

基于 Matlab 的相位式激光测距研究

张 婷^{1,2}, 张珂殊¹

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 基于相位式激光测距系统的基本原理和鉴相方法, 采用双调制频率的方法解决了测量距离和测距精度之间的矛盾, 采用差频鉴相的方法减少电路复杂度。首次基于模块化的思想, 运用 Matlab 的 Simulink 工具实现了系统的原理分析, 对频域数字测相、数字同步解调测相法和自动数字测相法进行了比较。从理论上证明了实现一个高精度、快速相位式激光测距系统的可行性, 为下一步实际设备研制奠定了基础。

关键词: 幅度调制; 差频; 测距精度; 测相

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Study of phase-shift laser measuring based on Matlab

ZHANG Ting^{1,2}, ZHANG Ke-shu¹

(1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on a synthesis on the basic principle and the phase measurement method of laser range finder phase-shift system, the problem between range measurement and resolution measurement is solved by a twofold modulation frequency method, meanwhile, the complexity of electrocircuit is diminished by the method of difference frequency for phase measurement. Based on modularization, the basic principle of laser range finder system is first simulated by Matlab, and three principal measurement methods (The frequency digital phase measuring, the digital synchronous demodulation phase measuring, the automatic digital phase measuring) are compared. At last, the feasibility of a new laser range finder phase-shift system including high-resolution and quick reaction performance is proved in theory, a good foundation for achieving actual equipment later is well prepared.

Key words: amplitude modulation; difference frequency for phase measurement; range measurement resolution; phase measurement

1 引 言

激光测距系统的基本原理是测量激光脉冲在空间传播的时间间隔 (time of flight, TOF), 进而获得测量距离。测量时间间隔的方法主要有三种: TOF 法, 脉冲式激光测距, 直接测量发射光束和接收光束之间的时间间隔; AMCW 法 (amplitude modulated continuous wave, AMCW), 相位式激光测距, 通过测量调幅连续波发射光束和反射光束的相位差来测量时间间隔; FMCW 法 (frequency modulated continuous wave, FMCW), 通过测量调频连续波发射光束和接收光束的频率差来测量时间间隔^[1]。在精度要求

不高的情况下, TOF 法适合于长距离的测量。FM-CW 方法受回波幅度变化的影响小, 抗噪声能力强, 但其精度受调制线性程度的限制, 系统实现复杂。与前两种方法相比较, AMCW 法具有较高的精度, 测距精度可达毫米级, 系统实现相对简单, 有很高的

基金项目: 中国科学院重大科研装备研制项目; 三维激光成像技术综合检测平台 (No. YZ200813) 资助。

作者简介: 张 婷 (1985 -), 女, 硕士, 主要从事激光测距和机载激光雷达中信号处理及调制解调技术的相关研究。E-mail: zhangting307@mails.gucas.ac.cn

收稿日期: 2009-08-13

实用价值。本文针对 AMCW 测距的基本原理与实现进行研究,比较了相位式激光测距中几种常用的测相方法,并且首次采用模块化的思想,使用 Matlab 的 Simulink 工具进行原理仿真,得出研究结论。

2 AMCW 相位测距方法研究

2.1 相位测距基本原理

相位法激光测距的基本原理:激光器对被测目标发射一个正弦调制的光信号,接收目标反射回的光信号,通过测量发射光信号和接收光信号之间的相位差,获得往返信号的时间间隔,计算出目标的距离。相位式激光测距的原理如图 1 所示。

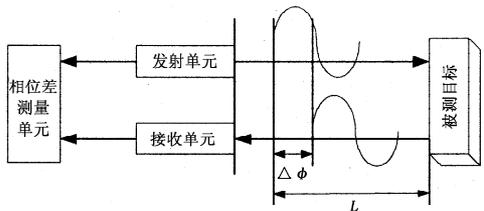


图 1 相位式测距基本原理

Fig.1 basic principle of phase laser range finder

正弦调制光波往返后相位延迟一个 ϕ 角,令激光调制频率为 f_0 ,光波在被测距离上往返一次所需时间为 $t = \phi/\omega$,而 $\phi = N \times 2\pi + \Delta\phi$,所以被测距离 L (也称为电尺)为:

$$L = c(N \times 2\pi + \Delta\phi)/2\omega = L_0(N + \frac{\Delta\phi}{2\pi}) = L_0(N + \Delta N) \quad (1)$$

其中, $L_0 = c/2f_0$,称为光尺; $\Delta N = \frac{\Delta\phi}{2\pi}$ 。

测量出发射和接收光波之间的相位差,就可以

确定距离 L 的数值^[2]。因此,选择适当的调制频率和合适的测相方法是实现一个高精度、快速测量的相位式激光测距系统的关键。

2.2 调制频率的选择

在 AMCW 相位式测距系统中,测距精度 ΔL 与最大测量距离(模糊距离) L 的关系为^[2]:

$$\Delta L = \frac{\Delta(\Delta\phi)}{2\pi}L \quad (2)$$

$$L = \frac{c}{2f} \quad (3)$$

根据式(2)和式(3),测量距离与测距精度之间是相矛盾的。在系统测相精度一定的情况下,调制频率越大,能测得的模糊距离越小,测距精度越高;反之,调制频率越小,能测得的模糊距离越大,测距精度越低^[3]。为了解决测量距离和测距精度之间的矛盾,可以采取双调制频率的测量方法,即选用两个调制频率,分别作为系统的精测测尺(大调制频率)与粗测测尺(小调制频率)。精测测尺可以保证测距精度,粗测测尺可以保证测量距离^[4]。

2.3 差频鉴相

当激光调制频率很高时,如果直接调制频率信号进行测相,会增加电路复杂度,降低测距精度。因此需要采用差频鉴相的方法,将激光发射信号和接收信号分别与本地振荡信号进行混频,得到两个频率的信号分量的叠加,经过低通滤波器后,得到一个低频信号。将此低频信号输入到鉴相电路中进行相位测量。这样可以降低电路复杂度,提高测距精度。差频鉴相原理如图 2 所示。

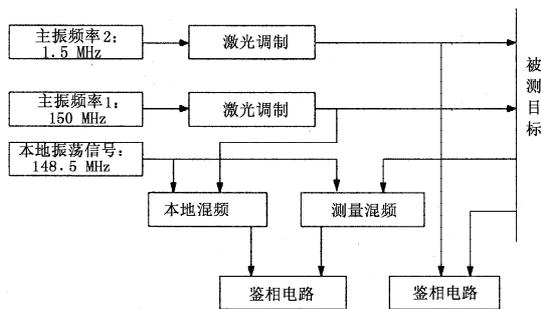


图 2 差频鉴相原理图

Fig.2 difference frequency for phase measurement

差频鉴相的原理用公式表达如下:

设经主振荡器调幅产生的激光发射载波信号为 $e_t = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$,本地振荡器产生的信号为 $A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$,则目标回波信号为 $r_t = \bar{A} \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_D)$ 。发射信号和接收信号与本地振荡信号经混频后得到:

$$m_t = \frac{A_0 A_1}{2} \{ \cos[(\omega_0 - \omega_1)t + \varphi_0 - \varphi_1] - \cos[(\omega_0 + \omega_1)t + \varphi_0 + \varphi_1] \} \quad (4)$$

$$n_t = \frac{\bar{A} A_1}{2} \{ \cos[(\omega_0 - \omega_1)t + \varphi_0 - \varphi_1 + \varphi_D] - \cos[(\omega_0 + \omega_1)t + \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_D] \} \quad (5)$$

用低通滤波器滤去式(4)、式(5)中角频率为 $\omega_0 + \omega_1$ 的高频分量,保留下的低频成分 e_m 和 e_n 分别为:

$$e_m = \frac{\overline{AA_1}}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_1)t + \varphi_0 - \varphi_1 + \varphi_D]$$

$$e_n = \frac{\overline{AA_1}}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_1)t + \varphi_0 - \varphi_1]$$

其中,仍包含相位差 φ_D 的信息。因此,可以用差频鉴相的方法实现高频相位测量,并且不会导致相位信息的丢失。

2.4 几种常用的测相方法

目前,在 AMCW 相位激光测距系统中,主要有三种常用的测相方法,分别为自动数字测相法、频域数字测相法和数字同步解调法。

1) 自动数字测相法^[5]:将发射信号和接收信号

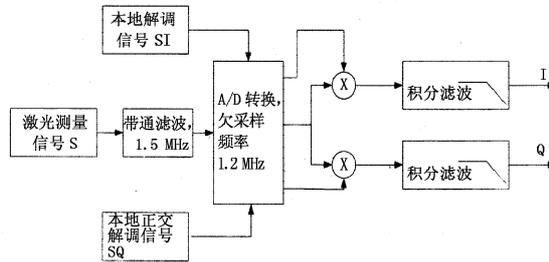


图3 数字同步解调测相原理图

Fig.3 principle diagram of digital synchronous demodulation phase measuring

首先将接收的激光测量信号、本地解调信号 SI 和本地正交解调信号 SQ 进行欠采样,得到三个数字序列。测量信号 S 分别与 SI 和 SQ 相乘,经过积分滤波后,分别得到 S 的相位的正弦值和余弦值,得到激光测量信号的相位值。

3 AMCW 测相方法原理仿真

3.1 仿真模块的划分及参数设置

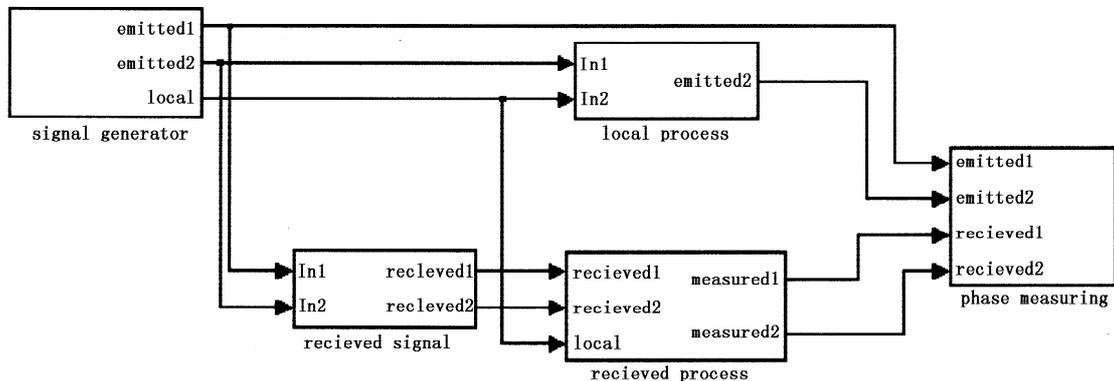


图4 AMCW 仿真系统原理图

Fig.4 principle diagram of AMCW simulation system

系统由以下五个功能模块组成:

整形为一个方波信号,两路方波信号通过一个检相触发器,用发射信号和接收信号的上升沿分别控制触发器的“开门”与“关门”,得到一个输出信号作为鉴相脉冲。将输出信号通过一个与门,用一个计数时钟对信号高电平的持续时间进行计数,计数脉冲个数乘以计数频率即为相位差。

2) 频域数字测相法^[6]:发射信号和接收信号经过 A/D 转换后,变成两个数字量。对这两个数字量分别进行快速傅里叶变换(FFT),得到信号的幅度谱和相位谱。找出幅度谱最大值处对应的相位信息,将发射信号和接收信号的相位值相减,得到发射信号和接收信号的相位差。

3) 数字同步解调法^[7-8]:数字同步解调测相原理实现如图3所示。

使用 Matlab 的 Simulink 工具,对 AMCW 测相方法进行原理分析。按照分散的测尺频率选择原理,采用双调制频率和差频鉴相的方法对系统进行鉴相。将 AMCW 系统划分为数个子模块,针对频域数字测相法和数字同步解调测相法这两种方法进行分析,并比较测相结果。模块化的 AMCW 仿真系统如图4所示。

1) Signal generator:信号产生模块,产生两路激

光发射信号和本地振荡信号。两路发射信号分别作为精测测尺信号和粗测测尺信号。

2) Received signal:接收信号模块,将本地两路激光发射信号经过一定的路径延时,作为激光接收信号。同时,在信号中添加一定信噪比的高斯白噪声。

3) Local process:本地信号处理模块,将本地发射的高频信号与本地振荡信号进行混频,通过一个低通滤波器后,获取低频信号,输入到测相模块中。

4) Received process:接收信号处理模块,由两个子模块组成。模块一将接收的高频信号与本地振荡信号进行混频,通过一个低通滤波器后,获取低频测量信号;模块二将接收信号通过一个带通滤波器,滤去掺杂在信号中的高斯白噪声。

5) Phase measuring:相位测量模块,由两个子模块组成,分别完成频域数字测相和数字同步解调测相的功能。将经过测相处理的数据导入到 Matlab 的 workspace 中,在 Matlab 中对测相数据进行处理,计算测相误差和精度。

分析过程各项参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置表

本地振荡信号频率	148.5 MHz
激光发射信号 1	1.5 MHz
激光发射信号 2	150 MHz
信号长度	10^{-5} s
高斯白噪声信噪比	16 dB
路径延时	相位差为 $1 \sim 359^\circ$, 间隔 1°
欠采样频率	1.2 MHz
本地解调信号	频率为 1.5 MHz
低通滤波器(差频处理)	类型:besself
	阶数:16
带通滤波器(滤噪处理)	截止频率:1.6 MHz
	类型:FIR
	阶数:64
通带频率:1.4 MHz ~ 1.6 MHz	
FFT 变换点数	8
本地正交解调信号	频率为 1.5 MHz, 相移 90°

3.2 结论分析及测相方法比较

在接收信号处理模块,需要一个带通滤波器,滤掉掺杂在信号中的高斯白噪声。滤波前后的信号波形以及信号功率谱如图 5 所示。

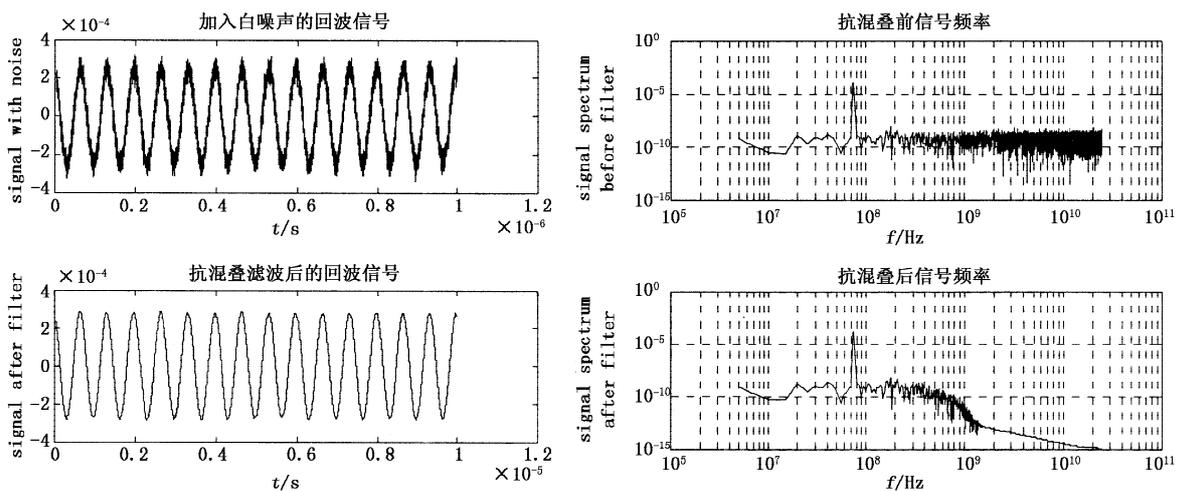


图 5 滤波前后的激光回波信号

Fig. 5 laser received signal before and after filtering

经过抗混叠滤波后,信号波形明显平滑了许多,信号功率谱中噪声的分布也有所减少,但是在信号频率附近,仍有一定量的噪声分布。可见,选择一个频带窄,滤波效果好的滤波器至关重要。

在对激光回波信号进行数字鉴相前,根据带通

采样定理,可以采取欠采样的方法,将信号从一个模拟量转换为一个数字量,欠采样的激光测量信号和本地解调信号如图 6 所示。运用欠采样的方法,不会导致信号携带相位信息的丢失,且采样频率低,降低了对 A/D 转换芯片的要求,在降低采样速率的同

时保证采样精度,提高测距分辨率。

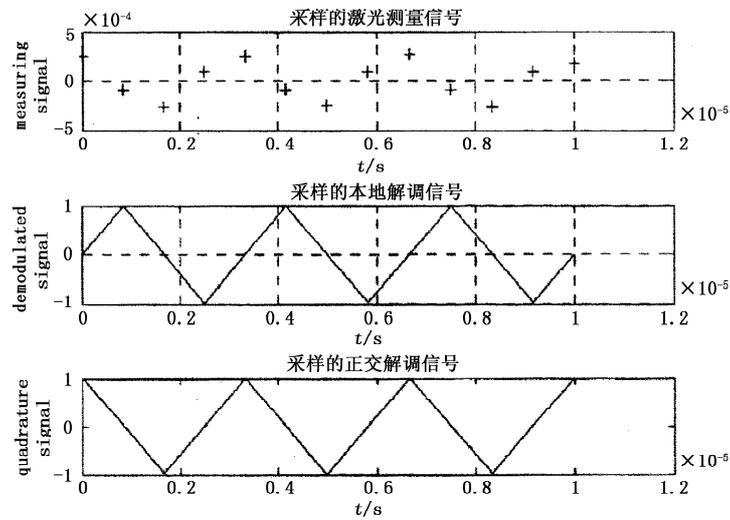


图6 欠采样处理

Fig. 6 under-sampling process

以设定的路径延迟角度值为横坐标,每点间隔 1° ,以测相误差为纵坐标(单位: $^\circ$),分别采用数字同步解调法和频域数字测相法进行测相,误差曲线如图7所示。

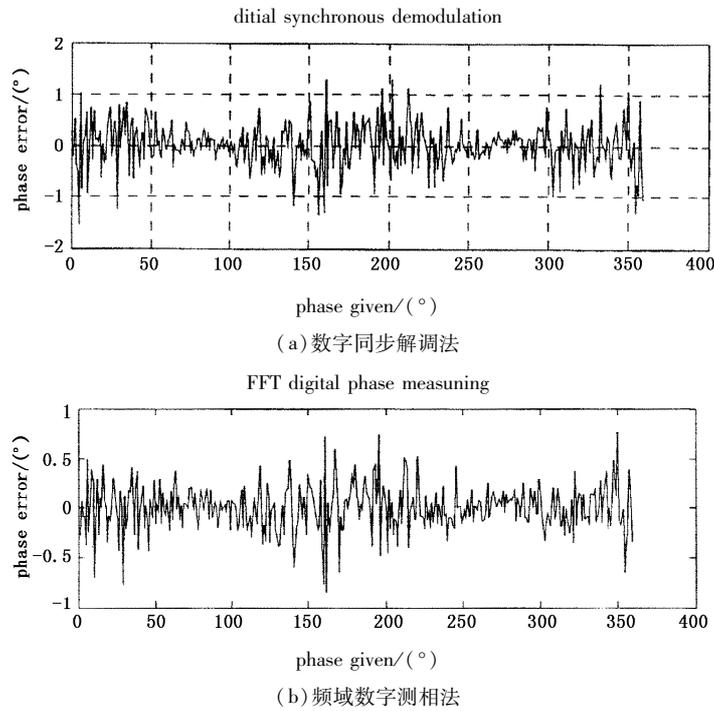


图7 测相误差曲线

Fig. 7 phase measuring error curve

图7(a)、(b)上下部分分别为数字同步解调法和频域数字测相法的仿真结果,可以看到,利用频域数字测相法得到的测相误差集中在 $\pm 0.5^\circ$ 之间,利用数字同步解调法得到的测相误差集中在 $\pm 1^\circ$ 之间。

将分析程序运行五次,得到测相误差统计表如表2所示,频域数字测相的平均测距误差集中在

0.1 mm ,比数字同步解调测相小,且测相误差的方差比数字同步解调法小一个数量级。

从分析结果可以看到,频域数字测相方法的测距精度很高,且由 DSP 对数字序列做 N 点 FFT 变换,速度快,电路实现简单。数字同步解调法方法简单,运算过程为同频甚至同步信号相乘,便于数字化

处理,且测相速度快,但在同等的仿真条件下,测距精度和方差劣于频域数字测相法。自动数字测相法测距精度高,但是对回波信号的波形要求高,电路实现复杂,且需要对一次测量进行多次平均,影响了测相速度。有时,为了进一步提高测相分辨率,需要提高计数脉冲频率,增加了电路实现难度^[9]。因此,在 AMCW 激光测距系统设计过程中,测相速度,测距精度和电路实现复杂度是影响测相方法选择的关键因素。

表 2 测相误差比较表

误差 次数	数字同步解调测相		
	平均测相 误差/(°)	测相误差 方差	平均测距 误差/mm
第一次	0.0343	0.2145	0.3
第二次	0.038	0.2028	0.3
第三次	0.0205	0.1862	0.2
第四次	0.0139	0.1783	0.1
第五次	0.0471	0.1743	0.4
	频域数字测相		
第一次	0.3657	0.0265	0.2
第二次	0.0149	0.0588	0.1
第三次	0.0133	0.0498	0.1
第四次	0.0139	0.0379	0.1
第五次	0.0098	0.0475	0.1

4 结束语

AMCW 相位式激光测距系统测距精度高,适用于中短距离的精密测量,且系统实现简单,应用范围广。但是也有一些亟需解决的问题,主要体现在:①在保证测距精度,提高测距分辨率的同时,如何实现快速高效测量;②在现有基础上,如何将几种测相方法有机结合,取长补短,使系统尽可能简单化,高精度化。③双调制频率系统实现复杂,如何使用一个调制频率进行测量,解决测距精度和测量距离之间的矛盾。

文章首次基于 Matlab 的 Simulink 工具,采用双

调制频率,差频鉴相的方法,实现原理仿真,并对分析结果进行讨论,探讨了目前广泛应用的三种鉴相方法,在理论上验证了 AMCW 系统高精度快速测量的可行性。频域数字测相方法的测距精度很高,且由于使用 DSP 对数字序列做快速傅里叶变换,同等条件下测相时间短,电路集成复杂度更小。而数字同步解调法方法比较简单,只是单纯的利用同频甚至同步信号相乘,便于数字化处理,且较频域数字测相方法的测相速度快,但在同等的仿真条件下,测距精度和方差劣于频域数字测相法。因此,选择合适的测相方法是实现高精度相位式测距系统的关键,下一步要做的工作是在此基础上,在激光雷达测距系统研制中重点解决测量距离和测距精度之间的矛盾。

参考文献:

- [1] 杨明,王宏,何克忠. 基于激光雷达的机器人环境建模与避障[J]. 清华大学学报,2000,40(7): 112-116.
- [2] 陈敏,杜小平. 一种提高相位测距精确度的方法[J]. 现代电子技术,2005,28(16):67-69.
- [3] 张慧,胡雅育. 提高相位激光测距精确度的研究[J]. 上海电机学院学报,2006,9(S1):8-10.
- [4] 高林奎,宋玮. 激光测距[M]. 北京:人民铁道出版社,1977:53-66.
- [5] 张志勇,张靖,朱大勇. 一种基于相位测量的激光测距方法[J]. 光电工程,2006,33(8):75-78.
- [6] 张慧. 相位法激光测距算法的嵌入式系统实现[D]. 上海:同济大学,2007:33-37.
- [7] Poujouly S E, Jourmet B. A twofold modulation frequency laser range finder[J]. Journal of Optics A: Pure and applied optics,2002,4:356-363.
- [8] Poujouly S, Jourmet B, Miller D. Laser range finder based on fully digital phase-shift measurement [C]. IEEE, 1999,3:1773-1776.
- [9] 邵珠法. 高精度快速激光相位测距技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2005:41-48.