

相位法激光测距的实现

汪友生, 徐小平

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 介绍了相位法激光测距基本原理, 详细论述了相位差的自动数字测量方法及其引起的误差. 对单次检相的精度、频率漂移、大气折射率等对测距误差的影响进行了分析并提出了具体解决方法. 实现结果表明, 采用相位法测距精度可以达到 $\pm(5\text{ mm}+5 \times 10^{-6} D)$.

关键词: 激光测距; 相位; 精度

中图分类号: TM93

文献标识码: B

文章编号: 0254-0037(2003)04-0424-04

激光具有普通光所不能比拟的特性, 如高度相干性、高度单色性、方向性强、亮度高, 这些特性使它在工业、农业、医学、国防建设、科学实验等许多方面具有广泛的应用前景. 其中, 激光测距就是激光技术在军事、工业、地形测绘乃至现代体育等领域的具体应用.

1 相位法测距原理

激光测距精度高, 速度快. 相位法激光测距是通过间接测定调制光信号在被测量距离上往返所需的时间 t_{2D} 来计算距离 $D^{[1]}$:

$$D = (c/2) t_{2D} = (c/2) (\Phi / 2\pi f) \tag{1}$$

式中: c 为光波在空气中传播的速度; Φ 为调制光信号经过被测距离 D 而产生的相位移; f 为信号的调制频率.

在图1中, A 表示调制光波的发射点, B 表示安置反射器的地点, A' 表示所发出的调制光波经反射器反射后的接收地点. $A-A'$ 两点间的距离即是待测距离 D 的2倍. 如果调制光波长较短时, 相位移为

$$\Phi = N_1 \lambda_1 + \Delta\phi_1 \tag{2}$$

式中: N_1 表示相位移 Φ 中包含的 2π 的整数倍; $\Delta\phi_1$ 表示不是整周期 2π 的相位尾数. 将上式代入式(1)得

$$D = \frac{c}{2} \cdot \frac{2\pi(N_1 + \Delta N_1)}{2\pi f_1} = N_1 \cdot \frac{c}{2f_1} + \Delta N_1 \cdot \frac{c}{2f_1} = (N_1 + \Delta N_1) \frac{c}{2f_1} = (N_1 + \Delta N_1) \lambda_1 / 2 = (N_1 + \Delta N_1) L_{\Delta 1} \tag{3}$$

式中: $\Delta N_1 = \Delta\phi_1 / (2\pi)$ 为小数; $L_{\Delta 1} = \lambda_1 / 2$ 称之为测尺长度.

在实际应用中, 由于无法确定 N_1 而采用增大调制光波长的办法, 如果所采用的调制光波长 λ 大于被测距离 D 的2倍, 式(2)中 N_1 将等于0, 如图中虚线所示. 则式(3)变为

$$D = L_{\Delta} \Delta N = L_{\Delta} \Delta\phi / (2\pi) \tag{4}$$

由式(4)可知, 选定信号频率, 则测尺长度 L_{Δ} 即为已知, 只要测出光信号经过 $2D$ 距离后的相位移 $\Delta\phi$,

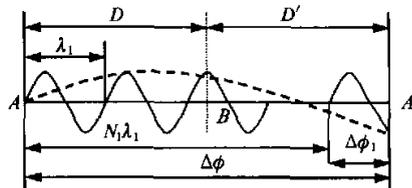


图1 光波经距离2D后的相位变化

收稿日期: 2003-02-17.

作者简介: 汪友生(1965-), 男, 安徽望江人, 工程师, 硕士.

即可测得距离 D 的值。

2 $\Delta\phi$ 的测定

2.1 差频测相

为了保证一定的测距精度，激光信号的频率必须选得很高，一般为十几 MHz ~ 几百 MHz。如果在这样高的频率下直接对发射波和接收波进行相位比较，电路中的寄生参量的影响将产生显著的附加相移，降低测相精度；为此，采用差频法来测相，即通过主振频率与本振频率混频，变成中低频信号。由于差频信号仍保持着原高频信号的相位关系，测量中低频信号的相位就等于测量主振信号经 $2D$ 距离后的相位延迟。各主要电路单元及其相互之间的相位关系如图 2 所示。

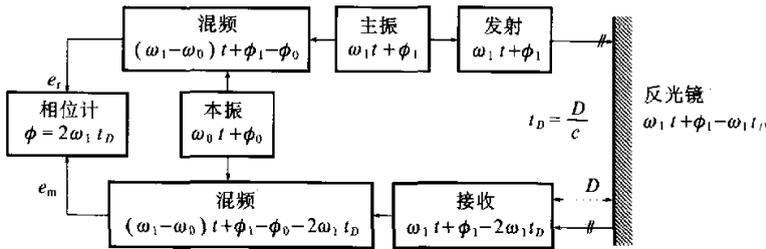


图2 差频测相电路各主要单元之间的相位关系

从图 2 可以看出，混频后得到的 2 个中低频信号之间的相位差就是主振测量信号经 2 倍距离 D 后产生的相位延迟。2 个中低频信号 e_r 和 e_m 的相位差 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = [(\omega_1 + \omega_0)t + \phi_1 - \phi_0] - [(\omega_1 - \omega_0)t + \phi_1 - \phi_0 - 2\omega_1 t_D] = 2\omega_1 t_D \quad (5)$$

同时由于进入测量系统的中低频信号的频率比主振测量信号的频率降低了许多倍，使得相位周期也扩展了许多倍，这就大大地提高了测相精度，有利于相位测量。

2.2 自动数字测相

图 2 中的相位计的实现方法有多种，采用自动数字测相法不仅测距精度高，速度快，而且便于实现数据的测量、记录和处理的自动化。它的原理框图如图 3 所示。

因为检相双稳态触发器(由 RS 触发器组成)需要负跳变触发使之翻转，故在比相之前先将正弦波形的参考信号 e_r 与测距信号 e_m 经过通道 1、2 进行放大整形，变成方波。之后，2 个方波信号分别加至检相触发器的 R、S 端。 e_r 方波的下降沿使触发器“置位”，Q 端输出高电平，相当于用 e_r 方波的下降沿作为鉴相器的“开门”信号。经过对应于相位差 $\Delta\phi$ 的一段时间之后， e_m 方波的下降沿又使触发器“复位”端输出低电平，相当于用 e_m 方波的下降沿作为鉴相器的“关门”信号。因此由检相触发器输出端所得到的检相脉冲宽度(即触发器的置位时间)，对应着两比相信号的相位差 $\Delta\phi$ 。在触发器“置位”期间，与门 1 打开，时标脉冲 CP 可以通过它进入计数器。所以计数器内所累计的时标脉冲数就反映检相脉冲的宽度，也即反映测距信号 e_m 和参考信号 e_r 之间的相位差 $\Delta\phi$ 。

计数器所计的单个检相的脉冲数 m 为

$$m = f_{CP} t_c = f_{CP} \Delta\phi / (2\pi f_c) \quad (6)$$

式中： f_{CP} 为时标脉冲的频率； t_c 为触发器的“置位”时间； f_c 为低频参考信号 e_r 和测距信号 e_m 的频率 $f_c = 1/T_c$ ； T_c 为低频信号 e_r 和 e_m 的周期； $\Delta\phi$ 为 e_r 与 e_m 间的相位差。

式(6)说明，通过与门 1 的时标脉冲数 m 与 $\Delta\phi$ 成正比。

为了减少误差影响，提高测距精度，在量距时要进行多次读数，取平均值作为最终结果。为了消除大

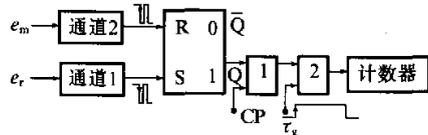


图3 自动数字测相原理图

气抖动及接收电路噪音等的影响,以减小偶然误差,提高测距精度,在检相电路中增加一个闸门时间 τ_g ,在闸门时间 τ_g 内取多次检相的平均值,作为检相结果,其次数可为几百次到几万次。

闸门时间 τ_g 内控制的检相次数 l 可依式(7)来计算

$$l = \tau_g / T_C = \tau_g f_C \quad (7)$$

在闸门时间 τ_g 内,总的测相脉数 M 为

$$M = ml = f_{CP} \tau_g \Delta\phi / (2\pi) \quad (8)$$

将式(8)代入(4)得

$$D = L_\Delta M / (f_{CP} \tau_g) \quad (9)$$

因式(9)中 f_{CP} 和 τ_g 对某一仪器来说是固定值,故该式表明,计数器中累计的脉冲数 M 的多少就反映了两信号 e_r 与 e_m 间相位差 $\Delta\phi$ 的大小。

上述过程说明,自动数字测相中影响单次检相精度的因素有检相触发器、与门电路的开关速度以及时标脉冲的频率等。检相触发器、与门电路的开关速度愈高,则检相精度也愈高。此外,被检相信号波形的好坏对检相精度也有很大影响。引起波形变坏的主要原因是偶次谐波所造成的波形不对称。波形不对称会引起信号在经过通道而进行放大整形时,产生过零触发时间的前后移动,从而使检相触发器“置位”时间长短发生变化——即使检相脉冲宽度发生变化,造成测距误差增大。为了减小波形不对称的影响,需要提高仪器性能,降低噪音,以及采用差分放大、限幅放大等措施,以减小波形失真。

3 影响测量精度的因素及处理办法

3.1 频率漂移

激光测距仪中的主振频率误差,直接决定了仪器的测距精度。它包括2个方面:频率的校准误差和频率的漂移误差。当用高精度的频率计作频率校准时,前者可忽略不计。

产生频率漂移的原因很多,如振荡电路元件性能的变化、晶体老化或质量欠佳、温度变化、电源等。如果只考虑频率误差,由此引起的测距误差 ΔD 为

$$\Delta D / D = \Delta f / f \quad (10)$$

式(10)表明:要使测距精度达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$,则主振频率 f 的稳定度也必须达到相同的量级。而一般石英晶体在 $-20 \sim 50^\circ\text{C}$ 的温度范围内工作时,较难达到此稳定度。为此,采用加恒温措施或晶体温度补偿,以及电路设计上的锁频或锁相等办法来减弱频率漂移的影响。锁相电路的作用在于自动调节本机振荡频率,确保用作检相的低频信号的频率稳定不变。其工作原理如图4所示,当被稳信号的频率与标准信号的频率有偏差时,鉴相器便输出一个反映此偏差大小和方向的电压,该偏差电压经直流放大器和双T滤波器之后,送至频率控制元件,引起控制元件的电容发生变化,从而相应地改变本机振荡器的频率,使之达到标称频率值。

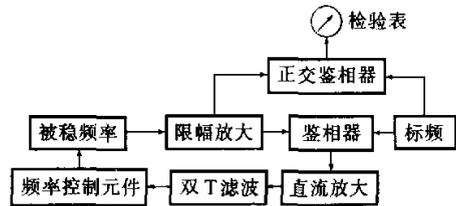


图4 锁相电路原理图

当被稳信号的频率与标准信号的频率有偏差时,鉴相器便输出一个反映此偏差大小和方向的电压,该偏差电压经直流放大器和双T滤波器之后,送至频率控制元件,引起控制元件的电容发生变化,从而相应地改变本机振荡器的频率,使之达到标称频率值。

3.2 大气折射率误差

大气折射率 n 变化将使光波在大气中的传播速度发生变化,从而影响测尺长度,产生测距误差。折射率误差 Δn 与测距误差 ΔD 有下述关系^[2]

$$\Delta D / D = \Delta n / n \quad (11)$$

式(11)说明折射率的精度与测距精度相同,且折射率误差对测距结果的影响是随距离而变的。大气折射率主要受测量环境的温度、湿度和气压等因素的影响。因此需要实时地测量环境参数,进行气象修正。对于GaAs半导体激光器,在一般条件下($1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \geq P \geq 0.90 \times 10^5 \text{ Pa}$, $20^\circ\text{C} \geq t \geq 0^\circ\text{C}$),折射率

误差引起的测距偏差(气象改正值)可近似地用下式计算^[2]:

$$\Delta D = (1.0 \Delta t \pm 0.4 \Delta P) D \times 10^{-6} \quad \text{或} \quad \Delta D = (-1.0 \Delta t \pm 0.4 \Delta P) D \times 10^{-6} \quad (12)$$

式中: Δt 为测量温度与标准气象条件下的温度差($^{\circ}\text{C}$); ΔP 为测量气压与标准气象条件下的气压差(Pa); 标准气象条件是 $P = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $t = 15^{\circ}\text{C}$.

按式(12), 在短程测距的气象修正中, 如果温度每升高 10°C , 则 1 km 距离加 1 cm; 如果气压每上升 $3.32 \times 10^3 \text{ Pa}$, 则 1 km 减少 1 cm.

3.3 光源选择

激光器的种类很多, 主要以固体激光器、气体激光器和半导体激光器应用最广泛. 不同光源在单色性、发散角、输出功率、相干性等主要特性上有差异, 因此, 根据实际测量的需要合理选择激光器, 以充分发挥其长处, 简化装置, 降低造价. 考虑到是在小测程的应用情况, 选用半导体激光器(GaAs), 它的特点是超小型、质量轻、成本低, 且能量转换效率高、寿命长、易于调制.

采用此方法研制的用于体育投掷项目测距的激光测距仪精测频率为 149 855 28 Hz, 在标准大气能见度条件下, 测程为 200 m, 误差为 $\pm(5 \text{ mm} + 5 \times 10^{-6} D)$.

参考文献:

- [1] 郭达志, 周丙申. 激光测距仪 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1978.
- [2] 高林奎, 宋玮. 激光测距 [M]. 北京: 人民铁道出版社, 1977.

Realization of Laser Range Finding Based on Phase

WANG You-sheng, XU Xiao-ping

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The authors introduce the basic principle of laser range finding technology based on phase, propound in detail the automatic digital measurement technique of phase difference and its errors, analyze the effect of single phase-picking precision, frequency drift and atmosphere refractive index, etc. on laser ranging errors and put forward some special improvement methods. The results of laser ranging realization show that adopting phase laser ranging can achieve the precision of $\pm(5 \text{ mm} + 5 \times 10^{-6} D)$.

Key words: laser range finding; phase; accuracy