

# GPS 精密单点定位中对流层延迟模型改正法 与参数估计法的比较

施展,孟祥广,郭际明,刘东明  
(武汉大学测绘学院,湖北武汉430079)

## Comparison between Modeling Method and Parameter-estimation Method in Tropospheric Delay Correction of GPS Precise Point Positioning

SHI Zhan, MENG Xiangguang, GUO Jiming, LIU Dongming

**摘要:**对 GPS 对流层延迟改正的两种方法——UNB3 模型改正法和参数估计法进行深入的探讨。在精密单点定位程序中,分别利用两种方法对 IGS 跟踪站数据进行坐标计算。结果表明,参数估计法在高程方向上的精度优于 UNB3 模型改正法,平面坐标精度相当;UNB3 模型改正法在收敛速度上略优于参数估计法。

**关键词:**精密单点定位;对流层延迟;模型改正;参数估计

对于 GPS 卫星的电磁波信号来说,对流层的大气为非色散介质,因而不能用与消除电离层延迟类似的观测值组合方法来消除对流层延迟。有关对流层延迟的改正方法,国内外的学者作了大量的研究,并提出了很多方法,如模型改正法、参数估计法等。目前,模型改正法使用得较为普遍,且经过不断的精化,模型改正的结果也越来越好。而参数估计的方法以平差理论为出发点,对延迟进行修正,也取得了很好的结果。本文讨论了 GPS 对流层延迟改正模型中的 UNB3 模型,以及参数估计法。并通过计算 IGS 跟踪站的大量数据,对模型改正法与参数估计法在精度和效率上进行比较,得出一些有益的结论。

### 一、对流层延迟模型改正

#### 1. UNB3 天顶延迟改正模型

对流层模型改正可分为干延迟改正和湿延迟改正两个部分,一个完整的对流层改正模型又包括天顶延迟改正模型和映射函数两个部分。对于某一方向的对流层延迟,可先求出天顶方向的对流层延迟,再经过投影映射到该斜路径上。具体可用下式表示:

$$d_{\text{trop}} = d_{\text{hyd}}^z \cdot m_{\text{hyd}} + d_{\text{wet}}^z \cdot m_{\text{wet}} \quad (1)$$

其中,  $d_{\text{trop}}$  为对流层总延迟;  $d_{\text{hyd}}^z$ ,  $d_{\text{wet}}^z$  分别为对流层天顶方向干延迟和湿延迟;  $m_{\text{hyd}}$ ,  $m_{\text{wet}}$  分别为对流层干

延迟和湿延迟的映射函数。

UNB3 的天顶延迟改正模型是由 Saastamoinen 模型精化而来的<sup>[1]</sup>。它的气象参数包括大气压  $P_0$  (mbar)、温度  $T_0$  (K)、水汽压  $e_0$  (mbar)、温度变化率  $\beta$  (K/km) 和水汽随高度变化的指数  $\lambda$ 。这 5 个气象参数值随测量时间和测站处的地理纬度的变化而变化。UNB3 模型提供了几个特定纬度的气象参数格网值,格网表见参考文献[1],这些格网点上的气象参数值是根据 1966 年 US Standard Atmosphere Supplement 的温度和湿度轮廓线从海平面处推算出来的。

对于其他纬度上的气象参数,可通过内插得到。内插公式如下<sup>[1-2]</sup>:

$$\zeta(\Phi, t) = \begin{cases} \zeta_{\text{avg}}(\Phi_i) + \frac{[\zeta_{\text{avg}}(\Phi_{i+1}) - \zeta_{\text{avg}}(\Phi_i)](\Phi - \Phi_i)}{\Phi_{i+1} - \Phi_i} - \\ \left\{ \zeta_{\text{amp}}(\Phi_i) + \frac{[\zeta_{\text{amp}}(\Phi_{i+1}) - \zeta_{\text{amp}}(\Phi_i)](\Phi - \Phi_i)}{\Phi_{i+1} - \Phi_i} \right\} \cdot \\ \cos\left(\frac{2\pi(t - T_0)}{365.25}\right), 15^\circ < |\Phi| < 75^\circ \\ \zeta_{\text{avg}}(15^\circ) - \zeta_{\text{amp}}(15^\circ) \cos\left(\frac{2\pi(t - T_0)}{365.25}\right), \\ |\Phi| \leq 15^\circ \\ \zeta_{\text{avg}}(75^\circ) - \zeta_{\text{amp}}(75^\circ) \cos\left(\frac{2\pi(t - T_0)}{365.25}\right), \\ |\Phi| \geq 75^\circ \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\zeta$  为某一气象参数内插值;  $\Phi$  为测站处地理纬度;  $t$  为年积日;  $\Phi_i, \Phi_{i+1}$  为格网值表中与  $\Phi$  相邻的两个格网点地理纬度; 年积日  $T_0 = 28$ 。

UNB3 对流层天顶延迟改正模型为<sup>[1]</sup>

$$\left. \begin{aligned} d_{\text{hyd}}^z &= \frac{10^{-6} k_1 R_d}{g_m} \left( 1 - \frac{\beta H}{T_0} \right)^{\frac{\lambda}{R_d \beta}} P_0 \\ d_{\text{wet}}^z &= \frac{10^{-6} k'_3 R_d}{g_m \lambda' - \beta R_d} \left( 1 - \frac{\beta H}{T_0} \right)^{\frac{\lambda' \beta}{R_d \beta} - 1} \frac{e_0}{T_0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中,  $k_1 = 77.604 \text{ K/mbar}$ ;  $k'_3 = 382\,000 \text{ K}^2/\text{mbar}$ ;  $g = 9.806\,65 \text{ m/s}^2$ ;  $R_d = 287.054 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}^{-1})$ ;  $H$  为测站高程(单位为 m);  $g_m = 9.784 \times [1 - 2.66 \times 10^{-3} \cdot \cos(2\Phi) - 2.8 \times 10^{-7} H]$ , 单位为  $\text{m/s}^2$ ;  $\lambda' = \lambda + 1$ 。

## 2. Niell 映射函数

UNB3 对流层改正模型的映射函数采用的是 Niell 映射函数<sup>[3]</sup>。Niell 映射函数考虑了大气层分布随时间周期性变化的特性。它能更好地反映测站上空的气象参数, 而非仅仅局限于测站所在的地表附近的气象状况。Niell 映射函数仅与卫星高度角、测站高程、测站地理纬度和年积日有关。

Niell 干延迟映射函数模型为

$$m_{\text{hyd}} = \frac{1 + \frac{a_{\text{hyd}}}{b_{\text{hyd}}}}{1 + \frac{a_{\text{hyd}}}{1 + c_{\text{hyd}}}} + \frac{\sin E + \frac{a_{\text{hyd}}}{b_{\text{hyd}}}}{\sin E + \frac{a_{\text{hyd}}}{1 + c_{\text{hyd}}}} \cdot \frac{1 + \frac{a_{\text{ht}}}{b_{\text{ht}}}}{1 + \frac{a_{\text{ht}}}{1 + c_{\text{ht}}}} \cdot \frac{H}{1\,000} \quad (4)$$

其中,  $E$  为卫星高度角;  $H$  为测站高程;  $a_{\text{ht}}, b_{\text{ht}}, c_{\text{ht}}$  的值分别为  $2.53 \times 10^{-5}, 5.49 \times 10^{-3}, 1.14 \times 10^{-3}$ 。Niell 模型同样给出了干延迟和湿延迟系数在几个特定纬度的格网值<sup>[2]</sup>。测站处的三个干延迟映射系数  $a_{\text{hyd}}, b_{\text{hyd}}, c_{\text{hyd}}$  可采用与式(2)相同的形式利用格网表提供的值内插得到。

Niell 湿延迟映射函数模型为

$$m_{\text{wet}} = \frac{1 + \frac{a_{\text{wet}}}{b_{\text{wet}}}}{1 + \frac{a_{\text{wet}}}{1 + c_{\text{wet}}}} + \frac{\sin E + \frac{a_{\text{wet}}}{b_{\text{wet}}}}{\sin E + \frac{a_{\text{wet}}}{1 + c_{\text{wet}}}} \quad (5)$$

其中,  $E$  为卫星高度角;  $a_{\text{wet}}, b_{\text{wet}}, c_{\text{wet}}$  根据 Niell 湿延

迟映射模型系数格网值<sup>[2]</sup>内插得到。湿延迟模型不考虑时间因素, 所以内插公式只与纬度相关, 与年积日无关, 得到内插公式为

$$a(\Phi) = \begin{cases} a_{\text{avg}}(\Phi_i) + [a_{\text{avg}}(\Phi_{i+1}) - a_{\text{avg}}(\Phi_i)] \cdot \\ (\Phi - \Phi_i) / (\Phi_{i+1} - \Phi_i), & 15^\circ < |\Phi| < 75^\circ \\ a_{\text{avg}}(\Phi_i), & |\Phi| \leq 15^\circ \text{ 时 } \Phi_i = 15^\circ, \\ |\Phi| \geq 75^\circ \text{ 时 } \Phi_i = 75^\circ \end{cases} \quad (6)$$

$a(\Phi)$  为测站处的湿延迟系数  $a_{\text{wet}}$  的值;  $b_{\text{wet}}, c_{\text{wet}}$  的值可类似求出。

## 二、对流层延迟使用参数估计

对流层折射影响通常表示为天顶方向的对流层折射量  $R$  和同高度角相关的投影函数  $M$  的乘积。并且对流层延迟中 90% 是由于分量延迟; 只有 10% 是由水汽引起的湿分量延迟。因此, 对流层延迟可用天顶方向的干、湿分量延迟及其相应的投影函数表示。

$$\Delta R_{\text{trop}} = \Delta R_{z, \text{dry}} M_{\text{dry}}(E) + \Delta R_{z, \text{wet}} M_{\text{wet}}(E) \quad (7)$$

式中,  $\Delta R_{\text{trop}}$  为对流层总延迟;  $\Delta R_{z, \text{dry}}$  为天顶方向对流层干分量延迟;  $M_{\text{dry}}(E)$  为相应的对流层干分量投影函数;  $\Delta R_{z, \text{wet}}$  为天顶方向对流层湿分量延迟;  $M_{\text{wet}}(E)$  为相应的对流层湿分量投影函数。

对流层延迟影响利用模型改正后, 干分量部分的改正精度可以达到厘米级, 而湿分量部分的残余影响还比较大。在 GPS 精密单点定位中, 通常利用参数估计的方法将对流层湿分量的残余影响当作一个参数进行估计。一般比较好的方法有线性分段函数法、随机游走法<sup>[4]</sup>。

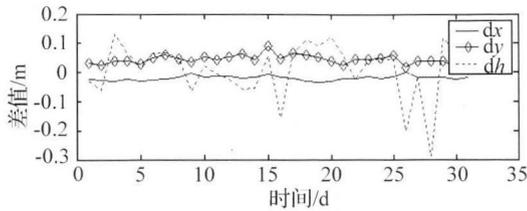
## 三、计算结果分析

对 IGS 跟踪站(UNB 站)的 2008 年 10 月的观测数据利用自编程序进行精密单点定位解算, 星历采用 SP3 精密星历文件。对流层延迟分别用 UNB3 模型改正和参数估计的随机游走法改正。

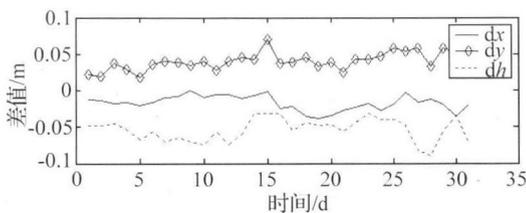
将用两种改正方法计算的坐标与 IGS 站提供的坐标均转换到高斯平面投影坐标系中, 对结果(每天 24 h 计算一个定位坐标, 共计算 31 d)进行比较, 差值如图 1 所示。

用 UNB3 模型改正法计算的结果,  $x$  方向的中误差为  $\pm 0.021\,2 \text{ m}$ ,  $y$  方向的中误差为  $\pm 0.046\,0 \text{ m}$ ,  $h$  方向的中误差为  $\pm 0.093\,5 \text{ m}$ 。用参数估计法计算的结果,  $x$  方向的中误差为  $\pm 0.020\,1 \text{ m}$ ,  $y$  方向的中误差为  $\pm 0.041\,4 \text{ m}$ ,  $h$  方向的中误差为  $\pm 0.056\,3 \text{ m}$ 。

根据各个方向的中误差对比可以看出,UNB3模型改正法与参数估计法在平面上的精度相当,误差在毫米级;在高程方向上,参数估计法的精度要优于UNB3模型改正法。



(a) UNB3模型改正计算坐标与IGS站提供坐标的差值



(b) 参数估计法计算的坐标与IGS站提供坐标的差值

图1 两种方法解算坐标与IGS站提供坐标的差值

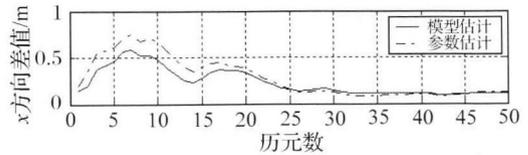
取某一天(D284)的数据,用两种方法分别计算每个历元的定位坐标,将结果转换至高斯平面,对两种方法的解算收敛速度作比较。结果如图2所示,其中三个方向的纵坐标均减去了一个固定值,该固定值是根据IGS跟踪站数据求出的准确高斯平面坐标值。

由图2可以看出,在平面上两种方法的收敛速度相当;在高程方向,用UNB3模型改正法求出的差值收敛至0.5m的速度要明显优于参数估计法。

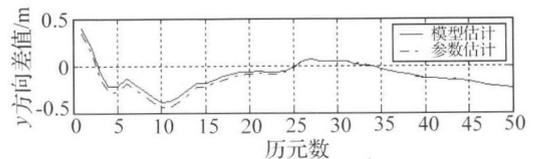
#### 四、结束语

本文对对流层UNB3改正模型和参数估计方法作了详细介绍。下载IGS跟踪站(UNB3)2008年10月份数据进行计算,对两种方法的计算结果进行比较分析。结果表明,在坐标精度方面,参数估计法

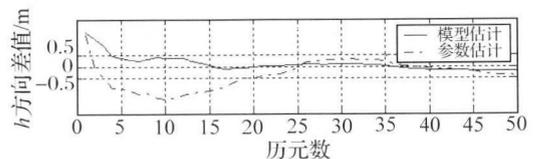
与UNB3模型改正法在 $x, y$ 平面的精度相当,在 $h$ 方向,参数估计法的精度要优于模型法;在收敛速度方面,模型改正法的收敛速度要略快于参数估计法。



(a)  $x$ 方向



(b)  $y$ 方向



(c)  $h$ 方向

图2 两种方法各个方向的收敛速度

#### 参考文献:

- [1] COLLINS J P. Assessment and Development of a Tropospheric Delay Model for Aircraft Users of the Global Positioning System[R]. Canada: Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, 1999.
- [2] WITCHAYANGKON B. Elements of GPS Precise Point Position[D]. USA: The University of Maine, 2000.
- [3] 欧吉坤. GPS测量中的大气折射改正的研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(1):31-36
- [4] 叶世榕. GPS非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉:武汉大学, 2002.
- [5] 李征航,黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2007.