

DOI:10.13203/j.whugis20170428



文章编号:1671-8860(2019)10-1457-08

北斗全球系统广播电离层模型性能初步评估

周仁宇¹ 胡志刚¹ 苏牡丹² 李军正³ 李鹏博¹ 赵齐乐¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

3 信息工程大学导航与空天目标工程学院,河南 郑州,450002

摘要:北斗三号系统于2017年正式启动建设,将采用新的北斗全球电离层延迟修正模型(BeiDou global ionospheric delay correction model, BDGIM)。使用高精度格网电离层数据和双频实测电离层延迟数据作为参考,对北斗试验卫星系统播发的BDGIM模型精度进行了相应分析和评估,并与北斗Klobuchar和GPS Klobuchar模型精度进行了比较。研究表明,在中国区域,BDGIM模型和北斗Klobuchar模型精度相当,优于GPS Klobuchar模型;在全球范围内,BDGIM模型精度优于北斗Klobuchar和GPS Klobuchar模型。采用不同电离层模型进行伪距单频单点定位,并对定位结果进行对比分析,结果显示,使用BDGIM模型比北斗Klobuchar模型的定位精度有13%的提高,比GPS Klobuchar模型有7%~10%的提高。

关键词:北斗三号;BDGIM;北斗Klobuchar;GPS Klobuchar;单频伪距单点定位

中图分类号:P228

文献标志码:A

在导航定位应用中,电离层误差是信号传播过程的主要误差之一。卫星定位系统通过导航电文向用户提供广播电离层参数进行修正,从而提高定位精度和服务性能^[1]。美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)采用地磁坐标系下的Klobuchar电离层模型^[2],欧洲的伽利略(Galileo)系统采用了NequickG模型^[3],中国的北斗二号系统采用地理坐标系下的Klobuchar模型^[4]。对于北斗二号系统电离层模型精度,张强等^[5-6]分析认为该模型在北半球中国区域精度优于GPS广播Klobuchar模型,改正比例约70%;而在靠近两极的高纬度地区,北斗二号电离层模型精度相对较差^[7]。中国于2017年底正式启动建设北斗三号系统,得益于新的技术体制和用户算法,北斗三号相较于北斗二号的服务性能有较为明显的提升。其中北斗三号在新的导航信号上向用户播发北斗全球电离层延迟修正模型(BeiDou global ionospheric delay correction model, BDGIM)^[8-9]的改正参数。因此需要对BDGIM模型与现有的广播电离层模型进行对比分析,评估BDGIM模型的精度以及对用户测距定位的影响,这一程度

上也能反映北斗三号系统的部分服务性能^[10]。本文对此进行了初步评估,首先简要介绍了BDGIM模型的基本算法,然后介绍评估电离层精度的方法以及数据源,接着通过格网数据和双频数据分析了BDGIM模型和其他广播模型精度在全球不同区域分布的特点,最后通过实测数据进行了单频伪距单点定位,对比验证了BDGIM模型的改正效果。

1 北斗全球电离层延迟改正模型

北斗二号系统采用地理坐标系下的Klobuchar电离层模型(以下简称BDSK8模型),通过导航电文播发8个改正参数。其计算方法如下:

$$T_g = F \times \begin{cases} 5 \text{ ns} + A \cos \frac{2\pi}{P}(t_{\text{local}} - 50\,400), \frac{P}{4} \leq |t_{\text{local}} - 50\,400| \\ 5 \text{ ns}, \frac{P}{4} > |t_{\text{local}} - 50\,400| \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_g 是信号穿刺点处电离层对B1I频点伪距观

收稿日期:2019-02-22

项目资助:国家自然科学基金(41604029,41574027,41574030)。

第一作者:周仁宇,博士生,主要从事北斗系统性能评估方法的研究。ry.zhou@whu.edu.cn

通讯作者:胡志刚,博士,副教授。zhigang.hu@whu.edu.cn

测值造成的时延; F 是投影函数, 电离层时延的变化部分用余弦函数表示; A 和 P 分别表示振幅和周期。

2017年12月, 中国卫星导航管理办公室发布新的空间接口文件, 公开了北斗三号系统信号体制及相应导航算法, 其中BDGIM模型包含非发播参数和9个发播参数 $\alpha_i (i = 1, 2 \dots 9)$, 发播参数通过导航电文向用户播发, 计算方法如下:

$$T_{ion} = M_F \cdot K \cdot VTEC = M_F \cdot \frac{40.28 \times 10^{16}}{f^2} \cdot [A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i \cdot A_i] \quad (2)$$

$$A_0 = \sum_{j=1}^{17} \beta_j \cdot B_j$$

$$B_j = \begin{cases} N_{n_j, m_j} \cdot P_{n_j, m_j}(\sin \varphi') \cos(m_j \lambda'), & m_j \geq 0 \\ N_{n_j, m_j} \cdot P_{n_j, m_j}(\sin \varphi') \sin(-m_j \lambda'), & m_j < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$A_i = \begin{cases} N_{n_i, m_i} \cdot P_{n_i, m_i}(\sin \varphi') \cos(m_i \lambda'), & m_i \geq 0 \\ N_{n_i, m_i} \cdot P_{n_i, m_i}(\sin \varphi') \sin(-m_i \lambda'), & m_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, T_{ion} 是电离层延迟值, 单位为 m; VTEC (vertical total electron content) 是穿刺点处天顶方向总电子总含量, 单位为 TECU; M_F 是投影函数, 用于把 VTEC 投影到信号传播方向上; K 是把电子含量转换到测距误差的系数, 和观测值频率 f 有关。通过非发播参数计算电离层延迟预报值 A_0 , 单位为 TECU。根据穿刺点位置计算系数 A_i 和 B_j 。穿刺点的地磁纬度和经度为 φ' 与 λ' , 单位为 rad; $N_{n,m}$ 为正则化函数; $P_{n,m}$ 为标准勒让德函数。BDGIM 模型的电离层薄层高度为 400 km。BDGIM 模型计算流程如图 1 所示。

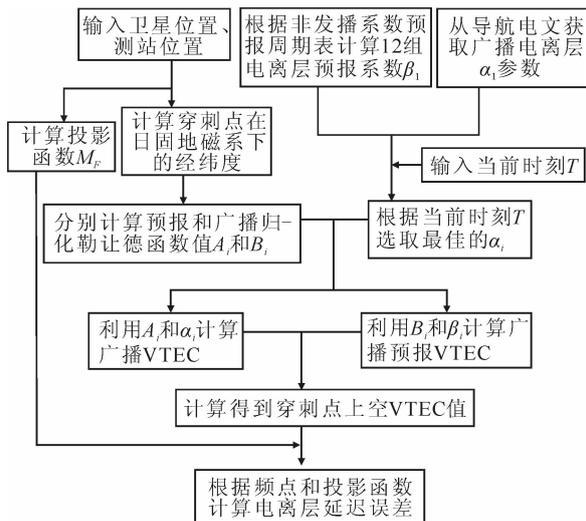


图 1 BDGIM 模型电离层延迟计算流程

Fig. 1 Procedure to Calculate Ionospheric Delay Using BDGIM Model

根据空间信号接口文件, 计算前, 在每天的 01:00、03:00、05:00...23:00 时刻, 通过非发播系数表计算生成相应的非发播参数 β_i , 计算电离层延迟时, 只需按照计算时间点选取合适的 β_i 参数使用, 无需重复计算。非发播参数详细的计算公式和 n, m 数值参考北斗全球系统接口控制文件^[8]。相较 BDSK8 模型, BDGIM 模型算法相对复杂, 计算步骤更多。

2 数据源及电离层模型评估方法

2.1 数据源

本文选取了 2017 年 3 月作为分析时间段, 收集了该时段 GPSK8、BDSK8 以及 BDGIM 模型参数。采用 CODE (Center of Orbit Determination in Europe) 发布的电离层格网产品, 作为高精度电离层参考数据。

本文收集了该时段内 31 天 10 个国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 所属测站的观测数据和导航星历, 计算相应的 STEC (slant total electron content) 值以及进行伪距单点定位, 评估 BDGIM 模型的精度, 分析对用户定位精度的影响。由于 BDGIM 模型在北斗三号全球系统中使用, 所以选取时考虑了站点的位置分布, 不仅有中国区域附近的测站, 如 JFNG、GMSD 等跟踪站, 也选取了非中国区域的测站; 既有低纬度赤道附近的测站, 如 BAKO 站, 也有高纬度测站, 如 MCM4 站。

2.2 评估方法

本文主要采用以下几种方式评估 BDGIM 模型精度。CODE 根据全球观测数据, 生成高精度全球电离层格网地图 (global ionosphere maps, GIM), 其精度优于 4 TECU^[11], 可以作为广播模型评估的参考基准。使用不同广播模型计算 VTEC 值, 和格网数据作差, 统计格网点上不同模型值误差的均值和均方根误差 (root mean square, RMS), 通过统计值评估对比 BDGIM 模型精度。另外, 统计不同模型在纬圈上的精度, 观察不同模型精度相对纬度的分布特征。在部分测站, 计算了不同模型 VTEC 值时间序列并进行对比分析。对选取时段内计算得到的电离层模型 VTEC 值误差计算其平均偏差和 RMS 值, 计算方法如下:

$$VTEC_{bias} = \sum_{i=1}^n (VTEC_{Model} - VTEC_{GIM}) / n \quad (5)$$

$$\text{VTEC}_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{VTEC}_{\text{Model}} - \text{VTEC}_{\text{GIM}})^2 / n} \quad (6)$$

式中, $\text{VTEC}_{\text{Model}}$ 是待评估广播电离层模型计算得到的模型值; VTEC_{GIM} 是使用格网数据计算的参考值; n 是所选取时段内格网点上模型值的总数。

此外, 电离层延迟和导航信号频率有关系, 所以本文使用 GPS 双频观测数据计算 STEC。使用 IGS 发布的 DCB 产品, 在观测值上对卫星和接收机端不同频点之间的偏差进行了修正。使用伪距计算 STEC_p 的计算公式^[12] 如下:

$$\text{STEC}_p = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_2^2 - f_1^2)} [P_1 - P_2 - c(b_1^s - b_2^s) - c(b_{r,1} - b_{r,2})] \quad (7)$$

式中, f 表示频率, 下标 1、2 表示不同的频点; P 是伪距观测值; c 是光在真空中的速度; b^s 和 b_r 分别是星上和地面接收机上的频率间偏差。和式(7)类似, 可以根据相位观测值计算 STEC_L , 然后用 STEC_L 平滑 STEC_p , 削弱噪声, 生成最终评估所需的 STEC_{df} 值, 再利用广播模型计算 $\text{STEC}_{\text{model}}$ 进行评估。

本文使用多个 IGS 测站的观测值在不同的广播电离层模型下进行伪距定位, 评估 BDGIM 模型的性能。电离层误差会导致用户的测距误差增大, 在高度角较低时可达几十米, 从而增大用户的定位误差。在解算时, 接收机钟差参数会吸收掉同一时刻参与解算卫星电离层延迟量的相同部分, 未改正的残余误差会体现在定位误差中^[13]。因此, 使用不同的广播模型进行定位解算, 定位精度可以反映不同模型对电离层的改正效果, 以及不同模型之间的改善率。本文主要分析了 BDGIM 模型、BDSK8 模型和 GPS 广播电离层模型(以下简称 GPSK8 模型)。

3 BDGIM 模型性能初步评估结果

3.1 利用电离层格网数据比较 BDGIM 模型精度

使用相应广播模型参数, 分别计算格网点上的 VTEC 值, 格网点的经度从 $180^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{E}$, 间隔 5° ; 纬度从 $87.5^\circ\text{S} \sim 87.5^\circ\text{N}$, 间隔 2.5° 。

以 2017 年年积日 068 天为例, 图 2 是该天 GPS 时 6:00 GIM、GPSK8、BDSK8 和 BDGIM 4 种模型计算的 VTEC 值。从图 2 可以看出, 太阳在 GPS 6 时位于上空, 受太阳照射影响, VTEC 值较高。虽然不同模型 VTEC 值有差异, 但均反映了电子含量和太阳照射的关系。太阳照射时, 电离

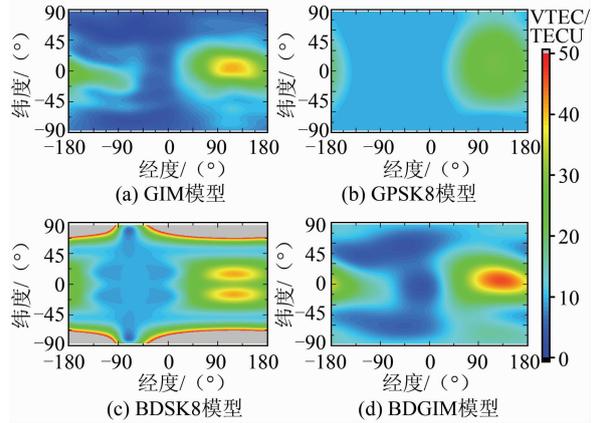


图 2 不同电离层模型计算的 VTEC 值

Fig. 2 VTECs Calculated from Various Ionospheric Models

层电离程度大, VTEC 值较高; 反之则较小。

从图 2(a) 可以看出, 电离层格网数据描述的电子含量分布更加细致。GPSK8 模型整体较为平缓、粗糙, 和格网数据相比, 没能反映出太阳照射时赤道附近电离层较高的电子含量。在处于夜晚的地区, GPSK8 模型计算的 VTEC 值相等, 这是因为 GPSK8 模型夜间电离层时延固定不变 (5 ns 左右)。

BDSK8 模型与 GPSK8 模型类似, 计算电离层时延时, GPSK8 模型使用地磁坐标, BDSK8 使用地理坐标。图 3 显示的是 2017 年年积日 068 天 6:00 时 GPSK8、BDSK8 和 BDGIM 模型 VTEC 值相对 GIM 格网的偏差。可以看出, BDSK8 模型在北半球中国区域与格网数据偏差较小, 但是在高纬度地区以及南半球太阳照射区域相差较大。这是由于使用中国地区观测资料建立 BDSK8 模型, 适用于中国及附近区域, 在其他区域使用该模型计算电离层延迟, 其精度不如中国区域。计算位置在南半球时, BDSK8 模型对纬度取绝对值, 导致南北半球电离层延迟相对于赤道对称, 如图 2(c) 所示, 不能反映南半球电离层的真实情况, 因此 BDSK8 模型在南半球精度不如北半球。可以看出, 格网点向两极移动, BDSK8 模型 VTEC 误差快速发散增大, 故 BDSK8 模型不适用于两极高纬度地区, 这与已有文献结论^[7] 一致。分析该现象产生的原因, 可能有两个因素: ① BDSK8 模型里 α 参数相对 GPSK8 模型数值较大; ② GPSK8 模型穿刺点的纬度不大于 74.88° , BDSK8 模型里则是使用穿刺点实际纬度。在纬度较高区域, 两者共同影响使得 $\alpha_n |\varphi|^n$ 随着纬度升高快速增大, 从而放大了 BDSK8 模型计算延迟时余弦函数的幅度 A , 导致了计算得

到的延迟过大。因此,BDSK8模型不能用于高纬度地区电离层延迟计算。

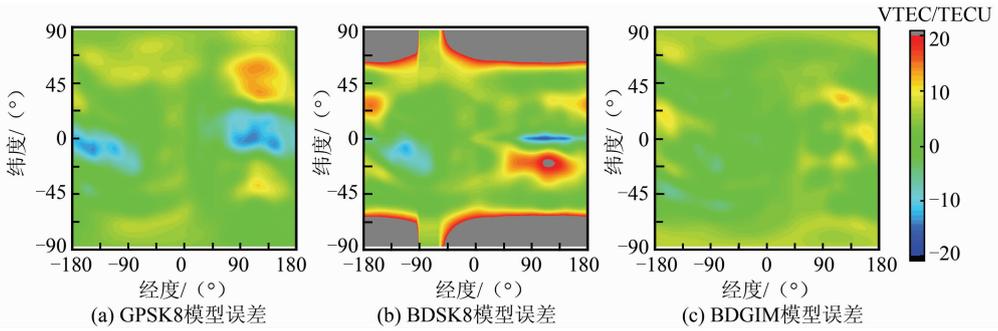


图3 不同电离层模型 VTEC 计算误差

Fig. 3 Differences of VTEC Between Various Ionospheric Models and GIM

从图 3(c)可以看出,BDGIM 与格网数据的偏差较小,在全球大部分区域与格网数据吻合较好,能反映低纬度地区太阳直射时较高的电子含量。此外,BDGIM 模型误差分布较为均匀,没有出现特别明显的地区差异,在两极区域,VTEC 值也和 GIM 比较接近。在全球大部分区域,BDGIM 模型相较 BDSK8 模型,精度有明显提升,适用范围更广。

为了得到更为可靠的结论,本文处理了 2017 年 3 月的数据,计算格网点上不同模型相对于格网数据偏差的时间序列,并统计了偏差的均值和 RMS 值,如图 4 和图 5 所示。可以看出,GPSK8 模型在赤道附近部分区域存在较大误差,中纬度区

域误差相对较小。BDSK8 模型在中国区域平均偏差和 RMS 都较小;在南半球亚太区域存在一个显著的异常区域,中心处误差超过 10 TECU;高纬度地区,BDSK8 模型误差随着纬度增加快速增大。BDGIM 模型在南半球高纬度部分区域存在较大误差,最大在 10 TECU 左右。除此之外,相对于另外两种广播模型,BDGIM 模型的平均误差和 RMS 值绝大部分都最小,尤其是北半球中纬度地区,和格网数据误差的 RMS 在 3 TECU 左右。BDGIM 模型精度在南半球相对 BDSK8 模型有较大改善。对比这 3 种广播模型,BDGIM 模型整体误差最小,北半球精度好于南半球,分析原因可能是南半球海洋面积大,缺乏监测站资料。

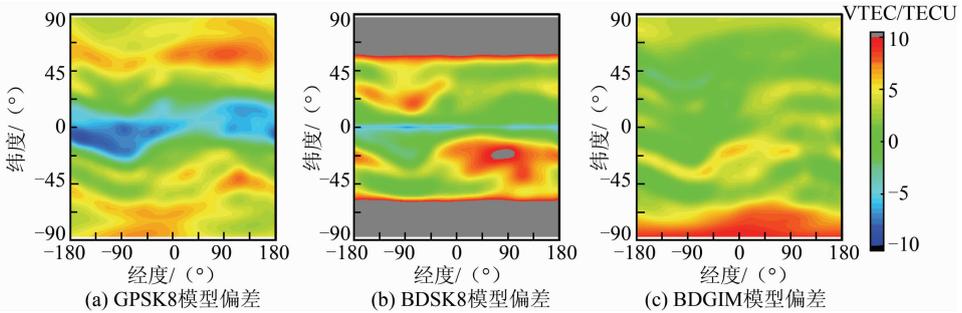


图4 不同电离层模型 VTEC 值平均偏差

Fig. 4 Mean Differences of VTECs from Various Ionospheric Models

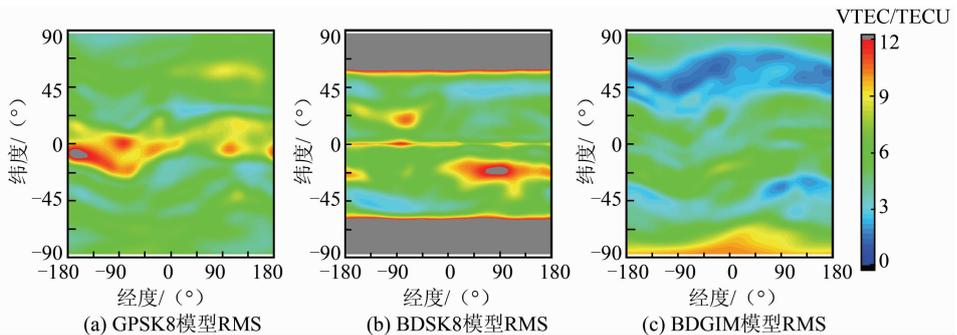


图5 不同模型电离层模型 VTEC 误差 RMS 统计

Fig. 5 RMS of VTEC Errors from Various Ionospheric Models

为了分析不同广播电离层模型精度相对纬度的变化,把前述计算的误差按照格网点纬度间隔进行统计,计算 RMS 值,不同广播电离层模型精度和纬度变化的关系如图 6 所示。可以看出, BDGIM 模型在南半球 70° 以上区域差于 GPSK8 模型,在其他纬度区域, BDGIM 模型的精度最高,在 5 TECU 以内; BDGIM 模型在北半球精度优于南半球,整体精度变化较为平缓; BDSK8 模型在两极地区误差极大,在中低纬区域误差在 10 TECU 以内,和 GPSK8 大致相当,北半球优于南半球; GPSK8 模型精度在低纬度区域较低。整体上, BDGIM 模型优于 GPSK8 和 BDSK8 模型,北半球优于南半球,南半球高纬度地区不如 GPSK8 模型。

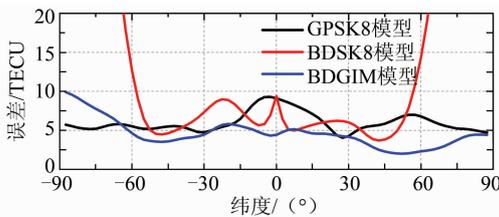


图 6 不同电离层模型 VTEC 值误差和纬度变化关系
Fig. 6 VTEC Variation of Different Models at Different Latitudes

图 7 显示的是 4 个站点上空 VTEC 值误差的时间序列,反映了不同模型的精度随时间的变化。可以看出, BDGIM 模型误差相对较小;在不同测站,各种广播模型的误差变化也有差异,在 JFNG 站,3 种模型 VTEC 值比较接近,没有较大差异,但是在另外 3 个测站, BDGIM 误差小于 GPSK8 和 BDSK8 模型。这反映了 JFNG 站所在的中国附近区域,这 3 种模型的精度接近。

3.2 利用双频实测电离层 STEC 比较 BDGIM 模型精度

根据上文的方法,计算了 2017 年 3 月份 10 个 IGS 测站观测到的 GPS 卫星的 $STEC_{df}$ 值,分别使用不同广播电离层模型计算对应的 $STEC_{model}$,然后和 $STEC_{df}$ 相减得到误差。因为不同频率间的频间偏差不一定能完全消除,可能有残留的系统偏差存在于载波平滑伪距计算得到的 STEC 值中,会妨碍精度评估。用户解算时,同一时刻电离层时延公共部分被接收机钟差吸收,主要是各颗卫星的差异部分影响定位精度。所以统计不同广播电离层模型计算 STEC 与双频数据偏差值的标准差 (standard deviation, STD),观察 STD 的变化。

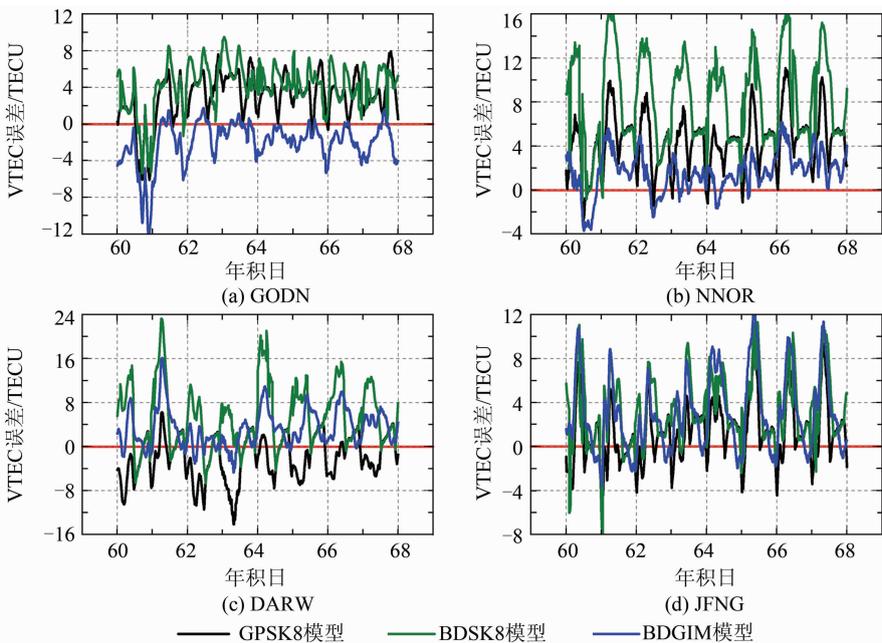


图 7 各站点上空 VTEC 随时间变化
Fig. 7 VTEC Variation of Several Stations over Time

图 8 是 NNOR 站在 3 月份所有 GPS 双频观测数据计算的 $STEC_{df}$ 和不同电离层模型计算的 $STEC_{model}$ 差值的标准差 (standard deviation, STD) 时间序列。BDGIM 模型计算的 STEC 差

值 STD 最小,在 2.5 TECU 以内,说明 BDGIM 模型计算的 STEC 值与实际电离层延迟的变化趋势较为一致。GPSK8 模型和 BDSK8 模型相当,大致在 2~4 TECU 之间, BDSK8 模型 STD

变化幅度相对更大。

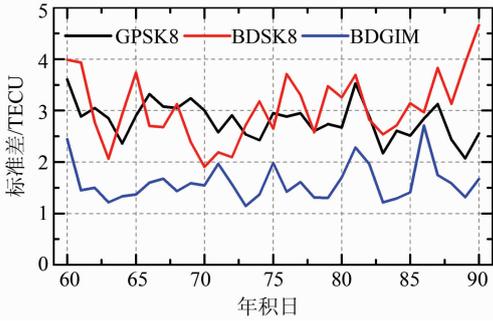


图8 NNOR站 STEC 差值 STD 统计

Fig. 8 STD of the STEC Difference at NNOR Station

表1显示了所有测站使用不同广播模型计算的 STEC 值和双频数据差值的 STD 统计值。从表1可以看出,在 MCM4 站, BDGIM 模型的 STD 值最大,精度较低,这应该是因为 MCM4 纬度较高所致,这与上文 BDGIM 模型在南半球高纬度区域误差略大的结果一致。对比 BDGIM 模型和 GPSK8 模型,除了 MCM4 站点之外, BDGIM 模型 STEC 偏差值 STD 均小于 GPSK8 模型,表明在大部分区域内, BDGIM 模型精度更高。对比 BDGIM 和 BDSK8 模型,在中国的 JFNG 和日本的 GMSD 站点,两者的 STD 一样,误差相当,反映了 BDGIM 模型和 BDSK8 模型在上述地区精度相当。分析其余测站的结果, BDGIM 模型的 STD 明显小于 BDSK8 模型,说明 BDGIM 的适用范围更广。

表1 2017年3月各个测站不同电离层模型 STEC 误差 STD 统计表/TECU

Tab.1 STD of the STEC Difference from Various Models in March, 2017 at Different Stations/TECU

测站	GPSK8	BDSK8	BDGIM
GRAS	3.5	2.8	2.6
GODN	2.8	2.2	1.7
SUTM	2.5	2.7	2.0
NNOR	2.8	3.1	1.6
GMSD	3.3	2.9	2.9
JFNG	3.8	3.1	3.1
DARW	5.2	6.1	4.1
BAKO	5.8	6.9	4.9
MCM4	3.5	3.5	3.8
均值	3.7	3.7	3.0

3.3 BDGIM 模型定位精度验证

除了直接比较各种模型计算的 VTEC 值之外,本文还利用上述站点 2017 年 3 月份的 GNSS 观测数据进行伪距单点定位,电离层误差分别使用 BDGIM、GPSK8 和 BDSK8 模型进行修正,然后统计定位精度,从定位误差的角度来评估不同电离层模型的改正效果。为了比较不同模型之间

的相对改正效果,使用下式计算精度改善率:

$$r = \frac{p_{ref} - p_{model}}{p_{ref}} \times 100\% \quad (8)$$

式中, r 是所评估的电离层模型的定位精度相对于参考模型的改善率; p 表示定位解算的位置误差。误差 p 越小,定位精度越高。如果 r 为正, $p_{ref} > p$, 则使用待评估模型的定位误差小于使用参考模型,精度提高;反之使用待评估模型的定位误差较大,说明定位效果不如参考模型精度。

伪距单点定位策略包括:①使用 GPS+北斗共同进行伪距单点定位,如果北斗卫星不足,则单独使用 GPS 定位解算;②使用广播星历和钟差产品;③使用萨斯塔莫宁模型改正对流层延迟;④卫星截止高度角 15° 。测站的坐标精确值采用 IGS 发布的站坐标,用于评估伪距单点定位精度。对于单个测站单天解算结果,计算坐标误差序列的精度时,统计其 95% 分位数作为测站该天的定位精度,然后对多天的定位结果取平均作为该站在所选时段内的定位解算精度。2017 年 3 月的定位结果如图 9 所示,图 9 中,测站按照纬度绝对值从左至右升序排列。不同电离层模型的改善率如表 2 所示。

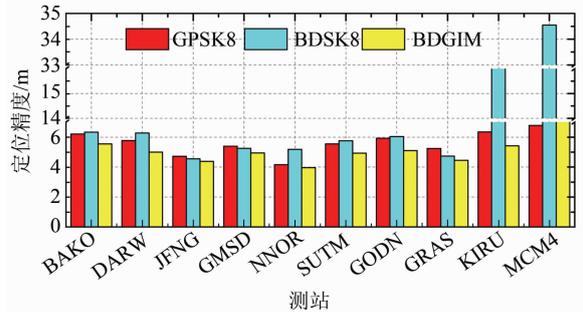


图9 各站点三维定位精度

Fig. 9 3D Positioning Accuracy of All Stations Using Different Ionospheric Models

表2 测站三维定位精度及精度提升

Tab.2 3D Positioning Accuracy of All Stations Using Different Models and Accuracy Improvement Rate

测站	以 GPSK8 模型作参考的			以 BDSK8 模型作参考的		
	定位精度/m			精度改善/%		
	GPSK8	BDSK8	BDGIM	BDSK8	BDGIM	BDGIM
BAKO	6.2	6.3	5.6	-2.1	10.6	12.4
DARW	5.8	6.3	5.0	-8.7	13.3	20.3
JFNG	4.7	4.6	4.4	3.4	7.2	3.9
GMSD	5.4	5.3	5.0	2.7	8.3	5.7
NNOR	4.2	5.2	4.0	-24.7	4.9	23.7
SUTM	5.6	5.8	4.9	-3.6	11.2	14.3
GODN	5.9	6.0	5.1	-2.0	14.0	15.7
GRAS	5.2	4.7	4.5	9.6	15.0	6.1
KIRU	6.4	18.2	5.4	-186.0	14.7	70.2
MCM4	6.8	34.6	7.2	-409.6	-6.5	79.1

从图 9 可以看出,位于高纬度的 KIRU 测站和 MCM4 测站使用 BDSK8 模型的定位误差约为 18 m 和 35 m,定位精度较差。因此,BDSK8 模型不适用于高纬度地区,这与图 5 中 VTEC 值在高纬度区域异常增大的结果吻合。在其余测站,不同模型定位误差差异最大在 1.2 m 左右。

相对于 GPSK8 模型,北半球中纬度的 GRAS、GMSD 和 JFNG 测站使用 BDSK8 模型的定位精度分别提升了 9.6%、2.7% 和 3.4%。在其余测站,使用 BDSK8 模型定位精度有一定下降,最大可达 24.7%。该现象表明 BDSK8 模型主要适用于北半球中纬度地区,在北斗二号系统的服务范围之外,GPSK8 模型的修正效果相对更好。

使用 BDGIM 模型,仅在南极地区的 MCM4 测站相对使用 GPSK8 模型的定位精度下降了 6.5%,该现象也与图 5 和图 6 显示的 BDGIM 模型和 GPSK8 模型在南半球极区的 VTEC 误差对比结果吻合,BDGIM 模型在该处改正效果不如 GPSK8 模型。在其余测站,使用 BDGIM 模型的定位精度均有改善,相对 GPSK8 模型定位精度平均改善达 11%。相对于 GPSK8 模型,使用 BDGIM 模型在 5 个北半球测站的定位精度平均改善 11.9%,5 个南半球测站平均改善 6.7%。这也说明 BDGIM 模型在北半球精度更高,电离层改正效果更好。分析该现象,可能有两方面的原因:首先,BDGIM 模型可能主要采用国内数据,缺乏境外的监测站数据;其次,南半球海洋覆盖面积居多,但海上缺乏观测数据。观测数据的不足可能导致了 BDGIM 模型在南半球精度不如北半球。

相对于 BDSK8 模型,使用 BDGIM 模型定位精度平均改善了 12.6%,在 KIRU 和 MCM4 测站的改善率甚至达到 70% 和 79%。这表明 BDGIM 模型能够用于高纬度地区的电离层延迟改正,扩大了北斗系统电离层模型的使用范围和服务能力。

4 结 语

本文利用 CODE 发布的电离层高精度格网数据和双频实测数据解算的 STEC 数据深入分析了 BDGIM 模型的性能,与 BDSK8 模型和 GPSK8 模型进行了对比分析,进一步利用 GNSS 观测数据对以上 3 种广播电离层修正模型的改正效果进行了验证分析,得出以下结论:

1) 由于均采用中国国内观测数据建立北斗电

离层模型参数,BDGIM 模型与 BDSK8 模型在中国及周边地区的精度相当,但在纬度大于 70° 以上的高纬地区,北斗 Klobuchar 精度迅速降低,而 BDGIM 模型精度明显优于 BDSK8。

2) BDGIM 模型在全球范围内和格网数据以及双频数据解算的 STEC 值吻合的程度更高,具有更强的电离层动态描述能力;而 BDSK8 模型采用南北对称的方式进行处理,而没有考虑南北半球实际电离层的差异性,导致南半球的精度没有 BDGIM 高。

3) 与 GPSK8 模型相比,BDGIM 模型在南半球高纬度地区略差,但是在全范围内的其他地方均优于 GPSK8 模型。

4) 单频伪距单点定位结果表明,相对于 BDSK8 模型,使用 BDGIM 模型的三维定位精度平均改善 13% 左右,相对于 GPSK8 模型,使用 BDGIM 模型的定位精度在全范围内也有 7% ~ 10% 的改善。

随着北斗三代建设的逐步推进,北斗系统服务范围将由中国及周边地区逐渐扩大到全球范围,BDGIM 模型精度也将随着监测站增多和全球更加均匀的站点分布而逐渐提高,采用北斗全球电离层 BDGIM 模型将进一步提高北斗单频用户导航定位的精度。

致谢:感谢 IGS、IGMAS 和 CODE 等提供的观测数据和相应产品。

参 考 文 献

- [1] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010 (李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010)
- [2] Klobuchar J A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(3): 325-331
- [3] Bertram A R. The Galileo Single Frequency Ionospheric Correction Algorithm [M]. Belin: Spring, 2006
- [4] CSNO. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document (Open Service Signal (Version 2.1)) [R]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2016
- [5] Zhang Qiang, Zhao Qile, Zhang Hongping, et al. Evaluation on the Precision of Klobuchar Model for BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,

- 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)
- [6] Luo W H, Liu Z Z, Li M. A Preliminary Evaluation of the Performance of Multiple Ionospheric Models in Low-and Mid-latitude Regions of China in 2010—2011 [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(2): 297-308
- [7] Wang Zemin, Bi Tong, Sun Wei, et al. Analysis of Global Navigation Satellite System Broadcast Ionospheric Model Correction in Polar Regions[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2016, 28(2): 235-242 (王泽民, 毕通, 孙伟, 等. GNSS 广播电离层模型在极区的改正效果分析 [J]. 极地研究, 2016, (2): 235-242)
- [8] CSNO. BeiDou Navigation Satellite System signal in Space Interface Control Document Open Service Signal BIC and B2a(Test Version)[R]. Beijing: Chian Satellite Navigation Office, 2017
- [9] Wang Ningbo. Study on GNSS Differential Code Biases and Global Broadcast Ionospheric Model of GPS, Galileo and BDS[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysic, Chinese Academy of Sciences, 2016 (王宁波. GNSS 差分码偏差处理方法及全球广播电离层模型研究 [D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2016)
- [10] Hu Zhigang. BeiDou Navigation Satellite System Performance Assessment Theory and Experimental Verification[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [11] Mamoru S, Tetsuro K, Eiji K, et al. Evaluation of GPS-based Ionospheric TEC Map by Comparing with VLBI Data [J]. *Radio Science*, 2003, 38(4): 8-1-8-5
- [12] Xiong B, Wan W X, Yu Y, et al. Investigation of Ionospheric TEC over China Based on GNSS Data [J]. *Advances in Space Research*, 2016, 58(6): 867-877
- [13] Wu X L, Hu X G, Wang G, et al. Evaluation of COMPASS Ionospheric Model in GNSS Positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(6): 959-968

Preliminary Performance Evaluation of BeiDou Global Ionospheric Delay Correction Model

ZHOU Renyu¹ HU Zhigang¹ SU Mudan² LI Junzheng³ LI Pengbo¹ ZHAO Qile¹

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

³ Institute of Surveying and Mapping, University of Information Engineering, Zhengzhou 450002, China

Abstract: The BeiDou global navigation system was officially launched in 2017 and will adopt a new BeiDou global ionospheric delay correction model(BDGIM). Using high-precision grid ionospheric data released by CODE and the Slant ionospheric delay derived from dual-frequency observations as a reference, the accuracy of the BDGIM model is analyzed and evaluated, and compared with the BeiDou Klobuchar and GPS Klobuchar models. The results show that in the region of China, the BDGIM model and the BeiDou Klobuchar model are comparable in accuracy and superior to the GPS Klobuchar model. On a global scale, the accuracy of the BDGIM model is better than that of the BeiDou Klobuchar and the GPS Klobuchar models. Different ionospheric models are implemented for single point positioning. The results show that the BDGIM model has a 13% improvement over the positioning accuracy of the BeiDou Klobuchar model, and a 7%-10% improvement over the GPS Klobuchar model.

Key words: BeiDou-3; BDGIM; BeiDou Klobuchar; GPS Klobuchar; single point positioning

First author: ZHOU Renyu, PhD candidate, specializes in performance evaluation of BeiDou system. E-mail: ry.zhou@whu.edu.cn

Corresponding Author: HU Zhigang, PhD, associate professor. E-mail: zhigang.hu@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41604029, 41574027, 41574030.