

能量重心校正法在提高激光多普勒测速精度中的应用

于 啸 洪光烈* 凌 元 崔桂华 舒 嵘

(中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电系统技术实验室, 上海 200083)

摘要 多普勒效应可以用于激光雷达对目标速度的探测,在处理探测信号的频谱时,由于栅栏效应的存在,会导致离散多普勒频谱和真实速度之间的偏差。在雷达测速系统中运用能量重心校正算法来对离散频率进行校正,从而达到提高测速精度的目的。实验结果表明,该雷达测速系统的探测精度优于厘米每秒量级。

关键词 测量;光纤光学;激光雷达;多普勒;能量重心校正

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.091201

Energy Centrobatic Correction Method Applied in Velocity Accuracy Enhancement in Doppler Laser Radar System

Yu Xiao Hong Guanglie Ling Yuan Cui Guihua Shu Rong

(Space Active Electronic-Optical Systems Laboratory, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Doppler effect can be used to detect target velocity based on laser radar system. When processing the signal spectrum, error between Doppler frequency and target velocity is caused by picket fence effect. In order to improve the velocity detection accuracy, energy centrobatic correction method is demonstrated to correct discrete spectrum. Experiment data indicate that the velocity accuracy is better than 1 cm/s.

Key words measurement; fiber optics; laser radar; Doppler; energy centrobatic correction

OCIS codes 120.1880; 030.1640; 030.1670; 040.2840

1 引言

测量目标的运动速度是多普勒效应在激光雷达中的一个重要应用^[1~4]。在测速过程中,由于快速傅里叶变换(FFT)栅栏效应的存在,连续波雷达通过谱峰搜索方法获得的目标多普勒频率无法对准其真实频率,从而使测得的目标速度存在较大误差。为了获得更为准确的多普勒谱峰频率,达到更高的测速精度,需要对谱峰频率进行修正,这即为频率校正的含义。目前比较常见的频率校正算法主要有比值校正、相位差校正、能量重心校正^[5]、FFT+FT连续细化傅里叶变换(FT)分析校正^[6]等。本文旨在通过频率校正提高雷达测速系统的精度。重点分析离散频谱能量重心校正多普勒频移的理论和方法,并进行误差研究,从而达到提高测速精度的目的。

2 能量重心校正算法

2.1 常用窗函数的能量特性

在对一段信号做分析时,必然要对信号截断,以 Hanning(汉宁)窗为例^[6]

收稿日期: 2012-04-18; 收到修改稿日期: 2012-05-16; 网络出版日期: 2012-06-26

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400402)资助课题。

作者简介: 于 啸(1986—),男,博士研究生,主要从事激光相干探测与信号处理方面的研究。

E-mail: yux1986@gmail.com

导师简介: 舒 嵘(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光遥感技术方面的研究。

E-mail: shurong@mail.sitp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: guanglieh@yahoo.com.cn

$$\omega(n) = 0.5 - 0.5 \cos \frac{2\pi n}{N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (1)$$

为了阐述的方便,将频率归一化,得到 Hanning 窗的频谱模函数为

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

功率谱函数 $G(f) = W^2(f)$, 因而

$$G(f) = \frac{\sin^2(\pi f)}{4\pi^2 f^2 (1-f^2)^2}. \quad (3)$$

Hanning 窗的功率谱图如图 1 所示。

对任一确定值 f_0 ,

$$\begin{aligned} \sum_{i=-n}^n [G(f_0+i) \times (f_0+i)] &= \sum_{i=-n}^n \left\{ \frac{\sin^2[\pi(f_0+i)]}{4\pi^2 (f_0+i)^2 [1-(f_0+i)^2]^2} \times (f_0+i) \right\} = \\ &= \frac{\sin^2(\pi f_0)}{16\pi^2} \sum_{i=-n}^n \left[\frac{1}{(f_0+i-1)^2} - \frac{1}{(f_0+i+1)^2} + \frac{4}{f_0+i} - \frac{2}{f_0+i-1} - \frac{2}{f_0+i+1} \right] = \\ &= \frac{\sin^2(\pi f_0)}{16\pi^2} \times \left[\frac{1}{(f_0-n-1)^2} + \frac{1}{(f_0-n)^2} - \frac{1}{(f_0+n)^2} - \frac{1}{(f_0+n+1)^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{2}{f_0-n} - \frac{2}{f_0-n-1} + \frac{2}{f_0+n} - \frac{2}{f_0+n+1} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

显而易见,当 $n \rightarrow +\infty$ 时, (4) 式趋近于零。

由此可见, Hanning 窗离散频谱的能量重心无穷逼近坐标原点, 根据该特性, 可以根据 Hanning 窗主瓣内的几根离散谱线, 精确求得主瓣的中心坐标。

对于矩形窗、Hamming 窗等常用窗, 当 $n \rightarrow +\infty$ 时, 能量重心同样逼近坐标原点, 证明略。

2.2 能量重心法校正多普勒频移的原理

根据频域卷积原理, 两时域信号的乘积的傅里叶变换等于这两个时域函数进行傅里叶变换后结果的卷积。因此, 多普勒时域信号经过与窗函数相乘后的频谱, 就相当于直接将 Hanning 窗的频谱搬到多普勒频率所在位置。根据窗函数能量重心的特性, 可以用主瓣内功率谱值较大的几根谱线, 精确求得主瓣的中心位置, 从而完成对目标速度的高精度探测。

根据上述原理, 表征多普勒频移的功率谱函数为

$$G_{f_d}(f) = G(f - f_d), \quad (5)$$

$$G_{f_d}(f) = \frac{\sin^2[\pi(f - f_d)]}{4\pi^2 (f - f_d)^2 [1 - (f - f_d)^2]^2}. \quad (6)$$

设 $G_{f_d}(i)$ 为功率谱第 i 条谱线值, $G_{f_d}(k)$ 为主瓣内谱线最大值, k 为幅值最大点对应的谱线号。根据能量重心特性有

$$\sum_{i=-n}^n G_{f_d}(k - f_d + i) = 0. \quad (7)$$

根据 (7) 式得

$$\sum_{i=-n}^n G_{f_d}(k - f_d + i) = \sum_{i=-n}^n (k+i) G_{f_d}(k+i) - f_d \sum_{i=-n}^n G_{f_d}(k+i) = 0, \quad (8)$$

求得主瓣的中心横坐标为

$$f_d = \frac{\sum_{i=-n}^n (k+i) G_{f_d}(k+i)}{\sum_{i=-n}^n G_{f_d}(k+i)}. \quad (9)$$

(7), (8) 式均为 $n \rightarrow +\infty$ 条件下的结果。

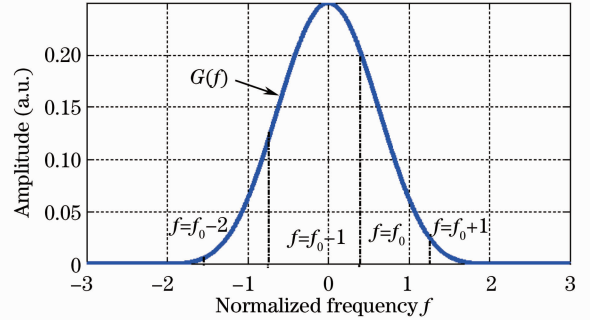


图 1 汉宁窗的功率谱图

Fig. 1 Power spectrum of Hanning window

(9)式即为测速信号加 Hanning 窗时归一化多普勒频率的精确校正公式^[6]。设系统采样频率为 F_s , 频谱点数为 N , 那么真实多普勒频率 F_d 即为归一化多普勒 f_d 与频谱分辨率 F_s/N 的乘积, 即

$$F_d = \frac{\sum_{i=-n}^n (k+i) G_{f_d}(k+i)}{\sum_{i=-n}^n G_{f_d}(k+i)} \times \frac{F_s}{N}. \quad (10)$$

2.3 理论误差分析

计算校正误差时, 为了简便起见, 取 $n=1, f_d \in [-0.5, 0.5]$, 那么可以求得能量重心校正法对频率校正的误差为

$$E = f_d - \frac{\sum_{i=-1}^1 i \times G_{f_d}(i)}{\sum_{i=-1}^1 G_{f_d}(i)}. \quad (11)$$

分别将矩形窗和 Hanning 窗的功率谱函数代入(11)式, 可得频率校正误差与真实频率的关系曲线, 如图 2 所示。

从图 2 可以看到, Hanning 窗的校正误差要远远小于矩形窗的误差水平。这是由于矩形窗的旁瓣衰减很慢, 只取 3 条谱线来做频谱校正, 位于旁瓣内能量较高的谱线没有参与到校正的过程当中, 这会很大程度地影响校正的精度, 而 Hanning 窗的旁瓣衰减很快, 能量主要集中在主瓣内, 校正精度很高。

在多普勒精确测速的应用当中, 选择尽可能多的谱线进行能量重心法对频率进行校正, 可以大大提高精度, 但是这必然会增加该算法的运算量和复杂程度。针对这个矛盾, 采取折中的方法, 尽量选择位于主瓣内的谱线, 而忽略旁瓣对能量重心的影响。因此, 在选择窗函数时, 应该挑选主瓣宽度较窄同时旁瓣衰减较快的窗, Hanning 窗是最符合上述条件的窗函数^[7,8]。

根据 Hanning 窗的特性, 其主瓣宽度为频率分辨率的 4 倍, 也就是说, 位于主瓣内的谱线数量为 4 条。按照上面 $n=1$ 的取值, 只取到了主瓣内的 3 条谱线, 这对多普勒频率的校正是不利的。图 3 即反映了分别取 3 条谱线和 4 条谱线对多普勒频率进行校正的误差比较。很明显, 4 条谱线带来更精确的结果。

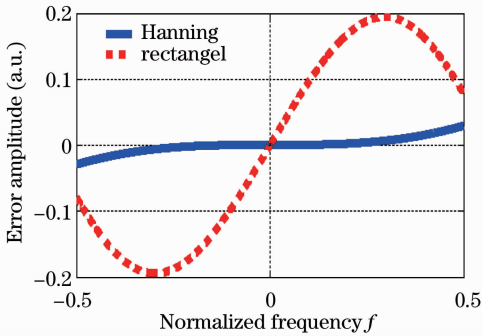


图 2 汉宁窗和矩形窗的校正误差比较

Fig. 2 Error comparison between Hanning and rectangle windows

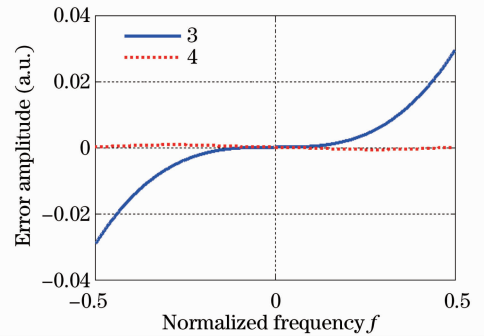


图 3 3 条和 4 条谱线做校正的误差比较

Fig. 3 Error comparison between correction with 3 and 4 spectral lines

3 多普勒测速实验

实验系统采用的是波长为 1550 nm 的脉冲激光器, 分别对两个速度模拟器完成验证实验。为了辨别目标的速度方向, 实验中引入了 62.5 MHz 的中频信号。

3.1 对漫反射目标的速度探测

第一个模拟实验是对运动导轨上的漫反射目标进行测量, 速度范围为 30~35 cm/s。在实验中, 速度间隔从 0.2 cm/s 至 0.5 cm/s 不等, 共对 15 个不同速度做了测量。

图 4 是目标速度为 31.5 cm/s 和 32.5 cm/s 时的频域波形。可以看到, 对于这两个不同的速度, 主瓣中

的4条谱线所对应的频率均为62.04, 62.07, 62.10, 62.13 MHz, 只是谱线的幅值会根据速度的变化而变化。

将上面的4个频率去掉中频62.5 MHz, 然后代入(10)式, 计算得到多普勒频移分别为414.2 kHz和420.6 kHz, 根据

$$v = \frac{\lambda \times F_d}{2}, \quad (12)$$

对应的速度分别为32.1 cm/s和32.6 cm/s。

所有速度的测量值与真实值之间的误差如图5所示, 可见, 对于该漫反射实验目标, 测速的误差基本都在1 cm/s以下。

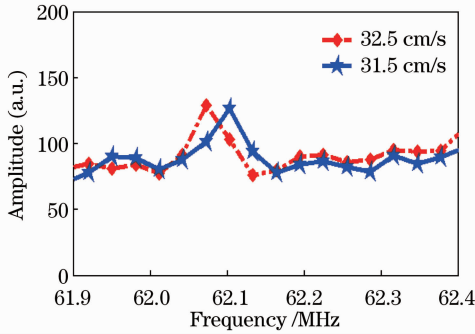


图4 实验1不同速度的频谱图

Fig. 4 Spectra of different velocities for the first experiment

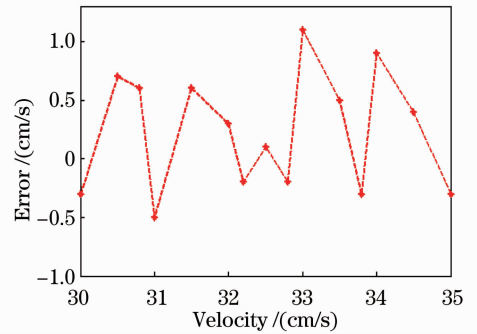


图5 实验1实验结果与真实速度之间误差

Fig. 5 Error between experiment data and real velocity for the first experiment

3.2 对高精度模拟器的速度探测

第二个实验是对速度和精度都较高的速度模拟器来完成的测量, 信号的强度比前一个实验要大, 速度范围为58.167~58.202 m/s。

图6是模拟速度为58.187 m/s和58.192 m/s时的频域波形, 与图4对照, 可以看到信噪比有了明显的提升。

同样将主瓣内的四个频率点代入(10)式, 去除中频后得到多普勒频移分别为75.084 MHz和75.089 MHz, 对应速度为58.190 m/s和58.194 m/s。

对于该速度模拟器的测量值和真实值之间的误差如图7所示。

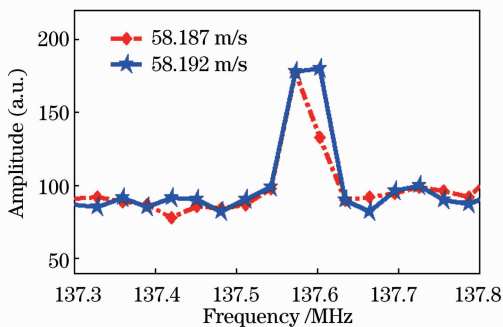


图6 实验2不同速度的频谱图

Fig. 6 Spectra of different velocities for the second experiment

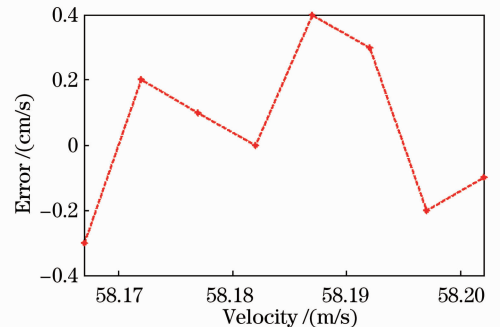


图7 实验2实验结果与真实值之间的误差

Fig. 7 Error between experiment data and real velocity for the second experiment

3.3 实验误差分析

在实验1的实验系统中, 由于信号强度小, 信噪比较差, 导致主瓣内的谱线幅值受噪声影响较大。此外, 导轨本身的振动和目标在达到匀速运动前的加速减速过程所带来的速度不稳定也会引入测量上的误差。而

在实验 2 的系统中,信号强度比较好,速度模拟器的速度精度比较高,测量误差基本上可以达到 5 mm/s 之内。

4 结 论

能量重心校正方法可以较好地提高激光雷达测速系统中多普勒频谱的分析精度,为精确测量目标的运动速度提供了一种有效的手段。该方法算法简单,计算速度快,而且不依赖于窗函数,只要是对称窗函数就可以采用。在本实验系统中,采用的 Hanning 窗校正具有较高的校正精度;与之相比较,矩形窗的能量泄露严重,旁瓣较大,校正精度低。此外,校正精度与参与校正的点数有关,本系统中采用的四点校正法取得了较好的实验结果,测速误差可以控制在厘米每秒量级。

参 考 文 献

- 1 Meng Zhaohua, Hong Guanglie, Hu Yihua *et al.*. Research on chirped amplitude modulation coherent lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2446~2451
孟昭华,洪光烈,胡以华等.啁啾调幅相干探测激光雷达关键技术研究[J].光学学报,2010,**30**(8):2446~2451
- 2 Yu Xiao, Hong Guanglie, Ling Yuan *et al.*. Homodyne detection of distance and velocity by chirped-amplitude modulated lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0606002
于 啸,洪光烈,凌 元等.啁啾调幅激光雷达对距离和速度的零差探测[J].光学学报,2011,**31**(6):0606002
- 3 Dai Yongjiang. The Principle of Lidar[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 233~239
戴永江.激光雷达原理[M].北京:国防工业出版社,2002.233~239
- 4 Sun Yang, Zhang Jun, Fan Yafu. Detecting micro-doppler effect of micro-motion dynamics by laser coherent radar of 1550 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1222~1226
孙 洋,张 骏,范亚夫.1550 nm 激光相干雷达探测运动目标的微多普勒效应[J].中国激光,2010,**37**(5):1222~1226
- 5 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
- 6 Ding Kang, Xie Ming, Yang Zhijian. The Theory and Technology of Discrete Spectrum Correction[M]. Beijing: Science Press, 2008. 111~117
丁 康,谢 明,杨志坚.离散频谱分析校正理论与技术[M].北京:科学出版社,2008.111~117
- 7 Ding Kang, Jiang Liqi. Energy centrobaric correction method for discrete spectrum[J]. *J. Vibration Engineering*, 2001, **14**(3): 354~357
丁 康,江利旗.离散频谱的能量重心校正法[J].振动工程学报,2001,**14**(3):354~357
- 8 Lin Huibin, Ding Kang. Anti-noise performance of energy centrobaric correction method using four points for discrete spectrum[J]. *J. Vibration Engineering*, 2009, **22**(6): 659~663
林慧斌,丁 康.离散频谱四点能量重心校正法及抗噪性能分析[J].振动工程学报,2009,**22**(6):659~663