

·光电系统·

光电经纬仪大气折射误差修正方案

韩先平

(92941部队 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要:光学测量大气折射带来的误差已成为限制高精度测量的主要因素。针对实时和事后数据处理两部分分别提出了两种修正方法,并建立了折射误差修正模型及残差模型,经试验验证和误差比对分析,证明两种修正方法计算便捷,模型准确,均能提高实时和事后数据处理的精度。

关键词:折射误差;折射率;修正模型;剩余误差

中图分类号:TN206

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-03-0011-03

Error Correction Methods for Atmospheric Refraction of Electro-optical Theodolite

HAN Xian-ping

(92941 Army Unit, Huludao 125001, China)

Abstract: High accuracy measurement is mainly limited by the error from atmospheric refraction. According to data processing parts in real time and afterwards, two correction methods are proposed respectively. And refraction error correction and residual error models are built. By experimental validation and error comparing analysis, the simple calculation process and accurate models can be got by using these two methods, and can enhance the accuracy of data processing in real time and afterwards.

Key words: refractive error; refractive index; correction model; surplus error

经纬仪测量数据做修正处理主要分为实时和事后两部分^[1]。实时修正^[2]就是在测量过程中,对经纬仪测量的目标参数立即进行大气折光修正计算,及时给出目标的精准测量数据,这要求保证计算的速度;事后修正是为了提高测量数据的精确性,再进行事后数据处理,由于有足够的时间,因此可以把一些因素(如大气的时变特性、大气的水平不均匀性等)考虑在内^[3],从而提高修正精度。文中提出了一套大气折光修正方案,一种是基于球面分层的精准修正方法^[4],可以满足事后数据处理对大气折光的精准修正;另一种是基于经验公式的修正方法^[5],可以满足实时数据处理对计算速度和实时性的要求。

1 大气折射修正方案

1.1 事后折射误差修正

(1)气象数据的准备

首先在对仰角数据作折射修正之前,要对气象参数进行整理。用探空气球或其他气象观测设备测出大气不同高度 h_i (m) 对应的气压 P_i (mb)、温度为 t_i ($^{\circ}\text{C}$)、相对湿度 B_i (%)^[6]。将湿度量纲%转换成 mb

$$e_i = 6.11 \times 10^{\frac{7.5t_i}{b+t_i}} \times B_i \begin{cases} t_i \geq 0 & b = 237.5 \\ t_i < 0 & b = 265.5 \end{cases} \quad (1)$$

(2)折射率计算

基于大气球面分层理论,大气折射率计算模型可以表示为^[7]

$$n_i = 1.0 + (78.4995 \times P_i - 11.27 \times E_i) \cdot (273.16 + t) \times 10^{-6} \quad (2)$$

由于探空仪测量值是随高度变化的离散采样数据,因此式(2)计算得到的折射率也是离散采样数据。如果直接得到了计算好的 M 个离散采样的随高度 h_1, h_2, \dots, h_M 变化的折射率 n_1, n_2, \dots, n_M 值,则按下述方法计算其他高度上 n 的值。①当 $h \leq h_M$ 时,利用拉格朗日插值方法计算 n 的值为 $n = n_{j-1} + (h - h_{j-1})(n_j - n_{j-1}) / (h_j - h_{j-1})$, $h \leq h_M$, $j = \min(h_k \geq h)$; ②当 $h > h_M$ 时, $n = 1 + (n_M - 1) \cdot \exp(v \cdot (h - h_M))$, $h > h_M$

(3) 仰角折射修正

令 $S = ((x - x_{0i})^2 + (y - y_{0i})^2 + (z - z_{0i})^2)^{\frac{1}{2}}$; 其中, x, y, z 为未进行折光修正的目标坐标初值, x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} 为第 i 站的假定坐标值。

令 $R_0 = R + H_0$, 其中, R 为地球半径 = 6 375 000 m。

令 $S_0 = 0$, $S_j = \frac{S}{2}(1 - u_j)$, $\Delta S_j = (S_j - S_{j-1})$, 计算 $R_j = (R_{j-1}^2 + \Delta S_j^2 + 2R_{j-1}\Delta S_j \sin \gamma_{j-1})^{\frac{1}{2}}$ 。令 $H_j = R_j - R$, 由式(2)计算 n_j 。令 $C_j = \frac{\ln(n_{j-1}/n_j)}{h_j - h_{j-1}}$, 其中 \ln 为自然对数, 则有

$$\gamma'_{j-1} = \tan^{-1}(\tan \gamma_{j-1} - \frac{C_j \Delta S_j \sec \gamma_{j-1}}{2}) \quad (3)$$

根据斯耐尔定律^[8]计算第 j 插值点 S_j 的仰角余弦, 并求 γ_j 。

$$\cos \gamma_j = \frac{n_{j-1} R_{j-1}}{n_j R_j} \cos \gamma'_{j-1}, \text{ 得}$$

$$\gamma_j = \cos^{-1} \left(\frac{n_{j-1} R_{j-1}}{n_j R_j} \cos \gamma'_{j-1} \right) \quad (4)$$

计算折射系数微分 $\left(\frac{d_n}{d_h}\right)_j$, 假设每一层内的折射率与高度为线性关系, 则

$$\left(\frac{d_n}{d_h}\right)_j = \frac{n_j - n_{j-1}}{H_j - H_{j-1}},$$

$$\Delta \gamma_j = A_j \frac{S_j}{n_j} \left(\frac{d_n}{d_h}\right)_j \cos \gamma_j, \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

将上述各值求和, 即可得到仰角的折光修正模型为

$$\Delta \gamma = \frac{\rho^*}{2} \sum_{j=1}^K \Delta \gamma_j = \frac{\rho^*}{2} \sum_{j=1}^K A_j \cdot \frac{S_j}{n_j} \cdot \left(\frac{d_n}{d_h}\right)_j \cdot \cos \gamma_j \quad (6)$$

其折射修正残差模型为

$$\Delta^2 \gamma = \Delta \gamma(n + \Delta n) - \Delta \gamma(n) = C \cot \gamma_0 + D \cot^3 \gamma_0 \quad (7)$$

1.2 实时折射误差修正

基于电波折射指数经验变化公式, 建立的电波折射指数计算方法和误差修正算法^[9-10], 可以实现测量数据的快速处理, 并满足外测数据高精度折光修正的需要。

大气折射指数 N 随着高度 h 变化的折射指数经验变化公式^[5]表示如下

$$N(h) = 313.0 \times e^{-0.14385h} \quad (8)$$

式中, 系数 313.0 为经验数据。为保证此经验公式的通用性, 此经验数据亦可用 \tilde{N}_0 表示。那么, 假设当测量点设备中心距海平面高度为 h_0 , 地面的大气折射指数为 $N(h_0)$ 时。这样, 距海平面高度 h 处任一节点的大气折射指数 $N(h)$ 和折射率 $n(h_i)$ 可表示为

$$N(h) = \tilde{N}_0 \times e^{-0.14385h} = (\tilde{N}_0 \times e^{-0.14385h_0}) \times e^{-0.14385(h-h_0)} = N(h_0) \times e^{-0.14385(h-h_0)} \quad (9)$$

$$n(h_i) = 1 + 10^{-6} N(h_i) = 1 + 10^{-6} N(h_0) \times e^{-0.14385(h_i-h_0)} \quad (10)$$

此节点处的大气折射指数是距测量点的相对高度 $h - h_0$ 和地面的大气折射指数为 $N(h_0)$ 的函数。由于地面的气象数据不难测到, 可以开始前测量好, 误差也相对较小, 所以根据上式计算的各高度节点的折射指数是非常简便和高效的。

下面假设光电经纬仪实测目标仰角为 E_c , 而目标相对测量点真实仰角为 E 。将目标高度 h 与高度 h_0 之间分成 s 个小区间, 根据式(9)和式(10)可以较细的划分节点 h_i ($i = 1, 2, \dots, s$), 从而提高折射误差的修正精度, 再采用数值积分的方法计算得真实仰角 E 。真实仰角的计算公式为

$$E = \arctan \frac{h \cos \phi(t) - h_0}{h \sin \phi(h)} \quad (11)$$

式中, $\phi(h)$ 为地心张角, 其表达式为

$$\phi(h) = \int_{h_0}^h \frac{h_0 n(h_0) \cos E_c}{\sqrt{n(h_i)^2 h_i^2 - n(h_0)^2 h_0^2 \cos E_c}} dh_i \quad (12)$$

$$\text{其折射修正量为: } \Delta E = E_c - E \quad (13)$$

2 试验验证

下面以试验来验证文中折光修正方案,飞行目标上加装了GPS高精度测量系统,载波相位差分后定位精度约0.2 m^[11]。多台光电经纬仪跟踪测量目标数据,采用光测双站交汇的方法^[12]对目标数据进行处理。实时和事后数据处理分别采用了文中的两种设计方案,对经纬仪俯仰角测量值进行折光修正。两种修正方案对飞行目标航迹俯仰角修正结果及一次差比较如图1、图2和表1所示。

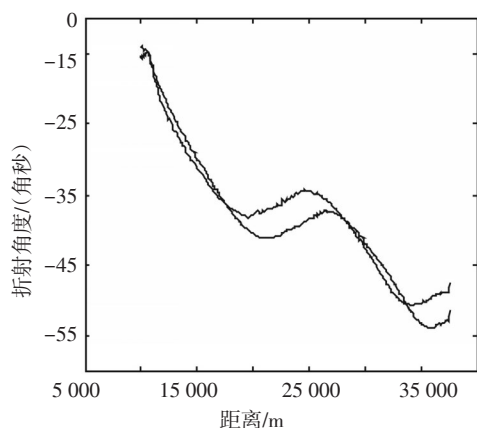


图1 两种修正方案折射角度随距离变化对比图

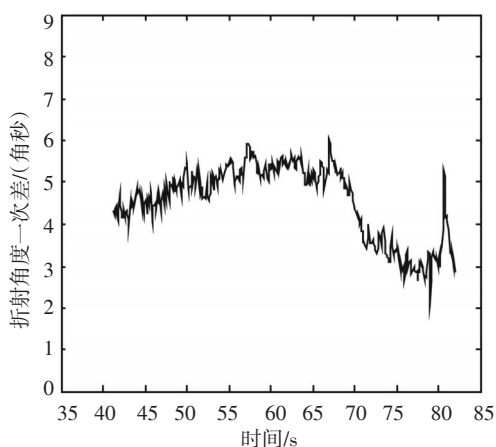


图2 两种修正方案折射角度一次差曲线图

表1 两种修正方案折射角度一次差结果

折射角度	均值 / (角秒)	标准差 / (角秒)	最大值 / (角秒)	最小值 / (角秒)
一次差	3.89	1.08	6.05	1.92

将GPS定位结果数据和光测修正后数据统一到

飞行目标的发射坐标系,用GPS定位结果做真值比较两种修正方案折光修正后对Y方向的影响,见图3和图4所示。其中实粗线代表事后修正结果,虚线代表实时修正结果,图3中细实线代表GPS定位后计算结果,表2为剩余误差统计结果。

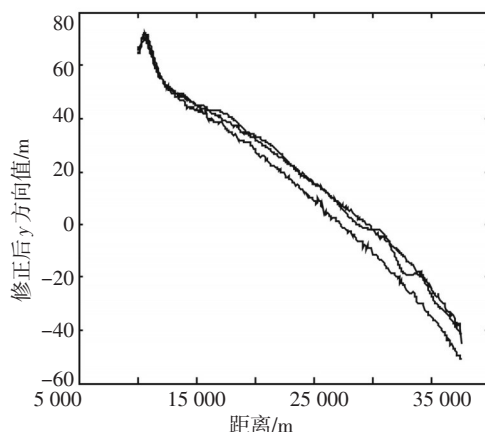


图3 修正后Y方向与GPS测量值随距离变化对比图

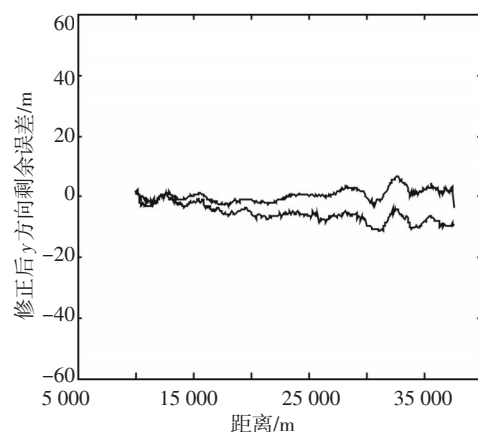


图4 修正后与GPS测量值Y方向剩余误差统计

表2 两种修正方案修正后与GPS测量值Y方向剩余误差统计结果

剩余误差/(残差)	均值/m	标准差/m
事后修正	0.25	2.04
实时修正	-5.45	3.08

3 结束语

通过以上试验数据分析,证明文中提出的两种修正方案合理正确、修正精度高,均能满足光电经纬仪高精度、测量处理的需求。其中事后修正方案计算精度更高、更准确;而实时修正方案由于模型简
(下转第31页)

波器,实验验证了光纤滤波器输出光谱呈现振荡曲线,随拉锥周期不同光纤滤波器的输出波长不同,信道间隔不同,隔离度不同。在实验中,拉锥周期为40,45时,光谱较平坦,因此这一组参数不适合用于制作光纤滤波器;其他拉锥周期50,55,60均可用来制作不同透射波长的光纤滤波器;其中拉锥周期为50时,信道之间的隔离度约为23 dB。

理论分析和实验结果都证明了该方案的有效性和可行性。目前的结果只是阶段性成果,而且都是在实验室环境下完成的,有些地方还有待改进,譬如封装^[8]的问题还有待进行更进一步的研究。

参考文献

- [1] 霍雷,曾晓东,冯喆璐,等.共线型声光可调谐滤波器非互易效应研究[J].光子学报,2011,40(8):1149-1153.
- [2] 林绵海,张伟刚.光纤耦合器的理论、设计及进展[J].物理学进展,2010,30(1):44.
- [3] 杨学礼,王学峰,张蔚.单模光纤耦合器的偏振温度特性研究[J].光子学报,2009,38(4):841-846.
- [4] 李绪友,杨汉瑞,杨建华,等.光纤耦合器稳定性分析及对光纤陀螺的影响[J].中国惯性技术学报,2010,18(2):246-250.
- [5] 孙友文,薛瑞丽,柳春郁,等.一种新型全光纤隔离器的设计[J].红外激光工程,2011,40(11):2187-2190.
- [6] Amir Hosseini, John Covey, David N Kwonget. Tapered multi-mode interference couplers for high order mode power extraction [J]. J. Opt., 2010, 12(7): 075502.
- [7] 柳春郁,叶红安,孔婧.基于马赫-曾德尔滤波器的光纤应力传感器的研究[J].光学学报,2009,29(12):288-29.
- [8] 高宏伟.1*2单模熔拉型光纤耦合器拉锥工艺与PDL的改进[D].大连:大连理工大学,2009.

(上接第10页)

- [6] 耿康,周起勃.动态红外景象仿真技术的研究[J].红外,2006(2):23-27.
- [7] 李平,李卓.基于LabVIEW的红外场景生成器最小可分

辨温差测试[J].北京理工大学学报,2010(4):943-946.

- [8] 李卓,钱丽勋,李平,等.动态红外场景生成技术及其新进展[J].红外与激光工程,2011(2):377-383.

(上接第13页)

单,计算便捷,无需气象参数等优点可以很好地应用到实时光测数据处理中,提高实时计算处理精度。另外,无法测得气象参数时,还可用实时修正方法代替进行折射误差计算,从而满足数据处理的需求。

参考文献

- [1] 刘利生.外测数据事后处理[M].北京:国防工业出版社,1999:15-19.
- [2] ITU_R, P834_3 Effects of tropospheric refraction on radio wave propagation.ITU_R, Recommendations Radio Wave Propagation[M].Volume 2000,P series_Part1,2001:231.
- [3] Smith, W.L. Notes on the relationship between total precipitable water and surface dew point[J]. Journal of Applied Meteorology,1966(5):726-727.
- [4] 杨成利.视距传播中电磁波弯曲引起距离误差的探讨[J].河南职业技术学院学报,2003,31(4):64-65.
- [5] 胡绍林.电波折射误差的经验-分层修正算法[J].中国空间科学技术,2003,8(4):67-71.
- [6] Hopfield H S. Troposphere effect on electromagnetic measured range: Prediction from surface weather data[J].Radio Science,1971, 6(3):357-367.
- [7] G D Thayer.A modified equation for radio refractivity of air [J].Radio Science,1974(10):803-807.
- [8] 黄捷.大气折射误差修正[M].北京:国防工业出版社,1999:31-35.
- [9] Niell, A.E. Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2001(26):475-480.
- [10] 祝转民.高弹道测量数据电波折射误差快速修正算法[J].中国空间科学技术,2001,8(4):31-35.
- [11] 高星伟,陈锐志,李夕银.中性大气对非差伪距定位的影响及其模型改正分析[J].测绘学报,2007,36(2):134-140.
- [12] 谭振江,郭丽虹.经纬仪目标交汇测量及航迹曲线拟合[J].光电工程,2002,29(6):17-20.