

基于频谱校正的双声光调制器频差检测

李 杨 相里斌 张文喜 黄 旻 伍 洲 孔新新

中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 为了对双声光调制器(AOM)的频差进行高精度检测,设计了一种基于频谱校正的外差干涉检测方法及实验系统。通过测量外差干涉信号的频率,获得双AOM的实际频差大小。信号频率的精确提取采用加Hanning窗的比值频谱校正法。仿真分析了利用不同信噪比信号对频差的检测精度与采样点数的关系,并设计搭建实验系统对一组双AOM的频差进行检测,结果表明,所采用的算法对双AOM频差的检测精度优于2 Hz。该检测方法可以为高精度外差测量系统的误差分析提供有效参考。

关键词 测量; 频差检测; 声光调制器; 外差探测; 频谱校正

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.051205

Detection of Double Acousto-Optical Modulators Difference Frequency Based on Spectrum Correction

Li Yang Xiangli Bin Zhang Wenxi Huang Min Wu Zhou Kong Xinxin

Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract In order to carry out high precision detection of frequency shift error of the acousto-optical modulator (AOM), a heterodyne interferometer detection method and an experimental system are designed. By measuring the frequency of the heterodyne interference signal, the actual difference frequency of the double AOM can be obtained. Spectrum correction algorithm using Hanning window is used for precise frequency correction. The relationship between detection accuracy of the difference frequency and sampling number by signals with different SNR is simulation analyzed, and the difference frequency of a pair of AOMs by designed experimental system is also detected. The simulation and experimental results show that the detection accuracy of the method used for difference frequency of double AOMs is better than 2 Hz. The method can provide valid reference for error analysis of high precision heterodyne detection system for application.

Key words measurement; frequency difference detection; acousto-optical modulator; heterodyne detection; spectrum correction

OCIS codes 140.3518; 120.4570; 040.2840; 030.1640

1 引言

声光调制器(AOM)是利用声子与光子相互作用产生声光衍射效应,在入射光频率上叠加一个声子频率,使出射光束产生精度较高的频率和角度偏移,通常利用布拉格衍射效应,可以使入射光能量大部分转移到+1级衍射极值上,获得较高的衍射效率和较精准的频率偏移。AOM可以应用到光束控制与光电检测等多个领域。利用其偏转特性,AOM在激光打印、激光寻址、激光调Q等技术中有着广泛应用;利用其移频特性,AOM在激光多普勒测速、外差干涉仪、光纤陀螺传感、激光线宽测量以及傅里叶望远镜等高精度检测和成像技术中也起着非常重要的作用^[1-7]。

在许多高精度的测量系统中,如可鉴向的高精度多普勒测速仪、纳米级外差干涉仪^[8]、多普勒测振仪^[9]等通常多选用双AOM外差检测的形式,在两束光路中分别加入不同移频量的AOM,这种形式有着对光电接收

收稿日期: 2014-12-15; 收到修改稿日期: 2014-12-31; 网络出版日期: 2015-03-24

基金项目: 国家杰出青年科学基金(61225024)、中国科学院光电研究院院创新基金(JS2013012201)

作者简介: 李 杨(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事光学干涉成像与检测等方面的研究。

E-mail: liyang914@126.com

器频响要求低、信噪比高、容易匹配光程等优点^[10]。理论上单个AOM的移频量应严格等于作用声子频率,但实际上由于光源频率抖动、声场波面无法达到平面和驱动电子电路噪声等因素会使实际移频量产生误差^[11]。高精度的测量系统要求AOM有极高的移频精度,双路频差精度甚至不应低于几赫兹,因此需要对系统中实际双AOM的频移量进行高精度检测。

本文针对双AOM外差探测形式,对双AOM的频差进行高精度检测,提出了采用加Hanning窗的比值法频率校正算法对探测信号频率进行高精度提取,从而实现双AOM频差的高精度检测。并通过所设计搭建的实验系统,精确检测了一组AOM的频差。对利用双AOM的差动多普勒测速测振仪、外差干涉仪等精密测量系统的误差分析提供了参考。

2 检测方法

2.1 外差检测方法

可见光的频率在 10^{14} Hz量级,直接检测移频量的大小是光电探测器所不能响应的,因此采用外差检测形式,如图1所示,将两束不同移频量的光在探测器前相干,为了有更高的相干调制度,把到达探测器的两束光功率调整到相等,两个不同移频频率的光波分别表示为

$$E_1 = E \cos(\omega_1 t + \varphi_1), E_2 = E \cos(\omega_2 t + \varphi_2), \quad (1)$$

式中 E 为每列光波的振幅, ω_1 和 ω_2 为两个移频量光的角频率, φ_1 和 φ_2 分别为两束光的相位。两束光发生相干后拍频表示为

$$E_m = A \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right), \quad (2)$$

式中 $A = 2E \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)$,探测器对高频的响应为直流量,仅能检测到的合成波的强度的低频起伏,检测的光电流信号 $i(t)$ 为

$$i(t) = A^2 = 2E^2 + 2E^2 \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi), \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 为两光束的频差^[6]。从检测到的光电流中提取出信号的频率,得到双AOM频差 $\Delta\omega$ 的值。

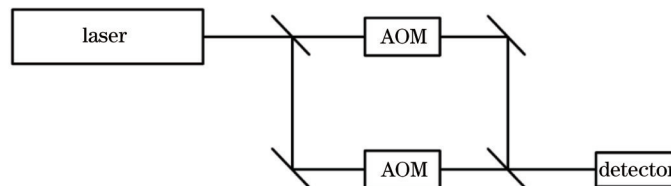


图1 外差检测形式

Fig.1 Heterodyne detection form

对单个AOM的移频量检测也同样采用此种方法,但一束光路不加AOM,直接到探测面上与移频光相干,或用移频器的0级光与1级光直接进行外差干涉进行测量,因此需要的光电探测器响应频率较高。提取的光信号频率即为AOM的移频量。

2.2 频率提取算法

在利用双AOM的外差高精度检测技术中,往往需要两路AOM产生极高精度的频差,对几十千赫兹的频差甚至可能要求误差不超过几赫兹,因此需要对频差的检测应有更高的精度。从检测方法看出,对频差检测的精度主要取决于光电信号频率的提取准确度。快速傅里叶变换(FFT)是提取周期信号频率的经典方法,但由于时域信号被截断和采用离散化,会引起频谱泄露,致使直接从FFT谱线读出的频率误差很大。要实现双AOM频差的高精度检测,需要进行高精度的频谱校正。

典型的频谱校正算法有:相位差校正法、比值校正法、能量重心校正法和FFT+离散傅里叶变换(DFT)谱连续细分法等,文献[12-13]比较了几种校正算法的校正精度、运算速度和适用特点,证明了对于多普勒测速等一类外差探测信号的频率提取,加Hanning窗的比值校正法精度高,运算量小,抗噪能力强,是相对最适合的算法。因此对高精度的双AOM频差检测,选用精度较高的加Hanning窗的比值校正法。

加 Hanning 窗的比值校正法思想是利用频率归一化后差值为 1 的主瓣峰顶附近两条谱线的窗谱函数的比值,建立一个以归一化校正频率为变量的方程,解出校正频率从而进行频率校正。具体方法如下所述^[14]:

设一个余弦信号 $x(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$, f_0 为信号真实频率, φ 为初相位,信号被截断并离散化采样,其采样周期为 $1/f_0$,采样点数为 N 。首先为信号加 Hanning 窗处理,其中 Hanning 窗函数为

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n/N), \quad (4)$$

其傅里叶变换的归一化模函数如(5)式,其中 f 为频谱频率:

$$W(f) = \left| \frac{\sin(\pi f)}{\pi f} \frac{0.5}{1-f^2} \right|, \quad (5)$$

加窗的函数做 FFT 变换,变换后信号频域峰值位置的谱线号为 k ,则粗测得的信号频率 f^* 为频谱峰处对应的频率值:

$$f^* = \frac{k f_0}{N}. \quad (6)$$

若频率校正量为 Δf ,幅值谱中频率峰最大值与峰谱线号相邻的次大值之比为 ν ,则有

$$\nu = \frac{W(\Delta f)}{W(\Delta f + 1)}. \quad (7)$$

将(5)式代入(7)式解出反函数,则得到加 Hanning 窗的比值法给出一个校正频率,由(6)式给出:

$$\Delta f = \frac{\nu - 2}{\nu + 1} \times \frac{f_0}{N}, \quad (8)$$

校正后的真实频谱为

$$f_i = f^* \pm \Delta f = \left(k \pm \frac{\nu - 2}{\nu + 1} \right) \times \frac{f_0}{N}. \quad (9)$$

当次大值在最大值左侧时,取正号;当次大值在最大值右侧时,取负号。

3 仿真分析

在没有噪声的理想情况下,采用加 Hanning 窗的比值校正法精度极高,信号的频率检测几乎没有误差^[14],但实际检测系统中,受到电子电路噪声、光路污染、环境背景噪声、光束能量与偏振方向不一致等因素影响,采集的光电流信号不仅会加入噪声影响,还会使干涉的调制度下降,都会引入一定的检测误差。要减小检测误差,达到高精度检测,需要信号频谱有较高的频率分辨率,当探测器采样频率一定时,则在时域采样应达到一定的长度。因此需要仿真分析受不同程度噪声影响,检测误差的大小随信号长度的变化,从而确定实验检测系统的设计。

仿真采用加 Hanning 窗的频率比值校正法检测真实频差为 50 kHz 两个 AOM 外差相干的信号,即应用 Matlab 软件生成一调制度合理的 50 kHz 正弦信号,为信号加入不同程度噪声,在一定的采样频率下与采样时间下,信号 FFT 后采用(6)式的方法对估计的频谱进行校正。

考虑探测器驱动难度,探测器采样频率设为 2 MHz。根据以往实验经验,通常信号的直流量比较高,调制度比较低,一般在 0.5 以下,仿真信号调制度设为 0.1。信号中引入的噪声主要为加性高斯白噪声,图 2 为采集信号加入噪声影响后在不同信噪比(SNR)下,检测误差的大小随信号采样点数的变化,图中每个点为对应采样点数下 50 次仿真得到频差测量误差的平均值。

可以看出,采集信号的信噪比越低,频差检测误差越大,在噪声影响下,随采样点数的增多,测量误差减小。从图 2(c)中看出,当信噪比较低(5 dB)时,只要采样点数不少于 20000 个,检测误差则比较小,不超过 5 Hz,仍可获得较高的频差检测精度。若采样点数大于 50000 个,检测精度不低于 2 Hz。

4 检测实验

4.1 实验系统

通过实验系统对两种不同驱动电路下的双 AOM 频差进行检测,AOM 选用美国 Brimrose 公司开发的波长为 632.8 nm 激光声光移频器,两个移频器的驱动频率分别为 80.1 MHz 与 80.15 MHz,理论频差为 50 kHz。通过实验系统测量两路 AOM 移频频差的大小与误差。

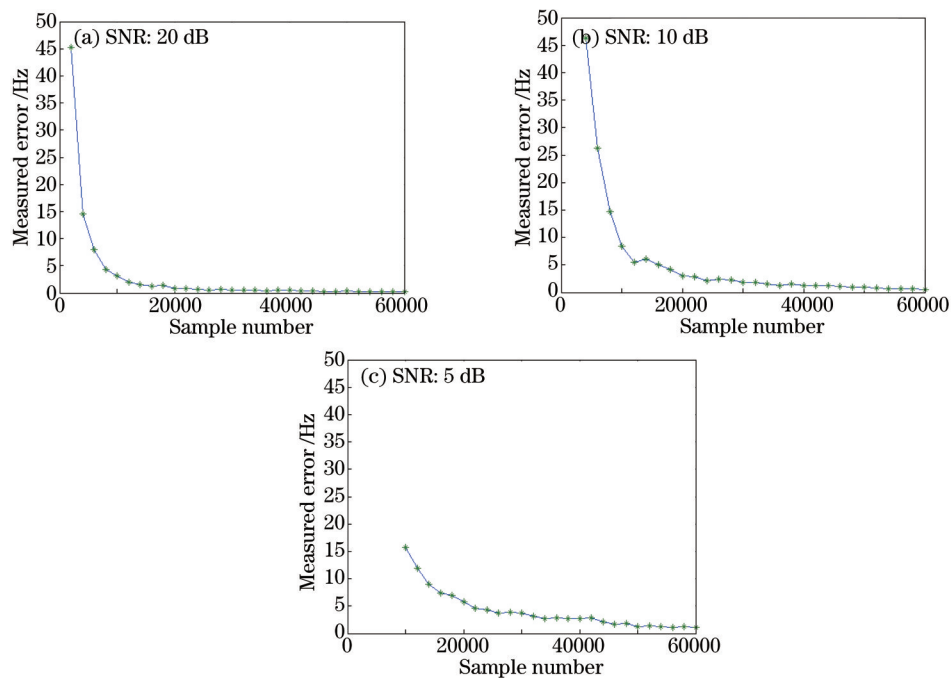


图2 不同信噪比下检测误差与采样点数的关系

Fig.2 Relationship between measured error and sampling number with different SNRs

设计的实验系统如图3所示,光路对称布置保证两束光光程差较小。激光器出射激光经过两对1/2波片和偏振分光(PBS)棱镜的组合被分为功率分别连续可调的两束,分别进入两个移频量不同的AOM进行移频。移频光束通过激光扩束镜扩束后以一定的夹角在小孔面板上相干,小孔后用电倍增管(PMT)对外差拍信号进行接收。接收前再分一路光,用傅里叶透镜与CCD相机对两束光的夹角进行监视即调整,以便控制干涉条纹的宽度。

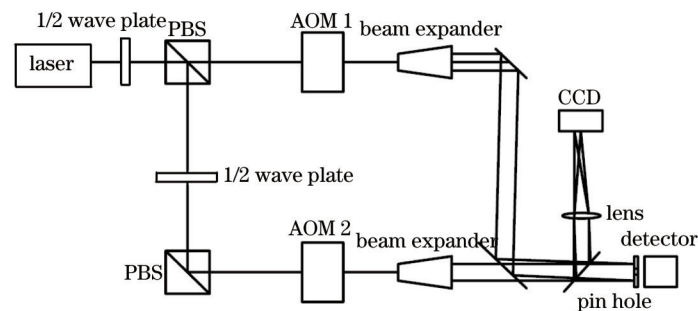


图3 实验系统示意图

Fig.3 Sketch of experimental system

因为光电倍增管实际的感光面相对于光束直径并不是点探测,会造成探测直流量的提高,使信号调制度与信噪比下降,因此在探测器前面加小孔板,且使干涉条纹的宽度大于小孔的直径。He-Ne激光器出射 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 激光,光斑直径2 mm,但要使两束光都能在小孔位置以较小的夹角干涉,光路调整难度较大,因此两束光在移频后各自通过一个10倍激光扩束镜将光斑扩展到20 mm直径,使得容易调整到两束光在探测小孔面上的光斑有较大的重叠面积,且两束光夹角较小,从而产生粗的干涉条纹。在挡光板上形成1 mm小孔,则干涉条纹宽度 $b = \frac{\lambda}{\theta} > 1 \text{ mm}$,算出 θ 为两束光之间的夹角应小于0.63 mrad。这就需要在夹角监视系统监视下完成调整。监视系统选用300 mm焦距傅里叶透镜,CCD像元尺寸4.4 μm 的相机,因此可以得出要将两束光在CCD上成的光点距离调整在43个像元以内。探测器用采样频率为 2×10^6 的PMT,根据仿真结果,为达到较高的测量精度,取采样点数50000点,从仿真的图2中可以看出,即使在较低的信噪比下,测量误差也不会超过2 Hz。

按照设计搭建实验系统如图4所示。为了进一步可以利用实验装置进行多路频差检测,实验系统最终

搭建成三束差动相干光路,并做了一定的集成化设计,对上述设计两个AOM频差检测时仅使用其中两路相干来完成。

4.2 实验结果

利用图4所示实验系统,在探测器前用黑色厚纸遮挡,中心形成1 mm左右小孔,调整到两束光在小孔面板上重合度较好且夹角小于0.5 mrad时采集PMT探测的光电流数据。单次测得的光电流时域信号与频谱如图5所示。可以看出,实际探测信号的调制度与信噪比都较高。虽然对信号加Hanning窗进行了切趾,但信号主频谱峰附近还存在较强的干扰频率,是造成频差误差的来源。利用主频谱峰进行频率比值校正,得到最终测量的实际频差为50025.39 Hz,与理想的频差 $f_i=50$ kHz相差25.39 Hz。

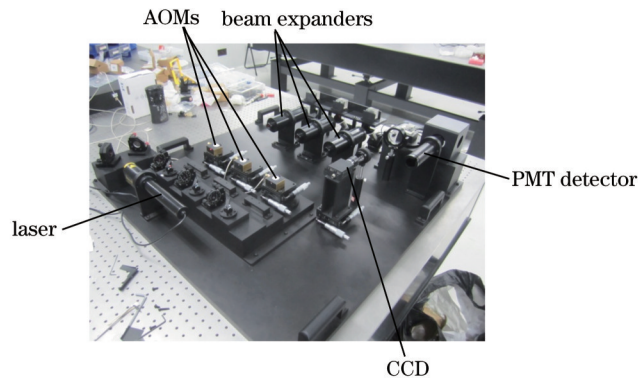


图4 实验系统照片

Fig.4 Photo of experimental system

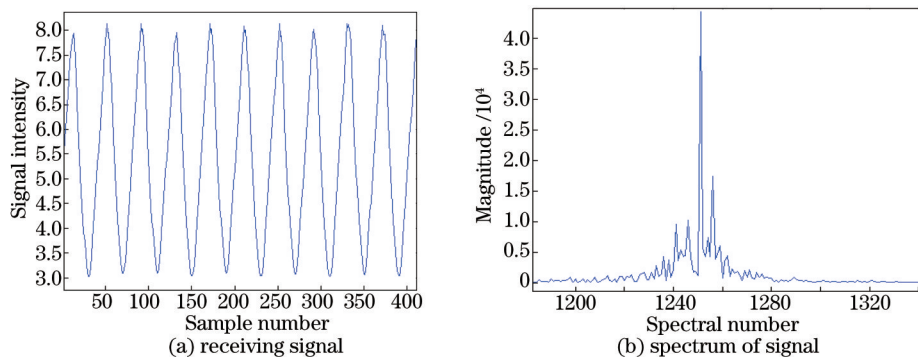


图5 检测的信号与信号频谱

Fig.5 Detected signal and the spectrum of the signal

改变光束夹角大小与方向,对频差进行了多次测量,十次测量的结果如图6所示,点划线表示理想频差 f_i ,实线表示十次测量的平均结果 $f_m=50024.49$ Hz。虚线为平均结果的 ± 2 Hz偏差线。可以看出十次测量结果都与平均值相差不超过2 Hz,与仿真的测量精度相符合。根据仿真与实验结果,说明所设计搭建的基于频谱校正的检测系统对双AOM频差的检测精度优于2 Hz。

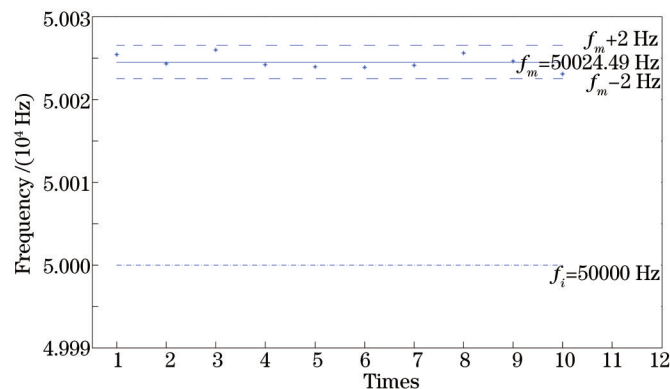


图6 频差的多次测量结果

Fig.6 Repeatedly measured results of difference frequency

5 结 论

对固体运动目标多普勒测速系统,为了提高信号的信噪比一般会将探测光与参考光间的夹角调到很小,如 1 mrad,在不考虑其他因素影响下,仅以实验用双 AOM 的频差作为多普勒测速的基准速度,选用 632.8 nm 激光光源进行测量时,测速误差达到 1.61 cm/s,对低速运动目标的测量误差过大。且从信号频谱可以看出,主频附近其它干扰频率较强,在实际多普勒测速系统中引入其他因素影响后可能难以分辨主频位置,造成更大的测速误差,说明该组 AOM 及驱动的移频精度不能满足应用在高精度要求的外差检测系统中。

根据仿真与实验检测结果,可以说明基于频谱校正的双 AOM 外差检测方法可以实现对双 AOM 频差的高精度检测,检测精度优于 2 Hz。可以为多普勒测速测振系统、外差干涉仪等高精度外差检测系统的误差分析提供有效参考。

参 考 文 献

- 1 Yu Kuanxin, Ding Xiaohong, Pang Zhaoguang. Acousto-Optic Principle and Acousto-Optic Device[M]. Beijing: Science Press, 2011: 336-343.
俞宽新,丁晓红,庞兆广. 声光原理与声光器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 336-343.
- 2 Nejad S M, O lyae S. Accuracy improvement by nonlinearity reduction in two-frequency laser heterodyne interferometer [C]. 13th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2006: 914- 917.
- 3 Cuellar E L, Cooper J, Mathis J, *et al.*. Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system [C]. SPIE, 2008, 7094: 70940G.
- 4 Hao Aihua, Mao Zhili, Ge Haibo. The study of acousto- optic technology in the field of laser technology[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2005, 10(3): 111-114.
郝爱花,毛智礼,葛海波. 声光技术在激光技术领域中的应用研究[J]. 西安邮电大学学报, 2005, 10(3): 111-114.
- 5 Zhou Zhisheng, Xiangli Bin, Zhang Wenxi, *et al.*. Image reconstruction method of Fourier telescope based on iteration [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0511005.
周志盛,相里斌,张文喜,等. 基于迭代的傅里叶望远镜图像重构方法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0511005.
- 6 Kong Xinxin, Huang Min, Zhang Wenxi, *et al.*. Design of laser frequency shift of multiple-beam Fourier telescope[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011102.
孔新新,黄旻,张文喜,等. 多光束傅里叶望远镜的移频设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 011102.
- 7 Xie Donghong, Deng Dapeng, Guo Li, *et al.*. Line-width measurement method of narrow line width lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010006.
解东宏,邓大鹏,郭丽,等. 窄线宽激光器线宽测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010006.
- 8 Shen Xiong. Technology and Application of Laser Doppler Velocimetry[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 126-127.
沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 126-127.
- 9 Qian Liming, Zhao Weijiang, Ren Deming, *et al.*. Frequency shift error of AOM in Doppler lidar system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 643-646.
钱黎明,赵卫疆,任德明,等. 多普勒雷达系统中 AOM 的频移误差[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 643-646.
- 10 Zhao Yang, Zhou Ting, Li Dacheng. Influence of characteristics of an AOM on the measurement accuracy of a heterodyne interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(10): 1368-1374.
赵洋,周挺,李达成. 外差干涉仪中 AOM 特性对测量精度的影响[J]. 光学学报, 1999, 19(10): 1368-1374.
- 11 Shang Jianhua, Ren Lihong, Xu Haiqin, *et al.*. Heterodyne laser doppler vibrometer based on double acousto-optic frequency shifters[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1149-1155.
尚建华,任立红,徐海芹,等. 基于双声光移频器的外差式激光多普勒测振计[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1149-1155.
- 12 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.
- 13 Zhou Jian, Long Xingwu, Wei Guo. Spectrum correction of laser Doppler velocimeter based on Labview[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(1): 9-14.
周健,龙兴武,魏国. 基于 Labview 的激光多普勒测速仪的频谱校正[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(1): 9-14.
- 14 Ding Kang, Xie Ming, Yang Zhijian. The Theory and Technology of Discrete Spectrum Correction[M]. Beijing: Science Press, 2008: 104-111.
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: 104-111.