

激光测角与测高的大气折射修正

宋正方 丁强

(中国科学院安徽光机所)

本文根据全球平均折射率分布模型计算了不同仰角和高度情况下的射线弯曲度、大气折射角和测高订正值,并用五个典型气候地区的折射率剖面作了同样的计算。比较的结果表明,在一般情况下全球平均模型已能满足通常的要求,若要求更高的精度,则应了解实时的折射率分布。

Atmospheric refraction corrections for angle and altitude
measured with laser

Song Zhengfang, Ding Qiang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

According to a model of the global average refractive index distribution, the ray bending, the atmospheric refractive angle, and the altitude error are calculated for various elevation and altitude. In addition, the same calculations are performed using different refractive index distributions for five typical climate regions. Comparisons between them show that the global average distribution, in general, can be used in the middle-accuracy cases. However, it is necessary knowing about a in-situ refractive index distribution for the case that a higher accuracy is required.

一、引言

大气折射修正的研究已有很长的历史,研究的成果已在天文学、大地测量和无线电波传播等领域得到了广泛的应用。测距机和雷达等测量距离与角度的装置用激光作光源后,测量精度有了极大的提高,因而对大气折射订正提出了新的要求。这不仅是因为光波段与无线电

波段上的空气折射率不同,而且也是由于大气层内折射率分布的细微结构显示了一定的作用。我们已在测距订正方面作过初步探讨[1,2],本文将对测角与测高的订正进行分析。从全球平均折射率分布模型出发,给出了不同高度和仰角上的订正数值,并同五个典型气候地区的资料作了比较。证明在一般情况下全球模型已能满足要求,对于较高的精度则应了解实时的折射率分布。

二、大气折射角

光波在地空之间传播时其轨迹是一条曲线,图1示意地给出了传播轨迹。光线由位于高度 h_1 的测站A以仰角 β 发射至位于高度 h_2 的目标B,AB之间的真实距离为 L_0 。由于大气折射效应,视在距离将为 L ,视仰角(在上对下传播时即为到达角)变为 θ_1 ,从而存在距离误差 $\Delta L=L-L_0$ 和仰角误差 $\alpha=\theta_1-\beta$ 。 α 又称为大气折射角。

假定大气折射率分布是水平均匀的,也可以作为球形分层介质,于是Snell定律成立,

$$r_1 n_1 \cos \theta_1 = r_2 n_2 \cos \theta_2 = \text{常数} \quad (1)$$

式中,带有下标“1”和“2”的量分别为不同层次上的数值,其中 $r_i = r_e + h_i$, r_e 为地球半径, h_i 为第 i 层的高度。从Snell定律出发,利用图1所示的几何关系,不难证明,

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{[\cos(\theta + \tau) / \cos \theta - n/n_0]}{[(n/n_0) \text{tg} \theta_0 - \sin(\theta + \tau) / \cos \theta]} \right\} \quad (2)$$

式中, n_0 和 n 分别为A、B两点处的折射率, τ 为AB两点之间射线的弯曲度。由几何光学方程组可以导出[3]

$$\tau = \int_0^{\theta} d\tau = - \int_{n_0}^n \frac{\cot \theta}{n} dn \approx - \int_{N_0}^N \cot \theta dN \times 10^{-6} \quad (3)$$

这里 $N = n - 1$,以 10^{-6} 为单位,称为折射率模数。

如果起始仰角较大,对式(3)作分部积分,并略去高阶项,得到

$$\tau = N_0 \cot \theta_0 - N \cot \theta \quad (4)$$

即弯曲度可由两端的折射率模数和视仰角来确定。上式在 $\theta_0 > 5^\circ$ 时有足够的精度,仅当 $\theta_0 \leq 5^\circ$ 时误差将超过10%,且随 θ_0 的减小而迅速增大。

(1)~(4)式就是我们讨论测角误差的基本公式。当大气折射率分布确定时,即可由上述公式计算出 α 和 τ 值。

大气折射率的高度分布可以由实时气象探空资料计算,但这种办法只有在特定场合(例如保证高精度)下才是必要的,经济而方便的办法是从历史气象资料统计出平均规律。不少事实已经证明,平均分布模式具有适中的精度。

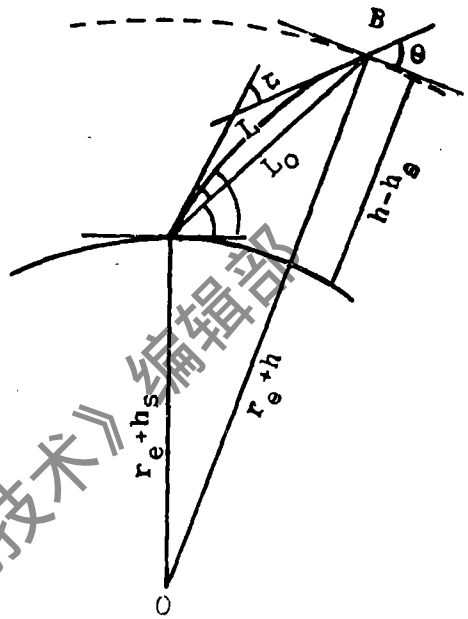


图1 光线传播轨道示意图

众所周知，折射率是大气密度的函数（也即依赖于气压、温度和湿度），同时也和波长有关。在平均状态下大气密度是随高度的增加而按指数规律下降的，因而可以预计折射率剖面一般也应具有这种形式。事实上在无线电波段已经通行这种模型，但光波段上目前还没有明确的大家公认模型，为此有必要根据一定的资料找出适当的模型来。

我国目前还没有建立标准大气，但已明确在建立我国标准大气之前可以使用美国标准大气。我们依据McClatchey等^[4]提出的“模型大气”尝试以指数形式拟合折射率分布，结果发现效果不如三参数的伽马分布^[2]。

$$N(h) = ah^b e^{-ch} \quad (5)$$

对模型大气，我们求得 $a=300$ ， $b=-0.001$ ， $c=1.25 \times 10^{-4}$ 。为了比较我们还统计了昆明自1958年至1975年期间的气象资料，得到 $a=43.26$ ， $b=0.24156$ ， $c=1.533 \times 10^{-4}$ 。两组参数差得这么多的原因是昆明海拔高度达1891.5m。但两者的折射率除了低于四公里以外，其余高度上并没有多大差别。

我们依据伽马模型计算了弯曲度和折射角，表1和表2分别给出了计算结果。从这两张表

表1 球平均模式下的弯曲度(τ)

视仰角	目 标 高 度 (km)					
	1	5	10	20	30	∞
10°	0.0124	0.0468	0.0710	0.0902	0.0955	0.0975
20°	0.00588	0.0223	0.0348	0.0435	0.0462	0.0472
30°	0.00369	0.0140	0.0214	0.0274	0.0291	0.0298
40°	0.00254	0.00963	0.0147	0.0188	0.0200	0.0205
50°	0.00178	0.00678	0.0103	0.0133	0.0141	0.0144
60°	0.00123	0.00466	0.00711	0.00912	0.00969	0.00992
70°	0.00077	0.00294	0.00448	0.00575	0.00611	0.00626
80°	0.00037	0.00142	0.00217	0.00279	0.00296	0.00303

表2 全球平均模式下的折射角(α)

视仰角	目 标 高 度 (km)					
	1	5	10	20	30	∞
10°	0.0761	0.0843	0.0890	0.0928	0.0942	0.0960
20°	0.0379	0.0415	0.0435	0.0452	0.0459	0.0466
30°	0.0248	0.0267	0.0278	0.0287	0.0291	0.0295
40°	0.0178	0.0188	0.0194	0.0199	0.0201	0.0204
50°	0.0131	0.0136	0.0139	0.0144	0.0142	0.0143
60°	0.00937	0.00958	0.00971	0.00981	0.00985	0.00989
70°	0.00609	0.00616	0.00619	0.00622	0.00623	0.00625
80°	0.00301	0.00302	0.00302	0.00303	0.00303	0.00303

可知角度误差主要出现在低仰角 ($\theta_s < 40^\circ$) 和低空 ($h < 5\text{km}$) 的情况下。例如, 在 $\theta_s = 10^\circ$ 、 $h = 5\text{km}$ 时, $\alpha = 5' 8''$, 而在 $h \geq 30\text{km}$ 时, α 只增大了 $40''$ 。这显然是低仰角时光线在低空的路程长, 而 5km 以下的低空大约集中了一半大气质量的缘故。

当 $h \rightarrow \infty$ 时, 也就是考虑大气层外目标的折射时, 这种折射又称为天文折射。Johnson^[5] 和 Wünschmann^[6] 讨论过天文折射问题, 得到了和我们相当一致的结果。

最后应当指出, 公式 (2) 右边的分子和分母均为小量之差, 因此对折射率数值和计算精度相当敏感, 表 2 中的数值在引用时应当注意这个问题。

三、高度订正

在如图 2 所示的情况中测点 B 的高度 h 时也因大气折射而产生误差。在处理这个问题时可以使用等效地球半径 r_e 的概念, 即在这种等效地球上光线将以直线传播。由图 2 的几何关系和等效地球半径, 可以证明高度订正值

$$\Delta h \approx \frac{h^2 \cot^2 \theta_s + h_s^2}{2(r_e + h_s)} (1 - k^{-1}) \quad (6)$$

式中, $k = r_e / r_s$, 称为等效折射系数, 由下式确定,

$$k = [1 + r_s (dn/dh) \cos \theta_s]^{-1} \quad (7)$$

由公式 (7) 可知等效折射系数的数值决定于大气折射率在光线传播方向上的梯度。图 3 给出

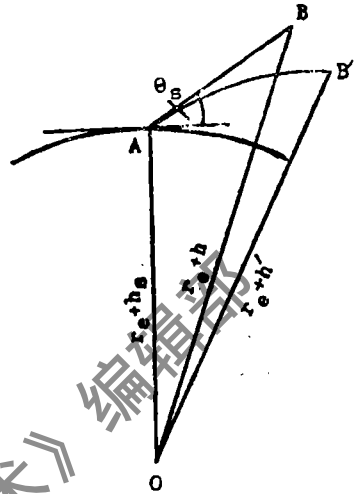


图 2 测高误差示意图

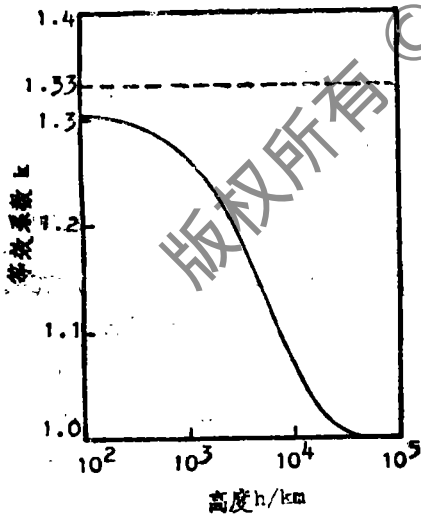


图 3 等效系数与高度的关系

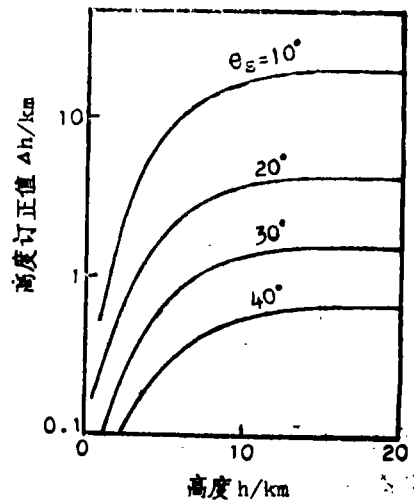


图 4 全球模型下高度订正值

$\theta_s = 0$ 时用全球平均模型 (公式 (5)) 所计算的 k 在不同高度上的数值。在低层标准大气条件

下作为初步近似,可令 $k=4/3$,这就是有名的“4/3”近似^[3],已在微波雷达测高中广泛使用。事实上正如图3所表明的那样,等效折射系数是随高度变化的。当 $h \geq 30\text{km}$ 时, $k \rightarrow 1$,即这时已可认为在这高度以上已无折射效应,光线将沿直线传播。

由已知的 k 值代入公式(6)即可计算高度误差,图4列出了对全球模型计算的结果。可以看到仰角越低时测高误差越大。当 $\theta_0 \geq 40^\circ$ 时, Δh 已在1m以下。因此当测量精度为1m时,对于仰角在 40° 以上的目标,可以不作高度的大气折射订正。

四、讨 论

为了考察上面用全球平均模型计算的结果之代表性,现在我们来讨论我国五个城市两种季节条件下的折射订正问题。我们选择有典型意义的哈尔滨、北京、西安、广州、昆明等五个城市,从中央气象局出版的1979年我国高空气象记录月报选择了一月和七月的各一天,分别作了同全球模型一样的计算。现以比较有普遍意义的等效折射系数为例进行讨论(参见表3)。从表3所列的数据可知,除了低空($\sim 1\text{km}$)各地区,各季节表现出较大差别之外,其余高度上差别很小,10km以上已不足6%,即使气候不同寻常的昆明也无多大差别。

表3 不同地区的等效折射系数($\theta_0 = 10^\circ$)

地 点	时 间 (月—日—时)	高 度 (km)				
		1	5	10	20	30
全 球	平 均	1.262	1.143	1.072	1.019	1.006
哈 尔 滨	1—1—12	1.280	1.161	1.077	1.019	1.005
	7—2—00	1.212	1.134	1.070	1.020	1.006
北 京	1—11—12	1.286	1.162	1.078	1.019	1.005
	7—1—12	1.197	1.127	1.069	1.021	1.007
西 安	1—20—00	1.247	1.152	1.076	1.020	1.006
	7—7—12	1.192	1.125	1.067	1.020	1.006
广 州	1—8—12	1.226	1.138	1.071	1.020	1.006
	7—3—12	1.202	1.126	1.067	1.020	1.006
昆 明	1—9—12		1.141	1.072	1.020	1.006

对其他参数计算的结果表明,当仰角 $\theta_0 = 10^\circ$ 时,折射角的最大差别小于 $1'$,一般在 $0.5'$ 左右,测高订正值的最大差别不超过2.4m($h=30\text{km}$ 时),一般在10~50cm左右。

考虑到我们对气象资料的选取除了能代表冬季和夏季、白天和晚上以及具有高于20km的资料而外别无其他主观意图,因此从上面比较的结果来看全球平均模型有一定的代表性,可以用在适中精度的场合下。如果精度要求比较高,对于气候特殊而且地势较高的地区,最好依据实时的气象资料来进行订正。

参 考 文 献

- [1] 宋正方,《激光》,1977年,第4卷,第5期,第30页。

- [2] 宋正方、丁强,《中国激光》,1986年,第13卷,第9期,第597页。
- [3] B.R.Bean, Troposphere refraction, Advances in radio reaserch, J.A. Saton ed., Academic, London, 1964.
- [4] R.A.McClatchey et al., Optical properties of atmosphere, AD-753075, 1973.
- [5] J.C.强生,《物理气象学》(中译本),科学出版社,1960年。
- [6] F.Wünschmann, Gerlands Beitr, Geophys, 1931, Vol.31, P.83.

收稿日期:1987年10月3日。

(上接第26页)

测距仪都小。例如MT-18小型激光测距机,它经发射系统压缩后的激光发散角为1mrad,而我们的激光器件本身的光束束散角为0.7mrad,即发散角为 $0.7/2=0.35$ mrad。两者相比,我们的器件的发散角要小得多。因此,将此器件装入我们的发射和接收系统的透过率分别为0.368和0.234的潜望式测距仪中,在一般能见度下,能对树林、草坡、土坎等自然目标稳定测距9000m,且工作稳定可靠。如果减少潜望式测距仪的发射和接收系统的透过损耗,提高测程到20000m是可能的。由此看来,此平-凸谐振腔组件的装机效果是良好的。

从我们用牛顿环等厚干涉法调校平-凸谐振腔组件来看,一个突出的优点是既直观,又容易,在一般暗室中进行即可。我们认为此法还可用来调校某些光学系统的光路以某些光学件的中心校定等。

本调校试验得到了邬龙卿、万家荣同志的支持与帮助、沈韵秋、谢尧廷、唐廷章、王光福、杨钧、李华昌、段宝光、李启文等同志参与了部分调试工作,并提出了宝贵建议。在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] C.Э.福里斯 A.Б.季莫列娃,《普通物理学》,第三卷第一分册,高等教育出版社,1956年7月,第30~47页。
- [2] T.C.兰斯别尔格,《光学》,上册,人民教育出版社,1961年11月,第53~58,92~97页。

作者简介:朱建新,男,1940年6月出生。工程师。现从事激光器的设计研制工作。

收稿日期:1987年10月3日。

(上接第57页)

从晶体的结晶学坐标变换到晶体物理学坐标时,重算折射系数的值将引入一个与测量误差相比可忽略的修正值。正如表1所示,我们测量方解石的折射率同文献相符很好,但我们得到的TGS的晶体的折射率测量值(见表2)要比文献数值低0.01或0.02。TGS晶体折射率测量值同文献数的差别,显然在于与TGS晶体表面存在一个过渡层有关,这个过渡层的性质与材料内部性质是不同的^[1]。

因此,本工作采用的方法完全能用于确定光学各向异性介质的折射率。

参 考 文 献 (略)

译自 OMΠ, 1984, No.7, P.3~5.

郑秉秀 译 卢中尧 校