强进行解调提取相位差 $\Delta\varphi$,进一步即可确定气溶胶吸收系数。由上可知,了解光热效应与解调算法是仿真的基础,下面予以简单介绍。

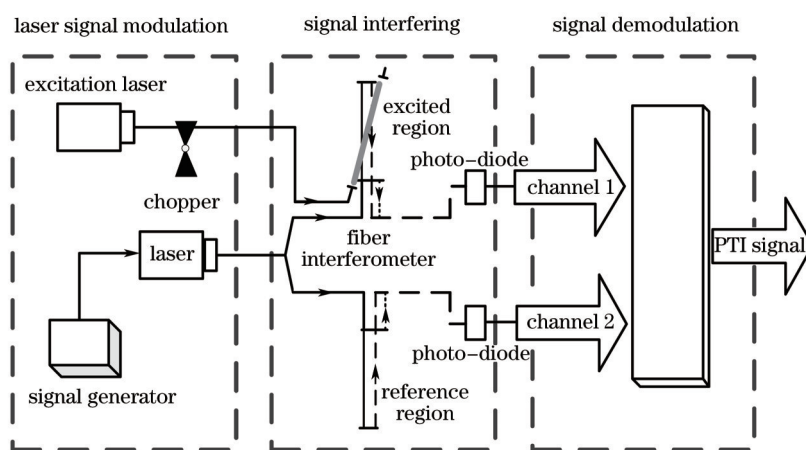


图1 光热干涉系统框架图

Fig.1 Schematic of photo-thermal interferometer

2.1 光热效应

当激励激光照射气溶胶粒子时,实际大气气溶胶粒子具有较小但非零的比热,加之空气的热传导率较小,因此在初始阶段,气溶胶粒子吸收能量主要加热其自身致使温度迅速升高,待气溶胶粒子达到饱和温度后,吸收能量主要用于加热周围大气,换言之,气溶胶吸收对大气加热存在时间延迟。Chan^[14]对该问题进行了研究,认为气溶胶的实际吸收中,真正用于加热大气的那一部分吸收才是气溶胶粒子的有效吸收,提出了

有效吸收系数的概念,其最终稳定值即为气溶胶吸收系数^[15],表示为

$$\alpha_{\text{eff}}(t) = \int \pi r^2 Q_{\text{abs}}(r) n(r) \left\{ 1 - \exp[-t/\tau(r)] \right\} dr, \quad (1)$$

式中 r 为气溶胶粒子半径, $n(r)$ 为粒子谱分布, t 为激励激光照射时间, $Q_{\text{abs}}(r)$ 为气溶胶粒子的吸收效率因子, $\tau(r)$ 为气溶胶粒子达到饱和温度所需要的时间。

通常情况下,用于探测的干涉光束半径远小于激励光束半径 a ,在 Δt 时间内,脉冲激励激光引起的气溶胶样品温度升高 ΔT 为^[16]

$$\Delta T = \frac{P}{\pi a^2 \rho C_p} \alpha_{\text{eff}}(t) \Delta t, \quad (2)$$

式中 P 表示激励光功率, ρ 、 C_p 分别为大气密度和气溶胶比热容。根据 Gladstone-Dale 公式,温度改变量 ΔT 与折射率改变量 Δn 相关,即

$$\Delta n = (n - 1) \frac{\Delta T}{T}, \quad (3)$$

式中 n 、 T 分别为样品折射率与温度。将(2)式代入(3)式,则

$$\Delta n = (n - 1) \frac{P}{\pi a^2 \rho C_p T} \alpha_{\text{eff}}(t) \Delta t. \quad (4)$$

光热效应引起的空气折射率改变量与有效吸收系数、激励激光能量、相互作用时间等参数直接相关,是光热干涉法的关键变量。

2.2 解调算法

光热干涉法采用光相位调制型传感器^[17],当干涉仪置于激励激光作用区域时,光热效应将导致探测臂与参考臂形成激励激光诱导相位差 $\Delta\varphi$,该相位差 $\Delta\varphi$ 与折射率改变量 Δn 相关,即

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi l_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{probe}}} \Delta n, \quad (5)$$

式中 λ_{probe} 为探测干涉光波长, l_{eff} 为激励激光的有效作用长度。

综合(3)~(5)式,相位差 $\Delta\varphi$ 可以表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi l_{\text{eff}} (n - 1)}{\lambda_{\text{probe}} T} \frac{P}{\pi a^2 \rho C_p} \alpha_{\text{eff}}(t) \Delta t, \quad (6)$$

式中 $\alpha_{\text{eff}}(t) = \alpha_0 \cdot c$, α_0 表示单位浓度样品(气体或气溶胶)的吸收系数, c 表示样品的浓度。(6)式表明,光热干涉法中相位差 $\Delta\varphi$ 同干涉仪参数、气溶胶自身参数、有效吸收系数、激励激光能量和相互作用时间等直接相关。

实际上,干涉仪输出光强信号并不简单随外界影响线性变化,要恢复出相位差 $\Delta\varphi$,通常利用压电陶瓷与反馈调节使系统控制在转相差点上,通过锁相放大器获取信号,此处采用 PGC 解调算法。

干涉仪输出光强信号经光电转换后,可表示为

$$V = A + B \cos[C \cos(\omega_0 t) + \varphi(t)], \quad (7)$$

式中 A 为与干涉仪输入光强、耦合器插入损耗有关的直流项, B 与光纤干涉仪输入光强、光纤耦合器的分光比、干涉仪的消光比等有关, C 为相位调制幅度, ω_0 为调制信号频率, $\varphi(t)$ 包括受调制激励激光引起的周期性变化相位 $\varphi_{\text{signal}}(t)$ 与相位噪声 φ_{noise} 。将(7)式用 Bessel 函数展开:

$$V = A + B \left\{ \left[J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos(2k\omega_0 t) \right] \cos \varphi(t) - 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi(t) \right\}, \quad (8)$$

式中的 $J_k(C)$ 为第一类 k 阶 Bessel 函数。该式表明干涉信号包括调制信号的基频和无穷项高次倍频,实验中调制频率远大于被测信号频率,将(8)式分别乘以 $\cos \omega_0 t$ 和 $\cos 2\omega_0 t$ 后进行低通滤波,通过微分、交叉相乘、相减并积分后可得 $B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi(t)$, (8)式去除系统参数的影响后,即为被测信号 $\varphi(t)$ 。该方案不需要压电陶瓷与反馈控制等复杂设备,可全数字化实现,为模拟仿真提供了前提。目前基于该算法的高灵敏度光纤湍流测量装置已研制成功并通过多次外场实验证明了其可靠性^[18]。

综上所述,通过干涉仪输出光强信号解调获取激励激光产生的诱导相位差,在相关参数已知的情况下,即可获得气溶胶吸收系数。

3 光热干涉法数值仿真

实际大气气溶胶吸收系数受包括浓度、形态、成分等多种因素影响可能出现量级上的差异($10^{-3}\sim 10^{-6}\text{m}^{-1}$),这就要求解调算法具有较大的动态范围,同时实际系统中噪声难以避免,解调算法须具备一定的噪声抑制能力。干涉仪输出光强信号并不简单随外界影响线性变化,而解调算法能否实现相位信息准确提取直接关系到气溶胶吸收系数测量的成败,因此进行仿真分析工作十分必要。

仿真分析包含3个阶段:1)依据实际大气气溶胶条件进行光热效应计算;2)生成接近光热干涉法实验结果的干涉信号;3)通过PGC算法对干涉信号进行一系列的解调处理,提取相位信息,验证与实际实验结果的吻合度。

3.1 光热效应的计算

不同类型的气溶胶具有不同吸收特性。黑碳气溶胶(BC)是大气中最主要的吸光物质,从可见光到红外波段均具有强烈的吸收效应,多次连续大规模国际性气溶胶实验都将其作为重要的观测研究对象^[19-22];沙尘气溶胶在可见光与近红外波段吸收相对较弱,但其总量较大,约占大气气溶胶总量和光学厚度的30%^[23];水溶性气溶胶以某些方式与吸收性颗粒混合时,在可见光与近红外波段表现出一定的弱吸收特性^[24]。为使光热效应计算更加贴近实际气溶胶条件,选取黑碳、沙尘、水溶性气溶胶代表强、中、弱3种吸收性气溶胶进行计算。

对于一个完整激励周期,激励激光开启后,照射气溶胶样品并导致周围空气温度快速升高;当激励激光关闭后,能量将向外传递直至平衡,Davis等^[25]对此进行了详细的分析计算。Monson等^[26]的分析表明,激励激光诱导相位是否恢复到初始位置与其变化幅度和斜率大小无关,因此在此只关注激励激光开启阶段的激励光诱导相位差变化趋势,并从中获取有用信息。图2为强、中、弱吸收性气溶胶激励激光诱导相位差的变化趋势。

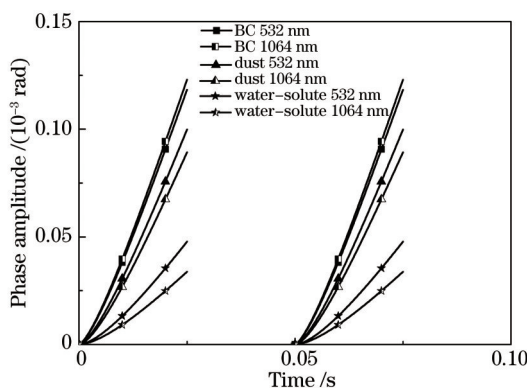


图2 不同气溶胶的激励激光诱导相位差变化趋势

Fig.2 Phase variation tendency of different aerosols induced by excitation laser

整体来看,强、中、弱吸收性气溶胶因激励激光产生的诱导相位差变化趋势相似,在激励初期均存在一个相对平缓的上升阶段,达到饱和温度后,迅速转变为线性上升,线性阶段的斜率与吸收系数成正比,据此能够获得相应样品的吸收系数。对于强吸收性气溶胶,有效吸收系数较大,气溶胶在激励激光作用下到达饱和温度的时间较短,随着气溶胶吸收特性的减弱,气溶胶在激励激光作用下到达饱和温度的时间越来越长,激励初期诱导相位差的上升阶段越来越趋于平缓,相位变化量与激励激光脉冲时间呈现出近似正弦曲线关系。

3.2 相位变化量的模拟

根据3.1节光热效应的计算结果,激励激光诱导相位差在饱和温度后的发展趋势为线性变化,而到达饱和温度的时间相对于激励周期来说非常之短,因此选择三角波来模拟激励激光诱导相位差 $\varphi(t)$,Monson等^[26]进行了理论推导并获得了相近的结果。表1为模拟所用的典型参数值。实验观测结果表明,实际大气气溶胶的吸收系数一般处于 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{m}^{-1}$ 量级^[27],根据(6)式计算得出对应激励激光诱导相位差幅值处于

$10^{-2} \sim 10^{-3}$ rad 量级,为了更好的对算法进行仿真分析,模拟相位幅值范围扩展为 $10^1 \sim 10^{-4}$ rad。

表 1 光热干涉计算的典型参数值

Table 1 Typical parameters for calculation of photo-thermal interference

System parameter	Value	Variable parameter	Value
λ_{probe}	1.31×10^{-6} m	$n - 1$	2.92×10^{-4}
l_{eff}	0.4 m	ρ	1.2 kg/m^3
Δt	0.025 s	C_p	$1005.2 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
a	1×10^{-3} m	T	300 K
		P	4 W

相位变化量 $\varphi(t)$ 包括激励激光诱导相位差 $\varphi_{\text{signal}}(t)$ 与相位噪声 φ_{noise} , 对于实际光纤式光热干涉装置, 噪声是不可避免的。外界环境变化(振动、温度漂移等)与器件状态改变(如激励激光器的功率波动、测量装置的平台振动等)都会转化为系统相位噪声, 但该噪声能够通过引入参考光基本予以消除。所用半导体激光器因频率稳定性产生的随机相位波动 (10^{-3} rad 量级) 成为最主要噪声来源。为使仿真工作更加贴近实际测量条件, 在考虑激光器功率与频率稳定性、振动、气溶胶自身参数改变等影响的前提下, 加入幅值为 1×10^{-2} rad 的均匀白噪声来模拟系统相位噪声。图 3 为光热干涉装置实测信号(实线)与仿真模拟信号(虚线)对比, 实测信号为上文所述实验装置在实际大气气溶胶条件下获得, 无论从信号变化趋势还是噪声幅值均呈现出较高的吻合度, 因此添加的白噪声完全可以模拟系统相位噪声。

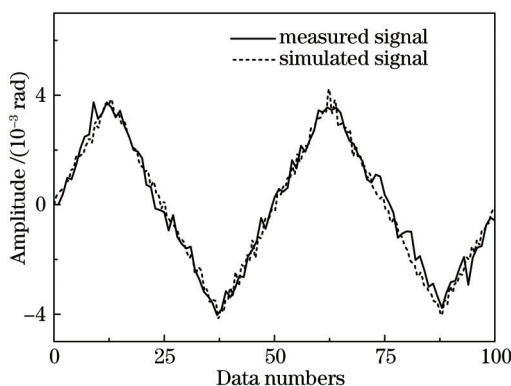


图 3 实测信号与模拟信号对比

Fig.3 Comparison of simulated signal with measured signal

3.3 PGC 仿真结果分析

图 4 为不同信噪比的三角波模拟解调结果, 信号幅值分别为 10 rad 、 10^{-2} rad 、 10^{-3} rad 和 10^{-4} rad , 对比图 4 (a) 中模拟信号(虚线)与解调信号(实线)可知, 噪声的存在对信号的精确提取带来较大影响, 随着信噪比的减小, 噪声对解调结果的影响越来越大, 对于幅值为 $1 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 的信号, 直接解调后误差甚至超过 400%, 因此有必要对解调后信号做进一步处理, 以减小噪声对信号提取工作的干扰。

根据(6)式, 在一定条件下, 吸收系数直接与斜率相关, 针对信号的上述特性, 提出采用斜率法来处理解调信号。斜率法算法分为两部分, 第一部分即自动寻址部分, 实际测量中信号的数据采集起始位置具有随机性, 可能并非如图 3 中实测信号那样从零点开始, 因此必须采用自动寻址算法, 找到并锁定线性区间; 第二部分即为线性拟合算法, 在准确获取线性区间的前提下, 进行线性拟合, 并将获得的多组线性拟合数据进行平均。上述仿真计算中采样数为 10^6 , 采样率为 10^6 , 干涉光调制频率 2000 Hz , 所用激励激光的脉冲频率为 20 Hz , 因此每 50000 个采样点获取 1 个斜率信号, 得到 20 个斜率后求其平均值, 获得代表吸收系数的斜率信号。

图 4(a) 为包括拟合信号(点虚线)在内的 3 种信号对比图, 图 4(b) 为拟合信号与模拟信号误差, 仿真结果表明: 在考虑激光器功率与频率稳定性、振动、气溶胶自身参数改变等影响(加入幅值为 $1 \times 10^{-2} \text{ rad}$ 白噪声)的前提下, 信噪比在 $10^3 \sim 10^{-2}$ 范围内, 最大解调误差不超过 40%。当信噪比为 10^{-2} 时, 线性拟合信号与模拟信号虽具有较大的误差, 但考虑到此时噪声与信号相差两个量级, 且 $1 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 的相位幅值对应的吸收系数

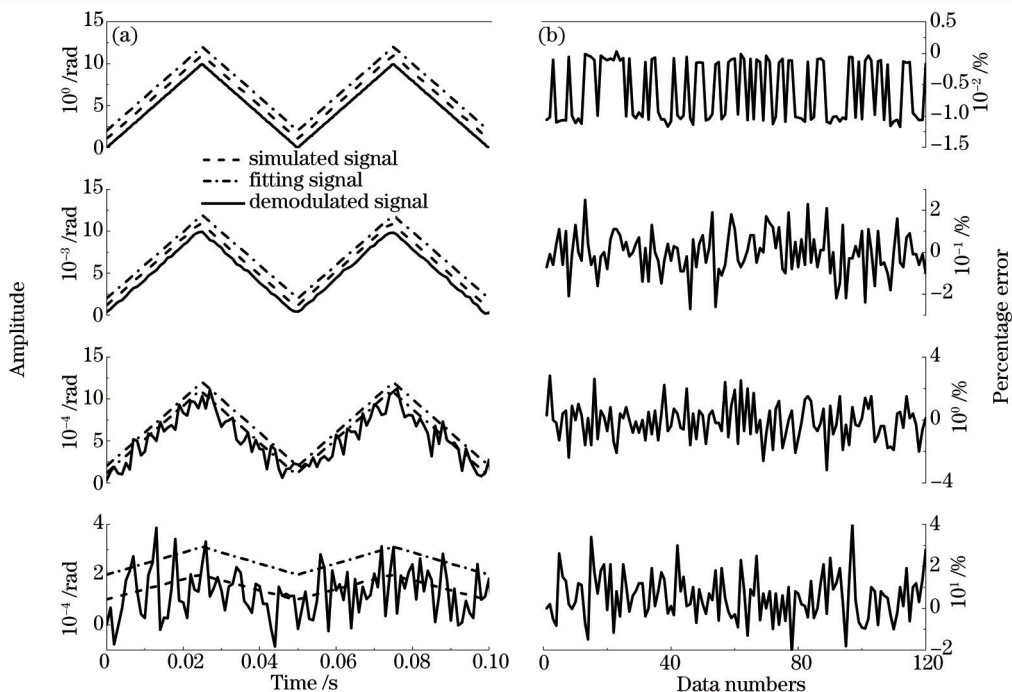


图 4 (a)模拟信号、线性拟合信号与解调信号; (b) 对应的 120 组拟合与模拟信号误差百分比

Fig.4 (a) Simulated signal, linear fitting signal and demodulated signal; (b) corresponding 120 sets of fitting signal and simulated signal percentage error

处于 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ 量级, 属极微弱吸收, 一般测量方法难以保证数量级上的正确, 因此该误差可以接受。

在仿真模拟取得较好结果的前提下, 通过实验装置对解调算法进行了初步的实验验证, 图 5(a)为保持其他条件不变的情况下, 通过改变激励激光功率获取的归一化 PTI 信号, 图 5(b)为保持其他条件不变的情况下, 通过改变样品 NO_2 气体浓度获取的归一化 PTI 信号。

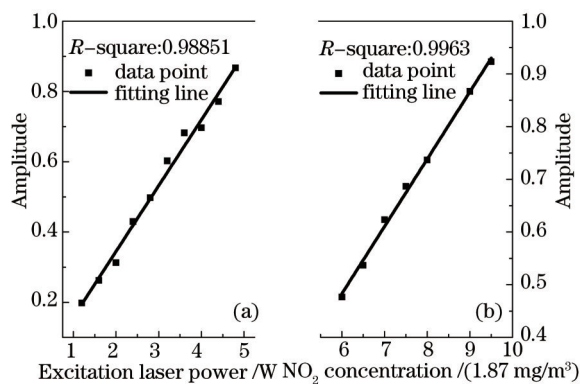


图 5 PTI 信号. (a) 不同激励光功率; (b) 不同浓度二氧化氮气体

Fig.5 PTI signal. (a) Different excitation laser powers; (b) different Nitrogen dioxide concentration

仿真结果表明, PGC 解调算法相位解调范围达 $10^1 \sim 10^{-4} \text{ rad}$, 突破了 π 的限制, 解调精确度较高; 在添加较大噪声的情况下, 结合自动寻址线性拟合算法可顺利完成数据解调提取工作, 解调误差对于解调结果影响较小; 实验结果表明, 在分别改变样品浓度与激励光功率的情况下, 信号呈现较好的线性关系, 与理论结果相符; 该算法基于 Lab-VIEW 软件编写, 可结合 Mie 散射计算程序与有效吸收计算软件为光热干涉的工程化提供良好的仿真平台, 同时无需修改即可直接用于实际光热干涉测量。因此, PGC 算法适用于光纤式光热干涉装置的数据解调, 满足实际气溶胶吸收系数的测量要求。

4 结 论

掌握气溶胶粒子的吸收特性对于提高气候模型的准确度、加深光在大气中的传输研究等方面均有着重

大的实际意义。利用光热干涉法进行气溶胶吸收特性的测量克服了传统的滤膜采样法的诸多缺点。给出了光热干涉的相位变化量与有效吸收系数、作用时间的关系,利用PGC算法对基于光热干涉法的气溶胶吸收特性进行了仿真分析,并通过实验装置对解调算法完成了初步的实验验证,得到以下结论:

1) 强吸收气溶胶到达饱和温度的时间相对较短,相位变化量与激励激光脉冲时间呈现出近似线性关系;随着吸收特性的减弱,气溶胶在激励激光作用下到达饱和温度的时间越来越长,相位变化量与激励激光脉冲时间在初始阶段呈现出近似正弦曲线关系;

2) 达到饱和温度后,不同吸收特性的气溶胶相位起伏均会呈现出斜率不同的线性上升趋势,斜率与气溶胶吸收系数成正比;

3) PGC算法突破了相位解调的限制,对于较大或较小幅值的相位起伏,均拥有较高的相位变化量提取精度,同时结合自动寻址线性拟合的斜率法,可在信噪比 $10^3\sim 10^{-2}$ 的范围内,实现最大解调误差不超过40%;

4) 在分别控制样品浓度与激励光功率的条件下,PGC输出信号均表现出较好的线性关系,与理论结果相符,证明了PGC算法适用于光纤式光热干涉装置的数据解调。

参 考 文 献

- 1 Stier P, Seinfeld J H, Kinne S, *et al.*. Aerosol absorption and radiative forcing[J]. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7(9): 5237-5261.
- 2 Albrecht B A. Aerosol, cloud microphysics, and fractional cloudiness[J]. *Science*, 1989, 245(4923): 1227-1230.
- 3 Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, *et al.*. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840.
石广玉,王 标,张 华,等.大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 826-840.
- 4 Helen C P. The geography and climatology of aerosols[J]. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27(4): 502-547.
- 5 Kaufman Y J, Tanre D, Holben B N, *et al.*. Aerosol radiative impact on spectral solar flux at the surface,drived from principal-plane sky measurements[J]. *J Atmos Sci*, 2002, 59(3): 635-646.
- 6 Schwartz S E.Uncertainty requirement in radiative forcing of climate change[J]. *Air & Waste Mange Assoc*, 2004, 54(11): 1351-1359.
- 7 Yang Honglong, Lu Chao, Liu Aiming, *et al.*. Analysis of aerosol optical properties and sources at Shenzhen[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201003.
杨红龙,卢 超,刘爱明,等.深圳地区气溶胶的光学特性及来源分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201003.
- 8 Rao Ruizhong. *Modern Atmospheric Optical[M]*. Beijing: Science Press, 2012: 145-155.
饶瑞中. *现代大气光学[M]*.北京:科学出版社, 2012: 145-155.
- 9 Xu Mengchun, Xu Qingshan, Bian Jian, *et al.*. Extinction coefficient of stratified atmosphere measured by sun-photometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1201002.
徐梦春,徐青山,边 健,等.基于太阳光度计测量确定分层大气消光系数[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1201002.
- 10 Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu, *et al.*. New method of aerosol extinction coefficient measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0101001.
宫纯文,李学斌,李建玉,等.大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. *光学学报*, 34(1): 0101001.
- 11 Miismuller H, Chakrarty R K, Arnott W P. Aerosol light absorption and its measurement: A review[J]. *J Quant SpectroscRa*, 2009, 110(11): 844-878.
- 12 Sedlacek A J. Real-time detection of ambient aerosols using photo-thermal interferometry: Folded jamin interferometer[J]. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77(6): 064903.
- 13 Li Shuwang, Shao Shiyong, Mei Haiping, *et al.*. Progress on measurement of atmospheric aerosol particle absorption with photo-thermal interferometry[J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2014, 9(6): 409-420.
李树旺,邵士勇,梅海平,等.光热干涉法测量大气气溶胶粒子吸收系数的研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(6): 409-420.
- 14 Chan C H. Effective absorption for thermal blooming due to aerosols[J]. *Appl Phys Lett*, 1975, 26(11): 628-630.
- 15 Shao Shiyong, Mei Haiping, Huang Yinbo, *et al.*. Analysis of effective absorption for atmospheric aerosol[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1057-1061.
邵士勇,梅海平,黄印博,等.大气气溶胶等效吸收的研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1057-1061.
- 16 Moosmuller H, Arnott W P, Rogers C F. Methods for real-time, *in situ* measurement of aerosol light absorption[J]. *J Air and Waste Manage*,

- 1997, 47(2): 157-166.
- 17 Jiang Yi. Advanced Fiber Sensor Technique[M]. Beijing: Science Press, 2009: 94.
江 毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 94.
- 18 Mei Haiping, Yuan Ke'e, Rao Ruizhong. Fiber optical sensing technology and its application in measuring atmospheric optical turbulence parameters[J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2007, 2(1): 1-5.
梅海平, 苑克娥, 饶瑞中. 光纤传感技术用于光学湍流测量[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 1-5.
- 19 Su Xingtao, Wang Hanjie. A simulation study on distributive characteristics and radiative forcing of black carbon aerosols over China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(6): 798-806.
宿兴涛, 王汉杰. 中国黑碳气溶胶分布特征与辐射强迫的模拟研究[J]. 大气科学学报, 2009, 32(6): 798-806.
- 20 Zhang Lisheng, Shi Guangyu. The simulation and estimation of radiative properties and radiative forcing due to sulfate and soot aerosol [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2001, 25(2): 231-242.
张立盛, 石广玉. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 231-242.
- 21 Zhou Chen, Zhang Hua, Wang Zhili. Impact of different mixing ways of black carbon and non-absorbing aerosols on the optical properties [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0829001.
周 晨, 张 华, 王志立. 黑碳与非吸收性气溶胶的不同混合方式对其光学性质的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0829001.
- 22 Zhang Chaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏 林, 李良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513002.
- 23 Wang Hong, Shi Guangyu, Wang Biao, *et al.*. The impacts of dust aerosol from deserts of China on the radiative heating rate over desert sources and the north pacific region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(3): 515-526.
王 宏, 石广玉, 王 标, 等. 中国沙漠沙尘气溶胶对沙漠源区及北太平洋地区大气辐射加热的影响[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 515-526.
- 24 Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state black carbon in atmospheric aerosols[J]. Nature, 2001, 409(6821): 695-697.
- 25 Davis C C, Samuel J P. Phase fluctuation optical heterodyne spectroscopy of gases[J]. Appl Opt, 1981, 20(14): 2539-2554.
- 26 Monson B, Vyas R, Gupta R. Pulsed and cw photo-thermal phase shift spectroscopy in a fluid medium: Theory[J]. Appl Opt, 1989, 28(13): 2554-2561.
- 27 Huang Yinbo, Huang Honglian, Han Yong, *et al.*. Measurement and model analysis of the aerosol optical properties in the region of Hefei and southeast coast[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6): 515-526.
黄印博, 黄红莲, 韩 永, 等. 合肥、东南沿海地区气溶胶光学特性测量及模式分析[J]. 大气与环境科学学报, 2007, 2(6): 515-526.

栏目编辑: 史 敏