

doi:10.3788/gzxb20144309.0912006

基于激光拍频高准确度相位式测距方法

姜成昊, 杨进华, 张丽娟, 王晓坤

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要: 介绍一种基于相位式激光测距的高动态、高准确度测距系统. 系统引入光频调制技术实现激光拍频产生高频调制信号并完成信号的高速变测尺调制. 在对回波信号进行鉴相时, 为降低鉴相偏差采用无窗全相位谱分析并实现对测量信号的相位计算. 计算表明, 该方法可以有效抑制频谱泄露, 减小噪声对测量结果的影响, 提高鉴相准确度. 实验表明该测距系统可以有效地解决相位法测距中存在的抗干扰能力差、距离模糊较难抑制等问题, 调制信号频率为 100 MHz、信噪比为 30 dB 时测距准确度优于 0.5 mm.

关键词: 相位测距; 激光测量; 拍频; 高准确度测量; 全相位谱分析; 鉴相; 相位调制

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0912006-5

High-precision Phase-shift Laser Range Finder System Based on Laser Beat-frequency

JIANG Cheng-hao, YANG Jin-hua, ZHANG Li-juan, WANG Xiao-kun

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

Abstract: A high-dynamic and high-precision ranging system based on laser phase-shift ranging was studied. The optical frequency modulation technology was introduced in system to realize laser beat-frequency, produce high-frequency modulation signals and complete the rapid-change measuring tape modulation of signal. In the phase demodulation of echo signal, the windowless all-phase spectrum analysis was adopted and the phase calculation of measuring signal was realized for the purpose of reducing the phase demodulation deviation. The calculation shows that the proposed method can effectively retrain spectrum leakage, reduce the influence of noise on the measurement results, and improve the phase demodulation precision. The experiment shows that this ranging system can effectively solve the problems such as poor anti-jamming capability and difficult mitigation of range ambiguity in the phase ranging. The ranging precision is more than 0.5 mm when the modulating signal frequency is 100 MHz and SNR is 30 dB.

Key words: Phase ranging; laser measurement; Beat-frequency; Precision measurement; All phase spectrum analysis; Phase discrimination; Phase modulation

OCIS Codes: 060.5060; 030.1670; 010.3640; 070.6020; 120.5050

0 引言

相位式激光测距是激光传播时间测量法 (Time Of Flight, TOF) 的一种. 它以激光为载体, 通过计算调制波的相位差间接测定激光传播时间间隔, 实现毫米级、

甚至微米级的高准确度测距^[1].

在相位式激光测距中, 激光信号的调制频率以及相位信息的测量准确度直接制约测量结果的准确度^[2]. 相位法激光测距中相位差测量以 2π 为模, 转换成距离信息就存在不模糊距离, 为了获取较为精确的

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 201150103) 资助

第一作者: 姜成昊 (1987-), 男, 博士, 主要研究方向为激光雷达、视觉检测技术. Email: jiangch412@126.com

导师 (通信作者): 杨进华 (1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为视觉检测. Email: yangjh@cust.edu.cn

收稿日期: 2013-12-10; 录用日期: 2014-05-12

<http://www.photon.ac.cn>

测量结果,在测量过程中往往需要多把测尺,并且希望最小测尺频率能够足够高. 半导体激光器在高频条件下很难获得较好的调制信噪比,并且它的调制深度会随着调制频率的增加而降低,同时调制后信号在高频时容易产生畸变,造成严重的波形失真.

利用激光波相位调制技术使激光器产生两束存在频差的光波,经混频装置合束后形成频率可探测的拍频信号. 这种拍频信号频率稳定、系统简单,能够轻松实现百兆赫兹甚至 G 赫兹的调制信号,并且调制速率迅速,是一种良好的测量光源^[3].

本文选择 1 550 nm 窄线宽激光光源,通过激光相位调制器件完成对光频的高速调制,实现全测尺高速测量. 利用全相位谱分析的相位不变性、频谱泄露抑制能力好等优点对探测回波信号进行处理,获取信号相位信息. 测量方法测距准确度可达亚毫米级,有效地解决了目标相位法测距中存在的抗干扰能力差、距离模糊较难抑制等问题.

1 探测原理分析

测量系统采用激光相位测距的方式实现对目标距离信息的检出,通过计算回波信号与发射信号之间的相位差计算光在空间走过的路程,即

$$l = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{c}{2f} = \frac{\varphi_1 - \varphi_s}{2\pi} \cdot \frac{c}{2f} \quad (1)$$

式中: φ_1 、 φ_s 为参考信号与回波信号的相位值, f 为激光信号的调制频率, c 为光速.

设计采用光相位调制器完成激光光频调制,并通过拍频产生高速调制信号实现系统相位测距,其原理如图 1.

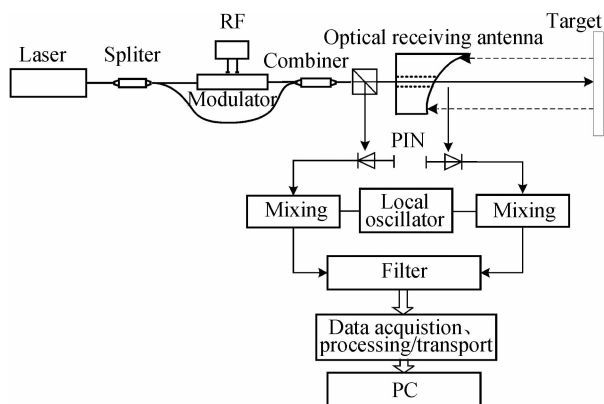


图 1 系统结构

Fig. 1 System structure

激光经过分束装置分为两路,一路经过光相位调制器调制后产生对应射频调制信号频率的频差并经合束装置实现与另一路光波合束. 由光相干理论,假设两束光偏振态完全相同,在光电探测器产生总得光强电流为^[4-7]

$$I_{IF} = \eta_d \frac{q_e}{h\nu} \frac{1}{z} \int_{\text{area}} \frac{1}{2} |E_1(t) + E_s(t)|^2 dx' dy' = \eta_d \frac{q_e}{h\nu} \frac{1}{z} \left[\frac{1}{2} A_d \bar{E}_1^2 + \frac{1}{2} A_d \bar{E}_s^2 + A_d \sqrt{\eta_h} \bar{E}_1 \cdot \bar{E}_s \cos(2\pi f_{IF} t + \Delta\varphi) \right] \quad (2)$$

式中: η_d 为混频效率, φ_s 、 φ_1 与 f_s 、 f_1 为信号光与本振光相位与频率, h 为普朗克常数, ν 为光频.

混频后光信号产生高频稳定的拍频信号,经分束器分为占绝大多数能量的信号光与占小部分能量的本振光,信号光经准直镜整形后出射实现目标探测. 目标反射后由光学接收天线接收并由光电探测器实现光信号与电信号的转换,采集后的信号与本振光信号进行混频转换以实现高频信号向低频信号的转换并完成原始信号的相位差计算.

2 激光拍频信号

采用激光高速相位调制器作为信号调制器件,实现对光频高速调制^[8-13],其调制原理如图 2.

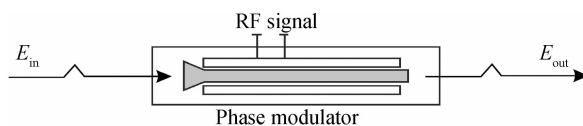


图 2 光频信号调制

Fig. 2 Optical frequency signal modulation

激光信号 $A \cdot e^{i(\omega t)}$ 经过光相位调制后将频率为 ω , 相位为 θ 的微波信号加载到激光光波中,输出光波信号可以表示为

$$E_{\text{out}}/A = J_0 \exp[i(\omega t)] + iJ_1 \cdot \exp[i(\omega \pm \omega t) + \theta] - J_2 \cdot \exp[i(\omega \pm 2\omega t) + 2\theta] - iJ_3 \cdot \exp[i(\omega \pm 3\omega t) + 3\theta] + \dots \quad (3)$$

调制后的光波信号与加载到相位调制器上的 RF 信号频率和相位相关,并包含其多倍频调制信号. 调整 RF 信号到 100 MHz 正弦波,拍频后的光信号经 PIN 接收并显示在示波器中,见图 3.

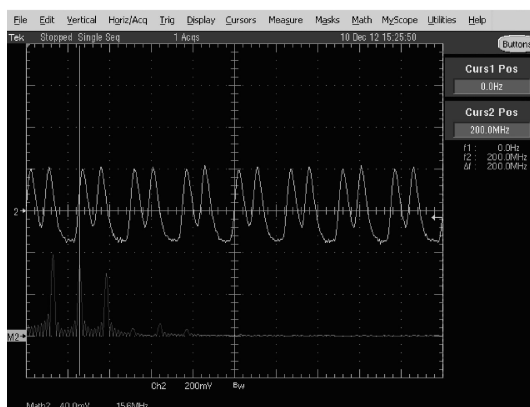


图 3 光拍频信号

Fig. 3 Laser beat-waves signal

对波形做快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)分析,得到图3中下方频谱信号图.从频谱图中可以看到拍频信号不只包含100 MHz的调制信号,也包含由于光相位调制器产生的200 MHz、300 MHz等多级频率信号.为了获得单一频率的拍频信号,可以通过调整光相位调制器出射光路实现不同级衍射光的分离,或通过带通滤波器获取需要的频率信号.图4为通过调整光相位调制器输出光路实现二倍频衍射光波的分离得到的拍频信号.

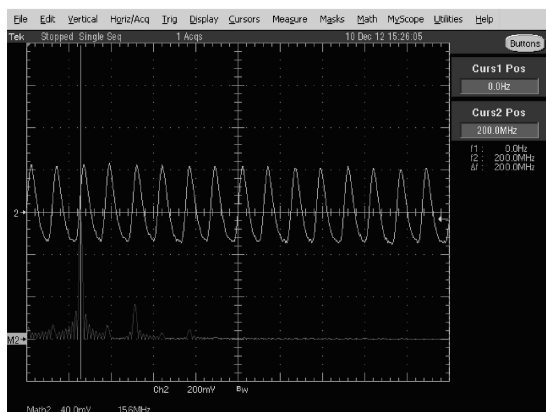


图4 经处理后的光拍频信号

Fig. 4 Laser beat-waves signal after processing

可以看到,处理后的拍频信号仅保留了200 MHz频率的调制信号,并得到高信噪比且频率稳定的测量信号源.

3 回波信号全相位谱分析

相位式激光测距采用的数字鉴相算法主要包括时间间隔鉴相法、数字同步解调法和谱分析鉴相法等.经目标反射回波信号由于受大气传输和接收电路噪声等因素影响,信号会受到较强的噪声污染.谱分析鉴相法具有测量准确度高、抗噪声性能强等优点,在准确计算回波信号包含的相位信息上得到广泛应用.

与传统的FFT鉴相法相比,全相位谱分析法具有更高的测量准确度以及防频谱泄露能力,在相位式激光测距中应用较多.根据卷积窗的不同,全相位数据预处理分为无窗、单窗和双窗三种类型^[14-15].采用无窗全相位数据预处理时,对 $2N-1$ 个点的离散信号 $S(n)$,其相位值为 φ_1 ,对于获取任意时段 T 中差频信号全相位数据傅里叶变换为

$$S_{\text{sp}}(k) = \frac{A}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1-i} (e^{j(2\pi f(n-i)T/N + \varphi_1)} + e^{-j(2\pi f(n-i)T/N + \varphi_1)}) \cdot e^{-j2\pi kn/N} e^{j2\pi ki/N} = \frac{A}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1-i} e^{j(2\pi/N)(k-fT)i} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j(2\pi/N)(k-fT)n} + \frac{A}{2} e^{-j\varphi_1} \sum_{j=0}^{N-1} e^{j(2\pi/N)(k+fT)i} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j(2\pi/N)(k+fT)n} = \frac{A}{2} e^{j\varphi_1} \frac{\sin^2[\pi(k-fT)]}{\sin^2[\pi(k-fT)/N]} + \frac{A}{2} e^{-j\varphi_1} \frac{\sin^2[\pi(k+fT)]}{\sin^2[\pi(k+fT)/N]} \quad (4)$$

实数序列的全相位频谱成对称分布,对于 $k < N/2$ 部分,各谱线的幅度为

$$A_{1k,\text{sp}} = \frac{A}{2} \frac{\sin^2[\pi(k-fT)]}{\sin^2[\pi(k-fT)/N]} \quad (5)$$

而原始信号傅里叶变换为

$$S_1(k) = \frac{A}{2} e^{j\varphi_1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(2\pi/N)n(fT-k)} = \frac{A}{2} e^{j[\varphi_1 + (N-1)N^{-1}\pi(fT-k)]} \cdot \frac{\sin[\pi(fT-k)]}{\sin[\pi(fT-k)/N]} \quad (6)$$

其谱线的幅值为

$$A_{1k} = \frac{A}{2} \frac{\sin[\pi(fT-k)]}{\sin[\pi(fT-k)/N]} \quad (7)$$

全相位谱分析法幅度谱的包络为传统频域数字鉴相法的平方,因此其主谱线更加突出,旁瓣衰减更大.

主谱线的频谱保留准确的相位信息,通过谱分析反推信号光与参考光相位差值,计算此时的鉴相偏差为

$$d\varphi = \frac{\sin^2(\pi\delta/M)}{\sin^2[(2k_0 + \delta)\pi/M]} [\sin(2\varphi_1) - \sin(2\varphi_2)] \quad (8)$$

式中 $M = (N+1)/2$, k_0 为主谱线,归一化频率偏移量 $\delta = fT - k_0$, φ_1 、 φ_2 分别为信号光与参考光相位值.

对信号频率为20.1 MHz信号进行全相位谱分析鉴相偏差,其计算参数如表1.

表1 仿真参数

Table 1 The simulation parameters

Parameters	Value
Center frequency/MHz	20
Sampling frequency/MHz	100
Data length	100
Main spectrum	20
Frequency displacement	0.05

全相位谱分析鉴相偏差仿真结果如图5.

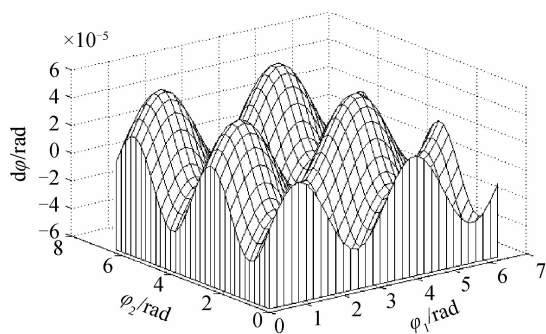


图5 全相位谱分析鉴相偏差

Fig. 5 Phase discrimination offset of APFFT

在无噪声影响的测量环境中,采用全相位谱分析获取做相位差优于0.06 mrad,测距准确度达 μm 以下,在实际应用中可以忽略对测量结果的影响.

相位式激光测距的噪声包括背景噪声、热噪声和散弹噪声等,文献[7]指出,在相位式激光测距系统中,主要噪声符合高斯白噪声的特性,而高斯白噪声并不改变全相位分析的测相均值,但因其测相的不确定性.

对于长度为 $N=2M-1$ 的噪声信号,采用无窗全相位谱分析时鉴相方差近似为^[7]

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2 \approx \frac{4}{3N(\sin(\pi\delta)/\pi\delta)^4} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (9)$$

式中 R_1 为测量信号信噪比, R_2 基准信号信噪比. 当接收端输出测量信号信噪比在 10 dB 到 40 dB 之间,参考信号信噪比 50 dB 时,按照表 1 仿真参数噪声对测量结果带来的误差如图 6.

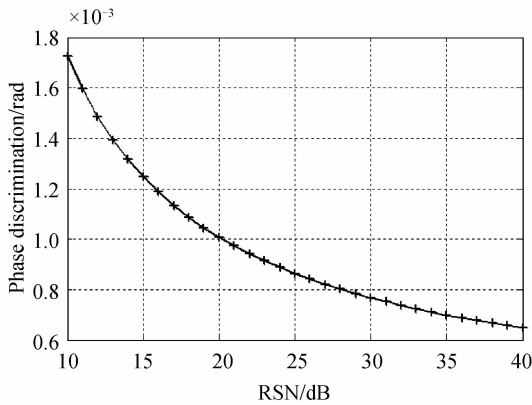


图 6 全相位谱分析鉴相标准差

Fig. 6 Standard deviation of apFFT phase discrimination

当接收信号信噪比高于 10 dB 时,测相准确度优于 1.8 mrad,当调制信号在百兆赫兹以上时,测距准确度在微米量级.

4 实验结果分析

根据图 1 所示结构搭建测量系统,激光光源选择 1 550 nm 波段线偏振窄线宽激光光源,线宽优于 100 kHz. 为了获亚毫米准确度的测量结果,调整 RF 控制信号 100 MHz,采样频率 500 MHz,输出信号信噪比优于 50 dB,探测信号经测量目标反射后,接收信号信噪比约 30 dB.

测量过程中,信号在传输电路上的细微差别会造成固定的相位误差,可以通过多次测量校正来消除,对测量误差的分析主要考虑测量结果不确定度的影响. 计算公式为

$$\sigma = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \varphi_{ave})^2}{n}} \quad (10)$$

式中: φ_i 为每次测量相位差值, φ_{ave} 相位差测量结果的平均值. 对参考信号与测量进行进行鉴相分析,提取部分鉴相结果见表 2.

系统鉴相偏差优于 1.15 mrad,100 MHz 调制信号频率下测距准确度为 0.5 mm. 选择更高调制带宽光相位调制器可以有效提高测量信号调制频率,在 GHz 的调制频率下,本系统处理算法测距准确度可以达到 0.1 mm 内.

表 2 鉴相结果

Table 2 The result of phase discrimination

Analysis	Phase difference1/rad	Phase difference2/rad
1	0.828 3	1.733 2
2	0.827 2	1.732 7
3	0.828 4	1.733 7
4	0.828 9	1.733 3
5	0.828 4	1.732 2
Mean value	0.828 2	1.733 0
Measurement result uncertainty	0.001 2	0.001 0

5 结论

本文采用激光高速相位调制器实现对激光波相位调制,并通过光拍频获得高速稳定的调制信号. 通过该方法,可以比较容易实现对激光信号百兆赫兹甚至 G 赫兹的信号调制,在激光相位式测距系统中可以给系统提供一个高效稳定的探测光源. 在探测信号的相位计算处理中,采用全相位谱分析法实现了对测量信号的高准确度测量,在 10 dB 以上信噪比的测量信号鉴相准确度高于 1.8 mrad,满足测距系统的要求.

参考文献

- [1] CHENG Yi-tao, YANG Jin-hua. Study on emission system of phase-laser range finder[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **33**(1): 29-31.
程义涛,杨进华. 相位激光测距发射系统实验研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, **33**(1): 29-31.
- [2] WANG Xuan-gang, GOU Ning-yi, ZHANG Ke-shu. Unbiased improvement of spectrum analysis phase discrimination for phase-shift laser range finder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(4): 883-895.
王选钢, 郭宁祎, 张珂殊. 相位式激光测距谱分析鉴相的无偏改进[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(4): 883-895.
- [3] FAN Zhi-jun, SUO Rui, LI Yan, et al. Study on some key problems in high speed dual frequency laser interferometer[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(12): 1419-1421.
范志军, 所睿, 李岩, 等. 高测速双频激光干涉仪的若干关键问题研究[J]. 光电子激光, 2004, **15**(12): 1419-1421.
- [4] ZHANG Qin, ZHANG Jian-yong, ZENG Hua-lin, et al. Acoustic signal detection system using PGC demodulation algorithm and laser Doppler effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(6): 1115-1118.
张勤, 张建勇, 曾华林, 等. 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.
- [5] YAO Jin-bin, WANG Ming-jun, et al. Design principle of laser range Doppler imaging radar system based on detecting space target[J]. *Infrared and laser engineering*, 2006, **35**(4): 445-448.
姚进斌, 王明军. 空间探测激光距离多普勒雷达系统原理设计[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(4): 445-448.
- [6] YANG Chun-sheng, ZHANG Tao, CHENG Jun-kang, et al. Influence of nonlinearity on measuring precision of dual frequency laser interferometer with two longitudinal modes [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and*

- Technology Edition*), 2008, **38**(3):561-564.
- 杨春生,张涛,成俊康,等. 双纵模双频激光干涉仪的非线性对测量精度的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, **38**(3):561-564.
- [7] WANG Wei, LI Dong-ming, GE Hui-liang, *et al.* Linewidth measurement of narrow linewidth laser based on the delayed self-homodyne technique using michelson interferometer[DB/OL]. *Acta Photonica Sinica*, (2013-11-13) [2014-05-01]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1235.04.20131113.1600.001.html>.
- 王巍,李东明,葛辉良,等. 基于MI自零差法的窄线宽激光器线宽测量[DB/OL]. 光子学报, (2013-11-13) [2014-05-01]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1235.04.20131113.1600.001.html>.
- [8] SHANG Jian-hua, REN Li-hong, XU Hai-qin, *et al.* Heterodyne laser doppler vibrometer based on double acousto-optic frequency shifters[J]. *Acta Photonica Sinica*, (2012-07-13) [2014-05-01]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1235.04.20120713.1552.002.html>.
- 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, (2012-07-13) [2014-05-01]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1235.04.20120713.1552.002.html>.
- [9] GAO Sai, YIN Chn-yong. High measurement speed dual frequency laser interferometer[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(3):238-240.
- 高赛,殷纯永. 高测速双频激光干涉仪[J]. 光学技术, 2001, **27**(3):238-240.
- [10] LI Lei, ZHAO Chang-ming, GAO lan, *et al.* Laser detection by electronic instead of optical using two-frequency lase[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **27**(2):249-252.
- 李磊,赵长明,高岚,等. 变光外差为电外差的双频激光探测[J]. 光学学报, 2007, **27**(2):249-252.
- [11] LI Wei-wen, LIU Yong, LIN Wei-peng, *et al.* Optical frequency multiplication of phase modulator and birefringent fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1):45-49.
- 李伟文,刘勇,林伟鹏,等. 基于相位调制和光纤双折射光学倍频法[J]. 光子学报, 2011, **40**(1):45-49.
- [12] CHEN Dong, ZHANG Bo-kun, HU Xie, *et al.* Research on the high resolution trace gas detection based on the difference-frequency mid-infrared spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6):678-683.
- 陈东,张伯昆,胡燮,等. 基于差频中红外激光的痕量气体高分辨光谱检测研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(6):678-683.
- [13] WANG Zhao-hua, HUANG Xiang-dong, YANG Wei. The measuring phase method of all-Phase FFT[J]. *World SCI-Tech R&D*, 2007, **29**(4):28-32.
- 王兆华,黄翔东,杨慰. 全相位FFT相位测量法[J]. 世界科技研究与发展, 2007, **29**(4):45-49.
- [14] WANG Zhao-hua, HUANG Xiang-dong. Principle of phase measurement and its application based on all-phase spectral analysis[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, **24**(6):777-782.
- 王兆华,黄翔东,杨慰. 全相位FFT相位测量法[J]. 世界科技研究与发展, 2007, **29**(4):777-782.
- [15] WANG Xuan-gang, GOU Ning-yi, ZHANG Ke-shu. ApFFT phase discrimination in phase-shift laser range finder[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2012, **10**(6):725-729.
- 王选钢,缙宁祎,张珂殊. 相位式激光测距全相位谱分析鉴相算法[J]. 信息与电子工程, 2012, **10**(6):725-729.