EGNOS 对流层延迟改正模型及其精度分析

刘靖晔，宋元明，胡加星
（桂林理工大学 土木与建筑工程学院，广西 桂林 541004）

摘　要：对流层延迟是 GPS 定位中一个主要的误差源，目前处理对流层延迟的主要方法是通过模型法、差分法等；当基线的距离较短时，基线两端气象条件基本相同差分法可以很好地修正对流层延迟误差，当基线的距离很长时，由于基线两端的气象参数差别较大差分法不能很好地消除对流层误差，模型法却能很好地消除对流层误差。对 EGNOS 模型进行了详细的介绍，并通过 MATLAB 编写程序；利用 IGS 跟踪站的数据进行计算分析比较，结果表明 EGNOS 对流层改正模型在高程上介于 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型之间，在 x，y 方向上精度相当。

关键词：GPS；对流层；EGNOS；精度分析
中图分类号：P228.41　　**文献标志码**：B　　**文章编号**：1672-4623（2011）02-0096-03

对流层紧邻地表，大气稠密，其高度为 40 km 以下的大气底层；由于折射率的变化，GPS 信号穿过对流层时路径会发生弯曲，因此对 GPS 定位产生了偏差。天顶方向上的延迟可达 2.3 m，天顶距离 z=80 ° 时对流层延迟将增加至约 13 m [2]。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、差分法、参数估计法等。在 GPS 的各种定位中应用比较广泛的对流层改正模型有 Hopfield 模型、Saastamoinen 模型、Black 模型等。而投影函数有 Marini（1972），Chao（1974），Davis（1985）及 Niell（1996）等模型，其中 Niell 模型是目前高精度 GPS 定位中经常采用的一种投影函数 [2]。在 GPS 数据处理中，对流层改正量总是与其他改正参数一起平差求得。实际证明，利用模型改正实测到的对流层天定延迟信息精密、可靠，精度可达 1-2 cm [5]。本文详细介绍了 EGNOS 对流层延迟改正模型，并与其他几种常用模型进行分析比较。

1　EGNOS 天顶延迟改正模型及映射函数 [3-5] [15]

EGNOS 模型是欧盟的 EGNOS（the European Geostationary Navigation Overly System）所采用的对流层天定延迟改正模型。EGNOS 模型最大的好处就是计算天顶延迟时不需要实测的气象数据。该模型是基于接收机高度和 5 个气象参数（气压、温度、水蒸气、温度下降率、水蒸气温度下降率）。这些参数利用多年的季节和时间数据的平均值，这些数值还与接收机所处的经纬度和时间有关系。

EGNOS 模型也是分为干延迟和湿延迟两部分，任意方向上的对流层延迟可以用下式表示 [6-7]：

$$d_{trop} = d_{dry} \cdot m_{dry} + d_{wet} \cdot m_{wet} \quad (1)$$

式中，d_{trop} 为对流层总的延迟量；d_{dry} 为对流层天顶方向的干延迟；d_{wet} 为对流层天顶方向的湿延迟；m_{dry} 为对流层干延迟的映射函数；m_{wet} 为对流层湿延迟的映射函数。

EGNOS 模型的数学模型如下：

由平均海平面的天顶延迟计算接收机处的天顶延迟：

$$\begin{cases} d_{dry} = z_{dry}(1-\dfrac{\beta H}{T})^{\frac{g}{R_d\beta}} \\ d_{wet} = z_{wet}(1-\dfrac{\beta H}{T})^{\frac{(\lambda+1)T}{R_d\beta}-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中，g=9.806 65m/s^2；H 是对海平面接收机高度（m）；T 是对海平面的温度值（K）；β是温度下降率（K/m）；Rd=287.054 J/（kg. K）；λ水蒸气湿度下降率；Z_{dry} 是对海平面的“干”空气的延迟；Z_{wet} 是对海平面的“湿”空气的延迟。

$$Z_{dry} = \frac{10^{-6}k_1R_dP}{g_m} \quad (3)$$

式中，k_1=77.604 K/mbar；P 海平面气压（mbar）；g_m =9.784 m/s^2。

$$Zwet = \frac{10^{-6}k_2R_d}{g_m(\lambda+1)-\beta R_d}\times\frac{e}{T} \quad (4)$$

式中，k_2=382000 K^2/mbar；e 是水蒸气压（mbar）。

平均海平面的气象参数 P、T、e、β、λ的计算公式如下：

$$\xi(\phi, D) = \xi_0(\phi) - \Delta\xi(\phi)\times\cos(\frac{2\Pi(D-D_{\min})}{365.25}) \quad (5)$$

其中，ξ（φ，D）为 5 个气象参数，它仅与接收机的纬度φ和观测的日期 D（年积日）有关；ξ_0（φ）为个气象参数的年平均值；$\triangle\xi$（φ）为个气象参数的季节变化

收稿日期：2010-10-08
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41064001）。

值；D_{min} 为个气象参数的年变化的最小指的日期（北半球 D_{min}= 28，南半球 D_{min}=211）。

$\xi_0(\varphi)$ 和 $\triangle\xi(\varphi)$ 可由在纬度范围（$\varphi+\varphi$，$\varphi-\varphi$）内的全球（或某区域）平均海平面的各气象参数拟合求得。表 1、表 2 分别列出了不同纬度圈 5 个气象参数的年平均值和季节变化值。

表 1　EGNOS 模型中的 5 个气象参数的年平均值

Latitude/ °	P/mbar	T_0/K	E_0	β_0	λ_0
≤15	1 013.25	299.65	26.31	6.30e-3	2.77
30	1 017.25	294.15	21.79	6.05e-3	3.15
45	1 015.75	283.15	11.68	5.58e-3	2.57
60	1 011.75	272.15	6.78	5.39e-3	1.81
≥75	1 013.00	263.65	4.11	4.53e-3	1.55

表 2　EGNOS 模型中的 5 个气象参数的季节变化值

Latitude/ °	P/mbar	T_0/K	E_0	β_0	λ_0
≤15	0.00	0.00	0.00	0.00e-3	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	0.25e-3	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	0.32e-3	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	0.81e-3	0.74
≥75	-0.50	14.50	3.39	0.62e-3	0.30

其映射函数可以用下式表示：

$$MF(E)=\frac{1.001}{\sqrt{0.002001+\sin^2(e)}} \tag{6}$$

如果高度角低于 5 ° 时，这个映射函数就不再适用了 [4]。

2　常用的几种对流层延迟模型及映射函数

霍普菲尔德（Hopfield）模型 [6] [9-11]

$$d_{trop}=\frac{155.2*10^{-7}\frac{P_s}{T_s}*(h_d-h_s)}{\sin(E^2+6.25)^{\frac{1}{2}}}+\frac{155.2*10^{-7}*4810*\frac{e_s}{T_s^2}(h_w-h_s)}{\sin(E^2+2.25)^{\frac{1}{2}}} \tag{7}$$

式中，$h_d=40\,136+148.72(T_s-273.16)$；$h_w$=11 000 。

萨斯塔莫宁（Saastamoinen）模型 [6] [9-11]

该模型的天顶方向的干湿延迟为：

$$\begin{cases}\Delta dz,d=\dfrac{0.002277P_s}{f(B,H)}\\ \Delta dz,w=\dfrac{e_s}{f(B,H)}\left(\dfrac{0.2789}{Ts}+0.05\right)\end{cases} \tag{8}$$

式中，f（B，H）=1-0.002 66cos2B-0.000 28H；B 测站纬度 和测站 H（km）高程。

公式（7）（8）中的可用下式计算 [12]：

es = RH*exp（-37.246 5 + 0.213 166*Ts - 0.000 256 908Ts^2）

Niell 映射函数模型 [1] [13]

Niell 干延迟映射函数模型为:

$$m_{hyd}=\frac{1+\dfrac{a_{hyd}}{1+\dfrac{b_{hyd}}{1+c_{hyd}}}}{\sin(E)+\dfrac{a_{hyd}}{\sin(E)+\dfrac{b_{hyd}}{\sin(E)+c_{hyd}}}}+\left(\frac{1}{\sin(E)}-\frac{1+\dfrac{a_{hgt}}{1+\dfrac{b_{hgt}}{1+c_{hgt}}}}{\sin(E)+\dfrac{a_{hgt}}{\sin(E)+\dfrac{b_{hgt}}{\sin(E)+c_{hgt}}}}\right)\cdot\frac{H}{1000} \tag{9}$$

式中，E 为卫星高度角；H 为测站高程（m）；a_{hgt}=2.53 · 10^{-5}，b_{hgt}=5.49 · 10^{-3}，chgt=1.14 · 10^{-3}；测站处的 3 个干延迟映射系数 a_{hyd}, b_{hyd}, c_{hyd} 可采用下式内插得到 [13]。

$$\begin{cases}\xi(\phi,t)=\xi_{avg}(\phi_i)+\left[\xi_{avg}(\phi_{i+1})-\xi_{avg}(\phi_i)\right]\cdot\dfrac{\phi-\phi_i}{\phi_{i+1}-\phi_i}-\left\{\xi_{amp}(\phi_i)+\left[\xi_{amp}(\phi_{i+1})-\xi_{amp}(\phi_i)\right]\cdot\dfrac{\phi-\phi_i}{\phi_{i+1}-\phi_i}\right\}\cdot\cos\left(\dfrac{2\pi(t-28)}{365.25}\right),15^\circ<|\phi|<75^\circ\\ \xi(\phi,t)=\xi_{avg}(\phi_i)-\xi_{amp}(\phi_i)\cdot\cos\left(\dfrac{2\pi(t-28)}{365.25}\right),|\phi|\le15^\circ|\phi|\ge75^\circ\end{cases} \tag{10}$$

式中，φ为用户测站的大地纬度，t 为年积日，ξ代表各参数的内插值。

Niell 湿延迟映射函数模型为:

$$m_{hyd}=\frac{1+\dfrac{a_{wet}}{1+\dfrac{b_{wet}}{1+c_{wet}}}}{\sin(E)+\dfrac{a_{wet}}{\sin(E)+\dfrac{b_{wet}}{\sin(E)+c_{wet}}}} \tag{11}$$

式中，E 为卫星高度角；awet，bwet，cwet 根据 Niell 湿延迟映射模型系数格网值内插得到。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：

$$\begin{cases}\xi(\phi,t)=\xi_{avg}(\phi_i)+\left[\xi_{avg}(\phi_{i+1}-\xi_{avg}(\phi_i))\right]\cdot\dfrac{\phi-\phi_i}{\phi_{i+1}-\phi_i},15^\circ<|\phi|<75^\circ\\ \xi(\phi,t)=\xi_{avg}(\phi_i),|\phi|\le15^\circ和|\phi|\ge75^\circ\end{cases} \tag{12}$$

3　计算及结果分析

为了分析 EGNOS 模型在 GPS 定位中的精度，本文将EGNOS模型与目前精度比较高并广泛采用的Hopfield 模型、Saas_Niell 模型（Saastamoinen 天顶延迟模型和 Niell 映射函数的组合）在 GPS 普通单点定位中进行精度的分析比较。

为了实现各个模型的精度分析比较，本文采用了在 MATLAB 7.1 里面编写程序，实现了普通单点定位的模块；Hopfield 模型、Saas_Niell 模型、EGNOS 模型等 3 个对流层模块。在普通单点定位的模块中采取 C/A 码伪距、广播星历的 Klobuchar 模型进行电离层延迟改正，用多项式拟合卫星钟差。试验选取 BJFS（北京房山）和 WUHN（武汉）两个 IGS 跟踪站的 2009 年第

90 天和第 155 天的观测数据，并用拉格朗日插值法求出相应的卫星坐标，用于单点定位的计算。各个模型间的 3 个方向的偏差如表 3、表 4 所示，表中 Saas-Hop 表示 Saas_Niell 模型与 Hopfield 模型之差；Eg-Hop 表示 EGNOS 模型与 Hopfield 模型之差；Eg-Saas 表示 EGNOS 模型与 Saas_Niell 模型之差。

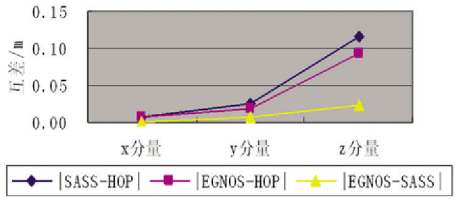

图 1 各个模型在 BJFS 站 155 d 平面坐标互差图

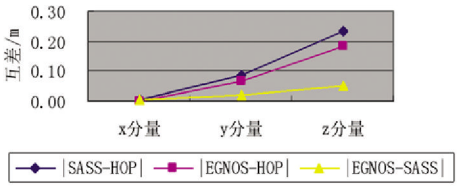

图 2 各个模型在 BJFS 站 90 d 平面坐标互差图

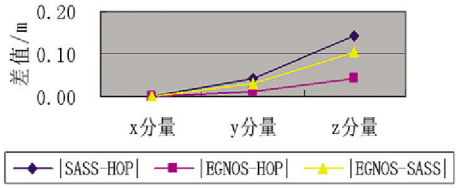

图 3 各个模型在 WUHN 站 155 d 平面坐标互差图

由图 1-图 3 分析数据可看出各对流层改正模型在平面 x 方向的偏差约为 1 cm，在平面 y 方向约为 3 cm，在高程 H 方面偏差约为 20 cm。还可以反映出 EGNOS 对流层延迟改正模型与 Saas_Niell 模型和 EGNOS 模型相比在 x，y 方向上的修正相当，在高程上介于 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型之间。分析影响各个模型精度的因素，都与气象参数密切相关；当测站处的气象参数未知时，都是用标准气象元素计算测站的气象元素。不同的算法直接影响到测站气象元素的精度，EGNOS 模型则是利用全球（或某区域）平均海平面的各气象参数拟合求得，图 1-图 3 的结果也说明 EGNOS 模型比 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型更能实际反映出测站气象元素。

4 结 语

EGNOS 模型是欧盟的 EGNOS 所采用的对流层天顶延迟改正模型。本文是在某一的气象条件下分析 EGNOS 模型、Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型对 GPS 定位精度的影响。利用 IGS 跟踪站数据多次计算分析得到，EGNOS 对流层延迟改正模型与 Saas_Niell 模型和 EGNOS 模型相比在 x，y 方向上的修正相当，在高程上介于 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型之间。EGNOS 模型采用全球（或某区域）平均海平面的各气象参数拟合测站实际的气象元素更于实际相符合。

参考文献

[1] 施展, 孟祥广, 郭际明, 等. 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[J].测绘通报,2009(6) 9-11
[2] 包海. GPS 精密单点定位中对流层延迟改正模型的研究与分析[D].长沙 中南大学, 2008
[3] 王新龙,李亚峰. GPS 定位中四种对流层延迟修正模型适应性分析[J] .电光与控制, 2008, 15 (11) 5-9
[4] 朱国辉, 张大鹏, 戴钢, 等.GPS 定位系统中的几种对流层模型[J].全球定位系统, 2006, 4 36-38
[5] 曲伟菁, 朱文耀, 宋淑丽, 等.三种对流层延迟改正模型精度评估[J].天文学报, 2008, 49:113-122
[6] 陈芳, 高永梅, 徐良骥, 等.GPS 测量误差中关于对流层延迟的探讨[J].西部探矿工程, 2005 (3) 26-27
[7] 严豪健, 符养, 洪振杰.现代大气折射论[M].上海 :上海科技教育出版社, 2006
[8] 付和宽, 周本辰, 蔡冰, 等. 大气延迟对 GPS 伪距单点定位影响的分析[J] .地理空间信息, 2010 , 8(3) 30-33
[9] 杨力, 隋立芬.对流层传播延迟改正[J].测绘学院学报, 2001, 18(3):182-185
[10] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2005
[11] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. GPS 技术与应用[M].北京 :国防工业出版社, 2004
[12] 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等.全球定位系统原理及其应用[M].北京 :测绘出版社, 2004
[13] 周命端, 郭际明, 孟祥广. GPS 对流层延迟改正 UNB3 模型及其精度分析[J].测绘信息与工程, 2008, 33 (4) 3-5
[14] John Paul Collins. Assessment and Developent of a Tropspheric Delay Model for Aircraft Users of the Global Positioning System [D]. Technial Repor, 1999
[15] Nigel Penna, Alan Dodson and Wu Chen.Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model [J].Nigel Penna and Others,54 : 37-55

第一作者简介：刘靖晔，硕士，主要从事 GPS 技术与应用方面的研究。