

激光多普勒测速仪的频域自适应阈值检测

聂延举, 孟照魁, 胡姝玲, 范哲, 李军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 激光多普勒测速仪(LDV)能够实现载体速度的高精度测量,从而满足航空航天领域对高精度导航的需求。目标速度测量是建立在回波信号成功检测的基础上进行的,因此微弱多普勒信号检测是 LDV 的关键技术。根据光频段噪声频谱特性,提出了对有用信号频率进行带阻滤波、利用剩余噪声强度估计总体噪声强度的方法,设计了频域内基于噪声强度估计的自适应阈值信号检测算法。通过与传统的固定阈值算法的对比仿真和实验,表明该方法具有更好的探测性能,能够在保持较低恒定虚警概率条件下实现对高于信噪比为 -9 dB 信号的完全检测,具有抵抗噪声强度的起伏变化、算法简单、适用性强等特点。

关键词: 激光光学; 激光多普勒测速仪; 恒虚警; 噪声方差估计

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0406002

Frequency domain adaptive threshold detection for laser Doppler velocimetry

Nie Yanju, Meng Zhaokui, Hu Shuling, Fan Zhe, Li Jun

(Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Laser Doppler Velocimetry(LDV) is able to measure the velocity of vehicle accurately for high precision navigation in the area of aerospace. The key of the measurement is to detect the Doppler signal successfully, so weak Doppler signal detection is one of the most important technologies due to the presence of noise. An adaptive signal detection algorithm in frequency domain was proposed. Noise was leached from useful signal by band stop filter and the adaptive threshold could be obtained according to the statistical properties of the left noise. Comparisons of simulation and experiments with the fixed threshold algorithm were taken, and the results show that the frequency domain adaptive threshold detection is an effective method to improve the performance of LDV. Under the condition of keeping the low Constant False Alarm Rate (CFAR), the Doppler signal can be completely detected when the Signal-to-Noise Ratio (SNR) is higher than -9 dB, and it is insensitive to the intense of noise, simple and applicable in many area.

Key words: laser optics; LDV; CFAR; noise variance estimation

收稿日期: 2015-08-20; 修订日期: 2015-09-23

作者简介: 聂延举(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达技术方面的研究。Email: 347669401@qq.com

导师简介: 孟照魁(1973-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光纤陀螺方面的研究。Email: 6906Emailmy@buaa.edu.cn

通讯作者: 胡姝玲(1971-), 女, 副教授, 博士, 主要从事激光器及其应用方面的研究。Email: hulxi@buaa.edu.cn

0 引言

激光多普勒测速仪(LDV)通过测量运动粒子散射光的多普勒频移解调目标的速度信息,具有精度高、量程广、非接触测量等优点,被广泛应用于机械、医疗、航空、航天等领域,将其安装到载体上探测对地速度,可实现载体的多普勒导航^[1-4]。为实现高精度多普勒导航,需要 LDV 提供连续高精度的测量结果,否则信号丢失或错误输出在导航积分过程中会造成较大的定位误差,所以微弱信号检测技术成为 LDV 的关键技术。

为了实现载体速度的高精度测量,传统的方法是设定阈值^[5],根据回波信号统计值和设定阈值进行比较,以判断多普勒信号是否存在。然而回波信号的强度随照射目标特性及外界环境随机变化,为实现多普勒系统的恒虚警检测,国内外学者对自适应阈值进行了广泛的研究,概括起来可分为时域法和频域法。时域信号检测方法对信噪比的要求较高,一般情况下需要信噪比大于 10 dB。Aydin 等^[6-7]给出了基于小波变换检测多普勒信号的自适应阈值设计;郭爱芳^[8]提出通过连续监视噪声或杂波平均电平的变化,调整检测阈值的恒虚警处理技术;任伦^[9]提出一种检测阈值系数随探测距离减小而增加的噪声电平恒虚警检测方法。在频域内用离散傅里叶变换对信号进行变换后检测则非常可靠,可以检测低至-10 dB 的信号^[5,10]。

文中分析了 LDV 的光频段信号及噪声的统计特性,设计了频域自适应阈值检测算法。首先分析频域阈值检测基本原理,然后分析光频段信号及噪声统计特性,利用带阻滤波器实现信号和噪声分离,再给出频域自适应阈值设计方法,最后通过仿真和实验与频域固定阈值检测进行了对比。

1 频域自适应阈值检测

1.1 基本原理

LDV 应用于载体测速,当载体运动时,载体与地面的相对运动使回波信号产生多普勒频移。因为照射目标为硬目标,所以有用信号频谱展宽较小^[11-13],若采样点足够多,则有用信号频谱为脉冲信号。如图 1 所示,LDV 利用零差探测方式,频率尖峰对应有

用信号频谱密度,其横坐标对应多普勒频移量,基底为噪声频谱。

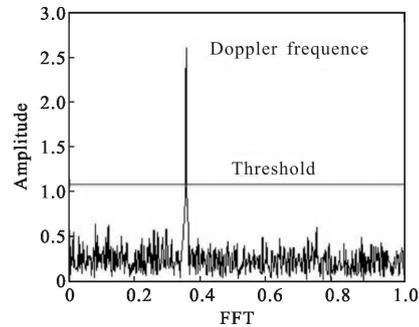


图 1 频域内阈值检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of the adaptive design in frequency domain

为了从噪声中检测到信号,传统的固定阈值方法是通过提前设定阈值,阈值一般选定大于 5 倍噪声标准差的平均值,然后将谱峰的频谱密度值与阈值进行大小比较。若谱峰的频谱密度大于阈值,则判定信号为多普勒信号;若谱峰的频谱密度小于等于阈值,则判定该信号为噪声信号。

对于 LDV 而言,噪声主要包括散粒噪声、热噪声、暗电流噪声、背景噪声和本振噪声等。噪声的强度随目标特性及外界环境的改变而变化,所以采用固定阈值检测,要求信号必须具有高的信噪比,或噪声的峰值必须较小,所以该方法对于微弱信号检测并不有效,并且因为噪声频谱服从一定的统计分布,出现噪声频谱峰值大于阈值,导致虚警。

1.2 实时噪声强度估计

自适应阈值检测通过实时估计噪声强度,改变阈值的设计值来实现恒虚警检测。为准确估计噪声强度,需要将信号和噪声分离。首先将采集信号进行 FFT 运算,并提取出信号频谱峰值,通过设计带阻滤波器将该频段信号滤出,然后利用剩余噪声进行总体的噪声强度估计。

LDV 采集到信号噪声通常服从零均值的高斯分布^[10],其概率密度为:

$$p(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: ε 为噪声电压; σ^2 噪声方差,用以表征噪声的强度。所以噪声频谱同样服从高斯分布。设带阻滤波器归一化带宽为 $k(0 < k < 1)$,即整个频带宽度为 1,归一化后的带宽是带阻滤波器的频宽与采样率一半的

比值。滤波后的噪声强度为 σ_i^2 , 则在整个频带上的噪声强度为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{1-k} \sigma_i^2 \quad 0 < k < 1 \quad (2)$$

根据公式(2)可知带阻滤波器的带宽越窄, 经滤波器输出的噪声频带越宽, 噪声强度估计越准确。但为了将多普勒信号主瓣全部滤除, 带阻滤波器需要设计一定的带宽。在整个频谱中多普勒频率的带宽(归一化后的频率)为^[14]:

$$k \geq \frac{v \sin \alpha}{2\pi \omega(z_s) f_s} \quad (3)$$

式中: v 为照射目标的速度; $\omega(z_s)$ 为信号光传播 z_s 距离后的高斯光束等相位面上的光斑半径; α 为载体运动方向与光出射方向夹角; f_s 为激光多普勒测速仪的采样率。由公式(3)可知, 在系统参数如 f_s 和 α 选定, 且因车载系统并不会产生 $\omega(z_s)$ 较大变化的条件下, 多普勒频率宽度同目标速度成正比。

根据奈奎斯特采样定理可知, 最大多普勒频移为 $f_s/2$, 则 LDV 最大可测速度为^[14]:

$$v_{\max} = \frac{\lambda f_s}{4 \cos \alpha} \quad (4)$$

式中: λ 为激光波长。通常在 LDV 设计过程中, 最大可测速度与载体的最大行驶速度相等。则公式(3)可重写为:

$$k \geq \frac{\lambda \tan \alpha}{8\pi \omega(z_s)} \quad (5)$$

在设计带阻滤波器时, 为提高噪声估计精度, k 取其最小值。

1.3 频域自适应阈值

频域自适应阈值检测能实现 LDV 的恒虚警检测。当载体静止, 采集信号中不包含有用多普勒信号时其虚警概率为^[10]:

$$P_f = 1 - \left[P \left(x = \frac{2Q^2}{N \cdot \sigma^2} \right) \right]^{\frac{N}{2}}, x \cdot \chi^2 \quad (6)$$

式中: N 为采样点数; Q 为门限阈值。现设定门限系数 $m = \frac{Q}{\sigma}$, 则公式(2)可改写为:

$$P_f = 1 - \left[P \left(x = \frac{2m^2}{N} \right) \right]^{\frac{N}{2}}, x \cdot \chi^2 \quad (7)$$

通过查表得出 m 与虚警概率之间的关系。图 2 为采样点数 $N=1024$ 时, 虚警概率随门限系数的变化曲线。

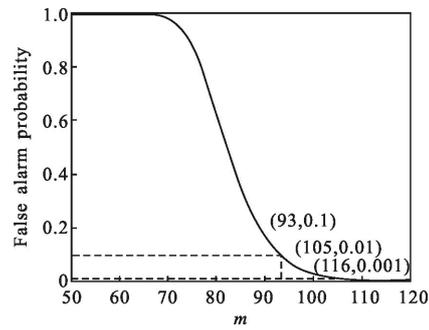


图 2 虚警概率随门限系数变化曲线

Fig.2 Curve of false alarm probability versus threshold coefficient

由图 2 可知, 通过设定不同的门限系数可以实现一定的虚警概率。例如当门限系数 m 为 93 时, 虚警概率为 0.1; 当门限系数 m 为 105 时, 虚警概率为 0.01; 当门限系数 m 为 116 时, 虚警概率为 0.001。

将设定的门限系数 m 与噪声强度估计值的平方根相乘, 便可到此时的出频域自适应阈值。

2 仿真与实验

2.1 仿真

为了检验频域内自适应阈值的有效性, 将其与频域内固定阈值的探测结果进行仿真对比。分别针对噪声和信噪比变化设计了两组仿真, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

| Parameter | Value |
|-----------------------------------|-------|
| Sampling frequency f_s /kHz | 1 |
| Sampling point N | 1024 |
| Signal amplitude A | 1 |
| SNR/dB | -30-0 |
| Noise power σ^2/W | 1-8 |
| Doppler frequency f_d /Hz | 300 |
| Bandwidth of band-stop filter k | 0.2 |

第一组仿真: 噪声从小到大变化, 对自适应阈值与固定阈值检测的虚警概率进行比较。

第二组仿真: 信号 SNR 从小到大改变, LDV 的探测概率随 SNR 的变化, 虚警概率分别设定为

0.1, 0.01 和 0.001。

在频域自适应阈值检测中设定虚警概率为 0.1, 门限系数为 93; 当噪声强度为 4 W 时, 固定阈值设计中的虚警概率为 0.1。仿真结果如图 3 所示。

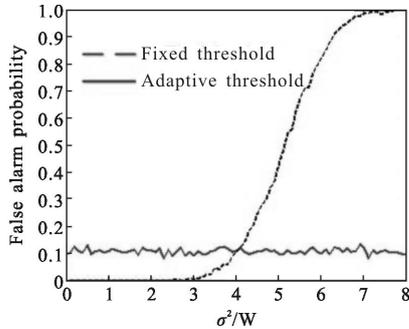


图 3 虚警概率随噪声强度变化的曲线

Fig.3 Curve of false alarm probability versus noise power

由图 3 可知, 噪声强度在 0~8 W 范围内变化, 固定阈值曲线大体可以分为 3 段: 噪声强度在 0~3 W 之间时, 具有极低的虚警概率; 噪声强度在 3~7 W 之间时, 虚警概率急剧增加; 当噪声强度在 7 W 以上时, 虚警概率约为 1。而采用频域自适应阈值检测算法的虚警概率始终保持在 0.1 左右, 在噪声强度较大时, 其虚警概率远远小于采用固定阈值检测的结果。

虚警概率分别为 0.1, 0.01, 0.001 时, 频域自适应阈值检测探测概率与信噪比之间的关系如图 4 所示。

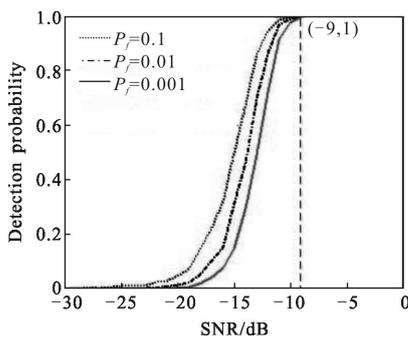


图 4 探测概率随 SNR 变化曲线

Fig.4 Curves of detection probability varying with SNR

由图 4 可知, 信噪比越大, 系统的探测概率越高; 虚警概率越大, 探测概率也越高; 当信噪比提高到 -9 dB 时, 所有的探测概率均达到 1。表明频域自适应阈值检测能够 100% 检测出信噪比为 -9 dB 的信号。

2.2 实验

为了检验频域自适应阈值检测的实际检测性能, 利用自主研发的车载激光多普勒测速仪进行了两组实验。实验装置如图 5 所示, 激光多普勒测速仪通过收发合置的准直器将激光以角度 α 照射在匀速转动的转台上, 并收集回波信号, 利用 NI 公司的产品 PXI 对 LDV 探测到的光信号进行采集, 将采集到的时域信号进行显示、存储。

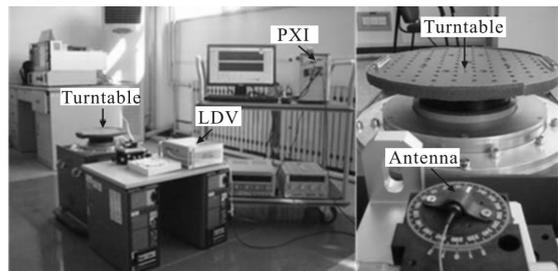


图 5 实验照片

Fig.5 Photograph of the experiment

实验一: 虚警概率测试。将转台静止, 采集频域自适应阈值检测和固定阈值检测的 100 s 的输出, 对虚警结果进行统计及比较。

实验二: 探测概率测试。转盘以恒定速度转动, 模拟匀速运动目标, 采集频域自适应阈值检测和固定阈值检测的 100 s 测量结果, 统计探测概率并比较。

实验的相关参数如表 2 所示, 设定虚警概率为 0.1 时, 归一化带阻滤波带宽为 0.2。

表 2 实验参数

Tab.2 Experiment parameters

| Parameter | Value |
|-----------------------------------|---------|
| Wavelength λ /nm | 1550 |
| Sampling frequency f_s /MHz | 40 |
| Signal amplitude N | 1024 |
| Spot size $\omega(z_0)$ /mm | 19.625 |
| Irradiation angle α /rad | $\pi/3$ |
| Output frequency/Hz | 10 |
| Bandwidth of band-stop filter k | 0.2 |

实验结果如图 6、8 所示, 对于实验结果个别点的分析如图 7、9 所示。

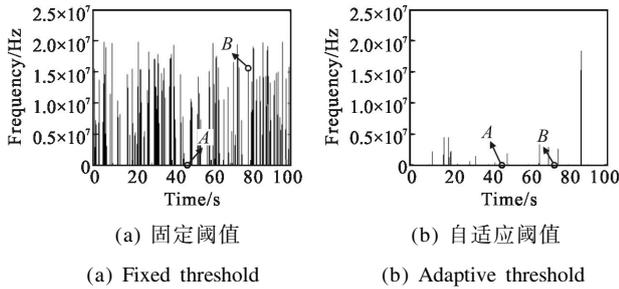


图 6 转台静止时, 100 s 内实验结果

Fig.6 Experimental results when turntable is static in 100 s

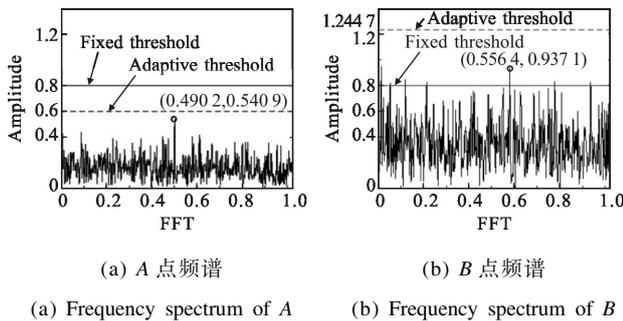


图 7 转台静止实验中虚警分析

Fig.7 Analysis of false alarm when turntable is static

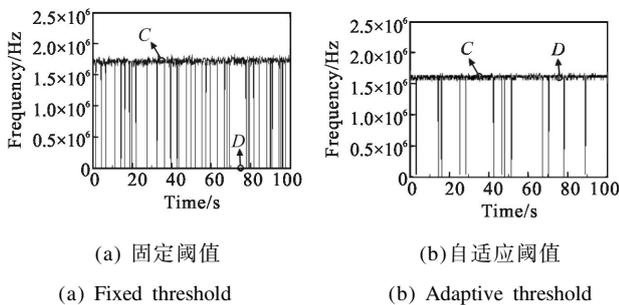


图 8 转台转动时, 100 s 内实验结果

Fig.8 Experimental results when turntable is rotational in 100 s

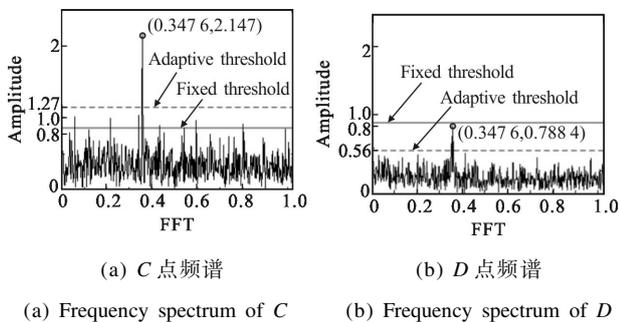


图 9 转台转动实验中检测个例分析

Fig.9 Analysis of signal detection when turntable is rotational

当圆盘静止时,检测结果如图 6(a)、(b)所示:在 100 s 内的 1 000 个数据中,固定阈值的实验结果中出现 141 个错误检测点,虚警概率约为 0.141;自适

应阈值的实验结果中出现 17 个错误检测点,虚警概率约为 1.7%。相比固定阈值设计,自适应阈值的虚警概率降低了 12.4%。

回波信号不存在多普勒信号,但是由于噪声强度起伏不定,LDV 可能错误检测到信号,如图 6(a)中点 A 和点 B。A 点和 B 点的频谱如图 7(a)、(b)所示:当噪声强度较小时,固定阈值和自适应阈值都能够正确检测信号;当噪声功率较大时,固定阈值会错误检测信号,自适应阈值能够跟随噪声强度增大而增大,正确检测信号,从而降低系统的虚警概率。

当圆盘转动时,检测结果如图 8(a)、(b)所示:在 100 s 内的 1 000 个数据中,固定阈值设计的实验结果中出现 52 个未检测点,探测概率约为 0.948;自适应阈值设计的实验结果中出现 13 个未检测点,探测概率约为 98.7%。相比固定阈值设计,自适应阈值的探测概率提高了 3.9%。

由于回波信号功率以及信噪比起伏不定,多普勒信号可能淹没在噪声中,导致 LDV 没有检测到信号,如图 8(b)中点 C 和点 D。C 点和 D 点的频谱如图 9(a)、(b)所示:当信号的强度和信噪比足够大时,固定阈值和自适应阈值都能够正确检测多普勒信号;当信号的强度比较小时,固定阈值可能检测不到信号,而自适应阈值能够跟随信号强度减小而减小,当信噪比足够时,也能够检测到多普勒信号。

实验结果表明:频域内自适应阈值设计相比固定阈值设计能够抵抗噪声强度的起伏变化,降低 LDV 的虚警概率,并且提高探测概率。

3 结论

文中提出了一种频域自适应阈值检测算法,以实现 LDV 光频段信号的恒虚警检测。利用带阻滤波器进行信号和噪声分离,并通过噪声强度估计和设定虚警概率,实时得出自适应阈值。通过数值仿真分析得到频域自适应阈值检测在噪声强度较大时虚警概率远远小于固定阈值检测的结果。通过实验室转台实验得出采用频域自适应阈值检测将虚警概率降低了 12.4%,探测概率提高了 3.9%。

参考文献:

[1] Utkarsh Sharma, Gang Chen, Kang Jin U. Fiber optic confocal laser Doppler velocimeter using an all-fiber laser

- source for high resolution measurements [J]. *Optics Express*, 2005, 13(16): 6250–6258.
- [2] Rene Shob Hansen, Christian Pedersen. All semiconductor laser Doppler anemometer at 1.55 μm [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18288–18295.
- [3] Fan Zhe, Zhang Chunxi, Niu Yanxiong, et al. Impact of photodetector's nonlinear response on coherent laser Doppler speedometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2103–2107. (in Chinese)
范哲, 张春熹, 牛燕雄, 等. 光电探测器非线性响应对相干激光多普勒测速仪的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2103–2107.
- [4] Han Yan, Sun Dongsong, Weng Ningquan, et al. Development of 60 km mobile Rayleigh wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1414–1419. (in Chinese)
韩燕, 孙东松, 翁宁泉, 等. 60 km 车载瑞利测风激光雷达研制[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1414–1419.
- [5] Qui H H, Sommerfeld M, Durst F. Two novel Doppler signal detection methods for laser Doppler and phase Doppler anemometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 5(7): 769–778.
- [6] Aydin N. DWT Based Adaptive threshold determination in embolic signal detection [C]//Adaptive Hardware and Systems, 2007: 214–219.
- [7] Goncalves I B, Leiria A, Moura M M M. STFT or CWT for the detection of Doppler ultrasound embolic signals [J]. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 2013, 29(9): 964.
- [8] Guo Aufang, Hou Mingsheng, Guo Tingkai. Computer simulation of noise constant false alarm rate [J]. *Electron IC Engineer*, 2007, 33(7): 4–6. (in Chinese)
郭爱芳, 候民胜, 郭廷铠. 噪声恒虚警处理电路的计算机仿真[J]. 电子工程师, 2007, 33(7): 4–6.
- [9] Ren Lun, Huang Jinjie, Jing Wei. An improved noise threshold detection method [J]. *Fire Control Radar Technology*, 2013, 42(1): 47–50. (in Chinese)
任伦, 黄金杰, 井伟. 一种改进的噪声门限检测方法[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(1): 47–50.
- [10] 张晓永, 王勇, 陈锋. LFM CW 激光雷达门限检测技术[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(2): 120–122.
- [11] Xu Cong'an, He You, Jian Tao, et al. Survey of space CFAR processing [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2011, 26(4): 414–418. (in Chinese)
徐从安, 何友, 简涛, 等. 空域 CFAR 处理方法综述[J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(4): 414–418.
- [12] He You, Guan Jian, Meng Xiangwei, et al. Survey of automatic radar detection and CFAR processing [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(1): 9–14. (in Chinese)
何友, 关键, 孟祥伟, 等. 雷达自动检测和 CFAR 处理方法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 9–14.
- [13] Zhou Jian, Long Xingwu. Research on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained inertial navigation system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42: 477–483.
- [14] Zhou Jian, Yao Baoju, Long Xingwu. Research on transit broadening of laser Doppler signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 826–829. (in Chinese)
周健, 姚宝聚, 龙兴武. 激光多普勒信号渡越加宽研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 826–829.