

# 大气颗粒物多参数激光自混合传感的数值模拟与特性分析

王秀丽 桂华侨 陆亦怀 刘建国 王 杰 伍德侠

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

**摘要** 基于颗粒物米氏散射特性、激光自混合三镜腔理论和激光器稳态条件, 推导出在大气颗粒物光反馈下激光器频率、功率、线宽的理论表达式, 建立了大气颗粒物光反馈下的激光自混合理论模型。同时, 数值模拟和分析了大气颗粒物物理参数对激光自混合干涉信号的影响。结果表明, 在一定粒径范围内, 激光自混合反馈强度随大气颗粒物粒径增大先增大后减小, 且反馈强度峰值出现的位置随颗粒物折射率实部的增大、虚部的减小向粒径较大处移动; 自混合系统的外腔长度影响自混合干涉信号的波动深度, 激光器输出光信号的幅值随外腔长度增大呈指数衰减; 自混合干涉信号波动频率与大气颗粒物运动速度呈线性关系。分析结果对基于激光自混合效应的大气颗粒物多物理参数传感具有重要作用。

**关键词** 大气光学; 大气颗粒物; 激光自混合干涉; 数值模拟

**中图分类号** O436; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0101003

## Numerical Simulation and Characteristics Analysis of Laser Self-Mixing Interference Measurement of Atmospheric Particle Parameters

Wang Xiuli Gui Huaqiao Lu Yihuai Liu Jianguo Wang Jie Wu Dexia

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

**Abstract** The theoretical expressions describing the self-mixing interference laser frequency, output power, and linewidth under the weak feedback of atmospheric particles are deduced based on the Mie scattering theory, the three-mirror theory and the steady-state equations of laser. The theory model of self-mixing effect feedback from atmospheric particles is established. And the relationship between the self-mixing signals and the physical parameters of atmospheric particles is analyzed in detail. The result shows that in a certain particle size range, the laser self-mixing signal intensity increases with the particle size and then decreases. With the increase of the real part and decrease of the imaginary part in atmospheric particle complex refractive index, the location of the external feedback strength peak value gradually moves to larger particle size. The amplitude of self-mixing signals is exponential decay with the increase of the external feedback cavity; the fluctuation frequency of the laser intensity is linearly related to the velocity of atmospheric particles. These conclusions offer a theoretical guidance to study optical sensing applications of atmospheric particles physical parameters by using the laser self-mixing technology.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric particles; laser self-mixing interference; numerical simulation

**OCIS codes** 010.1290; 010.1350; 010.1310

收稿日期: 2011-06-20; 收到修改稿日期: 2011-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(60908035)资助课题。

作者简介: 王秀丽(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光自混合技术方面的研究。E-mail: xiuliwang@aiofm.ac.cn

导师简介: 陆亦怀(1954—), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事环境污染光学监测新技术、目标特性及遥感监测技术等方面的研究。E-mail: lyh@aiofm.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

激光自混合干涉效应是指激光器的出射光经外部物体散射或反射后,部分光反馈回激光腔形成新的谐振,从而引起激光光谱、光强等发生变化。因为反馈光携带了外界反射物体信息,所以可以通过分析激光功率、频率的变化来获取外界物体诸如距离<sup>[1,2]</sup>、位移<sup>[3~7]</sup>、振动<sup>[8,9]</sup>以及运动速度<sup>[10]</sup>等信息,甚至可以进行光学器件或光学系统的特性测量<sup>[11]</sup>、探伤研究<sup>[12]</sup>和形貌测量<sup>[13,14]</sup>等。与传统的双光束干涉相比,激光自混合干涉仅有一个干涉通道,物体的散射光较容易反馈回激光器谐振腔形成自混合效应。近年来,越来越多的学者关注激光自混合干涉技术并进行了深入研究。2010年,Fathi等<sup>[15]</sup>利用激光自混合技术实现了透明玻璃厚度的测量;Dai等<sup>[16]</sup>深入研究分析了光纤环形激光器的多路自混合干涉效应;Zabit等<sup>[17]</sup>研究了基于液体透镜的自混合激光二极管振动仪;2011年,Mezzapesa等<sup>[18]</sup>利用激光自混合干涉效应实现了高分辨率孔深度探测。

大气颗粒物指的是分散在大气中的固态或液态颗粒状物质。它能吸收或散射太阳辐射、干扰自然界的能量辐射平衡、降低大气能见度,是影响我国城市空气质量的首要污染物。传统的大气颗粒物激光多普勒测速技术<sup>[19]</sup>,一般需要分光器件以形成外部干涉,并且光程差需要在激光相干长度内才能观察到多普勒干涉信号,因此相对激光自混合技术就显得系统复杂、难以调节。对于现有的颗粒物粒径测量技术,如激光散射和飞行时间<sup>[20]</sup>测量技术系统,信号探测结构更为复杂,需要设计精巧的椭球镜信号收集系统。因此,研究测量大气颗粒物多物理参数且系统简单的监测方法具有重要的现实意义。目前国内外基于激光自混合效应的研究大都集中在固体粗糙表面测量、液体颗粒流速测量等方面。2001年,Scalise等<sup>[21]</sup>运用自混合效应,用带光纤的多普勒测速测量了动脉内血红细胞的速度和平均流量。2005年,Zakian等<sup>[22]</sup>实现了流体中 $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 范围内单分散聚苯乙烯颗粒的粒径测量。2008年,Wang等<sup>[23]</sup>通过测量自混合干涉激光功率谱,并运用改进的Kaczmarz投影算法实现了单分

散系颗粒粒径的测量。

大气颗粒物散射信号较弱,颗粒物多种物理特性存在一定的随机波动,大气颗粒物反馈下的激光自混合现象及其机理仍不明确。本文基于米氏散射理论得到单颗粒物后向散射光场,根据激光自混合效应的三镜腔理论和激光器稳态条件建立单颗粒光反馈下激光自混合系统的理论模型,分析颗粒物光反馈下激光功率、频率和线宽等特性,数值模拟和分析颗粒物粒径、复折射率对自混合反馈强度的影响,为下一步实验研究提供理论指导。

# 2 大气颗粒物光反馈下激光自混合理论分析

激光自混合干涉效应可以用三镜腔模型<sup>[24]</sup>来分析,原理如图1所示, $F_1$ 和 $F_2$ 分别是激光器前后端面,光波振幅反射率分别为 $r_1$ 和 $r_2$ ,构成系统内腔;出射端面 $F_2$ 和被测颗粒物构成系统外腔。系统内外腔长分别为 $L_D$ 和 $L_E$ ;激光腔内媒质的复折射率为 $n_c$ 。激光经 $F_2$ 端面出射至颗粒物,部分光被颗粒物散射并反馈回激光器谐振腔,和腔内的激光形成自混合干涉。

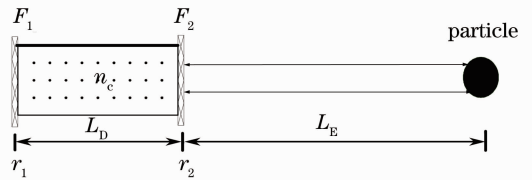


图1 激光自混合干涉系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a laser self-mixing interference system

设 $F_1$ 为起点,向右传播的光波为 $\mathbf{E}_0(t)$ ,部分光在内腔经历一次往返至 $F_1$ ,光波为

$$\mathbf{E}_1(t) = r_1 r_2 \mathbf{E}_0(t) \exp[i(2kn_c L_D)],$$

式中波矢 $k = 2\pi/\lambda$ 。经 $F_2$ 透射并到达颗粒物的光场为

$$\mathbf{E}_2(t) = \kappa \mathbf{E}_0(t) \exp[i(kn_c L_D + kL_E)],$$

式中 $\kappa$ 为 $F_2$ 的透射率。

根据颗粒物米氏散射理论,将 $\mathbf{E}_2(t)$ 分解为垂直分量 $E_{2r}(t, \phi)$ 和平行分量 $E_{21}(t, \phi)$ , $\phi$ 为光的电矢量与观测平面的夹角,被颗粒物散射后的光场为

$$\begin{bmatrix} E_{31}(t, \theta, \phi) \\ E_{3r}(t, \theta, \phi) \end{bmatrix} = \frac{\exp(ikr' - ikz)}{-ikr'} \begin{bmatrix} S_2(\theta) & 0 \\ 0 & S_1(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{21}(t, \phi) \\ E_{2r}(t, \phi) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n \cos \theta + b_n \tau_n \cos \theta) \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n \cos \theta + a_n \tau_n \cos \theta) \end{cases}, \begin{cases} \pi_n = \frac{P_n \cos \theta}{\sin \theta} \\ \tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n \cos \theta \end{cases},$$

$$\begin{cases} a_n = \frac{\varphi_n(\bar{\omega}) \varphi'_n(m\bar{\omega}) - m \varphi'_n(\bar{\omega}) \varphi_n(m\bar{\omega})}{\xi_n(\bar{\omega}) \varphi'_n(m\bar{\omega}) - m \xi'_n(\bar{\omega}) \varphi_n(m\bar{\omega})} \\ b_n = \frac{m \varphi_n(\bar{\omega}) \varphi'_n(m\bar{\omega}) - \varphi'_n(\bar{\omega}) \varphi_n(m\bar{\omega})}{m \xi_n(\bar{\omega}) \varphi'_n(m\bar{\omega}) - \xi'_n(\bar{\omega}) \varphi_n(m\bar{\omega})} \end{cases}, \begin{cases} \varphi_n = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} J_n(x) \\ \xi_n = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} H_n(x) \end{cases},$$

这里  $S_1(\theta), S_2(\theta)$  是散射函数,  $J_n(x), H_n(x)$  为第一类贝塞尔函数和汉克尔函数,  $P_n$  为勒让德函数。  $r'$  为颗粒物中心到观测点的距离,  $\bar{\omega} = kr$  为颗粒物尺度参数,  $r$  为颗粒物半径,  $m$  为颗粒物复折射率,  $\theta$  为散射角。由此可知, 只要得出  $\varphi_n(x), \xi_n(x)$  的一系列递推公式就可以计算出  $S_1(\theta), S_2(\theta)$  的值。假设采用线偏振光入射, 令光的偏振方向与观测平面垂直, 即  $\phi = \pi/2$ , 所以  $E_{21}(t, \phi) = 0$ 。假设激光自混合干涉是颗粒物由后向  $180^\circ$  散射光引起, 即  $\theta = \pi$ 。颗粒物的后向散射光经过  $F_2$  透射和  $F_1$  反射后光场为

$$E_3(t) = \frac{1}{kL_E} r_1 f S_1(\pi) \kappa E_0(t) \times \exp[i(2kn_c L_D + 2kL_E + \pi/2)], \quad (2)$$

式中  $r_2^2 + \kappa f = 1$ ,  $S_1(\pi)$  是复数, 令  $S_1(\pi) = a + bi$ , 其中  $a, b$  是颗粒物半径和复折射率的函数。

两束光  $E_1(t), E_3(t)$  最终在  $F_1$  处叠加, 系统稳定后叠加的光场与初始光场  $E_0(t)$  相同, 令  $r_{31} = \frac{a}{kL_E}, r_{32} = \frac{b}{kL_E}, \eta_1 = \frac{r_{31} f \kappa}{r_2}, \eta_2 = \frac{r_{32} f \kappa}{r_2}$ , 复折射率  $n_c = n - ig$  可得有光反馈时系统的激发条件为

$$\begin{cases} gk = -(1/2L_D) [\ln r_1 r_2 + \eta \cos(2kL_E + \beta)] \\ 2knL_D + \eta \sin(2kL_E + \beta) = 2M\pi \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\eta = \sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2}, \tan \beta = -\eta_1/\eta_2, M = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

当不存在光反馈时, 上式简化为

$$\begin{cases} g_0 k_0 = -(1/2L_D) \ln r_1 r_2 \\ 2k_0 n_0 L_D = 2M\pi \end{cases}. \quad (4)$$

(4)式是激光器的激发条件。当颗粒物靠近或远离激光器运动时, 反馈光的相位也随之改变, 激光腔内载流子密度  $N$  将发生变化, 同时复折射率  $n_c$  也将变化, 因此引起了波矢长度的改变 ( $k \rightarrow k_0 + \Delta k$ )。  $N_0$  为无反馈时的载流子数量。  $n_0, g_0$  为无反馈时激光腔物质的有效折射率和激光腔单位长度的线性增益, 记为  $n_0 = n(N_0), g_0 = g(N_0)$ , 做一级近似展开  $n(N), g(N)$  得

$$\begin{cases} n(N_0 + \Delta N) = n_0 + (dn/dN)_0 \Delta N = n_0 + \chi \Delta N \\ g(N_0 + \Delta N) = g_0 + (dg/dN)_0 \Delta N = g_0 + \rho \Delta N \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\chi, \rho$  分别为复数折射率  $n_c$  的实部和虚部随载流子密度  $N$  的变化率,  $\Delta N$  是腔内载流子密度的变化量。将(5)式代入(3)式, 取  $M = 0, \Delta N, \Delta k$  为独立变量, 并消去  $\Delta N$  项, 可得

$$\omega_0 \tau_E = \omega \tau_E + C \sin(\omega \tau_E - \arctan \alpha + \beta). \quad (6)$$

(6)式为激光自混合干涉系统的频率方程, 其中  $\omega_0$  为无反馈时的激光圆频率,  $\omega$  为颗粒物反馈下的激光圆频率,  $\alpha = \chi/\rho$  为激光器线宽展宽因子,  $\tau_D = 2n_0 L_D/c$  是激光在内腔往返时间,  $c$  为光速,  $\tau_E = 2L_E/c$  为激光在外腔往返时间,  $C = \frac{\eta \tau_E \sqrt{1 + \chi^2/\rho^2}}{\tau_D (1 - \chi g/n_0 \rho)}$  反映自混合干涉系统外部光反馈强度水平, 与腔外颗粒物物理参数和激光器参数有关。当  $\chi g/n_0 \rho \ll 1$  时, 得

$$C = \eta \frac{\tau_E}{\tau_D} \sqrt{1 + \alpha^2}. \quad (7)$$

在弱反馈情况下 ( $C < 1$ ), (6)式为单调递增函数, 有唯一解, 此时自混合干涉系统处于单模稳态运行方式<sup>[25]</sup>, 得

$$\nu = \nu_0 - \frac{C \sin(\phi_{\text{ext}} + \beta - \arctan \alpha)}{2\pi \tau_E [1 + C \cos(\phi_{\text{ext}} - \arctan \alpha + \beta)]}, \quad (8)$$

其中  $\nu_0, \nu$  分别为无反馈时和颗粒物反馈下激光器输出光频率,  $\phi_{\text{ext}} = \omega \tau_E = 4\pi \nu L_E/c$ , 表示激光器外腔反馈光的相位变化。(8)式表明在弱反馈情况下, 激光器输出频率的改变是外腔反馈相位的周期性函数并与颗粒物自身物理特性有关, 如粒径、折射率等。

将(4)式代入(3)式, 可得外腔反馈激光系统的阈值增益变化

$$\Delta G = gk - g_0 k_0 = -\frac{\eta}{2L_D} \cos(2kL_E + \beta). \quad (9)$$

由于激光器阈值增益被反馈光调制, 激光输出功率与激光阈值增益成比例, 因此, 激光器输出功率同样

被反馈光调制,输出的光功率可表示为

$$I = I_0 [1 + C_m \cos(\omega \tau_E + \beta)], \quad (10)$$

这里调制系数  $C_m$  在工作电流一定时为与  $C$  成比例的常数。

由(10)式和(6)式容易得到  $I(\omega_0 \tau_E + 2\pi) = I(\omega_0 \tau_E)$ ,因此激光器输出功率是  $\omega_0 \tau_E$  的周期函数,周期为  $2\pi$ 。当  $\omega_0 \tau_E$  变化  $2\pi$  时,对应移动一个干涉条纹,由  $\tau_E = 2L_E/c$ ,  $\omega_0 \tau_E = 2\pi c/\lambda$ ,得到外腔长度变化  $\lambda/2$  时对应一个干涉条纹。因此自混合干涉信号与传统的双光束干涉具有相同条纹分辨率。

根据外腔长  $L_E = L_0 - Vt$ ,  $L_0$  为外腔的初始腔长度,  $V$  为被测颗粒物光轴方向的运动速度,由(10)式可得颗粒物光反馈下激光器输出光功率的频率与颗粒物运动速度的关系式为

$$f = \frac{4\pi\nu V}{4\pi\nu L_0 - 2\pi c + \beta c}, \quad (11)$$

由此可见,颗粒物光反馈下输出光功率的频率与颗粒物运动速度之间是线性关系。

激光器的光谱线宽是一个重要参数,对于单频激光器,假定谱线线宽为洛伦兹线型,可得到激光自混合效应下激光线宽为

$$\delta\nu = \frac{\delta\nu_0}{[1 + C \cos(2\pi\nu\tau_E - \arctan \alpha + \beta)]^2}, \quad (12)$$

式中  $\delta\nu_0$  为无反馈时激光器输出的光谱线宽。

至此,得到了激光自混合干涉效应下的激光频率、功率和线宽,分别为(8),(10)和(12)式,其中  $\beta$  由颗粒物理参数决定。

### 3 激光自混合传感系统设计及自混合干涉信号模拟与分析

#### 3.1 激光自混合大气颗粒物传感系统设计

激光自混合大气颗粒物传感系统的设计目标就是要获取良好的自混合信号,实现高灵敏度、高精度的颗粒物多物理参数测量。激光自混合传感系统由激光器、透镜以及信号采集与处理系统组成,如图2所示。激光器出射光经过透镜并以一定的角度聚焦到待测颗粒物上,部分散射光按原路反馈回激光腔中引起激光功率的波动,产生自混合效应。同时激光被光探测器接收和电子学系统放大,经示波器采样和频谱分析等信号处理过程获得颗粒物的特征信息,实现运动速度、粒径的准确测量。

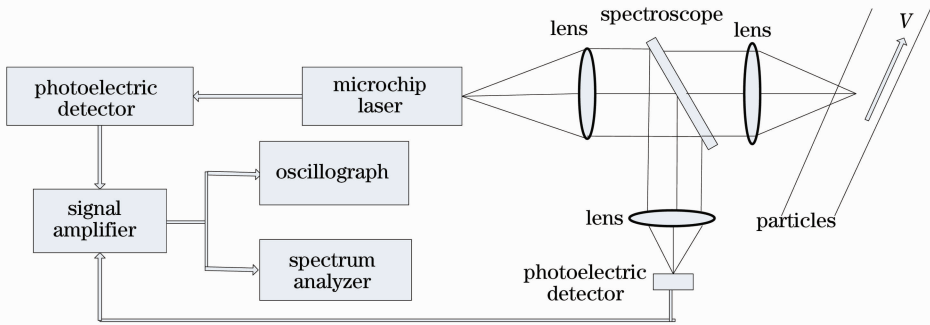


图2 激光自混合干涉大气颗粒物传感系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram for measuring atmospheric particles using laser self-mixing interference

为了减少由于大气颗粒物后向散射光强较弱和波动大带来的负面影响,提高颗粒物探测的灵敏度,传感系统设计时采用高灵敏度激光二极管(LD)抽运微片激光器<sup>[26,27]</sup>。为了获得较多的颗粒物后向散射光,激光传输系统应用共焦原理并采用大口径透镜将激光会聚于被测颗粒物,只有在会聚点附近的散射光才能大量返回到谐振腔中产生自混合效应,可以进一步提高系统的测量精度。信号探测系统采用分光镜分光并经透镜聚焦到光电探测器上,使得自混合信号探测的灵敏度进一步提高。

#### 3.2 颗粒物反馈系数特征

大气颗粒物传感系统设计中采用高灵敏度 LD 抽运微片激光器作为光源,数值模拟中微片激光器的相关参数取值如下:波长  $\lambda = 532 \times 10^{-9}$  m,内腔长为  $10^{-2}$  m,线宽展宽因子  $\alpha = 1$ <sup>[28]</sup>,腔内晶体的折射率  $n_0 = 1.82$ ,激光器右腔面振幅反射率  $r_2 = 0.9$ 。

折射率是大气颗粒物重要物理参数之一。对于具有吸收性的大气颗粒物,其折射率表示为复数  $m = m_r - im_i$ ,  $m_r$ ,  $m_i$  分别描述粒子对辐射的散射特性和吸收特性。一般而言实部  $m_r$  变化不大,干粒子的  $m_r$  在太阳辐射谱区约为  $1.5 \sim 1.6$ ,在热辐射区约为  $1.6 \sim 1.8$ ,水的  $m_r$  约为  $1.33$ 。虚部  $m_i$  在太阳辐

射区约 0.005 ~ 0.02, 在热辐射区约 0.1 ~ 0.5; 但碳颗粒物例外, 在整个谱区最高为 0.4 ~ 0.8。

由(7)式可知激光自混合效应反馈系数与大气颗粒物物理参数和激光器参数密切相关。在不同颗粒物折射率下, 自混合反馈系数  $C$  随颗粒物粒径的变化关系如图 3 所示, 模拟中粒径取值为 0.1 ~ 35  $\mu\text{m}$ 。可以看出, 自混合反馈系数在整条曲线上表现为一系列极值, 并附有较小的脉动。颗粒物反馈系数的总体变化趋势为: 粒径很小时, 自混合反馈系数也很小, 并随着粒径增大而增大, 达到峰值后, 又随粒径的增大而减小。由图 3(a) 可看出自混合反馈系数的峰值随着折射率实部的增大逐渐右移。由图 3(b) 可知随着颗粒物折射率虚部的减小自混合反馈系数的峰值也向右移动。当虚部较大时, 即颗粒物吸收作用较强, 自混合反馈系数很小。因此, 在颗粒物传感系统中, 对折射率实部较大、虚部较小的颗粒物更为敏感。

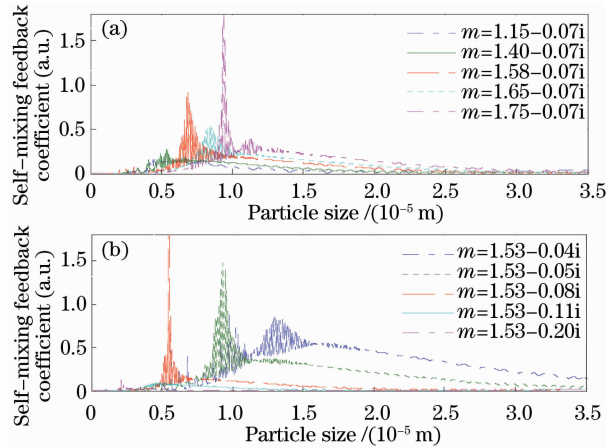


图 3 反馈系数  $C$  随大气颗粒物粒径的变化

Fig. 3 Relation between self-mixing feedback coefficient and particle size

从图 3 还可看出: 相同粒径、不同折射率的颗粒物自混合反馈系数有数倍的差别, 如图 3(a) 所示, 在半径 9  $\mu\text{m}$  处, 折射率为 1.75 - 0.07i, 1.15 - 0.07i 的颗粒反馈系数分别为 0.401, 0.091, 前者为后者的 4.4 倍; 相同折射率、不同粒径的颗粒物自混合反馈系数也有较大差异, 如折射率为 1.58 - 0.07i, 半径为 6  $\mu\text{m}$  和 8.6  $\mu\text{m}$  的颗粒自混合反馈系数分别为 0.061, 0.164, 后者是前者的 2.7 倍。

### 3.3 自混合干涉信号光频率和光强特征

#### 3.3.1 不同外腔长度下激光自混合效应中激光频率、光强随时间的变化

取大气颗粒物半径为 8.25  $\mu\text{m}$ , 折射率为 1.65 - 0.07i, 此时的反馈系数为 0.52, 颗粒物沿激

光光轴方向的运动速度分量为 0.05 m/s。这里仅考虑颗粒物 180° 后向散射情况, 即与接收立体角无关。激光自混合干涉输出光频率、光强随时间的变化关系如图 4 所示。由图 4(a) 可知激光自混合干涉系统的输出光频率发生类锯齿周期变化, 由(8)式可知外腔长度变化只引起输出光频率初相位的改变, 对输出频率的周期没有影响, 但是外腔长度的变化会影响输出光频率的波动深度: 外腔长度较大, 即  $L_E$  较大时, 自混合干涉系统的输出频率波动深度较小, 不容易观察到系统干涉频率的锯齿波形, 随着  $L_E$  值的变小, 自混合系统输出频率波动深度变大, 锯齿波形较为明显。这是因为当外腔长较小时, 颗粒物离激光腔较近, 散射反馈回激光腔的光子数较多, 从而对腔内光场的调制作用较强。

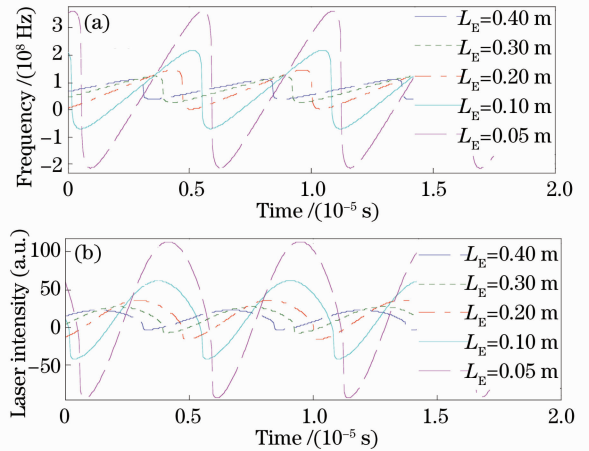


图 4 不同外腔长度下激光自混合干涉输出光频率(a)、光强(b)随时间的变化  
Fig. 4 Variation of the self-mixing interference frequency (a) and laser intensity (b) with time under different external cavity lengths

图 4(b) 是自混合干涉系统输出光强随时间的变化, 可看出光强也是周期变化的锯齿波形, 光强随外腔长的变化与光频率相似。从(10)式知, 不同的外腔长度使系统光强的初相位不同, 因此曲线与光强轴的初始交点不同。

图 5 给出了外腔长度变化对自混合干涉系统输出光强幅值的影响, 可看出光强幅值随外腔长度的增加呈指数衰减。因此, 在激光自混合传感系统中, 应适当减小颗粒物与激光器的距离, 以产生较明显的激光自混合信号。

#### 3.3.2 不同粒径下自混合干涉输出光频率和光强随时间的变化

粒径是描述大气颗粒物最基本的参数之一, 它决定了颗粒物自身的性质和环境效应。由于粒子粒



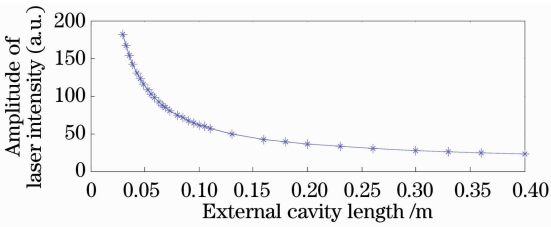


图 5 外腔长度对自混合干涉输出光强幅值的影响  
Fig. 5 Effect of external cavity length on amplitude of laser intensity

径范围差别巨大,故颗粒物自身的性质及行为也有较大差异。假设颗粒物沿光轴方向运动速度 0.05 m/s、复折射率 1.53-0.05i、初始外腔长度  $10^{-1}$  m 不变,取半径不同的颗粒物,自混合系统光频率和光强随时间的变化如图 6 所示。

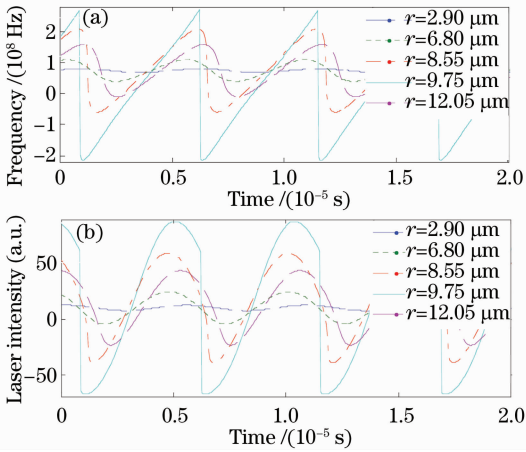


图 6 不同粒径下自混合干涉输出光频率(a)、光强(b)随时间变化  
Fig. 6 Variation of the self-mixing interference frequency (a) and laser intensity (b) with time under different particle radii

由(8),(10)式可知大气颗粒物粒径大小直接影响反馈强度水平,进而调制自混合信号的波形和波动深度。粒径为 2.90  $\mu\text{m}$  和 6.80  $\mu\text{m}$  时,自混合反馈强度分别为 0.024,0.145,反馈水平较低,由图 6 可以看出,此时自混合干涉信号波动深度较小,呈正弦形,类似于传统的双光束干涉。粒径为 8.55  $\mu\text{m}$  和 9.75  $\mu\text{m}$  时,自混合反馈强度分别为 0.490,0.771,反馈水平较强,从图可知,随着反馈水平的增强,自混合信号逐渐从正弦形过渡到类锯齿形,且波动深度变大。由图 6 还可看出,不同粒径对应的干涉信号曲线的起始点不同,说明粒径大小与自混合干涉信号初相位相关,这与(8),(10)式吻合。

### 3.3.3 不同颗粒物速度下自混合干涉输出光频率、光强随时间的变化

图 7 给出了粒径 8.25  $\mu\text{m}$ 、复折射率 1.65-0.07i、初始外腔长度  $10^{-1}$  m 不变时,不同粒子运动速度下的自混合系统输出光频率和光强随时间的变化曲线。

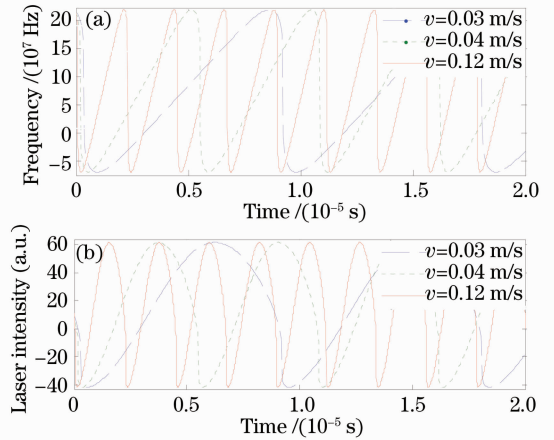


图 7 不同颗粒物速度下自混合干涉输出光频率(a)、光强(b)随时间变化  
Fig. 7 Variation of the self-mixing interference frequency (a) and laser intensity (b) with time under different particle velocities

从图 7(a),(b)可以看出,大气颗粒物运动速度越快,自混合干涉信号条纹越密集,对应干涉信号波动频率越大;颗粒物运动速度越慢,干涉信号条纹越稀疏,对应干涉信号波动频率越小。图 8 给出了大气颗粒物运动速度对自混合干涉信号波动频率的影响,可看出自混合信号波动频率与颗粒物运动速度呈线性关系,与(11)式吻合。

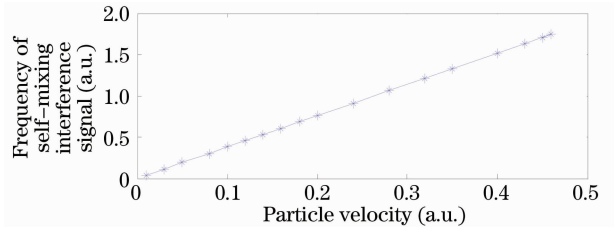


图 8 颗粒物运动速度对自混合干涉信号频率的影响  
Fig. 8 Effect of particle velocity on frequency of self-mixing interference signal

## 4 结 论

根据大气颗粒物米氏散射理论和激光自混合效应的三镜腔理论,给出了大气颗粒物光反馈下的激光自混合理论模型。同时,模拟和分析了颗粒物物理特性对自混合信号的影响。可以看出,激光自混合信号

与大气颗粒物的多种物理参数特性相关。

1) 自混合反馈强度水平与颗粒物粒径大小和复折射率有直接关系,反馈系数的峰值随复折射率实部的增大、虚部的减小移向粒径较大位置。

2) 自混合系统的外腔长度影响自混合干涉信号的波动深度,随着外腔长度的增大信号波动幅度逐渐变小,且信号幅值随外腔长度增大呈指数衰减。

3) 大气颗粒物运动速度越大,自混合干涉信号条纹越密集,且信号的波动频率与运动速度呈线性关系。

以上分析结果将为大气颗粒物光反馈下激光自混合实验系统设计和颗粒物物理特性传感研究提供理论依据。大气颗粒物光反馈下激光自混合效应的系统性实验将是后续工作的内容。

### 参 考 文 献

- G. Mourat, N. Servagent, T. Bosch. Distance measurement using the self-mixing effect in a three-electrode distributed Bragg reflector laser diode[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(3): 738~743
- Dongmei Guo, Ming Wang. Self-mixing interferometry based on a double-modulation technique for absolute distance measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(9): 1486~1491
- Shi Binghao, Zhao Jianlin, Li Zeren. Numerical simulation and experimental study of displacement measurement based on self-mixing interference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1415~1420
- 施冰皓, 赵建林, 李泽仁. 激光自混合干涉式位移测量数值模拟及实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1415~1420
- Zhang Zhaoyun, Gao Yang, Zhao Xinghai et al.. Micro-electro-mechanical system dynamic tests by laser self-mixing effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 256~260
- 张照云, 高 杨, 赵兴海等. 激光自混合微机电系统动态测试技术[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 256~260
- Ji Jingyi, Ye Huiying, Yu Yanguang. Based on the optical feedback self-mixing interference displacement measurement: algorithm design and filtering [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(1): 89~92
- 姬静毅, 叶会英, 禹延光. 基于光反馈自混合干涉的位移测量算法设计及滤波[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(1): 89~92
- Dongmei Guo, Ming Wang. Self-mixing interferometer based on temporal-carrier phase-shifting technique for micro-displacement reconstruction[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **263**(1): 91~97
- Zhang Li, Wu Yun, Zhou Lufei et al.. Dual-frequency laser optical feedback displacement measurement system with high resolution[J]. *J. Beijing Jiaotong University*, 2009, **33**(6): 9~12
- 张 立, 吴 云, 周鲁飞等. 高分辨率双频激光回馈的位移测量方法[J]. *北京交通大学学报*, 2009, **33**(6): 9~12
- Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1430~1434
- 禹延光, 郭常盈, 叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1430~1434
- Xia Wei, Zhang Xiaoyuan, Yue Bangqiang et al.. Laser self-mixing interference vibrometer based on current modulation and DSP demodulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041201
- 夏 巍, 张小元, 岳邦强等. 一种基于电流调制和 DSP 解调的激光自混合干涉测振仪[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041201
- Frits F. M. de Mul, Lorenzo Scalise, A. L. Petoukhova et al.. Glass-fiber self-mixing intra-arterial laser Doppler velocimetry: signal stability and feedback analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(4): 658~667
- P. de Groot, G. Gallatin, G. Gardopee et al.. Laser feedback metrology of optical systems [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(13): 2462~2464
- N. Servagent, T. Bosch, M. Lescure. A laser displacement sensor using the self-mixing effect for modal analysis and defect detection [J]. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1997, **46**(4): 847~850
- T. Suzuki, O. Sasaki, T. Maruyama. Phase-locked laser diode interferometer for surface profile measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(20): 4407~4410
- T. Bosch, N. Servagent, R. Chellali et al.. Three-dimensional object construction using a self-mixing type scanning laser range finder [J]. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1998, **47**(5): 1326~1329
- Mohammad Taghi Fathi, Silvano Donati. Thickness measurement of transparent plates by a self-mixing interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(11): 1844~1846
- Xiajuan Dai, Ming Wang, Cuirong Zhou. Multiplexing self-mixing interference in fiber ring lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(21): 1619~1621
- U. Zabit, R. Atashkhouei, T. Bosch et al.. Adaptive self-mixing vibrometer based on a liquid lens [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1278~1280
- Francesco P. Mezzapesa, Antonio Ancona, Teresa Sibillano et al.. High-resolution monitoring of the hole depth during ultrafast laser ablation drilling by diode laser self-mixing interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 822~824
- A. J. Hughes, E. R. Pike. Remote measurement of wind speed by laser Doppler system [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(3): 597~600
- Huang Shuhua, Liu Jianguo, Liu Wenqing et al.. A new method of aerosol particles time-of-flight accurate measurement based on differentiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2347~2350
- 黄书华, 刘建国, 刘文清等. 基于微分法精确测量气溶胶飞行时间的新方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2347~2350
- Lorenzo Scalise, Wiendelt Steenbergen, Frits de Mul et al.. Self-mixing feedback in a laser diode for intra-arterial optical blood velocimetry [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(25): 4608~4615
- C. Zakian, M. Dickinson, T. King. Particle sizing and flow measurement using self-mixing interferometry with a laser diode [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(6): S445~S452
- Huarui Wang, Jianqi Shen. Size measurement of nano-particles using self-mixing effect [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 871~874
- P. J. de Groot, G. M. Gallatin, S. H. Macomber. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter-modulated laser diode [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(21): 4475~4480
- Yu Yanguang, Ye Huiying, Yao Jianqun. Steady solution to a self-mixing interference system for measuring displacement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 80~84
- 禹延光, 叶会英, 姚建铨. 激光自混合干涉位移测量系统的稳态解 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 80~84
- Wan Xinjun, Zhang Shulian, Tan Yidong. Development of optical feedback technology of LD pumped microchip lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 9~12
- 万新军, 张书练, 谈宜东. LD 抽运微片激光器光回馈技术的研究进展 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(1): 9~12
- Ren Cheng, Zhang Shulian. Frequency modulation optical feedback characteristics of microchip Nd:YAG lasers with anisotropic external cavity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(6): 3858~3863
- 任 成, 张书练. 各向异性外腔微片 Nd:YAG 激光器调频回馈研究 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(6): 3858~3863
- S. Christophe, L. Eric, H. Olivier. Large linewidth-enhancement factor in a microchip laser [J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**(3): 033809