

文章编号 1004-924X(2017)08-1979-08

正交调制降频相位式激光测距

许贤泽, 翁名杰, 徐逢秋*, 白翔
(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了提高激光测距的精度与稳定性, 通过改良传统相位激光测距仪, 设计了新型正交调制降频与最小二乘法解相位的相位式激光测距仪。使用反射镜实现内外测距光路, 通过正交调制技术对发射激光进行幅度调制, 接收模块接收到的回波信号经过混频器后再经过低通滤波器将回波信号降频, 降低解相难度并提升解相精度。改用分时测量得到距离相位从而消除二次混频方法所产生的附加相移, 分别对内外光路低频回波信号采样进行模数转换后使用最小二乘法求解相位。采用多频率调制测量兼顾激光测距范围与测量精度, 最后通过超定方程解模糊算法求解多频测距的待测距离。在国家标准基线上进行样机测试, 实验结果表明, 在 60 m 量程内正交调制激光测距仪的测量平均误差控制在 1.5 mm 以内, 测距量程内标准差保持在 0.9 mm 以内。

关键词: 激光测距; 正交调制; 最小二乘法; 超定方程; 解模糊

中图分类号: TN247; TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172508.1979

Phase laser ranger based on quadrature modem and frequency reduction

XU Xian-ze, WENG Ming-jie, XU Feng-qi*, BAI Xiang

(College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

* Corresponding author, E-mail: hncxu@whu.edu.cn

Abstract: A novel laser range finder method based on the quadrature modem and least square method was investigated to improve the accuracy and reliability of traditional portable phase laser range finders. A reflector was employed for inner and outer optical paths. After amplitude modulation of laser intensity by the quadrature modulation method, the echo signal was mixed with modulation signal and passed through a low-pass filter to reduce the frequency, thus simplifying phase detection and improving solution accuracies. The inner and outer phase shifts were used to eliminate the additional phase shift lead by the secondary mixing. The low frequency echo signal from the inner and outer optical path were sampled for analog to digital conversion respectively, then the phase was solved base on the least square method. Multi-frequency measurement was adopted to maintain the laser ranging range and measurement accuracy. Finally, the measured distance was obtained by solving the laser ranging ambiguity by overdetermined linear equation. The proposed range finder was experimented on the national standard baseline. The results show that the prototypes of those rangers exhibit an average measurement error less

收稿日期: 2017-03-30; 修订日期: 2017-05-04.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB707904)

than 1.5 mm and an standard deviation less than 0.9 mm in the range of 0~60 m.

Key words: laser ranging; quadrature modem; least square method; overdetermined equation; ambiguity resolution

1 引言

激光测距技术以其非接触、实时快速、高精度和大范围等优点广泛应用于工业制造、航空航天以及遥感等领域。随着测量要求的不断提高,激光测距仪的尺寸、精度以及测量速率也不断提升^[1-2]。激光测距原理主要分为三角法、干涉法以及飞行时间法三类。其中,飞行时间测距法因测距精度高、测量范围广以及结构简单而被广泛应用于小型激光测距仪中。该方法进一步又分为脉冲测距法^[3-5]与相位测距法^[6-7]。

激光脉冲测距发射激光脉冲信号,通过测量发射与接收光脉冲的时间差来测量距离,其精度多为米量级,若要实现 10 mm 的测距精度需要高达 30 GHz 的脉冲计数器,因此难以满足环境恶劣与精度要求高的应用场合。激光相位测距使用周期信号调制激光发射强度,测量连续调制激光光波在待测距离来往传播而产生的相位变化,间接测量激光传播时间。相对脉冲测距相位测距可以轻松达到毫米级的测量精度,同时对收发器件频率响应要求较低。

相位测距精度主要取决于调制信号频率与相位检测精度。提高调制频率是提高相位测距精度最简便的方法,但随着调制频率的提升,电子元件的带宽限制会进一步影响激光调制信号的质量,使得回波信号劣化导致高频相位检测难度加大,同时高频电路各分布参数产生的相位误差难以补偿,使得相位检测精度降低,因此测距精度并不随调制频率线性提高。另一方面,相位测距精度取决于相位检测分辨率,基本相位检测方式有幅度解调与二次混频法。其中,二次混频测相法另产生一路高频基准信号,将调制信号与回波信号分别与基准信号进行混频后通过低通滤波器,将待鉴相信号由高频信号转化为低频信号,求解调制信号与回波信号相对基准信号的相移,从而求出回波信号与调制信号的相差。然而,二次混

频中基准信号与调制信号处于同一量级,电路复杂度增加,且调制信号与回波信号经各自检相电路求解相位,因此两检相电路各自的附加相移无法消除,从而限制了相差检测的准确度。

为兼顾设计成本与测距精度,本文设计了基于正交调制降频^[8-9]与最小二乘法解相位的新相位式激光测距法。该方法使用同一检相回路分时检测内外光路相差,从而消除检相电路带来的附加相移,通过对发射信号正交调制,回波信号与高频调制信号混频滤波后得到包含相差的低频信号,降低下一级数字采样模块的频率要求,利于数字测相电路的实现与测相精度的提高。以最小二乘法求得低频信号相位差^[10],计算量较 FFT 小。最后基于超定方程组的相位测距解模糊算法,规避了对最优距离的搜索^[11-12]。

2 相位激光测距原理

相位激光测距是用周期低频信号对激光光强进行幅度调制,然后测定调制光往返待测距离所产生的相位延迟,通过测量相位间接测量调制光的传播时间,得出待测目标距离。

设调制信号为正弦信号,调制信号与接收信号分别为:

$$s_T(t) = A_T \sin(2\pi f_s t + \varphi_s), \quad (1)$$

$$s_R(t) = A_R \sin(2\pi f_s t + \varphi_s - \gamma\varphi_R), \quad (2)$$

式中: A_T , A_R 分别为发射与接收信号幅度; f_s 为调制信号频率; φ_s 为初相位; φ_R 为回波信号相移,则有:

$$\varphi_R = 4\pi f_s D / c, \quad (3)$$

式中: D 为待测距离, c 为光速。由式(3)解得距离 D 与最大无模糊测量距离 D_M 分别为:

$$D = c\varphi_R / 4\pi f_s = \lambda_s \varphi_R / 4\pi, \quad (4)$$

$$D_M = c / 2 f_s = \lambda_s / 2. \quad (5)$$

对式(4)两边微分可得:

$$\delta D = \frac{c}{4\pi f_s} \cdot \delta\varphi_R. \quad (6)$$

由式(6)可知,可以通过提高调制频率 f_s 与测相分辨率 $\delta\varphi_R$ 两种方式来提高测距精度 δD 。但提高调制频率会导致单频测距范围 D_M 变小,因此普遍采用多频相位激光测距兼顾宽范围、高精度测距^[6,13]。

3 相位激光测距算法实现

3.1 最小二乘法相位检测

采用最小二乘法求解回波信号相位,设待测相位信号为:

$$M(t) = A_M \sin(2\pi f_0 t + \theta) + m. \quad (7)$$

由三角函数两角和公式得:

$$M(t) = A_M \sin(2\pi f_0 t) \cos \theta + A_M \cos(2\pi f_0 t) \sin \theta + m. \quad (8)$$

令 $x_1 = A_M \cos \theta$, $x_2 = A_M \sin \theta$, 则式(8)简化为:

$$M(t) = x_1 \sin(2\pi f_0 t) + x_2 \cos(2\pi f_0 t) + m. \quad (9)$$

求解 x_1 与 x_2 后通过反正切公式求解相位,以 f_s 频率对 $M(t)$ 信号进行采样,采样后数字信号为:

$$S(k) = x_1 \sin(2\pi k f_0 / f_s) - x_2 \cos(2\pi k f_0 / f_s) + m \quad (k=0, 1, \dots). \quad (10)$$

得采样方程组:

$$\begin{cases} x_1 \sin[2\pi f_0 (1/f_s)] + x_2 \cos[2\pi f_0 (1/f_s)] + m = S(1) \\ x_1 \sin[2\pi f_0 (2/f_s)] + x_2 \cos[2\pi f_0 (2/f_s)] + m = S(2) \\ \dots \\ x_1 \sin[2\pi f_0 (k/f_s)] + x_2 \cos[2\pi f_0 (k/f_s)] + m = S(k) \end{cases}. \quad (11)$$

方程简化为:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \quad (12)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sin[2\pi f_0 (1/f_s)] & \cos[2\pi f_0 (1/f_s)] & 1 \\ \sin[2\pi f_0 (2/f_s)] & \cos[2\pi f_0 (2/f_s)] & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \sin[2\pi f_0 (k/f_s)] & \cos[2\pi f_0 (k/f_s)] & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, m]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{b} = [S(1), S(2), \dots, S(K)]. \quad (15)$$

得 \mathbf{x} 最优解为:

$$\mathbf{x}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (16)$$

然后通过反正切公式求得信号相位:

$$\theta = \arctan(x_2^* / x_1^*), \quad (17)$$

3.2 基于超定方程组的距离解模糊

多频测量法兼顾激光测距范围与测量精度,当用 k 组调制频率测量同一距离时,测距方程组为:

$$\begin{cases} D_0 = \lambda_1 n_1 / 2 + \lambda_1 \varphi_1 / (4\pi) \\ D_0 = \lambda_2 n_2 / 2 + \lambda_2 \varphi_2 / (4\pi) \\ \dots \\ D_0 = \lambda_k n_k / 2 + \lambda_k \varphi_k / (4\pi) \end{cases}. \quad (18)$$

设 f_x 与 f_y 是 k 组频率中差频最小的两调制频率,由差频测相原理^[14],待测不模糊距离为:

$$D_0 = c(\varphi_x - \varphi_y) / [4\pi(f_x - f_y)], \quad (19)$$

式中 φ_x 与 φ_y 分别为 f_x 与 f_y 调制光波产生的相移。

由差频测相求得待测距离为粗尺度测量,虽无法获得高精度距离值,但可以获得不同调制频率相移的周期差。设 p_{ij} 为第 i 与 j 组调制光波产生的相移周期差,即有:

$$p_{ij} = n_i - n_j = 2(1/\lambda_i - 1/\lambda_j) D_0 + (\varphi_i - \varphi_j) / (2\pi). \quad (20)$$

测距系统必然存在一定的测相误差,因此实际测量计算的 p_{ij} 并不一定为整数,需要对 p_{ij} 取整运算。构建以下方程组:

$$\begin{cases} p_{12} = n_1 - n_2 \\ p_{13} = n_1 - n_3 \\ \dots \\ p_{1k} = n_1 - n_k \end{cases}. \quad (21)$$

将式(21)带入式(18)得:

$$\begin{cases} D_0 - \lambda_1 n_1 / 2 = \lambda_1 \varphi_1 / (4\pi) \\ D_0 - \lambda_2 n_1 / 2 = \lambda_2 \varphi_2 / (4\pi) - \lambda_2 p_{12} / 2 \\ \dots \\ D_0 - \lambda_k n_1 / 2 = \lambda_k \varphi_k / (4\pi) - \lambda_k p_{1k} / 2 \end{cases}, \quad (22)$$

方程组(22)有 D_0 与 n_1 两个未知数,是典型的超定方程组,可通过线性最小二乘法求解,即有:

$$\begin{aligned} D_0^* &= \sum_{i=1}^k a_i \varphi_i + \sum_{i=2}^k b_i p_{1i}, \\ n_1^* &= \sum_{i=1}^k d_i \varphi_i + \sum_{i=2}^k e_i p_{1i}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_i &= \left(\lambda_i^2 \sum_{j=1}^k \lambda_j - \lambda_i \sum_{j=1}^k \lambda_j^2 \right) / \left\{ 4\pi \left[\left(\sum_{j=1}^k \lambda_j \right)^2 - k \sum_{j=1}^k \lambda_j^2 \right] \right\}, \\
 b_i &= \left(\lambda_i \sum_{j=1}^k \lambda_j^2 - \lambda_i^2 \sum_{j=1}^k \lambda_j \right) / \left\{ 2 \left[\left(\sum_{j=1}^k \lambda_j \right)^2 - k \sum_{j=1}^k \lambda_j^2 \right] \right\}, \\
 d_i &= \left(k \lambda_i^2 - \lambda_i \sum_{j=1}^k \lambda_j \right) / \left\{ 2\pi \left[\left(\sum_{j=1}^k \lambda_j \right)^2 - k \sum_{j=1}^k \lambda_j^2 \right] \right\}, \\
 e_i &= \left(\lambda_i \sum_{j=1}^k \lambda_j - k \lambda_i^2 \right) / \left[\left(\sum_{j=1}^k \lambda_j \right)^2 - k \sum_{j=1}^k \lambda_j^2 \right].
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

在测尺频率选定后,测尺波长同时确定, a_i , b_i , d_i , e_i 可直接求出,将测距后得到的相差 φ_1 , $\varphi_2, \dots, \varphi_k$ 带入式(23)求解得出 D_0^* 与 n_1^* 。最后对 n_1^* 进行取整,带入方程组(22),得到各测尺频率所得距离,将平均值作为测量距离。该解模糊方法将距离模糊转变为超定方程组求解问题,步骤明确,避免了使用最优搜索迭代寻找最优解,准确性高、可靠性好。

4 正交调制激光测距系统设计

4.1 激光测距光路设计

传统分束激光测距光路如图 1 所示,分束镜将激光分为两路,一路通过内部测相电路求解相位,另一路到达待测目标后反射由光电接收器接收。两路信号需要通过不同的测相电路进行解相,测相电路 1、2 参数无法保持完全一致,因此将引入电路附加相移,从而限制测距精度的提高。这里采用内部校准光路消除测距过程中产生的附加相移以及噪声干扰进一步提升测距精度,光路如图 2 所示,当反射镜处于 a 位时,调制激光经过内光路后被反射镜反射并由光电探测器接收,解相内光路回波信号相位作为初始相位;当反射镜处于 b 位时,调制激光经双反射镜反射并由光电探测器接收,解相外光路回波信号与初始相位作差即求得待测距离产生的相移。与分束镜激光测距相比,在简化光路的同时也简化了电路,消除了电路带来的附加相移。

选用对人眼相对安全的 GaAs 激光器,型号为 QL63D4SC,采用物镜组以确保发射准直。雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)型号为 AD230-8,位于接收物镜的焦面上,反射光经过接收物镜聚焦到 APD 上,从而增大接收光强,提高测距仪的测程。

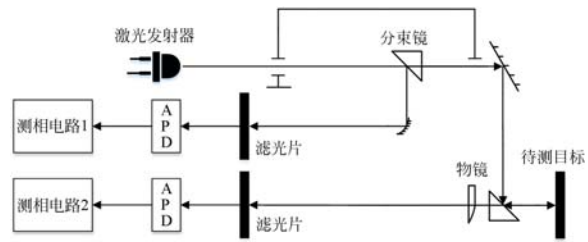


图 1 传统激光测距光路框图

Fig. 1 Optical path of traditional laser ranging system

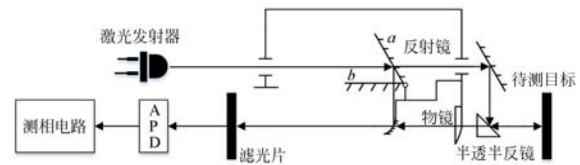


图 2 激光测距光路框图

Fig. 2 Optical path of proposed laser ranging system

4.2 正交调制与解调

二次混频激光测距原理如图 3 所示,由本地生成调制信号对激光发射器工作电流进行幅度调制,激光经过目标物体反射后由光电探测器接收;同时本地另产生一路基准参考信号,将调制信号与激光回波信号分别与该信号进行混频滤波后进行相位检测,最终得出调制信号与回波信号的相位差。实际电路中混频器、滤波器、采样电路、甚至信号走线均会产生附加相移,其相移误差在测尺频率为高频时无法忽略,因此二次混频测距虽然使用同一参考信号,但调制信号与回波信号分别通过两路不同回路进行混频、滤波、检相处理,因此无法保证两路电路所产生的附加相移一致,从而限制了测距精度的提高;同时激光发射器发射的调制光相对原始调制信号也会产生一定的相移,因此实际测得的相差也并非理想情况下距离所产生的相移。

正交调制激光测距原理如图 4 所示,本地产生的两路调制信号分别为高频信号 S_1 与低频信号 S_3 :

$$S_1 = A_1 \sin(2\pi f_H t + \varphi_1), \tag{24}$$

$$S_3 = A_2 \sin(2\pi f_L t + \varphi_2), \tag{25}$$

φ_1 与 φ_2 分别为高低频调制信号的初始相位。将 S_1 与 S_3 分别进行 90° 移相,得到:

$$S_2 = -A_1 \cos(2\pi f_H t + \varphi_1), \tag{26}$$

$$S_4 = -A_2 \cos(2\pi f_L t + \varphi_2). \tag{27}$$

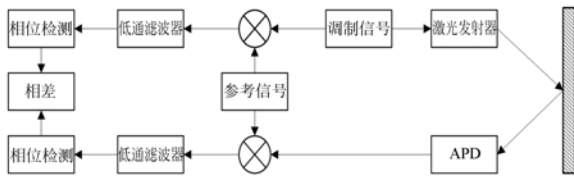


图 3 二次混频激光测距原理图

Fig. 3 Principle diagram of secondary mixing laser ranging method

由三角函数两角和差公式得:

$$S_7 = S_1 S_3 + S_2 S_4 = A_3 \cos[2\pi(f_H - f_L) + \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_{mod}], \quad (28)$$

式中 φ_{mod} 为正交调制电路产生的相移。 S_3 为光电接收器接收的反射激光信号, 其表达式如下:

$$S_3 = A_4 \cos[2\pi(f_H - f_L) + \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_{mod} - \varphi_{noise} - \varphi], \quad (29)$$

式中 φ_{noise} 为激光测距过程中由噪声干扰产生的相移。 S_8 与高频调制信号 S_1 混频得到混频信号:

$$S_9 = S_8 S_1 = A_5 \cos[2\pi f_L - \varphi_2 - \varphi_{mod} - \varphi_{noise} - \varphi] + N(t), \quad (30)$$

式中 $N(t)$ 为高频信号。再将混频信号 S_9 通过低通滤波器得到包含相差的低频信号:

$$S_{10} = A_6 \cos[2\pi f_L - \varphi_2 - \varphi_{mod} - \varphi_{noise} - \varphi]. \quad (31)$$

由式(31)可知, S_{10} 信号频率由正交调制中的低频信号决定, 而二次混频法若要获得低频信号则需要参考信号亦为高频信号, 因此正交调制测距可以避免在接收电路中产生另一路高频信号, 简化了测相电路设计。

分时进行内外光路测量, 则获得的内外光路

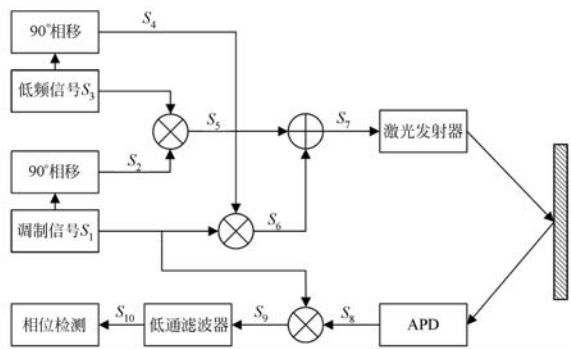


图 4 正交调制激光测距原理图

Fig. 4 Principle diagram of quadrature modem laser ranging

相移 φ_{in} 与 φ_{out} 分别为:

$$\varphi_{in} = -\varphi_2 - \varphi_{mod} - \varphi_{noise1} - \varphi_{d1}, \quad (32)$$

$$\varphi_{out} = -\varphi_2 - \varphi_{mod} - \varphi_{noise2} - \varphi_{d2}. \quad (33)$$

实际距离相移 φ 为:

$$\varphi_d = \varphi_{in} - \varphi_{out} = \varphi_{d2} - \varphi_{d1} + \varphi_{noise2} - \varphi_{noise1}. \quad (34)$$

由式(34)可知, 使用内光路可以消除电路的附加相移, 但仍旧无法消除噪声干扰产生的相移, 通过多次测量可以减小噪声干扰但无法完全消除。该测距方案利用同一接收检相电路分时检测内外光路的激光回波相位消除电路附加相移, 牺牲了检测时间但大大提升了测距精度。

5 实验结果与分析

实验基于两台正交调制激光测距样机置于国家标准基线上进行测试, 基线长度为 60 m, 平均精度为 0.18 mm。选用江苏某电子公司 K60 系列激光测距仪作为对比, 为保证实验的严谨性, 样机和 K60 采用相同的测尺, 分别为 300, 302, 313 和 315 MHz, 最小频差为 2 MHz, 由式(19)可得测距最大不模糊距离为 75 m。实验测试环境光照度设置为 2 000 lx, 温度为 24.3 °C, 选择白色靶面作为待测目标。

首先验证超定方程解模糊方案, 测试距离为 20 m, 测量 200 次, 对相差数据进行超定方程解模糊, 结果如图 5 所示。可以看到, 超定方程解模糊在测量距离为 20 m 时得到了 ± 2 mm 以内的测距精度, 由此表明该求解测距方法具有良好的测距精度与可靠性。然后进行样机整机测试, 在每个测试点进行 100 次数据测量, 实测距离的平均测量误差、标准差以及测距时间如表 1 所示。

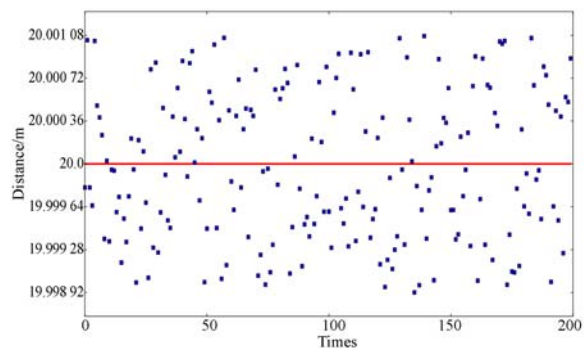


图 5 超定方程解模糊 (20 m)

Fig. 5 Ambiguity resolution for overdetermined linear equation in range of 20 m

表 1 中, ξ 为平均测量误差, 表示测量值与真实值之间的平均偏差绝对值, 其表达式如式(35)所示; σ 为标准不确定度, 其表达式如式(36)所示; e_{\max} 为 100 次测试中的最大测距误差。

$$\xi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_i - d|, \quad (35)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}, \quad (36)$$

式中: d_i 为第 i 次测量值; N 为测量次数; d 为真实距离; \bar{d} 为 N 次测量平均值。

由表 1 可知, 两种测距仪的平均测量误差均小于 1.5 mm, 正交调制样机与 K60 测距仪相比, 测距精度有较大提高。比较两种测距仪的测距标准差, 样机与 K60 测距仪性能相近, 但是其在量程内的测距标准差都控制在 0.9 mm 以内, 由此表明该测距方法具有良好的重复性。

表 1 测距仪样机实验结果

Tab. 1 Testing results of prototypes

实际距离 /m	1 号样机参数			2 号样机参数			K60 测距仪		
	ξ /mm	σ /mm	e_{\max} /mm	ξ /mm	σ /mm	e_{\max} /mm	ξ /mm	σ /mm	e_{\max} /mm
0.5	0.61	0.42	1.05	0.68	0.45	1.15	0.83	0.47	1.49
2	0.57	0.36	0.92	0.52	0.36	0.82	0.70	0.45	1.80
5	0.75	0.38	0.88	0.65	0.40	0.92	0.77	0.37	1.77
10	0.63	0.43	0.91	0.71	0.41	0.89	0.73	0.58	1.84
20	0.70	0.45	0.97	0.75	0.44	1.07	0.87	0.76	1.94
30	0.80	0.38	1.04	0.87	0.40	1.05	0.94	0.84	2.03
40	0.84	0.46	1.13	0.90	0.51	1.15	1.15	0.88	2.09
50	0.90	0.65	1.19	0.94	0.68	1.25	1.21	0.93	2.11
58	0.93	0.77	1.29	0.96	0.80	1.42	1.29	0.94	2.13

6 结 论

本文通过改进传统相位激光测距方案, 设计正交调制降频与最小二乘法解相位的相位式激光测距方案, 并推导了正交混频测距原理公式。利用内外光路分时测量得到待测距离产生的相位差, 从而消除传统二次混频电路中所产生的附加相移, 使用正交调制器对激光发射器电流进行调

制, 通过改变低频调制信号来改变回波信号频率, 降低了待检相信号频率, 简化了接收模块解相电路的设计。然后由超定方程解模糊得到待测距离, 简化求解步骤并提升求解速度。最后制作了实验样机测试, 并验证了该方法的精度与稳定性要优于传统调制相位激光测距仪。实验数据表明, 正交调制激光测距仪的测量平均误差控制在 1.5 mm 以内, 测距量程内标准差保持在 0.9 mm 以内, 该设计方案具有良好的测距精度与稳定性。

参考文献:

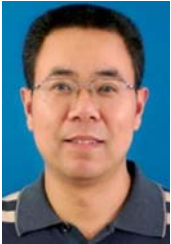
- [1] 曲兴华, 职广涛, 张福民, 等. 利用信号拼接提高调频连续波激光测距系统的分辨力[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 40-47.
QU X H, ZHI G T, ZHANG F M, *et al.*. Improvement of resolution of frequency modulated continuous wave laser ranging system by signal splicing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 40-47. (in Chinese)
- [2] PARK H S, SON S, CHOI S W, *et al.*. Wireless laser range finder system for vertical displacement monitoring of mega-trusses during construction[J]. *Sensors*, 2013, 13(5): 5796-5813.
- [3] 施智勇, 潘晓声, 张谦, 等. 利用延时法进行高精度脉冲激光测距[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2):

- 252-258.
- SHI ZH Y, PAN X SH, ZHANG Q, *et al.*. High-precision pulsed laser measuring distance by time delay method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2):252-258. (in Chinese)
- [4] 吴军, 于之靖, 诸葛晶昌, 等. 采用红外扫描激光与超声技术的室内空间定位[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 2417-2423.
- WU J, YU ZH J, ZHUGE J J, *et al.*. Indoor positioning by using scanning infrared laser and ultrasonic technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2417-2423. (in Chinese)
- [5] 王锐. 激光距离选通成像门宽对图像信噪比影响[J]. *中国光学*, 2015, 8(6): 951-956.
- WANG R. Effect of gate width of laser range gating imaging on image SNR[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 951-956. (in Chinese)
- [6] 肖洋, 于晋龙, 王菊, 等. 二次偏振调制测距系统中调制频率与测距精度的关系[J]. *物理学报*, 2016, 65(10): 100601.
- XIAO Y, YU J L, WANG J, *et al.*. Relationship between modulation frequency and range accuracy in the double polarization modulation range finding system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(10): 100601. (in Chinese)
- [7] 赵文成, 许贤泽, 乐意, 等. 基于双探测器的手持式激光测距仪系统设计与实现[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2015, 46(8): 2843-2849.
- ZHAO W CH, XU X Z, LE Y, *et al.*. System design and implementation for a portable laser range finder with dual detectors[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2015, 46(8): 2843-2849. (in Chinese)
- [8] 郑大青, 陈伟民, 陈丽, 等. 一种基于相位测量的快速高精度大范围的激光测距法[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(2): 303-308.
- ZHENG D Q, CHEN W M, CHEN L, *et al.*. A laser ranging method with high precision and large range in high speed based on phase measurement[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(2): 303-308. (in Chinese)
- [9] 刘逸, 杨学友, 刘常杰. 正交混频相位式激光测距方法与系统实现[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0208004.
- LIU M, YANG X Y, LIU CH J. Phase shift laser range finding with a novel quadrature modulation method and system implementation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0208004. (in Chinese)
- [10] 乐意, 许流博, 赵文成, 等. 基于最小二乘法的相位式激光测距仪[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(7): 108-112.
- LE Y, XU L B, ZHAO W CH, *et al.*. Phase laser range finder based on least square method[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2014, 42(7): 108-112. (in Chinese)
- [11] 李军侠. 基于三步搜索算法的解距离模糊方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(3): 557-561.
- LI J X. Resolution method of range ambiguity based on three-step-search algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(3): 557-561. (in Chinese)
- [12] 乐意, 许贤泽, 李忠兵, 等. 基于超定方程组的相位激光测距解模糊算法[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(4): 930-935.
- LE Y, XU X Z, LI ZH B, *et al.*. Resolution method of laser ranging ambiguity based on over-determined equation system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 930-935. (in Chinese)
- [13] 王凯, 段发阶, 郭浩天, 等. 基于大频差双频激光的发动机叶尖间隙测量技术[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(10): 1984-1988.
- WANG K, DUAN F J, GUO H T, *et al.*. Blade tip clearance measurement using dual frequency laser with large frequency difference[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(10): 1984-1988. (in Chinese)

- [14] 王选钢, 缙宁祎, 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): 888-895.
WANG X G, GOU N Y, ZHANG K SH. Unbi-

ased improvement of spectrum analysis phase discrimination for phase-shift laser range finder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 888-895. (in Chinese)

作者简介:



许贤泽(1967—),男,湖北京山人,博士,教授,博士生导师,1989年于合肥工业大学获得学士学位,1992年和2002年于武汉理工大学分别获得硕士和博士学位,主要从事精密仪器与超声医学图像处理领域的研究。E-mail: xxz@whu.edu.cn



翁名杰(1992—),男,福建福清人,硕士研究生,2015年于武汉理工大学获得学士学位,主要研究方向为精密仪器与智能控制。E-mail: 723809366@qq.com

通讯作者:



徐逢秋(1990—),男,江西丰城人,博士,讲师,2011年和2016年于武汉大学分别获得学士和博士学位,主要从事精密仪器,超声医学图像处理等方面的研究。E-mail: hncxu@whu.edu.cn