

地磁暴对北斗用户伪距定位的影响分析

王威^{1,2}, 刘宸¹, 王宇谱¹, 姜意¹, 许芬²

(1. 北京卫星导航中心, 北京 100094; 2. 北方工业大学, 北京 100144)

摘要: 地磁暴是近地空间经常发生的一种自然现象. 发生磁暴时, 电离层会发生明显的波动, 导致电离层模型改正精度下降, 进而影响单频用户定位解算结果. 利用哈尔滨、北京、三亚三个地区的观测结果, 计算了 2017 年 4 月地磁暴发生前后的电离层变化, 并分别解算了双频模式、单频基本导航模式和单频增强模式下的伪距定位结果, 对比了不同模式定位结果的差异. 发现在地磁暴期间, 双频定位结果最好, 单频增强模式的结果稍逊于双频结果, 两种模式一般优于单频基本导航模式.

关键词: 地磁暴; 电离层模型; 北斗卫星导航系统; 伪距定位; 广域差分服务

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2019)01-0082-07

0 引言

电离层距离地面高度为 50~1 000 km, 是地球大气层受太阳射线电离的部分, 其中含有大量的正离子和自由电子^[1]. 当卫星信号穿过电离层时, 这些粒子会影响信号的传播路径和传播速度, 进而影响用户接收机的伪距测量. 由电离层引起的误差在天顶方向可达十几米, 在高度角小于 5° 时, 误差可达 50 m^[2]. 伪距测量精度的好坏将直接影响用户定位精度的高低. 同时, 电离层的日变化遵循一定规律, 被电离的粒子数在日出后逐渐增加, 在午后到达峰值, 随后又逐渐减少, 形似余弦函数. 因此利用电离层的日变化规律, 可以通过建模来降低其对定位的影响. 另外, 电离层的变化还极易受空间环境的干扰, 因此关于电离层的研究一直十分热门, 并取得了不少成果^[1-7]. 地磁暴作为近地空间经常发生的一种自然现象, 其变化与太阳活动的强弱密切相关^[3]. 太阳活动喷发的粒子流引起太阳风与地球磁场和电离层相互作用, 从而发生地磁暴和电离层扰动. 在地磁暴发生期间, 地球周围的带电粒子数会发生明显变化, 对电离层的日变化规律也会产生显著影响. 文献^[3]研究了地磁暴对电离层变化的影响规律, 发现夏季爆发地磁暴对中高纬度地

区电离层骚扰比低纬地区剧烈. 文献^[4]利用了地球同步轨道(GEO)卫星的静地特性, 发现双频观测数据可以反映电离层的时域变化. 文献^[5]分析了太阳活动与电离层变化之间的规律. 但现有成果存在一定局限性, 一方面多从电离层电子浓度变化的角度和建模分析的角度进行研究; 另一方面, 多数研究是基于 GPS 系统的观测数据, 未直接分析电离层变化对我国北斗卫星导航系统(BDS)定位精度的影响.

BDS 将基本导航服务和增强服务进行了一体化设计. 导航电文不仅播发基本导航信息, 同时也播发广域差分改正信息, 免费向用户提供差分服务, 使得 BDS 单频用户不需要依赖于其他系统服务即可使用电离层格网改正数进行定位, 可以提高用户定位性能. 本文通过比较在地磁暴发生期间, BDS 提供的 B1B2 双频定位服务、B1 频点基本导航服务和 B1 频点增强服务的定位误差, 旨在得出一些有益结论.

1 电离层延迟改正

北斗用户进行导航定位时, 双频用户可通过双频观测量组合消除电离层延迟效应. 单频用户通过北斗系统提供的电离层改正数来扣除电离层的延

收稿日期: 2018-08-03

通信作者: 许芬 Email: xufen@ncut.edu.cn

迟.当前,北斗卫星导航系统播发的电离层改正模型有 8 参数模型(以下简称 BDS-K8)和电离层格网改正数.

1.1 双频组合消除电离层

通过两个频点的伪距观测量就可以获得相应斜路径上的总电子含量 TEC.

$$TEC = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40.28 \cdot (f_1^2 - f_2^2)} \cdot [(P_2 - P_1) - \tau_{bias12}^{sat} - \tau_{bias12}^{rcv} - M_{bias12}], \quad (1)$$

式中: f_1 、 f_2 为对应的两个频率; P_1 、 P_2 为两个频率上对应伪距; τ_{bias12}^{sat} 为卫星的硬件延迟; τ_{bias12}^{rcv} 为接收机的硬件延迟^[6].

1.2 BDS-K8

BDS-K8 是基于 GPS-K8 模型修正而来的,是北斗单频导航用户进行导航定位时使用的改正模型.与 GPS-K8 不同的是,BDS-K8 是利用中国境内连续监测站的双频观测数据来拟合地理坐标系下的 Klobuchar 模型的 8 个参数,每两个小时更新一组,并通过广播星历播发给用户使用^[4].

该模型表达式为

$$I_z(t) = \begin{cases} A_1 + A_2 \cos\left[\frac{2\pi(t - A_3)}{A_4}\right], & |t - A_3| < A_4/4, \\ A_1. & \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_z 是以 s 为单位的垂直延迟; t 为以 s 为单位的接收机至卫星连线与电离层穿刺点处的地方时; $A_1 = 5 \times 10^{-9}$ s 为夜间值的垂直延迟常数; A_2 为白天余弦曲线的幅度,由广播星历中的 α_n 系数求得,即

$$A_2 = \begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 \phi_M + \alpha_3 \phi_M^2 + \alpha_4 \phi_M^3, & \text{当 } A_2 \geq 0, \\ 0, & \text{当 } A_2 \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

式中: ϕ_M 为电离层穿刺点的地磁纬度; A_3 为初始相位,对应于余弦曲线极点的地方时,一般取 50 400 s (当地时间 14:00); A_4 为余弦曲线的周期,根据广播星历中 β_n 系数求得,即

$$A_4 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_M^n & \text{当 } A_4 \geq 72000, \\ 72000 & \text{当 } A_4 < 72000. \end{cases} \quad (4)$$

通过上述模型计算出天顶方向的电子总含量 (VTEC),然后使用投影映射函数将 VTEC 转换为

信号传输路径的电子总含量 (STEC).在求解 STEC 时,将电离层模型假定自由电子在空间上是均匀分布的,等同于所有的自由电子都集中在电离层质心高度 (BDS 取 $H=375$ km) 上的一个厚度无限小的薄层上^[6].如图 1 所示.投影映射函数可表示为

$$F(z) = \frac{1}{\cos z_{ip}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 z_{ip}}}, \quad (5)$$

$$\sin z_{ip} = \frac{r}{r + H} \sin z. \quad (6)$$

式中: Z 为接收机天顶方向和卫星视线的夹角; Z_{ip} 为穿刺点处的卫星天顶角; r 为地球的平均半径; H 为单层电离层模型的电离层薄层高度.

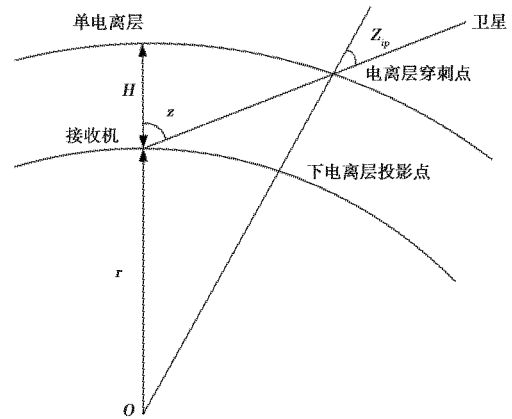


图 1 单层电离层模型

另外,由于在计算 BDS-K8 时,会利用前一天的电离层观测数据,同当天累计的数据一并进行求解,故若遇到前后两天电离层变化较大的情况时,模型改正精度会显著降低.因此,在发生地磁暴时,BDS-K8 的精度可能较差.

1.3 电离层格网改正数

电离层格网改正数覆盖范围为东经 $70^\circ \sim 145^\circ$,北纬 $7.5^\circ \sim 55^\circ$,按经度 $5^\circ \times$ 纬度 2.5° 进行划分,形成 320 个格网点 (IGP).如图 2 所示.每个格网点的电离层改正量用该点周围电离层穿刺点 (IPP) 距格网点的距离反比加权计算得到.

$$I_{IGP_i} = \sum_{j=1}^n I_{IPP_j} P_{ij} / \sum_{j=1}^n P_{ij}, \quad (7)$$

式中: I_{IPP_j} 为穿刺点处电离层延迟; I_{IGP_i} 为格网点处电离层延迟; P_{ij} 穿刺点至格网点的距离.

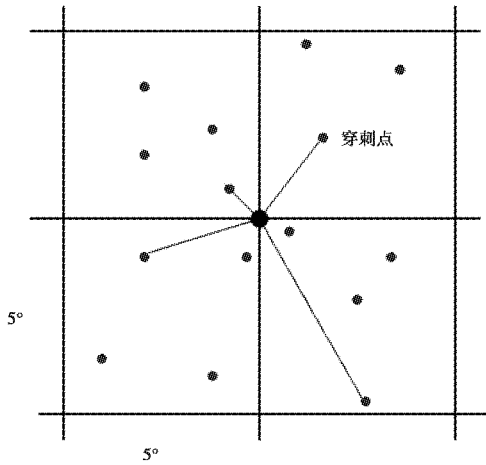


图 2 电离层格网改正原理图

在求得 IGP 处的电离层改正量后,一般使用双线性内插算法进行内插,分为时间线性内插和位置线性内插.时间线性内插是指通过相邻两个时刻的两张 VTEC/RMS 平均值地图,内插得到相邻两个时刻之间任意时刻的 VTEC/RMS 地图.时间线性内插方法的原理如下^[6]:

$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} E_i(\beta, \lambda'_i) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda'_{i+1}), \quad (8)$$

其中, $T_i \leq t < T_{i+1}$, $\lambda'_i = \lambda + (t - T_i)$, $\lambda'_{i+1} = \lambda + (t - T_{i+1})$, VTEC 地图绕 z 轴旋转 $(t - T_i)$ 角度是为了补偿其与太阳位置的强相关性, t 为相邻两个时刻之间的任意时刻, T_i 为前一张 VTEC/RMS 地图对应的时刻, T_{i+1} 为后一张 VTEC/RMS 图对应的时刻.位置线性内插是指在任意时刻的一张 VTEC/RMS 地图中,利用四个格网点的 VTEC/RMS 值采用位置内插格网区域内任意经纬度的 VTEC/RMS 值.位置线性内插示意图如图 3 所示.

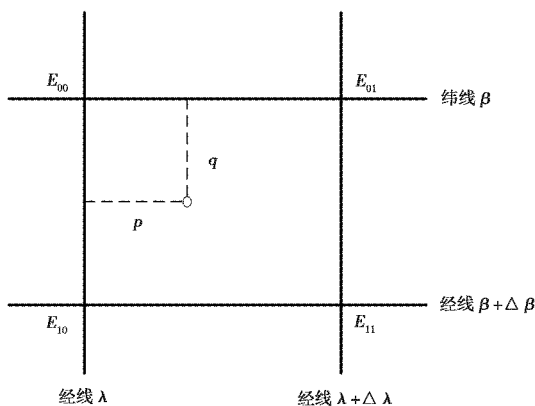


图 3 格网内插示意图

内插点所在格网的四个格网点中, $E_{0,0}$ 的经度 λ_0 最小、纬度 β_0 最大,规格化坐标为 $(0,0)$; $E_{1,1}$ 的经度最大、纬度最小,规格化坐标为 $(1,1)$; $E_{1,0}$ 、 $E_{0,1}$ 的规格化坐标为 $(1,0)$ 、 $(0,1)$.内插点距 $E_{0,0}$ 经度、纬度方向的规格化距离 p, q 分别为

$$\begin{cases} p = (\lambda - \lambda_0) / \Delta\lambda, & 0 \leq p \leq 1, \\ q = (\beta - \beta_0) / \Delta\beta, & 0 \leq q \leq 1. \end{cases} \quad (9)$$

在一张地图中,双线性内插 (β, λ) 处 VTEC/RMS 值的公式为

$$E(\beta, \lambda) = E(\beta_0 + q\Delta\beta, \lambda_0 + p\Delta\lambda) = (1 - p)(1 - q)E_{00} + q(1 - p)E_{10} + p(1 - q)E_{01} + pqE_{11}. \quad (10)$$

利用式(10)可计算式(8)中的 $E_i(\beta, \lambda'_i)$ 和 $E_{i+1}(\beta, \lambda'_{i+1})$,从而可得 $E(\beta, \lambda, t)$.格网电离层模型使用的投影函数与 BDS-K8 模型使用的投影函数相同,在此不作赘述.

2 地磁暴期间电离层延迟改正的变化分析

据空间环境预报中心网站^[8]提供的信息得知,2017年4月19日-23日发生了地磁暴.分别选取哈尔滨、北京、三亚的实际观测结果,计算不同纬度地区在地磁暴前后三天的 B1B2 双频电离层结果、BDS-K8 结果、电离层格网结果,如图 4~6 所示,可以看出,哈尔滨和北京地区电离层变化趋势相近,双频电离层结果均在 22 日出现明显异常高峰和波动,23 日有明显负暴和异常波动,24 日又出现异常高峰.地磁暴期间 8 参数模型的改正精度大幅降低,个别时段其改正精度甚至低于 40%.而电离层格网结果仍能较好地反映电离层的变化.与此同时,三亚地区双频电离层结果整体没有出现明显扰动,每日的变化幅度较小,在 23 日出现一个尖峰.但整体 BDS-K8 模型改正效果一般,在每日的峰值附近改正效果相对较差,整体改正精度大约为 60%.

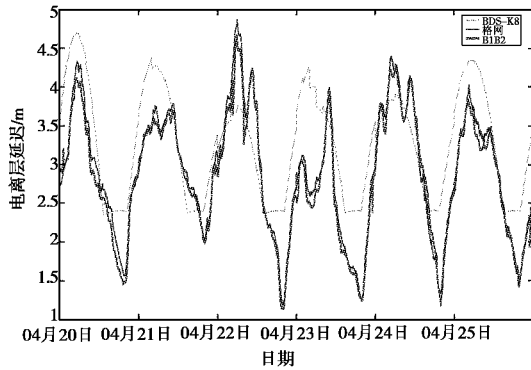


图 4 哈尔滨地区电离层延迟

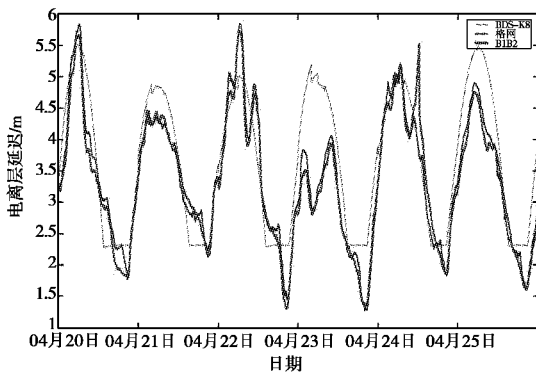


图 5 北京地区电离层延迟

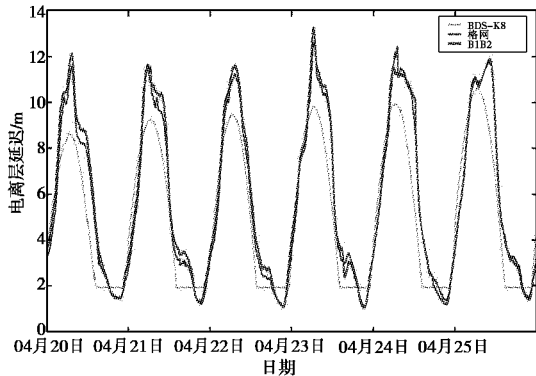


图 6 三亚地区电离层延迟

可以看出,4 月份发生地磁暴时,电离层的变化也比较有规律.中高纬度地区电离层扰动变化规律相似,且比低纬地区剧烈,伴随有负暴和持续的电离层扰动,这对 BDS-K8 模型的影响十分显著.同时,地磁暴期间中高纬地区在夜间电离层平场时模型的改正效果较差,在电离层变化峰值附近也不能准确及时地跟随电离层的变化.可见,由电离层变化引入的用户测距误差最大可达 2 m.低纬地区整体电离层变化受此次地磁暴影响较小.

3 地磁暴期间用户伪距定位结果的变化分析

对于单频基本导航定位用户来说,广播 BDS-K8 模型是消除或减弱电离层延迟的主要方法,而单频增强用户则是利用格网电离层改正数来降低电离层的影响.电离层延迟改正的精度高低将直接影响用户定位结果的好坏.从上述地磁暴期间电离层延迟改正变化分析可知,在此期间,BDS-K8 模型精度会显著下降.下面选取 4 月 20 日至 4 月 25 日(即年积日 110 至 115 日)哈尔滨、北京和三亚的一级大地点处观测得到的 B1 单频数据和 B1B2 双频数据,使用自编软件,利用一级大地点坐标作为真值,进行单站的伪距定位解算.表 1 示出了三个测站 NEU 方向上误差的 RMS 统计结果.

由表 1 结果看出,哈尔滨地区呈现双频模式、单频增强和单频基本精度相当,单频增强结果稍差的现象.查看观测数据后发现,由于哈尔滨处于我国东北角,电离层穿刺点较少,在单频增强模式定位解算时某些时段没有格网信息,导致哈尔滨的单频增强模式结果误差较大.同时哈尔滨的双频模式、单频基本、单频增强的定位误差均逊于北京、三亚的结果.

北京地区三维误差整体表现为双频结果略优于单频增强模式,单频基本结果最低.年积日 111 天、113 天和 115 天单频基本模式的结果偏差较大,与当天电离层 BDS-K8 模型改正精度不佳比较吻合.而同一天另外两个模式的定位偏差无恶化.三亚地区结果整体表现为单频增强模式稍优于双频模式,二者均明显优于单频基本结果.

通过分析各测站一天内定位误差的变化情况,可以看出各测站双频模式下定位误差整体比较稳定,而单频基本模式在电离层模型改正较差时间内的 U 方向误差较差,最大接近 10 m.进入傍晚后由于电离层模型的修改精度逐渐提升,整体的定位误差恢复到较小的水平,而单频增强模式的定位误差具有与双频定位类似的特点,整体效果接近双频模式.可见单频基本模式定位结果的好坏,和 BDS-K8 模型的改正精度有着密切的关系.下面选取年积日 111 天至 115 天北京的结果,以双频、单频增强和单频基本的顺序展示,如图 7~11 所示.

表 1 各测站定位误差

m

哈尔滨												
年积日	B1B2 双频				B1 增强				B1 基本			
	N 方向	E 方向	U 方向	三维	N 方向	E 方向	U 方向	三维	N 方向	E 方向	U 方向	三维
110	1.699	1.329	3.547	4.151	2.185	1.305	2.52	3.582	1.57	1.576	2.787	3.566
111	1.466	0.729	2.837	3.276	2.128	1.504	3.332	4.230	1.255	1.293	2.514	3.093
112	1.364	0.821	2.711	3.144	2.25	1.219	2.717	3.732	1.339	1.335	1.889	2.673
113	1.168	0.769	2.357	2.741	2.326	0.951	2.693	3.683	1.101	1.314	3.16	3.595
114	1.601	0.89	3.309	3.782	2.618	1.063	2.952	4.086	1.653	1.533	2.785	3.583
115	1.218	1.057	2.778	3.212	2.453	1.128	2.722	3.834	1.189	1.495	3.022	3.575
均值	1.419	0.933	2.923	3.381	2.327	1.195	2.823	3.849	1.351	1.424	2.693	3.332
北京												
年积日	B1B2 双频				B1 增强				B1 基本			
	N 方向	E 方向	U 方向	三维	N 方向	E 方向	U 方向	三维	N 方向	E 方向	U 方向	三维
110	1.033	0.953	2.125	2.548	1.264	0.854	2.223	2.696	1.365	1.247	2.861	3.406
111	0.99	0.586	1.999	2.306	1.141	0.686	1.876	2.300	1.136	1.188	3.557	3.918
112	1.001	0.48	1.645	1.985	1.303	0.61	1.623	2.169	1.366	1.262	3.01	3.538
113	0.948	0.505	1.332	1.711	0.942	0.656	1.651	2.011	1.091	1.095	3.668	3.980
114	0.997	0.52	1.977	2.274	1.195	0.584	1.56	2.050	1.244	1.399	3.093	3.615
115	0.684	0.661	1.473	1.753	0.832	0.452	1.393	1.684	1.08	1.483	3.572	4.016
均值	0.942	0.618	1.758	2.088	1.113	0.64	1.721	2.147	1.214	1.279	3.294	3.736
三亚												
年积日	B1B2 双频				B1 增强				B1 基本			
	N 方向	E 方向	U 方向	三维	N 方向	E 方向	U 方向	三维	N 方向	E 方向	U 方向	三维
110	0.499	0.975	2.016	2.294	0.59	0.758	2.292	2.485	1.017	0.997	2.224	2.641
111	0.569	0.716	2.07	2.263	0.451	0.55	2.157	2.271	0.726	1.463	3.197	3.590
112	0.444	0.665	1.904	2.065	0.565	0.421	1.892	2.019	0.851	1.328	2.476	2.936
113	0.542	0.551	1.436	1.631	0.577	0.411	1.65	1.796	0.838	1.079	2.839	3.151
114	0.756	0.628	1.77	2.025	1.969	0.559	0.601	2.133	0.95	1.34	2.789	3.237
115	0.627	0.783	1.58	1.872	0.458	0.564	1.163	1.371	1.288	1.149	1.943	2.599
均值	0.573	0.72	1.796	2.018	0.76	0.544	1.626	1.875	0.945	1.226	2.578	3.007

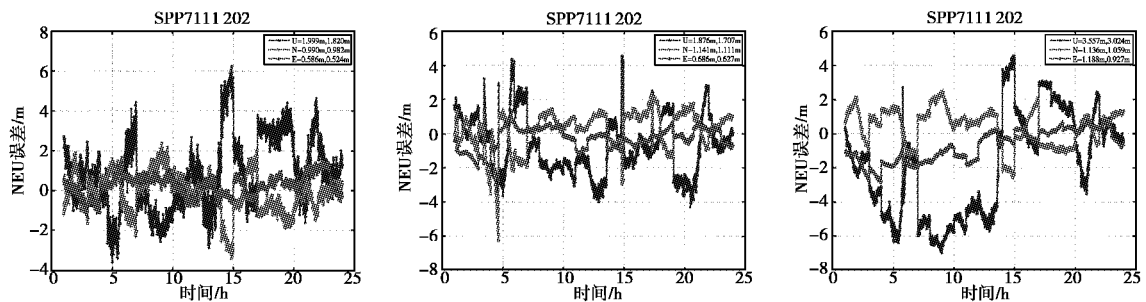


图 7 年积日 111 天各模式伪距定位结果

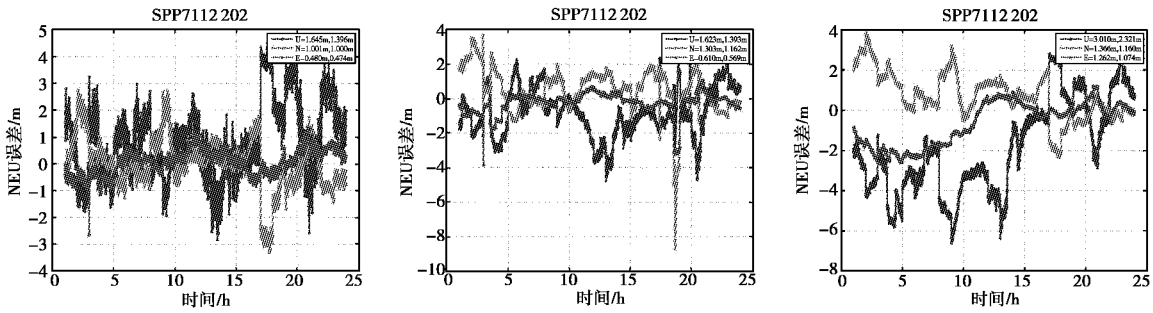


图 8 年积日 112 天各模式伪距定位结果

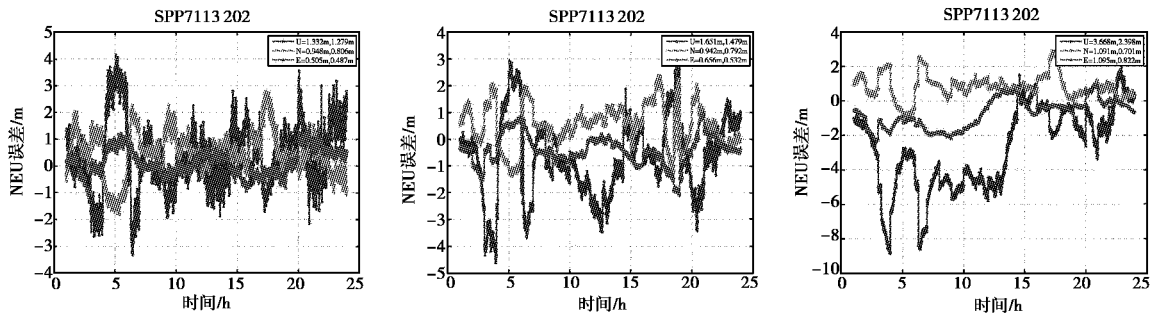


图 9 年积日 113 天各模式伪距定位结果

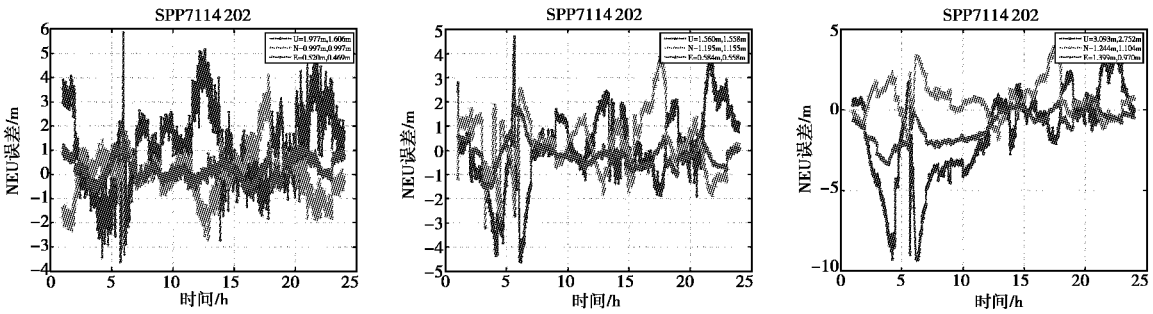


图 10 年积日 114 天各模式伪距定位结果

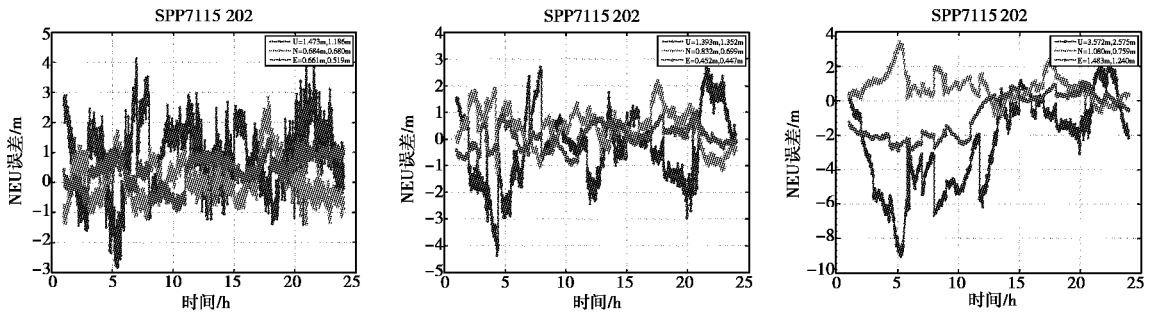


图 11 年积日 115 天各模式伪距定位结果

从理论上讲,双频模式可以最大限度地消除电离层延迟带来的定位偏差.从实际定位结果也可看出,双频模式在发生地磁暴的前后几天内,定位结果比较稳定,对比单频结果优势明显.单频基本导

航模式使用广播星历的 BDS-K8 模型进行电离层延迟的改正.在发生地磁暴现象时,BDS-K8 改正精度下降,使得单频基本导航模式结果 U 方向误差较差,短时间内最大可接近 10 m,严重影响了用

户定位的精度. 而北京和三亚的单频增强模式结果整体比较稳定, 定位精度接近双频结果, 在地磁暴期间无明显恶化.

4 结束语

在发生地磁暴现象时, 电离层会发生明显的异常高峰和波动, 导致 BDS-K8 模型精度显著下降, 影响单频基本导航用户的定位结果. 若在此期间, 中低纬度地区用户使用双频模式进行定位或使用单频增强服务, 将可以有效地减小由电离层扰动带来的影响.

参考文献

- [1] 张瑞. 多模 GNSS 实时电离层精化建模及其应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [2] 程娜, 贾小林. 基于改进 CODE 模型的北斗广播电离层模型精度评估[C]//第五届中国卫星导航学术年会, 2014.
- [3] 黄庆铭. 地磁暴与电离层骚扰的关系[J]. 地球物理学报, 1988, 31(4): 471-477.
- [4] 吴晓莉, 韩春好, 平劲松. GEO 卫星区域电离层监测分析[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 13-18.
- [5] 任刚. 太阳活动对区域电离层的影响分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [6] 刘宸. GNSS 导航电离层模型精化研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017.
- [7] 徐彤. 中低纬电离层模型及其异常现象相关研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [8] 空间环境预报中心网站. 空间环境概述[EB/OL] [2018-07-09]. <http://www.sepc.ac.cn/?p=7401>.

作者简介

王威 (1991—), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 研究方向为卫星导航数据处理.

刘宸 (1991—), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向为电离层模型精化.

王宇谱 (1989—), 男, 工程师, 博士, 研究方向为卫星钟差建模与预报.

许芬 (1970—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为数字信号处理.

Analysis on the influence of geomagnetic storm of BDS pseudorange positioning

WANG Wei^{1,2}, LIU Chen¹, WANG Yupu¹, JIANG Yi¹, XU Fen²

(1. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;

2. North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Geomagnetic storms are a natural phenomenon that often occurs in the near-earth space. When a magnetic storm happens, the ionosphere fluctuates significantly, which leads to the reduction of the accuracy of ionosphere correction model and then affects the positioning result of single-frequency user. By using three stations' observations of Harbin, Beijing and Sanya, we calculate the changes of ionosphere before and after a geomagnetic storm which occurs in April 2017, and then calculate the SPP results of dual-frequency mode, single-frequency basic navigation mode and single-frequency enhancement mode respectively. Comparing the results between different modes, and the results show that, during geomagnetic storms, the results of dual-frequency positioning are the best, and the results of single-frequency enhancement mode are slightly better than that of dual-frequency mode, and the two modes are generally superior to the basic single-frequency navigation mode.

Keywords: geomagnetic storm; ionosphere model; BDS; SPP; wide area differential service