

相位调制激光多普勒频移测量方法的误差研究

杜 军 曲彦臣 赵卫疆 耿利杰 刘 闯 张瑞亮 陈振雷

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150008)

摘要 为了能够对相位调制激光多普勒频移测量方法进行定量分析以及优化设计,使其在实际应用中获得最佳测量结果,从该多普勒频移测量方法的工作原理出发,对其测量误差分布规律进行了理论与实验研究,建立了该方法的测量误差模型。并利用该模型对此测量方法的频移测量精度等方面受相位调制频率和相位调制深度的影响进行了理论研究,发现当相位调制频率为 Fabry-Perot 干涉仪透射率曲线半峰全宽的 0.63 倍以及相位调制深度为 1.08 时,该方法的测量精度可以达到最高。

关键词 物理光学;遥感;多普勒频移;相位调制;拍频

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0712001

Measuring Error of Phase Modulation Laser Doppler Shift Measuring Method

Du Jun Qu Yancheng Zhao Weijiang Geng Lijie Liu Chuang
Zhang Ruiliang Chen Zhenlei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150008, China)

Abstract By investigating distribution regularity of measuring error theoretically and experimentally, this paper builds measuring error mode of phase modulation laser Doppler shift measuring method based on its operating principle, which can be used to quantitative analyze and optimization design of Doppler shift measuring method for acquiring optimum measuring results in practical application. This error mode is utilized to theoretically investigate the influence of phase modulation depth and frequency on its frequency shift measuring accuracy and so on. It is found that measuring accuracy can reach the maximum when phase modulation frequency is equal to 0.63 times of full width of half maximum of Fabry-Perot interferometer transmission curve and phase modulation depth is 1.08.

Key words physical optics; remote sensing; Doppler shift; phase-modulating; beat frequency

OCIS codes 120.5060; 280.3340; 120.2230

1 引 言

激光多普勒频移测量在运动目标跟踪和大气风场测量等领域有着广泛的应用^[1-6],是激光遥感和激光检测中的一项重要内容。按照工作原理其主要可分为外差探测方法和直接探测方法^[7-9]。外差探测是利用本振光与信号光的拍频信号来测量激光的多普勒频移,测量精度高,但对激光线宽、频率稳定性以及光学对准的要求相当苛刻。直接探测方法,

以基于法布里-珀罗(F-P)干涉仪的边缘技术激光多普勒频移测量方法^[10]为代表,利用对源于同一激光脉冲的出射光与后向散射信号光通过 F-P 干涉仪透射率变化的测量得到多普勒频移量,对激光器和其他光学结构的要求相对宽松,但却较难获得到很高的测量精度^[11]。

为了兼顾外差探测与相干探测两种方法的优势,一种全新的多普勒频移探测方法被提出^[12]。其

收稿日期: 2014-01-16; **收到修改稿日期:** 2014-03-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(HIT. NSRIF. 2014043)

作者简介: 杜 军(1980—),男,博士研究生,主要从事多普勒激光雷达方面的研究。E-mail: dujun126@126.com

导师简介: 曲彦臣(1971—),男,博士,副教授,主要从事太赫兹激光器、激光雷达等方面的研究。

E-mail: queyanchen@hit.edu.cn(通信联系人)

原理为对信号光进行适当调制深度的正弦相位调制,使其在原有频率成分 ω (载波)的基础上产生振幅相等相位相反的正负一阶边带 $\omega + \Omega$ 和 $\omega - \Omega$ ^[13-14]。虽然此调制光直接入射平方率探测器时,两个边带与载波拍频产生的光电流振幅相等相位相反恰好完全抵消,不会有拍频电流输出,但是,如果利用 F-P 干涉仪调节两边带的振幅及相位,破坏其称性,就会有拍频信号输出^[15-16]。利用此拍频信号的振幅参量随信号光频率的变化而明显变化的性质就可以进行多普勒频移测量。由于是信号光自身进行拍频,所以该方法不再需要考虑信号光与本振光的波前在时间和空间上匹配的问题,从而降低对激光器和其他光学结构要求;由于是对单一固定频率的拍频信号进行测量,所以可通过降低系统等效噪声带宽的办法来提高测量信号的信噪比,从而提高

测量的精度。通过实验证明,这种方法可以比 F-P 边缘技术多普勒频移测量方法的测量精度提高一个数量级^[12]。

本文的目的就是要在之前相关研究工作^[12]的基础上,建立起这种新的多普勒频移测量方法的测量误差模型,并利用该模型对此方法进行定量研究以及优化设计,使其能够在实际中达到最佳测量结果。

2 误差分析方法

2.1 相位调制多普勒频移测量方法原理

正弦相位调制信号光经 F-P 干涉仪后,边带与载波产生的一倍调制频率拍频信号 i_Ω 可表示为

$$i_\Omega \propto E_0^2 |A_0| \cos(\Omega t - \phi_0), \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} |A_0| = \sqrt{A_R^2 + A_I^2} \\ \phi_0 = \arctan(A_I/A_R) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_R = 2J_0(\beta)J_1(\beta)\text{Re}[T(\omega)T^*(\omega + \Omega) - T(\omega - \Omega)T^*(\omega)] \\ A_I = 2J_0(\beta)J_1(\beta)\text{Im}[T(\omega)T^*(\omega + \Omega) - T(\omega - \Omega)T^*(\omega)] \end{cases}, \quad (3)$$

式中 E_0^2 为信号光强度, ω 和 Ω 分别为信号光频率和相位调制频率, $|A_0|$ 为相位调制拍频振幅, A_R 、 A_I 为 A_0 的实部和虚部, ϕ_0 为相位参量, β 为相位调制深度, $T(\omega)$ 为 F-P 干涉仪透射率系数, $J_0(\beta)$ 和 $J_1(\beta)$ 分别为零阶和一阶贝塞尔函数。关于(1)~(3)式的具体推导过程见参考文献^[12]。

假设 F-P 条纹精细度 $F=25$ 和相位调制频率 $\Omega=4 \times 10^{-3} R_{FS}$ (R_{FS} 为 F-P 透射率曲线自由光谱范围)时,相位调制拍频信号中 $|A_0|$ 项与 ϕ_0 项随信号光频率变化曲线如图 1(a)和(b)所示。图 1 中横轴采用以 F-P 透射率曲线 R_{FS} 为单位的相对频率坐

标,并令对应 F-P 干涉仪透射率峰值的横坐标值为零,由于该频率位置为出射激光的频率位置,即频移测量的工作点,所以图中横坐标代表多普勒频移量。利用图 1(b)中相位曲线 $\phi_0(\omega)$ 在对应 F-P 干涉仪透射率峰值位置 180° 的跳变来判断 A_0 的符号(假定 $\phi_0 > 0$, $A_0 = |A_0|$; $\phi_0 < 0$, $A_0 = -|A_0|$),可以得到 A_0 随频率变化的曲线,如图 1(c)所示。由于在 A_0 随频率变化曲线的上下两个峰值之间, A_0 是随频率变化的单调函数,所以可以利用 A_0 ,类似于在边缘技术中利用 F-P 干涉仪透射率一样^[17-18],进行信号光多普勒频移测量。

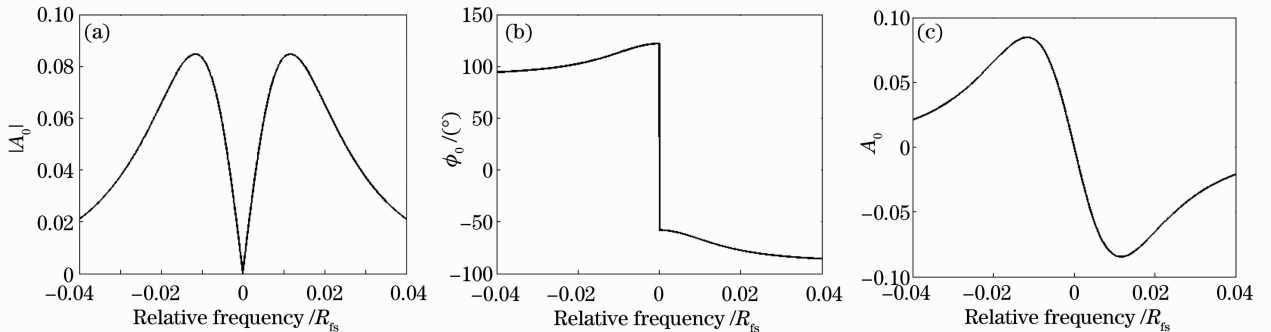


图 1 相位调制拍频信号振幅和相位参量的频率变化曲线。(a) $|A_0(\omega)|$ 曲线; (b) $\phi_0(\omega)$ 曲线; (c) $A_0(\omega)$ 曲线

Fig. 1 Phase modulation beat frequency signal amplitude and phase parameter curves of frequency changing.

(a) $|A_0(\omega)|$ curve; (b) $\phi_0(\omega)$ curve; (c) $A_0(\omega)$ curve

2.2 误差公式

要获得相位调制拍频信号中的 A_0 项来进行信号光多普勒频移测量,需要利用同频率的两个参考信号(正弦和余弦)分别与此拍频信号进行无时间延迟的相关运算,运算结果分别为

$$\begin{cases} I_s \propto + (E_0^2/2) |A_0| \cos \phi_0 \\ I_c \propto - (E_0^2/2) |A_0| \sin \phi_0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 I_s 为拍频信号与正弦参考信号相关运算结果, I_c 为拍频信号与余弦参考信号相关运算结果。

并且,要对信号光的能量进行检测,用于能量监测的探测器输出信号 I_0 可表示为

$$I_0 \propto cE_0^2, \quad (5)$$

式中 c 为常数,

$$|A_0| = \frac{2c \sqrt{I_c^2 + I_s^2}}{I_0}. \quad (6)$$

最后,利用公式 $\phi_0 = -\arctan(I_c/I_s)$ 判断 A_0 的符号。关于(4)~(6)式的具体推导见参考文献[12]。

以上过程主要是利用三个直接测量值 I_s 、 I_c 和 I_0 来获得间接测量值 $|A_0|$ 的过程。那么,对于单次测量,间接测量值 $|A_0|$ 的误差应由直接测量值 I_s 、 I_c 和 I_0 的误差按照以下关系进行计算:

$$\Delta |A_0| = \frac{\partial |A_0|}{\partial I_c} \Delta I_c + \frac{\partial |A_0|}{\partial I_s} \Delta I_s + \frac{\partial |A_0|}{\partial I_0} \Delta I_0. \quad (7)$$

将(7)式中各项的系数进行整理有

$$\begin{cases} \frac{\partial |A_0|}{\partial I_c} = \frac{2cI_c}{I_0 \sqrt{I_c^2 + I_s^2}} = -\frac{\sin \phi_0}{E_0^2/2} \\ \frac{\partial |A_0|}{\partial I_s} = \frac{2cI_s}{I_0 \sqrt{I_c^2 + I_s^2}} = \frac{\cos \phi_0}{E_0^2/2} \\ \frac{\partial |A_0|}{\partial I_0} = -\frac{2c \sqrt{I_c^2 + I_s^2}}{I_0^2} = -\frac{|A_0|}{I_0} \end{cases}. \quad (8)$$

所以(7)式可以写为

$$\Delta |A_0| = -\frac{\sin \phi_0}{E_0^2/2} \Delta I_c + \frac{\cos \phi_0}{E_0^2/2} \Delta I_s - \frac{|A_0|}{I_0} \Delta I_0. \quad (9)$$

可以证明测量误差 ΔI_0 、 ΔI_s 和 ΔI_c 之间不存在任何相关性,所以,间接测量值 $|A_0|$ 的标准偏差公式可以写为

$$\sigma_{|A_0|}^2 = \left(\frac{\sin \phi_0}{E_0^2/2}\right)^2 \sigma_{I_c}^2 + \left(\frac{\cos \phi_0}{E_0^2/2}\right)^2 \sigma_{I_s}^2 + \left(\frac{|A_0|}{I_0}\right)^2 \sigma_{I_0}^2, \quad (10)$$

式中 σ_{I_c} 、 σ_{I_s} 和 σ_{I_0} 分别为 I_c 、 I_s 和 I_0 三个测量值的标准偏差。

电信号测量值的标准偏差用系统噪声功率表示,由于 I_c 和 I_s 是对同一待测信号进行相同积分时间的相关运算获得的,所以根据参考文献[12]中(18)式可知,它们的测量标准偏差应为 $\sigma_{I_c} = \sigma_{I_s} = \sqrt{Bf_N}$ (B 为噪声等效带宽, f_N 为噪声功率密度),在此,统一用一个标准偏差 σ 来替代 σ_{I_c} 与 σ_{I_s} ,所以将(10)式中的前两项进行合并,写成

$$\sigma_{|A_0|} = \sqrt{\left(\frac{2}{E_0^2}\right)^2 \sigma^2 + \left(\frac{|A_0|}{I_0}\right)^2 \sigma_{I_0}^2}. \quad (11)$$

通过观察(11)式可以发现, $|A_0|$ 测量标准偏差由 $\sigma_1 = 2\sigma/E_0^2$ 和 $\sigma_2 = |A_0| \sigma_{I_0}/I_0$ 两部分构成。当假定信号光强度固定,且系统中存在散粒噪声和背景白噪声时,将这两部分标准偏差分别在图 2(a) 中用虚线和点线表示,可以看到它们分布情况截然不同,虚线部分 σ_1 的最大值出现在零频移位置,而点线部分 σ_2 的最小值出现在零频移位置。正是由于这两部分标准偏差具有这样的分布特点,所以当信号光频率靠近零频移位置的过程中, $|A_0|$ 的测量标准偏差先增大然后降低,如图 2(b) 所示。

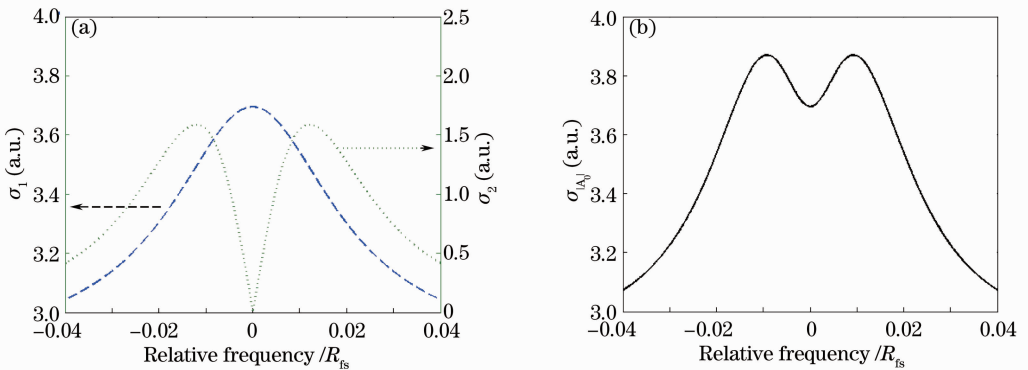


图 2 $|A_0|$ 测量标准偏差。(a) 分解标准偏差; (b) 总体标准偏差

Fig. 2 Measurement standard deviations of $|A_0|$. (a) Decomposition standard deviations; (b) standard deviation in population

由于利用 ϕ_0 判断 A_0 符号时不会引入额外误差,所以上面关于 $|A_0|$ 的误差公式也就是 A_0 的误差公式。另外,在单次测量中,拍频信号振幅参量的测量误差 ΔA_0 和信号光频移测量误差 $\Delta \nu$ 满足

$$\Delta A_0 = \frac{dA_0}{d\nu} \Delta \nu. \quad (12)$$

所以,经过多次等精度测量,它们的测量标准偏差应该满足

$$\sigma_{A_0} = \frac{dA_0}{d\nu} \sigma_\nu, \quad (13)$$

式中 σ_ν 为频移测量标准偏差。

设 $A_0(\omega)$ 鉴频函数的频移测量绝对灵敏度为

$$\Theta_{A_0} = \frac{dA_0}{d\nu}. \quad (14)$$

根据(13)式可知,利用函数 $A_0(\omega)$ 进行多普勒频移测量时,最终的频移测量标准偏差为

$$\sigma_\nu = \frac{\sigma_{A_0}}{\Theta_{A_0}} = \frac{\sigma |A_0|}{\Theta_{A_0}}. \quad (15)$$

根据(15)式可知最终频移测量误差取决于频移测量灵敏度 Θ_{A_0} , 振幅 A_0 和测量误差 σ_{A_0} 。

2.3 误差测量结果及分析

接下来,对拍频信号振幅 A_0 的测量误差(11)式进行实验研究,实验装置如图 3 所示。频率可调光纤激光器的输出光作为具有多普勒频移的信号光,光电倍增管 1(Photomultiplier 1)对信号光能量进行测量,光电倍增管 2(Photomultiplier 2)对相位调制拍频信号进行测量,对信号光束采用 $\times 5$ 倍扩束以降低其发散角,这样可以降低 F-P 透射率曲线的半峰全宽,使一次激光器频率扫描就可以测量出整个 $A_0(\omega)$ 鉴频曲线。关于本实验装置中各器件具体参数及实验步骤的介绍见参考文献[12]。

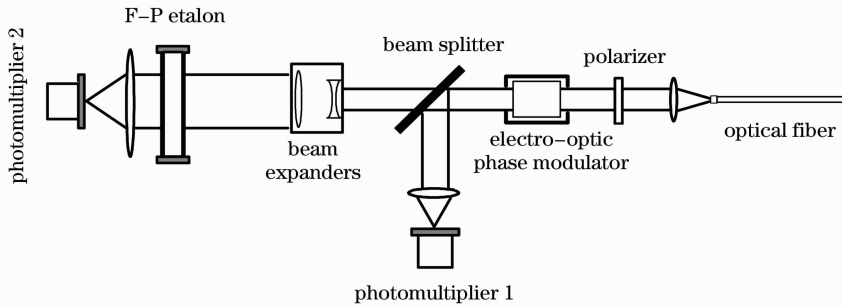


图 3 相位调制激光多普勒频移测量方法实验原理图

Fig. 3 Schematic diagram of phase modulation laser Doppler shift measurement

图 4(a)为对拍频信号振幅曲线 $A_0(\omega)$ 多次重复测量结果的平均值及标准偏差,图中将对应 F-P 透射率曲线峰值位置的横坐标定义为零,可以看到 $A_0(\omega)$ 曲线的分布情况与图 1(c)中的理论计算结果相一致。将图 4(a)中振幅曲线 $A_0(\omega)$ 测量标准偏差提取出来,并在图 4(b)中单独呈现,用于分析拍

频信号鉴频参量 A_0 的测量误差分布情况。通过观察图 4(b)可以发现,在信号光频率向着 F-P 峰值位置(图中零频率位置)靠近时,测量误差先升高然后又降低,这与图 2(b)中理论计算结果的基本规律符合得很好,证明了拍频信号鉴频参量 A_0 的测量误差(11)式的正确性。

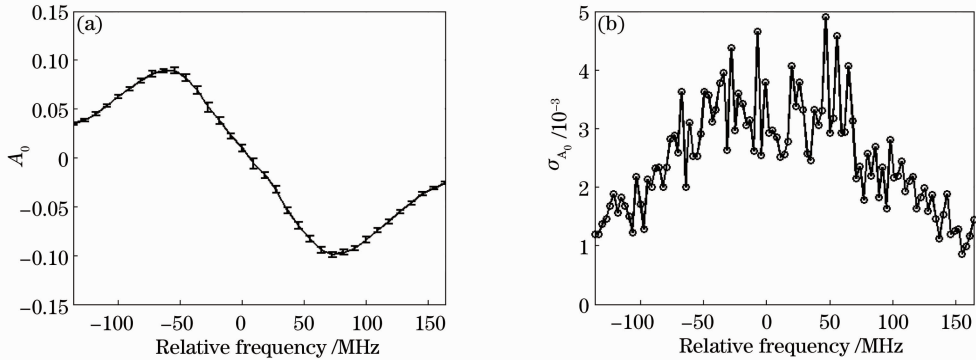


图 4 $A_0(\omega)$ 实验测量结果。(a)测量平均值和标准偏差;(b)测量标准偏差

Fig. 4 Experimental measurement results of $A_0(\omega)$. (a) Measurement average values and standard deviations; (b) measurement standard deviations

3 仿真研究

通过观察(2)、(3)式可知，相位调制深度 β 以及相位调制频率 Ω 影响着 $A_0(\omega)$ 的大小，而 $A_0(\omega)$ 的大小又会对频移测量灵敏度 Θ_{A_0} 和鉴频函数测量误差 σ_{A_0} 产生影响，从而会对最终的频移测量误差 σ_v 造成影响。所以，相位调制频率 Ω 和调制深度 β 是此种激光多普勒频移测量方法测量精度的两个重要影响因素。此部分内容就是利用 2.2 节中的误差公式对此多普勒频移测量方法受相位调制频率和深度的影响进行仿真研究，以确定在实际测量中最佳的相位调制参量值。

在仿真研究时，假设测量系统中除了存在散粒噪声还存在一定的背景白噪声，拍频信号测量通道等效噪声带宽是信号光能量检测通道等效噪声带宽的 1/10，信号光能量检测通道与拍频信号测量通道的分束比为 3:7，所用 F-P 干涉仪的条纹精细度为 25。

3.1 相位调制深度对测量影响的仿真研究

由于相位调制深度 β 对贝塞尔函数 $J_n(\beta)$ 会产生影响，而 A_0 中又含有 $[2J_0(\beta)J_1(\beta)]^2$ 项，所以调制深度 β 会对相位调制拍频信号振幅 A_0 产生影响。图 5 为 A_0 中贝塞尔函数项 $[2J_0(\beta)J_1(\beta)]^2$ 随调制深

度 β 的变化规律。根据(2)、(3)式可知，图 5 反映的是，在信号光频率 ω 和相位调制频率 Ω 为固定值时，相位调制拍频信号振幅 A_0 随调制深度 β 的变化规律。通过观察图 5 可以发现，振幅 A_0 在 $\beta = 1.08$ 位置最大。因此，在讨论相位调制深度 β 对相位调制拍频信号多普勒频移测量方法的影响时，选取了三个相位调制深度值 $\beta = 0.6、1.08、1.8$ 进行研究。

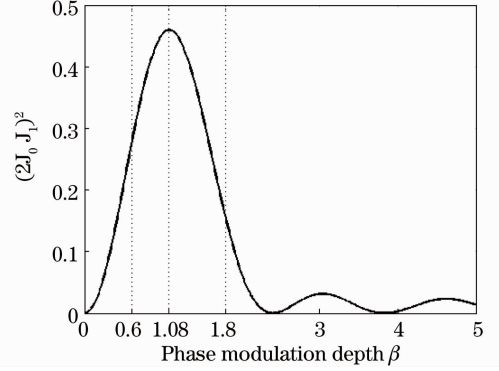


图 5 A_0 中贝塞尔函数项 $[2J_0(\beta)J_1(\beta)]^2$ 随调制深度 β 的变化曲线

Fig. 5 Curve of Bessel function $[2J_0(\beta)J_1(\beta)]^2$ in A_0 changing with phase modulation depth β

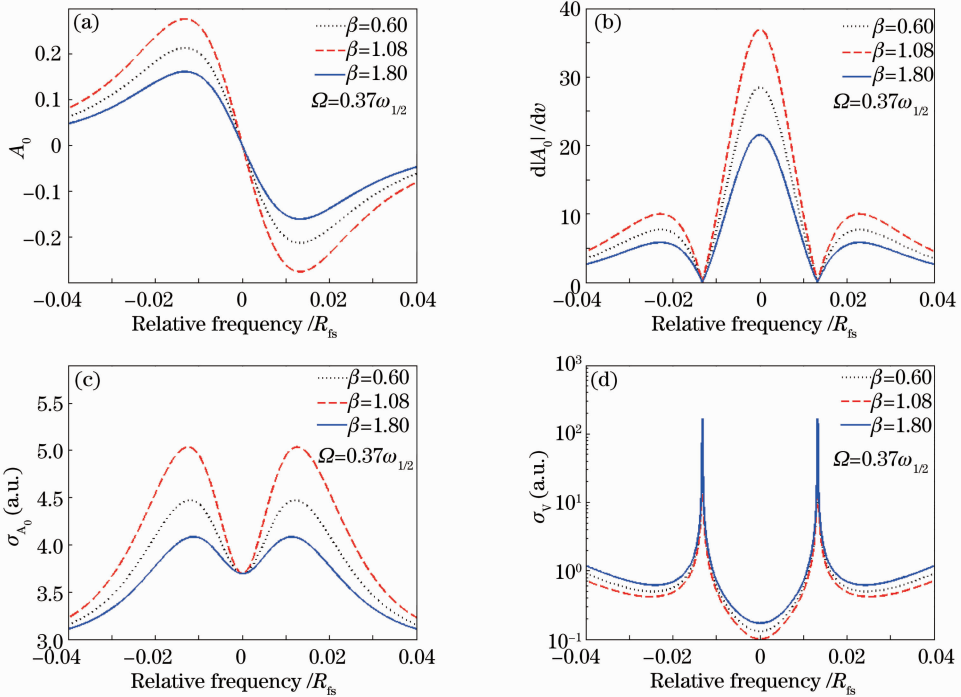


图 6 不同调制深度 β 情况下，(a)鉴频函数 A_0 曲线；(b)频移测量灵敏度曲线；(c)鉴频函数 A_0 测量误差曲线；(d)频移测量误差曲线

Fig. 6 Under different phase modulation depths β , (a) frequency discrimination function A_0 curve; (b) frequency shift measurement sensitivity; (c) frequency discrimination function A_0 measuring error curve; (d) frequency shift measuring error curve

图 6 为假设相位调制频率一定时,相位调制拍频信号多普勒频移测量方法中鉴频函数 A_0 曲线、频移测量灵敏度曲线、鉴频函数 A_0 测量误差曲线以及频移测量误差曲线随调制深度 β 的变化规律。图中,坐标原点对应 F-P 透射率峰值点,该点作为频移测量的工作点;横坐标代表频移量,采用以 F-P 自由光谱范围 R_{fs} 为单位的相对坐标值;调制频率 Ω 是以 F-P 透射率曲线半峰全宽 ($\omega_{1/2}$) 为单位的相对值。通过图 6(a) 可以看到,随着调制深度的增加,拍频信号的鉴频函数 A_0 曲线的上下两个峰值之间的距离先增大后减小,这样的变化必然会导致测量灵敏度曲线以及鉴频函数 A_0 测量误差曲线发生变化。通过图 6(b)、(c) 可以看到,随着调制深度的增加,频移测量灵敏度曲线和鉴频函数 A_0 测量误差曲线的峰值也是先增大后减小。

根据(15)式可知,频移测量灵敏度曲线和鉴频函数 A_0 测量误差曲线的变化必然导致频移测量误差发生改变。如图 6(d) 所示,随着调制深度的增加,频移测量误差先减小后增大,即在调制深度为 $\beta=1.08$ 时,相位调制拍频信号振幅参量多普勒频

移测量方法的测量误差最小。

另外,通过观察图 6(b) 可知,随着调制深度的改变,频率测量灵敏度为零的两个点之间的距离没有发生变化,即频移测量范围不变。

综上所述,在实际利用相位调制拍频信号振幅参量进行多普勒频移测量时,应适当地选择调制深度 ($\beta=1.08$) 才会使其测量精度最高,但其频移测量范围不会受到调制深度的影响。

3.2 相位调制频率对测量影响的仿真研究

图 7 为假设调制深度 ($\beta=1.08$) 一定时,相位调制拍频信号多普勒频移测量方法中鉴频函数 A_0 曲线、频移测量灵敏度曲线、鉴频函数 A_0 测量误差曲线以及频移测量误差曲线随相位调制频率 Ω 改变时的变化规律。

通过观察图 7(a) 可以看到,随调制频率的增加,鉴频函数 A_0 的上下两个峰值之间的高度差先增大后减小,但两个峰值点间的频率间隔却在一直变大。这样的变化必然会导致频移测量灵敏度曲线以及鉴频函数 A_0 测量误差曲线发生变化,如图 7(b)、(c) 所示。

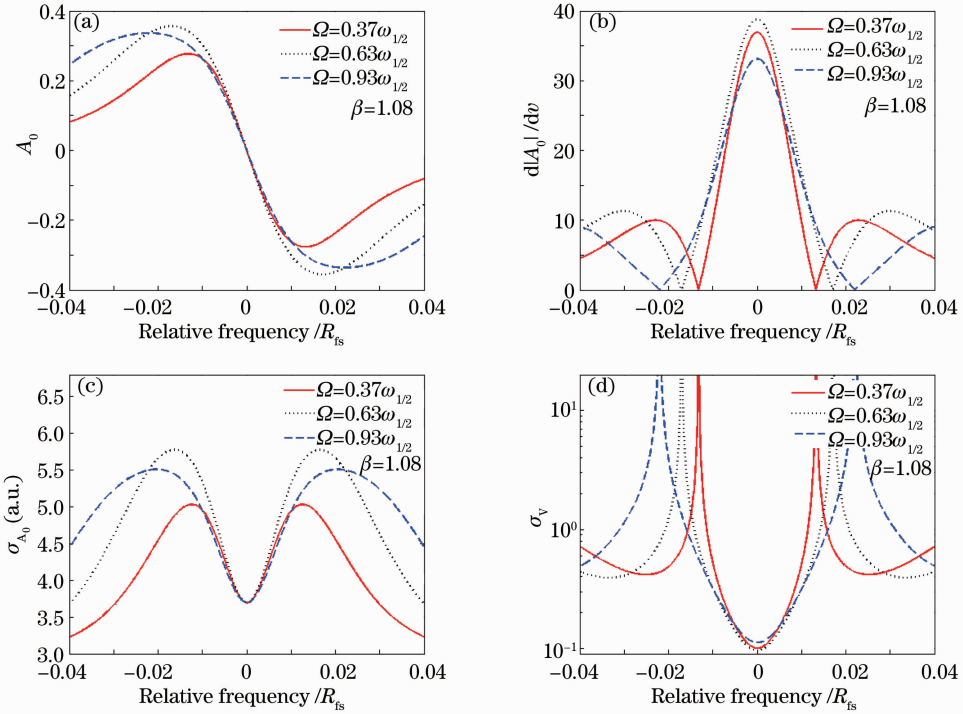


图 7 不同调制频率情况下, (a) 鉴频函数 A_0 曲线; (b) 频移测量灵敏度曲线; (c) 鉴频函数 A_0 测量误差曲线; (d) 频移测量误差曲线

Fig. 7 Under different phase modulation frequencies, (a) frequency discrimination function A_0 curve; (b) frequency shift measurement sensitivity; (c) frequency discrimination function A_0 measuring error curve; (d) frequency shift measuring error curve

如图 7(b)所示,随着调制频率的增加,频移测量灵敏度曲线的峰值先增加后降低,但频移测量灵敏度曲线上两个零值点的频率间隔却在一直增加。这两点变化说明,对于相位调制拍频信号多普勒频移测量方法,随着调制频率的增加,其测量灵敏度先增大后减小,而频移测量范围一直在增大。另外,如图 7(c)所示,随着调制频率的增加,鉴频函数 A_0 测量误差曲线的峰值先增大而后开始降低。

根据(15)式可知,频移测量灵敏度曲线和鉴频函数 A_0 测量误差曲线的变化必然导致频移测量误差发生改变。如图 7(d)所示,随着调制频率的增加,频移测量误差总体先降低再增大。

综上所述,在实际利用相位调制拍频信号进行多普勒频移测量时,应尽量提高相位调制频率 Ω ,这样会使频移测量范围得到提高,但是,测量误差在调制频率 $\Omega=0.63\omega_{1/2}$ 时达到最低,然后随着调制频率的进一步增加开始升高。

4 结 论

根据误差合成理论推导出信号光相位调制拍频信号多普勒频移测量方法的误差公式,并通过与实验结果相对比验证了此公式的正确性。此公式对该频移测量方法的定量研究以及各项参数的设计与优化都具有至关重要的作用。在利用该公式对基于此方法的频移测量系统进行参数优化过程中,证明当相位调制频率为 F-P 干涉仪透射率曲线 $\omega_{1/2}$ 的 0.63 倍时,以及调制度为 $\beta=1.08$ 时,该结构可以达到最佳的测量精度。

参 考 文 献

- Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu, *et al.*. Lower bound for parameter estimation of mobile laser Doppler velocimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1012001.
周 健, 魏 国, 龙兴武, 等. 车载激光多普勒测速仪参数估计的 Cramer-Rao 下限[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1012001.
- Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter for vehicle inertial navigation system [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1316—1321.
周 健, 龙兴武. 用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1316—1321.
- Li Yanchao, Zhang Liang, Yang Yanling, *et al.*. The method for multi-beam laser heterodyne high-precision measurement of the glass thickness [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(8): 5473—5478.
李彦超, 章 亮, 杨彦玲, 等. 多光束激光外差高精度测量玻璃厚度的方法[J]. *物理学报*, 2009, 58(8): 5473—5478.
- Liu Jiqiao, Bu Lingbing, Zhou Jun, *et al.*. Optical frequency discriminator of a mobile direct detection Doppler wind lidar [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(10): 1339—1344.

- 刘继桥, 卜令兵, 周 军, 等. 车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器 [J]. *中国激光*, 2006, 33(10): 1339—1344.
- Haiyun Xia, Xiankang Dou, Dongsong Sun, *et al.*. Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method [J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15286—15300.
- Sui Xiaolin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, *et al.*. Research on all-fiber structure velocity measurement coherent lidar [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208007.
睦晓林, 周寿桓, 赵 鸿, 等. 一种全光纤结构的相干激光测速雷达研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1208007.
- Bai Yan, Ren De Ming, Zhao Wei Jiang, *et al.*. Heterodyne Doppler velocity measurement of moving targets by mode-locked pulse laser [J]. *Opt Express*, 2012, 20(2): 764—768.
- Shen Fahua, Shu Zhifeng, Sun Dongsong, *et al.*. Improvement of wind retrieval algorithm for Rayleigh Doppler wind lidar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 030702.
沈法华, 舒志峰, 孙东松, 等. Rayleigh 散射 Doppler 激光雷达风场反演方法改进[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 030702.
- Liu Lisheng, Zhang Heyong, Guo Jin, *et al.*. Characteristics analysis of the photons arrival time interval of laser beat signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0403001.
刘立生, 张合勇, 郭 劲, 等. 激光拍频信号光子到达时间间隔特性分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0403001.
- Pu Lili, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.*. Receiving characteristics of coherent lidar under partially coherent condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1228002.
濮莉莉, 周 煜, 孙剑锋, 等. 激光雷达部分相干外差探测接收特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1228002.
- Du Jun, Ren Deming, Zhao Weijiang, *et al.*. Theoretical description of improving measurement accuracy for incoherence Mie Doppler wind lidar [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(2): 024211.
- Du Jun, Zhao Weijiang, Qu Yanchen, *et al.*. Laser Doppler shift measuring method based on phase modulator and Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 184206.
杜 军, 赵卫疆, 曲彦臣, 等. 基于相位调制器与 Fabry-Perot 干涉仪的激光多普勒频移测量方法[J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 184206.
- Yang Zhenyu, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Testing and analysis of large-range displacement measurement precision in sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer [J] *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412007.
杨振宇, 王 鸣, 夏 巍, 等. 正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量精度测试与分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412007.
- Duan Jie, Wen Yu, Xie Xiaoping. An all-optical XOR logic gate scheme for phase-modulated or amplitude-modulated signals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 030602.
段 杰, 温 钰, 谢小平. 一种应用于强度与相位调制信号的全光异或逻辑门方案[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 030602.
- Eric D Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. *Am J Phys*, 2001, 69(1): 79—87.
- Seel Stefan, Storz Rafael, Ruoso Giuseppe, *et al.*. Cryogenic optical resonators; a new tool for laser frequency stabilization at the 1 Hz level [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78(25): 4741—4744.
- Lei Tang, Zhifeng Shu, Jiehui Dong, *et al.*. Mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on double-edge technique [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(8): 726—731.
- Xia Haiyun, Sun Dongsong, Yang Yuanhong, *et al.*. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(29): 7120—7131.