

大气中激光测距的几个问题

中国科学院安徽光机所 宋正方

提 要

本文讨论激光测距的大气的修正问题。在测距精度要求达 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 以上时必须进行折射率修正,目标距离大于 $10 \sim 20$ 公里时还须作曲率修正。在温度梯度较小,湍流不强的时间里和离地面尽量高的地方进行测量可以大大减少大气状态变化和湍流的影响。

一、前 言

当前激光测距工作已普遍开展,对生产实践和科学实验起了很大的作用。激光测距的精度是相当高的,脉冲法一般可以达到 1 米左右,而相位法的精度可达几个厘米以下。但是正因为有这样高的精度,带来了一些特殊的问题,即大气状态——气压、温度和湿度变化的影响成了必须考虑的因素。本文的目的就是讨论激光测距,尤其是精密测距和长距离测量中的大气修正问题。

大气对测距的影响归根到底是由于空气折射率在时间和空间上都有变化这一点引起的,它大致表现为下列三个方面:

1. 大气状态的变化使折射率产生变化,从而造成测距误差。这项误差可以用当时的气象参数加以修正,此可称为折射率修正。
2. 折射率在空间的垂直分布是不均匀的,或者说存在折射率垂直梯度。光束在这种空间中即使是水平方向传播,其轨迹也将是一条曲线,使得光程有别于实际距离。而且当目标距离较远时,还存在地球曲率的影响,因此应当进行曲率修正。
3. 大气中存在湍流,亦即大气折射率的时空分布存在随机起伏,造成一个测回中对同一目标所测的数据彼此不同。不过,数据虽有波动,如果数据足够多的话,波动量的平均值是等于零的,所以湍流不会增加测量误差。

此外,在测量空中目标或测月、测卫时也存在由于大气折射而使光程加长的的问题。这方面的修正已发表过一些资料,本文不再赘述了。

二、光波的折射率

任何激光测距机都是以公式

$$L = \frac{1}{2} ct/n \quad (1)$$

作为工作的基础,测得了从激光发出的瞬间至接收到回波信号的时间 t 即可计算出测距机与目标之间的距离 L 。式中 c 是光的真空速度, n 是其折射率。测量的误差在于折射率 n 的变

化(我们假定 t 的测量误差是足够小的)。折射率的数值决定于光波的波长以及大气的气压、温度和湿度,它们的关系一般是由实验求得的。已经提出了很多计算公式,适用的范围和精度各不相同。如果要求有 10^{-7} 以上的精度,可以使用下面的公式^[1,2]:

$$n = 1 + N(\lambda) \times 0.37915 \frac{p}{T} - 15.02 \frac{e}{T} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$N(\lambda) = 80.6051 + \frac{24809.90}{132.274 - \lambda_0^{-2}} + \frac{174.557}{39.32957 - \lambda_0^{-2}} \quad (3)$$

其中 λ_0 是光的真空波长(微米), p 是气压(毫米), T 是绝对温度($^{\circ}\text{K}$), e 是水汽压(毫米), N 为折射率 n 中的小数部分,以 10^{-6} 为单位。这个公式适用于从紫外 0.185 微米直到近红外 1.69 微米的范围内,但对存在较强水汽吸收效应的波长,上式的精度将有所降低。

水汽压的影响对常用的短波长激光来说是不大的,在要求不很高的情况下可以根据实际情况选用下列较简单的公式^[3]:

$$N = 103.5 \frac{p}{T} (1 + 0.00753\lambda^{-2}) \quad (4)$$

$$N = 105 \frac{p}{T} \quad (5)$$

这里 λ 是激光在大气中的波长,它们的精度分别在 10^{-6} 和 10^{-5} 左右。

在相位法测距中用的是调制光束,这时激光以群速度传播,而折射率应以群速折射率来计算,这时公式(3)中的 $N(\lambda)$ 应为

$$N_g(\lambda) = 80.6051 + 24809.90 \frac{132.274 + \lambda_0^{-2}}{(132.274 - \lambda_0^{-2})^2} + 174.557 \frac{39.32957 + \lambda_0^{-2}}{(39.32957 - \lambda_0^{-2})^2} \quad (6)$$

根据上面讨论的折射率公式,我们可以得到计算折射率修正的公式。如果以 $p=760$ 毫米, $T=288.15^{\circ}\text{K}$, $e=0$ 作为参考值(这时的状况称为标准大气状况),则在任意大气状况下由于折射率的改变而产生的距离修正值为

$$\Delta L_N = L \left[N_0 \left(1 - 0.37915 \frac{p}{T} \right) + 15.02 \frac{e}{T} \times 10^{-6} \right] \quad (7)$$

式中 N_0 由公式(3)~(6)之一给出。由此得知,大约当温度差 1°C , 或者气压差 3 毫米,或者水汽压达 17 毫米时可以产生 1×10^{-6} 的误差。为了确保 1×10^{-6} 的精度,对上述参数的测量精度应当保持在上面所指出的值的一半左右。

三、光束的曲率

前面已经指出,光束在大气中传播的轨迹是一条曲线,而它的曲率 C 是直接 与 折 射 率 的 垂 直 梯 度 dN/dh 成正比的,亦即^[4]

$$C = \frac{1}{r} = - \frac{dN}{dh} = - \frac{105}{T} \frac{dp}{dh} + \frac{105p}{T^2} \frac{dT}{dh} \quad (8)$$

其中 r 称为曲率半径,第二个等号后边的负号表示,当 N 随高度减小时光束向下弯曲,这时的曲率 C 定为正值。在海平面标准大气下, $T=288.15^{\circ}\text{K}$, $p=760$ 毫米, $dp/dh \approx -90.8$ 毫米/公里,并且基本上是个常数,这样光束的曲率就直接与温度梯度有关系。我们用 Γ 来表示温度梯度且以温度随高度降低为正值,公式(8)可简化为

$$C = 33.1 - 0.96\Gamma \quad (9)$$

这里如 Γ 以 $^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ 计算, 则 C 以微弧度/公里计算。当 $\Gamma = 34.5^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ 时, 由公式(9)得知这时光束的曲率等于零, 即作直线传播。在温度梯度大于或小于这个数值时光束即向上或向下弯曲。

在光束曲率变化的情况下, 发射角度不变的光束在目标处的投影将会随着偏离它原来的位置, 偏离的数值可由公式

$$l = \frac{1}{2} CL^2 \quad (l \ll L) \quad (10)$$

给出, 由此造成的角度误差是

$$\alpha = CL \quad (11)$$

而距离误差根据图 1 的几何关系可以证明是

$$\Delta L_c = \frac{1}{24} (4C^2 - C_0^2) L^3 \quad (12)$$

式中 C_0 为已考虑测站和目标平均高度的地球曲率。上式在测站和目标高度大致相同的情况下是适用的。

如果瞄准角度是随光束曲率而改变的, 则曲率修正值应为

$$\Delta L_c = \frac{1}{24} (C^2 - C_0^2) L^3 \quad (13)$$

公式(10)~(13)表明, 光斑偏离的位置、角度误差和距离误差都与光束曲率也即与大气温度梯度有关。大气的温度梯度是因时因地而异的, 变化规律比较复杂, 这方面的研究目前还远远不够。就一般情况而言, 晴天正午前后(10~15时)温度梯度随高度的变化大致有如图 2 的趋势^[5]。夜间的温度在一定高度内是随高度增加的, 这称为逆温。逆温最强烈时 Γ 的绝对值可和白天正午同高度上的 Γ 值相当, 有时可能更大一些。在其余时间里温度梯度就比较小, 而

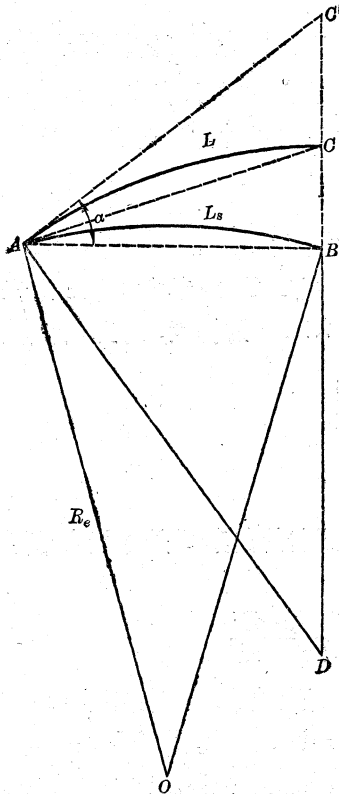


图 1 光束曲率和地球曲率修正的几何关系
 L —测量距离, L_c —实际距离, r —光束曲率半径,
 R_0 —地球半径, α —视仰角

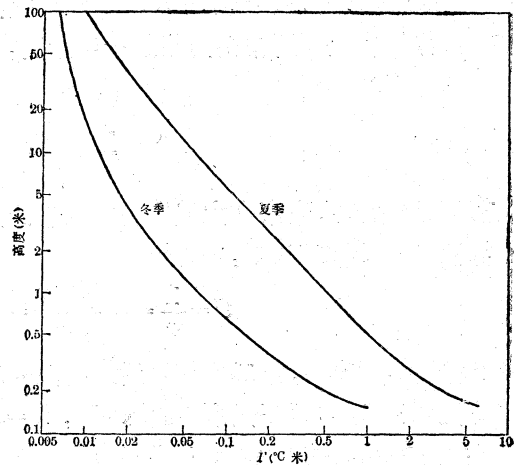


图 2 均匀地面上空正午温度梯度的高度分布

在日出后和日落前的一、二小时内是最小的,甚至可以达到零温度梯度。图3是我们观测到的正常天气下比较典型的表明上述温度梯度周日变化规律的一个例子,同时还画上了一起观测的光斑平均垂直位置 l 的周日变化。其中 T 是高度 2.4 米和 1.2 米之间的温度梯度,光斑是 6328 埃氦-氟激光,传播距离 1 公里,高度 1.7 米,发射角度在该周期内是固定的。可以看到, l 的变化与 T 相当一致。日出 1.5 小时后光斑开始向上升,中午前后升到最高点,逆温时光束向下弯曲,于逆温最强烈的时候降到最低点。一天之内光斑上下变化将近 50 厘米。这样的变化并不算很大,据报道曾在 10 公里处观测到光斑在 30 分钟内垂直变化达 4 米之多。这样的偏差虽然对测距的精度影响不严重,但对目标视角度的误差却是十分可观的(约 $3'$)。

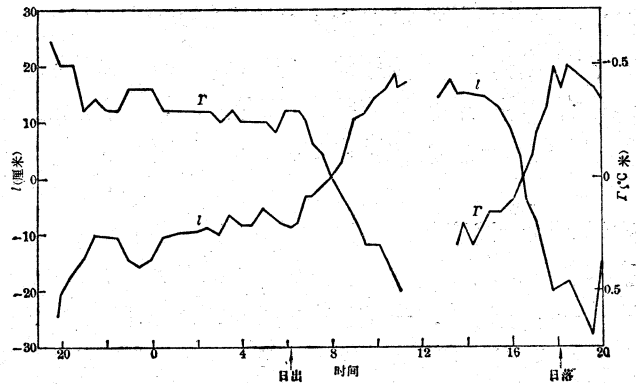


图3 温度梯度和光斑垂直位置的周日变化
(1973年10月17~18日)

下面我们具体讨论一下曲率修正的数值。为了提供一个量的概念,我们按公式(13)对三种有代表性的温度梯度值作了计算,计算结果已列于表1。表中第一个 T 值称为干绝热温度梯度,是衡量大气状态的一个参考温度梯度,大致是在离均匀地面 20 米以上的低空大气中所能达到的温度梯度。第二个 T 值就是前面提到的光束作直线传播时的温度梯度,这时 ΔL_c 纯粹是地球曲率修正。第三个 T 值是近地面 1~2 米的高度上晴天正午经常出现的温度梯度(冬季例外)。表1的结果说明,对于 1×10^{-6} 的精度来说,在温度梯度很小时(大概在 $T \leq 0.07^\circ\text{C}/\text{米}$) 只需考虑地球曲率修正,而在温度梯度较大时(大概在 $0.25^\circ\text{C}/\text{米}$ 或逆温 $0.18^\circ\text{C}/\text{米}$ 以上)曲率的误差是不能忽视的。对于一般的 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 的精度而言,在距离大于 40 公里和 T 大于 $0.5^\circ\text{C}/\text{米}$ (或逆温大于 $0.43^\circ\text{C}/\text{米}$) 时亦必须进行曲率修正。

表1 标准大气状况下不同距离上的曲率修正值

T ($^\circ\text{C}/\text{米}$)	L (公里)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	$\Delta L/L (\times 10^{-6})$									
0.01	-0.102	-0.403	-0.905	-1.61	-2.51	-3.62	-4.93	-6.44	-8.13	-10.2
0.0345	-0.103	-0.411	-0.924	-1.64	-2.57	-3.70	-5.04	-6.59	-8.32	-10.3
0.5	0.729	2.92	6.56	11.7	18.2	26.3	35.7	46.7	59.1	72.9

现在有些单位分别对晴朗白天、晴朗夜晚和阴天取某个固定的值作为修正的依据,由于所取的值不分季节和地点,从我们这里讨论的情况来看,这样做可能达不到预定的精度。

四、大气湍流的影响

由于测距问题涉及的湍流的尺度比较大,可以用几何光学近似地处理光程的变化问题。这就是说公式

$$\Delta L_T = \int_0^L N(x) dx \quad (14)$$

是适用的,其中 $N(x)$ 是点 x 处的瞬时折射率的变化量。根据大量统计,折射率的变化服从正态分布定律, $N(x)$ 的平均值等于零,所以由湍流引起的距离变化量 ΔL_T 的平均值也等于零。但是折射率变化的均方差 σ_N^2 不等于零,从而光程变化量的均方差 σ_L^2 也不为零。根据均方差的定义并由一定的假设可以导出光程变化量的均方差是^[6]

$$\sigma_L^2 = 2\sigma_N^2 aL \quad (15)$$

这里 a 称为湍流的积分尺度。 σ_N^2 和 a 的数值是由湍流的强弱决定的。目前对大尺度湍流的了解还很少,定性地说,在近地面处 σ_N^2 大约为 $10^{-11} \sim 10^{-12}$, 当高度在 $10 \sim 20$ 米以上时 σ_N^2 可降低一个数量级,一天之中在 $9 \sim 15$ 时这段时间内最大,在温度梯度转折点前后约半小时最弱。阴雨天气折射率的起伏要比晴天或云量多变的天气弱一个量级左右,一年中夏季最强冬季最弱。 a 的数值在近地面处大致为米的数量级。根据上面所指出的情况,光程变化的均方根理论估计值在几十公里光程上大致为数毫米到数厘米之间,亦即可以引起 10^{-6} 左右的相对偏差。好在光程变化量的平均值是等于零的,所以一般情况下这项误差不必考虑。不过这个结论是有条件的。第一,平均的时间应当足够长,也就是测量的数据应当足够多,以避免测量的随机性。第二,在这一组测量期间,测距系统和目标必须是稳定的,否则可能在测量数据中引进不稳定因素而造成误差。

除了光速随机涨落之外,大气湍流还能引起光束强度和传播方向的随机起伏,造成“满堂红”——无关门脉冲输入——现象。这种问题属于湍流大气中探测概率的课题,限于篇幅我们这里从略了,但值得指出的是,为了提高探测概率,应当使用口径较大的接收光学系统和发散角较大的光束。

五、小 结

根据上面的分析,我们提出几点初步意见供参考。

1. 对于精度不高于 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 的测距工作大气平均状态变化的影响不必考虑。当要求的精度高于上述量级时必须进行折射率修正,距离超过 $10 \sim 20$ 公里时还须进行曲率修正。

2. 大气湍流的影响表现在测量数据的离散程度上,如果测量的数据足够多,并且测距系统和目标是稳定的,大气湍流的影响可以通过取平均而消除。

3. 大气的温度梯度和湍流的变化规律可以导致这样的结论:在日出后和日落前一到二小时内进行测量是最正确的。这个结论是和某些单位的实践一致的。此外,在阴雨天气、冬天和离地面较高的地方进行测量也可得到较正确的结果。

参 考 资 料

- [1] J. W. Marini, C. W. Murray, Jr.; NASA TM-X-70555.
- [2] E. Peck, K. Reeder; *J. Opt. Soc. Am.*, **62**(1972) 958.
- [3] S. L. Valley, Handbook of Geophysic and Space Environments, Mc Graw-Hill, New York, 1965.
- [4] R. S. Lawrence, J. W. Strohbehn, *Proc. IEEE* **58**(1970) 1523.
- [5] O. G. 萨顿,微气象学,高等教育出版社,北京, 1959.
- [6] C. S. Gardner, M. A. Plonus; *Radio Sci.*, **10** (1975) 129.