

文章编号: 1007-5461(2001)06-0560-06

卫星目标光学测量大气折射修正

翁宁泉, 曾宗泳, 龚知本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 合肥 230031)

摘 要 本文从实测的大气参数廓线出发, 讨论了对卫星目标进行光学定位测量时, 进行大气折射误差修正时的几个问题, 如大气色散、大气湍流和大气水平不均匀性等对折射修正的影响。首先计算了不同仰角下卫星目标光学测量的大气折射修正量的大小, 讨论了用不同波长测量时大气色散所造成的修正量的偏差。同时还讨论了大气湍流、大气水平不均匀以及大气条件及昼夜变化等气象因素所引起的折射修正误差。

关键词 光学测量; 大气折射修正**中图分类号** P405; P427.1**文献标识码**: A

1 引 言

光波或无线电波在大气中传播时, 由于大气密度的不均匀, 会使传播方向发生改变、偏向密度较高的一边, 这种现象称为大气折射。在对卫星进行定位测量时, 会由于大气折射的影响, 使得测量的光学或无线电路径发生弯曲, 因此测量到的距离和仰角与真实的距离和仰角有偏差, 为了对卫星进行较为精确的定位, 一般需要进行大气折射修正。

进行大气折射修正时, 需要知道沿光路的大气折射率分布情况, 但由于大气条件的多变性和复杂性, 在实际测量中, 很难或几乎不可能有实时的折射率测量资料, 一般只能用模式来推算光路上折射率分布, 这样必然会带来修正误差。同时因为大气折射率不但与大气条件有关, 还与所采用的光波波长有关, 不同波长的光波在大气中传播时, 会产生色散效应, 当采用不同波长分别进行测量时, 也会带来偏差。因此, 在工程应用中, 需要对以上各种误差和偏差有一定的了解, 才能较好地应用得到的测量数据。

本文利用实际的大气探空资料, 计算了不同波长的色散所带来的大气折射修正的偏差, 估算了大气折射率误差所带来的修正的误差。为实际工作中卫星光学测量提供了一个参考。

2 大气折射

2.1 大气折射率

大气折射率与大气密度成正比, 因此与气压、温度和湿度有关, 同时折射率与光波波长有关, 光波的折射率通常用科尔劳希简化公式表示^[1]。

$$(n - 1) = \frac{n_g - 1}{1 + at} \times \frac{P}{1013.25} - \frac{4.125 \times 10^{-8}}{1 + at} e.$$

其中, P : 气压 (百帕), t : 温度 ($^{\circ}\text{C}$), e : 水汽压 (百帕), $a = 0.003661$, n_g : 光波的群折射率, 与波长有关, 根据 1963 年 IUGG 伯克利会议, 有:

$$n_g = 1 + A + \frac{3B}{\lambda^2} + \frac{5C}{\lambda^4}, \quad A = 2876.04 \times 10^{-7}, \quad B = 16.288 \times 10^{-7}, \quad C = 0.136 \times 10^{-7}.$$

由于大气折射率是一个与真空折射率 1 相差很小的数, 在实际问题中常常用折射指数, 单位为 10^{-6} 定义为:

基金项目: 国家高技术激光技术领域资助项目

收稿日期: 2000-06-20; 修改日期: 2001-03-15

$$N = (n - 1) \times 10^6.$$

从上面折射率的计算公式可以得出，在海平面附近高度，温度变化 1 度或气压变化 4 个百帕，折射率变化 1 个 N 单位；大气中水汽压一般在 40 百帕以下，因此在光波波段，湿度对折射率贡献很小，一般在 0.5% 以下。对于不同波长的光波，主要是大气群折射率的变化导致大气折射率的变化。

2.2 折射率高度廓线

大气折射率随气压、温度和湿度变化，从前面公式可以得到，大气折射率随温度变化较快，因此一般而言，大气折射率随高度减小，通常可以用指数下降率来近似表示折射指数随高度的变化： $N(z) = N_0 e^{-\alpha z}$ ，其中 N_0 是地面折射率， z 是高度， α 是系数。

在我们以前的工作中，发现大气对流层和平流层的折射率的下降规律略有不同，可以用两段指数函数分别拟合对流层和平流层折射指数的高度变化，得到更高的精度。

在这里的修正计算中，分别采用了北京、酒泉和合肥的气象探空资料来计算折射率高度变化。其基本情况如表。

	北京	酒泉	合肥
纬度	39° 56'	39° 46'	31°54'
经度	116°17'	98°29'	117°10'
海拔高度 (m)	55	1478	31

北京和酒泉使用 1985 年逐月的月平均资料，合肥使用了 1997-1999 年本所施放的气象探空资料，共 88 份，按月得出月平均。

图 1 是北京年平均折射指数高度廓线。可以看出：由于群折射率的差别，1.315 μm 和 3.8 μm 的光波折射指数比较接近，在地面差别 2~3 个 N 单位，而和 0.55 μm 的折射指数差别较大，在地面可以差接近 15 个 N 单位。图 2 是北京折射率随月份变化的曲线，由于温度的影响，折射指数有较明显的季节变化，一般在冬季较大，夏季较小，在地面可以有 30 个 N 单位以上的差别。在不同的地区折射率也不同，酒泉由于海拔高度较高，气压较低，地面折射率也较小。

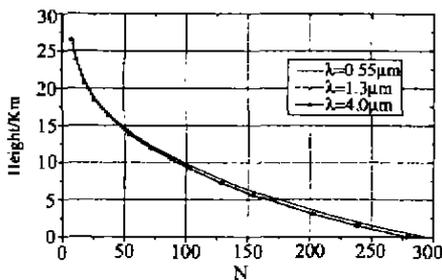


Fig.1 Average Profile of Refractive Index

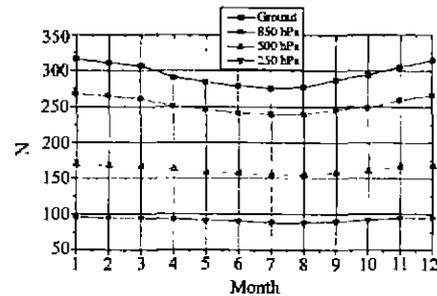


Fig.2 Annual Variance of Refractive Index

3 单站卫星定位折射修正

单站卫星定位测量是指用地球表面的一个站点，测量空中卫星的距离、方位和仰角来确定卫星的位置。由于大气折射率的不均匀性，使得测量的结果与真实值有偏差，造成卫星定位的误差。必须加以修正。一般可以假设大气折射率是水平均匀的，这样可以不考虑方位的修正。折射修正可以按照以下几个步骤进行^[6]，图 3 给出了修正计算的示意图。

3.1 计算卫星目标 T 到地心近似距离 \bar{r}_M

$$\bar{r}_M = (R_e^2 + r_s^2 + 2R_e r_s \sin E_e)^{\frac{1}{2}},$$

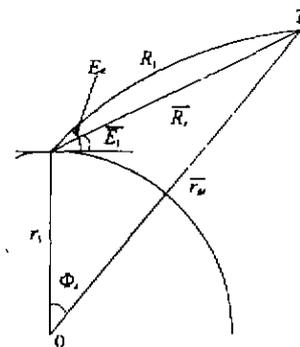


Fig.3 Sketch Map of Refractive Correction

其中 R_e 是测量得到的测站到目标的视距离, E_e 是测量得到的测站到目标的视仰角, $r_1 = a_0 + H$ 是测站的地心距, a_0 是地球平均半径 6371003.7 m, H 是测站海拔高度。

3.2 视距离的计算值 R_i

$$R_i = \int_{r_1}^{\overline{r_M}} \frac{n^2(r) r dr}{\sqrt{n^2(r) r^2 - n_1^2 r_1^2 \cos^2 E_e}}$$

式中 n_1 是测站地面的折射率; $n(r)$ 是不同高度的折射率。用以上两个式子迭代求出精确的目标地心距 $\overline{r_M}$ 。

3.3 计算测站和目标的地心夹角 φ_i

$$\varphi_i = \int_{r_1}^{\overline{r_M}} \frac{n_1 r_i \cos E_e dr}{r \sqrt{n^2 r^2 - n_1^2 r_1^2 \cos^2 E_e}}$$

3.4 计算真实仰角 $\overline{E_i}$ 和真实距离 $\overline{R_i}$

$$\overline{E_i} = \text{tg}^{-1} \frac{\overline{r_M} \cos \varphi_i - r_1}{\overline{r_M} \sin \varphi_i}, \quad \overline{R_i} = \frac{\overline{r_M} \sin \varphi_i}{\cos \overline{E_i}}$$

3.5 计算修正量

$$\Delta E = E_e - \overline{E_i}, \quad \Delta R = R_e - \overline{R_i}$$

4 影响折射修正的几个因素

为了对卫星光学测量有一个较清楚的认识, 本文用以上三个站点的折射率廓线进行了大气折射修正计算。在计算中假定卫星轨道离地球表面 200 km。

4.1 光波折射修正的色散

根据以上折射率和修正方法, 假设卫星离地高度为 200 km, 分别对上述三个站点 12 个月进行修正计算, 计算的波长为 0.55 μm 、1.315 μm 、3.8 μm , 计算的视仰角 20° ~ 80°。分别把三个站点的 12 个月结果平均, 得到了年平均的修正量, 计算的结果见表 1。

表 1 年平均修正量

站 点	仰 角	测距修正量 (m)			测角修正量 (角秒)		
		0.55 μm	1.315 μm	3.8 μm	0.55 μm	1.315 μm	3.8 μm
北 京	20°	56.3	14.3	7.0	158.0	150.7	149.4
	30°	20.6	7.0	4.6	100.3	95.7	94.9
	40°	10.0	4.6	3.6	69.2	66.0	65.5
	50°	5.9	3.5	3.1	48.8	46.5	46.1
	60°	4.0	2.9	2.7	33.6	32.0	31.8
	70°	2.9	2.4	2.4	21.2	20.2	20.0
	80°	2.3	2.1	2.0	10.3	9.8	9.7
酒 泉	20°	47.8	12.1	6.0	134.1	127.9	126.8
	30°	17.6	6.0	3.9	85.3	81.4	80.6
	40°	8.6	4.0	3.1	58.8	56.1	55.6
	50°	5.1	3.0	2.7	41.4	39.6	39.3
	60°	3.4	2.5	2.3	28.5	27.2	26.9
	70°	2.6	2.2	2.1	18.1	17.2	17.1
	80°	2.1	1.9	1.9	8.8	8.4	8.3

合 肥	20°	55.3	14.0	6.9	154.9	147.9	146.6
	30°	20.2	6.9	4.5	98.4	93.9	93.1
	40°	9.8	4.5	3.6	67.9	64.8	64.1
	50°	5.8	3.4	3.0	47.8	45.6	45.2
	60°	3.9	2.8	2.6	33.0	31.3	31.2
	70°	2.8	2.4	2.3	20.8	19.8	19.7
	80°	2.2	2.0	2.0	10.1	9.6	9.5

从结果可以得到以下几个结果: 随仰角的升高, 测距和测角的修正量都迅速减小, 从 20° 升高到 80°, 测距和测角的修正量减小 1 到 2 个量级。测角的修正量在仰角 20° 时有 150 角秒左右, 到仰角 80° 时只有 10 角秒左右; 对不同波长, 波长越长修正量越小, 这主要是由于群折射率不同造成的折射率差别, 波长 0.55 μm 的群折射指数为 305, 1.315 μm 为 290, 3.8 μm 为 288, 后两者差别较小, 与 0.55 μm 差 5~6%, 而后二者与前者的修正量也与前者差 5~6%; 对不同地区而言, 由于三个站点经纬度和海拔高度不同, 修正量也不同, 其主要原因也是折射率的不同, 酒泉海拔高度较高, 折射率较小, 修正量最小。北京和合肥相比, 由于北京纬度较高, 温度相对较低, 折射率较大, 修正量较大。

逐月的计算结果还表明对不同季节而言, 在冬季由于折射率较大, 修正量也较大, 春秋季修正量较小, 夏季最小, 在不同季节里差别也不同, 冬季差别较大, 夏季差别较小。

4.2 大气折射率的水平不均匀

大气折射率不均匀分布主要出现在垂直方向上, 一般大气折射修正主要采用水平均匀分层的大气折射率模式, 但由于地理纬度和天气系统的影响, 气象要素存在水平不均匀的情况, 这样在大尺度和低仰角的折射修正计算时, 水平不均匀性会给修正带来一定的误差。水平不均匀典型的由以下几个因素造成^[2](见表 2):

表 2 水平不均匀及仰角 20° 时折射修正误差

名称	厚度 (km)	水平尺度 (km)	$\Delta T / \Delta X (^{\circ}\text{C}/\text{km})$	测距修正量误差 (m)	测角修正量误差 (角秒)
纬度差	20	10^3	0.01	0.375	0.074
冷高压	10	10^2	0.03	0.062	0.018
锋面	3~5	10^2	0.1	0.125	0.018
海陆风	2	10^1	1~2	0.438	0.080
城市热岛	2	10^1	1~2	0.438	0.080

分别以北京 1 月份为例计算了几种情况下给修正量带来的偏差, 因为只有低仰角情况下光路水平跨度较大, 气象参数的水平不均匀才有较大影响, 表 2 只给出仰角 20° 的情况。可以看到, 和表 1 中平均的修正量相比, 水平不均匀性带来的误差比较小, 可以忽略, 但在较高精度的测量时, 水平不均匀的影响就要加以考虑。

以上几种是水平不均匀的平均情况, 水平不均匀还会出现在一些极端的情况, 如在山区地形下山的阳面和阴面会出现十几度的温度差, 山谷里冷空气堆积也会出现“冷湖”的情况等, 这些极端情况下温度和气压等气象参数的水平梯度较大, 会给折射修正带来较大的误差。

4.3 大气湍流对折射的影响

大气中总是存在不同强度的湍流, 会使得对空中目标进行测量时产生目标的抖动, 特别是给测角带来较大的误差。大气湍流会引起折射率起伏, 一般用来表示大气光学湍流的参数是折射率结构常数 C_n^2 , 其定义为:

$$D_n(r) = \overline{[n(r_0) - n(r_0 + r)]^2} = C_n^2 r^{2/3}$$

表述为: 当湍流满足局地均匀各向同性条件时, 其结构函数只与两点间的距离有关。

C_n^2 的大小表征了大气光学湍流的强弱, 一般在近地面强湍流情况下 C_n^2 为 $10^{-13} (\text{m}^{-2/3})$ 左右, 弱湍流情况下 C_n^2 为 $10^{-16} (\text{m}^{-2/3})$ 左右, C_n^2 一般随高度减小, 图 4. 为实测的 C_n^2 高度廓线^[4].

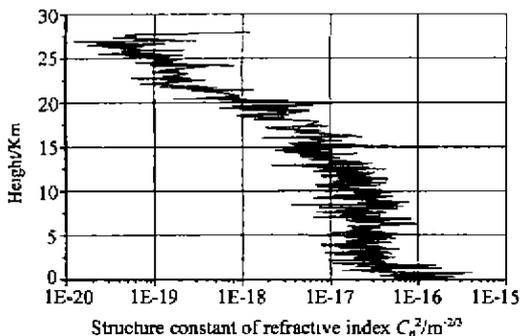


Fig.4 The Profile of Structure Constants of Refractive Index

大气湍流对折射修正的影响, 如测距的均方差 $\langle \Delta L^2 \rangle$ 和测角的均方差 σ_a^2 可以用以下的公式^[3] 计算:

$$\langle \Delta L^2 \rangle = 3.127 \int_0^Z C_n^2(h) \left(\frac{Z-h}{Z} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot \frac{dh}{\left[1 - \frac{\cos^2 \theta_0 n_0^2}{(1 + \frac{h}{R})^2 n^2} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\sigma_a^2 = 2.914 \rho^{-\frac{1}{3}} \int_0^Z C_n^2(h) \left(\frac{Z-h}{Z} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot \frac{dh}{\left[1 - \frac{\cos^2 \theta_0 n_0^2}{(1 + \frac{h}{R})^2 n^2} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

其中 ρ 为接收器的通光孔径, R 为地球半径, h 为高度, Z 为目标高度, θ_0 为仰角, n_0 为地面折射指数, n 为折射指数.

C_n^2 有较明显的日变化, 白天由于太阳辐射给湍流输送能量, 湍流较强, 夜间湍流较弱. 因此在进行折射修正时湍流在白天和夜间会有不同的影响, 表 3 分别是白天和夜间条件下大气湍流造成的误差. 湍流所引起的测距误差较小, 主要是给测角带来误差.

表 3 大气湍流引起的测角误差

仰角 (度)	10	30	45	80
白天	2.15(角秒)	1.28(角秒)	1.08(角秒)	0.91(角秒)
夜间	0.79(角秒)	0.47(角秒)	0.40(角秒)	0.33(角秒)

可以看到, 白天湍流引起的测角误差较大, 夜间较小; 对于不同的仰角, 由于如图 4 所示大气中下层湍流较强, 上层较弱, 低仰角情况下光路在强湍流区路径较长, 相应地湍流带来的误差也较大, 而高仰角情况下误差较小.

4.4 折射率日变化的影响

从上面叙述看到, 折射率与温度、气压等有关, 由于大气温度在一天中随太阳辐射变化, 一般地面温度在一天中平均有 5 °C 左右的变化, 最大可以达到 10 °C 以上, 因此近地面折射率也有明显的日变化, 由于地面长波辐射的影响, 对流层下部折射率也会出现日变化, 这种日变化会随高度减小, 在对流层上部和平流层地面日变化几乎没有影响. 假设地面有 10 °C 的日变化, 相应地有折射指数 10 个单位的日变化, 造成的修正误差见表 4.

表 4 折射率日变化造成的折射修正误差

	10°	30°	45°	80°
测距误差 (m)	8.9	0.7	0.2	0.0
测角误差 (角秒)	10.6	3.3	1.9	0.34

4.4 折射率模式误差的影响

一般用于修正的折射率模型是采用平均的折射率高度廓线统计得到的, 但折射率随天气条件的变化而与平均模型有差别, 我们用逐日的折射率廓线与平均模型比较, 得到模式误差见表 5:

表 5 折射指数模式与实测折射指数偏差

	地面	850 hPa	700 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa	250 hPa	200 hPa
年平均	10.8	8.4	6.5	4.6	4.1	3.3	2.8	1.9
月平均	3.7	3.0	2.8	1.8	1.5	1.3	1.2	1.1

这种误差在折射修正中会带来一定的误差, 在计算折射修正时, 经常采用年平均模型或月平均模型, 这样不同高度上折射指数的误差见表 6:

表 6 模式偏差带来的折射修正误差

仰角		10°	30°	45°	80°
年平均模式	测距误差 (m)	9.9	0.8	0.3	0.1
	测角误差 (角秒)	11.9	3.7	2.1	0.39
月平均模式	测距误差 (m)	3.4	0.3	0.1	0.0
	测角误差 (角秒)	4.1	1.4	0.72	0.15

5 结果讨论

从以上的讨论可以得出卫星目标测量大气折射修正的几个结论:

- (1) 在低仰角时大气折射修正量较大, 随着仰角升高迅速减小;
- (2) 用不同波长的光波进行测量时, 折射修正的大小不同, 特别是低仰角测量时, 要考虑大气的色散效应。
- (3) 大气参数的水平不均匀性、日变化和大气湍流等都会对大气折射造成不同的影响, 要按照实际应用中不同的精度要求加以考虑。
- (4) 在用模式进行大气折射修正时, 不同的模式其修正精度也不同, 在高精度的应用中要考虑到大气的各种模式变化情况的影响。

参 考 文 献

- 1 肖复何. 大气折射改正基础述评 (摘要). 大气折射研究专集 [M], 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992
- 2 曾宗泳等. 大气折射不均匀和大气折射修正. 大气折射研究专集 [M], 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992
- 3 曾宗泳等. 大气湍流对折射修正的影响. 大气折射研究专集 [M], 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992
- 4 翁宁泉等. 大气折射率结构常数垂直分布特征 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 12(4): 673~676
- 5 萧安家. 电磁波测距与大气 [M], 武汉: 湖北科学技术出版社, 1990
- 6 黄捷. 电波大气折射误差修正 [M], 北京: 国防工业出版社, 1999

The Refraction Correction of Optical Measurement to the Satellite

Weng Ningquan, Zeng Zongyong, Gong Zhiben

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031)

Abstract In this paper, some problems are discussed about the refraction correction while tracing and measuring the satellite using optical method. First, the magnitude of refraction correction is calculated under different elevation. Then the affect of optical dispersion is discussed. At last, some other problems such as atmospheric turbulence, horizontal asymmetry and the dairy variety of refractive are discussed.

Key words optics measurement, refraction correction

翁宁泉 1966年生, 副研究员, 1989年毕业于中国科技大学大气物理专业, 主要从事激光大气传输方面工作, 现攻读在取博士学位。