

双色测距原理

廖复中

(中国计量科学研究院)

双色测距是指同时用两种波长的光做为载波来进行测距。这是七十年代初期发展起来的一种测距新技术。据国外报道,应用双色测距原理,能使几十公里至几百公里甚至更远距离的测距相对精度从大约 10^{-6} 提高到 10^{-7} 量级。这是一项重要的技术突破。本文打算结合实例概述一般原理及特点。

一、前言

用脉冲法进行测距是较早发展起来的一种测距技术,已有广泛的应用。但是,它的精度却受到测时精度的限制,很难提得更高。

相位法测距是利用测相位的办法进行测距,由于它的精度一般比脉冲法高,因而得到更为广泛的应用。像相位雷达、微波测距仪、光速测距仪,近年来出现的激光相位测距仪、激光双纵模测距仪以及本文所叙述的双色测距甚至所谓三色测距等等都是利用相位法测距的原理来进行测距的。当然,它们也都属于无导轨测距技术。从发展趋势来看,为了提高这类仪器的测量精度,一般从两个方面加以改进:

1. 提高调制频率,即压缩调制波长,从而在检相精度相同或降低不多的情况下,测距的分辨率与精度获得提高。

2. 提高大气折射系数的测定精度。例如,就调制频率而言,已从早期的 10 兆赫左右提高到几十、几百甚至上千兆赫。至于第二点的重要性就更加明显,因为在相位法测距中所直接测得的只是被测单程所相应的调制波的半波数 N ,往返真空光程应为

$$L = \frac{Nc_0}{f} = N\lambda_0, \quad (1)$$

其中 c_0 为真空光速, f 为频率, λ_0 为真空波长。如果在介质中(例如在大气中),令平均折射系数为 n 时,则实际的往返距离应为

$$D = N\lambda = N \frac{\lambda_0}{n} = \frac{L}{n}. \quad (2)$$

由此可见,测得 N 可算出 L 。只有再精确地测得 n 才能得到精确的真实距离值 D ,这就是折射系数的测定对测距精度的影响。双色测距正是以能精确地测定大气折射率为特色的一种相位法测距方案。

二、双色测距原理

物理学的研究表明,与大气折射系数有关的因素很多,但主要的受大气密度及水蒸气密度两个因素的影响。在以光为载波的单色或双色测距中,水蒸气对折射系数 n 的影响并不重要,但气压 P 与温度 T 的测定对单色测距的影响却很大。因此由于沿途的 P, T 很难精确测定,从而使大距离测距的相对精度很难达到 1×10^{-6} 以上。实际上的精度一般不超过百万分之几。

1957 年普里莱平 (Прилепин, М. Т.) 及 1965 年本德和欧文斯 (Beder, P. L. and Owens, J. D.) 等人提出了采用双色波测距的方案,其十分突出的优点是温度与气压对测距精度的影响大大减小,几乎可以忽略不计。测距结果只略受空气中水蒸气的影响,而这种影响在测程达到 30 公里时,一般只不过引起二百万分之一的误差。具体原理简述如下:

设有两种波长不同的光,例如文献 [1] 中报道的 Georan I 型双色测距仪中使用脉冲氩离子激光器所发出的绿光和蓝光,并分别用其测距,对真实距离 D 而言将有

$$\left. \begin{aligned} D &= D \left[n_G - \frac{n_G - 1}{n_B - n_G} (n_B - n_G) \right], \\ D &= D \left[n_B - \frac{n_B - 1}{n_B - n_G} (n_B - n_G) \right], \end{aligned} \right\} (3)$$

其中 n_G, n_B 分别代表大气对绿光与蓝光的折射系数, 利用 (2) 式、(3) 式可化为

$$\left. \begin{aligned} D &= L_G - A_G(L_B - L_G), \\ D &= L_B - A_B(L_B - L_G), \end{aligned} \right\} (4)$$

其中

$$\begin{aligned} A_G &= (n_G - 1)/(n_B - n_G), \\ A_B &= (n_B - 1)/(n_B - n_G), \\ A_B &= A_G + 1. \end{aligned}$$

L_B 与 L_G 分别为用两种光所测得的真空光程, ($L_B - L_G$) 为其差值。

由于 L_G 或 L_B 以及 ($L_B - L_G$) 均可精确测得, 而且 ($L_B - L_G$) 与 A_G 或 A_B 只微弱地依赖于气压 P 与温度 T , 从而总的 D 对 P, T 的依赖性就比单色测距仪小得多, 这就是运用双色测距能大大提高测距精度的原理。

在双色测距仪中, 气压 P 、温度 T 、湿度 F 对测距的影响体现在 A 的计算中, 为此只需看对 n 的影响。因为 $n \approx 1$, 为方便计, 引入折射率 $\mu = n - 1$ 的概念, A 用折射率表示的表达式为

$$\left. \begin{aligned} A_G &= \mu_G/(\mu_B - \mu_G), \\ A_B &= \mu_B/(\mu_B - \mu_G). \end{aligned} \right\} (5)$$

对非调制光而言, 波长、温度、气压和水蒸气对相速光折射率 μ_p 的关系已由埃德伦 (Edlen) 公式 (1966) 给出。对调制光而言, 需要引入群速光折射率 μ_g , 这里 $\mu_g = \mu_p - \lambda(d\mu_p/d\lambda)$, 蓝光与绿光 (指 Georan I 中所用的 4580 埃与 5140 埃两条谱线) 的群速光折射率为

$$\left. \begin{aligned} \mu_B &= 296.1910\alpha\beta - 0.05156\beta p, \\ \mu_G &= 290.9931\alpha\beta - 0.05294\beta p, \end{aligned} \right\} (6)$$

其中

$$\alpha = \frac{P[1 + (0.817 - 0.0133t)10^{-6}P]}{760.357},$$

$$\beta = \frac{1.054915}{1 + 0.003661t},$$

其中 p 是以 mmHg 计的水蒸气压, t 是以度计的摄氏温度, P 是以 mmHg 计的大气压。将 (6)

式代入 (5) 式可得

$$A_G = \frac{290.9931\alpha - 0.05294p}{5.1979\alpha + 0.00138p}.$$

取至 5 位数字, 上式可写成

$$A_G = 55.983 - 19.036(p/P) + 3.841(p/P)^2. \quad (7)$$

A_G 的这一表达式对 510~810mmHg、干空气直至饱和空气以及温度达 30°C 的范围均适用。从 (7) 式显然可以看出, 为了分析 P, p 对被测距离 D 的影响, 必须首先分析对 A_G 的影响。为此, 把 (7) 式改写成

$$A_G = a - by - cy^2, \quad (8)$$

其中 $a = 55.983, b = 19.036, c = 3.841,$

$$y = \frac{p}{P}, \text{ 对 (8) 式与 } y \text{ 分别求增量变化有}$$

$$\Delta A_G = (-b - 2cy)\Delta y, \quad (9)$$

$$\Delta y = \left(\frac{\Delta p}{p} - \frac{\Delta P}{P} \right) y. \quad (10)$$

把 (10) 式代入 (9) 式中有

$$\Delta A_G = (-by + 2cy^2) \left(\frac{\Delta p}{p} - \frac{\Delta P}{P} \right). \quad (11)$$

(11) 式便是由 p, P 相对变化求 A_G 绝对变化量的公式, y 是参变量。为了进行数字计算, 令 $P = 760\text{mmHg}$, p 取 0 到 30mmHg 范围内的几个离散值, (11) 式中的第一个括号计算结果列表如下:

表 1

$p(\text{mmHg})$	y	$-by + 2cy^2$
0	0	0
0.8	1×10^{-1}	-0.019
3.8	5×10^{-1}	-0.095
7.6	1×10^{-1}	-0.189
15.2	2×10^{-1}	-0.378
22.8	3×10^{-1}	-0.564
30.4	4×10^{-1}	-0.749

以下分两种情况进行讨论:

1. 假定水蒸气压的测定完全准确, 大气压的测定有 3mmHg 的误差, 即 $\Delta p = 0, \Delta P = 3\text{mmHg}$, 此时

$$\Delta A_G = -(-by + 2cy^2) \frac{\Delta P}{P}, \quad (12)$$

代入 $\frac{\Delta P}{P} = 0.00395$ 及表 1 的数据, (12) 式计算结果及由于 ΔA_G 引起的总的距离误差 $\Delta A_G (L_B - L_G)$ 列于表 2 ($L_B - L_G = 5.2 \times 10^{-6}$).

表 2

$p(\text{mmHg})$	ΔA_G	$\Delta A_G(L_B - L_G)$ (单位 1×10^{-6})
0	0	0
0.8	0.00008	0.0004
3.8	0.00038	0.0020
7.6	0.00075	0.0039
15.2	0.00149	0.0078
22.8	0.00222	0.0126
30.4	0.00296	0.0154

2. 假定大气压的测定完全准确, 水蒸气压的测定有 3mmHg 的误差, 即 $\Delta P = 0, \Delta p = 3 \text{ mmHg}$, 此时

$$\Delta A_G = (-by + 2cy^2) \frac{\Delta p}{p}. \quad (13)$$

对于不同 p 值, $\frac{\Delta p}{p}$ 值也将不同. 按 (13) 式 ΔA_G 的计算结果及由于 ΔA_G 引起的距离误差 $\Delta A_G(L_B - L_G)$ 列于表 3 ($L_B - L_G = 5.2 \times 10^{-6}$).

表 3

$p(\text{mmHg})$	0	0.76	3.8	7.6	15.2	22.8	30.4
$\frac{\Delta p}{p}$	∞	3.95	0.79	0.39	0.20	0.13	0.10
ΔA_G	0.075	0.075	0.075	0.0735	0.075	0.0735	0.074
$\Delta A_G(L_B - L_G)$ 单位 1×10^{-6}	0.39	0.39	0.39	0.384	0.39	0.384	0.385

由表 2、表 3 的结果来看, 大气压与水蒸气压的测定误差同样为 3mmHg 时, 对总测距精度的影响前者比后者小得多, 即使在水蒸气压高达 20mmHg 情况下, 上述大气压的影响仅有 0.01×10^{-6} 左右, 而水蒸气压的影响却有 0.4×10^{-6} 左右.

文献 [1] 给出了同样 P, t, p 测定误差下

物理

对单色测距与使用 Georan I 进行测距时所带来误差的比较表, 现引用如下:

表 4

误差	D 的误差(单位: 1×10^{-6})	
	单色测距	Georan I
$\Delta t = 1^\circ\text{C}$	1.0	0.01
$\Delta P = 3 \text{ mmHg}$	1.2	0.01
$\Delta p = 3 \text{ mmHg}$	0.1	0.4

此表中有关双色测距的数据, 前面文中已经证明. 从表 4 的数据可明显看出, 在用双色测距时, 对难以测准的温度 t 与大气压 P 的测定精度的要求比单色测距大大降低, 实际操作中只需粗测即可. 但是, 对水蒸气压的测定则要求必须准到 1mmHg 以内.

另一误差来自 $L_B - L_G$ 的测定精度, 令其为 δ_L , 则即使 A 精确已知, 对总被测距离的影响也有 $\delta_D = A\delta_L$. 例如, $\delta_L = 0.1 \text{ mm}$, 则 $\delta_D = A\delta_L$ 为 5.6mm, 总相对精度 $\delta D/D = 5.6/D \text{ ppm}$ (其中 D 以公里计, $1 \text{ ppm} = 1 \times 10^{-6}$). 由此可见, 被测距离越长, 相对精度越高. 在 Georan I 双色测距仪中, $L_B - L_G$ 被测定的最小机械分辨率为 0.01mm.

图 1 为假定被测光路温度不断下降情况

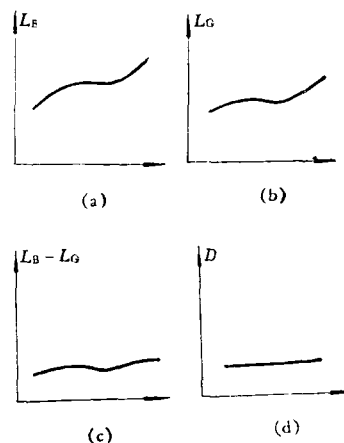


图 1

下, 用双色测距法所测得的距离几乎不受影响的分项图解示意. 其中, (a), (b) 说明由于沿 (下转第 225 页)