北斗卫星导航系统数据分析与应用专题·论文

太阳风暴期间的北斗电离层建模优化

董恩强^{①②*}, 常志巧^①, 李晓杰^①, 谭红力^①, 樊家琛^{①③}, 吴晓莉^①

① 北京卫星导航中心, 北京 100094;

② 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030;

③ 北京大学计算机学院, 北京 100871

*联系人, E-mail: paradise4me@163.com

收稿日期: 2015-03-30; 接受日期: 2015-04-21; 网络出版日期: 2015-05-29

上海市空间导航与定位技术重点实验室开放基金资助项目(编号: 14DZ2276100)

摘要 北斗卫星导航系统发播地理坐标系下 8 参数 Klobuchar 电离层模型提供给单频用户使用, 且采用实时观测数据每 2 h 更新一次模型参数. 太阳风暴会造成电离层严重扰动, 可能对电离层模型预报精度带来严重影响. 本文针对北斗系统电离层模型参数特点, 在分析相邻两天周期项参数对改正精度影响的基础上, 设计了基于历史周期项参数的模型解算方法, 首先利用前一天 24 h 观测数据解算的余弦周期项参数作为当天模型周期项参数, 然后利用当天累积数据, 采用最小二乘方法解算余弦幅值项参数. 该方法固定对电离层模型精度影响较小的周期项参数, 实现利用较短时段太阳风暴期间电离层穿刺点观测数据拟合电离层模型振幅参数, 从而达到太阳风暴期间电离层模型改正精度显著提升. 采用北斗实测电离层数据, 分析比较北斗发播模型结果和基于历史周期项参数模型结果的预报精度, 结果表明: 太阳风暴期间, 北斗系统发播模型结果因受前一天观测数据影响, 预报精度大幅降低, 电离层负暴期间中国区域平均预报精度比常态降低达 40%, 而基于历史周期项参数的模型结果在太阳风暴期间的预报精度均与平静期间精度相当, 平均预报精度优于 70%.

关键词 北斗系统, 太阳风暴, 电离层, 柯氏模型

PACS: 94.20.CF, 94.20.Vv, 91.10.Fc, 02.30.-f, 93.85.Bc

doi: 10.1360/SSPMA2015-00120

1 引言

电离层延迟是卫星导航定位中的重要误差源, 从天顶方向到水平方向, 电离层延迟引起的测距误差可以从 5–150 m^[1,2]. 因为电离层延迟量是电波频率的函数, 所以双频导航用户可以通过双频改正的

方法消除电离层延迟误差, 而单频导航用户一般采用系统发播的电离层延迟模型参数来进行修正. 2012 年 12 月 27 日, 中国卫星导航系统管理办公室公布了北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件, 单频导航用户从卫星导航电文中获取电离层延迟模型 8 参数, 采用 Klobuchar 模型公式计算电离层延迟修正量^[3].

引用格式: 董恩强, 常志巧, 李晓杰, 等. 太阳风暴期间的北斗电离层建模优化. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 079504

Dong E Q, Chang Z Q, Li X J, et al. Improvement of BDS ionospheric model during solar storms (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 079504, doi: 10.1360/SSPMA2015-00120

GPS 系统导航电文中电离层模型参数是地面控制系统根据该天为一年中的第几天(将一年分为 37 个区间)以及前 5 d 太阳的平均流量(共分为 10 档), 从 370 组常数中选取^[4]. 不同于 GPS, 北斗系统导航电文中的电离层模型参数是采用区域监测网的实时双频测距数据解算得到, 且每 2 h 更新一次.

太阳风暴是由于太阳剧烈活动而引发的一种常见的灾害性空间天气. 太阳风暴发生期间, 太阳释放出大量带电粒子所形成的高速粒子流以及等离子体流, 对地球磁层、电离层以及中性大气的状态造成影响^[5-7]. 严重的电离层扰动会降低单频导航用户和授时用户的服务精度^[8].

本文针对北斗系统电离层模型参数特点, 在分析相邻两天周期项参数对改正精度影响的基础上, 针对北斗系统每 2 h 更新一次电离层模型参数的特点, 设计了基于历史周期项参数的电离层模型解算策略, 比较分析该策略结果与北斗系统发播的模型结果在太阳风暴期间的电离层预报精度.

2 太阳风暴对电离层模型改正精度影响

受 2012 年 7 月 12 日日冕物质抛射影响, 7 月 14 日至 7 月 16 日共有 12 h 达到中等磁暴水平($K_p=6$), 21 h 达到小磁暴水平($K_p=5$), 3 d 的地磁 A_p 指数分别达到 30, 60 和 31^[9]. 这次地磁暴持续时间很长, 因此, 将这次以地磁暴为特征的太阳风暴作为典型事件进行分析.

选择北京、海南、福建和哈尔滨 4 个地区, 北京和哈尔滨代表我国的中高纬度地区, 福建和海南代表中低纬度地区, 分析各地区 7 月 13 日至 17 日(doy=195–199)北斗系统监测的电离层垂直电子浓度变化如图 1 所示.

分析结果表明, 7 月 15 日(doy=197)电离层电子浓度均有较明显升高, 而在 7 月 16 日(doy=198)普遍降低到约 20 tecu (1 tecu= 10^{16} 个电子)的水平. 原因是 7 月 15 日的地磁暴初相和主相期间均为正暴, 体现当天电离层 VTEC 峰值相位后延, 中高纬度地区电离层 VTEC 峰值增加明显; 在磁暴恢复期体现为持续 31 h 的负暴, 中国区域的电离层电子浓度普遍降低, 降幅约为平时的 40%–60%.

采用北斗卫星导航系统发播的电离层模型 8 参数计算结果和北京站对 GEO-1 卫星观测的垂直电离

层延迟进行比对, 如图 2 所示.

图 2 表明, 2012 年年积日 197 日至 199 日, 北斗系统电离层模型计算结果没有随着当日电离层电子浓度变化, 而是保持了与前一日电离层电子浓度相近的水平. 但 199 日模型计算结果又明显大于 198 日的电离层电子浓度, 同时小于当日电离层电子浓度. 由此估计, 北斗导航系统解算电离层模型参数时, 采用了前一日 24 h 观测数据和当日累计观测数据, 并进行了加权或等权累加, 每 2 h 更新一次.

北斗导航系统发播的电离层模型参数在空间天气平静期间, 能较好地反映电离层电子浓度的时空变化, 但是在电离层大范围剧烈扰动时, 改正精度会大幅下降. 如何改善电离层模型参数解算策略, 以适

图 1 (网络版彩图)太阳风暴对中国区域电离层电子浓度影响

Figure 1 (Color online) VTEC of China area during solar storms.

图 2 (网络版彩图)北京站 VTEC 与北斗模型结果比较

Figure 2 (Color online) BDS ionospheric model results vs. VTEC of Beijing.

应太阳风暴期间的电离层电子浓度变化,将在以下各节进行论述.

3 余弦周期项参数的影响

北斗系统采用的地理坐标系下的 Klobuchar 电离层改正模型有 8 个参数,分别是余弦曲线的幅值项参数 $\alpha_n(n=0,1,2,3)$ 和余弦曲线的周期项参数 $\beta_n(n=0,1,2,3)$, 用户利用 8 参数和模型公式可计算 B1I 信号的电离层垂直延迟改正量^[10]. 其中, α_n 是余弦曲线的幅值项参数,决定了电离层模型白天峰值时刻的大小,是模型绝对改正精度的主要影响因素; β_n 是余弦曲线的周期项参数,决定了电离层模型白天余弦时段的起止时刻,是模型绝对改正精度的次要影响因素.

太阳风暴期间,电离层严重扰动主要影响的是白天电离层电子密度的绝对大小和时空分布的不均匀性. 分析 2012 年第 195–199 日北斗导航系统发播的电离层模型参数在北纬 20°, 30°, 40° 的余弦周期和 1/4 周期大小, 结果如表 1 所示.

表 1 结果表明, 相邻两天模型余弦周期在北纬 20° 最大相差约为 5 h, 而在北纬 40° 则相差很小. 体现在白天时段的起止时刻, 则是相邻两天 1/4 余弦周期的差值, 最大为北纬 20° 年积日 195 和 196 d 相差 1.4 h.

为分析白天时段余弦起止时刻对模型改正精度的影响, 以海南和北京两地的电离层电子浓度与当日北斗系统的电离层模型结果为例, 分别使用当天 24 h 和前一天 24 h VTEC 数据解算出两组模型参数结果, Model-1 采用当天模型参数结果的余弦幅值项 $\alpha_n(n=0,1,2,3)$ 和前一天结果中的余弦周期项 $\beta_n(n=0,1,2,3)$ 组成一组 8 参数, Model-2 采用当天的参数结果. 分析 3 月 5 日至 3 月 7 日、7 月 14 日至 7 月 17 日共 7 d 的实验结果如表 2 所示, 7 月 14 日(doy=196)

表 1 余弦周期大小比较

Table 1 Comparison of cosine periodic size

doy	余弦周期(h)			1/4 余弦周期(h)		
	N20°	N30°	N40°	N20°	N30°	N40°
195	37.1	41.0	43.7	9.3	10.2	10.9
196	31.8	36.4	43.4	7.9	9.1	10.9
197	32.4	36.6	42.0	8.1	9.2	10.5
198	37.1	41.0	43.7	9.3	10.2	10.9
199	33.2	37.4	43.1	8.3	9.3	10.8

表 2 海南和北京电离层模型改正 RMS(tecu), 2012

Table 2 Model correction RMS (tecu) of Hainan and Beijing, 2012

日期	海南		北京	
	Model-1	Model-2	Model-1	Model-2
3 月 5 日	11.65	11.68	4.16	3.99
3 月 6 日	14.69	14.70	5.56	5.56
3 月 7 日	9.69	9.98	5.07	4.80
7 月 14 日	13.19	11.91	4.14	4.07
7 月 15 日	15.02	14.81	6.15	6.24
7 月 16 日	8.37	9.18	7.37	7.70
7 月 17 日	11.28	13.04	2.50	2.64

比较如图 3 所示.

分析结果表明, 在余弦幅值相同的前提下, 分别采用相邻两天的余弦幅值项结果, 3 月 5 日至 3 月 7 日两种模型改正误差 RMS 在以海南为代表的低纬度地区 and 以北京为代表的中纬度地区基本没有差别; 7 月 14 日至 7 月 17 日期间发生了强地磁暴, 两种模型改正误差 RMS 在低纬度地区最大相差也只有 1.7 tecu, 而中纬度地区相差很小.

4 电离层模型解算改进方法

对于北斗系统采用的 8 参数 Klobuchar 电离层延迟模型, 在分析相邻两天模型余弦周期项参数对改正精度影响的基础上, 设计基于历史周期项参数

图 3 (网络版彩图)海南和北京模型结果与原始 VTEC 比较 (a) 海南模型结果与原始 VTEC 比较; (b) 北京模型结果与原始 VTEC 比较

Figure 3 (Color online) Model results vs. original VTEC. (a) Model results vs. original VTEC of Hainan; (b) model results vs. original VTEC of Beijing.

的模型解算方法如下:

(1) 使用前一天 24 h 电离层观测数据, 对观测区域 VTEC 按等间隔纬度(1°)进行压缩, 获得多个纬度带的压缩 VTEC;

(2) 对同一纬度 VTEC 周日变化时间序列, 采用相关算法解算余弦幅值项和周期项两个特征参数;

(3) 分别对余弦幅值项纬度序列和周期项纬度序列采用最小二乘方法解算一组 8 参数^[2,10], 记为 $P_0(\alpha, \beta)$;

(4) 因北斗系统电离层模型发播更新周期为 2 h, 本文设置偶数小时之前 20 min 为模型参数解算时刻. 使用当天零点至解算时刻累积的电离层观测数据, 将余弦周期项参数固定为 P_0 中的 β_{0n} ($n=0,1,2,3$), 则观测方程为

$$L(t) = \sum_{i=0}^3 C_i(t) \alpha_i, \quad (1)$$

式中,

$$L(t) = I_z(t) - 5, \quad (2)$$

$$C_i(t) = \cos \left[\frac{2\pi(t-50400)}{A_4} \right] \cdot \phi_M^i, \quad (3)$$

其中, t 为穿刺点处的地方时, $I_z(t)$ 是穿刺点处垂直电离层延迟观测量, A_4 是穿刺点处的模型余弦周期, 具体为

$$A_4 = \begin{cases} 172800, & A_4 \geq 172800, \\ \sum_{n=0}^3 \beta_{0n} |\phi_M|^n, & 172800 > A_4 \geq 72000, \\ 72000, & A_4 < 72000, \end{cases} \quad (4)$$

ϕ_M 是电离层穿刺点的地理纬度, 单位为半周(π)^[3].

式(5)采用最小二乘方法解算上述观测方程, 求解出 α_n ($n=0,1,2,3$), 由 α_n 和 β_{0n} 组成完整的电离层模型 8 参数结果.

5 电离层模型改正精度分析

5.1 太阳活动统计

2009 年 9 月开始为太阳活动的第 24 周, 与第 23 周相比, 第 24 个太阳活动周的特点表现在: 一是开始晚, 2010 年下半年才有连续的黑子记录, 此前多次出现黑子数为零的情况; 二是上升比较慢, 2011 年 2 月 15 日 X 级耀斑标志着太阳活动进入快速上升期.

2011 年 2 月 15 日到 2012 年底, 已发生多次太阳风暴事件, 表现为太阳耀斑和日冕物质抛射 CME, 有些太阳风暴引发了太阳质子事件和地磁暴^[9].

统计 2012 年中国空间环境预报中心发布的空间环境月报数据^[9], 太阳风暴比较集中的月份是 2012 年 1, 3 和 7 月, 如表 3 所示.

本节首先分析 2012 年 7 月典型太阳风暴期间的模型预报精度, 然后对上述 3 个时间段的模型预报精度进行统计, 最后采用未参加模型解算的单站数据对模型预报精度进行检验.

5.2 模型预报精度分析与统计

采用基于历史周期项参数的电离层模型解算方法, 以 2 h 为解算周期, 与北斗系统的播发频度一致. 利用北斗系统电离层观测数据, 解算 2012 年 7 月 14 日至 7 月 17 日 4 d 的北斗系统电离层模型参数, 与北斗系统发播的电离层模型参数进行预报精度比较.

7 月 15 日发生了地磁正暴, 7 月 16 日发生了地磁负暴, 7 月 17 日逐渐恢复平静. 图 4 给出连续 3 d 所有 VTEC 观测量随地方时的变化分布与两种模型预报结果的比较.

从图 4 可以看出, 北斗系统发播的模型结果由于采用前一天 24 h 观测数据和当天的累积数据, 模型预报改正效果受前一天电离层电子浓度大小影响明显, 7 月 16 日(doy=198)发生地磁负暴, 所有观测区域电子浓度较前日大幅降低, 由于受 7 月 15 日较高电子浓度的观测数据影响, 模型计算结果明显偏大; 7 月 17 日(doy=199)电子浓度逐渐恢复正常, 但由于受 7 月 16 日较低电子浓度的观测数据影响, 模型计算结果又明显偏小.

基于历史周期项参数的模型预报结果, 由于采用了前一日余弦周期项参数, 而余弦幅值项参数仅采用当天的累积观测数据解算, 受前一日电离层浓度影响很小, 较好地反映了区域电离层电子浓度变化, 在电离层暴期间预报精度没有下降.

对表 3 中 3 个时间段各选取 3 d, 采用北斗导航

表 3 2012 年太阳活动统计

Table 3 Statistics of solar activity, 2012

序号	时间段	代表事件
1	2012.01.19–01.28	太阳质子事件
2	2012.03.03–03.10	X 级耀斑
3	2012.07.11–07.18	地磁暴

图 4 (网络版彩图)观测区域原始 VTEC 与两种模型结果比较。(a)按地方时压缩后的原始 VTEC 结果; (b)由北斗系统发播的模型参数计算的 VTEC 结果; (c)由基于历史周期项参数的模型参数计算的 VTEC 结果

Figure 4 (Color online) VTEC comparison of BDS observation, BDS model and model based on history cycle parameters, doy=197–199, 2012. (a) VTEC of BDS observation; (b) VTEC of BDS model; (c) VTEC of model based on history cycle parameters.

系统的电离层双频实测 VTEC 数据对模型预报精度进行验证, 统计预报误差 RMS、平均改正百分比, 结果如表 4 所示。

结果表明, 北斗系统发播的模型预报结果受电离层扰动影响明显, 特别是在 2012 年 7 月 16 日电离层负暴期间, 平均改正百分比下降到 40% 水平, 预报误差 RMS 达 14 tecu, 电离层负暴恢复期间的平均预报精度相比平时也略有降低, 预报误差 RMS 大于 10 tecu。而基于历史周期项参数模型预报结果的平均改正百分比变化不大, 均优于 70%, 预报误差 RMS 的

表 4 北斗实测数据验证电离层模型预报精度

Table 4 Model correction accuracy comparison between BDS model and model based on history cycle parameters

日期	平均改正精度百分比		RMS(tecu)	
	北斗(%)	本文	北斗	本文
2012.01.20	74.78	76.82	6.12	6.04
2012.01.21	70.67	74.78	6.98	6.59
2012.01.22	68.50	71.53	6.42	6.29
2012.03.06	69.72	71.77	9.77	9.64
2012.03.07	75.26	76.47	11.79	11.12
2012.03.08	64.54	71.70	12.14	11.46
2012.07.15	72.69	72.53	9.58	9.67
2012.07.16	40.82	76.02	14.39	4.54
2012.07.17	70.35	76.36	11.42	7.33

大小与当日电离层电子浓度以及电离层扰动程度相关。

5.3 单站观测数据检验

采用未参加模型解算的北京监测站对 GEO-1 卫星的电离层观测数据分别与北斗系统发播结果和基于历史周期项模型结果进行比较, 结果如图 5 所示。蓝色曲线为北斗系统发播参数预报结果, 绿色曲线为基于历史周期项参数预报结果。

单站观测数据检核结果表明, 太阳风暴期间, 基于历史周期项参数的模型预报精度优于北斗发播的模型改正精度。但是 197 日的最后两个解算周期和 198 日的第一个解算周期模型改正效果较差。原因是从北斗时 197 日 16 点至 198 日 2 点, 电离层模型参数均由北斗时当日 0 点开始累积的数据解算, 而这段时间已经是北京站对 GEO1 电离层穿刺点(E119°)地方时的第二日, 电离层电子浓度已经开始降低。北斗导航系统的观测区域在经度上跨度较大(E75°–E135°), 可以考虑以北京地区的地方时 0 点作为参数解算参考时刻, 尽可能减少太阳风暴期间因地方时差异引起的模型改正精度下降。

5.4 建模方法工程应用建议

太阳风暴对电离层的影响具有复杂多变的特性, 其成因、影响的时间空间以及影响的强度, 在现阶段难有可靠手段进行准确预报。而电离层大范围的剧

图 5 (网络版彩图)北京单站 VTEC 与两种模型预报结果比较

Figure 5 (Color online) VTEC comparison of Beijing station observation, BDS model, GIM and model based on history cycle parameters.

烈扰动对导航系统带来的影响,又不能忽视.对于北斗系统,在工程实践中,可以采用软双工的方式,即常规方法和基于历史周期项参数的方法同时解算,在模型参数改正精度评估环节,设置优选策略.例如,若两者改正精度均优于 70%,则输出常规方法结果;若北斗常规方法改正精度低于 70%,且基于历史周期项参数方法的改正精度优于 70%,则输出后者;若其中一种方法的改正精度远远优于另一种,则择优输出.

6 结论

北斗卫星导航系统采用了地理坐标系下 8 参数

Klobuchar 电离层模型,在余弦幅值参数相同的前提下,相邻两天的余弦周期项参数 β 对模型改正精度影响可以忽略.文中提出了基于历史周期项参数的电离层模型优化方法,固定对电离层模型精度影响较小的周期项参数,实现利用较短时段太阳风暴期间电离层穿刺点观测数据拟合电离层模型振幅参数,从而使太阳风暴期间电离层模型改正精度显著提升.太阳风暴期间,地方时跨天时段模型改正精度问题还有待解决.

基于历史周期项参数的电离层模型解算策略保持了与北斗系统一致的模型参数更新频度,在太阳风暴期间,可以有效改善北斗电离层模型参数的预报精度.

参考文献

- 1 Zhou Z M, Yi J J. Theory and Application of GPS Satellite Measurement (in Chinese). Beijing: Mapping Express, 1997 [周忠谟, 易杰军. GPS 卫星测量原理与应用. 北京: 测绘出版社, 1997]
- 2 Dong E Q. Application of Curve Surface Fitting in Regional Ionospheric Delay Model with Sparse Station Distribution. CSNC2013 [董恩强. 曲面拟合在稀疏布站条件下区域电离层模型中的应用. 2013 年第四届中国卫星导航年会论文]
- 3 China satellite navigation office. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 1.0). 2012.12 [中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B1I (1.0 版). 2012.12]
- 4 Li Z H, Huang J S. GPS Surveying and Data Processing (in Chinese). Beijing: Wuhan University Press, 2005 [李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理. 武汉: 武汉大学出版社, 2005]
- 5 解妍琼. 太阳风暴的综合研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2007
- 6 Liu L B, Wan W X, Chen Y D, et al. Relationship of ionosphere and sun activity (in Chinese). Chin Sci Bull, 2011, 56: 477–487 [刘立波, 万卫星, 陈一定, 等. 电离层与太阳活动性关系. 科学通报, 2011, 56: 477–487]
- 7 总装备部电子信息基础部. 太阳风暴揭秘. 北京: 国防工业出版社, 2011
- 8 Chen L C, Hu C B, Xie T F, et al. Effect of satellite navigation system on the solar storm (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2011, 41: 556–563 [陈刘成, 胡彩波, 谢廷峰, 等. 太阳风暴对卫星导航系统的影响分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 556–563]
- 9 Environment of Low Orbit Satellite. Space Environment Monthly Report (in Chinese). 2012.07 [低轨道卫星环境. 空间环境月报. 2012.07]
- 10 章红平. 基于地基 GPS 的中国区域电离层监测与延迟改正研究. 博士学位论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2006

Improvement of BDS ionospheric model during solar storms

DONG EnQiang^{1,2*}, CHANG ZhiQiao¹, LI XiaoJie¹, TAN HongLi¹,
FAN JiaChen^{1,3} & WU XiaoLi¹

¹ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;

² Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Technology, Shanghai 200030, China;

³ School of Mathematical Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

BDS adopts Klobuchar model with 8 parameters in a geography reference frame to correct the single-frequency user's ionospheric delay, refreshed by using real-time monitoring observation every 2 h. Solar storm may cause serious ionosphere agitation, and it may degrade the model prediction accuracy. Considering the characteristic of BDS model parameters, this paper makes analysis on the model correction accuracy influence by the period items (beta), and designs a new calculating strategy to make resolution to the ionospheric model parameters based on the history circle parameters. Firstly, the 8 model parameters are consolidated solved by using 24 h observation of the day before. Secondly, the cosine circle items (beta) are fixed to the value calculated before, and the amplitude items (alpha) are calculated by using cumulate data of that day with least-squares method. The ionospheric model prediction accuracy of BDS broadcasting parameters and new strategy is evaluated during solar storm, compared with both BDS observation and GIM from IGS. The analysis results indicate that, during solar storms, the model forecast accuracy of BDS is largely decreased by the influence of yesterday data. The average prediction percentage in China region reduces 40% during the ionospheric negative storm. The model prediction accuracy of new strategy is preserved both during the ionospheric positive and negative storm, and the average correction percentage is prior to 70%.

BDS, solar storm, ionosphere, Klobuchar

PACS: 94.20.CF, 94.20.Vv, 91.10.Fc, 02.30.-f, 93.85.Bc

doi: 10.1360/SSPMA2015-00120