

文章编号: 1001-3806(2007)02-0169-03

地球科学激光测高系统大气延迟修正算法

王 欢¹, 李 松^{1*}, 周 辉²

(1. 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079)

摘要: 为了对大气传播延迟误差进行修正, 达到精确测量的目的, 推导了天顶延迟的理论计算公式; 在大仰角情况下提出了一种简化的映射函数, 并把它与连分式映射函数进行了比较。以地球科学激光测高系统在南极的观测数据为依据, 分析得到该系统的平均大气延迟量为 2.35m, 修正误差控制在 12mm 以内。结果表明, 在大仰角情况下, 两者对总延迟的影响差异不超过 0.1mm。总的延迟量可以通过天顶延迟和映射函数计算得出。

关键词: 大气与海洋光学; 大气延迟; 映射函数; 天顶延迟

中图分类号: P228.5 **文献标识码:** A

Correction of atmosphere delay for geoscience laser altimeter system

WANG Huan¹, LI Song¹, ZHOU Hui²

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract Atmospheric propagation delay is one of the main error sources for geodetic measurement. Its correction is necessary for accurate measurements. Atmospheric delay depends on many atmosphere parameters, especially atmosphere density, pressure, temperature, etc. Atmosphere parameter distribution changes with elevation angles, and so does the atmospheric delay. The total delay can be calculated from the zenith delay. The theoretic formula of the zenith delay is deduced, and a simplified mapping function for large elevation angles is proposed and compared with Mendes' new continued fraction form. The difference is less than 0.1mm for the total delay. Lastly, the system's mean total delay and its error is solved on the basis of geoscience laser altimeter system (GLAS) observation data in Antarctica; the results are 2.35m and 12mm, respectively.

Key words atmospheric and ocean optics; atmospheric delay; mapping function; zenith delay

引 言

地球科学激光测高系统 (geoscience laser altimeter system, GLAS) 装载于美国宇航局在 2003 年 1 月发射的世界上首颗激光测高仪试验卫星 (ICESat) 上, 是美国地球观测系统计划 (earth observing system, EOS) 的一部分, 主要用于极地冰盖地形及温度变化监测。GLAS 系统作为用于地球探测的星载激光测高系统, 激光束传输经过大气层必将受到各种影响, 其中由大气折射引起的大气传播延迟误差成为测距精度的主要误差源之一, 它主要受大气的密度、压强和温度等各种大气参数影响^[1]。通常, 不同观测角情况下的大气参数分布不同, 这就导致了大气延迟量会随观测角而发生变化。因此, 大气总延迟 ΔL 通常可表示为天顶延迟 ΔL_z 和一个与高度角相关的映射函数 $m(\varepsilon, P)$ 的乘积^[2]。其中, ε 为高度角, 矢量参数 P 为各种可引入的

气象参数, 如压强、温度等。

1 天顶延迟计算模型

天顶延迟可表示为大气折射率沿传播路径的积分:

$$\Delta L_z = \int_z [n(z) - 1] dz \quad (1)$$

式中, $n(z)$ 为沿传播路径 z 的大气折射率。通常把水气折射率的偶极分量从水气和大气中其它成分的折射率的非偶极分量中分离开来单独处理, 较大的部分与地面气压有关称为“静力延迟项”, 亦称“干项延迟”, 较小的部分与水气分布有关称为“湿项延迟”。积分变量 $(n - 1)$ 为大气折射率差或大气折射本领, $(n - 1) = 10^{-6}N$ 。对于光波段, 折射率差 N 表示为^[3]:

$$N = k_1(\lambda)(p_d/T)Z_d^{-1} + k_2(\lambda)(p_w/T)Z_w^{-1} \quad (2)$$

式中, $k_1(\lambda)$ 和 $k_2(\lambda)$ 是波长 λ 的函数。 p_d 和 p_w 分别是干空气和水气的分压, T 为温度, Z_d 和 Z_w 为干空气和水气的压缩率。经推导, 天顶方向大气延迟的主要部分——静力延迟项 ΔL_h 可简化为:

$$\Delta L_h = 10^{-6}k_1(RM_d)g_m^{-1}p_s \quad (3)$$

式中, g_m 为重力加速度, R 为气体普适常数, M_d 为干

作者简介: 王 欢 (1981-), 女, 硕士, 研究方向为传输光学。

* 通讯联系人。E-mail: yflisong@public.wh.hb.cn

收稿日期: 2006-01-20 收到修改稿日期: 2006-05-15

空气分子量, p_s 是表面压强。天顶的湿项延迟 ΔL_w 可以写成:

$$\Delta L_w = 10^6 k_2' (R M_w) P_1 \quad (4)$$

式中, $k_2' = k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d}$, M_w 为水气分子量, P_1 为总可降水气量, 是大气模型中经常用到的大气变量。最后的天顶延迟式为:

$$\Delta L_z = \Delta L_h + \Delta L_w \quad (5)$$

激光波长为 $1.064\mu\text{m}$ 时, $k_1 = 0.80277\text{K}/\text{Pa}$, $k_2 = 0.66388\text{K}/\text{Pa}$, 取干空气分子量 $M_d = 28.9644\text{g}/\text{mol}$, 水气分子量 $M_w = 18.0152\text{g}/\text{mol}$ 得 $k_2' = 0.16458\text{K}/\text{Pa}$ 将以上参数及 $g_m(90^\circ, 0) = 9.8100\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 代入, 得到:

$$\Delta L_h \approx 2.349 \times 10^{-5} [\text{m}/\text{Pa}] \cdot p_s \quad (6)$$

$$\Delta L_w = 7.620 \times 10^{-5} [\text{m}/(\text{kg}/\text{m}^2)] \cdot P_1 \quad (7)$$

2 映射函数

映射函数将任意仰角的总大气延迟与天顶延迟联系起来。现有映射函数模型较多, MAR NI 第 1 个引入连分式形式的映射函数^[2], DAVIS 在 CFA-2 模型中指出连分式的系数与压强和温度相关, HERR NG 的 MTT 模型^[4]中连分式系数从与气象相关改成与温度和地理位置(纬度)相关。NIELL 的 NMF 模型^[5]中的系数与测站纬度和观测日期相关。必须指出, 以上各种连分式映射函数在本质上都是经验性的数学形式, 既没有经过严格的数学证明, 也没有包含物理概念。

MENDES 等人利用探空气球数据得到基于 MAR NI 改进映射函数的 Mendes 映射函数, 形式为:

$$m(\varepsilon) = \frac{1 + a_1 / [1 + a_2 / (1 + a_3 / \sin \varepsilon)]}{\sin \varepsilon + a_1 / [\sin \varepsilon + a_2 / (\sin \varepsilon + a_3)]} \quad (8)$$

式中, a_1, a_2, a_3, \dots 为待定常数, 可根据气象数据来估计。

模型 MF₁ 的参数数学公式为:

$$a_i = a_{i0} + a_{i1} t_s + a_{i2} \cos \varphi + a_{i3} Z, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

式中, t_s 为测站的温度(摄氏度), φ 为测站纬度, Z 为测站高度。

模型 MF₂ 的参数数学公式为:

$$a_i = a_{i0} + (a_{i1} + a_{i2} \varphi^2) \cos[\frac{2\pi}{365.25}(d - 28)] + a_{i3} Z + a_{i4} \cos \varphi, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

式中, d 为观测日期。上述公式中的系数见参考文献[6]。

从上述 3 个等式可以看出, 映射函数的关系式极其繁琐, 这对于大气延迟量的计算而言是不利的。因此, 作者结合 GLAS 系统, 综合考虑计算成本与精度影响后, 选取了一种最简便的连分式映射函数(simplified mapping function, SMF), 它的形式为:

$$m(\varepsilon) = 1/\sin \varepsilon \quad (11)$$

为了验证(11)式的可行性, 对简化映射函数与其它映射函数的差异做了比较。方法如下: 以 MENDES 的两种映射函数作为检验函数(test function, TF), 用简化式减去检验式, 再乘以天顶延迟的大概值 2.3m , 就得到了计算大气总延迟时, 利用简化映射函数与利用其它不同映射函数对总延迟量造成的相对影响。

在不同纬度及观测角情况下, 图 1 与图 2 中分别给出了简化函数与两个检验函数对总延迟影响的比较结果。通过比较可以看出, 当高度角大于 75° 时, 简化映射函数与 MENDES 的两个映射函数相比非常接近, 延迟误差影响小于 0.2mm 。当高度角大于 80° 时, 延迟误差影响小于 0.1mm 。这对 2.3m 的天顶总延迟来说是可以忽略的。

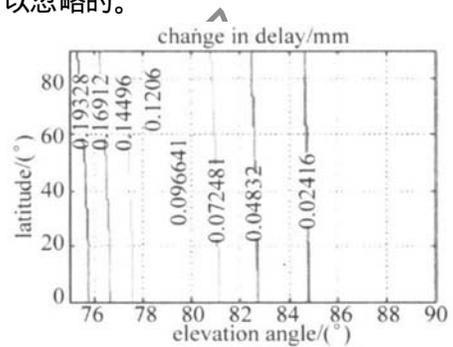


Fig 1 Change in delay of SMF compared to MF₁

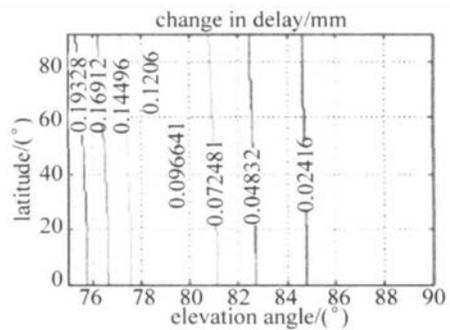


Fig 2 Change in delay of SMF compared to MF₂

在低高度角情况下, 简化映射函数与检验映射函数的误差则很明显。事实上, 其它各种不同的映射函数在低高度角情况下都呈现出较大的分歧^[7], 一方面是因为大气折射在低高度角的变化更为复杂, 另一方面因为, 这些映射函数模型还有很多局限性, 不能客观真实反应大气折射规律。

大多数非扫描型激光测距系统的角度控制精度都很高, 一般在偏天顶方向 10° 以内。表 1 中列出了 ICESat 卫星主要技术参数^{8]}。

由表 1 可知, GLAS 系统所在 ICESat 卫星倾角为

Table 1 ICESat parameters

orbital altitude/km	inclination/(°)	repeat orbit/d	period/min	weight/kg	size/m	power/W
600	94	183	101	970	1.9 × 1.9 × 3.1	640

94°, 偏离天顶方向 4°, 由图可知, 相应高度角 86°附近误差大约为 0.02mm, 其影响完全可以忽略。因此, 可以采用 (11) 式的简化映射函数。

3 误差分析

由 (6) 式和 (7) 式可知, 干项延迟与湿项延迟分别与大气压强和可降水量呈直接线性关系, 如果有大气压强与大气降水量的准确数据, 则大气天顶延迟就可以被修正。

1994 年, 美国自动气象观测站南极洲海岸线的大气压强观测数据^[9]见图 3。由图可知, 年平均大气压强约为 98kPa, 由 (6) 式得年平均干项天顶延迟 $\Delta L_h = 2.30\text{m}$ 。

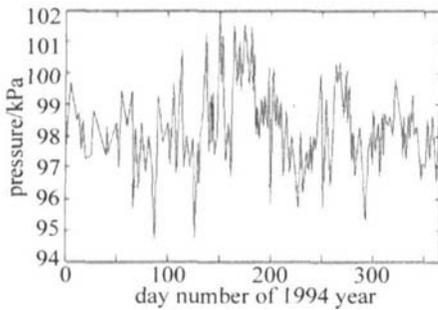


Fig 3 Atmospheric pressure of AWS single coast Antarctica 1994

从时间上来看, 大气压强冬季明显呈现高峰, 夏季则较为低缓。干项延迟的最大值也相应出现在冬季, 大约为 2.37m。夏季平均干项延迟约为 2.28m (南半球季节与北半球相反); 从变化幅度上来看, 也是冬季较高, 夏季较低。

所有南极观测站的大气压强均方根误差可控制在 500Pa 以内, 大部分测站精度能够达到 300Pa, 相应的干项延迟误差为 12mm, 一般可达 7mm, 因此精度约 0.5% ~ 0.3%。

通过 GPS 站点获得的 1999 年南极上空大气可降水量观测值见图 4。

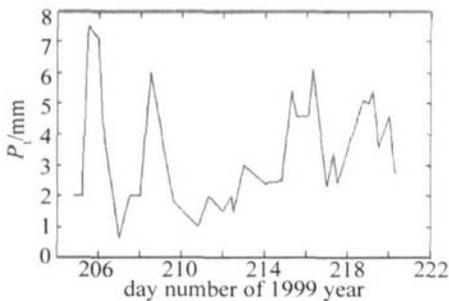


Fig 4 GPS derived values of precipitable water vapor Antarctica 1999

图中, 大气降水量的变化并没有一定的规律, 因为可降水量与天气状况密切相关。总的来说, 南极地

区的可降水量在 5mm 上下变化, 观测误差可控制在 2mm 精度, 由 (7) 式相应延迟 $\Delta L_w = 0.4\text{mm}$, 延迟误差约 0.2mm, 与延迟量在一个数量级上。另外, 可降水量与地域也有很大影响, 热带地区可达 50mm 左右, 因此湿项延迟也从 0.4mm 到 4mm 不等, 其它影响因素也很多, 变化非常复杂。因此, 湿项延迟的精度较低, 但它只占总延迟的很小一部分, 影响几乎可以忽略。

由表 1 知, GLAS 系统卫星倾斜角为 94°, 利用简化 (11) 式得映射函数值 $m(94^\circ) = 1.00244$, 天顶延迟 ΔL_z 为干项延迟 ΔL_h 与湿项延迟 ΔL_w 的和, 约为 2.34m。因此, GLAS 系统的南极上空平均大气总延迟为天顶延迟与映射函数的乘积, 即 $\Delta L = m(\xi, P) \Delta L_z = \Delta L_z \times m(94^\circ) \approx 2.35\text{m}$, 误差控制在 12mm 以内。

4 结 论

鉴于目前还没有一种映射函数能在低高度角观测时达到令人满意的精度, 而当高度角大于 80°时, 简化映射函数形式简洁, 且精度与连分式映射函数相差非常小, 因此, 作者提出的简化映射函数非常适用于大高度角情况下的应用。应用简化映射函数, 分析得到 GLAS 系统在南极上空的大气总延迟约为 2.35m, 误差控制在 0.5% 左右。

参 考 文 献

- [1] TAO X H, SON X Q, CAI X Ch. Research of laser disturbing satellite-based CCD [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4): 414~416 (in Chinese).
- [2] MARINI JW. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile [J]. *Radio Science*, 1972, 7(2): 223~231.
- [3] HERNGT A, QUINN K. Atmospheric delay correction to GLAS laser altimeter ranges [R]. MA: Massachusetts Institute of Technology Cambridge 1999. 3~6, 18~20.
- [4] DAVIS JL, HERRINGT A, SHAPIRO II *et al*. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length [J]. *Radio Science*, 1985, 20(12): 1593~1607.
- [5] NELL A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, B101(2): 3227~3246.
- [6] MENDES V B, PAVLIS G, PAVLIS D E *et al*. Improved mapping functions for atmospheric refraction correction in SLR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 1~4.
- [7] YAN H J. Correction of troposphere atmospheric delay (II): the current main research direction and progress [J]. *Progress in Astronomy*, 1996, 14(3): 181~190 (in Chinese).
- [8] WU Y. The technical properties of ICE Sat [OL/EB]. http://irs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/icesat/, 2003-08-18.
- [9] STEARNS C, WENDLER R. Research results from antarctic automatic weather stations [J]. *Reviews of Geophysics*, 1988, 26(1): 45~61.