

文章编号: 0258-7025(2010)05-1316-06

用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪

周 健 龙兴武

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出将激光多普勒测速仪(LDV)应用于车载惯性导航系统提供速度参数。阐述了激光多普勒测量自身速度的基本原理,设计了参考光束型 LDV,并运用跟踪滤波、频谱细化及频谱校正技术对多普勒信号进行处理。理论分析与实验表明,参考光束型 LDV 解决了双光束不能进行离焦测量的难题;跟踪滤波器实时跟踪多普勒信号,去除基底信号和部分噪声,提高了信噪比;频谱细化和频谱校正技术,提高了频谱分辨率,使提取的多普勒频率更接近于真实值,减小了系统的测量误差。LDV 可以为车载惯导系统提供有效的速度信息。

关键词 光学测量;自身速度测量;激光多普勒测速仪;跟踪滤波;频谱细化;频谱校正

中图分类号 V241.62⁺2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103705.1316

Laser Doppler Velocimeter for Vehicle Inertial Navigation System

Zhou Jian Long Xingwu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract An idea of using laser Doppler velocimeter(LDV) to offer velocity in vehicle inertial navigation system was proposed. The principle of measuring its own velocity with laser Doppler was expounded while reference-beam LDV was designed. And Doppler signal was processed using tracking filter, frequency spectrum refinement and frequency spectrum correction. The results of theory and experiment showed that; reference-beam LDV solved the problem that dual-beam LDV can not measure the velocity while out of focus; background signal and part of noise were eliminated, Doppler signal was tracked so that signal-to-noise ratio was raised; distinguishability of spectrum was improved, Doppler frequency was more agreed with the actual value, and the error of the system was decreased by frequency spectrum refinement and correction technology. So LDV can offer valid velocity for vehicle inertial navigation system.

Key words optical measurement; self-velocity measurement; laser Doppler velocimeter; tracking filter; frequency spectrum refinement; frequency spectrum correction

1 引 言

车载惯导系统的基本功能是通过惯性仪表获得车式载体的角运动和线运动,实时计算出其位置、速度和姿态,提供给制导和姿态控制系统对车式载体实施控制。现有的惯导系统主要是由陀螺仪表获取角运动信息,由加速度表获取线运动信息,而目前现有的加速度表都是基于测比力原理,即通过敏感某一质量体加速度形成的惯性力,测量加速度值。基于此原理的加速度表存在两个缺点^[1]:1)测量的是运动体的视加速度,而不是绝对加速度,另外还需要通过计算出引力场产生的加速度,才能得到运动体

的绝对加速度值,计算复杂;2)由于是通过质量体进行测量的,存在受过载影响的误差项。

自从 1964 年 Yeh 等^[2]证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流体速度以来,激光多普勒测速仪(LDV)就以其精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大及非接触测量等特点在航空、航天、机械、能源等领域得到快速的发展^[3~7]。

因此,研究利用 LDV 测量车载系统自身的速度,对简化导航计算和提高导航精度具有重大意义。针对双光束 LDV 不能进行离焦测量的特点,本文设计了参考光束型 LDV,用于测量车载系统自身的速度。

收稿日期:2009-06-11;收到修改稿日期:2009-07-21

作者简介:周 健(1983—),男,博士研究生,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail:wttzhoujian@163.com

导师简介:龙兴武(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事激光和光电子技术方面的研究。E-mail:xwlong110@sina.com

2 LDV 自身速度测量的基本原理

当车载系统相对于地面以一定的速度 v 运动时,车上的一整套光学系统相对于地面的运动速度也是 v ,此时运动的光源发出频率为 f_0 的一束光 W_1 ,入射到地面静止的粒子 P 上,根据多普勒效应可知,粒子 P 接收到光的频率为

$$f_1 = f_0(1 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_1/c), \quad (1)$$

式中 \mathbf{e}_1 为光束 W_1 方向上的单位矢量。几乎同时,运动的光检测器接收由静止粒子 P 散射,沿原方向返回的散射光 W_2 ,则光检测器接收到的光的频率为

$$f_2 = f_1(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_s/c) \approx f_0[1 + \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_s)/c], \quad (2)$$

式中 \mathbf{e}_s 为光束 W_2 方向上的单位矢量。由于光检测器接收的是沿原方向返回的散射光,所以 $\mathbf{e}_s = -\mathbf{e}_1$,结合(2)式可得

$$f_2 = f_0(1 + 2\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_1/c), \quad (3)$$

因此,多普勒频率为

$$f_D = |f_2 - f_0| = 2\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_1/\lambda, \quad (4)$$

式中 λ 为光源出射激光的波长。由(4)式可知,多普勒频率与车载系统的运动速度成正比,因此通过探测多普勒频率就可以推算载体的运动速度。

实验光路如图 1 所示,He-Ne 激光器的输出功率约为 9 mW,经过光束压缩准直镜压缩准直后,被半透半反镜分成强度相等的两束光,一束经全反镜和衰减片组沿原方向返回,再经过半透半反镜、偏振片、滤光片和小孔光阑入射到雪崩二极管上,为参考光;另一束入射到地面粒子 P 上,各个方向都有散射光,其中沿原方向返回的散射光经过小孔光阑后,同样经过半透半反镜、偏振片、滤光片和小孔光阑被雪崩二极管接收,为信号光。参考光与信号光在雪崩二极管的光敏面上进行干涉,由于光电探测器的平方率效应,雪崩二极管模块输出的电压信号中包

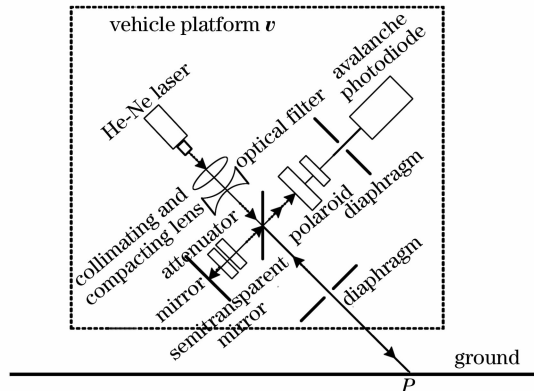


图 1 车载测速系统的光路图

Fig. 1 Schematic of measuring velocity system on vehicle

含与速度成正比的多普勒频率项。输出信号由数据采集卡采集并送至计算机处理,提取多普勒频率,进而求得载体的运动速度。令载体运动方向与光出射方向的夹角为 θ ,结合(4)式可知,多普勒频率为

$$f_D = 2 \frac{v \cos \theta}{\lambda}, \quad (5)$$

所以,求得载体的运动速度的大小为

$$v = \frac{\lambda f_D}{2 \cos \theta}. \quad (6)$$

3 多普勒信号的处理

3.1 多普勒信号及处理流程

忽略高斯光束的影响,令参考光束与信号光束的电场分布分别为

$$e_R(r, t) = E_R(r) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_R),$$

$$e_s(r, t) = E_s(r) \cos[2\pi(f_0 + f_D)t + \varphi_s], \quad (7)$$

式中 $E_R(r)$, $E_s(r)$ 分别为参考光束和信号光束在探测器光敏面上电场的振幅, φ_R , φ_s 分别为参考光束和信号光束的相位角, r 为光场中考察点到光源的距离。探测器的输出电流 $i(t)$ 与总光场的平方成正比,同时考虑到检测器响应带宽的限制,略去光学频率项,可得

$$i(t) = B[1/2(E_s + E_R)^2 + E_s E_R \cos(2\pi f_D t + \varphi_s - \varphi_R)], \quad (8)$$

式中 B 为常数,输出电流中包含一个正比于总光强的直流项和一个正比于振幅 $E_s E_R$ 的多普勒频率项。

目前多普勒信号处理的最常见的方法是快速傅里叶变换(FFT),这种方法具有很强的从噪声中提取信号的能力及能够接受间断信号等优点。然而,一方面,由于 LDV 中多普勒频率随着车载系统运动速度的变化而不停地改变,因此系统中固定通频带的滤波器不能满足激光多普勒测速仪对滤波性能的要求;另一方面,如果直接将 FFT 结果的峰值谱对应的频率作为多普勒频率值,则存在精度低的问题^[8]。

针对上述存在的问题,在软件设计中采取相应的措施:雪崩二极管模块将光信号转换为电信号后,数据采集卡完成信号采集并传至计算机,在 Labview 平台中先对原始信号进行高通滤波,去除直流项的影响,设计跟踪滤波器,对多普勒信号进行跟踪滤波。然后对滤波后的信号进行 FFT,得到其频谱,再运用频谱细化和频谱校正技术对信号的频谱进行修正。最后在修正后的频谱中提取多普勒频率,求得车载系统的运动速度。信号处理的流程如图 2 所示。

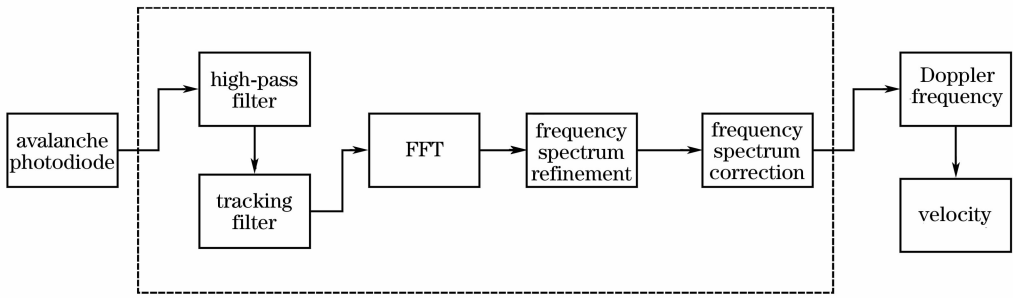


图 2 多普勒信号处理流程图

Fig. 2 Flowchart of Doppler signal processing

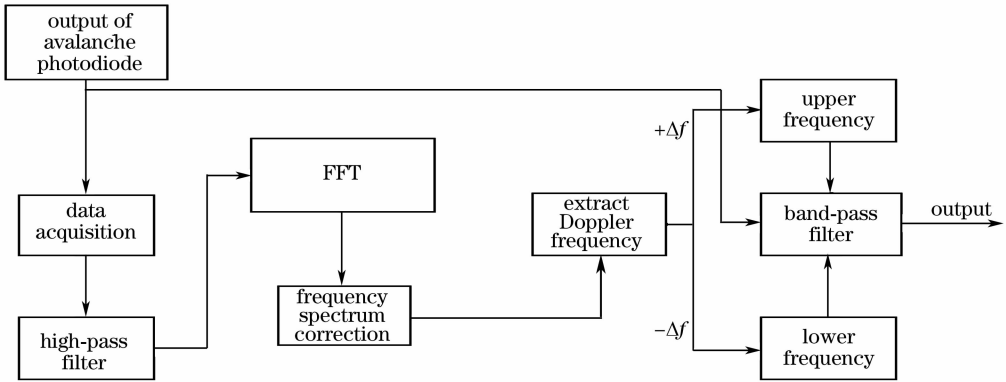


图 3 多普勒信号跟踪滤波的结构框图

Fig. 3 Structure chart of tracking filter for Doppler signal

3.2 跟踪滤波器

跟踪滤波器的实质就是使滤波器的通频带与前一时刻的多普勒频率之间建立联系,从而达到无论多普勒频率如何变化,其始终在跟踪滤波器的通频带的范围内。具体的做法为:数据采集卡采集多普勒信号,先通过加 Hanning 窗的 FFT,求得其频谱,并利用比值法频谱校正技术修正频谱图中峰值谱的位置,从而求得其多普勒频率。根据多普勒频率值调整下一时刻带通滤波器的上、下限截止频率,从而使下一时刻的多普勒频率始终被滤波器的通频带所包含,其信号处理的流程如图 3 所示。

3.3 频谱细化和频谱校正

3.3.1 频谱细化

频谱细化的算法很多,常见的有 Goertzel 细化算法、选带相位补偿细化算法及复调制谱细化算法等,其中 Goertzel 细化算法所需的运算量最少,计算速度最快^[9]。

Goertzel 细化算法的实质就是利用旋转因子序列 W_N^{-kn} 的周期性减少计算量。考虑到 $W_N^{-kn} = \exp[(-j2\pi/N) \cdot (-Nk)] = 1$, 则

$$X(k) = \sum_{r=0}^{N-1} x(r)W_N^{kr} = \sum_{r=0}^{N-1} x(r)W_N^{-k(N-r)}. \quad (9)$$

令采样序列 $x(n)$ 与序列 $W_N^{-kn}u(n)$ 的离散卷积为

$$y_k(n) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} x(n)W_N^{-k(n-r)}u(n-r), \quad (10)$$

式中 $u(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$ 为阶跃序列。由(9)式及当 $n < 0$ 和 $n \geq N$ 时 $x(n) = 0$ 的事实,可知 $X(k) = y_k(n)|_{n=N}$, 即 $y_k(n)$ 可以看作是脉冲响应为 $W_N^{-kn}u(n)$ 的系统对有限长序列 $x(n)$ 的响应,特别 $X(k)$ 就是 $n = N$ 时的输出值。图 4 给出了脉冲响应为 $W_N^{-kn}u(n)$ 的系统的计算流程,其中已经假设了初始松弛条件。

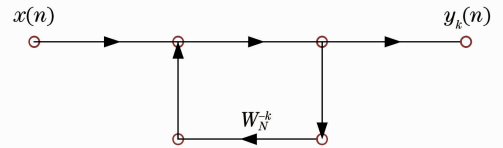


图 4 $X(k)$ 的一阶复递推计算流程图

Fig. 4 Calculation flowchart of the first order of $X(k)$

为进一步减少运算量,研究系统的传递函数 $H_k(z)$, 得

$$H_k(z) = \frac{1}{1 - W_N^{-k}z^{-1}} = \frac{1 - W_N^kz^{-1}}{(1 - W_N^{-k}z^{-1})(1 - W_N^kz^{-1})} = \frac{1 - W_N^kz^{-1}}{1 - 2\cos(2\pi k/N)z^{-1} + z^{-2}}. \quad (11)$$

此时系统计算的流程图如图 5 所示。

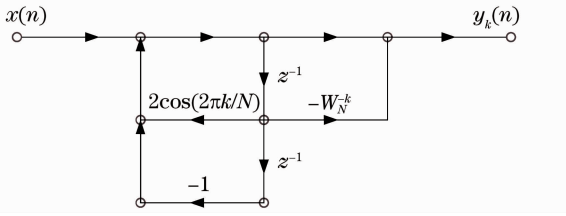


图 5 $X(k)$ 的二阶递推计算流程图

Fig. 5 Calculation flowchart of the second order of $X(k)$

若输入为实数,由于系数也是实数并且因子-1不必算作一次乘法,所以实现该系统的极点只需每个样本作 1 次实数乘法。由于只需使该系统处于可以计算出 $y_k(n)$ 的状态,所以实现系统函数的零点所要求的与 $-W_N^k z^{-1}$ 作复数乘法就不必在差分方程的每一步迭代中进行,只需在第 N 次迭代后完成。这样,全部的计算量是:对于极点作 N 次实数乘法和 N 次实数加法,加上对于零点作 2 次实数乘法和 2 次实数加法(当输入为实数时)。因此,总计算量是 $N+2$ 次实数乘法和 $N+2$ 次实数加法,这大大减少了计算量。

3.3.2 频谱校正

频谱校正的算法很多,其中比值校正算法校正公式简单,运算量少,且校正精度较高^[10]。比值校正法利用归一化后差值为 1 的主瓣峰顶附近二条谱线的窗谱函数比值,建立一个以校正频率为变量的

方程,解出校正频率,得以对频率进行修正。设 Hanning 窗的频谱函数为

$$f(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \frac{1}{2(1-x^2)}. \quad (12)$$

对于任意一个 x ,其窗谱函数为 $f(x)$,其离散频谱为 y_k ,对于任一个 $(x+1)$,其窗谱函数为 $f(x+1)$,其离散频谱为 y_{k+1} ,显然有

$$f(x)/f(x+1) = y_k/y_{k+1}, \quad (13)$$

由(12),(13)式可得 $x = (y_k - 2y_{k+1})/(y_{k+1} - y_k)$,所得校正量为

$$\Delta k = -x = (2y_{k+1} - y_k)/(y_{k+1} - y_k). \quad (14)$$

4 实 验

将车载系统放在平整的地面上,人工推小车使其在地面上保持直线运动,这样车载系统的运动速度可以人为控制,便于实验。运用 LDV 和全球定位系统(GPS)同时测量车式载体相对于地面的运动速度。由于实验中采用的是高精度的 GPS,所以可以以其测量值作为速度标准,计算 LDV 测量的相对精度。另外,系统中使用的数据采集卡是 Measurement Computing 公司的 PCI-das4020,最高采样频率为 20 MHz,4 个 12 位的模拟输入通道。在 Labview 平台上编写数据采集和信号处理的虚拟仪器(VI),进行实测研究。

分别运用普通带通滤波器和跟踪滤波器对多普

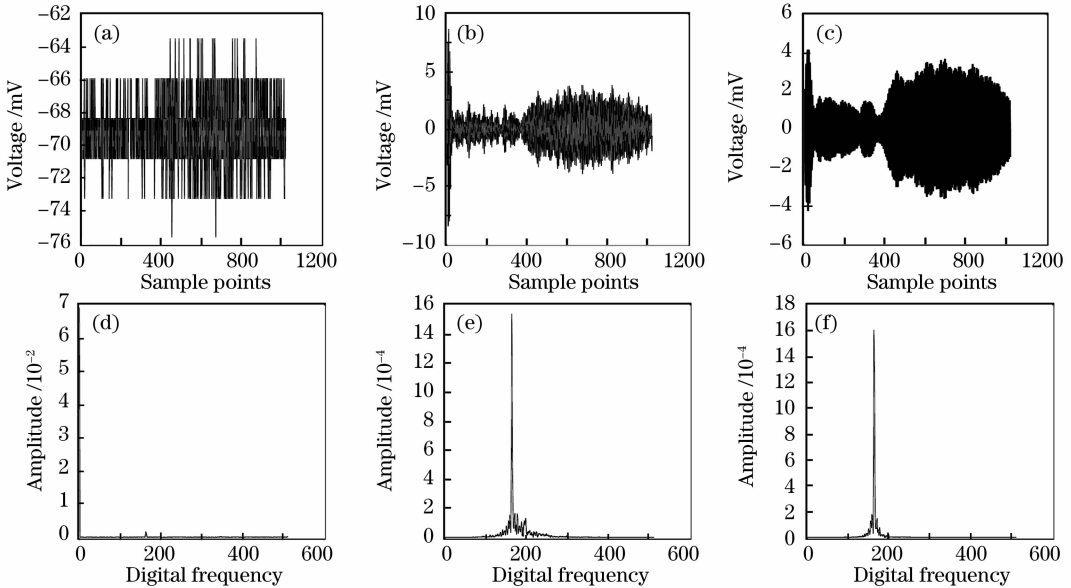


图 6 多普勒频率为 1.58 MHz 时的结果。(a)原始多普勒信号,普通带通滤波器(b)和跟踪滤波器(c)输出的信号及分别对应于(a)~(c)的频谱(d)~(f)

Fig. 6 Results when Doppler frequency is 1.58 MHz. (a) initial Doppler signal, output signals of common band-pass filter (b), tracking filter (c), and frequency spectra (d)~(f) corresponding to (a)~(c) respectively

勒信号进行实测,其中跟踪滤波器的半通带宽度为 100 kHz,普通滤波器的通带为 1.5~2 MHz。设定数据采集卡的采样频率为 10 MHz,采样点数(分析数据长度)为 1024。当车载系统相对于地面以某一速度运动,其运动方向与光出射方向夹角为 68° ,此时 GPS 测得的速度值为 1.3345 m/s,所对应的多普勒频率为 1.58 MHz,原始多普勒信号、两种滤波器

的输出信号及其频谱如图 6 所示。

人为改变车式载体的运动速度,从而改变对应多普勒信号的频率,使其不在普通滤波器的通带范围内。当 GPS 测得的速度值为 2.1538 m/s,对应的多普勒频率为 2.55 MHz 时,原始多普勒信号、两种滤波器的输出信号及其频谱如图 7 所示。

当 GPS 测得的速度值为 2.5846 m/s,对应多普

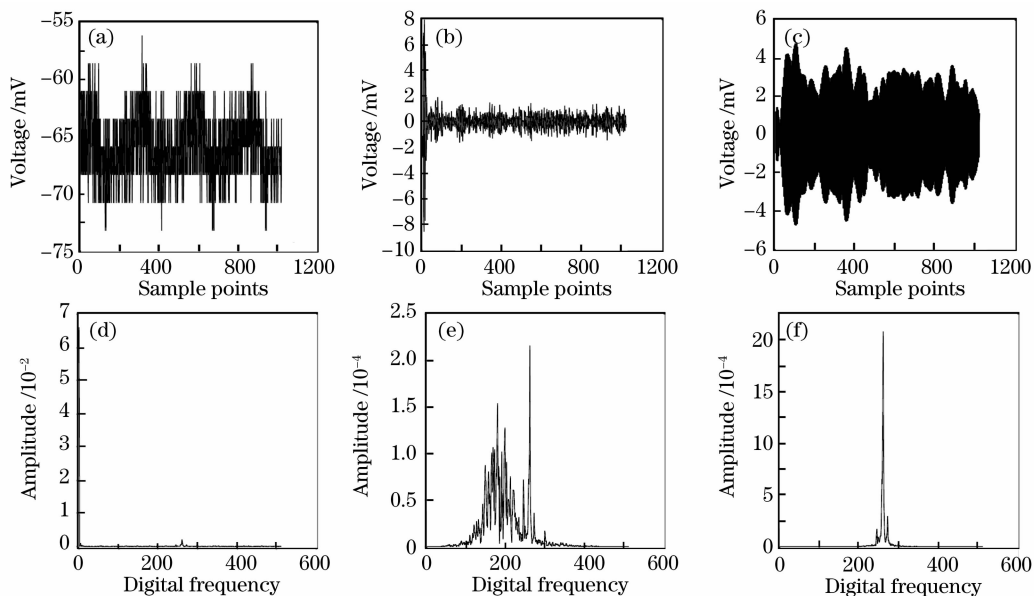


图 7 多普勒频率为 2.55 MHz 时的结果。(a)原始多普勒信号,普通带通滤波器(b)和跟踪滤波器(c)输出的信号及分别对应于(a)~(c)的频谱(d)~(f)

Fig. 7 Results when Doppler frequency is 2.55 MHz. (a) initial Doppler signal, output signals of common band-pass filter (b), tracking filter (c), and frequency spectra (d)~(f) corresponding to (a)~(c) respectively

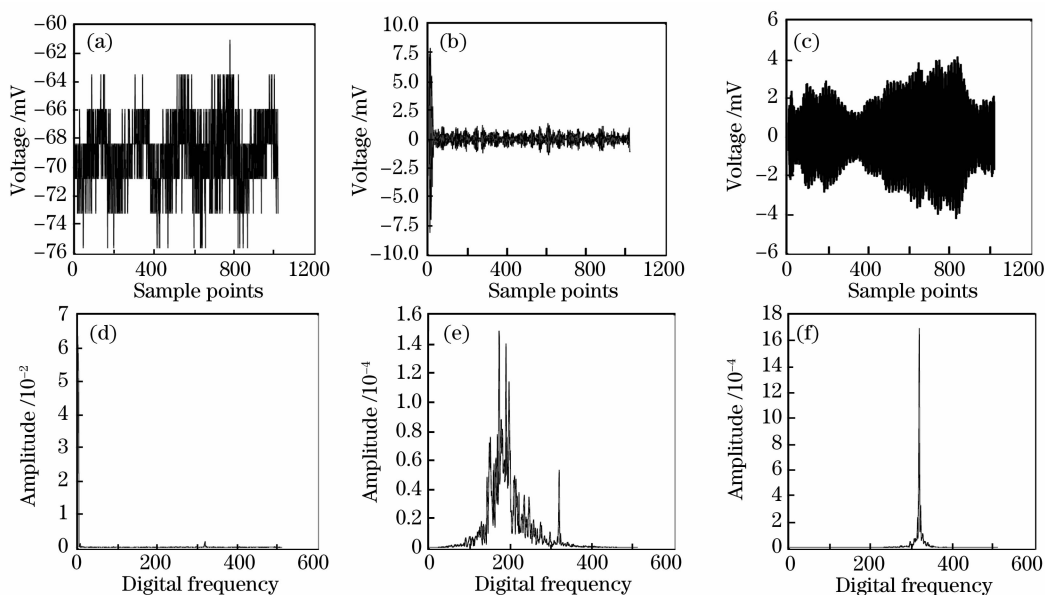


图 8 多普勒频率为 3.06 MHz 时的结果。(a)原始多普勒信号,普通带通滤波器(b)和跟踪滤波器(c)输出的信号及分别对应于(a)~(c)的频谱(d)~(f)

Fig. 8 Results when Doppler frequency is 3.06 MHz. (a) initial Doppler signal, output signals of common band-pass filter (b), tracking filter (c), and frequency spectra (d)~(f) corresponding to (a)~(c) respectively

勒频率为3.06 MHz时,原始多普勒信号、两种滤波器的输出信号及其频谱如图8所示。

由图6~8中原始信号可知,多普勒信号中与直流分量相比,多普勒频率项较小,原始信号频谱图中的第一个峰值是直流项,右边的小尖峰才是多普勒频率项;由图6可知,原始多普勒信号中含有基底信号和大量的噪声,由于多普勒频率在普通滤波器的通带范围内,因此两种滤波器都能达到滤除基底信号和部分噪声,提高信噪比的目的,且峰值谱所对应的多普勒频率的位置相同,与多普勒频率的真实值相一致;由图7可知,多普勒频率已越过了普通滤波器的通带,对于普通滤波器,虽然基底信号被滤除,但多普勒频率项的幅度也被大大地衰减,且频谱图中通带内形成的次峰值谱已非常接近峰值谱,对多普勒频率的测量有一定的影响。而对于跟踪滤波器,基底信号及系统的部分噪声被很好地滤除,多普勒频率项被很好地保留,其信噪比大大改善,且峰值谱对应位置的频率与多普勒频率的真实值一致;由图8可知,多普勒频率远离普通滤波器的通带,普通滤波器通带内形成了峰值谱,严重影响多普勒频率项频谱位置的判别,导致得出错误的结果,而跟踪滤波器没有受到任何影响,能适用于多普勒信号的处理。

对多普勒信号进行跟踪滤波后,将频谱修正前后的所得结果与GPS的测量值比较,如图9所示。由图9中的数据点计算可知,频谱修正前LDV测量的平均误差约为2.1%,频谱修正后LDV测量的平均误差约为1.5%,精度明显提高。这是因为频谱细化技术减小了多普勒频谱中相邻两点的频率间隔,提高了频率分辨率,频谱校正技术使从多普勒频谱中提取的多普勒频率更接近于真实值,所以频谱修

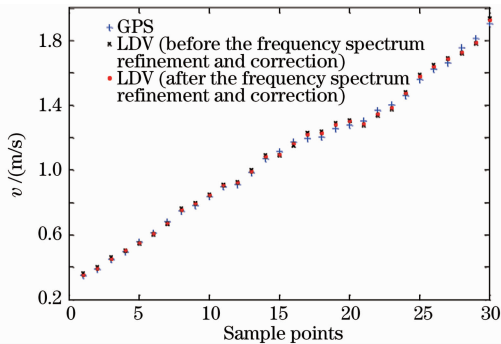


图9 LDV与GPS测量结果的比较

Fig. 9 Comparison results between LDV and GPS

正技术使LDV的测量精度明显提高。

5 结 论

理论分析和实验表明,参考光束型激光多普勒测速系统可有效测量车式载体自身的运动速度,跟踪滤波器实时跟踪多普勒信号,去除基底信号和部分噪声,提高了多普勒信号的信噪比;频谱细化技术减小了多普勒频谱中相邻两点的频率间隔,即提高了频谱分辨率;频谱校正技术使提取的多普勒频率更接近于真实值。将LDV应用于车载惯导系统已成为可能,车载系统在粗糙的不平整的地面上运动的情形还需要进一步做深入的研究。

参 考 文 献

- Sun Ningsheng. Autonomous navigation based on absolute velocity measuring instrument [J]. *Aerospace Control*, 2006, **24**(4):27~30
孙凝生. 基于绝对速度测量计的自主导航探讨[J]. *航天控制*, 2006, **24**(4):27~30
- Y. Yeh, H. Z. Cummings. Localized flow measurements with a He-Ne laser spectrometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **176**(4):176~178
- D. B. Brayton, H. T. Kalb, F. L. Crosswy. Two-component dual-scatter laser Doppler velocimeter with frequency burst signal readout [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(6):1145~1156
- A. K. Ziarami, A. Konrad. A method of extraction of sinusoids of characteristics [J]. *IEEE Trans. Circuits and System*, 2002, **14**:124~131
- I. Stec, S. Hertegard, J.-E. Juto. Laser Doppler measurements of the vocal fold blood micro-circulation [J]. *Journal of Voice*, 2007, **21**(3):345~354
- M. A. Gondal, J. Mastromarino, Uwe K. A. Klein. Laser Doppler velocimeter for remote measurement of polluted water and aerosols discharges [J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 2002, **38**(6):589~600
- Ying Zhong, Guoxiong Zhang, Changlin Leng *et al.*. A differential laser Doppler system for one-dimensional in-plane motion measurement of MEMS [J]. *Measurement*, 2007, **40**:623~627
- Liu Changwen, Han Jingna, Liu Jie *et al.*. Investigation on frequency correction methods and its application in digital spectrum LDA processor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):642~646
刘昌文,韩静娜,刘杰等. 激光多普勒测速中的频谱校正及其应用[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):642~646
- Hu Hailong. Research on signal processing of high accuracy in laser Doppler velocimeter [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. 23~25
胡海龙. 高精度信号处理技术在激光多普勒测速中的应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2006. 23~25
- Zhu Xiaoyong, Ding Kang. The synthetical comparison of correcting methods on discrete spectrum [J]. *Signal Processor*, 2001, **17**(1):91~97
朱小勇,丁康. 离散频谱校正方法的综合比较[J]. *信号处理*, 2001, **17**(1):91~97