

# 基于二次偏振调制的变频测距方法与系统实现\*

黑克非 于晋龙 王菊† 王文睿 贾石 吴穹 薛纪强

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

(2014年1月1日收到; 2014年3月11日收到修改稿)

由于鉴相精度限制、电路等引入的附加相移干扰等因素, 传统相位测距技术精度的提高受到了限制. 采用二次偏振调制技术对相位测距技术进行了改进. 利用二次偏振调制方法能够直接在相位调制器上对两次调制信号的相位差进行解调, 大幅度简化了系统的复杂程度. 采用变频方法替代传统的鉴相方法, 从而系统的测量精度不再受鉴相问题的困扰. 从理论上得到系统输出光强与调制频率成正余弦关系, 并进行了实验验证. 基于变频测距的实验中, 系统频率的稳定度优于  $10^{-6}$ , 测量精度可以达到  $\pm 10.6 \mu\text{m}$  (被测距离为 4.5 m). 并对一段长 200 m 的光纤进行了实际测量, 得到了清晰的调制频率与系统输出光强的曲线.

**关键词:** 激光测距, 变频测距, 二次偏振调制

**PACS:** 06.30.Bp, 07.60.-j, 42.25.Ja

**DOI:** 10.7498/aps.63.100602

## 1 引言

测量技术的发展在某种程度上决定了人类认识世界、改造世界的水平. 高精度的绝对距离测量技术可以提高大型设备、科学仪器的制造和装配水平, 对于促进技术进步、提高科学研究的水平有重要的意义<sup>[1-3]</sup>. 现在激光测距技术在测量中已经得到了广泛的应用. 其主要分为脉冲激光测距技术、电相位测距技术及干涉法测距技术<sup>[4-6]</sup>. 电相位法是使用周期信号对激光光强或者相位进行调制, 通过测量周期信号往返被测距离后的相移来间接推算距离, 其测量精度为毫米量级<sup>[7,8]</sup>. 但是传统的电相位方法由于电路相位附加相移扰动, 鉴相精度不高以及系统噪声的影响, 限制了其测距精度的提高<sup>[9]</sup>.

为了减少系统中的各器件对测量结果的影响, 本文采用二次偏振调制方法对第二次调制信号与第一次调制信号之间的相位延迟信息进行解调. 从理论上证明了解调后的输出光强与两次调制信号间的相位差成余弦关系, 并进行了实验验证. 同时,

通过改变调制频率的方法, 测量得到两个相邻的解调后强度最小值对应的频率值, 进而可以得到被测距离. 实验中对变频激光相位测距系统的稳定性进行了分析. 在被测距离为 4.5 m 的测试条件下该测距系统的测量精度为  $\pm 10.6 \mu\text{m}$ . 对一段 200 m 光纤进行了测量, 得到了调制频率与系统输出光强的曲线.

## 2 系统分析

一束光被同一频率的正弦信号两次调制之后, 会产生调制信号的倍频分量和直流分量. 直流分量的光强与两次调制信号之间的相位差的余弦值成正比. 经过第一次调制的光束经过一段距离之后返回调制器, 通过探测输出光的光强能够得出两次调制信号之间的相位差, 进而算出待测距离. 但是这种方法不能消除模糊距离. 因此我们采用了变频测距方法, 通过改变调制信号的频率, 测量得到两个相邻的光强输出最低点对应的频率值, 进而能够估算出待测距离与调制波波长的倍数关系, 从而得到

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB315704)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120032120029, 20120032130010)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangju@tju.edu.cn

准确的距离值. 具体讲, 此测试方案包括了二次调制和变频测距两个部分.

### 2.1 二次偏振调制方法的调制解调原理

在本测试方案中, 我们采用了二次偏振调制方案. 偏振调制过程基于电光相位调制器, 其是把一

个调制信号的幅度变化转为入射偏振光的相位变化<sup>[10]</sup>. 入射的偏振光如果是线偏振光, 且偏振方向和施加调制电压的方向成 $45^\circ$ , 出射光的偏振态会随着调制信号幅度的变化而变化<sup>[11]</sup>, 如图1所示, 其中 $V$ 为调制正弦波的最大调制电压,  $T$ 为正弦波的周期.

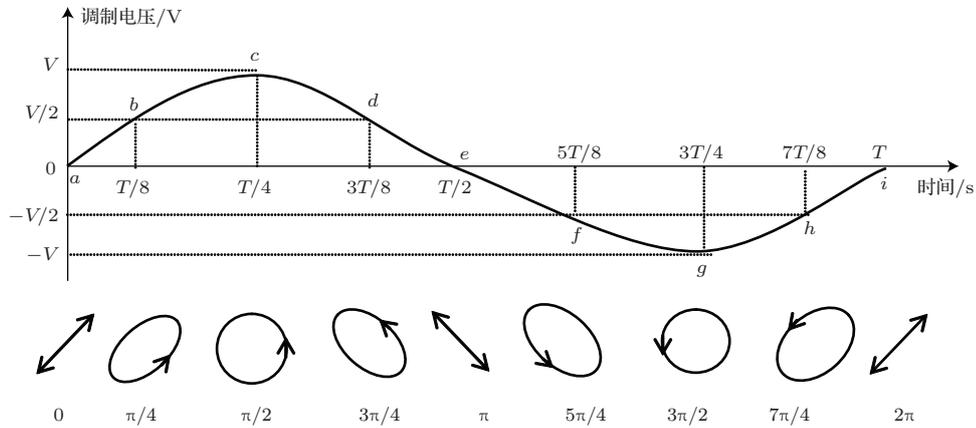


图1 输出光的偏振态与调制信号电压值的关系

调制后的光波经过被测物体反射后返回, 其调制信号的相位信息会随距离的变化而发生改变<sup>[12]</sup>. 反射回的信号会第二次进入相位调制器, 通过二次调制<sup>[13,14]</sup>可以解调出相位的变化, 进而得到距离的信息<sup>[15]</sup>.

图2给出了系统的基本光路: 一束线偏振光透过一个偏振分光棱镜(PBS), 调整后光束偏振方向与 $x$ 轴成 $45^\circ$ 角, 其偏振矩阵为 $\frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ , 其中 $E_0$

为入射偏振光在 $x$ 轴、 $y$ 轴方向上的电场强度. 然后该光束通过晶体电光调制器, 该调制器只将调制信号加载到 $y$ 轴上, 对 $x$ 轴方向的光不进行调制, 其偏振矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix}$ . 经过第一次调制后的光经过

$1/4$ 波片,  $1/4$ 波片的快轴与 $y$ 轴正方向夹角为 $45^\circ$ ,

其归一化偏振矩阵是 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$ . 然后这束光经过一段待测距离后被反射镜反射, 以波矢方向为 $z$ 轴建立右手系, 此时 $x$ 轴方向光的偏振态反转,  $y$ 轴方向光的偏振态保持不变, 其偏振矩阵是 $\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ . 在返回的路径上, 再经过 $1/4$ 波片, 由于坐标系的变

化,  $1/4$ 波片的快轴与 $x$ 轴正方向夹角为 $-45^\circ$ , 其

归一化偏振矩阵是 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$ . 返回的光信号再

次进入电光调制器进行第二次调制, 由于激光在测量过程中的飞行时间, 加在电光调制器晶体两端的电调制信号的相位变化 $\Delta\phi$ , 此时其偏振矩阵为

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i(\delta+\Delta\phi)} \end{bmatrix}$ . 最后, 经过二次调制的光在PBS处

进行偏振干涉, 此时光电探测器对准PBS的反射光束, 它的透射方向与 $x$ 轴正方向的夹角是 $45^\circ$ . 整个过程用琼斯矩阵描述为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i(\delta+\Delta\phi)} \end{bmatrix} \\ &\times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{E_0}{2\sqrt{2}} i \begin{bmatrix} -e^{i\delta} + e^{i(\delta+\Delta\phi)} \\ -e^{i\delta} + e^{i(\delta+\Delta\phi)} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

根据光强的计算公式得

$$I = \tilde{E}_x \cdot \tilde{E}_x^* + \tilde{E}_y \cdot \tilde{E}_y^*$$

$$= \frac{|E_0|^2}{2}(1 - \cos \Delta\phi). \quad (2)$$

可见此光强信号与相位差  $\Delta\phi$  成余弦关系. 简单讲可以通过检测光强信号得到相位差的信息. 但此方法如果直接用于测距, 会存在模糊距离的问题, 所以需要采用变频测距方法.

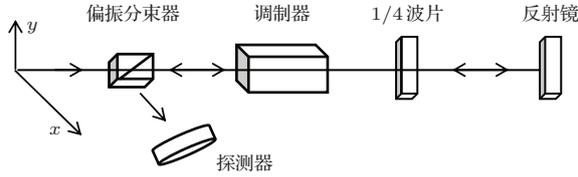


图2 二次偏振调制解调过程示意图

在(1)式中,  $\delta$  表示调制器的自然双折射<sup>[16]</sup>对两次调制的影响, 可以看出, 在  $x$  轴和  $y$  轴上都有一个  $\delta$  相位延迟. 因此在(2)式中计算系统输出光强时, 两个轴上相同的相位延迟  $\delta$  被消掉, 这样调制器自身的自然双折射就不会对最后测得的光强造成影响, 也不会对测量距离的结果产生影响.

### 2.2 变频测距的基本原理

由(2)式得到直流分量的光强与两次调制信号之间的相位差  $\Delta\phi$  的关系为

$$I \propto (1 - \cos(\Delta\phi)), \quad (3)$$

而  $\Delta\phi$  与调制频率  $f$  的关系为

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{2D}{\lambda} = \frac{4\pi f}{c} D, \quad (4)$$

其中,  $D$  为待测距离,  $c$  为光速. 将(4)式代入(3)式得

$$I \propto 1 - \cos\left(\frac{4\pi f}{c} D\right). \quad (5)$$

由(5)式可知, 通过连续地改变调制频率, 即扫频, 可得到光强  $I$  与调制频率  $f$  的关系曲线, 从理论上讲这条曲线应该是一条正余弦曲线<sup>[17]</sup>.

不同的调制频率  $f$  对应于不同的调制信号的波长  $\lambda$ . 当被测距离  $D$  为某一频率  $f$  对应的波长的整数倍时, 会得到光强的极小值. 所以当出现光强极小值时, 被测距离  $D$  与调制频率  $f$  的关系可以表示为

$$D = N\lambda/2 = N \frac{c}{2f}. \quad (6)$$

这里  $N$  表示正整数. 通过扫频可测得连续的两个光强极小值对应的频率  $f_1$  和  $f_2$ , 则

$$D = N\lambda_1/2 = N \frac{c}{2f_1}, \quad (7)$$

$$D = (N + 1)\lambda_2/2 = (N + 1) \frac{c}{2f_2}. \quad (8)$$

联立上面两个方程求得  $N$ , 进而可以得到距离

$$D = N \frac{c}{2f_1}, \quad (9)$$

从而就把距离的测量转化为测量两个光强最小值对应的频率值.

(9)式两端对频率  $f_1$  求导得

$$\Delta D = -N \frac{c}{2f_1^2} \Delta f_1, \quad (10)$$

再把(9)式代入(10)式, 求得

$$\frac{\Delta D}{D} = -\frac{\Delta f_1}{f_1}. \quad (11)$$

由(11)式可以看出, 系统的测量精度直接取决于调制频率的稳定度, 而在几十 GHz 的调制频率下, 当前微波源频率的稳定度可以小于 1 Hz, 这说明此测量方法理论上能达到非常高的测量精度.

在整个光路中, 经过 PBS 分束后, 除了透射出一束偏振光作为调制光, 还有一束反射光, 但是这束反射光的反射方向是在没有探测器的一侧, 并不会被探测器检测到. 在之后的光路中, 入射偏振光和反射光都是相向而行的(图2), 两束光不满足干涉条件<sup>[18]</sup>, 因此在理论分析中无需考虑干涉问题.

### 2.3 实验系统结构

在上述理论分析的基础上, 本文对基于二次偏振调制的高精度绝对测量技术进行了相应的实验研究. 实验装置示意图如图3所示. 实验中采用的光源是 780 nm 的红外光, 由于系统器件对激光器的线宽没有要求, 所以一般的半导体激光器即可满足要求. 因为需要远距离测量, 所以选取激光的输出功率为 10 dBm. 因为最后探测的是光强信号, 所以要求激光器的输出功率要稳定, 短期功率稳定度小于 0.01 dB. 采用的 PBS、1/4 波片和反射镜都是与光源相匹配的器件, PBS 的消光比大于 500 : 1, 高消光比对精度的提高有很大的帮助. PBS 解调出的信号含两个方向的偏振光, 其中一个方向上的偏振光不包含两次调制的相位差信息, 所以这部分偏振光的光强在测量结果中表现为系统噪声. PBS 的消光比越低, 这部分光越强, 从而对结果影响越大, 会使得最后测量的频率值不稳定. 本文采用 Newport 公司生产的 4431 型相位调制器.

光源出射的光经过 PBS 之后成为线偏振光, 线偏振光的偏振方向与调制器的  $y$  轴成  $45^\circ$ , 经过相位调制器调制之后光束转变为椭圆偏振光, 调制

频率为3 GHz, 调制信号的频率源为Agilent公司生产的83640B型信号发生器. 出射光束经过1/4波片和反射镜之后返回, 在调制器中进行第二次调制. 经过二次调制的光束在PBS上进行解调, 解调之后被探测器接收. 用数据采集设备(DAQ)对探测器的输出进行采样, 通过编写Labview程序实现系统的自动扫描以及数据的保存.

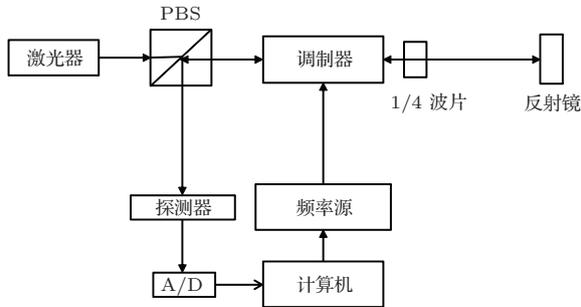


图3 偏振调制变频测距系统

获得两个光强极小值对应的频率的过程: 首先设置扫描频率的起点和终点以及扫描频率的步进值, 用程序控制频率源输出一个频率, 记录DAQ的采样值; 之后按步进值增大调制频率, 如此进行一段扫描后可以得到两个相邻的输出电压最低点对应的频率值, 再通过这两个频率值计算出被测距离.

### 3 实验结果分析

#### 3.1 调制频率与系统输出光强的关系

本文对搭建好的系统进行了测试. 在某个测量距离下进行了一段3—3.09 GHz的扫频, 步进为10 kHz. 我们对所得数据进行了处理, 实验结果如图4所示. 从图4可以看出, 调制频率与系统探测器输出光强成余弦关系, 这与之前的理论推导相符.

#### 3.2 极小点频率的稳定度

由(10)式可知, 测量频率的稳定性是高精度测量的关键. 下面研究电压输出极小值对应的频率的稳定性. 在不同测量距离下, 对电压输出极小值对应的频率进行了多组测量, 测量结果列于表1.

通过(10)式可以看出, 测距的精度与测量所得的频率的稳定性有关, 稳定的频率测量是高精度测量的基础. 由表1可知, 频率的稳定度在 $10^{-7}$ 量级,

优于 $10^{-6}$ . 这为高精度的测量提供了有力的保证.

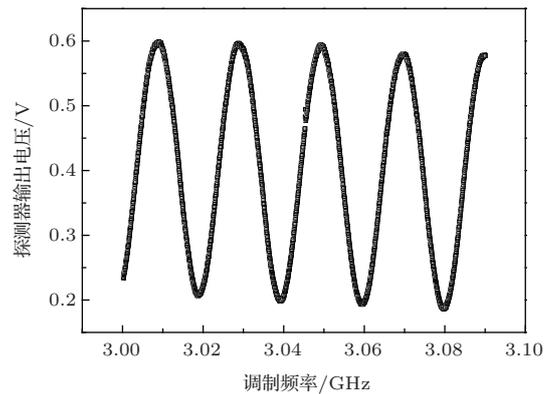


图4 调制频率与探测器输出电压的关系

表1 系统稳定度测试

平均值/Hz	标准差/Hz	标准差/平均值
3039640943	1991	$6.55 \times 10^{-7}$
3039441516	2846	$9.36 \times 10^{-7}$
3039441516	1736	$5.71 \times 10^{-7}$
3039176247	1551	$5.10 \times 10^{-7}$
3039081541	2001	$6.58 \times 10^{-7}$

#### 3.3 系统测量精度

为了对系统的实际测量能力进行测试, 本文采用Ozoptics公司生产的ODL-650型光纤延迟线对测试距离做精确的改变, 光纤延迟线的精度小于 $1 \mu\text{m}$ , 最大延迟为50 mm, 光纤延迟线两端的光纤为单模光纤, 长度约为3 m, 换算成空气中的传播距离约为4.5 m. 光纤延迟线变化量 $\Delta D$ 为10, 20, 30, 40 mm, 对每组延迟距离的变化进行了10组测量, 测量结果列于表2.

表2 系统测量精度

$\Delta D/\text{mm}$	平均值/mm	最大偏差/ $\mu\text{m}$	标准差/ $\mu\text{m}$
10.000	10.002	4.3	1.7
20.000	19.998	6.2	2.8
30.000	30.003	10.6	4.2
40.000	39.999	5.1	2.4

原始数据中, 平均值反映了标定后系统的溯源精度, 而标准差反映了系统的分辨率和动态范围. 从最大偏差角度看系统的绝对精度可以达到 $\pm 10.6 \mu\text{m}$ .

为了确定系统的测量范围, 在波片后面加入一

段约 200 m 的单模光纤, 其关键参数: 数值孔径为 0.12, 衰减小于 10 dB/km (光波波长为 630 nm), 模场直径为  $4.2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$  (光波波长为 630 nm), 作用波长为 630—860 nm. 频率源的扫频范围为 1 MHz, 扫频步进为 1 kHz, 扫频曲线如图 5 所示. 待测距离变长后, 调制频率与探测器输出电压依然成余弦关系, 只是曲线的周期发生了变化, 通过测量两个相邻光强极小值对应的频率值就可以得出待测距离. 经过计算, 测得光纤长度为 232.38 m. 由于对于 780 nm 的红外光, 光纤的折射率是空气的折射率的 1.5 倍, 因此此系统在空间中的测距能力能够达到 300 m 以上. 由于频率源的最小步进为 1 kHz, 这对长距离的测量精度有很大的影响, 为了得到更高的测量精度, 需要选用步进频率更小的扫频源.

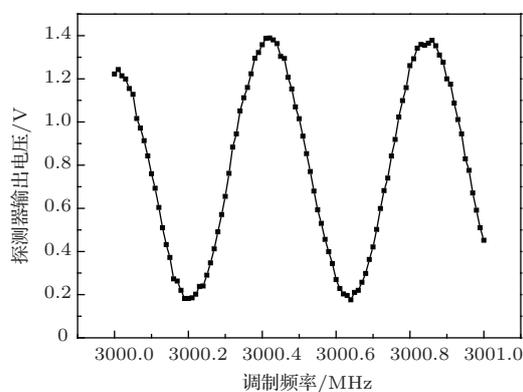


图5 加入 200 m 光纤后, 调制频率与探测器输出电压的关系

## 4 结 论

本文对基于二次偏振调制的变频测距原理进行了理论分析, 把对距离的测量变为对频率的测量. 通过在调制器上的二次调制, 消除了电路系统上的附加相移, 大幅度简化了系统的复杂程度. 成功地搭建了实验系统, 得到了与理论推导相符合的系统输出光强与调制频率之间的关系曲线. 对测量频率的稳定度进行了测试, 得出系统的频率稳定度小于  $10^{-6}$ , 系统的测量绝对精度达到  $\pm 10.6 \mu\text{m}$  (测量距离为 4.5 m), 这表明变频测距技术比传统

的鉴相方法更有利于提高测量精度. 系统的测量范围可以达到 300 m 以上, 实现了大范围的距离测量. 基于二次偏振调制的变频激光测距仪设计思路非常适合紧凑的便携式激光测距仪设计, 并大幅度提高了便携式激光测距仪的精度.

## 参考文献

- [1] White N 2000 *Nature* **407** 146
- [2] Xing S J, Zhang F M, Cao S Y, Wang G W, Qu X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 170603 (in Chinese) [邢书剑, 张福民, 曹士英, 王高文, 曲兴华 2013 物理学报 **62** 170603]
- [3] Shelus P J 2001 *Surv. Geophys.* **22** 517
- [4] Qing P, Chen W, Song Y J, Hu M L, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240601 (in Chinese) [秦鹏, 陈伟, 宋有建, 胡明列, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 240601]
- [5] Smullin L D, Fiocco G 1962 *Nature* **194** 1267
- [6] Bobroff N 1993 *Meas. Sci. Technol.* **4** 907
- [7] Liu M, Yang X Y, Liu C J 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0208004 (in Chinese) [刘邈, 杨学友, 刘常杰 2012 中国激光 **39** 0208004]
- [8] Wang G C, Yan S H, Yang J, Lin C B, Yang D X, Zou P F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 070601 (in Chinese) [王国超, 颜树华, 杨俊, 林存宝, 杨东兴, 邹鹏飞 2013 物理学报 **62** 070601]
- [9] Amann M, Bosch T, Myllyla R, Rioux M, Lescure M 2001 *Opt. Eng.* **40** 10
- [10] Xu H, Li X Y, Xiao X, Li Z Y, Yu Y D, Yu J Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 114212
- [11] Hirota Y, Hattori R 2006 *Opt. Express* **14** 4486
- [12] Bosch T, Lescure M 1997 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **46** 1224
- [13] Guo D M, Wang M 2007 *Appl. Opt.* **46** 1486
- [14] Qin J X, Xi L X, Zhang X G, Tian F 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114201
- [15] Lo Y, Hsu P 2002 *Opt. Eng.* **41** 2764
- [16] Poujouly S, Journet B 2002 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **4** s356
- [17] Yoon H, Hong J, Huisung K, Kyihwan P 2008 *International Conference on Control, Automation and Systems* Seoul, Korea, October 14–17, 2008 p2280
- [18] Yu D Y, Tan H Y 2005 *The Optical Engineering* (Beijing: Machinery Industry Press) p306 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2005 工程光学 (北京: 机械工业出版社) 第 306 页]

# Variable frequency range finding technology based on double polarization modulation method and system implementation\*

Hei Ke-Fei Yu Jin-Long Wang Ju<sup>†</sup> Wang Wen-Rui Jia Shi  
Wu Qiong Xue Ji-Qiang

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

( Received 1 January 2014; revised manuscript received 11 March 2014 )

## Abstract

Traditional laser range technology has a poor phase measurement accuracy and an additional phase of the system, which restricts the improvement of its accuracy. In this article, by using the technology of variable frequency measurement based on double polarization modulation the phase shift range-finding technology is improved. With the method of double polarization modulation, the demodulation of the phase information is directly implemented on the phase modulator, which can make the system simpler. The variable frequency technology is used to replace the traditional phase discrimination technology; therefore the measurement accuracy of the system will not be persecuted with the phase discrimination any more. The theoretical curve of sine (cosine) relation between modulation frequency and output light intensity is proved experimentally. Owing to the fact that the stability of frequency can be better than  $10^{-6}$ , the measurement accuracy can reach  $\pm 10.6 \mu\text{m}@4.5 \text{ m}$ . By using this system to measuring a 200 m-long fiber, the clear curve of modulation frequency versus output of system is obtained.

**Keywords:** laser distance measurement, variable frequency distance measurement, double polarization modulation

**PACS:** 06.30.Bp, 07.60.-j, 42.25.Ja

**DOI:** [10.7498/aps.63.100602](https://doi.org/10.7498/aps.63.100602)

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2012CB315704) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant Nos. 20120032120029, 20120032130010).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wangju@tju.edu.cn](mailto:wangju@tju.edu.cn)