0254-6124/2012/32(6)-881–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Xie Jie, Zhang Bo, Hou Bo, Yao Zhicheng, Liu Guangbin. Simulation of NeQuick parameters of Galileo satellite navigation system. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 881-886

Galileo 卫星导航系统广播 NeQuick 模型及其参数拟合*

谢 杰 张 博 侯 博 姚志诚 刘光斌

(第二炮兵工程学院 西安 710025)

摘 要 提出了基于 IGRF 模型的 Galileo 广播 NeQuick 模型及其参数拟合算法, 解决了 Galileo 信号仿真中地理场景映射与地磁坐标下的电离层延迟修正参数拟合问题. 应用 IGRF 模型, 可计算出任意给定位置和时间点的地磁参数以及 E 层、F_1 层、F_2 层的电子密度, 从而计算出 Galileo 电离层修正参数. 仿真结果表明, 该算法拟合的全球电离层延迟与 IGS 提供的实际观测值基本一致, 仿真精度高于一般的经验电离层模型, 实现了 Galileo 卫星信号的电离层延迟修正参数的精确仿真.

关键词 电离层误差, NeQuick 模型, Galileo 卫星, IGRF 模型

中图法分类号 V 448, TP 391. 9

Simulation of NeQuick Parameters of Galileo Satellite Navigation System

XIE Jie ZHANG Bo HOU Bo YAO Zhicheng LIU Guangbin

(*The Second Artillery Engineering College of PLA, Xi'an* 710025)

Abstract The simulation model of Galileo ionospheric parameters based on IGRF is proposed to solve the problem that ionospheric parameters estimation is related to geomagnetic coordinates. Using IGRF, the geomagnetic elements of the geomagnetic field and the Electron Density can be computed at a given location and time, sequentially, the ionospheric parameters of Galileo can be calculated. The simulation results show that the ionospheric delay calculated by this model is consistent with the value observed by IGS, and the precision is higher than those by other models, which proves that the high precision simulation of the Galileo ionospheric parameters is realized.

Key words Ionospheric error, NeQuick model, Galileo satellite, IGRF model

* 国家高技术研究发展计划项目 (2010AA7010213) 和军队重点科研项目 (EP050068-23) 共同资助

2011-07-25 收到原稿, 2012-03-11 收到修定稿

E-mail: kelvi_jie@163.com

0 引言

Galileo 卫星导航系统定位精度比 GPS 系统更高, 深入研究 Galileo 卫星信号仿真技术, 对研制 Galileo 导航定位接收机以及充分利用 Galileo 导航系统具有重要作用.

单频接收机最主要的误差来源是地球大气电离层带电粒子对信号的影响, 其对导航信号传播过程中的载波和码相位均具有较大影响. 在卫星导航仿真中, 仿真导航卫星信号须准确模拟出电离层延迟误差并将修正参数播发给用户, 供接收机端准确剔除电离层影响, 达到精确定位. 本文推导了 NeQuick 三维电子密度计算方法, 并根据 Galileo 系统广播电离层修正参数的定义, 推导并验证了基于 IGRF 模型的 Galileo 系统电离层修正参数拟合算法.

1 NeQuick 模型原理

NeQuick 模型是一个 Epstein 层电子密度描述模型 [1], 用于计算某时刻特定位置的电子密度, 是一种描述三维电离层图像的方法 [2], 对 Galileo 系统来说是一个实时的电离层修正模型 [3]. 模型是建立在一组电离层参数 (各 Epstein 层临界频率 f_0E, f_0F_1, f_0F_2 及 $\mathrm{F_2}$ 层传播因子 $\mathrm{M(3000)\ F_2}$ 的基础上, 以 $\mathrm{F_2}$ 层峰值高度区分的分层模型. 同时, 模型还需要太阳活动参数 [4] $F_{10.7}$ (太阳光波长为 10.7 cm 时的射电辐射流量) 或 R_{12} (太阳黑子数每月平均值). 两者转换关系如下 [5]:

$$\begin{cases} F_{10.7} = 67.0 + 0.572R_{12} + (0.00089R_{12})^2 - \\ \qquad (0.0209R_{12})^3, \\ R_{12} = 1.61(F_{10.7} - 67.0) - [0.0733(F_{10.7} - \\ \qquad 67.0)]^2 + [-0.0240(F_{10.7} - 67.0)]^3. \end{cases} \tag{1}$$

E 层和 $\mathrm{F_1}$ 层临界频率分别为

$$f_0E^2 = \sqrt{F_{10.7}}[(1.12 - 0.019\varepsilon)\cos X_{\mathrm{eff}}]^2 + 0.49; \tag{2}$$

$$f_0F_1 = \begin{cases} 1.4f_0E & (\text{白天}), \\ 0 & (\text{夜晚}). \end{cases} \tag{3}$$

而 $\mathrm{F_2}$ 层临界频率 f_0F_2 和 $\mathrm{M(3000)\ F_2}$ 是电子密度剖面图建立的基础, 引入 IRI (国际参考电离层模型通用的 CCIR 系数计算得出).

CCIR 分别采用一个四阶和六阶的傅里叶级数表示传输因子 $\mathrm{M(3000)\ F_2}$ 和临界频率 f_0F_2 的日变化和季节变化, 其数学模型可用如下函数 $\Omega(\varphi, \lambda, t)$ 表示 [6]:

$$\Omega(\varphi, \lambda, t) = a_0(\varphi, \lambda) + \sum_{j=1}^{h}[a_j(\varphi, \lambda)\cos jt + b_j(\varphi, \lambda)\sin jt]. \tag{4}$$

其中, $-90^\circ \leqslant \varphi \leqslant 90^\circ$ 表示地理纬度, $0^\circ \leqslant \lambda \leqslant 360^\circ$ 表示地理经度, t 表示标准时间.

傅里叶系数 a_j, b_j 则通过下式计算 [6]:

$$\begin{cases} a_j(\varphi, \lambda) = \sum_{k=0}^{n} U_{2j,k}G_k(\varphi, \lambda); \\ b_j(\varphi, \lambda) = \sum_{k=0}^{n} U_{2,j-1,k}G_k(\varphi, \lambda). \end{cases} \tag{5}$$

式中, $G(\varphi, \lambda)$ 为球谐勒让德函数, $U_{2j,k}$ 和 $U_{2,j-1,k}$ 为描述 $\mathrm{M(3000)\ F_2}$ 和 f_0F_2 的数值映射系数, 即 CCIR 系数. 当计算某天 $\mathrm{F_2}$ 层 f_0F_2 和 $\mathrm{M(3000)\ F_2}$ 的数值映射系数时, 采用线性内插得到, 具体计算过程参考文献 [6].

当高度 $h < h_{\mathrm{m}}F_2$ 时, 其电子密度有 [3]

$$n(h) = \sum_{i=F_2,F_1,E} n_i(h). \tag{6}$$

其中,

$$n_i(h) = \frac{4A_i}{[1 + \exp(z_i)]^2}\exp(z_i),$$

这里 $n_i(h)$ 是高度为 h 时第 i 层的电子密度, z_i, A_i 定义见文献 [3].

当 $h > h_{\mathrm{m}}F_2$ 时, $\mathrm{F_2}$ 层顶部的电子密度为

$$n_{\mathrm{top}}(h) = \frac{4n_{\mathrm{max,F_2}}}{[1 + \exp(z)]^2}\exp(z). \tag{7}$$

式中,

$$z = \frac{h - h_{\mathrm{m}}F_2}{H_0\left[1 + \dfrac{rg(h - h_{\mathrm{m}}F_2)}{rH + g(h - h_{\mathrm{m}}F_2)}\right]},$$

$$H = \frac{B_{\mathrm{top,F_2}}}{v},$$

$$v = (0.041163x - 0.183981)x + 1.424472,$$

$$x = \frac{B_{\mathrm{top,F_2}} - 150}{100},$$

$$n_{\mathrm{max},X} = 1.24 \times 10^{10}X^2,$$

其中, X 可为 f_0E, f_0F_1, f_0F_2.

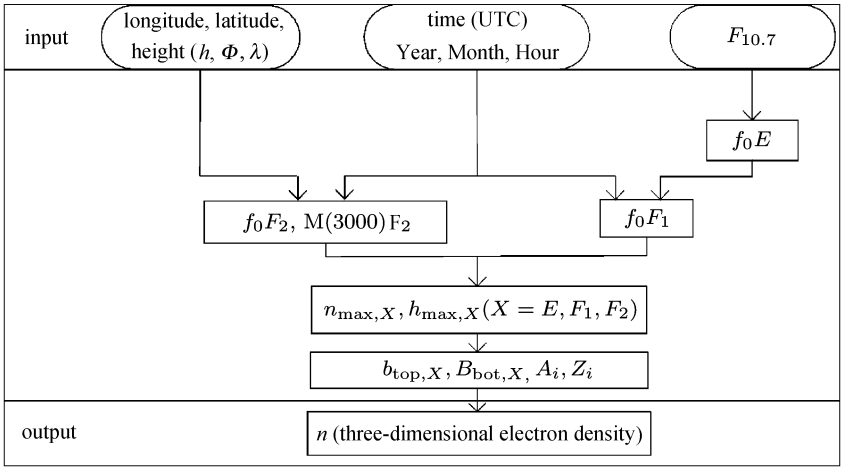


图 1　NeQuick 模型的计算流程

Fig. 1　Calculation flow of the NeQuick model

经以上分析, NeQuick 模型计算流程如图 1 所示. 在 Galileo 导航卫星信号仿真过程中, 图 1 所示的 NeQuick 模型只能计算出信号传播路径上的电子密度, 但传播给用户的电离层修正参数并非是简单的电子密度或电子数量, 下面进一步推导基于 IGRF 的广播 NeQuick 模型参数拟合算法.

2　Galileo 广播 NeQuick 模型修正参数定义

Galileo 卫星导航信号中播发的电离层数据包括两部分. 一部分是电离层扰动标志, 以 0 或 1 表示是否存在某些特殊时刻 (如地震、海啸等电离层的突变情况, 将这种情况定义为电离层扰动或电离层风暴, 并根据长期观测数据, 按扰动发生的概率将全球分为 5 个区域 [7]. 另一部分是电离层修正参数 a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, 即平均电离度 A_z 与修正磁倾角 u 的函数系数, 具体表达式如下 (8)[7].

$$A_z = a_{i0} + a_{i1}u + a_{i2}u^2. \tag{8}$$

式中, $\tan u = \dfrac{I}{\sqrt{\cos\phi}}$, I 表示真实磁倾角, ϕ 表示地理纬度.

由式 (8) 可知, 磁倾角 I 和平均电离度 A_z 是 Galileo 系统广播 NeQuick 模型修正参数计算的基础, 为此需建立地理经纬度与地磁位置及磁倾角的转换模型, 以及利用第 1 节给出的电子密度计算方法, 建立平均电离度模型, 进而导出修正参数的拟合模型.

3　磁倾角算法模型

地磁强度 (B) 与水平面的夹角称为磁倾角 (I), 地磁强度向下为正, 地磁要素关系如图 2 所示.

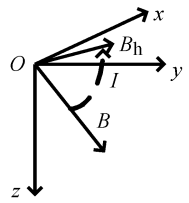


图 2　地磁要素关系

Fig. 2　Relationship among the geomagnetic elements

图 2 中 O 表示观测位置, Ox 指向地理北, Oy 指向地理东, Oz 垂直向下, B_h 表示地磁强度在水平面内的投影.

国际地磁参考场 (IGRF) 是地球基本磁场及其长期变化的一系列数学模型 [8], IGRF 模型采用一组球谐系数 (或高斯系数) g_k^m 和 h_k^m 来描述地磁场的标量磁位, 可用下式 [8] 表达:

$$V(r,\theta,\varphi) = a\sum_{k=0}^{k}\sum_{m=0}^{k}\left(\frac{a}{r}\right)^{n+1}\cdot$$

$$(g_k^m \cos m\varphi + h_k^m \sin m\varphi) P_k^m(\theta). \tag{9}$$

式中, a 为地球半径, r 为由地心算起的径向距离, $P_k^m(\theta)$ 为伴随勒让德函数, k 为模型的阶段水平, θ 为经度, φ 为余纬 ($\varphi = 90° - \phi$, ϕ 表示纬度).

相应的地磁分量可由下式 [8] 求出:

$$\begin{cases} X = \sum\limits_{k=0}^{k_{\max}} \sum\limits_{m=0}^{k} \left(\dfrac{a}{r}\right)^{n_k+1} \cdot \\ \quad (g_k^m \cos m\varphi + h_k^m \sin m\varphi) \dfrac{\mathrm{d}P_{n_k}^m(\cos\theta)}{\mathrm{d}\theta}, \\ Y = \sum\limits_{k=0}^{k_{\max}} \sum\limits_{m=0}^{k} \dfrac{m}{\sin\theta} \left(\dfrac{a}{r}\right)^{n_k+1} \cdot \\ \quad (g_k^m \sin m\varphi - h_k^m \cos m\varphi) P_{n_k}^m(\cos\theta), \\ Z = -\sum\limits_{k=0}^{k_{\max}} \sum\limits_{m=0}^{k} (n_k+1) \left(\dfrac{a}{r}\right)^{n_k+1} \cdot \\ \quad (g_k^m \cos m\varphi + h_k^m \sin m\varphi) P_{n_k}^m(\cos\theta). \end{cases} \tag{10}$$

从而可得磁倾角

$$I = \arctan(Z/\sqrt{X^2 + Y^2}). \tag{11}$$

4 平均电离度优化模型

NeQuick 模型以 ITU-R (国际电信联盟无线电部提供的 $F_{10.7}$ 月平均值作为输入参数, 拟合模型中以平均电离程度 A_z 代替 $F_{10.7}$ 作为 NeQuick 模型的输入参数, 同时根据 IGS 提供的如下全球电离层网格数据最优化模型计算 A_z 值:

$$(\Delta V_{\mathrm{TEC}})^2 = \min \sum_{\mathrm{GPSlinks}} |V_{\mathrm{TEC,obs}}(A_z) - V_{\mathrm{TEC,mod}}(A_z)|^2 \tag{12}$$

其中, $V_{\mathrm{TEC,obs}}(A_z)$ 表示 IGS 观测值, $V_{\mathrm{TEC,mod}}(A_z)$ 表示 NeQuick 模型的预测值, 由此可计算出各观测站每天的 A_z 值, 式 (8) 表明 A_z 是修正磁倾角 u 的二次函数, 由此即可拟合出多项式系数, 即 Galileo 电文参数 a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}.

ITU-R 建议, $F_{10.7}$ 不超过 193[2], 本文选取 [0, 193] 作为 A_z 的取值范围, 图 3 给出了 2011 年 5 月 2 日 14:00 LT(100°E, 20°N) 以最优化模型计算 A_z 的搜索过程.

从图 3 可知, 当 $A_z = 65.2$ 时误差 $E = 0.0478$ 最小, 即将其作当地当时的平均电离值.

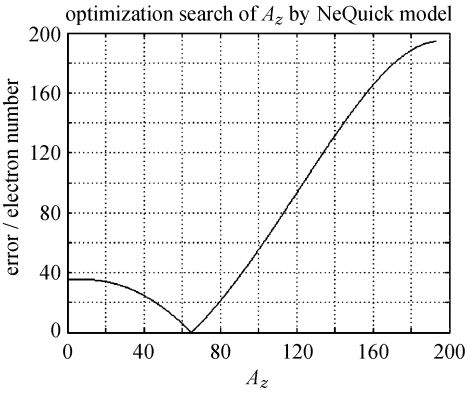


图 3 A_z 最优搜索过程

Fig. 3 Optimization search process of A_z

5 拟合数据结果分析

5.1 NeQuick 模型补偿值与 GIM 观测数据对比分析

IGS 提供的全球电离层分布图 (GIM) 数据产品, 其将全球按经纬度 2.5°×5° 分成网格, 2011 年 5 月 2 日 14:00 LT 高度 450 km 的全球电离层天顶向等效延迟观测数据图和 NeQuick 模型计算值及其误差如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 基于 NeQuick 模型计算出的全球天顶向电离层延迟与 GIM 观测的延迟值非常接近, 只在低纬度地区有微小误差, 同时图 4(c) 也表明, 此时在当地的预测误差不超过 4 m, 表 1 列出了中纬度地区两者的误差值.

从表 1 可以看出, NeQuick 模型计算值与 GIM 观测值误差绝对值基本在 1 m 以内, 低纬最大值为 3.8 m, 相对于其他电离层简易模型 (一般误差在 7~10 m), NeQuick 模型的补偿效果已提高了一倍多.

5.2 拟合值与观测值误差分析

由式 (12) 将全球各观测站平均电离度值 A_z 和修正磁倾角 u 带入, 拟合 Galileo 系统全球平均电离度模型为

$$A_z = -0.1263e - 3u^2 - 0.3227u + 65.0754. \tag{13}$$

图 5 为拟合等效电离层延迟与 GIM 观测值的误差, 表 2 列出了利用本文模型对 2009 年不同季节某天全球天顶向电离层延迟仿真与观测数据对比的平均误差和均方误差.

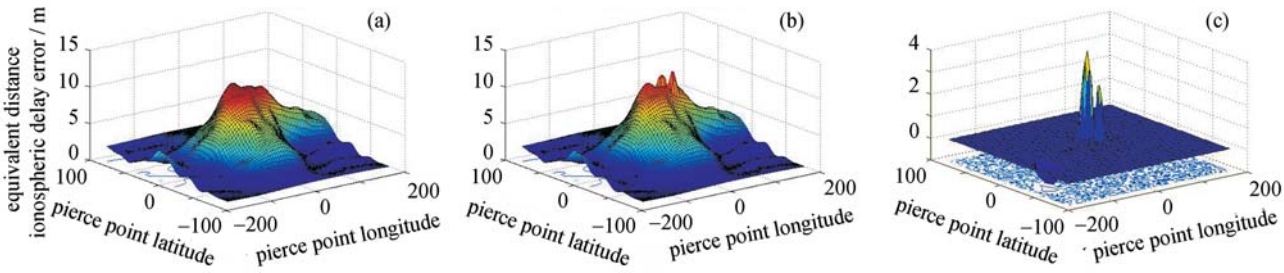


图 4　全球电离层天顶向等效延迟观测数据图和 NeQuick 模型计算值及其误差. (a) 基于 GIM 仿真的全球天顶向电离层延迟, (b) 基于 NeQuick 仿真的全球天顶向电离层延迟, (c) 基于 NeQuick 计算的电离层延迟与 GIM 观测数据误差

Fig. 4　Ionospheric delay error between observed value and NeQuick model. (a) Simulation value of ionospheric delay based on GIM, (b) simulation value of ionospheric delay based on NeQuick, (c) ionospheric delay error between observed value and NeQuick model

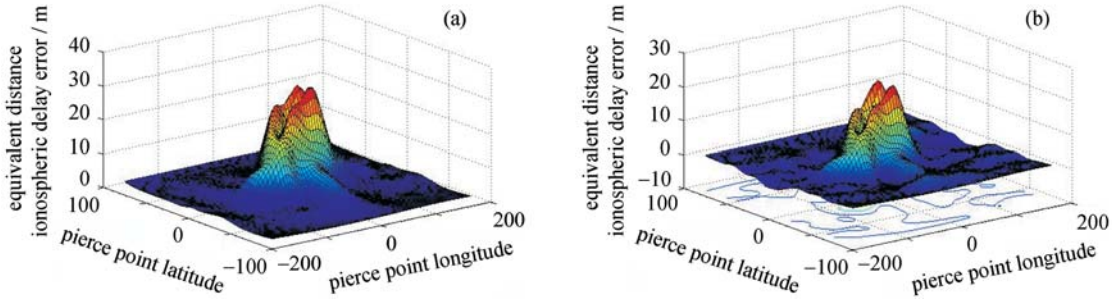


图 5　拟合的等效电离层延迟与 GIM 观测值的误差. (a) 基于 Galileo 电离层修正模型拟合的全球电离层天顶向延迟, (b) 基于 NeQuick 拟合的 Galileo 天顶向电离层延迟与 GIM 观测数据误差

Fig. 5　Ionospheric delay error between GIM and simulation value. (a) Simulation value of ionospheric delay based on Galileo ionospheric correction, (b) ionospheric delay error of Galileo between GIM and NeQuick model

表 1　NeQuick 模型值与 GIM 观测值在 (20—50°E, 0—22.5°N) 的等效延迟误差

Table 1　Error between NeQuick model and GIM

纬度/(°)	经度/(°)						
	20	25	30	35	40	45	50
0	0.010 888 968	0.007 627 86	0.001 512 7	0.009 814 36	0.009 464 7	0.002 811 1	0.000 704 289
2.5	0.007 476 682	−0.009 478 32	−0.003 002	−0.007 921 3	−0.009 807	−0.006 92	0.000 222 514
5	−0.008 568 22	−0.003 820 56	1.457 320 2	1.854 185 22	0.780 963 7	0.002 550 4	0.002 872 028
7.5	−0.008 951 199	0.852 808 364	2.394 665 2	2.422 901 2	0.876 172 7	0.006 562 2	0.001 049 233
10	−0.000 512 784	0.007 890 428	0.689 730 1	0.556 980 17	0.000 221 6	0.002 731	−0.002 307 481
12.5	0.006 623 532	0.008 562 505	0.006 154	−0.009 561	−0.010 553	0.002 428 4	0.006 928 704
15	−0.005 803 712	0.007 050 491	−0.009 704	0.010 061 63	−0.008 189	−0.005 635	0.007 667 197
17.5	0.000 634 389	0.001 551 005	0.906 650 8	0.922 645 75	−0.007 231	−0.003 141	0.007 588 792
20	0.600 124 152	2.221 2007 26	3.092 214 6	2.639 172 22	0.938 736 9	0.004 825 7	0.007 169 307
22.5	2.047 497 049	3.439 573 718	3.853 717 8	2.964 796 37	1.090 063 5	−0.004 001	0.001 199 665

表 2 不同时刻拟合仿真的全球天顶向等效电离层延迟平均误差和均方差

Table 2 Average error and mean square deviation of ionospheric delay of different time

年–月–日	地方时 (LT)	高度/km	平均误差 ($\bar{E}$)/m	均方差 (RMS)/m	卫星数目	观测站数量
2009-01-22	11:00:00	450	2.0617	2.4943	31	379
2009-04-15	22:00:00	450	1.2101	2.7841	32	377
2009-07-04	16:00:00	450	0.8897	2.8579	30	210
2009-10-26	08:00:00	450	1.0792	2.2941	32	179

由图 5(b) 可以看出, 拟合的全球天顶向电离层延迟在低纬度地区误差较大, 而全球平均误差为 0.83 m, 均方差为 3.33 m, 拟合精度满足要求. 表 2 进一步说明, 本文所提出的算法模型在不同季节不同太阳活动情况下, 均能保持较好的拟合精度.

6 结论

综上所述可以看出, 基于 IGRF 的 NeQuick 电离层等效延迟与 GIM 观测值保持一致, 相比通常采用的简易电离层模型补偿, 精度提高了 1 倍多.

对比图 5(a) 与图 4(a) 可知, 基于 IGRF 拟合的 Galileo 广播 NeQuick 电离层延迟补偿值与实际观测值在低纬地区的误差还较大, 分析主要原因是, 低纬度地区电离层变化剧烈, 同时用一个二次多项式来精确描述全球天顶的电离层复杂变化本身具有较大难度, 在以后工作中可按经纬度分区域拟合, 进一步提高精度. 但表 2 说明了该模型的全球拟合精度较高且具有相当的稳定性, 对于一般的导航定位足以满足精度要求.

对 Galileo 系统导航电文参数的拟合求解算法进行了探讨, 并通过 IGS 提供的真实观测数据进行了仿真分析, 结果表明, 该算法能有效模拟 Galileo 导航信号传播过程中的电离层延迟, 其误差相对于其他简易模型提高了 1 倍, 可用于 Galileo 信号仿真中的电离层误差补偿, 从而精确模拟用户前端的 Galileo 导航定位信号.

参考文献

[1] Coosson P, Radicella M S, Nava B. Comparisons of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuick models [J]. *Ann. Geophys.*, 2002, **45**(1):111-116

[2] Wang Jun, Dang Yamin, Xue Shuqiang. Application of a new ionospheric model—NeQuick in China [J]. *Sci. Surv. Mapp.*, 2007, **32**(4):38-39. In Chinese (王军, 当亚民, 薛树强. NeQuick 电离层模型在中国地区的应用 [J]. 测绘科学, 2007, **32**(4):38-39)

[3] Memarzadeh Y. Ionospheric Modeling for Precise GNSS Applications [D]. Tehran: Science in Geodesy Engineering, K.N. Toosi University of Technology, 2009

[4] Belabbas B, Schlueter S, Sadeque M Z. Impact of NeQuick Correction Model to Positioning and Timing Accuracy using the Instantaneous Pseudo Range Error of Signal Frequency Absolute Positioning Receivers [DB/OL]. 2005-09-13[2011-05-12]. http://elib.dlr.de/19831/01/99415.pdf

[5] Aragón-Ángel A, Orús R, Hernández-Pajares M, *et al.* Preliminary NeQuick assessment for future single frequency users of GALILEO [J/OL]. 2002[2011-05-06]. http://www.isprs.org/publications/related/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimarts8/N04.pdf.

[6] Cheng Jianquan, Yang Yuhong, Xin Gang. Computation and application of key input parameters of international reference ionosphere [J]. *J. Inf. Eng. Univ.*, 2011, **12**(1):56-57

[7] European Union. European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document [R], OS SIS ICD, 2010. 49

[8] Wang Jiexian, Li Haojun. Calculation and formula deduction of magnetic Declination and geomagnetic inclination [J]. *J. Geod. Geodyn.*, 2009, **29**(3):89