

基于双频测尺的大尺寸空间激光测距方法研究

张云雷^{1,2}, 张珂殊¹, 邵永社¹, 李孟麟¹

(1. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094;

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:相位式激光测距采用连续波测相,为实现高精度鉴相,单频测尺的调制频率相应地提高,导致测距系统的空间尺度变小。为实现大尺寸空间的激光测距,文中在FPGA上设计实现双频测尺的鉴相系统,两测尺均采用全相位频域数字鉴相法。鉴相系统在不同信噪比的信号下的实验表明,通过控制两测尺之间的频差,有效降低了测尺间干扰;低频测尺测距范围75 m,高频测尺测距精度可达0.4 mm,系统整体鉴相精度0.08°,测量速度每秒50万次,满足了大尺度空间中相位式激光测距的应用需求。

关键词:激光测距;相位差;全相位FFT;可编程逻辑器件

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)03-0045-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.03.011

Research on Phase-difference Measuring Methods in Laser Range Based on Two Measurement Rulers at Large Scale Space

ZHANG Yun-lei^{1,2}, ZHANG Ke-shu¹, SHAO Yong-she¹, LI Meng-lin¹

(1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Continuous wave phase measurement was applied in phase difference laser range finder. In order to achieve high accuracy, the relevant modulation frequency is high, so that this single measurement ruler had a small measuring range. In order to implement laser range finder at the large scale space measurement, the FPGA implementation scheme of two measurement rulers was designed to determine the phase-difference based on all-phase spectrum analysis. Experiments on phase system under signal with different signal-to-noise ratio show that the interference between two measurement rulers was negligible when the difference of the two frequencies was suitable. The measurement range of 75 meters was achieved by the low frequency ruler, the accuracy of all-phase Fast Fourier Transform (FFT) can reach 0.08° (i.e., 0.4 mm at a modulation frequency of 80 MHz) by the high frequency ruler. The measurement frequency of the system was 500 kHz. The performance of the system meets the requirements of new applications in the phase difference laser range finder.

Key words: laser range finder; phase difference; all-phase FFT; FPGA

0 引言

相位式激光测距系统是通过测量连续波幅度调制后的发射信号初相位与接收信号(回波信号)初相位之间的相位差实现测距^[1]。相位式激光测距技术相对于脉冲式激光测距技术,具有测量频率高、精度高的特点,成为工业生产的更大需求。但是为了保证相位式鉴相方案的精度,激光器调制信号的频率在百兆赫兹左右^[2-9],导致单一测尺条件下相位式测距系统的测量范围小于2 m,不能满足更大空间尺度下的测量要

求。因此,针对多个频率测尺同时测量的相位式测距方案的研究十分具有现实意义。

该实验室长期致力于激光测量技术的研究,在激光雷达设备研制中积累了一定的技术经验。前期研制的相位式原理样机^[10],测距精度可达0.4 mm,测距范围1.875 m,每秒百万次测量,前期的工作基础明确了关键技术路线。为开展大尺度空间中的激光测距系统,文中在实验室原有基础上进一步研制,设计实现了低频测尺作为粗测尺实现大测量范围,高频测尺作为

收稿日期:2014-04-04

修回日期:2014-07-10

网络出版时间:2015-01-20

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAH34B01);国家自然科学基金资助项目(61205161)

作者简介:张云雷(1988-),男,硕士生,研究方向为激光雷达数字信号处理;张珂殊,研究员,研究方向为激光遥感探测、嵌入式计算机技术、计算机综合信息处理技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150120.2159.013.html>

精测尺实现高精度,双频测尺集成的数字鉴相方法。通过系统测试表明,双频测尺的方案使系统的测距范围扩展至 75 m,同时保持了亚毫米的精度。

1 技术设计概述

双频测尺方案相位式激光测距系统原理如图 1 所示。首先将粗测信号和精测信号共同调制到一起,作为频率源控制激光器的发射信号。发射光信号经过待测物表面反射形成反射信号,由光电转换系统接收形成电信号。鉴相系统使用 ADC 来提取发射信号和接收信号,通过鉴相单元测量信号初相位,最后上传至上位机形成位置信息。

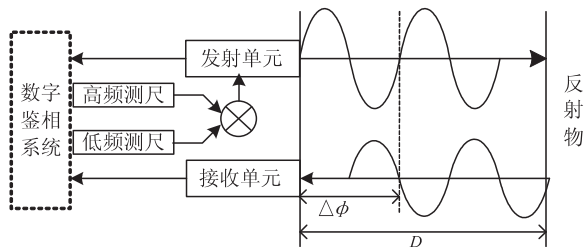


图 1 双频测尺鉴相系统方案

1.1 双频测尺鉴相原理

为保证系统在噪声、频率偏移、谐波和杂散频率等因素影响下仍能保持良好的鉴相性能,文中的测尺均采用 FFT 算法实现离散傅里叶变换的全相位谱分析^[11-12]。

全相位谱分析法是将长度为 $2N-1$ 的输入信号序列经全相位数据预处理后变换成长度为 N 的序列,再进行离散傅里叶变换,求出发射信号和接收信号的相位值。假设发射信号为 $S_1(t) = A\cos(2\pi ft + \varphi_1)$,接收信号与发射信号频率相同,为 $S_2(t) = B\cos(2\pi ft + \varphi_2)$ 。其中, A 、 B 为信号幅值, f 为信号频率, φ_1 、 φ_2 为信号相位。数字鉴相方法处理的是连续信号采样后的离散序列,即

$$S_1(n) = A\cos(2\pi \frac{f}{f_s} \cdot n + \varphi_1)$$

$$S_2(n) = B\cos(2\pi \frac{f}{f_s} \cdot n + \varphi_2)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N$, $f_s = 1/T$ 为采样频率, N 为采样点数。

全相位数据预处理对离散序列中的 i 个点加两次矩形窗,等效于将每个向量的中心点循环移位到首位,然后再做加法,得到全相位数据向量。对于截取的每段数据 $s_i(n)$, $i=0, 1, \dots, N-1$, 设其傅里叶变换为 $S_i(k)$, 则相应的循环移位后的数据段 $s'_i(n)$ 的傅里叶变换为 $S'_i(k) = S_i(k)e^{j\frac{2\pi ki}{N}}$, 根据傅里叶变换的线性性质,可知全相位数据的傅里叶变换为

$$S_{ap}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} S_i(k) e^{j\frac{2\pi ki}{N}} = \sum_{i=0}^{N-1} [\sum_{n=0}^{N-1} s(n-i) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}] e^{j\frac{2\pi ki}{N}} \quad (1)$$

以采样后的发射信号实数序列为例:

$$s(n-i) = A\cos(2\pi(n-i)fT/N + \varphi_1) = \frac{A}{2} [e^{j(2\pi(n-i)fT/N + \varphi_1)} + e^{-j(2\pi(n-i)fT/N + \varphi_1)}] \quad (2)$$

代入式(1)可得

$$\begin{aligned} S_{ap}(k) &= \frac{A}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} [e^{j(2\pi f(n-i)T/N + \varphi_1)} + e^{-j(2\pi f(n-i)T/N + \varphi_1)}] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} e^{j\frac{2\pi ki}{N}} = \\ &= \frac{A}{2} e^{j\varphi_1} \sum_{i=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}(k-fT)i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi}{N}(k-fT)n} + \\ &= \frac{A}{2} e^{-j\varphi_1} \sum_{i=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}(k+fT)i} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi}{N}(k+fT)n} = \\ &= \frac{A}{2} e^{j\varphi_1} \frac{\sin^2[\frac{\pi}{N}(k-fT)]}{\sin^2[\frac{\pi}{N}(k-fT)/N]} + \\ &= \frac{A}{2} e^{-j\varphi_1} \frac{\sin^2[\frac{\pi}{N}(k+fT)]}{\sin^2[\frac{\pi}{N}(k+fT)/N]} \end{aligned} \quad (3)$$

可见,实数序列的全相位频谱也呈对称分布,对于 $k < N/2$ 部分,各谱线的幅度和相位分别为:

$$A_{1k_ap} = \frac{A}{2} \frac{\sin^2[\frac{\pi}{N}(k-fT)]}{\sin^2[\frac{\pi}{N}(k-fT)/N]}, \varphi_{1k_ap} = \varphi_1 \quad (4)$$

同理,接收信号谱线的幅度和相位分别为

$$A_{2k_ap} = \frac{B}{2} \frac{\sin^2[\frac{\pi}{N}(k-fT)]}{\sin^2[\frac{\pi}{N}(k-fT)/N]}, \varphi_{2k_ap} = \varphi_2 \quad (5)$$

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,因此全相位谱分析法的主谱线值更加突出,旁瓣衰减更大。同时,传统频域数字鉴相法各谱线的相位值与谱线位置相关(含有 $fT-k$ 分量),只有峰值谱线的相位值为所求信号的初相位,而全相位谱分析法求得的各根谱线的相位值都是所求信号的初相位。上文的原理推导未考虑频率偏移的影响,在全相位谱分析法测相过程中,仍选用峰值谱线,根据式(6)即可算出发射信号序列与接收信号序列的相位差。

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(S_2(k_0))}{\text{Re}(S_2(k_0))}\right) - \arctan\left(\frac{\text{Im}(S_1(k_0))}{\text{Re}(S_1(k_0))}\right) \quad (6)$$

1.2 双频测尺融合算法实现

相位式测距的鉴相原理较为成熟,而多测尺测相的相关文献较少。调研发现,多测尺的选择方式包括集中的间接测尺频率和分散的直接测尺频率^[13],其中前者的调制频率非常接近,适用于远距离测量;后者的调制频率间距较大,适用于中近距离高速、高精度测量。

文中采用分散的直接测尺频率。选择调制频率

时,必须保证各个测尺测得的距离能相互衔接。假设调制频率由高到低分别为 $f_{e1}, f_{e2}, \dots, f_{eq}, f_{ei}$ 的测尺长度和相位差为 $L_i, \Delta\varphi_i$, 通过 f_{ei} 测得距离为 $d_i = L_i \times \Delta\varphi_i / 2\pi$, 测量精度为 $d_{ei}, i=1, 2, \dots, q$ 。 f_{ei} 和 f_{ei+1} 衔接过程如图2所示,其中阴影表示测量的误差范围,低频测尺的误差范围较大。

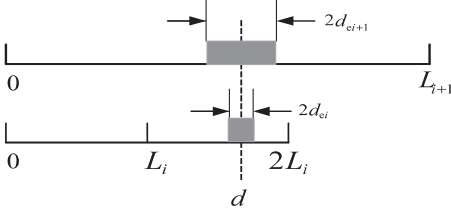


图2 测尺衔接示意图

由于通过低频测尺的距离解算高频测尺的整周期数,所以图2中的 d_{ei+1} 必须足够小(或者 L_i 必须足够大),以保证 $[d_{ei+1}/L_i] = [d/L_i]$ 。令 $R_i = [d/L_i]$, 低频测尺的精度与高频测尺需满足:

$$\begin{cases} d + d_{ei+1} < (R_i + 1)L_i \\ d - d_{ei+1} > R_i L_i \end{cases} \quad (7)$$

设 $d = (R_i + x)L_i$, 其中 $x \in [0, 1]$, 通过不等式解得 $L_i > \max[d_{ei+1}/(1-x), d_{ei+1}/x]$ 。当鉴相精度一定时, d_{ei+1} 保持不变,所以高频测尺的频率不能过高,否则解算 R_i 可能出现错误,导致测量误差接近 L_i 。不等式与真实距离相关,当 x 等于 0.5 时, L_i 大于 $2d_{ei+1}$ 即可;当 x 为其他值时,要求高频测尺的测尺长度更大,所以相邻测尺需满足 $L_i \gg d_{ei+1}$ 。设接收机对 f_{ei+1} 的鉴相精度为 $\sigma_{\Delta\varphi_{i+1}}$, 根据前式,相邻测尺的频率关系为:

$$\frac{f_{ei}}{f_{ei+1}} \ll \frac{2\pi}{\sigma_{\Delta\varphi_{i+1}}} \quad (8)$$

选择测尺的频率时必须考虑系统所能达到的鉴相精度,低频测尺的鉴相精度越好,越有利于扩大调制频率的间距。当相邻测尺相互满足上式时,可由低频到高频逐渐递推计算实际距离。首先通过两个最低频率的测尺计算距离:

$$d'_{q-1} = \left[\frac{d}{L_{q-1}} \right] \times L_{q-1} + d_{q-1} \quad (9)$$

当最高的调制频率为 f_{ei} 时,递推算得距离为:

$$d'_i = \left[\frac{d'_{i+1}}{L_i} \right] \times L_i + d_i \quad (10)$$

最终计算得到距离为:

$$d = d'_1 = \left[\frac{d'_2}{L_1} \right] \times L_1 + d_1 \quad (11)$$

从上式可知,测量精度取决于 d_1 的精度,即测量精度由最高调制频率决定。同时,只要测尺满足式(8)并且测量距离小于最大测尺长度 L_q , 可准确计算得 $[d'_2/L_1] = R_1$, 所以测量范围由最低调制频率决定。

在系统中,假设低频测尺测得的时间差为 t_2 , 则由

低频测尺测得的距离为 $d_2 = ct_2/2$ 。对高频测尺的鉴相结果为 $\Delta\varphi = \theta_2 - \theta_1$, 该测尺所测得的距离为 $d_1 = c \Delta\varphi / 4\pi f$ 。该系统只采用了两个测尺,所以距离对于高频测尺的整倍数为 $R = [d_2/L]$, 通过 d_1, d_2 融合后的实际距离为:

$$d = \frac{c[ft_2]}{2f} + \frac{c\Delta\varphi}{4\pi f} \quad (12)$$

通过低频测尺正确解算 R 后,低频测尺并不引起测量误差。由以上推导可以看出低频测尺的动态范围决定系统的测距范围;低频测尺的精度越高,周期模糊误差越小。

实际应用中要求低频测尺与高频测尺的融合,低频测尺精度尽量高,来减小周期模糊误差。系统中,高频测尺动态范围为 1.875 m, 所以要求低频测尺的精度最差为 0.2 m, 即低频鉴相精度应在 1° 以内。

2 双频测尺鉴相方案的实现

为实现高速测量、高精度鉴相、快速数据传输和高效率的总线通信,数字鉴相系统主要功能模块划分为时钟管理、PLL 配置、ADC 采样、数据传输与总线通信,以及相位差测量。基于 FPGA 的全相位数字鉴相系统实现方案如图3所示。

FPGA 采用 Xilinx Virtex4 系列芯片,其工作时钟 FPGA_CLK 为 100 MHz, 内部时钟用 DCM 资源进行管理,通过最小化时钟抖动、歪斜与占空比失真,构建高性能时钟网络^[14]。时钟的应用主要分为三个部分:整形后的 100 MHz 系统时钟、ADC 采样时钟和用于数据传输和接口通信的时钟, Rcv_Com 是一块通信电路板,主要完成上位机数据采集控制与传输。

系统精测信号采用 80 MHz 调制,接收信号与 79 MHz 混频后提取 1 MHz 信号作为待测信号。粗测信号采用 2 MHz 调制,接收信号通过低通滤波器提取 2 MHz 信号作为待测信号。待测信号通过 32 MHz 采样转换为数字信号,然后进行鉴相。这种设计有效地降低了信号间的串扰。

FPGA 内部鉴相单位主要包括数据预处理模块(Data_pre_processing)和 FFT-IP 核。数据预处理模块将同时处理发射信号离散序列(A路)和接收信号离散序列(B路),两路的处理结构相同,由一个定点乘法器、一个深度为 31 的先进先出 FIFO 组成,同时两路共用一个存储深度为 64、存放卷积窗系数的只读存储器 ROM。对采样数据的加窗处理由乘法器完成,乘法器输出的前 31 个数据由 FIFO 缓存。乘法器输出的第 32 个数不再存入 FIFO, 而是作为傅里叶变换的第一个点;乘法器运算到第 33 个数时, FIFO 中的数据开始逐一吐出,分别与乘法器计算的新值对应相加,即实现两

两间隔为 N 的加窗后数据相加,作为傅里叶变换的第 2 ~ 32 点;乘法器输出的第 64 个数抛弃;如此便形成了一帧数据,可进行 32 点傅里叶变换。具体实现如图 4 所示。

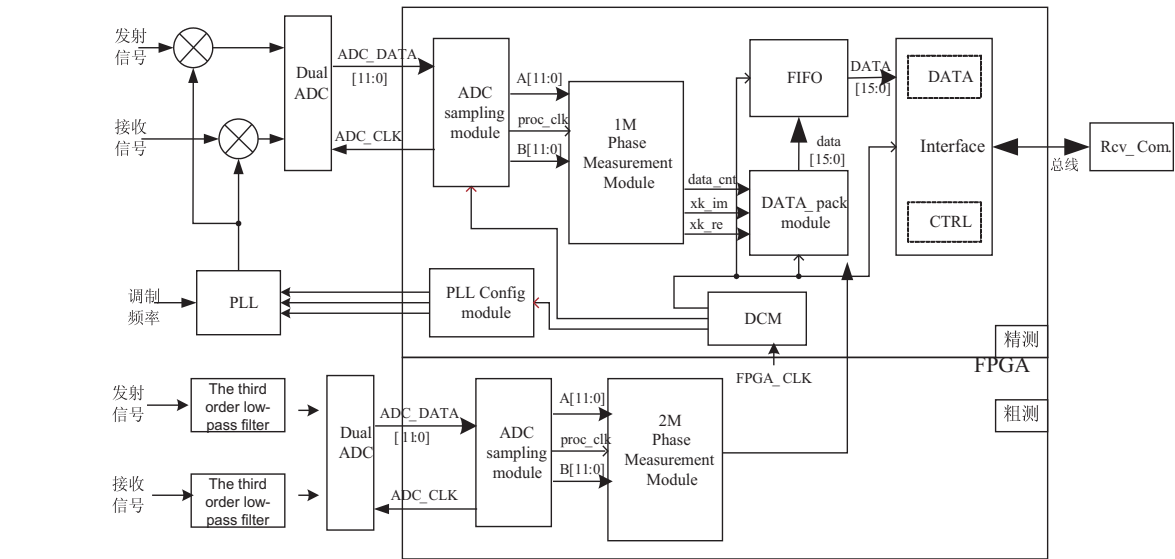


图 3 全相位谱分析法实现方案

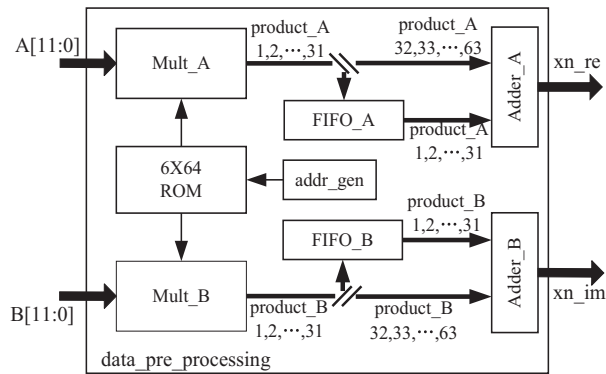


图 4 全相位数据预处理实现方案

FFT IP 核选用流水线 Streaming I/O 结构,采用一级流水线操作,输入加载和输出加载同时完成,保证了良好的时序性。根据离散傅里叶变换的圆周共轭对称性,一次傅里叶变换就可以完成发射信号和接收信号相位信息的计算,实现了快速、精简的傅里叶变换结构。

3 实验数据分析

系统最终测试采用原理如图 5 所示的测距系统,粗测尺采用 2 MHz,测尺长度 75 m。实际测量中,激光器发射信号由内光路返回,信号质量 50 dB 左右;接收光信号质量 40 dB 左右。采用信号发生器模拟相应信号,采集测试数据,统计分析在不同信噪比下 30 000 次鉴相结果的标准差和鉴相误差。可设置粗测信号和精测信号的幅值分别为 1.2 Vpp 和 1.6 Vpp,结果如表 1 所示。

从表 1 中数据可以看出,信噪比越高,鉴相精度越好,信噪比高于 40.67 dB 时,精测尺鉴相标准差优于

0.08°,测距精度为 0.4 mm;粗测尺鉴相精度好于 1°,满足双频测尺数据解算时的解模糊精度要求,测距范围可达 75 m。同时,由于双频测尺采用全相位数字鉴相法,每次测量调用很少的测量数据点即可实现较高精度的鉴相,因此鉴相速度很快,达每秒 50 万次。

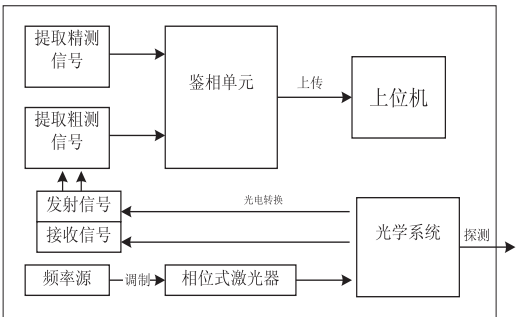


图 5 系统测试原理图

表 1 双测尺信噪比实验数据表

信噪比/dB	高频测尺		低频测尺	
	标准差/°	测距精度/mm	标准差/°	测距精度/mm
50.000	0.031	0.16	0.016	3.2
44.781	0.040	0.21	0.065	13
44.033	0.060	0.31	0.128	26
43.041	0.062	0.32	0.204	40
41.864	0.069	0.36	0.287	57
40.671	0.077	0.40	0.388	77
39.610	0.087	0.45	0.450	90

4 结束语

文中根据对双频测尺融合算法的分析,提出双频

测尺鉴相方案,同时基于 FPGA 设计了一款应用于激光测距系统的高精度中等测距范围的鉴相电路。通过实际测试,准确地检验了鉴相电路的性能。

实验数据表明,双频测尺均采用全相位数字鉴相法,测量精度可达 0.4 mm,测距范围 75 m,测量速度每秒 50 万次,满足了相位式激光雷达对动态范围和测量精度的应用需求。

参考文献:

[1] 张 婷,张珂殊. 基于 Matlab 的相位式激光测距研究[J]. 激光与红外,2010,40(1):22-27.

[2] Amann M C,Bosch T,Lescure M,et al. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement[J]. Optical Engineering,2001,40(1):10-19.

[3] 高林奎,宋 玮. 激光测距[M]. 北京:人民铁道出版社,1977.

[4] Williams J G. Highway profile measuring system; American, 5510889[P]. 1996-04-23.

[5] Poujouly S,Journet B,Miller D. Laser range finder based on fully digital phase-shift measurement[C]//Proceedings of the 16th IEEE instrumentation and measurement technology conference. Venice:IEEE,1999:1773-1776.

[6] Poujouly S,Journet B. A twofold modulation frequency laser

using efficiently pruned exhaustive search[C]//Proc of international conference on document analysis and recognition. Beijing:IEEE,2011:687-691.

[21] Zhang Hongwei, Liu Changsong, Yang Cheng, et al. An improved scene text extraction method using conditional random field and optical character recognition[C]//Proc of international conference on document analysis and recognition. Beijing:[s. n.],2011.

[22] Yan Jianqiang, Li Jie, Gao Xinbo. Chinese text location under complex background using Gabor filter and SVM[J]. Neurocomputing,2011,74(11):2998-3008.

[23] Lucas S M, Panaretos A, Sosa L, et al. ICDAR 2003 robust reading competitions[C]//Proceedings of international conference on document analysis and recognition. [s. l.]:[s. n.], 2003:682-687.

[24] Chen Datong, Odobez J M, Thiran J P. A localization/verification scheme for finding text in images and video frames based on contrast independent features and machine learning[J]. Signal Processing:Image Communication,2004,19(3):205-217.

[25] Kim J, Park S, Kim S. Text locating from natural scene images using image intensities[C]//Proceedings of eighth interna-

range finder[J]. Journal of Optics A:Pure and Applied Optics,2002,4(6):356-363.

[7] Chen Xinwei, Jin Shengcai, Qi Shishan, et al. An improved correlation method of phase difference detection between two signals in polarimetric radar signal processing system[C]//Proc of microwave conference. [s. l.]:[s. n.],2009:469-472.

[8] John M P, David H P, Richard F B. Optical electronic distance measuring apparatus with movable mirror; American, 5455670[P]. 1995-10-03.

[9] Nejad S M, Fasihi K, Olyae S. Modified phase-shift measurement technique to improve laser-range finder performance[J]. Journal of Applied Physics,2008,8(2):316-321.

[10] 王选钢, 侯宁祎, 张珂殊. 相位式激光测距谱分析鉴相无偏改进[J]. 光学精密工程,2012,20(4):888-895.

[11] 王兆华, 黄翔东, 杨 尉. 全相位 FFT 相位测量法[J]. 世界科技研究与发展,2007,29(4):28-32.

[12] 王兆华, 侯正信, 苏 飞. 全相位 FFT 频谱分析[J]. 通信学报,2003,24(11A):16-19.

[13] 胥俊丞. 新型相位激光测距仪的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2008.

[14] 田 耕, 徐文波, 胡 彬, 等. Xilinx ISE Design Suite 10. x FPGA 开发指南—逻辑设计篇[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.

tional conference on document analysis and recognition. [s. l.]:IEEE,2005:655-659.

[26] Kim K C, Byun H R, Song Y J, et al. Scene text extraction in natural images using hierarchical feature combining and verification[C]//Proc of the 17th international conference on pattern recognition. [s. l.]:IEEE,2004:679-682.

[27] Pan Wumo, Bui T D, Suen C Y. Text detection from scene images using sparse representation[C]//Proc of 19th international conference on pattern recognition. Tampa:IEEE,2008.

[28] Liu Chunmei, Wang Chunheng, Dai Ruwei. Text detection in images based on unsupervised classification of edge-based features [C]//Proc of eighth international conference on document analysis and recognition. [s. l.]:IEEE,2005:610-614.

[29] Cai Min, Song Jiqiang, Lyu M R. A new approach for video text detection[C]//Proc of 2002 international conference on image processing. [s. l.]:IEEE,2002:117-120.

[30] Mariano V Y, Kasturi R. Locating uniform-colored text in video frames[C]//Proc of 15th international conference on pattern recognition. Barcelona:IEEE,2000:539-542.

[31] Wong E K, Chen M. A new robust algorithm for video text extraction[J]. Pattern Recognition,2003,36(6):1397-1406.

基于双频测尺的大尺寸空间激光测距方法研究

作者:

[张云雷](#), [张珂殊](#), [邵永社](#), [李孟麟](#), [ZHANG Yun-lei](#), [ZHANG Ke-shu](#), [SHAO Yong-she](#), [LI Meng-lin](#)

作者单位:

[张云雷, ZHANG Yun-lei \(中国科学院 光电研究院, 北京 100094; 中国科学院大学, 北京 100049\)](#), [张珂殊, 邵永社, 李孟麟, ZHANG Ke-shu, SHAO Yong-she, LI Meng-lin \(中国科学院 光电研究院, 北京, 100094\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

[2015\(3\)](#)

引用本文格式: [张云雷](#). [张珂殊](#). [邵永社](#). [李孟麟](#). [ZHANG Yun-lei](#). [ZHANG Ke-shu](#). [SHAO Yong-she](#). [LI Meng-lin](#) [基于双频测尺的大尺寸空间激光测距方法研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(3)