

# 北京 SLR 站天顶方向激光测距对流层改正的周期变化

籍利平 程伯辉

(中国测绘科学研究院, 北京 100039)

## The 102 d Variation of Tropospheric Zenith Delay at No. 7249 SLR Station

Ji Liping, CHENG Bohui

**摘要:** 以 IERS 第 36 号技术说明中的对流层延迟模型为基础, 推导激光器波长为 532 nm 的北京激光测距站天顶方向的对流层延迟改正简化公式。利用置于激光测距站的 BJFS GNSS 站 102 d 的气象数据进行天顶方向对流层延迟改正计算。根据 2010 年 5 月 22 日—2010 年 8 月 31 日的 293 028 组气象数据进行计算, 计算结果出现 4 处峰值和 3 处谷值。

**关键词:** 卫星激光测距; 对流层; 天顶延迟

### 一、引言

激光穿过对流层时, 传播路径会因为受到大气层的折射而发生变化。而对流层对于卫星激光测距的影响在天顶方向可达到米级, 不容忽视。对流层对于激光测距的影响, 不仅与激光波长、测站的纬度和大地高有关, 还取决于地面的气象因素<sup>[1]</sup>。为了更精确地确定对流层的影响, 不仅需要采集激光测距数据, 也需要观测测站地面的气压、温度和相对湿度等气象数据。由于天气等因素的限制, 卫星激光测距站无法每日采集距离观测数据和气象数据, 并置的导航卫星观测站可以连续采集气象数据。密集、连续的气象观测数据为精确分析对流层对于卫星激光测距观测的影响提供了数据支持, 为国际地球自转服务局(International Earth Rotation & Reference Systems Service, IERS) 推荐的对流层天顶延迟模型提供了技术支持。本文结合北京卫星激光测距站的实际情况, 对天顶方向的激光测距对流层改正的周期性变化进行探讨和分析。

### 二、激光测距对流层天顶延迟模型

由 IERS 第 36 号技术说明可知, 对流层天顶方向干延迟可根据式(1)进行计算<sup>[2]</sup>

$$d_h^d = 0.002416579 \frac{f_h(\lambda)}{f_s(\varphi, H)} P_s \quad (1)$$

式中  $d_h^d$  为对流层天顶方向干延迟, 单位为 m;  $\lambda$  为激光波长, 单位为  $\mu\text{m}$ ;  $\varphi$ 、 $P_s$ 、 $H$  分别为 SLR 站的纬度、高程(单位为 m)和气压(单位为 hPa)。

式(1)中, 函数  $f_s(\varphi, H)$  为站纬度和高程的函数, 计算公式为

$$f_s(\varphi, H) = 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00000028H \quad (2)$$

式(1)中  $f_h(\lambda)$  为  $\lambda$  的函数, 引入波数  $\sigma = \lambda^{-1}$ , 则有

$$f_h(\lambda) = 10^{-2} \times \left[ k_1^* \frac{(k_0 + \sigma^2)}{(k_0 - \sigma^2)} + k_3^* \frac{(k_2 + \sigma^2)}{(k_2 - \sigma^2)} \right] C_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

式(3)中,  $k_0$ 、 $k_2$ 、 $k_1^*$ 、 $k_3^*$ 、 $C_{\text{CO}_2}$  分别可以取值为  $238.0185 \mu\text{m}^{-2}$ 、 $57.362 \mu\text{m}^{-2}$ 、 $19990.975 \mu\text{m}^{-2}$ 、 $579.55174 \mu\text{m}^{-2}$  和  $0.99995995$ 。

对流层天顶方向湿延迟按式(4)计算

$$d_{nh}^w = 10^{-4} \times (5.316f_{nh}(\lambda) - 3.759f_h(\lambda)) \frac{e_s}{f_s(\varphi, H)} \quad (4)$$

式(4)中  $d_{nh}^w$  为对流层天顶方向湿延迟, 单位为 m;  $e_s$  为水气压, 单位为 hPa;  $f_{nh}(\lambda)$  可由下式计算

$$f_{nh}(\lambda) = 0.003101(\omega_0 + 3\omega_1\sigma^2 + 5\omega_2\sigma^4 + 7\omega_3\sigma^6) \quad (5)$$

式中,  $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  分别可以取值为  $295.235$ 、 $2.6422 \mu\text{m}^2$ 、 $-0.032380 \mu\text{m}^4$ 、 $0.004028 \mu\text{m}^6$ 。

在地球表面 相对湿度与水气压的关系式为<sup>[3]</sup>

$$e_s = RH \cdot e^{(-37.2465 + 0.2131667T_s - 0.0002569087T_s^2)} \quad (6)$$

式中  $e_s$  为水气压, 单位为 hPa;  $RH$  为相对湿度;  $T_s$  为测站温度, 计算时采用绝对温度值。式(1)和式(4)之和即为天顶方向激光测距对流层改正。

收稿日期: 2011-04-14

作者简介: 籍利平(1965—), 男, 河北高邑人, 工程师, 主要研究方向为空间大地测量。

### 三、北京SLR站天顶对流层改正的简化公式

北京SLR站激光器波长为532 nm,即0.532 μm,在文件SLRF2005\_POS + VEL\_snx.txt中的纬度为39°36'25"<sup>[4]</sup>。若π取3.141 592 653 589 79,则北京SLR站的纬度为0.691 271 587 210 弧度;北京SLR站大地高为82.2 m。

北京SLR站在国际激光测距服务组织中的测站编号为7249,故在公式下标中增加了相应信息符号。将上述波长、纬度和大地高依次代入,则式(1)可简化为

$$d_{h7249}^z = 0.002\ 417\ 841 P_s \quad (7)$$

式(4)可以简化为

$$d_{nh7249}^z = 0.000\ 155\ 76 e_s \quad (8)$$

由式(6)~式(8)即可计算北京SLR站天顶方向激光测距的对流层改正。

### 四、102 d的数据计算实例

北京SLR站与BJFS GNSS站并置。在ITRS2000并置站中,BJFS站至SLR站的(X,Y,Z)坐标差分别为(-16.501,118.295,-146.316)<sup>[5]</sup>,距离为188.877 m。

BJFS GNSS站自2010年5月22日开始以每分钟2次的采样率采集了气压、温度和相对湿度数据。

每天采集的气象数据为2880组,除只采集了2148组数据外,其他日期均连续正常采集。2010年5月22日—2010年8月31日期间,采集了293 028组气象数据。选取该站102 d的连续观测数据,进行激光测距天顶方向对流层改正计算。

气象仪器每天形成一个文件,按时间顺序合并采用气象数据文件之前,需要进行剔除数据表头的预处理,冗余的气象数据也需要消除。

由于单张电子表格的最大行数为66 536,远小于293 028,因此,计算分多个表格进行,分别统计了对流层延迟改正的峰值和谷值。对流层延迟改正的峰值和谷值统计见表1。

表1 对流层延迟改正峰谷值与对应气压对照

日期	峰值/m	气压/hPa	日期	谷值/m	气压/hPa
2010-06-03	2.439 0	1 008.6	2010-06-16	2.387 0	987.1
2010-07-24	2.421 4	1 001.3	2010-07-29	2.379 8	984.1
2010-08-06	2.434 2	1 006.6	2010-08-14	2.388 5	987.7
2010-08-26	2.431 5	1 005.5			

由表1可以看出,在102 d的观测中,对流层对于天顶方向延迟的影响呈现周期性变化。峰值的间隔为51 d、13 d、20 d,谷值的间隔为53 d、-16 d等。峰值和谷值的出现成季节性变化,前两组的半波长接近。在气压偏高的6、7月份周期长,而自8月初开始,天顶方向延迟的影响周期缩短。

### 五、结束语

由于观测时间段和数据量的限制,本文只是对102 d对流层影响激光测距的天顶方向改正进行了初步分析,对其周期性变化考察的严密性尚待提高。

为了进一步分析对流层对激光测距的影响,需要进行如下工作:

1) 延长气象数据的采集时间段,扩展到整个年度或者连续数年,这样发现的周期性变化更可靠。

2) 对流层延迟改正对于激光测距的影响,与过顶卫星的天顶距关系密切,天顶距越大,对流层延迟越大。投影函数描述了测站区域对流层总延迟和天顶方向延迟的函数关系(与测站气压纬度和大地高有关),对水气压经验公式的采用也需要作进一步考察和研究,以便更深入地了解对流层延迟对于卫星激光测距的影响。

### 参考文献:

- [1] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社,1995.
- [2] PETIT G, LUZUM B. IERS Technical Note No. 36 [C] // Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. Frankfurt am Main [s. n. ] 2010.
- [3] 陈招华. 区域精密对流层延迟建模[D]. 长沙: 中南大学,2010.
- [4] CINZIA L. SLRF2005\_POS + VEL\_snx.txt [EB/OL]. [2011-02-05]. ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/slr/products/resource/reanalysis\_2007/SLRF2005\_POS + VEL\_snx.txt.
- [5] 李广宇. 天球参考系变换及其应用[M]. 北京: 科学出版社,2010.
- [6] 徐杰,孟黎,任超,等. 对流层延迟改正中投影函数的研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(5): 120-124.
- [7] 周西华,梁茵,王小毛,等. 饱和水蒸气分压力经验公式的比较[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版,2007,26(3): 331-333.