0254-6124/2019/39(1)-046–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HU Hanjing, WANG Xiaoni, LIU Junting. Ionospheric delay correction of single-frequency for global navigation satellite system based on NTCM-BC model (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 46-54. DOI:10.11728/cjss2019.01.046

基于 NTCM-BC 模型的全球卫星导航系统单频电离层延迟修正 *

胡菡静　王小妮　刘俊婷

(青岛理工大学琴岛学院　青岛 266106)

摘　要　选择 NTCM-BC 模型作为单频电离层延迟修正模型, 通过非线性最小二乘拟合的方法, 利用提前一天预测的电离层图 (COPG 文件), 计算得到 NTCM-BC 模型修正系数; 利用 Klobuchar 模型和 IGS 发布的 GIM 数据对 NTCM-BC 模型进行比较和分析. 对太阳活动高、中、低年实测数据的分析结果表明: 全球平均水平上, NTCM-BC 模型的电离层延迟修正性能明显优于 Klobuchar 模型, NTCM-BC 模型的 TEC 平均误差和均方根误差比 Klobuchar 模型分别下降了 41% 和 30%; 模型的 TEC 计算误差与太阳活动剧烈程度成正相关, 即太阳活动高年模型误差较大, 太阳活动低年误差相对较低. 相较于磁静日, 磁扰日期间 Klobuchar 模型和 NCTM 模型的误差均有一定程度的增加. 此外, 模型的电离层修正误差同时存在明显的纬度、季节和地方时差异.

关键词　电离层延迟, 全球卫星导航系统, 非线性最小二乘拟合, Klobuchar 模型, NTCM-BC 模型

中图分类号　P 323

Ionospheric Delay Correction of Single-frequency for Global Navigation Satellite System Based on NTCM-BC Model

HU Hanjing　WANG Xiaoni　LIU Junting

(*Qindao College, Qingdao Technological University, Qingdao* 266106)

Abstract　Ionospheric delay is one of dominant factors that affect single-frequency positioning accuracy of Global Navigation Satellite System (GNSS). It is very important for GNSS single-frequency users to study the ionospheric delay correction model of high accuracy. In this paper, an ionospheric correction algorithm called Neustrelitz TEC Broadcast model (NTCM-BC) is chosen as the single-frequency ionospheric delay correction model. The correction coefficients of NTCM-BC model are obtained by non-linear least square fitting method based on the 1-day predicted ionospheric maps (COPG file). The results of NTCM-BC model have been compared with Klobuchar model and IGSG's Global Ionosphere Maps (GIM). It can be concluded that, for solar maximum, moderate or

* 科技部国际科技合作专项项目资助 (2014DFR21280)

2018-07-28 收到原稿, 2018-11-19 收到修定稿

E-mail: 10707754@qq.com

minimum, NTCM-BC model can achieve a significantly better performance than Klobuchar model in global average. The mean error and Root Mean Square Error (RMSE) of TEC calculation decrease by 41% and 30%, respectively. The TEC deviations of the two models have positive correlations with solar activity. Compared with the geomagnetic quiet days, the errors of Klobuchar and NTCM-BC models will increase during the geomagnetic perturbed days. Moreover, the correction error depends on latitude, season and local time.

Key words Ionospheric delay, GNSS, Non-linear least square fitting, Klobuchar model, NTCM-BC model

0 引言

电离层是卫星导航系统单频操作最大的误差来源. 卫星导航信号在穿越电离层时, 由于无线电波与电离层等离子体的相互作用, 电磁信号被延迟. 对 L 频段信号而言, 电离层延迟可导致高达百米的延迟误差 [1]. 在忽略高阶项的情况下, 导航信号遇到的延迟误差与接收端和卫星传播路径上的倾斜总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 成正比. 对于双频接收机, 结合测量可以消除绝大部分的传播延迟 [2]. 考虑到制造成本和设备复杂性, 单频接收机仍然是目前最便宜和最广泛的 GNSS 信号接收设备. 这些单频用户需要合适的电离层模型和导航卫星播发的修正参数, 以降低电离层延迟误差. 因此, 构建具有较高精度的电离层延迟误差模型并利用修正数据对模型进行驱动更新是单频用户提高导航定位精度的一个重要的研究方向.

为满足 GPS 系统单频电离层延迟修正的需要, Klobuchar[3] 提出了一种能有效修正单频导航接收机电离层影响的方法, 即 8 参数 Klobuchar 模型修正法. Klobuchar 模型将夜间垂直电离层延迟设置为常数 5 ns, 并将白天延迟用半余弦函数来表示, 描述了 GPS L1 频率的平均垂直延迟. Klobuchar 模型计算简单快捷, 是最广泛使用的广播电离层模型. 但是, Klobuchar 模型对于单频率用户的电离层修正精度只有约 50%[4,5]. 中国北斗导航系统采用了 8 参数 CIM, 该模型与 GPS Klobuchar 模型相似, 仅在参数设定、映射函数、参数估计方法等方面与 Klobuchar 模型略有不同, 其修正精度稍优于 Klobuchar 模型 [6]. 为进一步提高电离层修正精度, 欧洲的伽利略系统采用了三维时变的电离层修正模型 NeQuick G. NeQuick G 模型利用全球分布的 20 个永久监测站获得的前一天的 GNSS 数据计算 3 个修正系数, 驱动 NeQuick 模型, 其电离层延迟修正精度达到约 70%, 优于 GPS Klobuchar 模型 [7,8]. Yang 等 [9] 对 Klobuchar 模型与 NeQuick 模型在中国地区的电离层延迟修正精度进行了评估 [9]. Wang 等 [10] 对多个 NeQuick 电离层模型参数的应用精度进行了分析, 结果表明 NeQuick G 模型的修正精要稍优于 Klobuchar 模型的修正精度. 相对于 Klobuchar 模型, NeQuick 修正模型更复杂, 计算时间更长.

针对卫星导航电离层修正的需求, 德国航天中心 (DLR) 通信和导航研究所构建了一个全球 TEC 模型 NTCM-GL (Global Neustrelitz TEC Model). 该模型利用 12 个参数描述电离层随年、季节、月份及地方时等时间变化和随磁纬度、驼峰位置等空间变化 [11]. 根据导航系统电离层延迟单频修正的需要, 在 NTCM-GL 的基础上进行简化, 提出了 9 参数模型 NTCM-BC (Neustrelitz TEC Broadcast model). 研究表明, NTCM-BC 的 TEC 预测性能优于 Klobuchar 模型, 与 NeQuick G 模型的预测性能相当. 但在复杂性方面, NTCM-BC 比 NeQuick G 更简单, 与 Klobuchar 模型相当 [12]. 与 NTCM-GL 相比, NTCM-BC 模型系数不是恒定的, 需要根据监测站每日的 GNSS 实测数据计算出来, 以重建最近的电离层逐日变化.

本文基于 NTCM-BC 模型, 利用欧洲定轨中心 (CODE) 提前一天预测的电离层数据 (COPG GIM 文件) 驱动 NTCM-BC 模型, 通过非线性最小二乘拟合方法计算 NTCM-BC 模型的修正系数; 利用 IGS 发布的电离层图 (IGSG GIM) 数据产品, 对 NTCM-BC 模型在不同太阳活动年份的磁静日及磁暴日期间的电离层修正精度进行分析评估. 研究结果可为中国建立适合北斗三号全球导航系统的电离层模型

提供理论支撑.

1 单频电离层延迟修正模型

1.1 Klobuchar 模型

美国 GPS 导航系统采用的 Klobuchar 模型是随电离层穿刺点 (Ionospheric Pierce Point, IPP) 的地磁纬度变化而变化的半余弦函数. 函数最大值对应的时间设定为 14:00 LT, 夜间垂直电离层延迟设置为常数 5 ns 或 9.24 TECU. 利用三阶多项式系数计算余弦函数的振幅和周期, 这些系数可由 GPS 卫星播发的导航电文获得. Klobuchar 模型基于与薄壳电离层近似的垂直时延模型 [4]. 作为二维模型, Klobuchar 模型需要映射函数 F 转换垂直于用户级的倾斜延迟.

$$T_{\rm ion}=\begin{cases} F\Big[5.0\times10^{-9}+ \\ \quad A_{\rm mp}(1-x^2/2+x^4/24)\Big], & |x|<1.57; \\ F(5.0\times10^{-9}), & |x|\geqslant 1.57. \end{cases} \tag{1}$$

其中, $T_{\rm ion}$ 为 GPS L1 频段的电离层延迟, 单位为 s. 式 (1) 中各变量计算方法如下.

$$A_{\rm mp}=\begin{cases} \sum\limits_{n=0}^{3}\alpha_n\varphi_{\rm m}^n, & A_{\rm mp}\geqslant 0; \\ 0, & A_{\rm mp}<0. \end{cases} \tag{2}$$

$$x=2\pi(t-50\,400)/P_{\rm er}. \tag{3}$$

$$P_{\rm er}=\begin{cases} \sum\limits_{n=0}^{3}\beta_n\varphi_{\rm m}^n, & P_{\rm er}\geqslant 72\,000; \\ 72\,000, & P_{\rm er}<72\,000. \end{cases} \tag{4}$$

$$F=1.0+16.0(0.53-E)^3. \tag{5}$$

其中, α_n, β_n 为卫星播发的 Klobuchar 模型修正系数, $\varphi_{\rm m}$ 为卫星–接收机路径上电离层 350 km 高度 IPP 对应地磁纬度, t 为当地时间 (单位为 s), F 为垂直转换为倾斜路径映射函数, E 为观测仰角 (单位为半周).

1.2 NTCM-BC 模型

为满足卫星导航系统电离层修正的需要, NTCM-BC 模型对全球电离层 TEC 每日时空变化进行建模, 模型将电离层 TEC 分解为三部分 [12], 具体表示如下:

$$F_{\rm model}^{\rm vert}=F_1F_2F_3, \tag{6}$$

$$F_1=\cos\chi'''+\cos\chi''[c_1\cos V_{\rm D}+ \\ c_2\cos V_{\rm SD}+c_3\sin V_{\rm SD}+ \\ c_4\cos V_{\rm TD}+c_5\sin V_{\rm TD}], \tag{7}$$

$$F_2=1+c_6\cos\varphi_{\rm m}, \tag{8}$$

$$F_3=c_7+c_8\exp\Big[-\frac{(180\varphi_{\rm m}\varphi_{c1}/\pi)^2}{2\sigma_{c_1^2}}\Big]+ \\ c_9\exp\Big[-\frac{(180\varphi_{\rm m}\varphi_{c_2}/\pi)^2}{2\sigma_{c_2}^2}\Big]. \tag{9}$$

其中: F_1 项描述了电离层随地方时的变化, 包括日、半日和 1/3 日三个谐波成分; F_2 项描述了 TEC 随地磁纬度 $\varphi_{\rm m}$ 的变化; F_3 项则利用高斯函数描述了 TEC 与磁赤道两侧驼峰区位置之间的联系. 式 (7) 中 $V_{\rm D}$, $V_{\rm SD}$, $V_{\rm TD}$ 分别表示三个谐波成分的角相位, φ_{c_1} 和 φ_{c_2} 分别为 NTCM-BC 模型北侧和南侧驼峰区位置, 分布设定为 16°N 和 10°S, σ_{c_1} 和 σ_{c_2} 表示驼峰区半峰宽, 分别为 12° 和 13°. 式 (7) 中系数 (c_1,c_2,c_3,c_4,c_5) 主要用于调节电离层 TEC 的日、半日和 1/3 日的幅度, 式 (8) 中系数 c_6 主要用于调节电离层 TEC 随磁纬度的变化幅度, 式 (9) 中系数 (c_7,c_8,c_9) 则主要用于调节模型驼峰区电离层 TEC 的变化幅度.

式 (7)~(9) 中各参量的具体计算方法如下:

$$V_{\rm D}=2\pi\frac{t-14}{24}, \tag{10}$$

$$V_{\rm SD}=2\pi\frac{t}{12}, \tag{11}$$

$$V_{\rm TD}=2\pi\frac{t}{8}, \tag{12}$$

$$\cos\chi'''=\cos(\varphi-\delta)+0.4, \tag{13}$$

$$\cos\chi''=\cos(\varphi-\delta)-\frac{2}{\pi}\varphi\sin\delta, \tag{14}$$

$$\delta=\frac{23.45}{180/\pi}\sin\Big(2\pi\frac{284+D_y}{365}\Big). \tag{15}$$

其中, t 为地方时 $\cos\chi''$ 和 $\cos\chi'''$ 为 TEC 对太阳天地角 χ 的依赖性, φ 为地理纬度, δ 为太阳赤经, D_y 为年积日.

为计算任意信号传播路径上的电离层延迟, 需要将垂直 TEC 转换为倾斜 TEC, 采用以下投影函数

$$\delta_{\rm TECs}/\delta_{\rm TECv}=M(E)= \\ \big\{1-[R_{\rm e}\cos E/(R_{\rm e}+h_{\rm I})]^2\big\}^{-1/2}. \tag{16}$$

其中, δ_{TECv} 和 δ_{TECs} 分别为垂直 TEC 和倾斜 TEC, R_{e} 为地球半径, E 为观测仰角, $h_{\mathrm{I}}=400\,\mathrm{km}$ 为电离层薄层高度.

2 NTCM-BC 模型修正系数计算

2.1 数据来源

卫星导航系统向单频用户播发的电离层修正系数通常由前一日监测站实测的电离层数据驱动模型获取. 作为国际 GPS 服务 (IGS) 关联分析中心 (IAAC) 第一个发布电离层预测产品的机构, 欧洲定轨中心 (CODE) 2012 年开始在网上公开发布提前 1 和 2 天的电离层 TEC 地图 (即 COPG 数据). COPG 数据是基于历史实测的电离层数据并结合球谐函数系数外推的方法获得 [13,14].

这里选择 2012, 2014, 2016 和 2017 年 CODE 发布的提前一天的电离层预测图 (C1PG 文件) 作为 NTCM-BC 模型的驱动数据, 利用非线性最小二乘拟合方法计算得到 NTCM-BC 模型的 9 个修正系数 c_i $(i=1,2,\cdots,9)$. 单频接收机用户利用这 9 个系数即可重构全天全球任意区域的电离层延迟值.

采用 IGS 发布的最终电离层地图 (IGSG GIM 数据) 作为电离层延迟真值 [15], 对模型的修正精度进行评估. 此外, 为了分析 NTCM-BC 模型在不同电离层扰动状况下的电离层延迟修正精度, 分别对磁静日 (Kp 指数 <3) 和磁扰日 (Kp 指数 $\geqslant 3$) 期间模型的精度进行了比较分析. 为了对比方便, 这里也给出了同一时段 Klobuchar 模型的电离层延迟修正结果. Klobuchar 模型的 8 个修正系数取自 NOAA (美国国家海洋和大气管理局) 国家大地测量 (NGS) 档案中心 *.

2.2 修正系数估计

基于最优化估计理论, 通过限定 COPG 预报的 TEC 值与模型输出的 TEC 值的平方误差最小估计 NTCM-BC 模型的 9 个修正系数 [16]. 目标函数为

$$\arg\min\sum_{n=1}^{N}|\delta_{\mathrm{COPG}}(P_n)-\delta_{\mathrm{model}}(P_n,c_1,c_2,\cdots,c_9)|_n^2. \tag{17}$$

其中, N 代表 CODE 提前 1 天预报的电离层 TEC 值, δ_{model} 表示 NTCM-BC 模型计算的 TEC 值, P_n 表示第 n 个 TEC 值所在的地理位置.

对目标函数进行简化, 可以表示为

$$\arg\min\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{X}). \tag{18}$$

其中, $\boldsymbol{Y}=\sum_{n=1}^{N}|\delta_{\mathrm{COPG}}\delta_{\mathrm{model}}(\boldsymbol{X})|_n^2$, $\boldsymbol{X}$ 即模型修正系数 $(c_1,c_2,\cdots,c_9)$. 基于非线性最小二乘拟合算法, 采用迭代计算的方法即可解算出 NTCM-BC 模型的修正系数 [16,17], 具体表示为

$$\boldsymbol{X}_{i+1}=\boldsymbol{X}_i+(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}. \tag{19}$$

其中, $\boldsymbol{H}$ 为 Jacobi 矩阵, 即 $\boldsymbol{H}=(\partial\boldsymbol{Y}/\partial\boldsymbol{X})_i$, i 为迭代轮次. 一般设第 $i+1$ 轮 NTCM-BC 模型的平均误差与第 i 轮模型的平均误差小于 0.1 TECU 即可终止迭代.

3 精度评估与分析

3.1 电离层延迟估计结果

图 1 给出了 2012 年 1 月 14 日 00:00 UT 电离层 TEC 的计算结果. 在图 1 中可以看出, 图 1(b) CODE 预报的电离层 TEC 地图与图 1(a) 的电离层真实分布表现形态基本一致, 仅在某些局部区域如低纬区域的电离层驼峰区的 TEC 峰值大小、出现位置等存在一定的误差. 图 1(c) 中 Klobuchar 模型给出的 TEC 分布则与真实分布存在明显的差别, 仅 TEC 峰值出现的大致区域与 IGSG 结果接近; 模型给出的 TEC 最大值仅约 40 TECU, 而 IGSG 的峰值约 80 TECU, 二者相差甚多. 相对于 Klobuchar 模型, 图 1(d) 中 NTCM-BC 模型的计算结果与真实的 TEC 地图在变化形态及数值变化范围方面更接近, 其重构的 TEC 地图更好的表征了电离层的时空变化特征. 受模型修正参数数量的限制, 其给出的电离层 TEC 分布在很多细节上与真实分布还存在一定差距, 如 1(d) 中模型并未给出较清晰的磁赤道南北两侧的驼峰结构.

图 2 给出了 Klobuchar 模型及 NTCM-BC 模型重构的电离层 TEC 与 IGSG 给出的 TEC 真值的差

*ftp://www.ngs.noaa.gov/cors/rinex

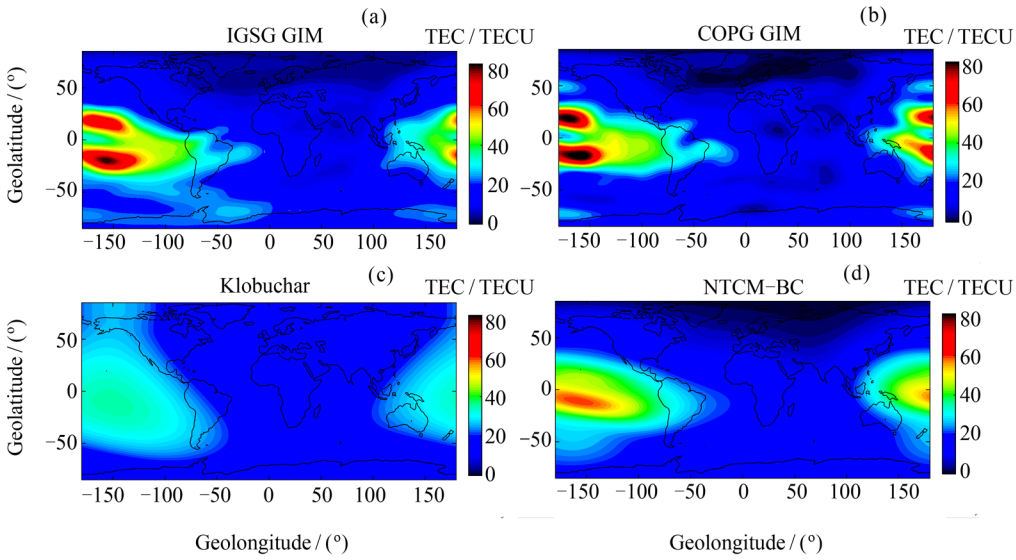


图 1 2012 年 1 月 14 日 00:00 UT 不同模型的电离层 TEC 地图比较. (a) IGSG 电离层 TEC 地图, (b) CODE 提前一天预报的电离层 TEC 地图 (CODG 数据), (c) Klobuchar 模型给出的电离层 TEC 地图, (d) NTCM-BC 模型给出的电离层 TEC 地图

Fig. 1 Comparison on TEC maps derived by different models at 00:00 UT on January 14, 2012. (a) IGSG's global ionosphere map; (b) CODE's 1-day predicted ionosphere map; (c) Global ionosphere map calculated by Klobuchar model; (d) Global ionosphere map calculated by NTCM-BC Klobuchar model

值分布. 从图 2(a) 可以看出, Klobuchar 模型给出的 TEC 分布在磁低纬区域与磁高纬区域均存在明显的误差, 其中低纬区域计算的 TEC 比真值明显偏低, 而高纬区域则偏高, 最大差值超过 40 TECU 以上. 从图 2(b) 给出的结果可以看出, NTCM-BC 模型给出的 TEC 误差分布明显小于 Klobuchar 模型, 其出现较大误差的区域主要集中在磁低纬区域, 最大差值约为 30 TECU, 大误差分布区域相对较小且分布更为集中. 从对比结果看, NTCM-BC 模型明显优于 Klobuchar 模型.

3.2 精度分析与评估

欧洲定轨中心从 2012 年以后才开始发布 COPG 数据. 这里选择太阳活动高年 (2012 和 2014 年)、太阳活动中年 (2016 年) 和太阳活动低年 (2017 年) 三个典型的太阳活动年份的实测数据, 对 Klobuchar 和 NTCM-BC 模型的全球范围内电离层 TEC 精度进行评估, 结果如图 3 所示.

图 3(a) 给出的是 Klobuchar 模型的 TEC 重构误差统计直方图. 从图 3(a) 可以看出, Klobuchar 模型给出的电离层 TEC 值比真实 TEC 值低, 该模型的绝对 TEC 误差为 6.72 TECU, 均方根误差为 9.65 TECU, 68% 统计样本误差小于 6.72 TECU, 95% 统计样本误差小于 17.01 TECU, 99.9% 统计样本误差小于 29.66 TECU.

图 3(b) 给出的是 NTCM-BC 模型的 TEC 重构误差统计直方图. 从图 3(b) 可以看出, 相对于 Klobuchar 模型, NTCM-BC 模型的误差更符合标准正态分布, 通过该模型计算得到的 TEC 相对于真实 TEC 的误差无明显的偏大或偏小. NTCM-BC 模型的绝对 TEC 误差为 3.96 TECU, 均方根误差为 5.72 TECU, 68% 统计样本误差小于 4.69 TECU, 95% 统计样本误差小于 10.14 TECU, 99.9% 统计样本误差小于 17.64 TECU. NTCM-BC 模型仅比 Klobuchar 模型多 1 个修正参数, 但模型的 TEC 修正精度比 Klobuchar 模型却有明显提升. 从统计结果来看, NTCM-BC 模型精度明显优于 Klobuchar 模型, 其中电离层 TEC 绝对平均误差下降了约 41%, 标准差下降了 30%.

3.3 讨论

表 1 给出了不同太阳活动年份磁静日 ($Kp < 3$)

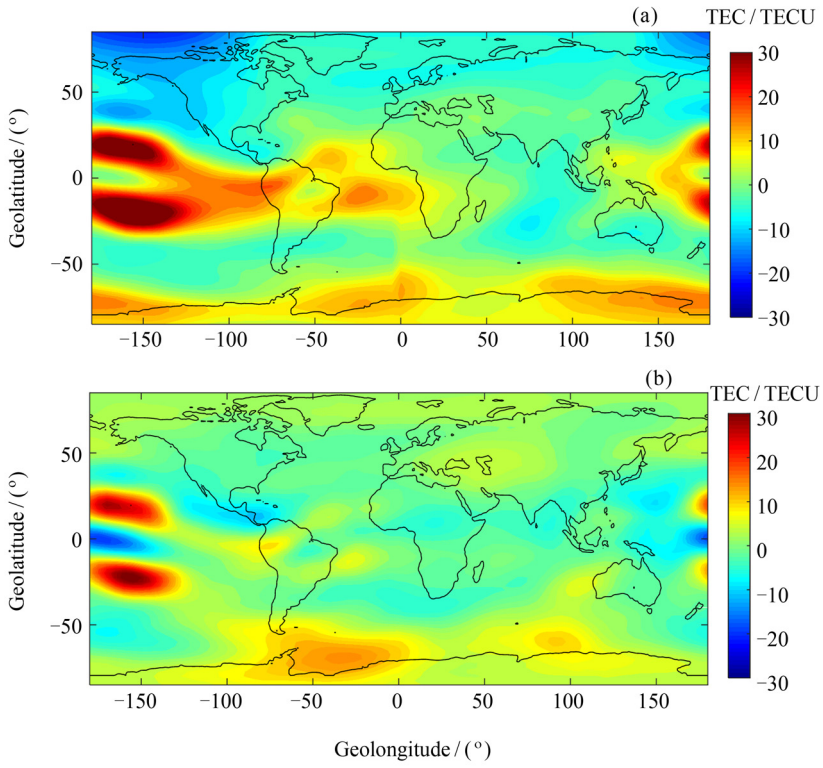


图 2 2012 年 1 月 14 日 00:00 UT Klobuchar 模型 (a) 和 NTCM-BC 模型 (b) 电离层 TEC 重构误差比较

Fig. 2 Comparison on the TEC deviations of Klobuchar (a) and NTCM-BC (b) model at 00:00 UT on January 14, 2012

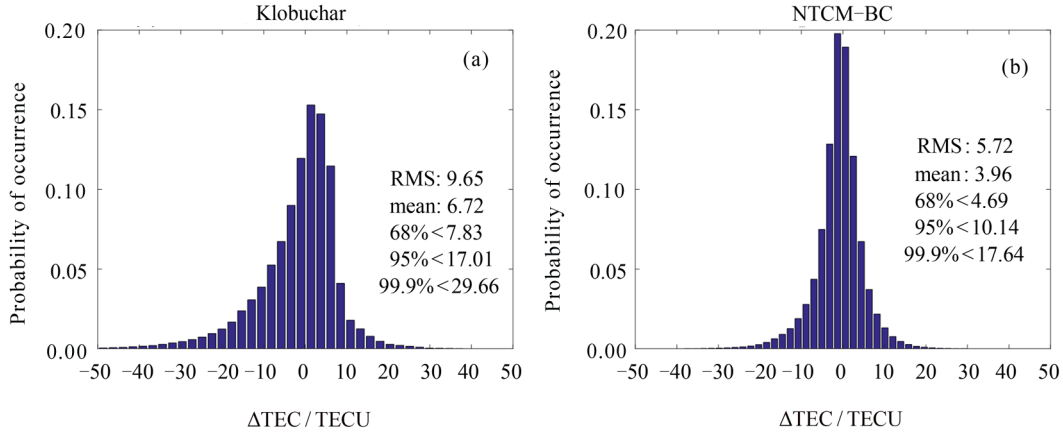


图 3 根据 Klobuchar(a) 和 NTCM-BC (b) 模型计算得到的 TEC 与 IGS GIM 的电离层 TEC 比较

Fig. 3 Statistical comparisons of TEC calculated by Klobuchar (a) and NTCM-BC (b) model with IGS final GIMs

和磁扰日 ($Kp \geqslant 3$) 模型计算的电离层 TEC 精度.

由表 1 可以看出, 2014 年两个模型的绝对误差和标准差最大 (年平均 $F_{10.7}$ 指数约 157), 2012 次之 (年平均 $F_{10.7}$ 指数约 131), 2016 年再次之 (年平均 $F_{10.7}$ 指数约 94), 2017 年最小 (年均 $F_{10.7}$ 指数约 80). 因此, 模型的误差与太阳活动剧烈程度呈正相关, 即太阳活动高年模型误差较大, 太阳活动低年误差相对较低. 磁静日期间 Klobuchar 模型的 TEC

表 1 磁静日和磁扰日期间 Klobuchar 模型和 NTCM-BC 模型电离层修正误差 (单位 TECU)

Table 1 Statistical comparisons of Klobuchar and NTCM-BC model during geomagnetically quiet and disturbed days (unit TECU)

	年份	平均误差 (ME)		标准差 (STD)	
		Klobuchar	NTCM-BC	Klobuchar	NTCM-BC
磁静日	2012	7.03	4.08	10.04	5.59
	2014	9.53	5.34	13.05	7.25
	2016	5.06	3.11	7.17	4.37
	2017	4.11	2.03	5.16	2.76
	均值	6.43	3.64	8.85	4.99
磁扰日	2012	7.15	4.19	10.33	5.82
	2014	9.11	5.92	12.71	8.02
	2016	6.49	4.04	9.02	5.78
	2017	4.80	2.91	6.29	4.40
	均值	6.89	4.26	9.59	6.01

平均误差和标准差分别为 6.43 TECU 和 8.85 TECU, 而 NTCM-BC 模型则为 3.64 TECU 和 4.99 TECU, 比 Klobuchar 模型分别下降了 43% 和 44%. 磁扰日期间, Klobuchar 模型的 TEC 平均误差和标准差分别为 6.89 TECU 和 9.59 TECU; 而 NTCM-BC 模型则为 4.26 TECU 和 6.01 TECU, 分别下降了 33% 和 37%. 磁扰日期间两个模型的误差相对磁静日均有一定的增加, 但增加幅度并不十分显著, 但磁扰日的标准差比磁静日增加幅度更明显. Klobuchar 模型绝对 TEC 平均误差和标准差分别增加约了 0.4 TECU 和 0.7 TECU, 而 NTCM-BC 模型则增加约了 0.6 TECU 和 1.0 TECU. 从整体对比结果可以看出, 两个模型表现均较为稳定, NTCM-BC 模型的修正误差明显小于 Klobuchar 模型.

除了受太阳活动活跃程度和地磁扰动影响外, 电离层还存在强烈的纬度变化和季节、日夜变化特征. 根据低纬、中纬和高纬区域的不同, 下面进一步给出 Klobuchar 模型和 NTCM-BC 模型电离层修正误差的区域对比, 结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 不管是平均误差还是标准差, 两个模型的平均误差和标准差为低纬区最高, 高纬次之, 中纬最小, 平均误差接近 9.5 TECU, 标准差超过 10.4 TECU. 这与电离层在不同纬度的变化规律一致. 从模型的对比结果看, NTCM-BC 模型的精度明显优于 Klobuchar 模型. 从模型的精度提升情况看, 低纬和高纬区域的精度提升效果优于中纬区域.

图 5 分别给出了春 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月)、冬 (12—2 月) 两个模型的对比结果. 从图 5 可以看出: 分季 (春秋) 和冬季两个模型的平均误差接近, 夏季最低; 对于标准差而言, 春季最大,

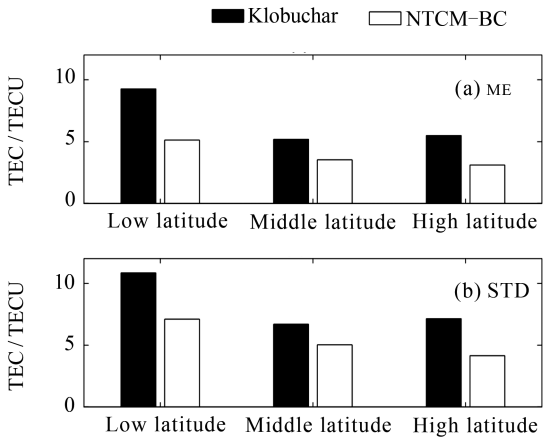


图 4 不同纬度区域 Klobuchar 模型和 NTCM-BC 模型的电离层修正误差对比

Fig. 4 Statistical comparisons of Klobuchar and NTCM-BC model at different latitude

秋季和冬季次之, 夏季最小. 因此, 模型的修正精度存在明显的季节性差异. 但从整体看, 不同季节条件下 NTCM-BC 模型的修正误差均小于 Klobuchar 模型, 在一定程度上验证了 NTCM-BC 模型的稳定性.

考虑电离层的日夜变化情况, 图 6 给出了两个模型修正误差随地方时 (00:00 LT−23:00 LT) 的变化. 从图 6 中可以看出, 模型的修正误差存在明显逐日变化规律, 即平均误差和标准差在黎明前后 (04:00 LT−06:00 LT) 最低, 正午前后 (14:00 LT−16:00 LT) 最高, 这与电离层的日变化规律一致. 从两个模型的对比结果可以看出, NTCM-BC 模型的精度优于 Klobuchar 模型, 且其误差的逐日变化更稳定.

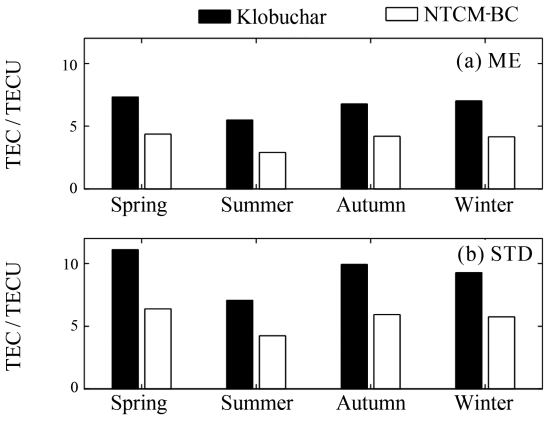


图 5 不同季节 Klobuchar 模型和 NTCM-BC 模型的电离层修正误差对比

Fig. 5 Statistical comparisons of Klobuchar and NTCM-BC model at different seasons

4 结论

高精度的电离层延迟修正对提高导航、定位精度具有重要的应用价值. 针对卫星导航系统高精度单频电离层延迟修正的需求, 利用欧洲定轨中心 (CODE) 提前一天预测的电离层数据, 基于非线性最小二乘拟合方法, 实现 NTCM-BC 模型的电离层修正. 与 IGS 发布的电离层图 (IGSG GIM) 数据的对比表明, NTCM-BC 模型精度明显优于 Klobuchar 模型. 其中电离层 TEC 绝对平均误差下降了约 41%, 标准差下降了 30%; 模型的修正误差与太阳活动、地磁扰动相关, 修正误差同时存在明显的纬度、季节和地方时差异. 研究结果可为中国建立适合北斗三号卫星全球导航系统的电离层模型提供理论支撑.

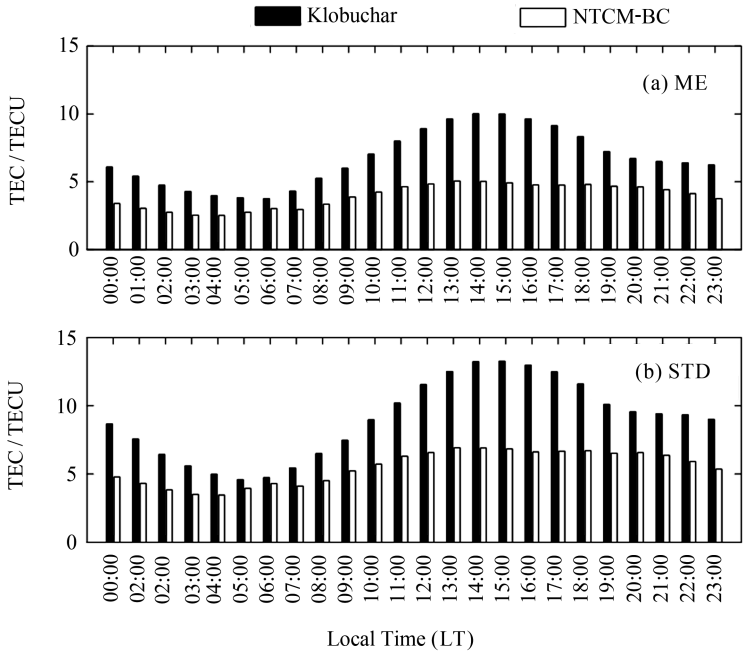


图 6 不同地方时条件下 Klobuchar 模型和 NTCM-BC 模型的电离层修正误差对比

Fig. 6 Statistical comparisons of Klobuchar and NTCM-BC model at different local time

下一步工作将基于 NTCM-BC 模型的修正数据, 利用实测的 GPS 数据分析评估 NTCM-BC 模型对单频导航接收机导航定位精度的实际提升作用.

参考文献

[1] ZHEN Weimin, CAO Chong. Ionospheric limitation of GPS wide area argumentation system [J]. *GNSS World*, 1997, **22**(1): 6-13 (甄卫民, 曹冲. GPS 广域增强系统的电离层限制 [J]. 全球定位系统, 1997, **22**(1): 6-13)

[2] HOCHEGGER G, NAVA B, RADICELLA S, *et al*. A family of ionospheric models for different uses [J]. *Phys. Chem. Earth, Part C: Solar, Terr. Planet. Sci.*, 2000, **25**(4): 307-310

[3] KLOBUCHAR J A. Ionospheric time-delay algorithm for single frequency GPS users [J]. *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.*, 1987, **23**(3): 325-331

[4] KLOBUCHAR J A, KUNCHES J M. Eye on the ionosphere: Correction methods for GPS ionospheric range delay [J]. *GPS Solut.*, 2001, **5**(2): 91-92

[5] FEESS W A, STEPHENS S G. Evaluation of GPS ionospheric time-delay model [J]. *IEEE Trans. Aero. Elec. Syst.*, 1987, **AES-23**(3): 332-338

[6] WU X, HU X, WANG G, *et al*. Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning [J]. *Adv. Space Res.*, 2013, **51**(6): 959-968

[7] BIDAINE B. Ionosphere modelling for Galileo single frequency users [D]. Liege: University of Liege, 2012

[8] ZHANG Qiang, ZHAO Qile, ZHANG Hongping, *et al*. Evaluation on the precision of klobuchar model for BeiDou navigation satellite system [J]. *Sci. Wuhan Univ.: Inf. Sci.*, 2014, **39**(2): 142-146 (张强, 赵齐乐, 章红平, 等. 北斗卫星导航系统 Klobuchar 模型精度评估 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014, **39**(2): 142-146)

[9] YANG Zhe, SONG Shuli, XUE Junchen, *et al*. Accuracy assessment of Klobuchar model and NeQuick model in China, Geom [J]. *Sci. Wuhan Univ.: Inf. Sci.*, 2012, **37**(6): 704-708 (杨哲, 宋淑丽, 薛军琛, 等. Klobuchar 模型和 NeQuick 模型在中国地区的精度评估 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, **37**(6): 704-708)

[10] WANG Ningbo, YUAN Yunbin, LI Zishen, *et al*. Performance analysis of different nequick ionospheric model parameters [J]. *Acta Geod. Cartog. Sin.*, 2017, **46**(4): 421-429 (王宁波, 袁运斌, 李子申, 等. 不同 NeQuick 电离层模型参数的应用精度分析 [J]. 测绘学报, 2017, **46**(4): 421-429)

[11] JAKOWSKI N, HOQUE M M, MAYER C. A new global TEC model for estimating transionospheric radio wave propagation errors [J]. *J. Geod.*, 2011, **85**(12): 965-974

[12] HOQUE M M, JAKOWSKI N. An alternative ionospheric correction model for global navigation satellite systems [J]. *J. Geodesy*, 2015, **89**(4): 391-406

[13] SCHAER S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System [J]. *Geod-Geophys. Arb. Schweiz*, 1999, **59**: 59

[14] GARCÍA RIGO A, MONTE E, HERNÁNDEZ Pajares M, *et al*. Global prediction of the vertical total electron content of the ionosphere based on GPS data [J]. *Radio Sci.*, 2011, **46**(6): RS0D25. DOI:10.1029/2010RS004643

[15] ZHANG X, MA F, REN X, *et al*. Evaluation of NTCM-BC and a proposed modification for single-frequency positioning [J]. *GPS Solut.*, 2017, **21**(4): 1531-1548

[16] OU Ming. Reconstruction Method Study of Ionospheric Characteristic Parameters Based on Satellite Signal [D]. Wuhan: Wuhan University. 2017 (欧明. 基于卫星信号的电离层特征参量重构技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017)

[17] CHEN Baolin. Optimization Theory and Algorithm [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (陈宝林. 最优化理论与算法 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005)