

顾及电离层延迟改正精度信息的 伪距单点定位随机模型

颜翰文¹, 张益泽²

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;

2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘要:针对太阳活动高年电离层活跃期卫星导航信号受电离层扰动影响导致伪距单点定位精度下降的问题,提出了一种在传统高度角定权外额外顾及电离层延迟改正精度信息对观测值权的影响的随机模型。分析了北斗卫星导航系统(BDS)和全球定位系统(GPS)在采用北斗全球广播电离层模型(BDGIM)和Klobuchar广播电离层模型时不同随机模型的伪距单点定位精度,并与电离层平静期的结果进行对比。实验结果表明,在电离层活跃期顾及电离层延迟改正精度的随机模型的定位精度相比高度角定权模型有较大提升,采用BDGIM时使用顾及电离层延迟改正精度的随机模型,将BDS、GPS及GPS+BDS+Galileo的平均定位精度分别提升了6.63%、4.73%和6.37%,而采用Klobuchar广播电离层模型时,将平均定位精度分别提升了7.41%、7.15%和6.38%;在电离层平静期,顾及电离层延迟改正精度的各随机模型相比高度角定权模型定位精度提升低于电离层活跃期。

关键词:伪距单点定位;广播电离层模型;随机模型;电离层延迟改正

中图分类号:V19;P228

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2025)01-0076-12

A stochastic model for pseudorange single point positioning with consideration of the accuracy of ionospheric delay correction

YAN Hanwen¹, ZHANG Yize²

(1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: In response to the problem of reduced accuracy in pseudorange single point positioning due to ionospheric disturbances during periods of high solar activity, a stochastic model is proposed, which considers the effect of ionospheric delay correction accuracy on the weighting of observations in addition to the traditional elevation angle weighting. The accuracy of pseudorange single point positioning for the BeiDou satellite navigation system (BDS) and the global positioning system (GPS) is analyzed using the BeiDou global ionospheric model (BDGIM) and the Klobuchar broadcast ionospheric model with different stochastic models, and the results are compared with those in ionospheric quiet periods. The experimental results show that during the ionospheric active period, the positioning accuracy of the stochastic model that considers the precision of the ionospheric delay correction is significantly improved compared to the elevation angle weighting

收稿日期: 2024-05-25; 修订日期: 2024-07-23

作者简介: 颜翰文(2003—), 男, 主要从事卫星导航与定位方面的研究。

通信作者: 张益泽(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事 GNSS 高精度定位方面的研究。

model. Among the different stochastic models, the average positioning accuracy improvements for BDS, GPS and GPS + BDS + Galileo are 6.63%, 4.73% and 6.37% respectively when using BDGIM considering the precision of the ionospheric delay, and 7.41%, 7.15% and 6.38% respectively when using Klobuchar broadcast ionospheric model. During the ionospheric quiet period, the improvement in positioning accuracy of the stochastic models considering ionospheric delay correction precision is less pronounced than that in the ionospheric active period.

Key words: Pseudorange single point positioning; Broadcast ionospheric model; Stochastic model; Ionospheric delay correction

0 引言

在卫星导航定位中,由于各卫星的空间环境以及与接收机的相对方位不同,不同卫星观测量的可靠度并不完全相同,因此,需要对不同观测量赋予不同的权重以建立随机模型。伪距单点定位中常用的先验随机模型有高度角定权模型^[1-2]、信噪比定权模型^[3-5]及用户等效距离误差(user equivalent range error, UERE)定权模型^[6-7]等。

电离层延迟是影响全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)定位精度的重要因素^[8]。由电离层折射引起的定位距离误差往往达到数米至数十米,因此,对电离层延迟的改正是提高伪距单点定位精度的重要手段。GNSS 通常使用广播电离层模型参数修正电离层延迟,其中全球定位系统(global positioning system, GPS)使用 Klobuchar 广播电离层模型^[9-11],北斗三代全球卫星导航系统采用北斗全球广播电离层模型(BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model, BDGIM)播发 9 个改正参数^[9,11-12]。

太阳活动呈周期性变化,其周期大约为 11 年。第 25 个太阳周期从 2019 年 12 月开始,预计 2024—2025 年太阳活动达到峰值^[13-14]。在太阳活动高年,由于太阳风与磁层-电离层相互作用导致的电离层扰动,将对 GNSS 信号产生严重影响^[11,15],进而增大电离层延迟对观测量测距精度的影响。对于伪距单点定位而言,由于 GPS Klobuchar 广播电离层模型的平均改正精度为 71.3%,而 BDGIM 在全球范围内的平均改正精度为 77.2%^[9,16],改正精度有限。特别是在电离层活跃期,高度角定权模型低估了电离层延迟对测距精度的影响,难以完全反映各观测量的可靠性。

针对太阳活动高年电离层活跃期伪距单点定

位传统高度角定权模型无法完全反映电离层延迟比重这一问题,本文提出了一种在伪距单点定位随机模型中顾及电离层延迟改正精度的定权方案,分别采用北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)、GPS 以及 GPS+BDS+Galileo 三系统的定位结果,评估了该方案在使用 Klobuchar 广播电离层模型和 BDGIM 时,在电离层活跃期的定位精度与高度角定权模型的对比情况,确定了采用 BDGIM 和 Klobuchar 模型时精度提升最高的随机模型,并同时评估了该类随机模型在电离层平静期与高度角定权定位精度的差异。结果表明,该顾及电离层改正精度信息的伪距单点定位随机模型对电离层活跃期提高伪距单点定位精度具有一定意义。

1 伪距单点定位观测方程

BDS 和 GPS 的伪距观测方程为^[3,17]

$$\begin{cases} P^{C,j} = \rho^{C,j} - cd t^{C,j} + cd t_R + I^j + T^j + \epsilon^{C,j} \\ P^{G,j} = \rho^{G,j} - cd t^{G,j} + cd t_R + I^j + T^j + \epsilon^{G,j} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C 和 G 分别表示 BDS 和 GPS; j 表示卫星编号; ρ 表示卫星到接收机相位中心间的距离,其值为 $\sqrt{(X^j - X)^2 + (Y^j - Y)^2 + (Z^j - Z)^2}$, 其中, (X, Y, Z) 表示测站坐标, (X^j, Y^j, Z^j) 表示卫星 j 的坐标; c 为光速; dt_R 为接收机钟差, dt^C 和 dt^G 分别表示 BDS 和 GPS 的卫星钟差; I 表示电离层延迟误差; T 表示对流层延迟误差; ϵ 表示伪距观测噪声和其他误差。

2 随机模型

在卫星定位中,各观测值的权反映了该观测值的可靠程度,对不同观测量确定合适的权值,将提高伪距单点定位的定位精度。

权阵 P 可以表示为

$$P = Q^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & & & \\ & \frac{1}{\sigma_2^2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, Q 为观测值的协方差矩阵; σ 表示各观测量的观测噪声。

观测方程噪声由定位时各个误差项组成^[8], 即

$$\sigma_j^2 = \sigma_{\text{UERE},j}^2 = \sigma_{\text{eph},j}^2 + \sigma_{\text{clk},j}^2 + \sigma_{\text{ion},j}^2 + \sigma_{\text{trop},j}^2 + \sigma_{\text{mp},j}^2 + \sigma_{\text{noise},j}^2 \quad (3)$$

式中, σ 表示观测方程噪声; σ_{UERE} 表示用户等效距离误差; σ_{eph} , σ_{clk} , σ_{ion} , σ_{trop} , σ_{mp} 及 σ_{noise} 分别表示卫星星历精度、卫星钟差精度、电离层改正精度、对流层改正精度、多路径模型精度及观测值噪声精度。

2.1 高度角定权法

对式(3)可以根据经验简化为^[8]

$$\sigma^2 = (a + b e^{\text{ele}/c})^2 \quad (4)$$

式中, a, b, c 分别为根据经验确定的估计值; e 为自然对数的底数; ele 表示卫星相对测站的高度角。后文简称高度角定权的随机模型为 ele 。

2.2 为电离层延迟的定权方法

在电离层活跃期, 由于传统的高度角定权方法低估了电离层延迟对卫星定位精度的影响。因此, 需要考虑在传统的高度角定权以外顾及电离层延迟改正精度的影响, 即

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{ele}}^2 + \sigma_{\text{ion}}^2 \quad (5)$$

1) 本文将其分为 3 类: 按照电离层延迟大小乘以一定比例的定权方法。由于广播电离层模型对电离层误差的改正量约为 60%, 因此定权方案为

$$\sigma_{\text{ion}} = 0.4 \times I \quad (6)$$

即假设广播电离层模型仍有 40% 的电离层延迟未能改正, 后文简称该模型为 iono 。

2) 根据不同模型和所处的地理位置分配相应的比例系数。由于 BDGIM 和 Klobuchar 模型在不同区域的改正精度不同, 因此, 需要在不同区域对两个广播电离层模型分配不同的改正比例系数。不同模型在不同地区的改正精度如表 1 所示^[9]。

则估计电离层延迟的中误差为

$$\sigma_{\text{ion}} = (1 - p) \times I \quad (7)$$

式中, p 为在表 1 中不同区域下不同模型各自的改正精度。

表 1 不同广播电离层时延修正模型在不同电离层活动水平下的改正比例

Tab. 1 Proportion of corrections in different broadcast ionospheric delay correction models at different levels of ionospheric activity

区域	≥30 个 TECU		15~30 个 TECU		<15 个 TECU	
	BDGIM	Klob	BDGIM	Klob	BDGIM	Klob
中国及周边	81.4	66.2	79.8	69.5	77.6	54.1
欧洲	65.1	72.3	67.5	72.3	75.9	61.4
北美	72.7	58.7	70.9	66.1	72.8	53.1
赤道	81.3	59.2	79.4	63.2	70.9	37.5
南半球	71.8	66.6	77.6	71.8	74.7	39.9
海洋	70.0	56.0	70.0	56.0	70.0	56.0

后文简称该模型为 iono_factor 。

3) 根据经验公式推算电离层延迟的权重大小。经验公式为^[18-20]

$$\sigma_{\text{ion}}^2 = \frac{1}{m^2} \begin{cases} \sigma_{\text{ion},0}^2 + \sigma_{\text{ion},1}^2 \cdot \cos B_{\text{IPP}} \cdot \cos \left(\frac{t_{\text{IPP}} - 14}{12} \pi \right), & 8 < t_{\text{IPP}} < 20 \text{ 或 } B_{\text{IPP}} < \frac{\pi}{3} \\ \sigma_{\text{ion},0}^2, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中, m 表示投影函数, 即 $m = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 Z}{(1 + H_{\text{ion}}/R)}}$,

其中, Z 表示卫星相对接收机的天顶角; H_{ion} 表示电离层薄层高度, 对于 BDGIM 取 400 km, R 表示地球半径; $\sigma_{\text{ion},0}^2$ 表示电离层模型改正在天顶方向的先验方差, $\sigma_{\text{ion},1}^2$ 表示电离层模型所估计的延迟的方差, 这两项均是由电离层模型确定对应的经验值, 对于 BDGIM 这两项均取为 0.5 m; B_{IPP} 为电离层穿刺点 (ionospheric pierce point, IPP) 纬度, t_{IPP} 为 IPP 当地时间^[19]。由于该式用于具有时空相关性的改正模型, 因此适用于 BDGIM, 对于 Klobuchar 模型则不适用^[19], 后文简称该模型为 iono_emp 。

2.3 组合 SISRE 与电离层延迟精度的定权方法

由式(3)可知, 在随机模型中还有 σ_{eph} 和 σ_{clk} 没有考虑, 这两项可由用户空间信号精度 (signal in space range error, SISRE) 表示^[21], 即 $\sigma_{\text{SISRE}}^2 = \sigma_{\text{eph}}^2 + \sigma_{\text{clk}}^2$, 本文中取 GPS 的 SISRE 为 0.5 m, BDS-2 卫星的 SISRE 为 0.8 m, BDS-3 卫星的 SISRE 为 0.5 m, Galileo 的 SISRE 为 0.3 m。因此, 式(3)可改写为

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{SISRE}}^2 + \sigma_{\text{ele}}^2 + \sigma_{\text{ion}}^2 \quad (9)$$

2.2 节所述模型额外顾及 SISRE 的模型分别简称为 iono+sisre,iono_factor+sisre,iono_emp+sisre。

3 实验结果

3.1 实验数据

第 25 个太阳周期从 2019 年 12 月开始,2024—2025 年太阳活动达到峰值。为了比较电离层活跃期与电离层平静期不同定权策略的效果,本文选取了 16 个 IGS 测站在电离层平静期的 2020 年 11 月 1 日至 7 日(DOY306~312)和处于电离层活跃期的 2023 年 3 月 23—29 日(DOY082~088)的观测数据及广播星历,其中 2023 年 3 月 23—24 日处于电离层磁暴期间,当天 Kp 值峰值达到 8^[22]。数据采用原始伪距观测值,GPS,BDS 及 Galileo 系统分别采用 L1,B1I 及 E1 频点的伪距观测值,采样时间间隔为 30 s,卫星截止高度角为 10°,对流层模型采用 EGNOS 模型和 NMF 投影函数,分别评估了不同定权策略下 BDS 和 GPS 单系统使用不同广播电离层模型和随机模型时各测站的伪距单点定位精度。测站分布如图 1 所示。

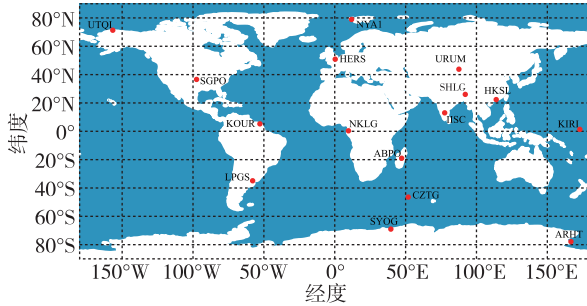


图 1 测站分布图

Fig. 1 Distribution map of stations

3.2 精度指标

为了比较不同随机模型的伪距单点定位精度,本文使用 IGS 周解测站精密坐标作为参考坐标,评估各天结算结果相对于 IGS 坐标的均方根(root mean square,RMS),RMS 的计算式为

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (10)$$

式中, x_0 表示 N,E,U 这 3 个方向上的参考坐标值; x_i 表示相应方向上的计算值; n 为剔除粗差后的历元数。

为了比较不同随机模型与高度角定权的差异,记相对精度提高百分比为

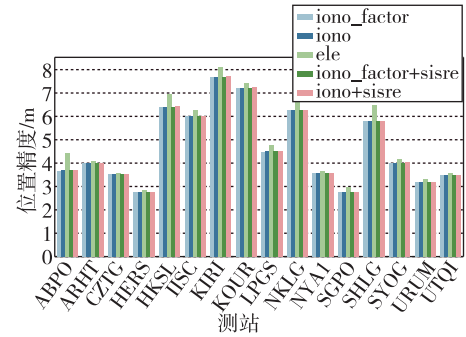
$$P = \frac{R_i - R_{ele}}{R_{ele}} \times 100\% \quad (11)$$

式中, R_i 表示不同随机模型进行伪距单点定位时的 RMS; R_{ele} 表示高度角定权的 RMS。

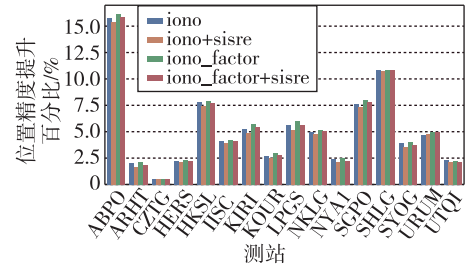
3.3 不同随机模型精度对比与分析

3.3.1 电离层活跃时期

在处于电离层活跃期的 2023 年 3 月 23—29 日,使用 GPS 单系统采用不同定权策略的结果如图 2 和图 3 所示。



(a) GPS 不同随机模型定位精度

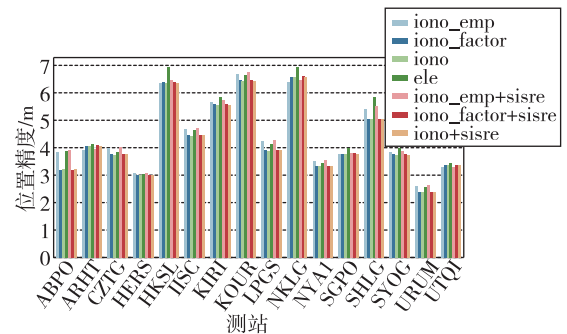


(b) GPS 不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

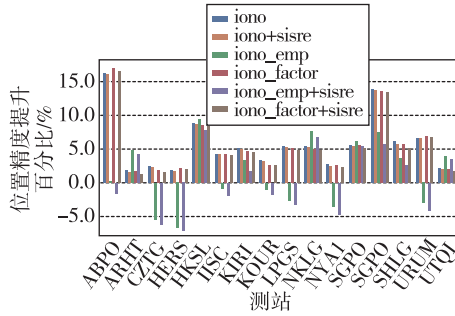
图 2 电离层活跃期采用 GPS 和 Klobuchar 模型

不同定权策略与高度角定权模型位置精度对比

Fig. 2 Comparison of position accuracy of different weighting strategies using GPS and Klobuchar models with elevation angle weighting model during ionospheric active period



(a) GPS 不同随机模型定位精度



(b) GPS 不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 3 电离层活跃期采用 GPS 和 BDGIM
不同定权策略与高度角定权位置精度对比

Fig. 3 Comparison of different weighting strategies and
elevation angle weighting position accuracy using GPS
and BDGIM during ionospheric active period

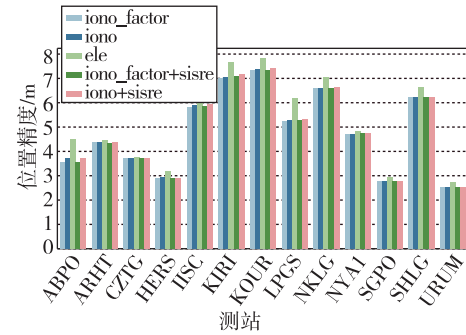
根据图 2 和图 3 可知,部分采用经验公式的定权方案相较于高度角定权方案的测站精度有所下降,这一统计结果说明该方案不够稳定,且该经验公式对 GPS 不通用,而其内在原因仍有待进一步研究。其他方案的精度均有不同程度的提升,其中,处于中低纬度的测站 ABPO 和 SHLG 相对提升最多,达到 10% 以上,ARHT, CZTG 及 NYA1 这 3 个处于高纬度地区的测站提升幅度较小,均低于 2.5%。此外,在电离层延迟以外增加对 SISRE 分量的考虑时,其效果反而比不考虑 SISURE 时发生下滑。

在 GPS 单系统采用 Klobuchar 广播电离层模型的 4 种定权方案中, ABPO, ARHT, HERS, HKSL, IISC, KIRI, KOUR, LPGS, NYA1, SGPO 及 SYOG 这 11 个测站采用 iono_factor 方案时精度提升比例最高, iono 方案次之,而其他测站中除 URUM 站以外,采用 iono 和 iono_factor 两种定权方案时效果接近。因此,在 GPS 单系统采用 Klobuchar 广播电离层模型时, iono_factor 定权方案的效果相对于高度角定权方案提升最多。

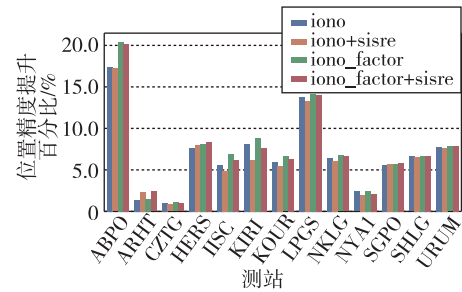
在 GPS 单系统采用 BDGIM 广播电离层模型的 6 种定权方案中, iono_emp 和 iono_emp+sisre 方案精度提升不稳定,在 8 个测站中精度下降,说明该模型不通用,主要原因是 BDGIM 在建模时监测站分布不均匀,导致其模型精度在全球也呈现不均匀分布,总体上北半球优于南半球^[23],而在其他 4 种定权方案中, iono 在 ARHT, CZTG, HKSL, KIRI, KOUR, NKLG, SHLG, SYOG 及 UTQI 这 9 个测站中的精度提升比例相比其他定权方案具有显著优势,而 iono_factor 方案在 ABPO, HERS 和 URUM 3 个测站中精

度提升比例最高,而 iono 方案次之。其他测站中, iono_factor 和 iono 方案的效果较为接近,此外,可以看出这两个方案在添加 SISRE 对权的影响之后精度提升比例反而下降。因此, GPS 单系统采用 BDGIM 广播电离层模型时,使用 iono 模型的定位精度相比传统高度角模型提升最多。

使用 BDS 单系统采用不同定权策略的结果如图 4 和图 5 所示。



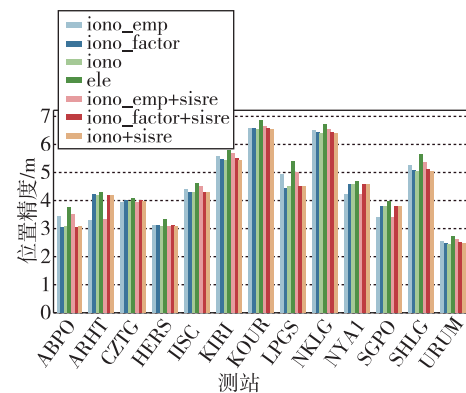
(a) BDS 不同随机模型定位精度



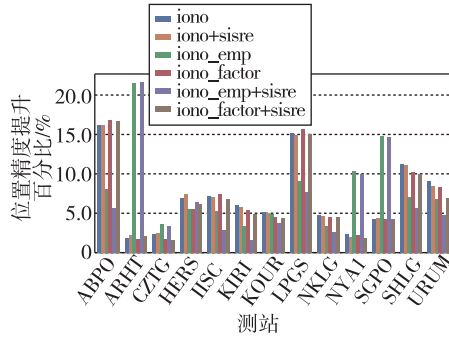
(b) BDS 不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 4 电离层活跃期采用 BDS 和 Klobuchar 模型不同
定权策略与高度角定权模型位置精度对比

Fig. 4 Comparison of the position accuracy of different
weighting strategies using BDS and Klobuchar models with
elevation angle weighting models during
ionospheric active period



(a) BDS 不同随机模型定位精度



(b) BDS 不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 5 电离层活跃期采用 BDS 和 BDGIM

不同定权策略与高度角定权位置精度对比

Fig. 5 Comparison of different weighting strategies and elevation angle weighting position accuracy using BDS and BDGIM during ionospheric active period

据图 4 和图 5 可知,各随机模型的精度相较于高度角模型均有一定提升,ABPO 和 LPGA 两个处于中低纬度地区的测站,其提升均超过了 10%。而在其他 4 个随机模型中,提升最少的处于南北极地区的 ARHT, NYAI 及 SGPO 测站,iono_emp 和 iono_emp+sisre 提升最多,但在中低纬度地区这两个方案的位置精度提升不如其他方案。

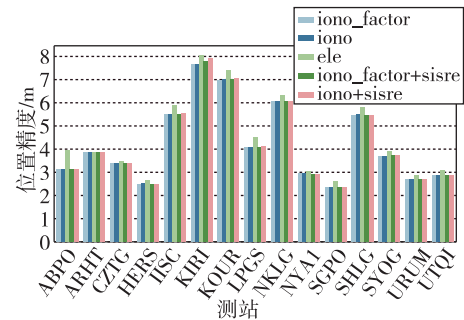
对于 BDS 单系统采用 Klobuchar 广播电离层模型的 4 种定权方案,其中 ABPO, IISC, KIRI, KOUR, LPGA 及 NKLG 这 6 个测站均是 iono_factor 精度提升比例最高,测站 NYAI 是 iono 精度提升比例最高,ARHT 测站是 iono_factor+sisre 精度提升比例最高,但 ARHT 和 NYAI 各自的优势定权策略并未体现出明显优势,而其他测站在采用 4 种不同定权方案时效果接近。ABPO, IISC, KIRI, KOUR, LPGA 及 NKLG 这 6 个测站均处于低纬度地区,说明在低纬度地区采用 iono_factor 方案对于 BDS 单系统采用 Klobuchar 广播电离层模型效果最好,可在中低纬地区采用该定权方案,而在其他地区则 4 种方案效果接近。

在 BDS 单系统采用 BDGIM 广播电离层模型的 6 种定权方案中, KIRI, KOUR, NKLG, SHLG 及 URUM 这 5 个测站使用 iono 方案精度提升比例最高,而 iono_factor 方案在 ABPO 和 LPGA 上体现了较为明显的优势, CZTG 站则是 iono_factor+sisre 方案的精度提升比例最高。总体而言,使用 iono 方案效果最好,其中由于 KIRI, KOUR 及 NKLG 均处于赤道附近,因此该方案最适合于赤道地区。

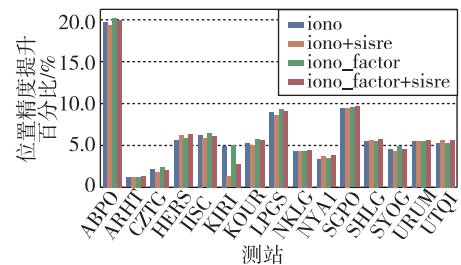
2023 年 3 月 23—29 日不同定权策略的定位精度与传统高度角定权策略的对比如表 2 所示。可知,除去精度提升不稳定的 iono_emp 和 iono_emp+sisre 方案以外,采用 BDGIM 广播电离层模型时,iono 方案对于所选取的各测站平均精度提升最高,在使用 BDS 单系统时位置精度提升达到 6.63%,而使用 GPS 单系统时位置精度提升为 4.73%,使用 BDS 单系统精度提升高于 GPS 系统;而采用 Klobuchar 广播电离层模型时,iono_factor 方案平均定位精度提升最高,对 GPS 单系统,该方案的精度提升达到 7.15%,对 BDS 单系统,该方案的精度提升达到 7.41%。

采用 GPS+BDS+Galileo 三系统定位的结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知,使用 Klobuchar 模型时,各随机模型的定位精度相较于高度角模型均有所提升,ABPO 测站平均提升最多,接近 20%,相对提升最少的是处于南极地区的测站 ARHT。平均提升最多的方案是 iono_factor,各测站的平均定位精度提升为 6.38%。



(a) 多系统不同随机模型定位精度

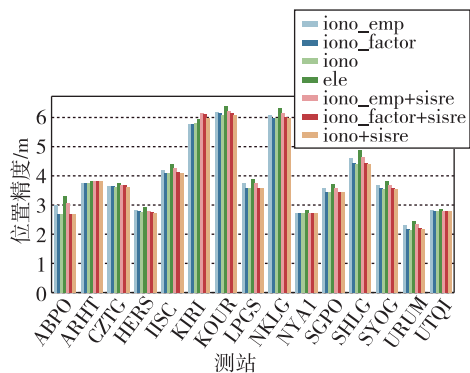


(b) 多系统不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

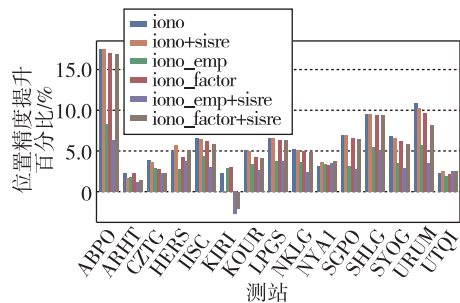
图 6 电离层活跃期采用多系统和 Klobuchar 模型不同定权策略与高度角定权模型位置精度对比

Fig. 6 Comparison of position accuracy of different weighting strategies with elevation angle weighting models using multi-system and Klobuchar models during ionospheric active period

由图 7 可知,采用 BDGIM 改正电离层延迟时,除 KIRI 站的 $\text{iono_emp} + \text{sisre}$ 和 $\text{iono_factor} + \text{sisre}$ 以外,各随机模型相对高度角模型的定位精度也有所提升,提升最多的仍然为 ABPO 测站。6 种顾及电离层延迟改正精度的随机模型中效果最好的是 iono ,其平均定位精度提升了 6.37%。



(a) 多系统不同随机模型定位精度



(b) 多系统不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 7 电离层活跃期采用多系统和 BDGIM 不同定权策略与高度角定权模型位置精度对比

Fig. 7 Comparison of the position accuracy of different weighting strategies with elevation angle weighting models using multi-system and BDGIM during ionospheric active period

各随机模型相对高度角模型的定位精度提升比例如表 2 所示。

表 2 中,除顾及电离层延迟精度以外,考虑 SISRE 误差的随机模型定位精度并不优于仅额外考虑电离层延迟精度的随机模型。这是因为式(4)的常数项 a 抵消了部分 SISRE 误差,导致额外考虑 SISRE 的随机模型夸大了 SISRE 的误差值,使得 $\text{iono} + \text{sisre}$ 和 $\text{iono_factor} + \text{sisre}$ 模型在精度上并不优于 iono 和 iono_factor 。

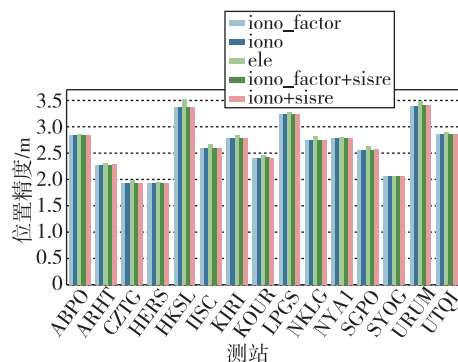
表 2 电离层活跃期顾及电离层延迟改正精度的随机模型与高度角定权随机模型对比

Tab. 2 Comparison of a stochastic model considering the accuracy of the ionospheric delay correction with elevation angle weighting stochastic model during ionospheric active period

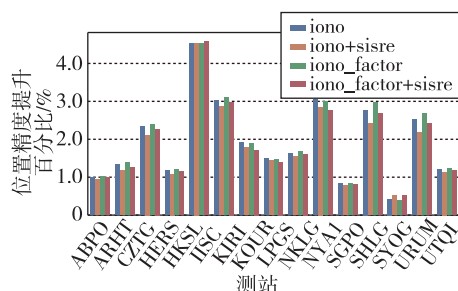
随机模型	系统	广播电离层模型	精度提升比例/%
iono	GPS	Klobuchar	6.59
		BDGIM	4.73
	BDS	Klobuchar	6.85
		BDGIM	6.63
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	6.19
		BDGIM	6.37
iono_factor	GPS	Klobuchar	7.15
		BDGIM	4.53
	BDS	Klobuchar	7.41
		BDGIM	6.38
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	6.38
		BDGIM	5.97
iono_emp	GPS	BDGIM	1.04
	BDS	BDGIM	8.13
	GPS+BDS+Galileo	BDGIM	3.82
iono+sisre	GPS	Klobuchar	6.35
		BDGIM	4.59
	BDS	Klobuchar	6.67
		BDGIM	6.59
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	6.01
		BDGIM	6.24
iono_factor+sisre	GPS	Klobuchar	7.02
		BDGIM	4.29
	BDS	Klobuchar	7.32
		BDGIM	6.13
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	6.29
		BDGIM	5.61
iono_emp+sisre	GPS	BDGIM	0.06
	BDS	BDGIM	7.14
	GPS+BDS+Galileo	BDGIM	3.82

3.3.2 电离层平静时期

在处于电离层平静期的 2020 年 11 月 1—7 日,采用 GPS 单系统定位时不同定权策略与高度角定权模型之间的对比结果如图 8 和图 9 所示。



(a) GPS 不同随机模型定位精度

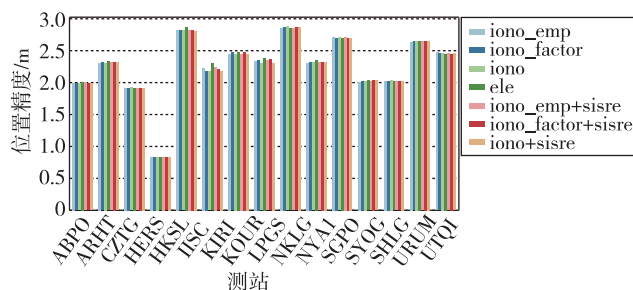


(b) GPS 不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

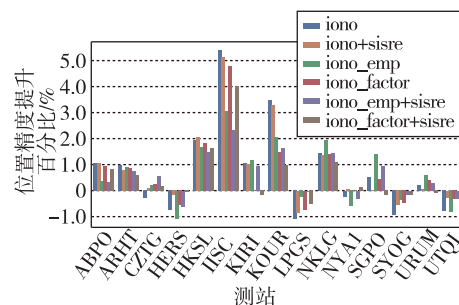
图 8 电离层平静期采用 GPS 和 Klobuchar 模型不同定权策略与高度角定权模型位置精度对比

Fig. 8 Comparison of the position accuracy of different weighting strategies using GPS and Klobuchar models with elevation angle weighting model during ionospheric quiet period

由图 8 可知,采用 Klobuchar 广播电离层模型的顾及电离层延迟的定权方案,在三维定位精度上均有一定提升,但均小于 5.0%,相较于 2023 年 3 月 23—29 日电离层磁暴期间,采用顾及电离层延迟的定权方案提升并不明显。提升最多的测站是位于中国香港的 HKSL,是精度提升唯一超过 4% 的测站。此外,除测站 SYOG 和 HKSL 以外,在顾及电离层延迟以外考虑 SISRE 精度的定权方案的定位精度提升,均小于仅采用高度角定权与电离层延迟精度组合的定权方案。



(a) GPS 不同随机模型定位精度



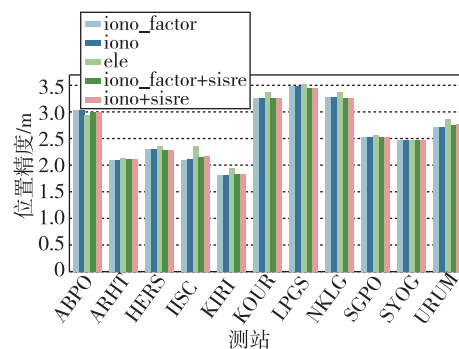
(b) GPS 不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 9 电离层平静期采用 GPS 和 BDGIM 不同定权策略与高度角定权模型位置精度对比

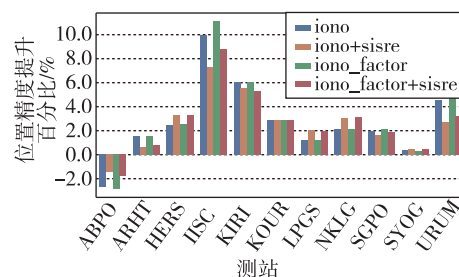
Fig. 9 Comparison of the position accuracy of GPS and BDGIM with different weighting strategies and elevation angle weighting models during ionospheric quiet period

由图 9 可知,各方案的精度提升相较于电离层活跃期并不明显,提升最多的 IISC 测站定位精度最多也仅有 5% 的提升,且 CZTG, HERS, NYA1, KIRI, LPGS, SYOG 及 UTQI 共 7 个测站的定位精度,在采用不同方案的情况下甚至出现了下降的情况。

电离层平静期采用 BDS 单系统各定权方案与高度角定权的对比如图 10 和图 11 所示。



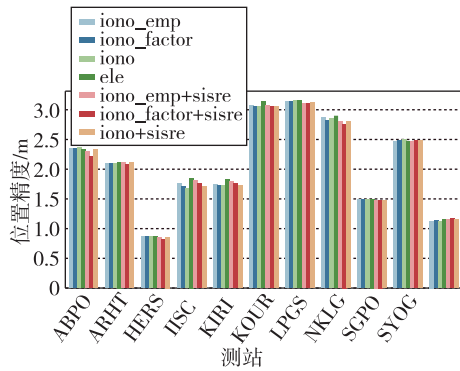
(a) BDS 不同随机模型定位精度



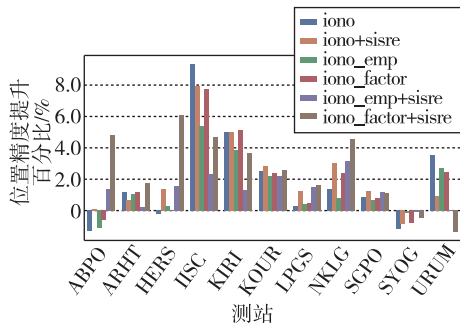
(b) BDS 不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 10 电离层平静期采用 BDS 和 Klobuchar 模型不同定权策略与高度角定权模型位置精度对比

Fig. 10 Comparison of the position accuracy of different weighting strategies using BDS and Klobuchar models with elevation angle weighting models during ionospheric active period



(a) BDS 不同随机模型定位精度



(b) BDS 不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 11 电离层平静期采用 BDS 和 BDGIM 不同定权策略与高度角定权定位精度对比

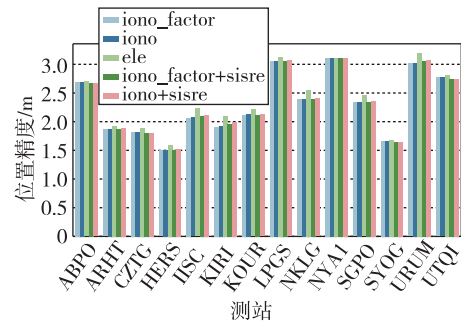
Fig. 11 Comparison of positioning accuracy with elevation angle weighting using different weighting strategies of BDS and BDGIM during ionospheric quiet period

由图 10 可知,当使用 Klobuchar 广播电离层模型时,除 ABPO 测站以外其他测站的三维定位精度均有一定提升,其中提升最多的测站是 IISC,采用 iono 和 iono_factor 方案效果较好,位置精度均提高了 10% 以上,而其他测站提升均小于 6%。在所有测站中,iono 和 iono_factor 方案在 ARHT, IISC, KIRI, SGPO 及 URUM 效果好于同时顾及 SISRUE 的方案,而 ABPO, HERS, LPGS, NKLG 及 SYOG 测站加上 SISRUE 时定位精度更高, KOUR 测站 4 种定权策略的精度提升较为接近。

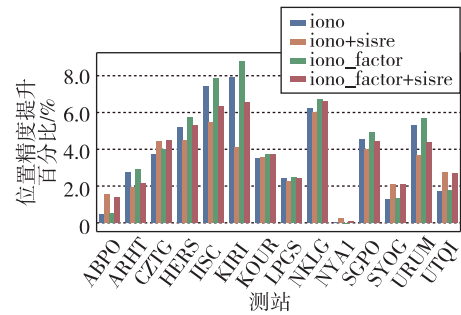
当使用 BDGIM 广播电离层模型时,整体而言,不同方案的定位精度提升不够明显,在 ABPO, SYOG, URUM 测站有部分模型的定位精度下降。IISC 和 URUM 测站使用 iono 方案的效果最好; ABPO, ARHT, HERS, LPGS 及 NKLG 使用 iono_factor+sisre 方案的精度提升最多; KIRI 测站使用

iono_factor 方案的提升最多, KOUR 使用 iono+sisre 提升最多; SYOG 测站不同方案的精度均下降。

电离层平静期采用 GPS+BDS+Galileo 三系统各随机模型相对高度角模型的位置精度对比如图 12 和图 13 所示。



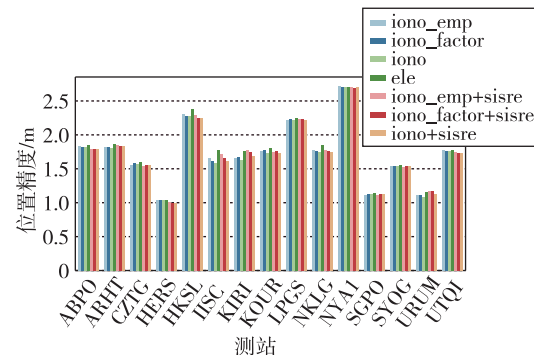
(a) 多系统不同随机模型定位精度



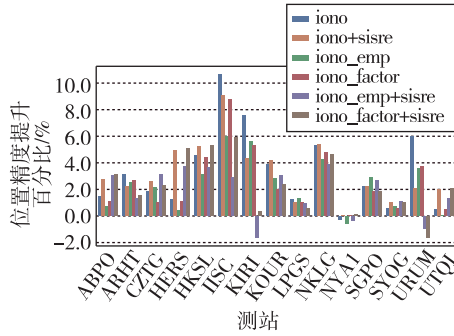
(b) 多系统不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 12 电离层平静期 GPS+BDS+Galileo 三系统采用 Klobuchar 模型和不同定权策略与高度角定权定位精度对比

Fig. 12 Comparison of positioning accuracy of GPS+BDS+Galileo system using Klobuchar model and different weighting strategies with elevation angle weighting during ionospheric quiet period



(a) 多系统不同随机模型定位精度



(b) 多系统不同随机模型相对高度角模型定位精度提升

图 13 电离层平静期 GPS+BDS+Galileo 三系统采用 BDGIM 和不同定权策略与高度角定权定位精度对比

Fig. 13 Comparison of positioning accuracy of GPS+BDS+Galileo system using BDGIM and different weighting strategies with elevation angle weighting during ionospheric quiet period

由图 12 可知,在电离层平静期使用 GPS + BDS+Galileo 三系统定位,并使用 Klobuchar 模型改正电离层延迟时,顾及电离层延迟改正精度的各随机模型的定位精度相对高度角模型仍有所提升,但是提升幅度小于电离层活跃期,定位精度提升最多的是 iono_factor 模型,为 4.02%。

由图 13 可知,KIRI,NYA1 及 URUM 测站的定位精度出现了下降的情况,同时其他测站的精度提升也不如电离层活跃期明显,不同方案在各测站的平均定位精度提升不超过 5%,因此,顾及电离层延迟改正精度的随机模型并不够适合电离层平静期。

电离层平静期顾及电离层延迟的各定权方案的定位精度提升相较于电离层活跃期并不明显,在某些情况下甚至出现了下降,所有测站的平均结果如表 3 所示。采用 BDGIM 广播电离层模型时,BDS 单系统采用 iono+sisre 方案定位精度提升最多,在所选测站中取得了 2.13%的定位精度提升,明显小于电离层活跃期同模型和效果最好的模型;GPS 单系统使用 iono+sisre 定权模型平均定位精度提升最多,为 0.87%;三系统使用 iono 模型精度提升最多,达到 3.24%。采用 Klobuchar 广播电离层模型时,4 种模型相对高度角定权模型的定位精度均有一定提升,提升最多的模型是 iono_factor,其中 BDS 单系统的平均提升达到 2.88%,GPS 单系统定位的平均提升达到 1.98%;三系统使用 iono_factor 模型效果最好,精度提升为 4.02%。

表 3 电离层平静期顾及电离层延迟改正精度的随机模型与高度角定权随机模型对比

Tab. 3 Comparison of a stochastic model considering the accuracy of the ionospheric delay correction with elevation weighted stochastic model during ionospheric active period

随机模型	系统	广播电离层模型	精度提升比例/%
iono	GPS	Klobuchar	1.95
		BDGIM	0.80
	BDS	Klobuchar	2.77
		BDGIM	1.95
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	3.75
		BDGIM	3.24
iono_factor	GPS	Klobuchar	1.98
		BDGIM	0.69
	BDS	Klobuchar	2.88
		BDGIM	1.92
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	4.02
		BDGIM	2.51
iono_emp	GPS	BDGIM	0.69
	BDS	BDGIM	1.47
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	2.34
iono+sisre	GPS	Klobuchar	1.82
		BDGIM	0.87
	BDS	Klobuchar	2.57
		BDGIM	2.13
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	3.32
		BDGIM	2.94
iono_factor+sisre	GPS	Klobuchar	1.89
		BDGIM	0.69
	BDS	Klobuchar	2.72
		BDGIM	1.92
	GPS+BDS+Galileo	Klobuchar	3.76
		BDGIM	2.51
iono_emp+sisre	GPS	BDGIM	0.62
	BDS	BDGIM	1.34
	GPS+BDS+Galileo	BDGIM	1.60

电离层平静期顾及电离层延迟精度的定权方案效果低于电离层活跃期顾及电离层延迟精度的定权方案,这是由于电离层活跃期电离层延迟增大,传统的高度角定权模型低估了不同卫星的信号在经过电离层时产生的延迟对伪距噪声的影响,因此必须添加顾及电离层延迟一项,以弥补高度角模型的低估。

4 结论

本文通过选取全球分布的 16 个 IGS 测站在电离层活跃期与电离层平静期各连续 7 天的观测数据,对比了两类共 6 种额外顾及电离层延迟改正精度的伪距单点定位随机模型在 GPS、BDS 单系统以及 GPS+BDS+Galileo 三系统下使用 BDGIM 和 Klobuchar 广播电离层模型相对同一条件下高度角定权模型的定位精度,结果表明:

1)在电离层活跃期的 2023 年 3 月 23—29 日,顾及电离层延迟改正精度的各伪距单点定位随机模型定位精度在 BDS 和 GPS 单系统或 GPS+BDS+Galileo 三系统且使用 BDGIM 和 Klobuchar 广播电离层模型时的定位精度相比高度角定权模型均有一定提升。这是由于电离层活跃期电离层延迟增大,使得电离层延迟改正精度占观测精度的比重提高,传统高度角定权不能完全反映这一情况,因此,在确定权阵时需要额外顾及电离层延迟改正的误差。

2)在电离层平静期的 2020 年 11 月 1—7 日,顾及电离层延迟改正精度的各伪距单点定位随机模型相比高度角定权模型定位精度提升并不明显,在某些测站使用不同模型定位精度反而下降。这是由于电离层平静期电离层延迟较小,高度角定权模型较好地估计了广播电离层模型改正的不确定度。

3)电离层活跃期采用 BDGIM 平均定位精度相比高度角定权提高最多的随机模型是 iono 方案,其在 GPS、BDS 以及 GPS+BDS+Galileo 的定位精度提升分别为 6.63%,4.73%和 6.37%;而采用 Klobuchar 广播电离层模型平均定位精度提高最多的是 iono_factor 方案,对 GPS、BDS 以及多系统的提升分别为 7.15%,7.41%和 6.38%。

从上述统计结果来看,顾及电离层延迟改正精度的随机模型对 GPS 效果最好,对多系统组合效果次之。采用经验公式估计电离层改正精度的随机模型在不同测站的精度差异较大,表明该经验公式不适用于顾及电离层延迟精度的单点定位随机模型,其具体原因还需要后续深入研究。

参考文献

- [1] GERDAN G P. A comparison of four methods of weighting double difference pseudorange measurements[J]. Australian Surveyor, 1995,40(4):60-66.
- [2] 杨徐,徐爱功,秦小茜,等. 高度角定权模型的

BDS/GPS 伪距单点定位分析[J]. 导航定位学报, 2017,5(2):72-78.

YANG Xu, XU Aigong, QIN Xiaoxi, et al. Analysis on BDS/GPS pseudorange point positioning with weight matrix models of elevation angles[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2017,5(2):72-78 (in Chinese).

- [3] 张玉爽,黄张裕,张文祥. 北斗伪距单点定位的随机模型影响评估[J]. 测绘工程, 2017,26(8):24-28.

ZHANG Yushuang, HUANG Zhangyu, ZHANG Wenxiang. The impact assessment of BeiDou pseudo range point positioning stochastic model[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2017,26(8):24-28(in Chinese).

- [4] 刘志强,黄张裕,金建平. 利用卫星高度角和信噪比提高 GPS 定位精度的试验分析[J]. 测绘工程, 2008,17(4):54-58.

LIU Zhiqiang, HUANG Zhangyu, JIN Jianping. An experiment study of improving GPS positioning precision by satellite elevation and SNR[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2008,17(4):54-58 (in Chinese).

- [5] 王宴会,田茂强,赵永辉. 随机模型对 BDS-3 新频率单点定位影响分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2023,46(12):59-62.

WANG Yanhui, TIAN Maoqiang, ZHAO Yonghui. Influence analysis of stochastic model on single point positioning of BDS-3 new frequency[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023,46(12):59-62 (in Chinese).

- [6] 张哲浩,潘林. 多系统融合单点定位先验和验后定权研究[J]. 全球定位系统, 2021,46(3):1-6.

ZHANG Zhehao, PAN Lin. Research on a priori and posterior weighting methods for multi-GNSS combined single point positioning[J]. GNSS World of China, 2021,46(3):1-6(in Chinese).

- [7] 刘亚,何文涛,张洁. 融合 SISRE 的卫星高度角定权模型及 PPP 应用性能分析[J]. 测绘科学技术学报, 2021,38(3):235-239.

LIU Ya, HE Wentao, ZHANG Jie. SISRE-combined satellite elevation-depending weight model and its PPP application performance analysis[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2021,38(3):235-239(in Chinese).

- [8] SUBIRANA J S, ZORNOZA J M J, HERNÁNDEZ-PAJARES M. GNSS data processing: Volumn I: fundamentals and algorithms[M]. Netherlands: ESA Communications, 2013.

- [9] 袁运斌, 李子申, 王宁波, 等. 卫星导航电离层建模与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.
YUAN Yunbin, LI Zishen, WANG Ningbo, et al. GNSS ionospheric modeling and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021 (in Chinese).
- [10] KLOBUCHAR A J. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, AES-23(3): 325-331.
- [11] 鲍任杰, 唐成盼, 胡小工, 等. 北斗广播电离层模型精度评估研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023: 1-14.
BAO Renjie, TANG Chengpan, HU Xiaogong, et al. Study on the accuracy evaluation of BeiDou broadcast ionospheric model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023: 1-14 (in Chinese).
- [12] WANG N, LI Z, YUAN Y, et al. BeiDou global ionospheric delay correction model (BDGIM): performance analysis during different levels of solar conditions[J]. GPS Solutions, 2021, 25(3): 97.
- [13] LUO P X, TAN B L. Long-term evolution of solar activity and prediction of the following solar cycles [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2024, 24(3): 196-206.
- [14] 李文龙, 李鸿雁, 郭希海, 等. 太阳黑子活动周期规律分析及趋势预测[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 53-62.
LI Wenlong, LI Hongyan, GUO Xihai, et al. Analysis and trend prediction of sunspot activity cycle [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5): 53-62 (in Chinese).
- [15] 桑文刚, 娄广振, 张兴国, 等. 地磁暴期间电离层扰动监测及 GNSS 定位性能分析[J]. 全球定位系统, 2023, 48(5): 71-78.
SANG Wengang, LOU Guangzhen, ZHANG Xingguo, et al. Ionospheric disturbance monitoring and GNSS positioning performance analysis during geomagnetic storms [J]. GNSS World of China, 2023, 48(5): 71-78 (in Chinese).
- [16] 朱永兴, 谭述森, 任夏, 等. GNSS 全球广播电离层模型精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(5): 768-775.
ZHU Yongxing, TAN Shusen, REN Xia, et al. Accuracy analysis of GNSS global broadcast ionospheric model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(5): 768-775 (in Chinese).
- [17] 谢钢. GPS 原理与接收机设计(修订版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2022.
XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2022 (in Chinese).
- [18] WANG A, ZHANG Y, CHEN J, et al. Investigating the contribution of BDS-3 observations to multi-GNSS single-frequency precise point positioning with different ionospheric models [J]. Advances in Space Research, 2024, 73(1): 553-570.
- [19] WANG A, CHEN J, ZHANG Y, et al. Performance of selected ionospheric models in multi-global navigation satellite system single-frequency positioning over China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 2070.
- [20] ZHANG Q, LIU X, LIU Z, et al. Performance evaluation of BDS-3 ionospheric delay correction models (BDSK and BDGIM): first year for full operational capability of global service[J]. Advances in Space Research, 2022, 70(3): 687-698.
- [21] 谢慧, 宋淑丽, 焦国强, 等. 北斗卫星导航系统 SISURE 初步评估[J]. 天文学报, 2019, 60(3): 96-106.
XIE Hui, SONG Shuli, JIAO Guoqiang, et al. Preliminary evaluation of SISURE of BeiDou satellite navigation system [J]. Acta Astronomica Sinica, 2019, 60(3): 96-106 (in Chinese).
- [22] MATZKA J, BRONKALLA O, TORNOW K, et al. Geomagnetic Kp index. V. 1.0 [Z]. GFZ Data Services, 2021.
- [23] WANG A, ZHANG Y, CHEN J, et al. Analysis of spatial-temporal characteristics for BDS-3 broadcast ionospheric models (BDS Klobuchar and BDGIM) in multi-GNSS real-time single-frequency precise point positioning[J]. Measurement, 2024, 224: 113958.

(编辑: 孟彬)