

# Klobuchar 模型和 NeQuick 模型 在中国地区的精度评估

杨 哲<sup>1,2</sup> 宋淑丽<sup>1</sup> 薛军琛<sup>1</sup> 朱文耀<sup>1</sup>

(1 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030)

(2 中国科学院研究生院,北京市玉泉路甲 19 号,100049)

**摘 要:**将 CODE 以及 GPS 广播星历提供的 8 个系数分别作为 Klobuchar 模型的输入参数,利用 Klobuchar 模型及 NeQuick 模型计算得到中国地壳运动观测网 15 个 GPS 基准站上 2000~2008 年的电离层 VTEC 序列,以欧洲定轨中心 CODE 提供的事后电离层产品作为参考标准,得到了两个模型在中国地区的精度评估结果。

**关键词:**Klobuchar 模型;NeQuick 模型;球谐函数模型;精度评估

**中图法分类号:**P228.41

GPS/Galileo 两大卫星导航定位系统,目前分别采用了 Klobuchar 模型和 NeQuick 模型作为单频用户的电离层延迟改正模型。我国北斗系统作为中国自主卫星导航系统,也需要建立相应的电离层延迟改正模型。欧洲定轨中心 CODE 提供的电离层产品,因其精度高<sup>[1-3]</sup>、信息量丰富及完整,被国际 GNSS 电离层研究用户广泛应用。本文以 CODE 提供的全球电离层球谐函数模型为评估标准,利用 Klobuchar 模型和 NeQuick 模型计算了中国地壳运动观测网 15 个 GPS 基准站上 2000~2008 年的 VTEC 时间序列,其中,Klobuchar 模型分别以 GPS 广播星历和 CODE 提供的 8 个系数作为模型输入参数。通过与 GIM 结果比对,分析了 Klobuchar 模型和 NeQuick 模型在中国地区的适用精度,得到了两种模型在中国地区各自表现的特征。

## 1 Klobuchar 模型与 NeQuick 模型

Klobuchar 模型是由 Bent 电离层经验模型简化而来的,假设所有电子都集中在高度为 350 km 的薄层,采用余弦函数的形式反映电离层的周日变化特征,参数的设置考虑了电离层周日变

化的振幅和相位变化,表达了电离层时间延迟的周日平均特性<sup>[4]</sup>。该模型主要由两个部分组成,基本形式为:

$$I_z(t) = \begin{cases} A_1 + A_2 \cos\left(\frac{2\pi(t-A_3)}{A_4}\right), & |t-A_3| < A_4/4 \\ A_1, & t \text{ 为其他值} \end{cases} \quad (1)$$

式中各参数意义参见文献[4]。CODE 分析中心自 2000 年 7 月中旬开始,根据全球 IGS 站实测的电离层图数据也定期地计算并提供模型所需的 8 个系数。本文对 CODE 提供的 8 参数 Klobuchar 模型的精度进行分析,其目的是为北斗系统电离层预报模型的建立提供一定的参考。

Klobuchar 模型的基本输入参数为:GPS 时间(周内秒),测站的地理坐标,测站上空卫星的高度角、方位角以及由 GPS 广播星历提供的 8 个模型参数。Klobuchar 模型的优点在于模型公式简单,且计算时效高。对于 GPS 单频导航用户来说,在使用 Klobuchar 模型修正电离层延迟误差时,所需参数均可实时获取或计算得到,如卫星高度角、方位角可由广播星历文件与测站坐标计算得到,8 个模型参数由广播星历文件得到。

收稿日期:2012-04-15。

项目来源:国家自然科学基金青年基金资助项目(10603011);国家 863 计划资助项目(2009AA12Z307);2009 年中国科学院上海天文台知识创新工程青年基金资助项目(5120090304)。

NeQuick 模型可以计算测站与卫星以及卫星与卫星之间任意给定时间、位置的电子密度及给定路径的电子含量,再沿高度进行数值积分得到传播路径上的电离层延迟,由倾斜因子可以计算天顶方向上的电离层延迟<sup>[5,6]</sup>。

NeQuick 模型属于一种半经验的电离层模型,该模型基于一系列的电离层探测参数,包括临界频率  $f_oE$ 、 $f_oF1$  和  $f_oF2$ ,  $F2$  区的转换参数  $M(3000)F2$ ,以及太阳活动参数  $F10.7$ (太阳光波长为 10.7 cm 的射电辐射流量)或  $R12$ (太阳黑子数月均值),计算由地面到  $F2$  层峰值以上至 2 000 km 区域的电子密度及电子含量<sup>[5]</sup>。该模型主要由两部分组成:高度低于  $F2$  层峰值的底部公式和高度在  $F2$  层峰值以上的顶部公式。模型基本形式为:

$$N(h) = \frac{4N_{\max}}{\left(1 + \exp\left(\frac{h-h_{\max}}{B}\right)\right)^2} \exp\left(\frac{h-h_{\max}}{B}\right) \quad (2)$$

式中各参数意义参见文献<sup>[5]</sup>。近几年来,NeQuick 模型经过了很多改进<sup>[5]</sup>,本文所用的是 ITU-R 提供的 NeQuick1 版本。

NeQuick 模型的基本输入参数为:信号传播路径上点的地理坐标和高度,月份,世界时,以及太阳活动参数( $R12$  或  $F10.7$ )。模型的输入文件包括 12 个 CCIR 系数(CCIR ?? ASC)文件和地磁纬度(DIPLATS. ASC)文件,每个 CCIR 文件提供了计算当月电离层参数  $f_oF2$  及  $M(3000)F2$  月均值的系数,共有  $(988+441) \times 2$  个系数;地磁纬度文件提供了国际地磁参考场中的地磁纬度格网数据,格网分辨率为纬度方向  $5^\circ$ ,经度方向  $10^\circ$ ,共有  $37 \times 37$  个数据,地磁纬度文件需要每 5 a 更新一次<sup>[7]</sup>。NeQuick 模型在输入文件的读取以及信号传播路径上电子含量的数值积分运算上需要花费一些时间,该模型公式以及计算时效性均较 Klobuchar 模型复杂。对导航用户来说,NeQuick 模型基本输入参数中除太阳活动参数(月均值)不可实时获取外,其他均可实时得到。由于模型中太阳活动参数输入值为月均值,Galileo 系统为了给用户提供每天的电离层延迟改正值,对该模型进行了优化<sup>[8,9]</sup>,将模型中表示太阳活动的参数  $F10.7$ (太阳活动月均值)用与地磁纬度有关的有效电离因子  $A_z$ (太阳活动日变化)代替,通过导航电文的形式将计算  $A_z$  的有关参数实时地播发给导航用户。

## 2 中国地区两个模型精度评估

从中国地壳运动观测网中选取分布于全国的 15 个 GPS 基准站。根据这些测站的观测数据文件,以每天 2 h 的采样间隔提取观测数据文件中的卫星列表,利用 NeQuick 模型和 Klobuchar 模型计算这些测站 2000~2008 年信号传播路径上的电离层延迟序列。同时,为比较分析 Klobuchar 模型使用不同方法得到的 8 参数计算电离层延迟与 NeQuick 模型电离层延迟的改正精度,本文将 CODE 以及 GPS 广播星历提供的 8 个系数分别作为 Klobuchar 模型输入参数,以 CODE 提供的球谐函数模型计算的 VTEC 为参考,评估两个模型在中国地区的电离层延迟改正精度。

### 2.1 精度评估指标

以模型偏差 Bias、标准偏差  $\sigma$  作为 VTEC 精度的评估指标:

$$\text{Bias} = \langle \text{VTEC}_{\text{mod}} - \text{VTEC}_{\text{ref}} \rangle$$

$$\sigma = \sqrt{\langle (\text{VTEC}_{\text{mod}} - \text{VTEC}_{\text{ref}} - \text{Bias})^2 \rangle} \quad (3)$$

式中,  $\text{VTEC}_{\text{mod}}$  为 NeQuick 模型和 Klobuchar 模型计算的电离层 VTEC;  $\text{VTEC}_{\text{ref}}$  为电离层延迟的参考值,本文将 CODE 提供的电离层 VTEC 作为参考值;符号  $\langle \rangle$  代表对累积和取平均。

### 2.2 VTEC 时间序列统计分析

图 1 给出了 2002 年及 2007 年(分别为太阳活动的峰年和谷年)各站(纬度方向由高到底排列) VTEC 年均值统计结果。图 2 给出了分布在不同纬度带上(琼州 qion、武汉 wuhn、北京 bjfs、乌鲁木齐 urum)的 4 个 GPS 基准站 2002 年及 2007 年各模型 VTEC 时间序列的月均值统计结果。

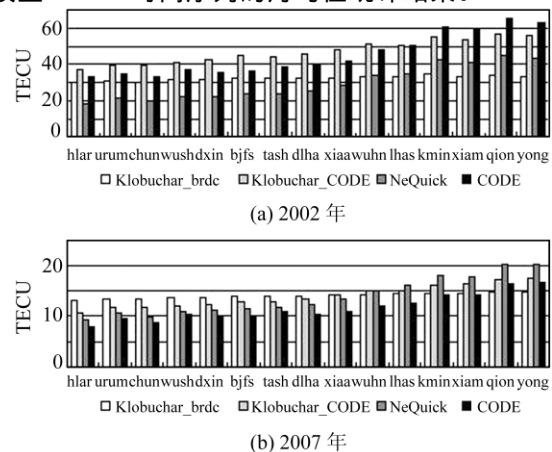


图 1 2002 年及 2007 年各模型 VTEC 年均值统计  
Fig. 1 Yearly Value of VTEC Calculated by Models  
in the Year 2002 and 2007

从图1、2可知,相对于CODE的VTEC参考值,在太阳活动峰年,NeQuick模型低估了电离层延迟,而在太阳活动平静年则高估了电离层延迟,这可能与该模型中太阳活动输入参数有一定关系,本文中该模型计算采用的是太阳黑子数月均值。Klobuchar模型采用brdc系数计算的各站电离层延迟年均值随纬度变化不敏感,没有很好地表达电离层延迟随纬度变化的特点。因为CODE为Klobuchar模型提供的系数是根据电离层图数据计算得来的,使得在不同地区不同太阳活动期由Klobuchar模型采用CODE提供系数计算的电离层延迟与CODE参考值符合得相对较好。

各模型在不同纬度不同太阳活动期VTEC月均值的变化表现出了明显的季节效应,即春秋两季VTEC值出现峰值,冬夏两季出现谷值。而且,随着测站纬度的升高,VTEC值逐渐降低,在太阳活动高峰年各站VTEC月均值均大于太阳活动平静年,2002年VTEC最大达80TECU左右,而2007年最大仅达20TECU,这说明电离层VTEC变化受太阳活动影响甚大。

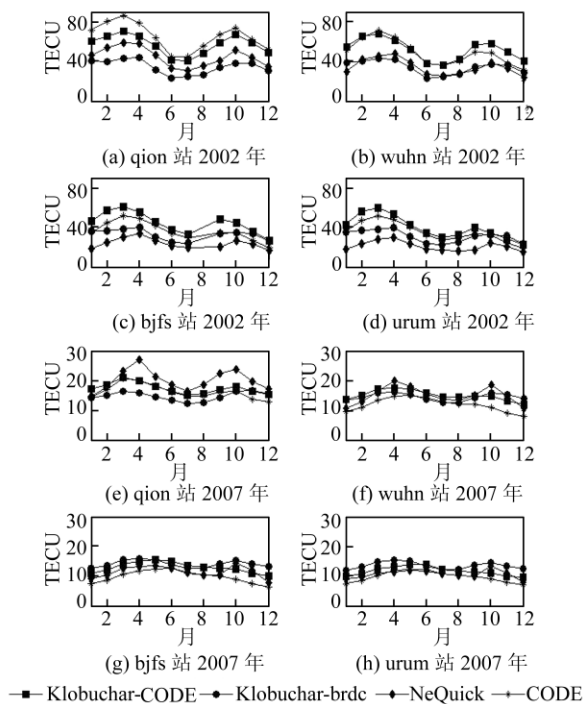


图2 2002年及2007年各模型VTEC月均值统计  
Fig. 2 Monthly Value of VTEC Calculated by Models in the Year 2002 and 2007

将CODE及GPS广播星历提供的8个系数分别作为Klobuchar模型的输入参数,计算得到了两个模型(Kb表示Klobuchar模型系数由GPS广播星历提供,Kc即为由CODE提供;N表示NeQuick

模型)相对于CODE参考值的标准偏差 $\sigma$ 及偏差Bias。图3和图4分别表示沿纬度方向各站点(由高到底)2000~2008年两个模型相对于CODE参考值偏差Bias及标准偏差 $\sigma$ 的统计图。

从图3可知,两个模型的Bias变化相差较大。NeQuick模型的Bias随太阳活动周期的变化明显,在太阳活动峰年2002年达到最大值(负向)-17TECU左右,以后很快负向变小,到2003~2005年间接近于零,然后逐渐正向变大,到2008年达7TECU左右,这也说明了NeQuick模型在太阳活动峰年低估了电离层延迟,而在活动平静年则高估了电离层延迟的特征;NeQuick模型的Bias随纬度的变化不太明显,在全国各站呈现一致性的变化特征。Klobuchar模型的Bias随纬度的变化特征明显,在太阳活动高峰期2000~2002年全国南北各站Kc的Bias差别高达15TECU,但这种差别很快变小,到2006~2008年间其差别仅为1~2TECU;而Kb的Bias差别则高达30TECU,而且在2000年各站Bias达到负向最大,这和brdc提供的模型系数有关,模型系数并未很好地表达电离层的真实变化,使得2000年计算结果偏差较大。这种差别也是逐渐减小,

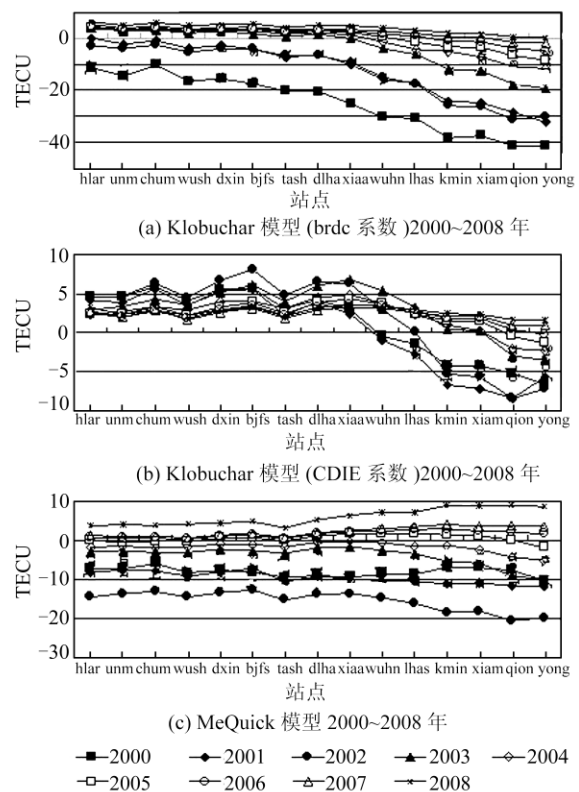


图3 各站点2000~2008年各模型偏差统计图  
Fig. 3 Bias Statistic of Models for Sites from the Year 2000 to 2008

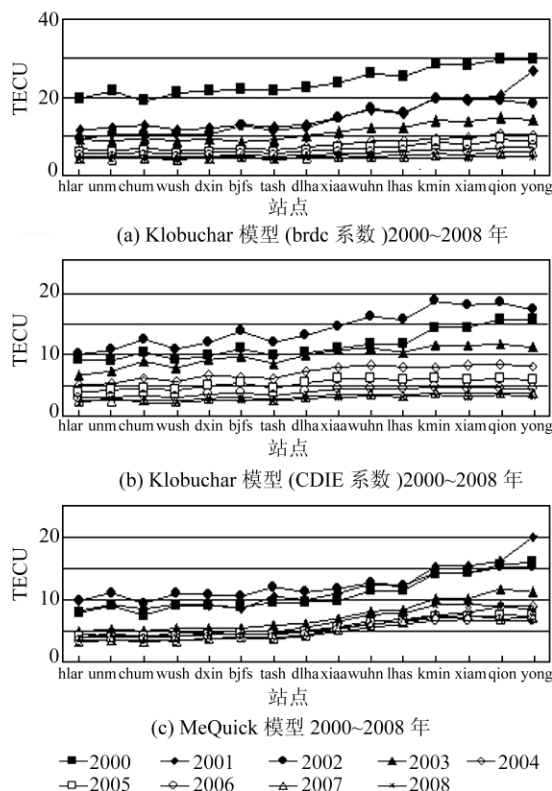


图 4 各站点 2000~2008 年模型标准偏差统计图  
Fig. 4 Standard Deviation Statistic of Models for the Sites from the Year 2000 to 2008

到 2006~2008 年间其差别为 4~8 TECU。从以上各图也可以看出,在太阳活动平静年,各模型高估了电离层延迟,使得偏差为正值。

由图 4 可知,N 与 Kc 两个模型去除 Bias 后的标准偏差相差不大,最大仅相差 3 TECU 左右;而 Kb 相对于 N 的 RMS 最大相差达 14 TECU,这种差异主要在 2000 年及 2001 年出现。两个模型标准偏差  $\sigma$  随太阳活动周期和纬度的变化趋向雷同,Kc 与 N 均在太阳活动峰年 2002 年达到最大值,Kb 则在 2000 年/2001 年达到最大,且大于 Kc 和 N 统计最大值;随着太阳活动的减弱, $\sigma$  很快变小,到太阳活动平静年 2005~2008 年全国平均基本上不超过 7 TECU;随纬度的变化,均呈现随纬度的减小而增大的特征。两个模型的主要差异是:Klobuchar 模型的  $\sigma$  在太阳活动平静年随纬度的变化较小,2006~2008 年全国南北各站 Kc 的  $\sigma$  均在 2~4 TECU 左右,Kb 及 N 模型的  $\sigma$  在 3~9 TECU 之间变化。

### 3 结 语

1) 两个模型都较好地表现了电离层随太阳活动、纬度变化以及明显的春秋双峰的季节效应

特征。但 Kb 模型计算的电离层延迟随纬度变化不敏感,没有很好地表达电离层延迟随纬度变化的特点,这是 Kb 模型的一个明显缺点。

2) NeQuick 模型的系统偏差随纬度变化趋向不是很明显,而随太阳活动周期的变化甚为明显,在活动峰年低估了电离层 TEC,而在平静年则高估了电离层 TEC。Klobuchar 模型的系统偏差随纬度减小而增大的倾向明显,没有充分体现电离层 TEC 随纬度变化的特征。Klobuchar 模型 Kc 系统偏差随太阳活动周期的变化不明显,而 Kb 呈现与 NeQuick 模型类似的变化特征。

3) 两个模型去除了系统偏差后的标准偏差,均呈现在太阳活动峰年和低纬度地区较大的特征。从总体比较来看,NeQuick 模型的标准偏差最小,Kc 次之,Kb 最大。

4) 两个模型在中国地区的系统偏差及标准偏差随太阳活动、纬度的变化很有规律性,为这两个模型在中国地区的优化和改进提供了可能和依据。如 NeQuick 模型的 Bias 随太阳活动在全国呈现一致性的变化特征,就很容易得到改正;Klobuchar 模型在全国地区随纬度变化明显,这也为模型改正提供了一定的参考依据。对于我国北斗卫星导航系统而言,两个模型优化改进后可以考虑作为北斗系统的电离层延迟改正模型。

### 参 考 文 献

- [1] Feltens J, Schaer S. IGS Products for the Ionosphere[C]. The IGS analysis centers workshop ES-OC, Darmstadt, Germany, 1998
- [2] Feltens J. IGS Products for the Ionosphere-One Year of Ionosphere Working Group Activities[C]. The IGS Analysis Center Workshop, SIO, La Jolla, California, 1999
- [3] Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The IGS VTEC Maps: a Reliable Source of Ionospheric Information Since 1998[J]. J Geod, 2009, 83: 263-275
- [4] Klobuchar J A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(3): 325-331
- [5] Nava B, Coisson P, Radicella S M. A New Version of the NeQuick Ionosphere Electron Density Model [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70: 1 856-1 862
- [6] Radicella S M. The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution[J]. Annals of Geophysics, 2009, 52 (3/4): 417-422

- [7] Bidaine B, Prieto-Cerdeira R, Orus R. NeQuick; in-Depth Analysis and New Developments [C]. The 3rd ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies, Noordwijk, 2006
- [8] Aragón-Angel A, Orús R, Hernández-Pajares M, et al. Preliminary NeQuick Assessment for Future Single Frequency Users of GALILEO [C]. The 6th Geomatic Week, Barcelona, Spain, 2005
- [9] Radicella S M, Nava B, COISSON P. Ionospheric Models for GNSS Single Frequency Range Delay Corrections [J]. Física de la Tierra, 2008, 20: 27-39

第一作者简介: 杨哲, 硕士生, 研究方向为 GNSS 电离层模型应用分析。

E-mail: yangzhe@shao.ac.cn

## Accuracy Assessment of Klobuchar Model and NeQuick Model in China

YANG Zhe<sup>1,2</sup> SONG Shuli<sup>1</sup> XUE Junchen<sup>1</sup> ZHU Wenyao<sup>1</sup>

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, A19 Yuquan Road, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Klobuchar model is used for ionospheric delay correction by GPS, and NeQuick model is used by the Galileo system with the same purpose in the single frequency mode. We consider ionosphere products that are post-processed by Center for Orbit Determination in Europe as reference, taking advantage of vertical TEC data provided by Klobuchar and NeQuick model for the 15 GPS basic stations in Crustal Movement Observation Network of China from the year 2000 to 2008. And the eight coefficients for Klobuchar model will be provided by CODE and GPS navigation message respectively, we analyze the application of the two models in the Chinese region. ① It is more obvious that the bias of Klobuchar model will increase with respect to the lowering of latitude. Both NeQuick and Klobuchar model of GPS broadcasting are observed to have stronger links to the periodic variations of solar activities. ② There are relatively large standard deviation which has excluded bias, in the two models in peak year of solar activity and low latitude region. yet on the whole, NeQuick model produces the least standard deviation. ③ The fact that the two models, when applied to the area of China, show regular variation depending on solar activities and latitude, provide with the possibility and basis of the further optimization and improvement of them.

**Key words:** Klobuchar model; NeQuick model; spherical harmonics model; accuracy assessment

**About the first author:** YANG Zhe, postgraduate, majors in application analysis of GNSS ionospheric model.

E-mail: yangzhe@shao.ac.cn