第 49 卷 第 1 期 天 文 学 报 Vol.49 No.1
2008 年 1 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jan., 2008

# 三种对流层延迟改正模型精度评估*

曲伟菁 [1,2†] 朱文耀 [1] 宋淑丽 [1] 平劲松 [1]

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)
(2 中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 利用 36 个全球分布的 IGS 站 2003 全年 GPS 实测的对流层天顶延迟数据和气象数据，对目前国内外常用的两个对流层延迟改正模型： Hopfield 模型、 Saastamoinen 模型和最近几年发展起来的 EGNOS 模型的改正精度和适用范围进行评估，指出 Hopfield 模型在应用中存在的缺陷， EGNOS 模型可用作 GNSS 实时定位和导航的对流层天顶延迟的改正模型.

**关键词** 大气效应，方法：数值
**中图分类号**： P 124; **文献标识码**： A

## 1 引言

对流层延迟是 GNSS 导航定位的主要误差源，改正不当对定位可以产生米级的影响. 为此，国际上建立了许多的对流层天顶延迟改正模型，目前得到国内外公认，用得最多的是 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型. 但由于地面的气象资料很难反演大气层中多变的水汽分量，即使有实测气象参数的 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型仍难满足高精度 GPS 定位和 GPS 气象学的应用需要. 在 GPS 数据处理中，我们总是将高精度对流层天顶延迟信息作为改正量与其他改正参数 (如测站的坐标等) 一起平差求得. 实际应用证明， GPS 实测得到的对流层天顶延迟信息精密、可靠，精度可达 1—2 cm. GPS 实测的对流层天顶延迟的时间序列，已成为评估各对流层延迟改正模型最可靠、有效的手段.

全球数千个 GPS 固定站 (包括 IGS 网和区域网) 已建立了数年高精度、高分辨率的对流层天顶延迟的时间序列. 根据我们对中国地壳运动观测网络基准站和 IGS 站实测天顶延迟时间序列的时空特性进行精细分析，发现对流层大气天顶延迟的变化具有强而平稳的周年特性，每年的周年变化振幅和相位都非常接近，周年变化的振幅和年平均值主要取决于测站的纬度和高程，而且除了明显的周年变化 (季节变化) 外，其他均呈高频变化和不规则变化，而这些变化如前所述，很难用模型精确模制. 因此根据以上统计特性，建立一个全球通用的，测站的天顶延迟仅取决于测站的纬度、高程和观测日期的，具有一定精度的全球平均对流层延迟改正模型，在 GNSS 的导航定位中具有重要的实用

2007-01-19 收到原稿， 2007-02-01 收到修改稿

* 国家自然科学基金青年基金 (10603011), 上海市启明星计划 (05QMX1462) 、中国科学院知识创新工程、中国科学院百人计划、上海科学技术委员会 (06D222101) 资助项目

† quwj@shao.ac.cn

价值. 这一方面, 欧盟 EGNOS (the European Geo-stationary Navigation Overlay System) 建立的对流层天顶延迟改正模型 (简称 EGNOS 模型), 就是一个很好的范例.

我们利用 36 个全球分布的 IGS 站 2003 全年 GPS 实测的对流层天顶延迟数据和气象数据, 对 Hopfield 、 Saastamoinen 和 EGNOS 3 个对流层天顶延迟改正模型的改正精度和适用范围进行了比较和评估. 指出了 Hopfield 模型应用中存在的精度缺陷, 即当测站高程较高时, 天顶延迟改正精度明显降低, 并分析了产生这一缺陷的原因; 着重介绍和分析了 EGNOS 模型的优点, 推荐 EGNOS 模型可用作 GNSS 实时定位和导航的对流层天顶延迟的改正模型.

## 2 目前常用的大气延迟改正模型

### 2.1 Hopfield 模型 [1−5]

Hopfield 模型是用全球气象探测资料进行分析, 在该模型中大气层仅分为对流层和电离层两层. 在对流层中, 大气温度下降率假设成一个常数 $\beta$; 根据观测资料 $\beta \approx +6.5^0\,\mathrm{C/km}$ (这里保留 $\beta$ 为正值). 模型采用以下公式:

天顶总大气延迟为

$$\begin{cases} \rho = 10^{-6}k_1\dfrac{P_0}{T_0}\dfrac{H_T-h}{5} + 10^{-6}\left[k_3 + 273\,(k_2-k_1)\right]\dfrac{e_0}{T_0^2}\dfrac{H_w-h}{5} \\ H_T = 40136 + 148.72(T_0 - 273.15)m \\ H_w = 11000m \end{cases}, \tag{1}$$

其中, $H_T$ 、 $H_w$ 、 $P_0$ 、 $T_0$ 、 $e_0$ 和 $h$ 分别为干大气层顶高、湿大气层顶高、地面气压 (mbar) 、 $T_0$ 为地面温度 (T) 、地面水气压 (mbar) 和测站在大地水准面上的高度 (m), 常参数 $k_1 = 77.6\,\mathrm{K/mbar}$, $k_2 = 71.6\,\mathrm{K^2/mbar}$, $k^3 = 3.747\times10^5\,\mathrm{K^2/mbar}$.

### 2.2 Saastamoinen 模型 [4−8]

在 Saastamoinen 模型中, 把地球的大气分为 3 层: 对流层是从地面到 10 km 左右高度处的对流层顶, 其气体温度假设为 $6.5^0\,\mathrm{C/km}$ 递减率; 第二层是从对流层顶到 70 km 左右的平流层顶, 其中把大气温度假设成常数; 70 km 以外是电离层. 大气折射改正的基本数学表达式为:

$$\Delta z = \int_1^{n_1}\frac{\tan z}{n}\mathrm{d}n \quad (0 \le z \le 90^0), \tag{2}$$

在对上式积分时, Saastamoinen 模型主要贡献是首次把被积函数按照天顶距三角函数进行展开逐项进行积分, 得到大气天顶延迟改正为:

$$\begin{cases} \rho = 0.002277\times\dfrac{\left[P_0 + (0.05 + \frac{1255}{T_0+273.15})e_0\right]}{f(\varphi,h)} \\ e_0 = rh\times 6.11\times 10^{\frac{7.5T_0}{T_0+273.3}} \\ f(\varphi,h) = 1 - 0.00266\cos 2\varphi - 0.00028h \end{cases}, \tag{3}$$

其中，$P_0$ 、$T_0$ 、$e_0$ 、$rh$ 、$f(\varphi,h)$ 、$\varphi$ 和 $h$ 分别为地面气压 (mbar) 、地面温度 ($^0$C) 、地面水气压 (mbar) 、相对湿度 $(0-1)$ 、地球自转所引起重力加速度变化的修正、台站的地心纬度 ($^0$) 和测站大地高 (km).

当没有实测气象数据时，利用 Hopfield 和 Saastamoinen 模型计算对流层天顶延迟所需的气象参数可以利用加拿大新布朗斯威克大学开发的 DIPOP 软件中的设置 [13]:

$$T = T_0 - 0.0068 \cdot h\,, \tag{4}$$

$$P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{0.0068}{T_0} \cdot h\right)^5\,, \tag{5}$$

$$e = \begin{cases} e_0 \left[1 - \dfrac{0.0068}{T_0} \cdot h\right]^4 & h < 11000\,\mathrm{m} \\ 0 & h \geq 11000\,\mathrm{m} \end{cases} \tag{6}$$

得到.

标准参考大气参数，$P_0 = 1013.25\,\mathrm{mbar}$, $e_0 = 11.691\,\mathrm{mbar}$, $T_0 = 288.15\,\mathrm{K}$, $h$ 为海拔高 (m).

### 2.3 EGNOS 模型 [9−12]

EGNOS 模型是欧盟的 EGNOS (the European Geo-stationary Navigation Overly System) 所采用的对流层天顶延迟改正模型. EGNOS 模型的最大好处是计算天顶延迟时，不需要实测的气象数据. 该模型提供计算对流层天顶延迟所需的 5 个气象参数：气压、温度、水气压、温度梯度、水气梯度，它们在平均海平面上的时空变化仅与纬度和年积日有关，且其年变化呈余弦函数，每个参数余弦函数的相位固定 (最小值的年积日北半球取为 28 日，南半球为 211 日), 余弦函数的振幅和年平均值由气象资料拟合求得.

接收机的对流层天顶延迟的计算是：先由接收机的纬度和观测日期求得平均海平面的 5 个气象参数，则可计算相应的平均海平面的天顶延迟，然后由接收机的高程计算接收机处的对流层天顶延迟. EGNOS 模型能较好地描述平均对流层延迟 [10,11], 其数学模型如下：

由平均海平面的天顶延迟计算接收机处的天顶延迟：

$$d_{\mathrm{dry}} = z_{\mathrm{dry}} \left[1 - \frac{\beta H}{T}\right]^{\frac{g}{R_d \beta}}\,, \tag{7}$$

$$d_{\mathrm{wet}} = z_{\mathrm{wet}} \left[1 - \frac{\beta H}{T}\right]^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d \beta} - 1}\,, \tag{8}$$

其中，$g = 9.80665\,\mathrm{m/s^2}$, $H$ 、$T$ 、$z_{\mathrm{wet}}$ 和 $z_{\mathrm{dry}}$ 分别是接收机的高度 (m) 、平均海平面的温度 (K) 、平均海平面的天顶湿延迟和平均海平面的天顶干延迟，$R_d = 287.054\,\mathrm{J/kg/K}$.

平均海平面的干天顶延迟：

$$z_{\mathrm{dry}} = \frac{10^{-6} k_1 R_d p}{g_m}\,, \tag{9}$$

其中， $k_1 = 77.604\,\mathrm{K/mbar}$, $g_m = 9.784\,\mathrm{m/s^2}$, $p$ 是平均海平面的气压 (mbar).

平均海平面的湿天顶延迟：

$$z_{\mathrm{wet}} = \frac{10^{-6} k_2 R_d}{g_m\,(\lambda + 1) - \beta R_d} \times \frac{e}{T}\,, \tag{10}$$

其中， $k_2 = 382000\,\mathrm{K^2/mbar}$, $e$ 是平均海平面的水气压 (mbar).

平均海平面的气象参数 $P$ 、 $T$ 、 $e$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 的计算公式：

$$\xi(\phi, D) = \xi_0(\phi) - \Delta\xi(\phi) \times \cos\left(\frac{2\pi(D - D_{\min})}{365.25}\right)\,, \tag{11}$$

其中， $\xi(\phi, D)$ 为 5 个气象参数，它仅与接收机的纬度 $\phi$ 和观测的日期 D (年积日) 有关； $\xi_0(\phi)$ 为各气象参数的年平均值； $\Delta\xi(\phi)$ 为各气象参数的季节变化值； $D_{\min}$ 为各气象参数的年变化的最小值的日期 (北半球 $D_{\min} = 28$, 南半球 $D_{\min} = 211$).

$\xi_0(\phi)$ 和 $\Delta\xi(\phi)$ 可由在纬度范围 ( $\phi + \Delta\phi$, $\phi - \Delta\phi$ ) 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 和表 2 分别列出了不同纬圈 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**

**Table 1 Average values of the five meteorological parameters used by the EGNOS model**

| | average | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Lat(°) | $P_0$ (mbar) | $T_0$ (K) | $e_0$ (mbar) | $\beta_0$ (K/m) | $\lambda_0$ |
| $\leq 15$ | 1013.25 | 299.65 | 26.31 | $6.30e^{-3}$ | 2.77 |
| 30 | 1017.25 | 294.15 | 21.79 | $6.05e^{-3}$ | 3.15 |
| 45 | 1015.75 | 283.15 | 11.66 | $5.58e^{-3}$ | 2.57 |
| 60 | 1011.75 | 272.15 | 6.78 | $5.39e^{-3}$ | 1.81 |
| $\geq 75$ | 1013.00 | 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**

**Table 2 Seasonal variation values of the five meteorological parameters used by the EGNOS model**

| | average seasonal variation | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Lat (°) | $\Delta P_0$ (mbar) | $\Delta T_0$ (K) | $\Delta e_0$ (mbar) | $\Delta\beta_0\beta_0$ (K/m) | $\Delta\lambda_0$ |
| $\leq 15$ | 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 |
| $\geq 75$ | −0.50 | 14.50 | 3.39 | $0.62e^{-3}$ | 0.30 |

**表 3 利用各个模型解算得天顶延迟相对于 IGS 实测天顶延迟 03 年全年的 bias 和 rms**

**Table 3 The bias and rms of IGS ZTD measurement and the three models (1)using measured meteorology parameters (except EGNOS- see text in details), (2)using standard meteorology parameters**

| | | (1) | | | | | | (2) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Station | h(m) | Hopfield (cm) | | Saastamoinen (cm) | | EGNOS (cm) | | Hopfield (cm) | | Saastamoinen (cm) | |
| | | bias | rms | bias | rms | bias | rms | bias | rms | bias | rms |
| algo | 202.00 | 2.60 | 3.34 | 1.90 | 2.86 | −4.14 | 5.17 | −5.22 | 6.50 | −5.85 | 7.01 |
| bjfs | 87.41 | 3.10 | 5.35 | 2.85 | 5.13 | −3.23 | 6.06 | 2.16 | 7.38 | 2.10 | 7.37 |
| brus | 149.70 | 1.59 | 3.43 | 1.33 | 3.22 | 1.54 | 3.76 | 2.11 | 5.50 | 1.91 | 5.43 |
| drao | 542.00 | 4.91 | 5.41 | 2.42 | 3.13 | −1.63 | 3.53 | 0.11 | 3.24 | −2.50 | 4.09 |
| gope | 592.60 | 5.05 | 5.78 | 2.21 | 3.54 | 1.81 | 3.75 | 3.21 | 5.63 | 0.32 | 4.65 |
| graz | 538.30 | 4.79 | 5.43 | 2.09 | 3.22 | 1.92 | 3.90 | 4.75 | 6.97 | 2.11 | 5.53 |
| guao | 2049.20 | 10.71 | 10.81 | 0.96 | 1.67 | 0.50 | 2.22 | 7.30 | 8.01 | −3.05 | 4.49 |
| jplm | 423.98 | 2.86 | 4.39 | 0.56 | 3.36 | −6.74 | 7.85 | 0.57 | 4.55 | −1.66 | 4.81 |
| lama | 187.00 | 1.35 | 2.64 | 1.01 | 2.43 | 0.83 | 3.59 | 0.48 | 4.76 | 0.11 | 4.73 |
| lhas | 3622.00 | 17.30 | 17.46 | 2.81 | 3.35 | 2.30 | 4.49 | 15.27 | 16.06 | −1.03 | 5.08 |
| mag0 | 361.93 | 1.57 | 2.37 | 0.24 | 1.80 | −2.77 | 4.47 | −4.66 | 7.11 | −5.99 | 8.04 |
| mdo1 | 2005.49 | 10.12 | 10.68 | 0.34 | 3.58 | 1.01 | 3.76 | 8.62 | 9.82 | 1.76 | 5.03 |
| mets | 94.57 | 0.20 | 2.12 | 0.58 | 2.16 | 0.08 | 3.82 | −2.54 | 5.63 | −2.20 | 5.48 |
| nrcl | 82.48 | 2.58 | 4.17 | 2.61 | 4.17 | −3.26 | 5.72 | −1.76 | 6.91 | −1.65 | 6.88 |
| nril | 47.89 | 0.78 | 1.96 | 1.49 | 2.33 | −2.7 | 4.50 | −5.22 | 7.29 | −4.42 | 6.74 |
| petp | 211.03 | 1.05 | 2.31 | 0.55 | 2.14 | −4.08 | 5.61 | −4.19 | 7.40 | −4.72 | 7.72 |
| prds | 1247.94 | 7.12 | 7.25 | 1.03 | 1.71 | −0.96 | 2.87 | −0.54 | 2.78 | −6.98 | 7.50 |
| reyk | 93.10 | 0.89 | 2.20 | 1.39 | 2.44 | −0.10 | 4.12 | −2.90 | 5.94 | −2.48 | 5.74 |
| sch2 | 498.18 | 3.78 | 4.24 | 1.50 | 2.44 | −3.55 | 5.03 | −3.61 | 6.52 | −5.85 | 7.98 |
| sofi | 1119.60 | 8.04 | 8.34 | 2.16 | 3.05 | 1.91 | 3.44 | 6.75 | 8.09 | 0.81 | 4.53 |
| stjo | 152.84 | 2.01 | 4.13 | 1.74 | 4.00 | −1.77 | 5.81 | −0.73 | 7.18 | −1.02 | 7.21 |
| sutm | 1797.60 | 8.17 | 8.51 | −0.65 | 2.66 | 5.31 | 6.03 | 6.72 | 7.28 | −2.27 | 3.61 |
| thu2 | 36.10 | 0.46 | 1.59 | 1.39 | 2.09 | −3.71 | 4.69 | −7.41 | 8.34 | −6.44 | 7.49 |
| whit | 1427.00 | 7.76 | 7.85 | 1.04 | 1.59 | −0.62 | 2.82 | 1.12 | 3.92 | −6.04 | 7.12 |
| wtzr | 666.00 | 4.07 | 4.74 | 0.77 | 2.47 | 1.65 | 3.68 | 3.31 | 5.71 | −0.01 | 4.65 |
| yakt | 103.37 | 1.78 | 2.66 | 1.89 | 2.71 | −2.39 | 4.49 | −5.23 | 7.02 | −4.92 | 6.79 |
| yell | 181.00 | 2.51 | 2.98 | 2.23 | 2.75 | −2.44 | 3.71 | −5.17 | 6.52 | −5.33 | 6.65 |
| yssk | 91.29 | 0.18 | 3.49 | 0.27 | 3.77 | −3.84 | 5.06 | −2.79 | 6.31 | −2.71 | 6.27 |
| zimm | 956.70 | 5.73 | 6.20 | 0.80 | 2.43 | 2.43 | 3.86 | 5.13 | 6.87 | 0.15 | 4.57 |
| hofn | 82.50 | 0.28 | 2.05 | 0.86 | 2.22 | 0.39 | 4.21 | −2.77 | 5.95 | −2.28 | 5.73 |
| ban2 | 831.90 | 10.61 | 11.51 | 5.03 | 6.70 | 0.32 | 5.13 | 13.43 | 14.38 | 8.56 | 9.98 |
| daka | 63.10 | 2.59 | 6.2 | 1.57 | 5.8 | 5.59 | 9.2 | 9.57 | 12.43 | 9.23 | 12.17 |
| tcms | 77.26 | 6.65 | 8.65 | 5.86 | 7.9 | 2.03 | 6.69 | 13.19 | 15.32 | 12.91 | 15.08 |
| tnml | 75.86 | 6.13 | 8.28 | 5.39 | 7.59 | 1.37 | 6.67 | 12.29 | 14.67 | 12.02 | 14.44 |
| twtf | 203.12 | −1.43 | 9.86 | −3.66 | 11.04 | 2.81 | 6.81 | 13.80 | 15.72 | 12.74 | 14.79 |
| riog | 32.00 | 0.79 | 12.99 | 1.48 | 13.01 | −12.31 | 13.12 | 7.92 | 8.56 | 7.70 | 8.36 |
| hrao | 1414.19 | 43.29 | 43.42 | 36.36 | 36.50 | 12.06 | 12.61 | 14.23 | 14.79 | 7.18 | 8.22 |
| Mean | | 4.13 | 5.87 | 1.55 | 3.52 | −0.73 | 4.99 | 2.31 | 7.84 | −0.19 | 7.04 |

# 3 各模型精度和适用范围的评估

## 3.1 各模型计算结果与 GPS 实测结果的比较

利用 IGS 数据中心提供的 2003 年全年全球 37 个主要 IGS 台站的实测气象数据和天顶延迟数据, 分别用 Hopfield 、Saastamoinen 和 EGNOS 天顶延迟模型计算天顶延迟, 并与 GPS 实测天顶延迟结果进行比对, 给出各个模型相对于每个 IGS 站天顶延迟的年偏差 (bias 即两者平均值的差) 和中误差 (rms) (见表 3), 表 3 中前两列是根据实测气象数据得到的 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型结果, EGNOS 模型中的气象参数是根据各个纬度间隔 (15° 一个间隔) 的 5 个气象参数的年平均值和季节变化值内插得到 (见表 1 和表 2). 为了便于比较, 表 3 后面两列给出了用标准气象参数得到的 Hopfield 和 Saastamoinen 模型计算的结果, 表中最后一行的 mean 是剔除 rms 较大的 (即大于 3 倍中误差) 站之后所有台站 bias 和 rms 的平均值. 对 Hrao 站, 由于此站的实测气象资料有问题, 所以在以下模型讨论中除去此站.

**表 4 各模型解算 rms 和 bias 的最大值及其相应的测站名字**

**Table 4 The maximum of rms and bias and corresponding station names**

| | Hopfield (cm) | | Saastamoinen (cm) | | EGNOS (cm) | | Hopfield(cm) | | Saastamoinen (cm) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | bias | rms | bias | rms | bias | rms | bias | rms | bias | rms |
| Max | 17.30 | 17.46 | 5.86 | 13.01 | 12.31 | 13.12 | 15.27 | 16.06 | 12.91 | 15.08 |
| name | lhas | lhas | tcms | riog | riog | riog | lhas | lhas | tcms | tcms |

从表 3 和表 4 可见: Hopfield 模型平均 bias 和平均 rms 为 4.13 cm 和 5.87 cm, 最大的偏差达 17.3 cm, 出现在 lhas 站, 最大的 rms 为 17.46 cm; Saastamoinen 模型为 1.55 cm 和 3.52cm, 最大的 bias 为 5.86 cm, 出现在 tcms 站, 最大的 rms 为 13 cm; EGNOS 模型为 −0.73 cm 和 4.99 cm, 用标准气象参数 Hopfield 模型为 2.31 cm 和 7.84 cm, 用标准气象参数 Saastamoinen 模型为 −0.19 cm 和 7.04 cm.

通过以上比较, 我们发现: 从总体上讲, EGNOS 模型与具有实测气象参数的 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型 3 个模型计算的天顶延迟与 GPS 实测结果基本相符, 在绝大多数情况下, 3 个模型与 GPS 实测结果的 bias 与 rms 不超过 10 cm, EGNOS 模型由于不需要实测气象参数, 计算公式简单, 特别适用于 GNSS 导航定位的需要; 在 3 个模型中, Saasmoinen 模型是最接近 GPS 实测结果, EGNOS 模型次之, Hopfield 模型要差一些, 特别是当测站高度高于 1000 m 时, Hopfield 模型计算的结果均出现较大的 bias 与 rms, 这表明该模型不适宜用于高度较高测站的对流层延迟改正, 对此我们将于下节详细讨论; 用实测气象参数 Hopfield 、Saastamoinen 模型的 bias 均出现正值, 这表明两个模型计算的天顶延迟存在一定的系统偏差.

## 3.2 各模型随高程变化的比较

为了研究不同高度测站的 3 个模型的适用程度, 我们将 36 个 IGS 站按 500 m 的高程间隔来划分, 表 5 给出了不同高度区间用实测气象资料的 Hopfield 、Saastamoinen 模型

和 EGNOS 模型结果相对于 GPS 实测结果的平均 bias 和 rms; 表 6 给出了 36 个 IGS 站中高程大于 1000 m 的 7 个站这 3 个模型解算结果的比对; 图 1 和图 2 分别是拉萨 (lhas)GPS 站 3 个模型相对 GPS 实测结果的月平均 bias 和 rms 的分布图. 图中 EGNOS 为 EGNOS 模型计算结果， Hopfiled 为用实测气象参数得到的 Hopfield 模型结果， Saastamoinen 为用实测气象参数得到的 Saastamoinen 模型结果， Standard_hop 为用标准气象参数的 Hopfiled 模型结果， Satandard_saas 为用气象参数的 Saastamoinen 模型结果.

**表 5　bias 和 rms 随测站高度的变化**

**Table 5　The variations of bias and rms with the change of height**

| height(m) | Hopfield (cm) | | Saastamoinen(cm) | | Egnos (cm) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | bias | rms | bias | rms | bias | rms |
| 0—100 | 2.05 | 4.91 | 2.14 | 4.88 | −1.64 | 6.16 |
| 0—500 | 2.20 | 4.73 | 1.81 | 4.55 | −1.79 | 5.75 |
| 500—1000 | 5.86 | 6.5 | 2.22 | 3.58 | 1.08 | 3.98 |
| >1000 | 9.88 | 10.1 | 1.09 | 2.52 | 1.48 | 3.71 |

**表 6　高度高于 1000 m 台站的 bias 和 rms**

**Table 6　The bias and rms of stations (height>1000 m)**

| station | height (m) | Hopfield (cm) | | Saastamoinen (cm) | | EGNIS (cm) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | bias | rms | bias | rms | bias | rms |
| lhas | 3622. | 17.30 | 17.46 | 2.81 | 3.35 | 2.30 | 4.49 |
| guao | 2049. | 10.71 | 10.81 | 0.96 | 1.67 | 0.74 | 2.26 |
| mdo1 | 2005. | 10.12 | 10.68 | 0.34 | 3.58 | 1.01 | 3.76 |
| sutm | 1797. | 8.17 | 8.51 | −0.65 | 2.66 | 5.31 | 6.03 |
| whit | 1427. | 7.76 | 7.85 | 1.04 | 1.59 | −0.50 | 2.82 |
| prds | 1247. | 7.12 | 7.25 | 1.03 | 1.71 | −0.96 | 2.87 |
| sofi | 1119. | 8.04 | 8.34 | 2.16 | 3.05 | 2.50 | 3.77 |

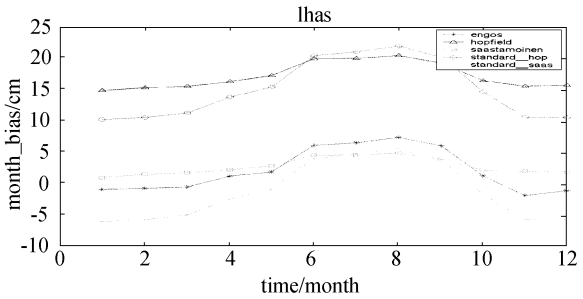


图 1　lhas 站各模型的月平均 bias 分布

Fig. 1　The distribution of the monthly average bias of models at lhas

从表 5 、表 6 和图 1 、图 2 可见， Hopfield 模型计算对流层天顶延迟的 bias 和 rms 随测站高度的增高而增加; 对于高度低于 100 m 的测站， Hopfield 模型与 Saastamoinen

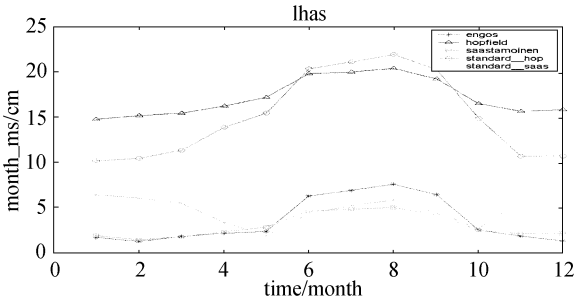


图 2 lhas 站各模型的月平均 rms 的分布

Fig. 2 The distribution of the monthly average rms of models at lhas

模型精度相当，比 EGNOS 模型精度稍好， 3 个模型精度都在同一量级；而对于高度比较高 ($> 1000\,\mathrm{m}$) 的测站， Hopfield 模型的 bias 和 rms 已接近或者超过 10 cm, 显然已不适用于这些高度较高的测站的对流层延迟改正.

为了弄清 Hopfield 模型存在的缺陷及其原因，我们研究了各个模型的天顶延迟对高度的梯度,

Hopfield 模型：

$$\left(\frac{\partial\rho}{\partial h}\right) = -\frac{10^{-6}k_1P_0}{5T_0} - \frac{10^{-6}[k_3 + 273\,(k_2 - k_1)]e_0}{5T_0^2}\,, \tag{12}$$

Saastamoinen 模型：

$$\left(\frac{\partial\rho}{\partial h}\right) = \frac{0.00028\left(0.002277P_0 + 0.002277\left(\dfrac{1225}{T_0 + 273.15} + 0.05\right)e_0\right)}{f(\varphi,h)^2}\,, \tag{13}$$

EGNOS 模型：

$$\begin{aligned}
&\rho = d_{\mathrm{dry}} + d_{\mathrm{wet}}\\
&\left(\frac{\partial\rho}{\partial H}\right) = -z_{\mathrm{dry}}\frac{g}{R_d\beta}\left(\frac{\beta}{T}\right)\left[1 - \frac{\beta H}{T}\right]^{\frac{g}{R_d\beta}-1} - z_{\mathrm{wet}}\left[\frac{(\lambda+1)\,g}{R_d\beta} - 1\right]\left(\frac{\beta}{T}\right)\left[1 - \frac{\beta H}{T}\right]^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d\beta}-2}
\end{aligned} \tag{14}$$

从以上公式可见，Hopfield 模型的梯度与高度无关, 是温度的函数, 而 Saastamoinen 模型和 EGNOS 模型的梯度都是高度的函数，与高度有关，这也可能是对于高度较高的测站， Hopfield 模型的精度较差，而 Saastamoinen 模型和 EGNOS 模型较好的原因.

## 4 对 EGNOS 模型的评估

如上所述， EGNOS 模型计算的天顶延迟的精度与具有实测气象参数的 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型相当，无明显的系统偏差，平均 rms 仅为 5 cm, 高于用标准大气参数的 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型计算的精度. 实际上，目前国内外 GPS/GNSS

的用户除了 GPS/MET 应用外 (在 GPS/MET 应用中，为了从总的天顶延迟中分离出天顶延迟的湿分量，需要测站处的实测气象参数), 绝大多数用户，包括许多 IGS 的固定站都没有实测气象数据．在这种情况下，为了获得具有一定精度的对流层延迟改正，采用 EGNOS 模型应是较理想的选择． EGNOS 模型测定对流层天顶延迟改正的平均精度约为 5 cm, 化为斜路径延迟改正的平均精度即为 10 cm (取高度角 30° ), 乘上单点定位的几何因子 3 ∼ 4, 可估计采用 EGNOS 模型对单点定位结果带来的误差一般不会超过 50 cm, 这样的精度足已满足实时导航定位的精度要求，而且显然这样的精度是利用标准大气参数的 Hopfield 、 Saastamoinen 等模型所不能达到的． EGNOS 模型计算公式简单、预注参数不多，只要注入接收机的纬度、高程和观测日期，就能得到具有一定精度的对流层大气延迟改正．它可作为适用的 GNSS 实时定位和导航的对流层天顶延迟的改正模型．

## 5 结论

通过全球 IGS 网 GPS 实测对流层天顶延迟时间序列，对 Hopfield 、 Saastamoinen 和 EGNOS 对流层延迟改正模型精度的评估，我们可得到如下的结论：

(1) Hopfield 模型计算对流层天顶延迟改正的精度，随测站高度的增加而降低．当测站高程高于 1000 m 时， Hopfield 模型已不适用于这些高度较高的测站的对流层延迟改正．

(2) 从总体上讲，EGNOS 模型与具有实测气象参数的 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型计算的天顶延迟与 GPS 实测结果基本相符，平均精度约为 5 cm, 能满足 GNSS 米级定位精度对流层延迟改正需要．

(3) EGNOS 模型是一个能较好反映全球大气变化的特征的全球性平均对流层大气延迟改正模型．EGNOS 模型计算测站的天顶延迟，不需要实测气象参数，计算公式简单，注入参数少，具有一定的精度，可作为适用的 GNSS 实时定位和导航的对流层天顶延迟的改正模型，特别是接收机内部的改正模型．

## 参 考 文 献


1 Hopfield H S. Journal of Geophysical Research, 1963, 68: 5157
2 Hopfield H S. Journal of Geophysical Research, 1969, 74: 4487
3 Hopfiled H S. Rad Sci, 1971, 6: 357
4 杨力．大气对 GPS 测量影响的理论与研究．博士论文，中国人民解放军信息工程大学测绘学院， 2001,
5 严豪健．天文学进展， 1995, 13: 380
6 Saastamoinen J. Bull Geod, 1972, 105: 279
7 Saastamoinen J. Bull Geod, 1973, 13: 13
8 Saastamoinen J. Bull Geod, 1972, 106: 383
9 Collins J P, Langley R B. Final Contract Report Prepared for Nav Canada Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Repot, University of New Brunswick, Fredericton, N B Canada. 1997, 187
10 Collins J P, Langley R B. Proceedings of ION GPS98, 1998
11 Penna N, Dodson A, Chen W. Journal of Navigation, 2001, 54(1): 37
12 Farah A, Moore T, Hill C. Journal of Navigation, 2005, 58(3): 459

13 陈小明，刘基余. 导航， 1996, 32(2): 44

# The Evaluation of Precision about Hopfield, Saastamoinen and EGNOS Tropospheric Delay Correction Model

QU Wei-jing[1,2] ZHU Wen-yao[1] SONG Shu-li[1] PING Jin-song
(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200030)
(2 *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039)

**Abstract** Based on the tropospheric data and meteorologic data of 36 stations provided by IGS in 2003, we evaluate the correction precision of Hopfield model, Saastamoinen model widely used at home and abroad at present and EGNOS model developed in recent years. The limitation of Hopfield model is pointed out. EGNOS model can be the correction model in the tropospheric delay for the real-time orientation and navigation.

**Key words** Atmospheric Effects, Methods: Numerical