

# 相位调制激光多普勒鉴频参量的 虚拟数字锁相测量方法

杜 军<sup>1</sup> 李世明<sup>1\*</sup> 赵卫疆<sup>2</sup> 曲彦臣<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨师范大学计算机科学与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

<sup>2</sup> 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 150080

**摘要** 提出了利用基于 LabView 可视化语言的虚拟数字锁相技术对相位调制激光多普勒频移测量方法的鉴频参量进行测量的方法, 并对其进行了理论与实验研究。为了防止待测信号与参考信号通道间的干扰以及在参考信号传输过程中混入噪声, 该虚拟数字锁相技术采用参考信号内部生成的方法。为了保证参考信号与待测信号之间的同频性以获得精确的鉴频参量测量结果, 在该虚拟数字锁相技术中引入了虚拟数字锁相环来实时精确捕获待测信号频率。通过利用其对实际信号光相位调制信号的测量, 证明了该虚拟数字锁相鉴频参量提取方法的正确性和可行性。

**关键词** 多普勒频移; 相位调制; 锁相技术; 信号处理

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s112001

## Measuring Method of Virtual Digital Phase Locking for Phase Modulation Laser Doppler Frequency Parameter

Du Jun<sup>1</sup> Li Shiming<sup>1</sup> Zhao Weijiang<sup>2</sup> Qu Yanchen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Computer Science and Information Engineering, Harbin Normal University,  
Harbin, Heilongjiang 150080, China

<sup>2</sup> National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150080, China

**Abstract** The virtual digital phase locking technique based on LabView visual language is proposed to measure the frequency parameter of phase modulation laser Doppler shift measuring method, and investigate it theoretically and experimentally. For preventing the disturbance between the test signal and the reference signal channels and mixed with noise in the process of reference signal transmission, this virtual digital phase locking technique adopts the method of reference signal generated inside. In order to ensure the same frequency between reference signal and test signal for accurate frequency parameter measurements, the virtual digital phase locking loop for accurately capturing the test signal frequency is introduced into the virtual digital phase locking technique. The validity and feasibility of the virtual digital phase locking frequency parameter measuring method are proved through measuring the practical phase modulation beat signal.

**Key words** Doppler frequency shift; phase modulation; phase locking technique; signal processing

**OCIS codes** 120.5060; 280.3340; 120.2230

## 1 引 言

通过测量出射激光回波信号的多普勒频移来获取目标速度信息, 是光电检测和激光遥感领域中的一项重要方法, 其在三维大气风场遥感<sup>[1,2]</sup>等方面有着广泛的应用。在工作原理上, 对激光多普勒频移的测量方法主要可分为: 相干探测(外差探测)<sup>[1]</sup>和直接探测(非相干探测)<sup>[2]</sup>。相干探测是利用回波信号光与本振光

收稿日期: 2015-01-24; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12511147)

作者简介: 杜 军(1980-), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光雷达、物联网等方面的研究。E-mail: dujun126@126.com

\* 通信联系人。E-mail: lsm18@163.com

之间的拍频信号来进行激光多普勒频移测量。由于本振光与杂散光不相干而产生的滤波作用,以及本振光对信号光的转换增益作用,使相干探测方法具有高测量精度和灵敏度的优点。然而,必须要求信号光与本振光的直径、方向、偏振、振幅、相位等在探测器的光敏面上严格匹配,才能获得一定的拍频效率;并且,必须严格要求出射激光线宽和频率稳定性,才能保证本振光与信号光之间的相干性。所以相干探测对光源、光学器件以及装调等方面的要求极其苛刻,难于向全面工程化方向发展。直接探测中最主要采用的是边缘技术测量方法,其利用窄带滤波器(如法布里-珀罗(F-P)干涉仪等)将回波信号光的频率移动变成相对能量的变化,从而获得多普勒频移信息。虽然,由于其系统等效噪声功率高,其测量精度较低,但是其对光源和光学器件的要求宽松得多,在技术上更容易实现。

为了能够兼顾这两种探测方法各自的优势,即具有高的测量精度,又对光学器件及其装调的要求宽松容易实现,提出了一种全新的激光多普勒频移探测方法,即相位调制激光多普勒频移测量方法<sup>[3]</sup>。其原理为,对信号光进行适当的正弦相位调制,使原有频率成分 $\omega$ (载波)的两侧出现相位相反、振幅相等的正负一阶边带 $\omega + \Omega$ 和 $\omega - \Omega$ ( $\Omega$ 为相位调制频率),然后利用F-P干涉仪调整它们振幅及相位,来破坏其对称性,这样边带与载波就会产生固定频率的拍频信号输出<sup>[4-5]</sup>。由于在该拍频信号归一化振幅 $A_0$ (简称振幅)随信号光频率变化的曲线中,存在上下两个峰值,并且在它们之间 $A_0$ 是随频率变化的单调函数,所以可以像在边缘技术中利用F-P干涉仪透过率曲线一样<sup>[6-7]</sup>,利用 $A_0$ 进行信号光多普勒频移测量。

在相位调制多普勒频移测量方法中,参与拍频的光波是同一信号光的不同频率成分,由于它们经历相同的时间和空间,所以在探测器的光敏面上它们的光束直径、方向、偏振、振幅、相位等必然一致,且相干性不会因探测距离的增加而降低,这样无须过高要求系统的光学结构和光源,自然就可以获得极高的拍频效率,这就使得这种方法具备了普通直接探测方法对系统要求宽松容易实现的优势。另外,由于回波信号光相位调制拍频信号的频率为单一固定值,就可以通过降低系统工作带宽,来尽可能的降低进入系统的噪声,从而获得较高的测量精度,这就可以使得这种方法具备了普通相干探测方法测量精度高的优势。在本课题组之前的工作中<sup>[3,8]</sup>,已经通过实验证明了这种方法在测量精度方面的优势。

在相位调制激光多普勒频移测量方法中,拍频信号的振幅参量作为多普勒频移测量的鉴频参量,而拍频信号的相位参量作为判断频移方向的辅助参量。所以对相位调制拍频信号振幅和相位参量的提取,就成为该激光多普勒频移测量方法能否在工程技术中得到实现并发挥其自身优势的关键环节。在通信以及信号检测领域,锁相技术是对固定频率周期信号振幅和相位参量测量最为成熟有效的方法。自上个世纪60年代第一台锁相放大器(LIA)出现以来,使得信号检测技术获得了突破性进展,使其成为探索和发现新的自然规律的重要手段。最早的LIA由模拟电路构成,伴随着数字技术的进步,目前已由模数混合型向全数字锁相放大器发展。数字锁相放大器(DLIA)是采用数字算法来代替模拟器件,其在动态范围、零点漂移、线性失真等方面具有模拟锁相放大器所不可比拟的优势<sup>[9]</sup>,特别是当DLIA基于PC系统时,其核心数字处理单元为功能强大的CPU,在操作系统平台上具有极其丰富的应用软件,而且其算法设计可以不受硬件条件的限制,使DLIA具有更高的灵活性<sup>[10-11]</sup>。

本文的目的就是要研究如何利用基于LabView计算机可视化语言的虚拟数字锁相技术来实现对信号光相位调制拍频信号鉴频参量的提取,以保证该激光多普勒鉴频方法在实际中更好的应用。另外,此虚拟数字锁相技术也可以在基于此种相位调制拍频信号的其他技术领域获得应用,如激光稳频技术(Pound-Drever-Hall技术)<sup>[4]</sup>以及原子物理学中光学共振测量(频率调制光谱学)<sup>[5]</sup>,来推动其进一步发展。

## 2 LabView 虚拟数字锁相技术

### 2.1 数字锁相技术原理

数字锁相技术与模拟锁相技术一样,仍以互相关检测为基础,使待测信号与同频参考信号进行数字互相关运算。设 $S(t)$ 为待测周期信号

$$S(t) = A \sin(2\pi ft + \theta) + n(t), \quad (1)$$

式中 $n(t)$ 为信号中的随机噪声。

与待测信号同频的正弦和余弦参考信号分别为

$$r_s(t) = \sin(2\pi ft), \tag{2}$$

$$r_c(t) = \cos(2\pi ft). \tag{3}$$

数字锁相算法首先要以采样频率  $f_s$  对待测信号(1)式进行采样,对其进行离散化处理。如果令  $N = f_s/f$ ,采集信号周期为  $q$ ( $q$ 为整数),则采样总点数为  $M = Nq$ ,采样时间间隔为  $t_s = 1/(Nf)$ ,于是可得到待测信号的采集序列为<sup>[12-14]</sup>

$$S(k) = A\sin(2\pi f \cdot kt_s + \theta) + n(kt_s) = A\sin(2\pi k/N + \theta) + n(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, M-1. \tag{4}$$

按照同样的方式,参考信号的离散序列  $r_s(k)$ 和  $r_c(k)$ 可表示为

$$r_s(k) = \sin(2\pi k/N), \tag{5}$$

$$r_c(k) = \cos(2\pi k/N). \tag{6}$$

待测信号  $S(k)$ 与参考信号  $r_s(k)$ 和  $r_c(k)$ 的数字互相关运算为

$$R_{S r_{s(c)}}(\tau) = \frac{1}{M-\tau} \sum_{k=0}^{M-1-\tau} S(k) r_{s(c)}(k+\tau), \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, M-1 \tag{7}$$

由于随机噪声与参考信号不相关,所以有

$$R_{S r_s}(\tau) = (A/2) \cos(2\pi f\tau + \theta), \tag{8}$$

$$R_{S r_c}(\tau) = (A/2) \sin(2\pi f\tau + \theta), \tag{9}$$

将以上两式代入参考文献[3]中的(16)和(17)式计算可以分别获得待测信号的振幅和相位参量,上述过程实质上为参考文献[3]中相关运算的数字化过程。

### 2.2 虚拟数字锁相技术的 LabView 实现

本节内容为,利用可视化语言 LabView 实现 2.1 节中介绍的数字锁相算法,具体程序见图 1(FFT:快速傅里叶变换)。在此数字锁相程序中,参考信号由 LabView 自身函数生成,并非由外部信号源提供,这样可以避免传统方式中待测信号与参考信号通道间的干扰以及在参考信号传输过程中混入噪声。按照 2.1 节中给出的计算步骤,该程序先将待测信号与参考信号进行相乘,然后对相乘结果进行求和得到  $R_{S r_s}(\tau)$ 和  $R_{S r_c}(\tau)$ ,最后再利用参考文献[3]中的(16)和(17)式计算出待测信号的振幅和相位参量。

为了验证该数字锁相程序的功能,将程序自身函数生成的正弦信号作为待测信号进行测量。为使该待测信号更接近实验中获得的信号光相位调制输出信号(见参考文献[3]),在该信号中混入噪声以及二次谐波,测量结果如图 2 所示。

图 2 为该虚拟数字锁相程序的前面板,通过它输入待测信号的频率、振幅和初相位分别为 30 MHz、

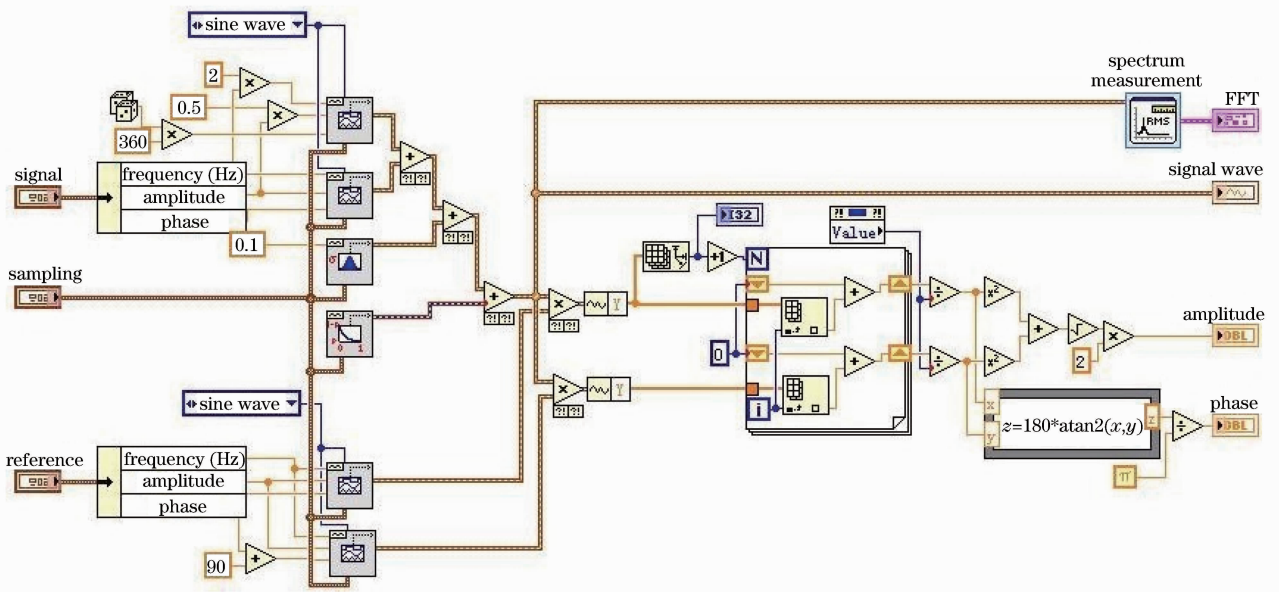


图 1 数字锁相核心算法程序

Fig. 1 Digital phase lock core algorithm procedures

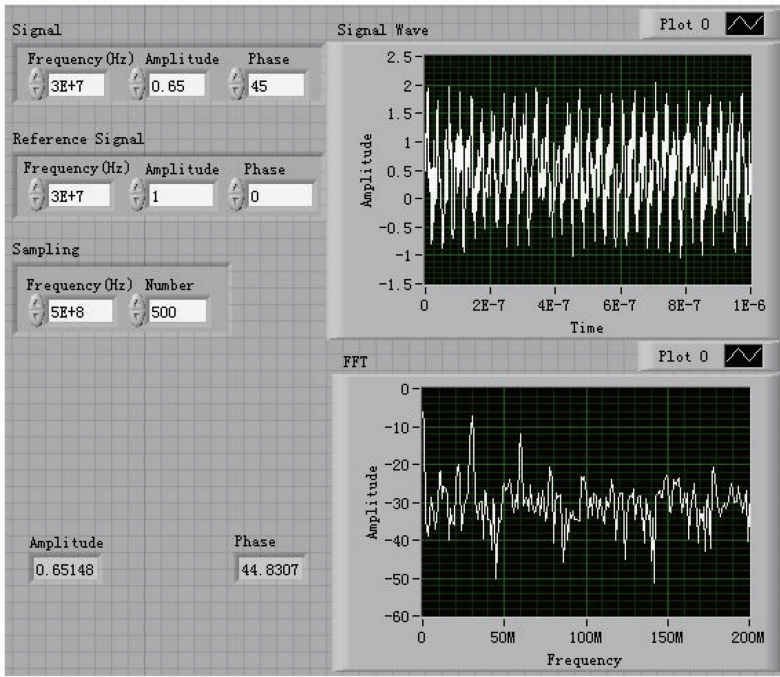


图 2 数字锁相程序前面板

Fig. 2 Digital phase lock procedures front panel

0.65和 $45^\circ$ ;参考信号的频率、振幅和相位分别为30 MHz、1和 $0^\circ$ ;采样频率和采样点数分别为500 MHz和500;并显示待测信号的波形图与频谱。该前面板显示此程序最终计算的结果分别是振幅0.65148、相位 $44.8307^\circ$ ,这与设定待测信号的振幅和初相位参量值0.65和 $45^\circ$ 相当接近。此结果证明该虚拟数字锁相程序可以完成相位调制拍频信号振幅和相位提取的功能。

### 3 锁相环原理及其数字化实现

参考信号与待测信号之间的同频性是影响锁相放大器性能的一项重要因素是。2.2节中介绍的虚拟数字锁相程序采用内部产生参考信号的方式,虽然该方式会带来很多好处,但是依然无法避免其参考信号可能与待测信号之间会存在频率偏差,因此在利用2.2节中介绍的虚拟数字锁相程序生成参考信号与待测信号进行相关运算前,应该对待测信号的频率进行跟踪,使虚拟数字锁相程序生成参考的频率能够随着待测信号频率的漂移而变化,这样才能使虚拟数字锁相放大器的输出结果更接近待测信号的实际值,而锁相环技术就是用来捕获待测信号频率的有效手段。本节基于电学中锁相环的原理来设计一种虚拟数字锁相环,使其能够与2.2节中介绍的虚拟数字锁相程序相结合,来提高待测信号测量精度。

#### 3.1 电学中锁相环原理

锁相环是相位负反馈控制电路,其特点是利用外部信号来控制环路内部振荡信号的频率及相位。一个锁相环通常的基本组成部分是:鉴相器(PD)、低通滤波器(LP)、压控振荡器(VCO)。其原理框图如图3所示<sup>[15]</sup>。

图3中锁相环的工作过程为:首先,利用鉴相器(PD)获取输入信号 $u_i(t)$ 与输出信号 $u_o(t)$ 之间的相位

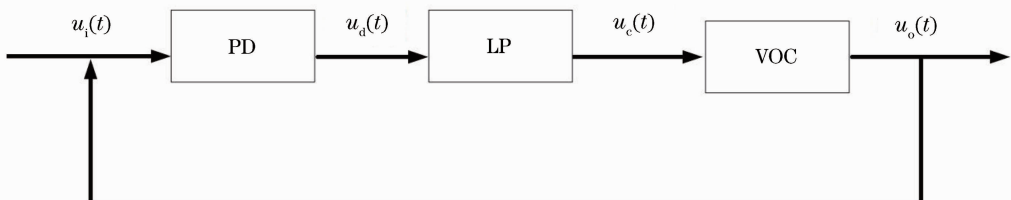


图 3 锁相环原理图

Fig. 3 Principle diagram of phase-locked loop

差,并将此相位差转化为电压信号  $u_d(t)$  进行输出;然后,信号  $u_d(t)$  经过低通滤波器(LP)形成控制电压  $u_c(t)$  进行输出;最后,控制电压  $u_c(t)$  调节压控振荡器(VCO)的输出频率。

按照以上电学中锁相环的原理,可以利用 LabView 语言来实现虚拟数字锁相环,以配合 2.2 节中虚拟数字锁相放大器的使用。下面介绍锁相环的数学模型以及对其进行软件实现的具体方法。

### 3.2 锁相环数学模型分析

设外界输入信号与给定的参考信号分别为

$$u_i(t) = u_m \sin(\omega_i t + \theta_i), \tag{10}$$

$$\begin{cases} u_{r(s)}(t) = \sin(\omega_o t) \\ u_{r(c)}(t) = \cos(\omega_o t) \end{cases}, \tag{11}$$

式中  $\omega_i$  和  $\omega_o$  分别为待测信号和参考信号频率的初值,  $u_m$  为待测信号振幅。

将两个参考信号分别与输入信号进行相乘来完成锁相环中鉴相器 PD 的功能<sup>[15]</sup>

$$u_{ds}(t) = Ku_i u_{rs}/2 = Ku_i \{ \sin[(\omega_i + \omega_o)t + \theta_i] + \sin[(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i] \} / 2, \tag{12}$$

$$u_{dc}(t) = Ku_i u_{rc}/2 = Ku_i \{ \cos[(\omega_i + \omega_o)t + \theta_i] + \cos[(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i] \} / 2, \tag{13}$$

低通滤波器 LP 将上式中的和频分量滤掉后,剩下的差频分量作为改变参考信号频率参数的控制参数

$$u_{cs}(t) = Ku_i \sin[(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i - \theta_o] / 2, \tag{14}$$

$$u_{cc}(t) = Ku_i \cos[(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i - \theta_o] / 2, \tag{15}$$

利用以上两个参量对参考信号频率进行控制的具体方法如下:

首先,利用这两个参数获得输入信号与参考信号之间的相位差<sup>[15]</sup>

$$\theta_d(t) = \arctan \left[ \frac{u_{cs}(t)}{u_{cc}(t)} \right], \tag{16}$$

然后,利用这个相位差获得输入信号与参考信号之间的频率差

$$\Delta\omega = \frac{d\theta_d(t)}{dt} = \frac{d(\omega_i - \omega_o)t}{dt} + \frac{d(\theta_i - \theta_o)}{dt} = \omega_i - \omega_o, \tag{17}$$

最后,将这个频率差反馈到参考信号的初始值,使参考信号的频率向输入信号的频率靠近<sup>[15]</sup>

$$\omega_r = \omega_o + \Delta\omega. \tag{18}$$

在实际程序中,可以利用循环使参考信号的频率逐步接近输入信号的频率,同时(17)式作为锁相环是否锁定的判断条件,即循环的终止条件。

### 3.3 虚拟数字锁相环的 LabView 实现

虚拟数字锁相环的 LabView 程序见图 4。在此数字锁相环程序中,首先,利用子程序 PD 将待测信号与程序生成参考信号进行乘法运算;接下来,经过低通滤波器滤掉和频成分;然后,利用子程序 VOC 计算参考

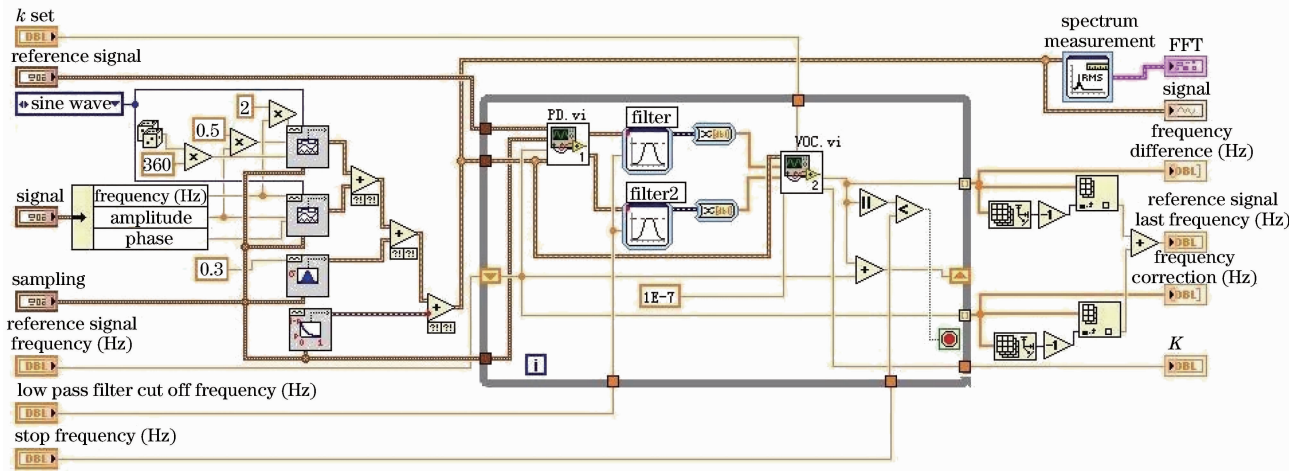


图 4 锁相环主程序

Fig. 4 Phase-locked loop main program



信号与待测信号之间的相位差,再利用该相位差计算出频率差。最后,将此频率差与程序计算停止参数进行比较。如果该频率差小于停止参数,说明待测信号与参考信号之间的频率差在该数字锁相程序所允许的范围之内,不会对最终结果造成太大影响,计算结束;如果计算的频率差大于停止参数,则需要用它对参考信号初始频率进行修正,并重复上述计算过程直到频率差小于停止参数。此数字锁相环中子程序 PD 和子程序 VOC 分别在图 5 和图 6 中给出。

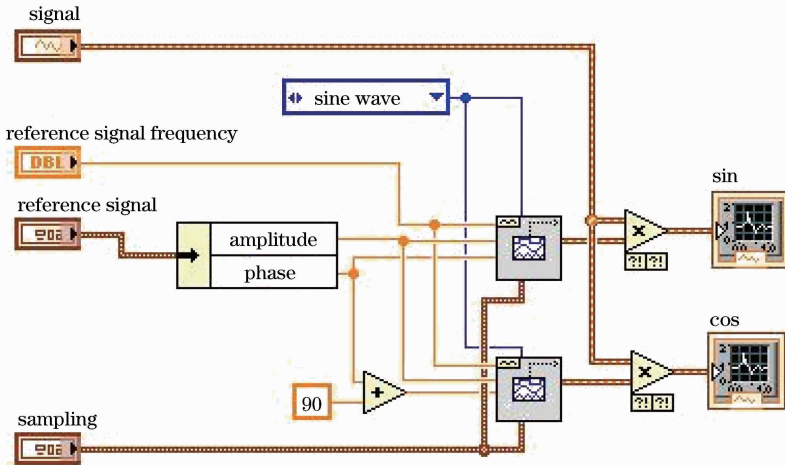


图 5 子程序 PD

Fig. 5 Subprogram PD

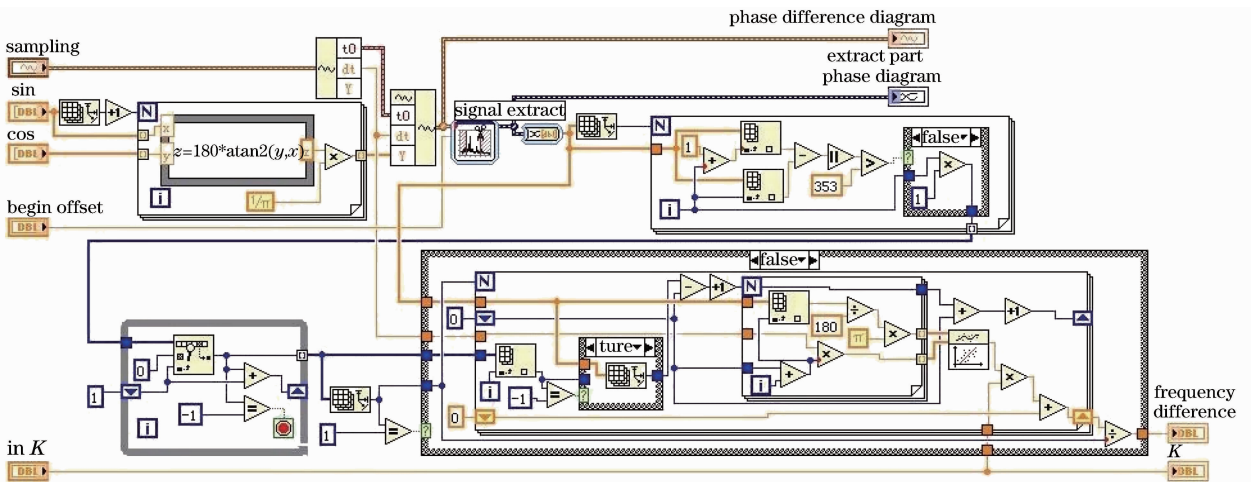


图 6 子程序 VOC

Fig. 6 Subprogram VOC

为了验证该程序的可靠性,依然使用 LabView 自身函数生成的待测信号进行测量。同时为了使此待测信号更接近实际情况,在该信号中依然混有二次谐波以及噪声。

该数字锁相环程序前面板在图 7 中给出,通过它可以对待测信号、参考信号以及采样信息等初始参数进行设置,可以对频率差计算停止参数值进行设置,可以显示待测信号的波形及频谱,可以显示该程序每次循环的频率差计算的结果及利用此频率差修正后的参考信号频率,可以显示该程序最终计算结果。

对此数字锁相环程序各项初始参数的设置,如图 7 所示,可以看到待测信号频率与参考信号初始频率之间存在 2 MHz 的偏差。通过对图中此锁相环程序的计算结果进行观察可以发现,每次循环计算的频率偏差值在逐渐减小,每次循环修正后的参考信号频率值逐渐向待测信号频率值接近;在频率偏差计算值为 439.493 Hz(小于计算停止频率 2000 Hz)时,循环结束;最终修正后的参考信号频率值为 31.996 MHz,其非常接近待测信号的频率(32 MHz)。这说明该数字锁相环程序可以有效地将参考信号与待测信号之间的频率差控制在一定的范围之内。

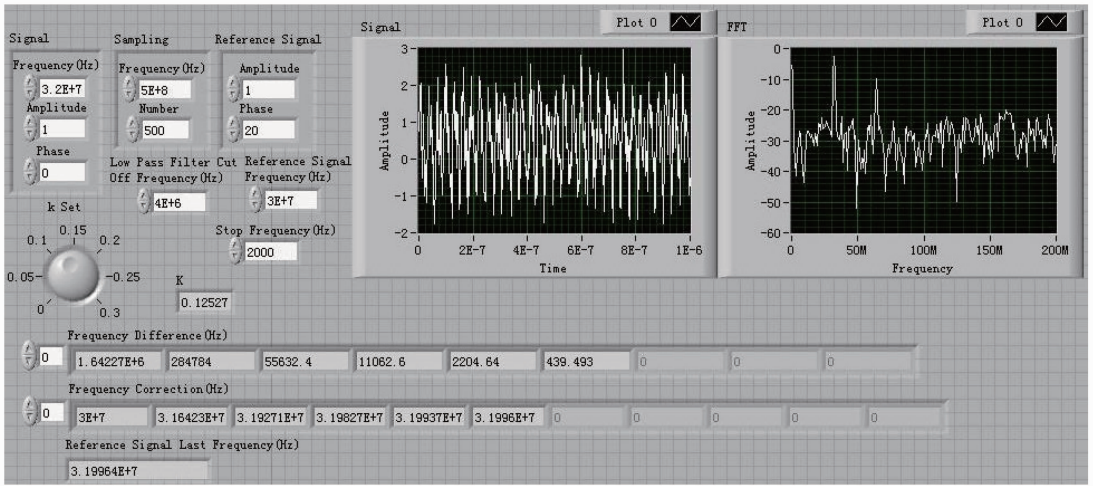


图 7 数字锁相环程序前面板

Fig. 7 Front panel of digital phase-locked loop procedure

#### 4 虚拟数字锁相技术对相位调制鉴频参量测量的实验研究

在本节中,利用 2 和 3 节中介绍的虚拟数字锁相技术,对实际信号光相位调制拍频信号的振幅参量进行测量,来验证其正确性与可行性。

图 8 为信号光相位调制多普勒频移测量方法的实验研究装置,在此实验装置中,首先,利用单模光纤将信号光引入系统,经过凸透镜准直后,再依次经过偏振片和空间电光相位调制器;然后,利用分束片将信号光分成两束,约占总能量 20% 的反射光经过凸透镜入射到 1 号光电倍增管上,作为信号光能量监测,约占总能量 80% 的透射光经过扩束镜( $\times 5$  倍)准直后垂直入射到固定厚度 F-P 标准具上;最后,利用凸透镜将经过此 F-P 标准具的信号光会聚到 2 号光电倍增管上进行检测。光电倍增管 1 和 2 的输出信号连接到数据采集卡的两个采样通道进行采集,为了保证相位调制与信号采样的同步性,将信号发生器生成的正弦信号分成两部分:一部分经驱动器放大后传递给相位调制器对信号光进行相位调制;另一部分连接到数据采集卡的外触发通道作为数据采样外触发源。在实验过程中,利用频率可调 1064 nm 光纤激光器的输出光来模拟具有多普勒频移的信号光。关于该实验装置及其工作过程的介绍详见参考文献[3]。

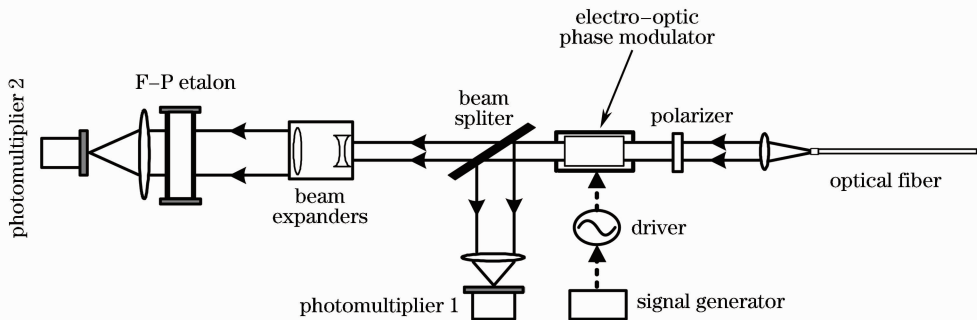


图 8 实验装置图

Fig. 8 Experimental apparatus diagram

该实验装置产生的相位调制拍频信号由前面介绍的虚拟数字锁相程序进行测量,其程序框图如图 9 所示,信号发生器输出信号作为数据采集卡的触发信号,控制其对待测信号的采集,接下来,首先利用锁相环程序对采集的待测信号进行频率跟踪,然后再生成与待测信号同频的参考信号,最后利用数字锁相核心算法进行相关运算获得拍频信号的振幅与相位参量。

利用该虚拟数字锁相程序,对  $-150 \sim 150$  MHz 频移范围信号光相位调制拍频信号进行测量,其振幅参量多次测量平均值及标准偏差在图 10(a)中给出。图 10(a)中零频率位置对应 F-P 干涉仪透过率峰值点位

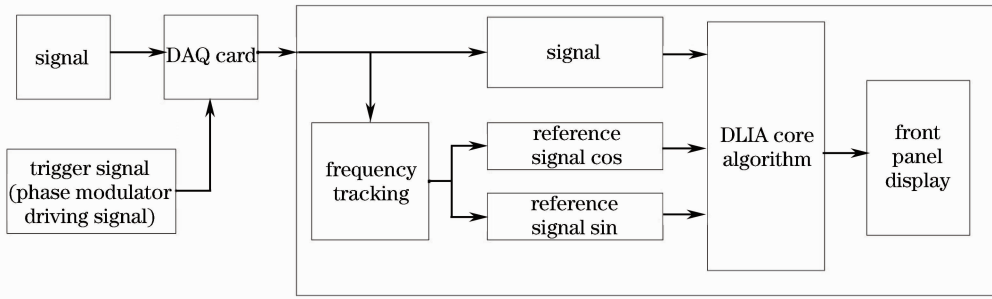


图 9 虚拟数字锁相程序框图

Fig. 9 Virtual digital phase-locked program block diagram

置,在整个频移范围内,拍频信号振幅参量测量误差都很小,并且振幅测量曲线整体上很光滑,同样存在上下两个峰值,并且在这两个值之间是一段单调曲线,此实验测量曲线的形势与理论计算结果[图 10(b)]总体上符合的很好,这就可以证明利用基于 LabView 可视化语言的虚拟数字锁相技术可以完成相位调制激光多普勒鉴频参量的提取。但是,入射光线宽、发散角、空间分布以及 F-P 干涉仪表面缺陷、楔角等因素都会影响实际拍频信号振幅测量曲线的分布情况,实验中采用的线宽很窄光纤激光器以及平行度很高的固体 F-P 标准具,所以主要是由于入射 F-P 的光束经过相位调制等光学器件能量空间分布不对称和存在倾向角度,使得图 10(a)中拍频信号振幅测量曲线零频移左右分布并不完全对称,以及零频移附近曲线发生一定弯曲。

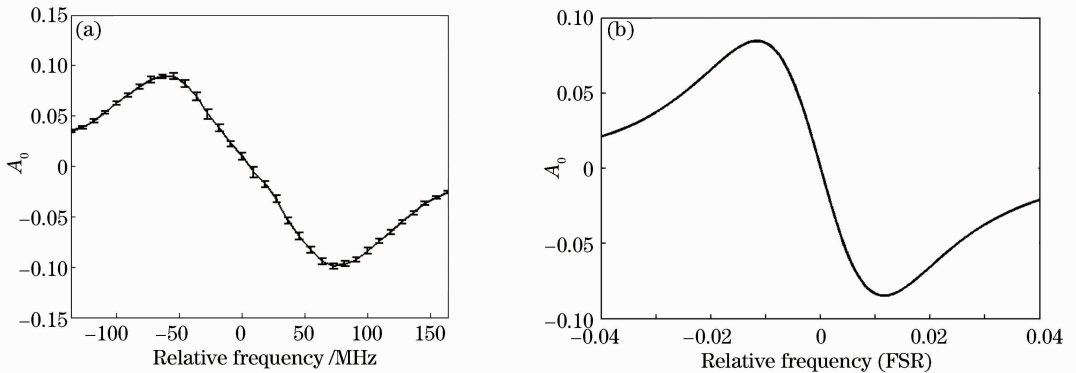


图 10 信号光相位调制拍频信号振幅参量。(a)测量结果;(b)理论结果 (FSR 为 F-P 透过率曲线自由光谱范围)<sup>[8]</sup>  
Fig. 10 Signal light phase modulation beat frequency signal amplitude. (a) Measuring result; (b)theoretical result  
(FSR is the free spectral range of F-P transmission curve)<sup>[8]</sup>

## 5 结 论

鉴频参量的提取方法是,激光多普勒频移测量中的一项关键内容,其决定着最终频移测量结果精确程度。结合相位调制激光多普勒频移测量方法的原理,本文给出了基于 LabView 计算机可视化语言的虚拟数字锁相技术来实现其鉴频参量的提取方法。其通过数字锁相环程序实时跟踪待测信号频率可以保证参考信号与待测信号的同频性,利用程序内部生成参考信号的办法克服待测信号与参考信号通道间的干扰以及在参考信号传输过程中混入噪声,此鉴频参量提取方法利用数字算法代替硬件结构,可以简化系统结构,同时增加系统的灵活性与抗干扰能力,具有很高的实际应用价值。

## 参 考 文 献

- Ye Song, Xiong Wei, Wang Xinqiang, *et al.*. Correction of spatial heterodyne interferogram base on frequency domain analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0530001.
- 叶 松,熊 伟,王新强,等. 基于频域分析的空间外差干涉图校正方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0530001.
- Pu Lingbing, Liu Jiqiao, Chen Weibiao. Discrimination of Doppler frequency shift based on Fizeau interferometer and PMT array[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 379-383.
- 卜令兵,刘继桥,陈卫标. 基于菲佐干涉仪与多通道光电倍增管阵列的多普勒频移技术[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 379-383.



- 3 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.
- 4 Eric D Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *Am J Phys*, 2001, 69(1): 79–87.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Kim D, Kwon S, Cha H, *et al.*. A newly designed single etalon double edge Doppler wind lidar receiving optical system[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2008, 79(12): 123111.
- 8 Du Jun, Qu Yancheng, Zhao Weijiang, *et al.*. Measuring error of phase modulation laser Doppler shift measuring method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0712001.  
杜 军, 曲彦臣, 赵卫疆, 等. 相位调制激光多普勒频移测量方法的误差研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0712001.
- 9 Wang Fang, Zhang Xia. Improved algorithm of carrier phase recovery for 224 Gb/s, WDM-PM-16QAM signals over 640 km transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s206011.  
王 芳, 张 霞. 224 Gb/s, 640 km 传输实验中 WDM-PM-16QAM 信号载波相位恢复改进算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s206011.
- 10 Luo Haiyan, Shi Hailiang, Li Shuang, *et al.*. Study on the performance indexes of spatial heterodyne spectrometer influenced by elements tolerances[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0330002.  
罗海燕, 施海亮, 李 双, 等. 空间外差光谱仪干涉仪组件的容差分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0330002.
- 11 He Lingping, Chen Bo, Yang Lin, *et al.*. *In situ* optic measuring technique based on virtual lock-in[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(9): 1977–1681.  
何玲平, 陈 波, 杨 林, 等. 基于虚拟锁相的原位光学测量技术[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(9): 1977–1681.
- 12 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin, *et al.*. Application of lock-in amplifier based on LabVIEW platform for leakage detection[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34(3): 241–244.  
杭利军, 何存富, 吴 斌, 等. 基于 LabVIEW 平台的锁相放大器在管道泄漏检测中的应用[J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(3): 241–244.
- 13 Sun Xiugui, Zhang Hongbin, Sun Jiangbo. Design of dual-phase lock-in amplifier based on virtual instrument technology[J]. *Measurement and Control Technology*, 2011, 30(8): 14–18.  
孙秀桂, 张洪斌, 孙江波. 一种基于虚拟仪器技术的双锁相放大器的设计[J]. *测控技术*, 2011, 30(8): 14–18.
- 14 Zhao Ling, Tian Xiaojian, Liang Lei, *et al.*. Virtual digital lock-in amplifier based on automatic frequency tracking[J]. *Journal of Jinlin University (Information Science Edition)*, 2012, 30(1): 5–11.  
赵 玲, 田小建, 梁 磊, 等. 基于自动频率跟踪的虚拟数字锁相放大器[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2012, 30(1): 5–11.
- 15 Sun Xiugui, Zhang Hongbin, Zhang Shuchao. Design of software and digital phase locked loop based on LabVIEW[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(1): 76–80.  
孙秀桂, 张洪斌, 张树朝. 基于 LabVIEW 的软件数字锁相环实现[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(1): 76–80.

栏目编辑: 刘丰瑞