

自适应滤波算法在微弱振动测量中的应用

谷晓彬,冯国英,刘建

(四川大学 电子信息学院 激光微纳工程研究所,四川 成都 610065)

摘要: 将递归最小二乘自适应滤波算法应用于激光多普勒测振技术中,搭建了相应的微弱振动测量装置。模拟仿真与实验中,通过与设计的切比雪夫低通滤波算法对比,结果表明:该递归最小二乘自适应滤波算法能够有效抑制随机高斯白噪声,还原出原始信号;能够对简谐振动信号实现有效滤波,并且可以还原出淹没在噪声中的低频 20 Hz 信号;文中算法可以去除语音噪声,使声音更加纯净,增强语音信号,以此验证了该算法在外差振动测量中的可行性。该算法简单易用、收敛性强、速度快,尤其对于随机噪声的去除比普通的低通滤波器更加有效。

关键词: 振动测量; 语音检测; 自适应滤波; 递归最小二乘算法; 激光外差

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0417003

Application of adaptive filtering algorithm in the weak vibration measurement

Gu Xiaobin, Feng Guoying, Liu Jian

(Institute of Laser & Micro/Nano Engineering, College of Electronic and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The adaptive filtering algorithm based on recursive least square algorithm was applied to a laser Doppler vibrometer and the corresponding weak vibration measuring devices were built up. Compared with Chebyshev low-pass filtering algorithm, simulation and experimental results show that this adaptive filtering algorithm can suppress the random Gaussian white noise and restore the original signal; the RLS algorithm can effectively filter out noise from the vibration signal, and restore the low-frequency 20 Hz signal drowned out in the noise; the RLS algorithm also can filter out noise from voice leading voice to being pure and enhance speech signal. The above verifies the feasibility of this algorithm in the heterodyne vibration measurement. The algorithm is simple and easy to use, fast and has strong convergence. In the aspect of filtering random noise, the RLS algorithm is more effective than low-pass filter.

Key words: vibration measurement; voice detection; adaptive filtering; recursive least square algorithm; laser heterodyne

收稿日期:2015-08-11; 修订日期:2015-09-15

基金项目:国家自然科学基金(60890200,10976023)

作者简介:谷晓彬(1989-),男,硕士生,从事新型激光技术及应用方面的研究。Email:1031381503@qq.com

导师简介:冯国英(1969-),女,教授,博士生导师,主要从事新型激光技术方面的研究。Email:guoing_feng@scu.edu.cn

0 引言

光学测量技术是一种非接触式的测量方法,一直以来是工业和科研领域的研究热点^[1-4]。激光外差探测技术本质上是一种相干探测技术,具有精度高、线性度好、动态响应快等特点。另外,作为一种非接触式测量方式,可以应用于许多其它接触式测振方式无法测量的任务中,还可以弥补接触式测量方式无法测量大幅度振动的缺陷。因此,广泛应用于测振^[1-4]、测速^[5-7]、测距^[8]、光通信^[9]、雷达^[10-12]、语音检测^[13-14]、车辆识别^[15]等方面。在探测微弱振动信号时,测振系统固有噪声和工作环境噪声往往会将有用信号淹没,从而加大了对有用信号提取和特征分析的困难^[16],进而就需要一种有效的手段去除这些随机噪声,有效地将有用信号提取出来。自适应滤波算法是近 30 年发展起来的关于信号处理的方法^[17],其可以在未知有关信号特征的有关知识环境下完成滤波运算,具有收敛速度快、估计精度高、稳定性好等优点,因而广泛应用于回波消除^[18]、自适应信道均衡^[19]、信道估计^[20]、语音线性预测^[21]、自适应天线阵列^[22]等诸多领域。文中研究基于递归最小二乘(RLS)的自适应滤波算法在激光外差测振中的应用,探索有效滤除噪声的方法,力图将淹没在噪声中的有用周期性信号提取出来。

1 激光外差探测原理

激光的出现以及激光技术的发展,使可用光波的相干性获得了明显的改进。为了对随机振动进行测量,1976 年起美国宇航局(NASA)发展了外差多普勒测量技术^[23]。激光外差基本原理图如图 1 所示。由

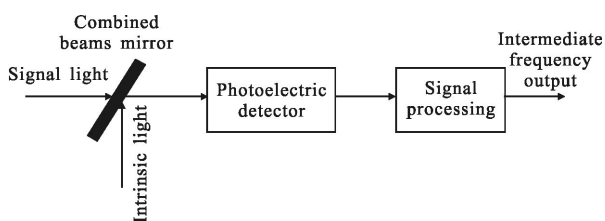


图 1 激光外差原理

Fig.1 Schematic of laser heterodyne

光电探测器输出含有振动信息的电流方程^[24]:

$$i(t)=I_1+I_2+2(I_1I_2)^{1/2}\cos[2\pi f_{\text{AOM}}t+4\pi A\sin(2\pi ft)/\lambda+\phi] \quad (1)$$

式中: I_1, I_2 为光电探测器输出直流信号; ϕ 为初始相位,此信号 $i(t)$ 是载频为 $f_{\text{AOM}}=80 \text{ MHz}$ 的一个相位调制信号,所测物体做正弦运动 $x(t)=A\sin(2\pi ft)$ 。该相位调制信号输入信号模块,通过混频放大、压控振荡器和锁相环 PLL 处理得到物体位移信号。

2 RLS 自适应滤波算法^[25]

2.1 最小二乘法

将期望响应 $d(i)$ 和滤波器输出 $y(i)$ 之差定义为误差 $e(i)$, 即:

$$e(i)=d(i)-y(i) \quad (2)$$

假设输入信号为 $u(i)$, 抽头权值为 $w(i)$, 循环变量 k , 相应的滤波器输出为:

$$y(i)=\sum_{K=0}^{M-1} w_k^* u(i-k) \quad (3)$$

由公式(2)和(3)可得误差为:

$$e(i)=d(i)-\sum_{K=0}^{M-1} w_k^* u(i-k) \quad (4)$$

在最小二乘法中, 横向滤波器抽头权值的选择应使得误差平方和构成的代价函数为最小值, 该代价函数定义为:

$$\varepsilon(w_0, \dots, w_{M-1})=\sum_{i=i_1}^{i_2} |e(i)|^2 \quad (5)$$

当该代价函数为最小(即实现最小化)时, 滤波器的抽头权值 w_0, w_1, \dots, w_{M-1} 在 $i_1 \leq i \leq i_2$ 的间隔内保持不变。

2.2 RLS 自适应滤波算法

RLS 算法, 即递归最小二乘是给定 $n-1$ 次迭代滤波器权向量最小二乘估计, 依据新到达的数据计算 n 次迭代权向量最新估计。

$u(i)$ 为 i 时刻抽头输入向量为:

$$u(i)=[u(i), u(i-1), \dots, u(i-M+1)]^T \quad (6)$$

输入向量包括振动信号和噪声向量。

$w(n)$ 为 n 时刻的抽头权向量为:

$$w(n)=[w_0(n), w_1(n), \dots, w_{M-1}(n)]^T \quad (7)$$

引入加权因子 $\beta(n, i)=\lambda^{n-i}$ 以保证“遗忘”掉久远的过去数据, 以便滤波器工作在非平衡环境时, 能跟踪观测数据的统计变化。

为了扩展代价函数公式, 使其能考虑与输入输出映射关系有关的先验信息, 可把待最小化的代价函数扩展为两部分之和:

$$\varepsilon(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2 + \delta \lambda^n \|w(n)\|^2 \quad (8)$$

更新抽头权向量的递归方程为:

$$\hat{w}(n) = \hat{w}(n-1) + k(n) \xi(n) * e(n) \quad (9)$$

式中: $k(n)$ 为增益向量; $\xi(n) = d(n) - \hat{w}^H(n-1)u(n)$ 为更新抽头权向量之前 $e(n)$ 的暂时尚值; $\hat{w}^H(n-1)u(n)$ 表示基于 $n-1$ 时刻抽头权向量最小二乘估计旧值的期望响应 $d(n)$ 的估计值。公式(9)描述了 RLS 算法的自适应过程, 据此可通过在其过去值的基础上增加一个量来递推抽头权向量, 该量等于先验估计误差 $\xi(n)$ 复共轭与时变增益量 $k(n)$ 的乘积。

RLS 算法的收敛速率快, 且收敛速率不随输入向量 $u(n)$ 集平均相关矩阵 R 特征值的扩散度而改变。

3 模拟仿真

为了验证该滤波算法的可行性, 首先, 对其进行

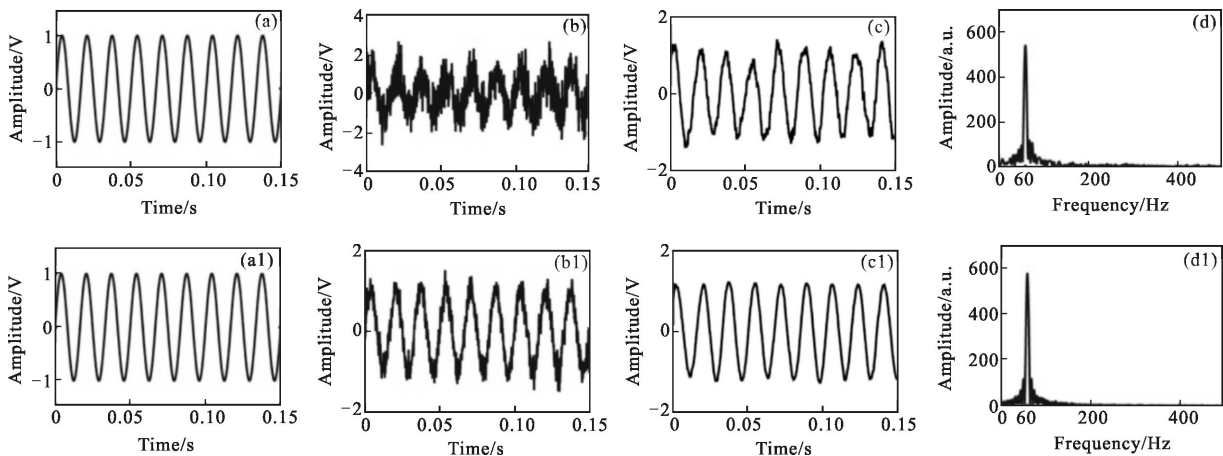


图 2 SNR=1 和 12 时, 分别对混有 Gaussian 白噪声正弦信号的模拟滤波。(a)、(a1) 为原始振动信号; (b) 和 (b1) 为混有噪声的振动信号; (c) 和 (c1) 为滤波后振动信号波形图; (d) 和 (d1) 为对应的频谱图

Fig.2 When SNR=1 or 12, simulation of filtering out the Gaussian white noise from sine function. (a) and (a1) are the waveforms of original vibration signal; (b) and (b1) are the vibration signals mixed with noise; (c) and (c1) are the vibration signals after filtering out noise; (d) and (d1) are the spectrums of (a) and (a1), respectively.

号加入 Gaussian 白噪声后信号的振幅发生明显变化。图 3 给出低通滤波器对 SNR=1 时信号的滤波模拟结果, 所设计低通滤波器带边区衰减数和截止区衰减数分别为: $r_p=0.1$ 、 $r_s=30$, 截止频率为 $f_c=2100$ Hz, 由于后期所做正弦振动试验最高为 2000 Hz, 所以设置截止频率为 2100 Hz。利用所述滤波算法进行滤波后, 波形图发生明显改善, 验证了其可行性; 而

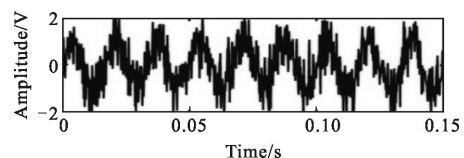
了模拟仿真。在仿真参数设置中, 振动信号设定为频率 $f=60$ Hz 的正弦函数, 振幅 $A=1$ V。使用 awgn 函数随机加入信噪比分别为 1 和 12 时的高斯白噪声, awgn 函数为 Matlab 中的函数, 是用于在某一信号中加入 Gaussian 白噪声; $y=awgn(x, SNR)$, 是在信号 x 中加入 Gaussian 白噪声, 信噪比为 SNR。

原始振动信号为:

$$y = \sin(2\pi f x t) \quad (10)$$

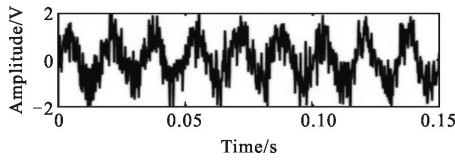
利用所述算法对其进行了滤波处理, 算法参数设置为滤波器的阶数 $M=30$, 遗忘因子 $L=0.9$ 。模拟结果如图 2 所示。SNR=1 和 12 时, 图 2(a) 和 (a1) 分别为原始振动信号, 图 2(b) 和 (b1) 分别为加入 Gaussian 白噪声后的信号, 图 2(c) 和 (c1) 为滤波后信号, 图 2(d) 和 (d1) 为其对应的频谱图。图 2(b) 为 SNR=1 时模拟图, 从图中可以看出, 此时振动信号几乎全部被淹没, 经过该算法滤波后, 能够较好地还原出原始信号。从图 2(b1) 可以看出, 当 SNR=12 时, 原始振动信

经过普通低通滤波器的数据几乎未发生变化。



(a) 滤波前信号

(a) Signals without being filtered



(b) 滤波后信号

(b) Vibration signals after filtering out noise

图 3 SNR=1 时,利用低通滤波器对混有 Gaussian 白噪声正弦信号的模拟滤波

Fig.3 When SNR=1, simulation of filtering out the Gaussian white noise from sine function by using low-pass filter

4 实验及结果

基于外差干涉基本原理,搭建了一声光移频式的激光外差振动测量系统。该实验使用氦氖激光器(DHC DH-HN250 632.8 nm)作为光源,使用扩音器作为振动源,驱动信号用任意信号发生器(RIGOL DG1022)提供。由氦氖激光器发出的线偏振光经过分光棱镜 BS₁ 分为两束,一束作为信号光,频率为 f_0 ,一束作为本振光,频率为 f_0 。信号光经过一个二分之一波片 HWP₁(633 nm)后其偏振方向发生改变,调节 HWP₁ 以使入射光全部透过后面的偏振棱镜 PBS,HWP₁ 和 PBS 之间安置一个声光移频器 AOM(工作波长为 632.8 nm,中心频率为 80 MHz),经过 AOM 后频率变为 f_0+f_{AOM} ($f_{AOM}=80$ MHz),利用小孔 A₁ 使一级光通过。信号光束入射到偏振棱镜 PBS,振动物体和 PBS 之间加一四分之一波片 QWP(633 nm),信号光通过波片变为圆偏振光入射到振动物体反射回来,再通过 QWP 变为线偏振光,但偏振方向旋转 90°,经过 PBS 反射到 BS₂ 上。本振光经 M 反射,通过另一二分之一波片 HWP₂(633 nm)偏振方向发生改变,保证两束光偏振态一致以提高干涉效率,通过小孔 A₂ 后,两束光同时入射到光电探测器光敏面发生干涉,产生拍频信号。实验装置图如图 4 所示。使用一个普通功放充当振源,使用任意信号发生器(RIGOL DG1022)驱动功放。

经过仔细的调试光路,获得了拍频信号输出,当加入频率为 $f=1$ kHz 和振幅 $A=5$ V 的振动信号时,拍频信号发生明显调制。在得到拍频信号的基础上,对其进行振动信号解调。所得 80 MHz 拍频信号输入到数据处理模块。信号首先进入混频模块,拍频信号和本振电路产生的一个标准 84 MHz 正弦信号混频,

降频到 4 MHz,经过一四阶带通滤波器后输入到 AGC 模块,使信号电压峰值控制在 3 V 不变,以利锁相环 PLL 电路进行信号的解调,信号经过 PLL 中的鉴频鉴相器,使输入信号和本振信号保持相位差不变,解调出原始振动信号。所得调制信号由示波器采集,同时获得其频谱,振动信号频谱如图 5 所示,图中选取了 900 Hz~2 kHz 信号作为展示。

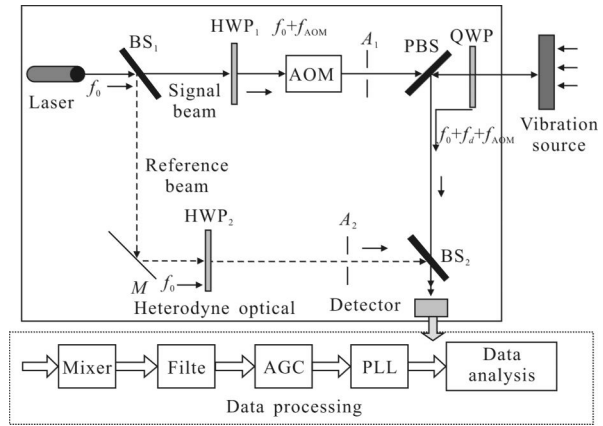


图 4 实验装置原理图

Fig.4 Schematic diagram of experimental device

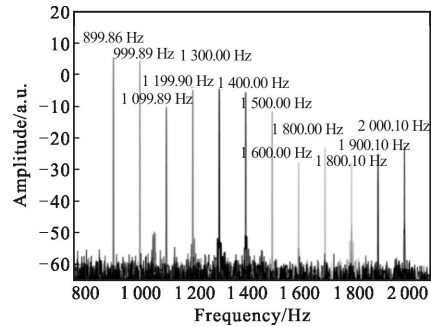


图 5 振动信号频谱

Fig.5 Spectrum of vibration signals

经过外差光路 and 数据处理模块,所获得振动信号混有大量噪声,尤其是低频信号。实验中采集了 20 Hz、1 kHz、2 kHz 振动信号,分别经过 RLS 算法处理后的振动信号如图 6 中所示。图 6(a)、(a1)、(a2)为实验中采集到的解调出的原始振动信号,从图中可以看出信号混有大量噪声,尤其在低频部分,有用信号几乎被噪声完全淹没,使用该算法滤波后得到如图 6(b)、(b1)、(b2)所示信号。从实验结果可得出:该 RLS 算法可以很大程度地去除噪声,抗干扰能力强,对中低频信号均有良好的滤波能力;图 7 是使用低

通滤波器的结果图,通过对图 6 和图 7,可以看出文中算法能够很大程度上消除随机噪声,并根据信号特征还原出原始信号。图 8 为采集的语音信号,使用手机给音响播放英语单词“A”的音,由于人所能听

到语音信号频带为 20 Hz~20 kHz,使用低通滤波器很难实现对信号的滤波,该 RLS 算法可以不受频率限制的情况下对语音信号去除随机噪声,得到了更加纯净的语音信号。

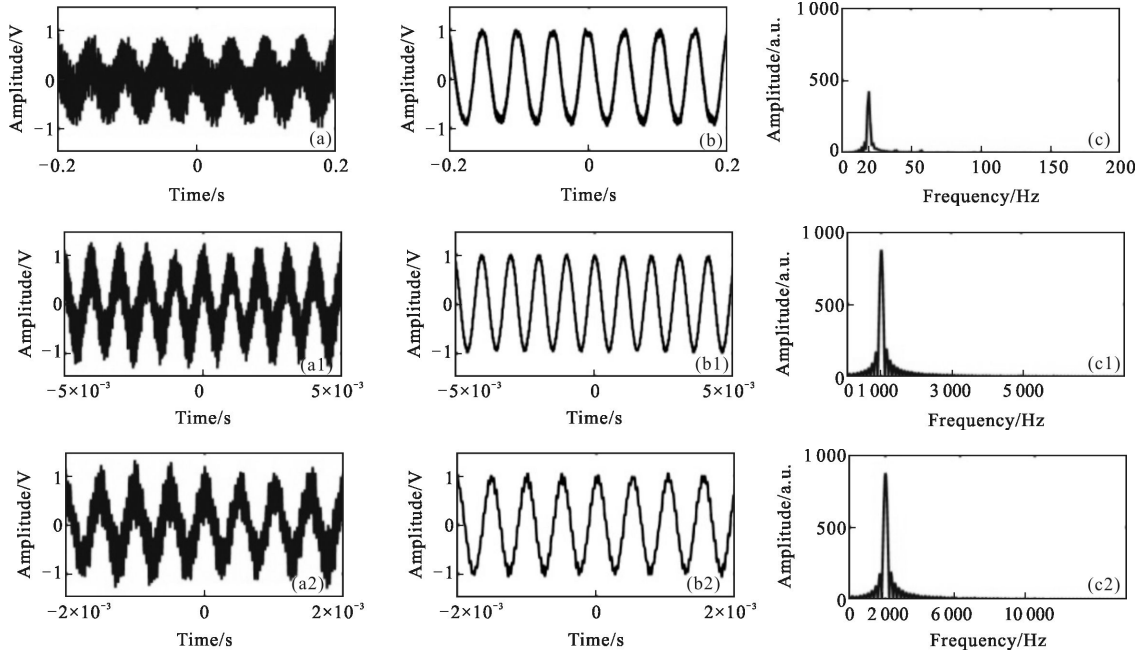


图 6 RLS 处理振动信号。(a)、(a1)和(a2)分别为 20 Hz、1 kHz、2 kHz 混有随机噪声振动信号;(b)、(b1)和(b2)分别为滤波后振动信号;(c)、(c1)、(c2)是其频谱

Fig.6 Vibration signal by using RLS. (a),(a1) and (a2) are the waveforms of 20 Hz,1 kHz,2 kHz vibration signals mixed with random noise, respectively; (b),(b1) and (b2) are the waveforms of the filtered vibration signal,respectively; (c),(c1) and (c2) are the spectrums of (a),(a1) and (a2), respectively

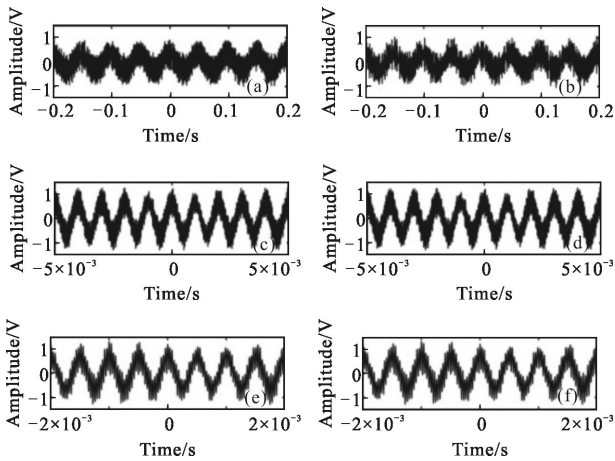
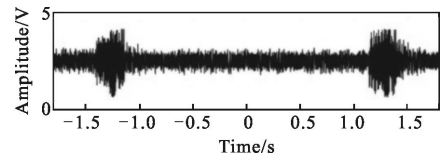
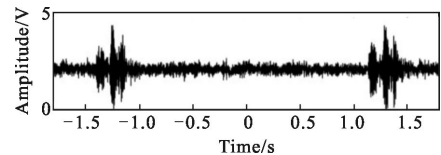


图 7 低通滤波处理振动信号。(a)、(c)和(e)分别为未处理振动信号;(b)、(d)和(f)为对应的通过低通滤波器的信号

Fig.7 Vibration signal by using low-pass filter. (a),(c)and(e)are the vibration signals without filtering out random noise; (b)、(d) and (f) are the signals after filtering out random noise for using low-pass filter



(a) 外差系统测得未处理语音信号
(a) Untreated speech signal by heterodyne system



(b) 滤波后语音信号
(b) Speech signal after filtering out random noise

图 8 RLS 处理语音信号

Fig.8 Speech signal by using RLS

5 结论

文中针对激光外差测振中所获得的物体振动信

号,介绍了光学外差原理,并将 RLS 自适应滤波算法应用于激光外差测振技术中。首先,使用 awgn 函数向频率 $f=60$ Hz 的正弦函数随机引入了 SNR 分别为 1 和 12 时的高斯白噪声,通过对比该 RLS 算法和低通滤波器的模拟运算,验证了文中滤波算法的有效性;然后,搭建了激光外差测振平台,使用任意信号发生器作为驱动,功放作为振动源,进行了激光外差测振实验。实验中采集了 900 Hz~2 kHz 的振动信号步长为 100 Hz,给出了滤波前后所采集到的信号效果图,并针对 20 Hz 振动信号和语音检测做了实验;接着使用手机驱动音响,利用所述外差系统测得了语音信号,并对其进行了 RLS 滤波,实验结果表明该算法在低频和语音增强方面的随机噪声消除有良好的性能。研究表明,该算法可以应用在激光外差探测中,尤其为车辆识别^[15],语音检测^[13-14]等方面提供了方便。

参考文献:

- [1] Bai Yan, Ren Deming, Zhao Weijiang, et al. Research on heterodyne detection of a mode-locked pulse laser based on an acousto-optic frequency shift[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(20): 4018-4023.
- [2] Park Y, Cho K. Heterodyne interferometer scheme using a double pass in an acousto-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 331-333.
- [3] Waz A, Kaczmarek P, Abramski K. Laser-fibre vibrometry at 1550 nm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(10): 105301.
- [4] Liu Lisheng, Zhang Heyong, Wang Tingfeng, et al. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1508-1515. (in Chinese)
刘立生,张合勇,王挺峰,等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1508-1515.
- [5] Bai Yan, Ren Deming, Zhao Weijiang, et al. Heterodyne Doppler velocity measurement of moving targets by mode-locked pulse laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 764-768.
- [6] Zhang Heyong, Peng Shuping, Zhao Shuai. Experimental research of heterodyne velocity measurement for non-cooperative rotatable target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 784-790. (in Chinese)
张合勇,彭树萍,赵帅. 非合作转动目标相干测速实验研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 784-790.
- [7] Liu Lisheng, Zhang Heyong, Guo Jin, et al. High precise measurement of target velocity using laser heterodyne technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2366-2372. (in Chinese)
刘立生,张合勇,郭劲,等. 用激光外差技术高精度测量目标速度[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2366-2372.
- [8] Wang Chunhui, Cheng Xiangyang, Liu Liping, et al. Distance measurement of a target with CO₂ coherence imaging lidar of short pulse [J]. *Chinese J Laser*, 2003, 30(6): 555-558. (in Chinese)
王春晖,成向阳,刘丽萍,等. 窄脉冲 CO₂ 相干激光成像雷达目标距离测量研究[J]. 中国激光, 2003, 30(6): 555-558.
- [9] He Yan, Shang Jianhua, Liu Dan, et al. Heterodyne laser doppler vibrometer for underwater acousto-optic communication [J]. *Chinese J Laser*, 2009, 36(1): 189-192. (in Chinese)
贺岩,尚建华,刘丹,等. 用于水下声光通信的外差式激光多普勒振动计[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 189-192.
- [10] Sun Y, Zhang J. Detection on micro-Doppler effect based on laser coherent radar[J]. *Journal of Electronics(China)*, 2012, 29(1-2): 56-61.
- [11] Zhang Wenrui, Zeng Xiaodong, Man Xiangkun. Study on optical heterodyne detection [J]. *Infrared and Laser Engineerin*, 2008, 37(8): 146-148. (in Chinese)
张文睿,曾晓东,满祥坤. 激光外差实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(8): 146-148.
- [12] Jiang Chenghao, Yang Jinhua, Zhang Lijuan. Schematic design and simulation of new Doppler imaging laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 411-416. (in Chinese)
姜成昊,杨进华,张丽娟. 新型多普勒成像激光雷达原理设计与仿真[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 411-416.
- [13] Shang Jianhua, He Yan, Liu Dan, et al. Laser Doppler vibrometer for real-time speech-signal acquirement [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8): 732-733.
- [14] Zhang Qin, Zhang Jianyong, Zeng Hualin. Acoustic signal detection system using PGC demodulation algorithm and laser Doppler effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1115-1118. (in Chinese)
张勤,张建勇,曾华林. 基于 PGC 解调的激光多普勒语音检测系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1115-1118.
- [15] Luo Yun, Feng Guoying, Liu Jian, et al. Vehicle identification technology of laser heterodyne spectral analysis of vibration characteristics[J]. *Chinese J Laser*, 2014, 11: 31. (in Chinese)

- 罗韵, 冯国英, 刘建, 等. 激光外差振动谱提取分析的车辆标识技术[J]. 中国激光, 2014, 11: 31.
- [16] Cheng Xuezheng, Xu Jingdong, Wei Aying. Application of RLS adaptive filtering in signal de-noising [J]. *Journal of Measurement Science & Instrumentation*, 2014, 5(1): 32–26.
- [17] Zhao H, Zhou J, Yang K. Laser Doppler signal processing based on least mean square adaptive filter [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(17): 2781–2783.
- [18] Capman F, Boudy J, Lockwood P. Controlled convergence of QR least-squares adaptive algorithms-application to speech echo cancellation [C]//Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-97, 1997.
- [19] Bu Xiangyuan, Yang Yaoyao. Adaptive equalization using a new RLS algorithm combined with the coordinate descent method [J]. *Advanced Technology in Teaching*, 2013, (S): 631–638.
- [20] Li J, Ma J, Liu S. RLS channel estimation with superimposed training sequence in OFDM systems [C]//11th IEEE International Conference on Communication Technology, ICCT, 2008.
- [21] Yu R, Ko C C. Lossless compression of digital audio using cascaded RLS-LMS prediction [J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2003, 11(6): 532–537.
- [22] Monzingo R A, Miller T W. Introduction to Adaptive Arrays [J]. 1980: SciTech Publishing.
- [23] Edelman S, Cook Jr L L, Cyphers H D, et al. THE shock and vibration bulletin [R]. Washington DC: Naval Research Lab Washington DC Shock and Vibration Information Center, 1969: 37.
- [24] Ma Lifang. The polarized light based heterodyne interference system for the laser ultrasonic signal detector [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007: 24–25. (in Chinese)
马丽芳. 检测激光超声的线偏振光外差干涉系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2007: 24–25.
- [25] Haykin S. Adaptive Filter Theory [M]. Zheng Baoyu Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 303–366. (in Chinese)
西蒙赫金. 自适应滤波器原理[M]. 郑宝玉译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 303–366.