

基于多源数据的BKlob模型精细化

刘家龙, 朱永兴, 贾小林, 宋淑丽, 程 娜

Refinement of BKlob model based on multi-source data

LIU Jialong, ZHU Yongxing, JIA Xiaolin, SONG Shuli, and CHENG Na

引用本文:

刘家龙, 朱永兴, 贾小林, 等. 基于多源数据的BKlob模型精细化[J]. 全球定位系统, 2023, 48(3): 62–71. DOI: [10.12265/j.gnss.2023092](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023092)

LIU Jialong, ZHU Yongxing, JIA Xiaolin, et al. Refinement of BKlob model based on multi-source data[J]. *Gnss World of China*, 2023, 48(3): 62–71.

DOI: [10.12265/j.gnss.2023092](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023092)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023092>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于北斗地基增强系统的中国区域电离层建模研究

Study on China regional ionosphere modeling based on BeiDou ground-based augmentation system

全球定位系统. 2020, 45(1): 26–30

CEEMD与GRNN神经网络电离层TEC预报模型

Ionospheric TEC forecast model of based on CEEMD and GRNN

全球定位系统. 2021, 46(4): 76–84

远距离下CORS的双差电离层延迟内插模型精度分析

CORS Double-Difference Ionospheric Delay Interpolation Model Accuracy Analysis Over Long Distances

全球定位系统. 2018, 43(5): 38–42

基于北斗GEO的电离层延迟修正方法比较与分析

Comparison and Analysis of Ionospheric Delay Correction Methods Based on BeiDou GEO

全球定位系统. 2018, 43(2): 33–39

不同全球电离层格网产品在中国区域的应用精度评估与分析

Evaluation and analysis of different global ionospheric maps over China

全球定位系统. 2021, 46(4): 8–15

Linux Shell在电离层TEC格网数据提取和分析中的应用

Application of Linux shell in ionospheric TEC grid data extraction and analysis

全球定位系统. 2019, 44(3): 81–87



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

基于多源数据的 BKlob 模型精细化

刘家龙^{1,2}, 朱永兴^{3,4}, 贾小林^{3,4}, 宋淑丽^{1,2}, 程娜⁵

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100080; 3. 西安测绘研究所, 西安 710054; 4. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054; 5. 山东建筑大学测绘地理信息学院, 济南 250101)

摘 要: 北斗三号全球卫星导航系统 (BDS-3) 开通了全球服务, BDS Klobuchar(BDSklob) 模型的服务区域也拓展至全球范围, BDSklob 模型全球化后的性能引起了极大的关注. 针对北斗二号卫星导航系统 (BDS-2) 播发的 BDSklob 模型在服务区域外精度不高、两极地区改正异常情况, 本文基于参数精化方法, 利用经验模型 IRI-Plas-2017、北斗全球广播电离层延迟修正模型 (BDGIM), 以及欧洲定轨中心 (CODE) 的全球电离层格网 (GIM) 产品多源数据提出新的 BDSklob 模型精细化方案多源数据精细化方法. 结果表明: 各个数据源精细化方法对 BDSklob 模型性能都有明显提升, 尤其是在极地区域; BDSklob_C(数据源为 CODE 的 GIM 产品) 处理结果精度最高; BDSklob_B(数据源为 BDGIM) 精度次之, 但不借助外部数据源, 在北斗系统中即可完成精化处理; BDSklob_I(数据源为 IRI 模型) 精度稍差, 但基于经验模型的预测性, 可以满足实时精化处理的需要.

关键词: BDS Klobuchar 模型; 精细化; 全球参考电离层模型 (IRI 模型); 全球电离层格网 (GIM); 广播电离层模型

中图分类号: P288

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2023)03-0062-10

0 引 言

电离层包括地面 60 km 以上至磁层顶的整个大气层空间, 该区域大气在紫外线、X 射线等高能射线的辐射作用下发生电离, 从而产生大量的自由电子, 形成一个由带电粒子组成、整体仍为中性的电离层区域^[1-3]. 电离层的时空特性具有随机性、不平衡性、无序性等特点, 对卫星导航、短波通信、雷达监测有重要影响^[4]. 电离层延迟误差是全球卫星导航系统 (GNSS) 的主要误差源之一, 引起测距误差可达数十米. 由于电离层折射率的频率分散性, 电离层误差可以通过两个或两个以上的频率进行组合来消除. 但对于单频用户来说, 采用广播电离层模型进行电离层延迟修正, 提高实时定位服务精度, 仍是现行主流高效的手段^[5-6].

目前主要的 GNSS 系统均可提供广播电离层改正服务, 主要有 GPS Klobuchar 模型 (GPSklob 模型)、Galileo NeQuick 模型 (NeQuick G 模型)、BDS Klobuchar 模型 (BDSklob 模型) 和北斗全球广播电离

层延迟修正模型 (BDGIM 模型). 北斗三号 (BDS-3) 开通了全球化服务, BDSklob 模型的服务区域也随着 B1I 和 B3I 频点拓展服务全球. 对于继续使用北斗 B1I 和 B3I 频点的用户来说, 还需要 BDSklob 模型进行电离层延迟修正. 另外, 由于 GPSklob 已被用户广泛接受和熟悉, 学者们自然也对 BDSklob 模型全球化后的性能给予极大关注. 在不同太阳活动水平下, BDSklob 模型具有较高适应性, 对各种异常条件能够保障数据可靠性. 针对北斗广播电离层服务性能, Zhu 等学者以实测电离层数据为参考对比分析了 BDGIM 和 BDSklob 模型的性能^[7-9]. BDGIM 模型在全球范围、亚太区域以及中国区域改正率分别可达 67.72%、70.69%、74.27%, 而 BDSklob 模型改正率分别为 38.12%、44.90%、57.70%. BDSklob 模型以 Klobuchar 模型为理论模型, 为区域解算, 亚太以外区域精度不均匀, 极区有异常. BDSklob 模型的广播电离层模型改正参数在 B1I/B3I 频点播发, BDGIM 模型的参数在 B1C/B2a 频点播发, 部分接收机仅支持 B1I/B3I 频点, 但迫切需要高精度定位服务^[10], 因此

收稿日期: 2023-04-18

资助项目: 国家自然科学基金 (12073063); 地理信息工程国家重点实验室基金 (SKLGIE2020-M-1-1); 山东省自然科学基金 (ZR2021 QD080)

通信作者: 宋淑丽 E-mail: slsong@shao.ac.cn

对 BDSklob 模型进行精细化是非常有必要的。

针对提升 BDSklob 模型的精细化处理方案,可分为参数精化法和模型精化法。参数精化法是利用数学方法,在已有广播电离层模型 8 参数的基础上对其进行二次解算,使其具有更好的修正效果,如最小二乘法、序贯平差法、松弛搜索法、经验模型外推法等^[11-14]。其中松弛搜索法算法流程简单,运算速度快,且具有较高精度。模型精化方法是在 Klobuchar 原有模型基础上附加考量其他影响因素增加或删减参数,达到提升模型的性能效果。如,基于电离层季节变化特性以及实时太阳流量考量,将 Klobuchar 基础 8 参数模型简化至 2 参数^[15];为了进一步修正基础理论模型中的振幅、常量等,引入太阳相对黑子数提出了 Klobuchar 9 参数模型^[16];基础模型将夜间修正值设为常量,为此多引入两个参数,使得夜间模型精度得到了显著提升^[17];除此之外,还提出了 14 参数模型、15 参数模型以及 Klobuchar-like 模型等^[18-20]。

两种精化方法各有优缺点:模型精化法,增加或删减模型参数,构建新的模型,虽然模型精度大幅度提升,但对用户来说增加了繁琐的计算流程;参数精化法大多采用事后的全球电离层格网 (GIM) 或实测数据进行精化操作,达到提升模型精度的目的,但此种方法具有一定的滞后性,不能实时满足用户的应用需求。基于北斗现状,从运控端考虑对现有的 BDSklob 基础模型进行精化,本文提出了利用多源数据进行 BDSklob 精化处理。基于参数精化方案,采用三种数据来源进行精化处理,分别为:经验模型数据、BDGIM 模型数据以及 GIM 产品。

经验模型数据具有预知性、便捷性等特点,采用经验模型作为参考数据进行精化处理,可以保证用户实时获取高精度的定位服务。经验模型常见的有全球参考电离层模型 (IRI 模型)、NeQuick 模型、Bent 模型等。由于 IRI 模型对电离层分层建模,日变化及季节变化趋势与实测数据高度一致性,所以具有较高的精度^[21-22],IRI 模型最新版本为 IRI Plas-2017,全面考虑了 60~20 000 km 的电子含量^[23]。目前,国内外比较有名的电离层分析中心有欧洲定轨中心 (CODE)、中

国科学院 (CAS)、喷气推进实验室 (JPL) 等。而 CODE 的 GIM 产品 (CODG) 是最准确且免费的产品之一^[24]。BDGIM 和 BDSklob 模型同属于 BDS 广播电离层模型,BDGIM 模型改正精度总体优于 BDSklob 模型,采用 BDGIM 模型数据进行精化可以保证精化过程不借助外部数据源,系统内部进行处理,同时保障 BDSklob 模型精度。综上所述,本文以参数精化方法-松弛搜索法为基础,利用经验模型数据 IRI-Plas-2017 模型、BDGIM 模型以及 CODG 作为参考数据进行精化处理 (简称: BDSklob_I、BDSklob_B、BDSklob_C),在不同条件下分析各数据源精化服务的优劣性,为用户的不同需要提供判断依据,并为后续 BDSklob 模型性能的进一步提升提供理论参考。

1 原理方法

BDSklob 模型为地理坐标系下的 Klobuchar 模型,如下所示:

$$I_z(t) = \begin{cases} 5 \times 10^{-9} + A_2 \cos \left[\frac{2\pi(t-50400)}{A_4} \right], & |t-50400| < \frac{A_4}{4} \\ 5 \times 10^{-9}, & |t-50400| \geq \frac{A_4}{4} \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为地方时,取值范围为 0~86 400 s,

$$t = \begin{cases} t_E + \lambda_M \times 43200/\pi - 86400, & t \geq 86400 \\ t_E + \lambda_M \times 43200/\pi + 86400, & t < 86400 \end{cases} \quad (2)$$

t_E 为标准时间; λ_M 为地理经度,单位为 rad;

$$A_2 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n \left| \frac{\varphi_m}{\pi} \right|^n, & A_2 \geq 0 \\ 0, & A_2 < 0 \end{cases} \quad (3)$$

φ_m 为地理纬度,单位为 rad。

$$A_4 = \begin{cases} 172800, & A_4 \geq 172800 \\ \sum_{n=0}^3 \beta_n \left| \frac{\varphi_m}{\pi} \right|^n, & 172800 > A_4 \geq 72000 \\ 0, & A_4 < 72000 \end{cases} \quad (4)$$

一阶偏导为:

$$\frac{\partial I_z}{\partial \alpha_n} = \begin{cases} 0, & |t-50400| \geq \frac{A_4}{4} \\ \varphi_m^n \cos \left(\frac{2\pi(t-50400)}{A_4} \right), & |t-50400| < \frac{A_4}{4} \end{cases};$$

$$\frac{\partial I_z}{\partial \beta_n} = \begin{cases} 0, & |t-50400| \geq \frac{A_4}{4} \\ \frac{A_2 \left(\frac{2\pi(t-50400)}{A_4} \right) \varphi_m^n \sin \left(\frac{2\pi(t-50400)}{A_4} \right)}{A_4}, & |t-50400| < \frac{A_4}{4} \end{cases} \quad (5)$$

二阶偏导为

$$\frac{\partial^2 I_z}{\partial \alpha_n^2} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 I_z}{\partial \beta_n^2} = \begin{cases} 0, & |t - 50400| \geq \frac{A_4}{4} \\ \frac{-A_2 \left(\frac{2\pi(t-50400)}{A_4} \right) \varphi_m^{2n}}{A_4^2}, & |t - 50400| < \frac{A_4}{4} \end{cases}. \quad (7)$$

BDSklob 参数模型为非线性模型, 利用松弛迭代法进行参数精化迭代效果最优. 采用松弛搜索法进行迭代处理无需方程组的运算和矩阵求解处理, 将高维数组转化为一维数组进行迭代处理, 直至满足预设精度.

松弛搜索法原理如下:

引入目标函数 $\Psi(X)$:

$$\Psi(X) = \sum_{i=1}^n (f_i(X) - T_i)^2. \quad (8)$$

式中: X 为待求解的电离层参数; n 为该时段数据量; $f_i(X)$ 为电离层时延拟合值; T_i 为电离层时延实测值.

假设 $f_i(X)$ 的一阶导数及二阶导数均存在, 则可求出关于目标函数的一阶及二阶导数:

$$\frac{\partial \Psi(X)}{\partial x_j} = 2 \sum_{i=1}^n (f_i(X) - T_i) \frac{\partial f_i(X)}{\partial x_j}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi(X)}{\partial x_j^2} = 2 \sum_{i=1}^n \left[(f_i(X) - T_i) \frac{\partial^2 f_i(X)}{\partial x_j^2} - \left(\frac{\partial f_i(X)}{\partial x_j} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

利用递推公式进行搜索求解:

$$\begin{aligned} X^k &= X^{k-1} + \lambda_k P_j^k, \\ P_j^k &= -e_j \cdot \frac{\frac{\partial \Psi(X^{k-1})}{\partial x_j}}{\frac{\partial^2 \Psi(X)}{\partial x_j^2} \Big|_{X^{k-1}}}, \\ e_j &= (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T. \end{aligned} \quad (11)$$

式中, λ_k 为松弛因子.

若已知参数的初始值 X^0 , 对各个参数进行一维搜索求解, 搜索方向为 P_j^k , 对松弛因子 $\lambda_k > 0$ 的选取, 使 $\Psi(X^k) < \Psi(X^{k-1})$. 对于给定精度 $\varepsilon > 0$, 当

$$|\Psi(X^k) - \Psi(X^{k-1})| < \varepsilon \quad (12)$$

成立时, 则停止计算; 否则继续搜索直至满足式 (12).

模型计算中电离层延迟值单位为 ns, 后续实验

中统一转换为电子总含量 (TEC) 单位 TECU 进行对比分析.

2 实验分析

2.1 实验方法

电离层变化具有明显的季节性规律, 本文利用 2019 年两分两至点数据即年积日 80、172、266、356 的数据展开实验. 参数精化方法选择松弛迭代法, 模型相对简单运算速度快、精度较高. 经验模型数据、BDGIM 模型数据输出的 GIM 数据以及 CODG 设置为目标数据, 对此进行参数迭代分析. 迭代后参数代入 BDSklob 模型, 最后进行精度验证, 判断各个数据源精化处理后的性能. 精度评估包括与 CODG 比较、与 GNSS 实测数据比较和定位性能分析等三个方面, 具体如下:

1) 精化处理后模型 BDSklob_I、BDSklob_B、BDSklob_C 以及基础模型 BDSklob 模型输出的 TEC 与 CODG 做对比分析, 分析其在全球、亚太地区以及不同纬度带的性能.

2) 在全球均匀选择 35 个 GNSS 观测站, 如图 1 所示. 各精化后模型数据以及基础 BDSklob 模型的 TEC 值与 GNSS 观测站中提取的实测数据进行对比分析, 统计其在单独测站上的偏差值以及不同纬度带上的精度.

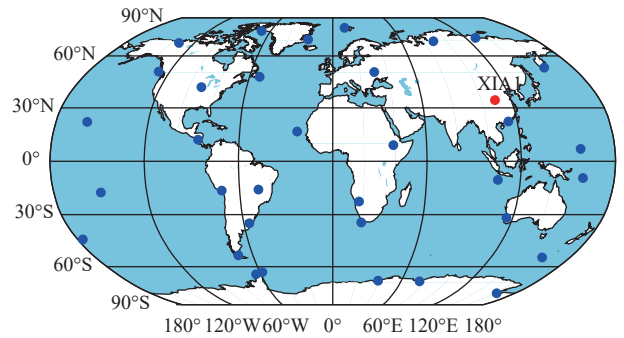


图 1 GNSS 观测站分布图

3) 广播电离层模型为导航定位最大的误差源之一, 为分析精化前后对定位性能的提升效果, 选取 BDSklob 模型主要服务区中的观测站 XIA1 测站, 进行精化前后单频标准单点定位 (SPP) 精度分析.

主要评估指标包括平均偏差 (bias)、均方根 (RMS) 以及改正率 (PER). 其中 bias 和 RMS 为模型输出 TEC 和参考值之间偏差的平均值以及均方根, PER 为模型输出值相对参考值的修正百分比. PER 为相对精度指标, 而平均偏差和 RMS 为绝对精度指标, 具体计算公式如下:

$$\text{bias} = \sum_{i=1}^N \frac{(v\text{TEC}_{\text{model}}^i - v\text{TEC}_{\text{ref}}^i)}{N}; \quad (13)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v\text{TEC}_{\text{model}}^i - v\text{TEC}_{\text{ref}}^i)^2}{N}}; \quad (14)$$

$$\text{PER} = \left(1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\text{abs}(v\text{TEC}_{\text{model}}^i - v\text{TEC}_{\text{ref}}^i)}{v\text{TEC}_{\text{ref}}^i} \right) \cdot 100\%. \quad (15)$$

式中: $v\text{TEC}_{\text{model}}^i$ 为模型输出 TEC 值; $v\text{TEC}_{\text{ref}}^i$ 为参考

基准 TEC 值; N 为统计时段的历元数. 其中统计 PER 会出负值情况, 此时将 PER 取 0.

2.2 BDSklob 精化前后与 CODG 对比

图 2 为多源数据精化前后 BDSklob 模型与 CODG 全球的 TEC 偏差分布图, 可以看出:

1) BDSklob 模型在主要服务区, 亚太地区性能良好, 偏差约为 10 TECU; 而在极地区域性能较差, 最高偏差可达 40 TECU.

2) 多源数据精化处理后的 BDSklob_B、BDSklob_C 以及 BDSklob_I 模型偏差最大为 16 TECU.

3) 精化前后, 极地区域性能提升最为明显, 性能提升约 25 TECU, 在亚太地区性能提升约 5 TECU.

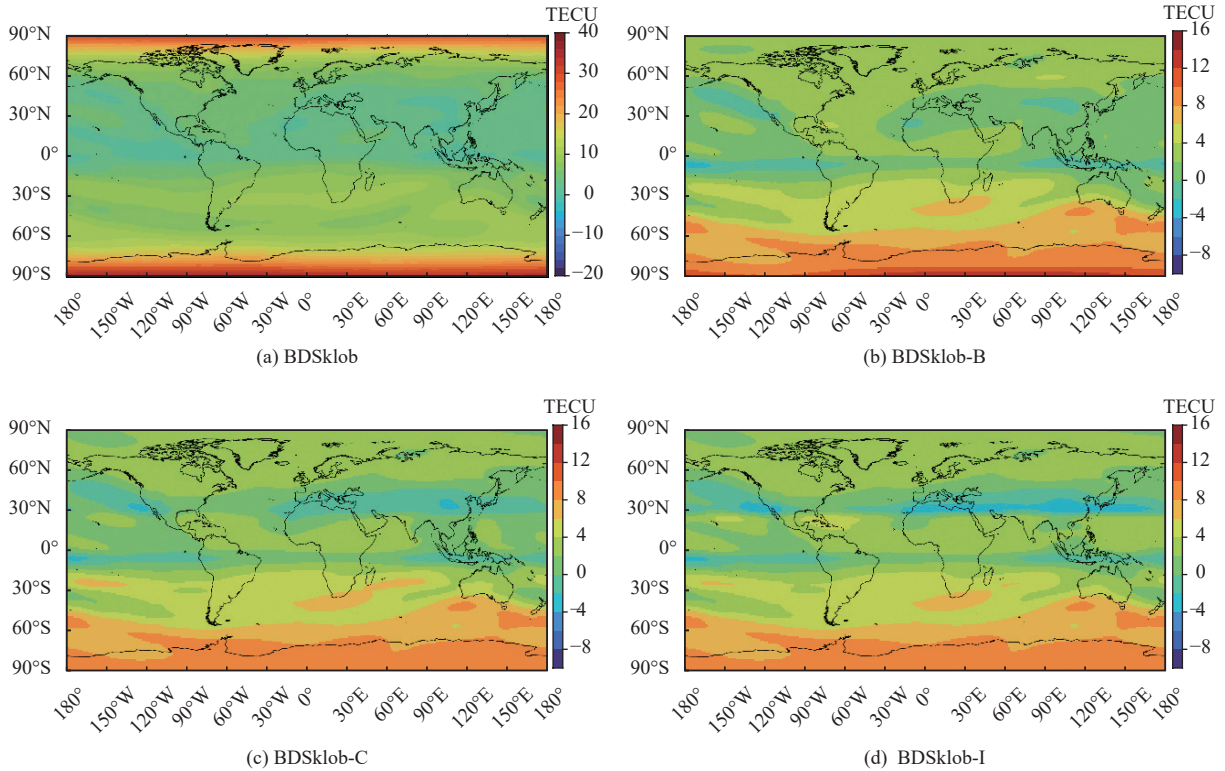


图 2 多源数据精化前后 BDSklob 模型与 CODG TEC 偏差

为了更加详细直观地分析精化前后精度情况, 表 1 统计了精化处理前后 BDSklob 模型在全球及模型主要服务区亚太地区的精度. 可以看出:

1) 多源数据处理后精度有了显著提升, 在春分、夏至、秋分、冬至全球范围 PER 最高可提升约 16%、17%、15%、10%, 在亚太区域 PER 最高可提升约 12%、13%、17%、10%.

2) RMS 在精化处理前后, 在两分两至点全球范围最高可降低 60 TECU、7 TECU、64 TECU、50 TECU,

在亚太区域 RMS 最高可降低 10 TECU、14 TECU、8 TECU、10 TECU.

3) 总体来看利用 CODG 精化即 BDSklob_C 效果最佳, BDSklob_B 次之, 经验模型 BDSklob_I 性能一般. 季节性变化对精化处理性能影响不大.

4) 相较于 RMS 来说, PER 看起来没有特别直观, 这是由于多数模型值与参考值偏差大于参考值, 统计时此种情况 PER 按 0 统计, RMS 为绝对精度指标, 精化前后效果更加明显.

表 1 精化前后 BDSklob 模型全球及区域精度统计

季节	模型	全球		亚太地区	
		PER/%	RMS/TECU	PER/%	RMS/TECU
春分	BDSklob	26.77	64.90	37.40	15.11
	BDSklob_B	39.14	7.03	45.31	6.96
	BDSklob_C	42.89	5.01	49.76	5.14
	BDSklob_I	33.63	14.22	37.96	18.65
夏至	BDSklobb	22.30	12.34	33.61	6.87
	BDSklob_B	39.08	5.26	46.68	4.60
	BDSklob_C	39.09	5.11	45.85	4.64
	BDSklob_I	31.51	7.01	36.33	7.84
秋分	BDSklobb	24.09	68.67	33.88	12.37
	BDSklob_B	38.02	5.12	48.59	4.72
	BDSklob_C	39.74	4.71	50.78	4.39
	BDSklob_I	31.29	11.28	39.26	15.51
冬至	BDSklobb	38.21	53.32	45.86	9.30
	BDSklob_B	46.42	6.79	49.01	5.04
	BDSklob_C	48.82	4.97	50.77	4.41
	BDSklob_I	37.70	10.54	35.84	8.84

图 3、4 为精化前后 BDSklob 模型在各纬度带上的精度统计, 区域划分如下: 区域 1 为 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 、区域 2 为 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、区域 3 为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、区域 4 为 $-30^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 、区域 5 为 $-60^{\circ}\sim -30^{\circ}$ 、区域 6 为 $-90^{\circ}\sim -60^{\circ}$. 可以看出精化前后不同纬度带上精度有了明显提升, 其中在极地区域性能提升最为明显, 最高可提升 40%. 由表 1

可知, 相对精度 PER 有时会出现 0 的情况, 所以绝对精度 RMS 会更具有参考意义. RMS 不做剔除处理, 在极地区域精化前后最高可降低 100 TECU. 在不同纬度带上, 总体来看依然是 BDSklob_C 性能最佳, BDSklob_B 次之, 经验模型 BDSklob_I 相对较差.

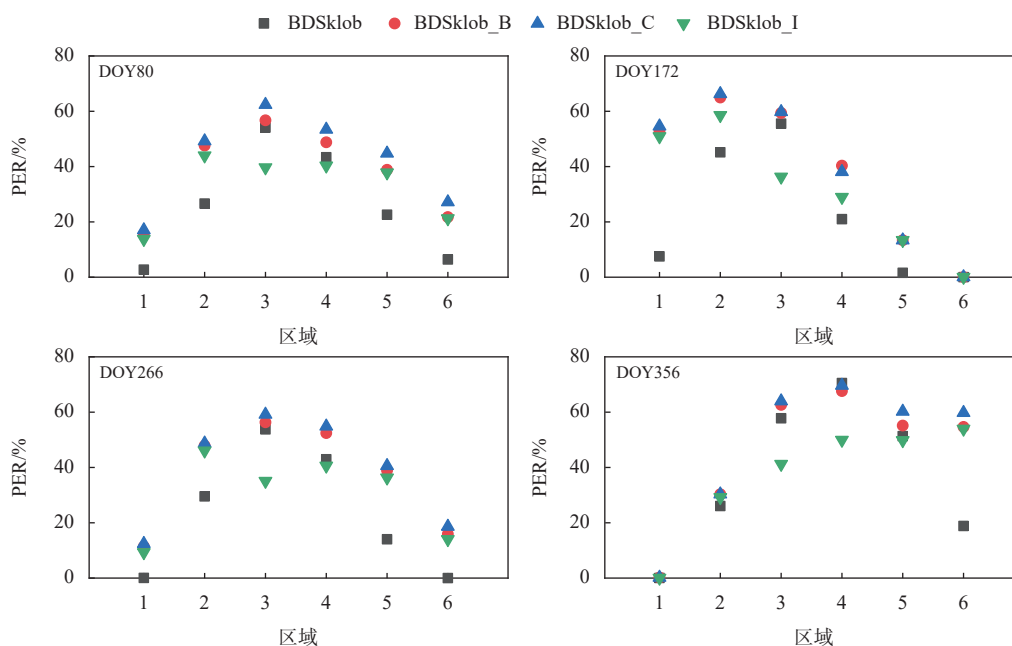


图 3 精化前后 BDSklob 模型在不同区域上的改正率

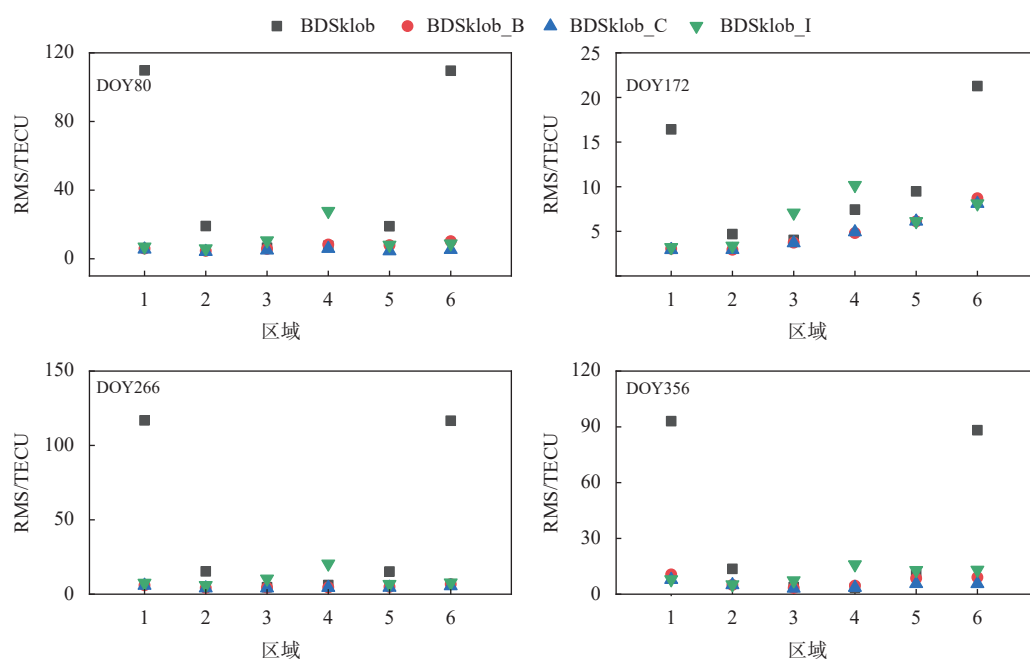


图 4 精化前后 BDSklob 模型在不同区域上的 RMS

2.3 BDSklob 精化前后与 GNSS 实测数据对比

图 5 为多源数据精化前后 BDSklob 模型 TEC 与实测数据在各观测站上的 TEC 偏差,可以看出:

1) 精化前 BDSklob 模型在各个观测站上偏差为 8~14 TECU, 越高纬度区域测站偏差越大, 与前文统

计结果一致。

2) 精化后模型与实测 TEC 偏差最高为 6 TECU. 在极地区域精化前后变化较为明显, 偏差降低约 7 TECU.

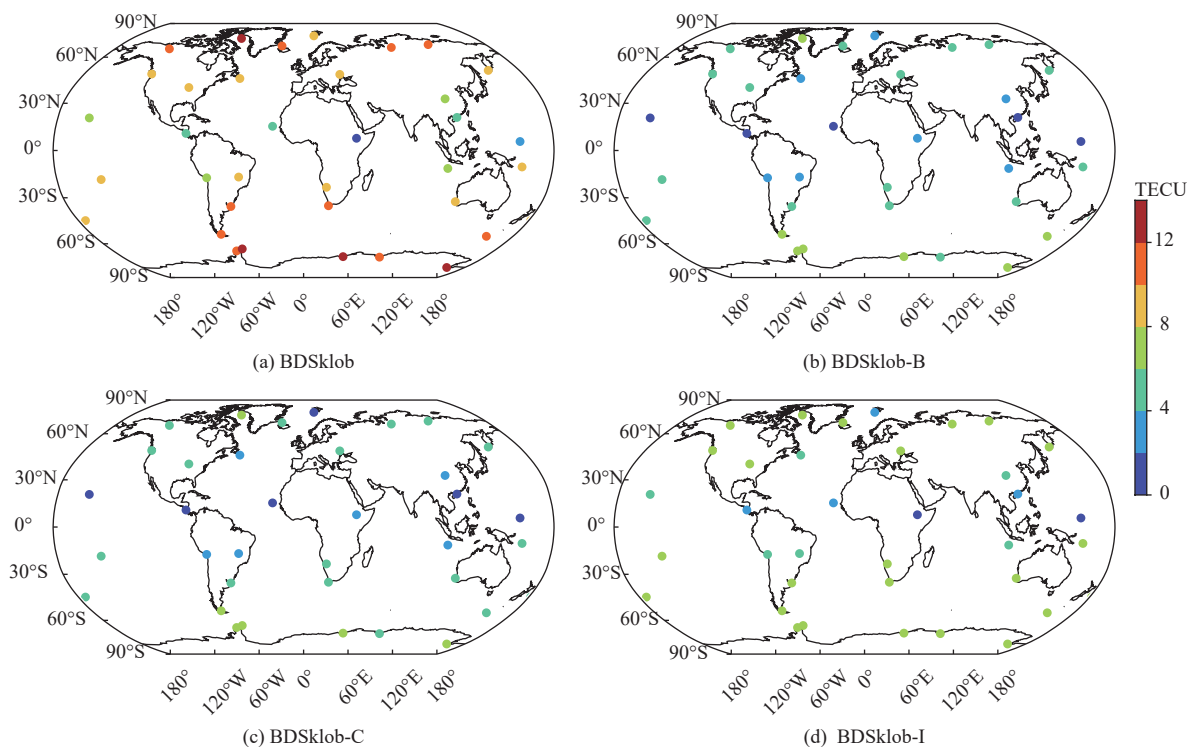


图 5 2019 年 DOY172 多源数据精化前后 BDSklob 模型与 GNSS 实测 TEC 偏差

为了更好统计精化前后精度变化, 图 6 以 GNSS 实测数据为基准, 统计了不同纬度带上精化前后

BDSklob 模型的精度. 可以看出:

1) 在高纬度地区即极地区域精化程度最高, 南

半球高纬度地区精化前 RMS 可达近 100 TECU, 精化后为 5 TECU 左右, 且跟选定的站点有关。

2) 以实测数据进行统计来看, BDSklob_C 性能

最佳, BDSklob_B 次之, 经验模型 BDSklob_I 相对差一些, 和以 GODG 为基准的统计结果一致。

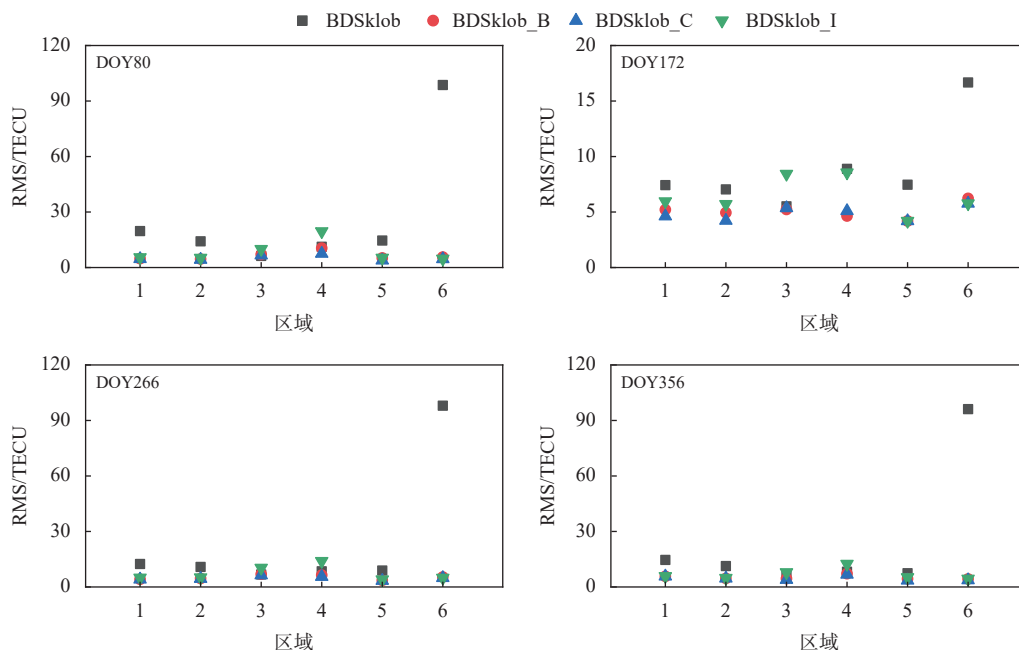


图 6 以 GNSS 实测 TEC 为基准精化前后 BDSklob 模型在不同区域上的 RMS

2.4 BDSklob 精化前后定位性能影响分析

从前文可知多源数据对 BDSklob 精化前后模型性能有了显著的提升, 电离层延迟对定位性能影响是极大的, 为此我们选取了 BDSklob 模型主要服务区内的 XIA1 测站, 分析改测站在 2019 年两分两至点即年积日 80、172、266、356 精化前后单频 SPP 定位性能。

图 7 给出了 2019 年两分两至点 XIA1 测站三维方向 RMS 精度, 图 8 为 BDSklob 精化前后 XIA1 测站上定位精度时间序列结果, 可以看出:

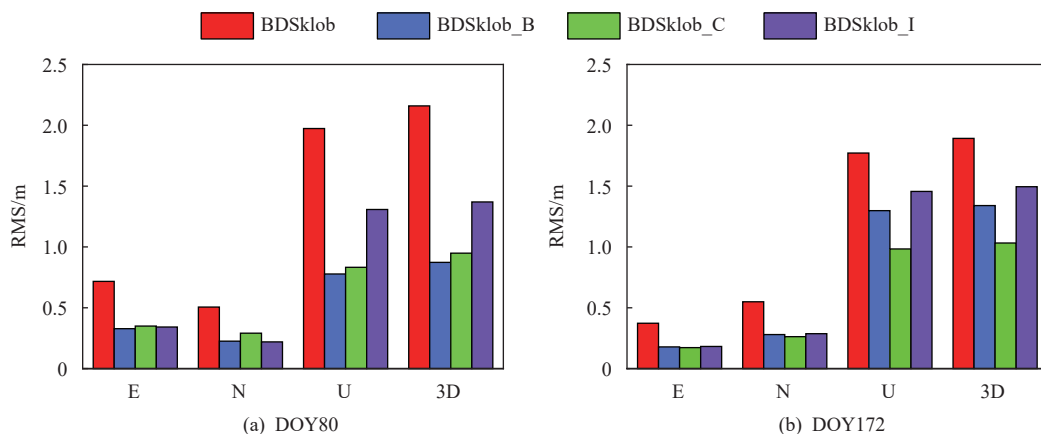
1) 定位结果差异主要体现在高程方向, 径向和切向精化前后偏差并不明显。高程方向上定位误差相

对较大一些, 同时精化前后差异也较大, 最高精化前后高程方向定位精度最高可提升 8 m。

2) 季节性变化对定位精度结果影响较小, 多源数据精化方法受季节影响较弱。

3) 精化处理前后, E 方向上 RMS 最高可降低 0.4 m, N 方向上 RMS 最高可降低 0.3 m, U 方向上 RMS 最高可降低 1.5 m, 3D 方向上 RMS 最高可降低 0.9 m。

4) 总体来看 BDSklob_C 性能最佳, BDSklob_B 次之, 经验模型 BDSklob_I 相对来说性能较差, 和之前电子含量统计结果一致。



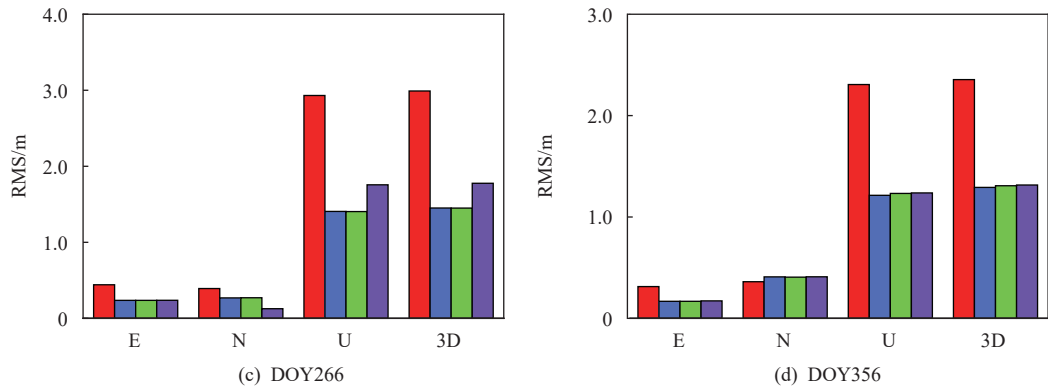


图7 2019年两分两至日XIA1测站定位精度

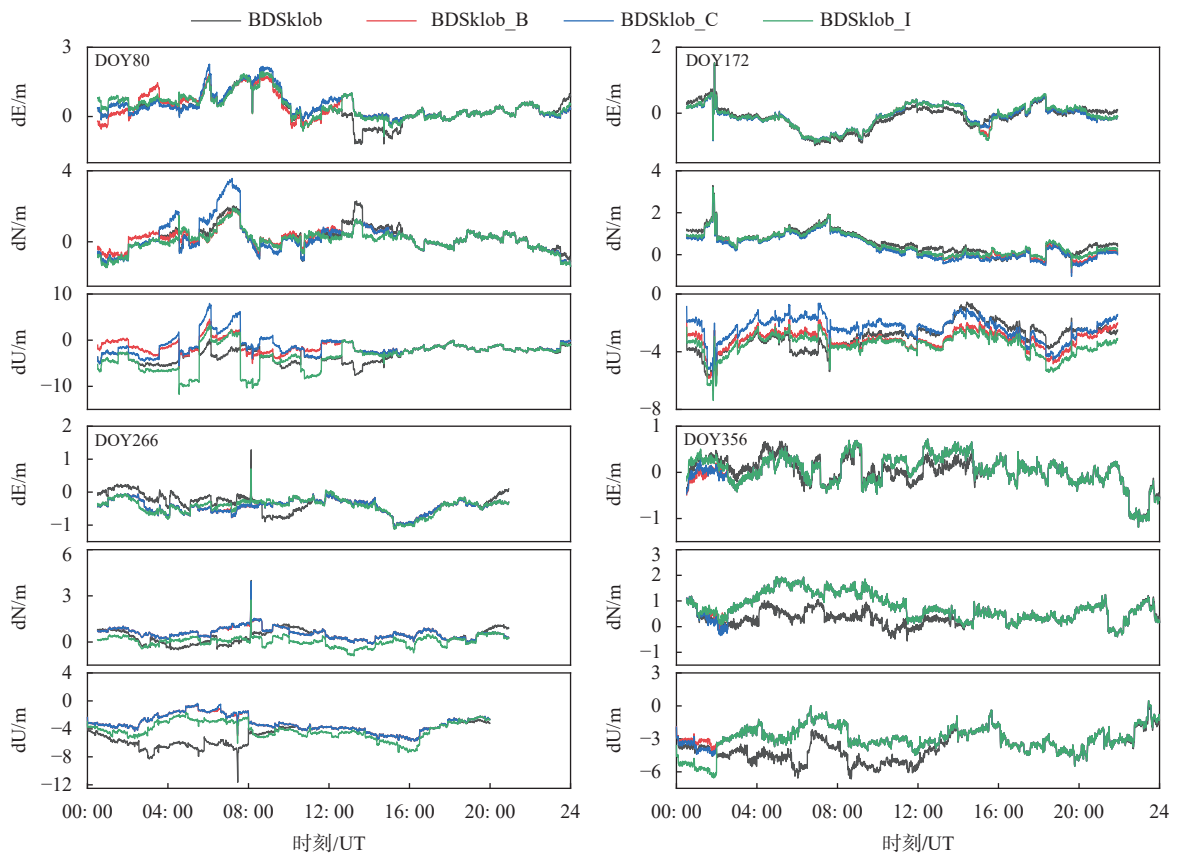


图8 XIA1测站定位误差序列图

3 讨论

本文针对 BDSklob 采用了多源数据精化处理方法, 基于松弛搜索法, 利用经验模型 IRI-Plas-2017 模型、CODE 的 GIM 产品, 以及北斗本身系统的 BDGIM 模型数据作为目标数据进行精化处理。不同数据源处理后结果精度稍有差异, 且对 BDSklob 模型的性能均有明显提升。其中 BDSklob_C 处理结果精度最高, 但由于其滞后性仅适用于高精度需求用户; BDSklob_B 模型精度次之, 其不借助于外部数据源, 在北斗自

系统中即可完成精化处理; BDSklob_I 相较于其他两种精度稍差, 但经验模型具有预测性, 可以同步进行精化处理, 满足用户实时性的需要。

本次研究中仅进行了 2019 年两分两至日的精化实验, 未能系统性长时序地对多源数据精化实验进行探究, 后续在实验时间充足的条件下可进一步探究。另外除了松弛搜索法外, 还有更多高精度的参数精化方法, 后续可利用多源数据对不同参数精化方法进行对比分析, 选择更为简便更高精度的 BDSklob 精化方法。

4 结束语

针对 BDS-2 期间 BDSklob 模型在服务区域外精度不高、两极地区改正异常情况,提出了基于参数精化方法,利用经验模型 IRI-Plas-2017、BDGIM 模型以及 CODE GIM 产品等多源数据,精化 BDSklob 模型.采用与 CODE 产品比较、与双频观测量比较和定位性能提升,分析了多源数据精化 BDSklob 模型精度提升情况,结果表明:

1) 各个数据源对 BDSklob 性能都有明显提升,尤其是在极地区域.其中 BDSklob_C 精度最高, BDSklob_B 模型精度次之, BDSklob_I 性能相对较差.

2) 以 CODE 的 GIM 产品为基准,多源数据精化方法,在全球范围 RMS 最高可降低 60 TECU,在亚太地区可降低 15 TECU,在极地区域可降低 100 TECU.

3) 以 GNSS 实测数据为基准,极地区域 RMS 最高可降低约 100 TECU.

4) 采用精化前后 BDSklob 模型,单频 SPP 定位 3D RMS 值最高可降低 0.9 m.

BDSklob_C、BDSklob_B 以及 BDSklob_I 精化方法都对 BDSklob 模型精度有了显著的提升, BDSklob_C 可以满足高精度用户的需求, BDSklob_B 可保证精化处理的独立性,而 BDSklob_I 具有高效的实时性.随着人们高精度定位需求的增强, BDSklob 模型的性能需要进一步完善,后续可采用多源数据多模算法进行 BDSklob 的精化处理,保证 BDSklob 模型的服务性能.

参考文献

- [1] KLOBUCHAR J A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users[J]. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 1987(3): 325-331. DOI: [10.1109/TAES.1987.310829](#)
- [2] SCHAER S. Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system[D]. University of Berne, 1999.
- [3] WANG C, CHUANG S, LEI F, et al. Improved modeling of global ionospheric total electron content using prior information[J]. *Remote sensing*, 2018, 10(1): 63. DOI: [10.3390/rs10010063](#)
- [4] ZHAO C B, YUAN Y B, ZHANG B C, et al. Ionosphere sensing with a low-cost, single-frequency, multi-gnss receiver[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2019, 57(2): 881-892. DOI: [10.1109/TGRS.2018.2862623](#)
- [5] ZUS F, DENG Z, WICKERT J. The impact of higher-order ionospheric effects on estimated tropospheric parameters in precise point positioning[J]. *Radio science*, 2017, 52(8): 963-971. DOI: [10.1002/2017RS006254](#)
- [6] SHI C, GU S F, LOU Y D, et al. An improved approach to model ionospheric delays for single-frequency precise point positioning[J]. *Advances in space research*, 2012, 49(12): 1698-1708. DOI: [10.1016/j.asr.2012.03.016](#)
- [7] ZHU Y X, TAN S S, ZHANG Q H, et al. Accuracy evaluation of the latest BDGIM for BDS-3 satellites[J]. *Advances in space research*, 2019, 64(6): 1217-1224. DOI: [10.1016/j.asr.2019.06.021](#)
- [8] WANG N B, LI Z S, YUAN Y B, et al. Beidou global ionospheric delay correction model (BDGIM): performance analysis during different levels of solar conditions[J]. *GPS solutions*, 2021, 25(3): 1-13. DOI: [10.1007/s10291-021-01125-y](#)
- [9] YUAN Y B, WANG N B, LI Z S, et al. The beidou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results[J]. *Journal of the institute of navigation*, 2019, 66(1): 55-69. DOI: [10.1002/navi.292](#)
- [10] SWAMY K. Impact of high geomagnetic activity on Global Positioning System Satellite Signal (L-Band) delay and klobuchar algorithm performance over low latitudinal region[M]. *Microelectronics, Electromagnetics and Telecommunications*, 2018.
- [11] SHUKLA A K, DAS S, SHUKLA A P, et al. Approach for near-real-time prediction of ionospheric delay using Klobuchar-like coefficients for Indian region[J]. *IET radar, sonar & navigation*, 2013, 7(1): 67-74. DOI: [10.1049/iet-rsn.2011.0371](#)
- [12] 何玉晶. GPS电离层延迟改正及其扰动监测的分析研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [13] 李维鹏, 李建文, 戴伟. Klobuchar电离层延迟改正模型精化方法的研究[J]. *测绘科学*, 2009, 34(5): 49-51.
- [14] 高杨, 焦诚, 刘萧, 等. 利用中国区域电离层数据拟合 Klobuchar参数[J]. *全球定位系统*, 2014, 39(5): 37-40,45.
- [15] 朱进. 天文和测地 VLBI物理模型的研究[D]. 南京: 南京大学, 1991.
- [16] 赵威, 张成义. Klobuchar 模型的实用分析与改进[J]. *空间科学学报*, 2013, 33(6): 624-628.
- [17] WANG N B, YUAN Y B, LI Z S, et al. Improvement of Klobuchar model for GNSS single-frequency ionospheric delay corrections[J]. *Advances in space research*, 2016, 57(7): 1555-1569. DOI: [10.1016/j.asr.2016.01.010](#)
- [18] 章红平, 平劲松, 朱文耀, 等. 电离层延迟改正模型综述[J]. *天文学进展*, 2006, 24(1): 16-26.

- [19] 李猛, 廖瑛, 梁加红, 等. 电离层延迟模型改进研究[J]. 计算机仿真, 2009(10): 4.
- [20] WANG N B, LI Z S, HUO X L, et al. Refinement of global ionospheric coefficients for GNSS applications: methodology and results[J]. *Advances in space research*, 2019, 63(1): 343-358. DOI: [10.1016/j.asr.2018.09.021](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.09.021)
- [21] ADEBIYI S J, ADIMULA I A, OLADIPO O A, et al. Assessment of IRI and IRI-Plas models over the African equatorial and low-latitude region[J]. *Journal of geophysical research : space physics*, 2016. DOI: [10.1002/2016JA022697](https://doi.org/10.1002/2016JA022697)
- [22] OGWALA A, EMMANUEL S O, PANDA S K, et al. Total electron content at equatorial and low-, middle- and high-latitudes in African longitude sector and its comparison with IRI-2016 and IRI-Plas 2017 models[J]. *Advances in space research*, 2020. DOI: [10.1016/j.asr.2020.07.013](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.013)
- [23] SEZEN U, GULYAEVA T L, ARIKAN F. Online computation of international reference ionosphere extended to Plasmasphere(IRI-Plas) model for space weather[J]. *Geodesy and geodynamics*, 2018, 9(5): 347-357. DOI: [10.1016/j.geog.2018.06.004](https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.06.004)
- [24] SEKIDO M, KONDO T, KAWAI E, et al. Evaluation of GPS-based ionospheric TEC estimation and application to pulsar VLBI observation[J]. *Communications research laboratory review*, 2003, 38(4). DOI: [10.1029/2000RS002620](https://doi.org/10.1029/2000RS002620)

作者简介

刘家龙 (1997—), 男, 博士, 研究方向为 GNSS 数据处理及电离层监测。

Refinement of BKlob model based on multi-source data

LIU Jialong^{1,2}, ZHU Yongxing^{3,4}, JIA Xiaolin^{3,4}, SONG Shuli^{1,2}, CHENG Na⁵

(1. *Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*; 3. *Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China*; 4. *State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China*; 5. *School of Surveying and Geo-infomatics, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China*)

Abstract: BDS-3 has launched global services, and the service area of the BDS Klobuchar (BDSklob) model has also expanded to a global scale. The global performance of the BDSklob model has also attracted great attention. In response to the low accuracy of the BDSklob model outside the service area and abnormal correction in polar regions during the BDS-2 period, this paper proposes a new BDSklob model refinement scheme-multi-source data refinement method-based on parameter refinement method, using empirical models IRI-Plas-2017, BDGIM model, and multi-source data from CODE's GIM products. The results show that the refinement methods of various data sources have significantly improved the performance of the BDSklob model, especially in polar regions; BDSklob_ C (GIM product with CODE data source) has the highest processing accuracy; BDSklob_ B (data source is BDGIM) takes the second place in accuracy, but without the help of external data sources, refinement processing can be completed in the Beidou system; BDSklob_ the accuracy of I (data source is IRI model) is slightly poor, but based on the predictive ability of empirical models, it can meet the needs of real-time refinement processing.

Keywords: BDS Klobuchar model; refinement; IRI model; GIM; broadcast ionospheric model