



北斗卫星导航系统数据分析与应用专题·论文

基于 BDS/GPS 双系统的全球电离层建模

薛军琛*, 宋淑丽, 朱文耀

中国科学院上海天文台, 上海 200030

*联系人, E-mail: jcxue@shao.ac.cn

收稿日期: 2015-03-30; 接受日期: 2015-04-23; 网络出版日期: 2015-05-29

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10603011, 11273048)

摘要 借助当前比较完善的 GPS 系统, 建立基于 BDS/GPS 双系统的全球电离层模型, 是克服 BDS 单系统建模弊端, 提高全球电离层模型和硬件延迟(DCB)监测精度的一种有效途径. 本文分析了基于 BDS/GPS 双系统的电离层模型所能达到的精度, 以及 GPS 观测对 DCB 监测的辅助作用. 文中选用了太阳活动峰年 2013 年 2 月 11 日–2014 年 1 月 13 日 336 天的 BDS/GPS 双系统观测资料, 利用 15×15 阶球谐函数模型建立了全球电离层模型(GIM/SHA), 并利用 IGS 最终电离层产品(GIM/IGS)、双频实测 VTEC 和海洋测高数据对该双系统模型的电离层产品进行了全面的精度评估. 结果表明: (1) 通过与三种基准数据比对, GIM/SHA 的外符合精度在 3–6 tecu 范围内, 且系统性偏差较小; (2) GPS 卫星 P1P2 频点 DCB 与 IGS 最终产品结果比较 BIAS 在 0.1 ns 内, RMS 最大不超过 0.2 ns; (3) 通过比较 BDS 单系统与双系统生成的卫星和接收机 B1B2 频点 DCB 发现, 两种方法解算的 DCB 均值差别为 0.01–0.227 ns, 双系统解算 BDS 卫星 DCB 稳定性稍优于单系统结果, 但是 GPS 观测资料的加入能够明显地提高接收机 DCB 的稳定性; 从 14 颗 BDS 在轨卫星 B1B2 频点 DCB 长期稳定性统计可见, 各卫星 DCB 长期稳定性为 0.2–0.3 ns, 其中 GEO 卫星稳定性水平稍差.

关键词 全球电离层模型, GPS, BDS, IGS, 垂直电子总含量, 硬件延迟

PACS: 91.10.Fc, 91.10.Pp, 91.10.pa, 94.20.Cf

doi: 10.1360/SSPMA2015-00130

1 引言

电离层作为地球空间大气的重要组成部分, 其对电磁波传播的影响效应不可忽略. 这种效应主要表现为使电磁波发生折射、色散和延迟, 具体对相位和伪码测距信号分别表现为相位超前和群时延. 电离层总电子含量(TEC)对于确定电离层效应有重要意

义, 并能够用来估计电离层关键频率. 空间测地技术的发展为测定 TEC 提供了新的技术手段, 它能够提供高精度、高分辨率、全球覆盖的电离层观测资料, 便于实现电离层模型的反演. 在利用空间技术反演电离层模型的过程中, 不可避免地涉及信号发射和接收系统 DCB 的分离, DCB 也是影响导航系统定位

引用格式: 薛军琛, 宋淑丽, 朱文耀. 基于 BDS/GPS 双系统的全球电离层建模. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 079505

Xue J C, Song S L, Zhu W Y. Global ionosphere model based on BDS/GPS dual-system observations (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 079505, doi: 10.1360/SSPMA2015-00130

授时精度的主要因素之一。

自 1998 年 6 月, IGS 电离层工作组开始对外以 IONEX^[1]格式发布稳定、可靠的电离层产品, DCB(包括接收机 DCB 和卫星 DCB)作为副产品也被附加其中. IGS 各电离层分析中心(IAACs)利用 GPS 系统观测资料, 采用不同的方法^[2-5]独立生成电离层产品, CODE 还利用 GLONASS 资料. IAACs 生成的电离层产品(包括最终、快速、预报产品)在全球的适用精度分别为: 2-8 tecu (1 tecu=10¹⁶个电子), 2-9 tecu, 2-11 tecu.

BDS 导航系统是中国自主研发的新一代卫星导航系统, 整个系统将于 2020 年全部组网完成. 系统由 5 颗 GEO, 3 颗 IGSO 和 27 颗 MEO 卫星组成, 此设计将使系统有能力更好地服务于区域和全球定位、导航和授时. 由于目前 BDS 系统卫星和地面跟踪站数量均相对较少, 这使可利用的 BDS 电离层观测资料相对 GPS 甚少, 利用 BDS 单系统尚难于建立理想的全球电离层模型. 借助已经比较完善的 GPS 系统, 建立基于 BDS/GPS 双系统的全球电离层模型, 是克服 BDS 单系统建模弊端, 提高全球电离层模型和 DCB 监测精度的一种有效途径. 本文利用 BDS 和 GPS 双系统观测资料建立全球电离层模型 GIM/SHA, 并对生成的电离层产品(VTEC 和卫星 DCB)利用双频实测结果、IGS 最终电离层产品、海洋测高资料进行了精度评估, 并分析了电离层建模中 GPS 数据对 BDS 系统 DCB 监测的辅助作用.

2 数据及处理策略

2.1 观测资料

本文选取太阳活动高峰年 2013 年 2 月 11 日-2014 年 1 月 13 日共计 336 天 IGS 的 GPS 和 MGEX (The Multi-GNSS Experiment)的 BDS/GPS 双频(L1L2 波段)实测数据. 图 1 为本文使用的具有 GPS 和 BDS 观测数据的 GNSS 站点分布(SHAGPS 为本文使用的具有 GPS 观测资料的站点, SHACMP 为使用的具有 BDS 观测资料站点, VALIDS 为 34 个未参加 BDS/GPS 建模, 用于评估的 IGS 站). 本文使用 IGS 精密星历计算 GPS 卫星位置(IGb08 地固坐标系), 具体采用切比雪夫多项式计算相应时刻的卫星位置; 使用 brdm 广播星历计算相应时刻的 BDS 卫星位置(CGCS2000 地固坐标系), 具体采用 BDS ICD 文件给

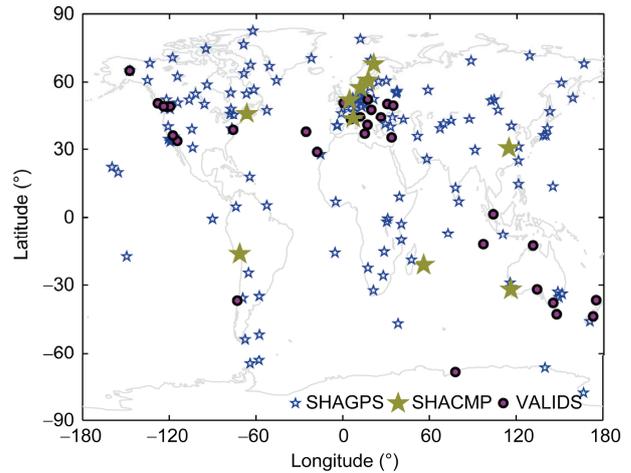


图 1 (网络版彩图)双系统 GIM 在 2013 年 194 天所用 GNSS 站点分布图

Figure 1 (Color online) GNSS stations used by GIM/SHA and validation stations not used by GIM/SHA on DOY 194, 2013.

出的轨道根数算法计算时段内相应时刻卫星位置和速度.

2.2 评估基准

对本文建立的 GIM/SHA 的精度评估, 采用 IGS 最终电离层产品、未参与 GIM/SHA 建模的 GNSS 测站实测 VTEC 和海洋测高卫星得到的 VTEC 作为 VTEC 评估基准. GPS 测站实测 VTEC 是利用双频实测 GPS 数据组合, 采用相位平滑伪距方法, 得到精度较高的斜路径 STEC, 利用 IGS 最终 DCB 产品扣除其中的卫星和接收机 DCB, 通过映射函数, 最终形成精度较高的实测 VTEC 数据作为评估基准. 海洋测高卫星双频观测得到的星下 VTEC 是通过两个测高仪测得的距离来获取电离层改正^[6], 测得的 VTEC 精度约为 2-3 tecu^[7], 主要覆盖占全球表面积 70%的海洋地区, 这正是 GNSS 技术缺少观测资料覆盖的区域. 目前 IGS 分析中心也一直利用海洋测高卫星的 VTEC 数据作为 IGS 产品评估基准^[8].

本文 BDS 单系统和 BDS/GPS 双系统建模均采用电离层模型系数和系统 DCB 一起解算的数据处理策略, 模型系数每天 13 组, DCB 每天设一组参数. 由于 IGS 提供的 GPS 卫星 P1P2 频点 DCB 具有很高的精度^[8], 本文使用 IGS 最终电离层产品提供的 DCB 结果为基准, 评估计算的 GPS 卫星 P1P2 频点 DCB; 对 BDS 卫星 B1B2 频点 DCB, 本文则利用长时间的序列

分析了其稳定性.

3 基于 BDS/GPS 双系统的全球电离层模型精度分析

3.1 VTEC 评估

对于利用 GPS/BDS 双系统观测数据生成的电离层产品, 本文利用 IGS 最终电离层产品进行全球 VTEC 精度统计, 使用未参与 GIM 建模测站实测 VTEC 数据评估了测站上空穿刺点精度, 并利用海洋测高等效 VTEC 评估了 Jason-2 星下点处 VTEC 的精度.

3.1.1 利用 IGS 最终产品进行 GIM/SHA 全球格网 VTEC 精度评估

为了检验 GIM/SHA 全球格网 VTEC 的精度, 本文使用 336 天 IGS 发布的最终电离层 IONEX 产品作为比对基准, 进行了精度统计分析. 图 2 给出了 GIM/SHA 与 IGS 电离层产品比对的 BIAS, RMS 和 STD 336 天的时间序列. 可见, IGS 最终电离层产品与 GIM/SHA 最终电离层产品之间整个时段所有 336 天的 RMS 最大不超过 6 tecu, 平均值为 3.34 tecu; 均方差 STD 最大不超过 5.98 tecu, 平均为 3.20 tecu. 336 天的比较结果表明, GIM/SHA 的统计 BIAS 整个时段最大不超过 2.8 tecu, 平均值为 0.74 tecu, 都属于 GNSS 电离层产品允许的范围(实际上, CODE 与 IGS 之间也存在一定的系统性偏差^[8]), 即 GIM/SHA 电离层产品的精度水平与 IGS 各分析中心(如 CODE)相当, 说明 GIM/SHA 最终电离层产品精度是可靠的.

图 2(b)和(c)均出现了季节效应, 这是因为在冬夏两季电离层变化比较平稳, 测定的精度比较高, 而春秋两季电离层变化比较剧烈, 测定的精度较低.

3.1.2 利用未参与 GIM 建模站实测 VTEC 数据进行 GIM/SHA 的外符合精度评估

为了进一步检验本文电离层产品的精度, 本文利用时段内未参与建模的测站上空实测 VTEC 数据, 对该电离层产品进行了外符合精度评估, 评估结果如图 3 所示. 同时, 分析了电离层模型在不同季节的精度(表 1).

图 3(a)–(c)都出现了季节效应, 其原因同 3.1.1 小节. 电离层的季节性变换效应在表 1 中表现明显.

结果表明, 利用未参与建模站实测 VTEC 数据评估 GIM/SHA, 其 BIAS 最大不超过 3 tecu, 平均 BIAS 为-0.46 tecu; RMS 最大不超过 6.5 tecu, 平均为 3.78 tecu. 此结果与各 IAACs 生成的最终电离层产品 GIM 的精度统计结果基本相当, 并且统计精度随时间呈明显的季节性变化. 表 1 中按季节统计的 GIM/SHA 精度说明, 相对于实测 VTEC 数据 GIM/SHA 精度夏季最高, 冬季次之, 春秋两季较差, 这与全球电离层变化的季节性有关.

3.1.3 利用海洋测高等效 VTEC 数据进行 GIM/SHA 外符合精度评估

本文选取了数据处理时段内 Jason-2 海洋测高数据生成的星下点 VTEC, 与 GIM/SHA 生成的相应 VTEC 进行了比较, 发现两者间呈现约 2.5 tecu 的系统偏差(图 4). 由图 4 可以看到, 系统偏差 BIAS 在夏季变化比较平稳, 也反映了电离层变化在夏季比较平稳.

产生此偏差的原因主要是测高卫星 Jason-2 轨道高度约为 1350 km, 其所测得的 VTEC 是 1350 km 高度以下的 VTEC 值, 而全球卫星导航系统的卫星高度在 20000 km 以上, 测得的是整个电离层剖面 VTEC. 因而, 用海洋测高数据生成的 VTEC 产品评估 GIM/SHA 的相应产品时, 会存在一个系统性的问题, 这就需要对 Jason-2 测得的 VTEC 做一定的预处理. 本文在用测高卫星的 VTEC 评估 GIM/SHA 时, 参考 Scharroo 和 Smith^[9]的预处理方法, 使用一个相对比例因子 0.911, 将双频测高数据计算的 TEC 从 Jason-2 轨道外推到 GNSS 轨道高度处, 以得到等效电离层剖面 VTEC. 表 2 给出了采用比例因子前后用测高卫星 VTEC 评估 GIM/SHA 按季节的统计结果(ORG 为调整前, CRT 为调整后).

表 2 表明, 利用海洋测高的 VTEC 评估 GIM 的产品时, 采用一个适当的相对比例因子的调整是必要的. 调整后两者间无明显的系统偏差, RMS 也相应减小. RMS 均值为 5.91 tecu, 最大不超过 9 tecu. RMS 随季节的变化也与全球电离层变化的季节性特征相符. 表 2 中相对于海洋测高 VTEC 的 RMS 明显大于表 1 中相对于 IGS 电离层产品的 RMS, 其原因是生成 GIM/SHA 的观测数据覆盖区域主要是全球陆地地区, 覆盖的海洋地区甚少(图 1), 而海洋测高的 VTEC 资料主要覆盖全球海洋地区, 所以 GIM/SHA 相对于

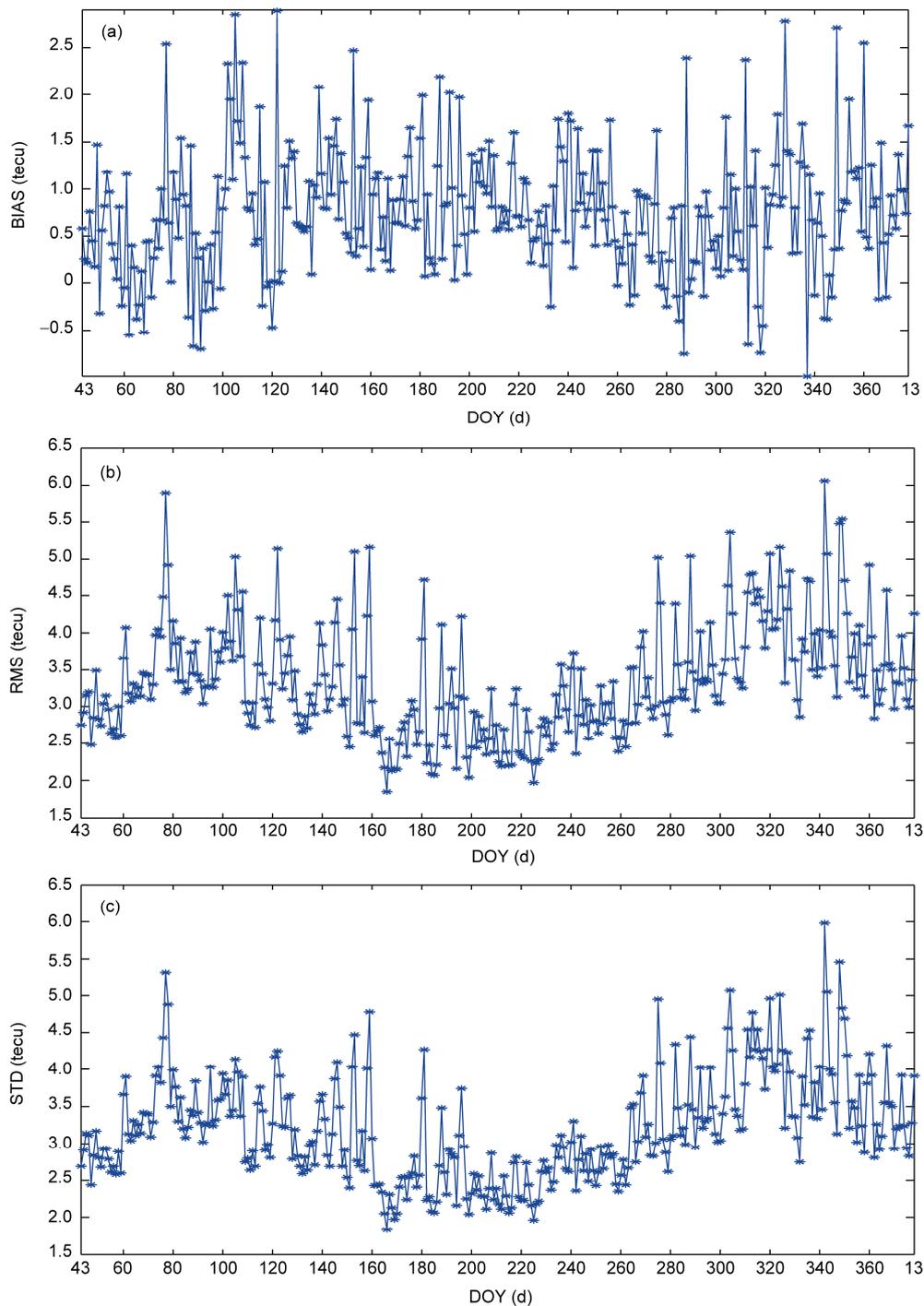


图 2 (网络版彩图)GIM/SHA 最终电离层产品与 IGS 最终电离层产品之间精度统计 BIAS, RMS 及 STD 时间序列. (a) GIM/SHA 最终电离层产品与 IGS 最终电离层产品之间系统偏差 BIAS(单位: tecu); (b) GIM/SHA 最终电离层产品与 IGS 最终电离层产品之间对比精度 RMS(单位: tecu); (c) GIM/SHA 最终电离层产品与 IGS 最终电离层产品之间对比均方差 STD(单位: tecu)

Figure 2 (Color online) The statistics of GIM/SHA with respect to GIM/IGS on global grids over time (336 d). (a) BIAS time series between GIM/SHA and GIM/IGS (unit: tecu); (b) RMS time series of GIM/SHA with respect to GIM/IGS (unit: tecu); (c) STD time series of GIM/SHA with respect to GIM/IGS (unit: tecu).

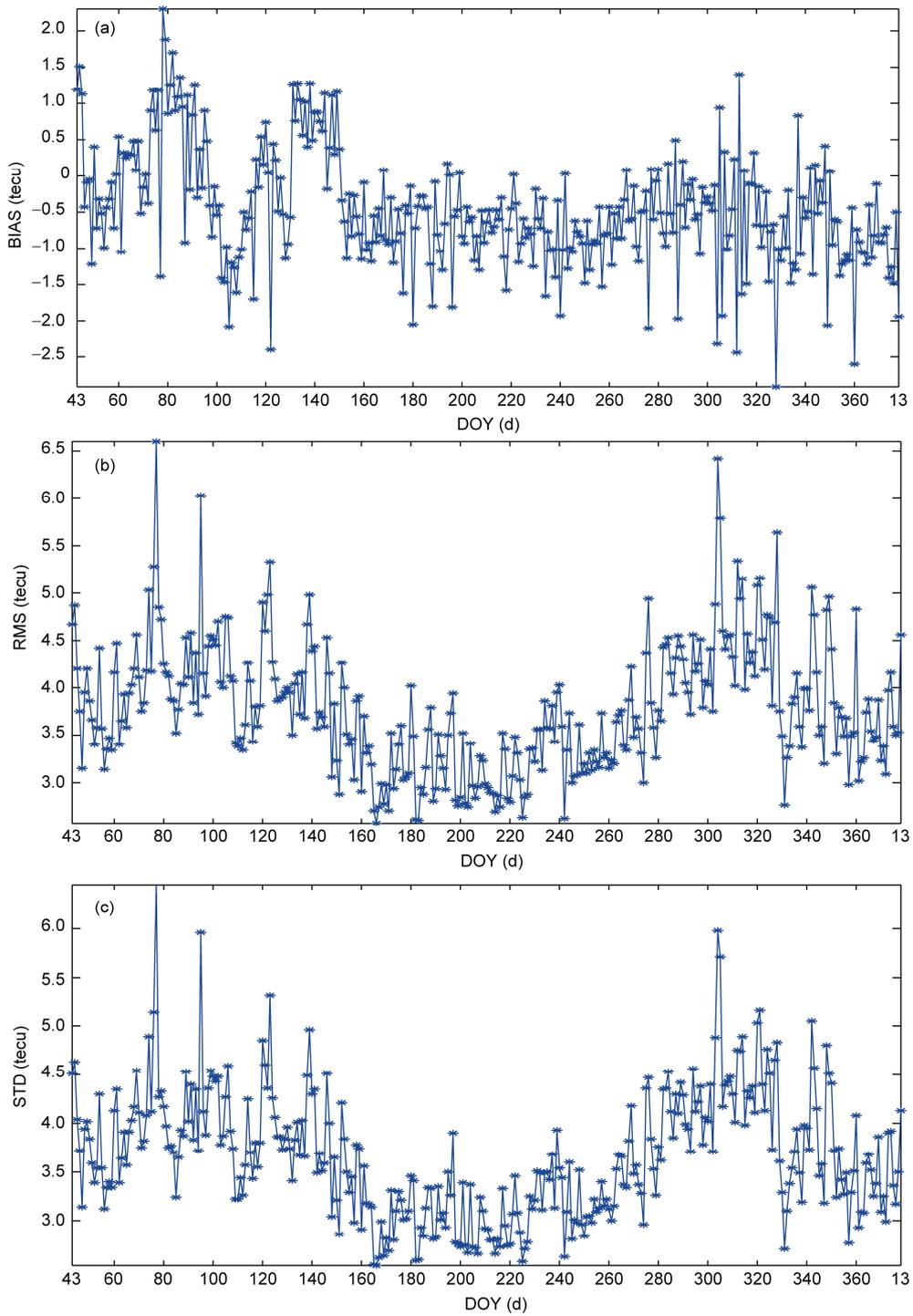


图3 (网络版彩图)GIM/SHA 最终电离层产品实测 VTEC 外符合精度统计 BIAS, RMS 及 STD 时间序列. (a) GIM/SHA 最终电离层产品实测 VTEC 外符合精度统计 BIAS(单位: tecu); (b) GIM/SHA 最终电离层产品实测 VTEC 外符合精度统计 RMS(单位: tecu); (c) GIM/SHA 最终电离层产品实测 VTEC 外符合精度统计 STD(单位: tecu)

Figure 3 (Color online) Statistics time series of GIM/SHA with respect to real-measured VTEC at the VALIDs stations. (a) BIAS time series between GIM/SHA and real-measured VTEC of VALIDs stations (unit: tecu); (b) RMS time series of GIM/SHA with respect to real-measured VTEC of VALIDs stations (unit: tecu); (c) STD time series of GIM/SHA with respect to real-measured VTEC of VALIDs stations (unit: tecu).

表 1 利用实测 VTEC 数据评估模型统计结果按季节分类 (单位: tecu)

Table 1 statistics index with seasonal alternating for the accuracy of GIM/SHA (unit: tecu)

| | Spring | Summer | Autumn | Winter |
|------|--------|--------|--------|--------|
| BIAS | 0.13 | -0.75 | -0.66 | -0.62 |
| RMS | 4.13 | 3.22 | 4.00 | 3.78 |

海洋测高 VTEC 的 RMS 要大些. 另外, 本文也计算了 GIM/IGS 相对于海洋测高 VTEC 的 RMS 均值为 5.11 tecu. IGS 解存在优势的原因主要是 GIM/IGS 解中融合了 34 个 VALIDS 站的观测资料, 特别是沿海地区和海洋中的 7 个站观测资料参与了 GIM/IGS 的解算, 在一定程度上提高了 GIM/IGS 的解在全球海洋地区的精度. 表 3 给出了这 7 个站 GIM/IGS 和 GIM/SHA 相对于海洋测高 VTEC 336 天的 RMS 统计值.

根据 Ho 等人^[7]于 1997 的研究, 海洋测高 VTEC 的精度约为 2-3 tecu, 本文取为 3 tecu, 则利用下式可估计 GIM/SHA 和 GIM/IGS 在海洋地区的平均精度分别为 5.09 和 4.14 tecu.

$$\sigma_{\text{GIM/SHA-RA}}^2 = \sigma_{\text{GIM/SHA}}^2 + \sigma_{\text{RA}}^2, \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\text{GIM/SHA-RA}}$ 为使用海洋测高 VTEC 评估的 GIM/SHA 精度, $\sigma_{\text{GIM/SHA}}$ 为 GIM/SHA 的实际精度, σ_{RA} 则为海洋测高 VTEC 的实际精度.

4 DCB 结果分析

4.1 卫星 DCB 结果分析

系统硬件延迟 DCB 可分为接收机 DCB 和卫星 DCB, 卫星 DCB 由于其高稳定性的特点, 可以用于导航系统的单频单点定位及授时, 而接收机 DCB 稳定性较差, 一般在卫星导航定位中被吸收到接收机钟差与位置参数一同参与估计. 本文分别对由 BDS/GPS 双系统电离层建模生成的两个系统卫星 DCB 进行统计分析.

4.1.1 GPS 卫星 P1P2 频点 DCB 比对分析

IGS 最终电离层产品 IONEX 文件给出了 GPS 卫星 P1P2 频点 DCB 结果, 该结果是其他 IAACs 产品的组合结果, 除了某些异常情况, IGS 给出的 DCB 结

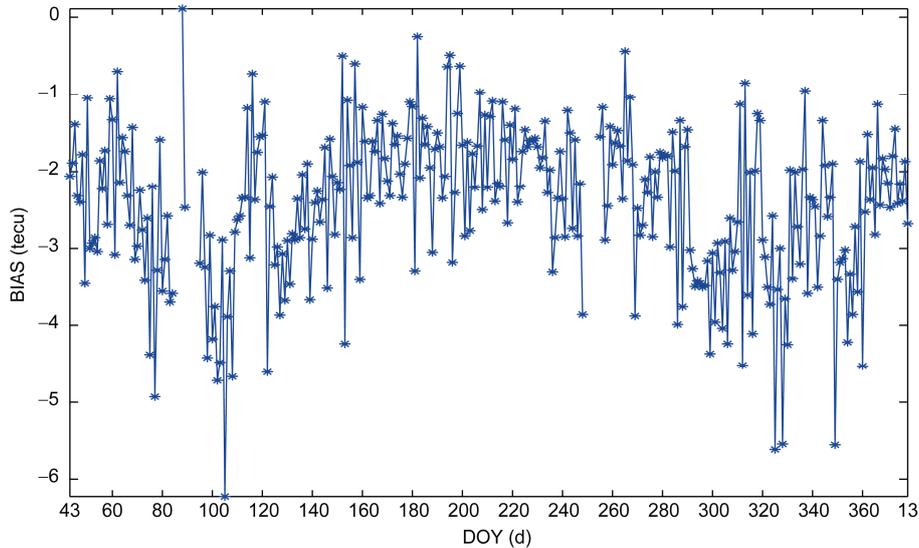


图 4 (网络版彩图)海洋测高 VTEC 与 GIM/SHA 产品间的系统偏差 BIAS(单位: tecu)

Figure 4 (Color online) BIASes between original altimetry VTEC and GIM/SHA (unit: tecu).

表 2 海洋测高 VTEC 按季节评估 GIM/SHA 产品的统计结果(单位: tecu)

Table 2 Statistics index comparison with seasonal alternating before and after ratio factor used (unit: tecu)

| | Spring | | Summer | | Autumn | | Winter | |
|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|------|
| | ORG | CRT | ORG | CRT | ORG | CRT | ORG | CRT |
| BIAS | -2.76 | -0.60 | -1.85 | -0.07 | -2.68 | -0.18 | -2.48 | 0.05 |
| RMS | 6.50 | 6.03 | 5.45 | 5.24 | 6.93 | 6.66 | 6.01 | 5.73 |

表3 7个沿海站上 GIM/IGS 和 GIM/SHA 相对于海洋测高的 VTEC 的 RMS 均值比较(单位: tecu)

| SITE | Auck | Coco | Darw | Dav1 | Lpal | Ntus | Pdel | Mean |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RMS/IGS | 2.39 | 5.69 | 6.19 | 6.89 | 4.74 | 6.37 | 3.46 | 5.10 |
| RMS/SHA | 3.07 | 6.59 | 8.21 | 7.03 | 5.48 | 7.16 | 3.63 | 5.88 |

果具有最高的精度^[8]. 本文使用 IGS 高精度 DCB 产品, 对双系统 GIM/SHA 计算的 336 天 GPS 卫星 DCB 进行了精度评估. 图 5 为双系统 GIM/SHA 计算的 32 颗 GPS 卫星 P1P2 频点 DCB 在 336 天的统计结果.

由图 5 可见, 大部分卫星 DCB 相对于 IGS 结果偏差不超过 0.1 ns, RMS 最大不超过 0.2 ns, 可见卫星 DCB 结果相对于 IGS 结果没有明显的系统性偏差, 且统计精度较高, 这与其他 IAACs 与 IGS 的统计精度相当^[8]. 图中还可见, G27 星和 G30 星 BIAS 较大并且 G30 的 RMS 也较大, 这是由于 G27 与 G30 星的 DCB 相对于 IGS 的结果出现了几次大的跳变, 跳变是由于这两颗星在解算时段内可能发生了如星载钟切换、信号变化、太空环境变化以及其他卫星类似变化等事件, 而各 IAACs 对于该类型事件的处理策略往往不同(例如, JPL 对该事件发生时间前后数天, 相对应星 DCB 参数在模型解算中均不予考虑), 这导致该星解算结果的不统一. 本文在统计该类事件对应卫星 DCB 时, 没有将此类情况下产生的与 IGS 解的较大偏差剔除, 由此, 产生了个别卫星 BIAS 和 RMS

较大的情形.

4.1.2 BDS 卫星 B1B2 频点 DCB 分析

由于目前 BDS 单系统电离层观测资料稀少, 导致基于 BDS 单系统建立 GIM 生成全球 VTEC 整体精度较差, 从而会影响 BDS 系统 DCB 的解算精度; 而 GPS/BDS 双系统建立的全球电离层模型 GIM/SHA 能够较好地确定全球的 VTEC, 从而有利于提高 BDS 系统 DCB 的测定精度. 这对提高 BDS 系统的导航、定位和授时精度具有重要作用^[10]. 本文对单系统解算 BDS 系统 DCB 与双系统联合解算的 BDS 系统 DCB 进行了相应的比较分析, 分别统计了单系统与双系统解算 BDS 卫星 DCB 长时段内平均值及稳定性, 如表 4 所示(MONO 为单系统结果, DUAL 为双系统结果, DIFFERENCE 为两系统结果差值; PRN 为卫星号, STDV 为每颗星计算时间段内的统计标准差, MEAN 为时段内平均值, DIFSTDV 为单系统与双系统 STDV 差值, DIFMEAN 为单系统与双系统 MEAN 差值).

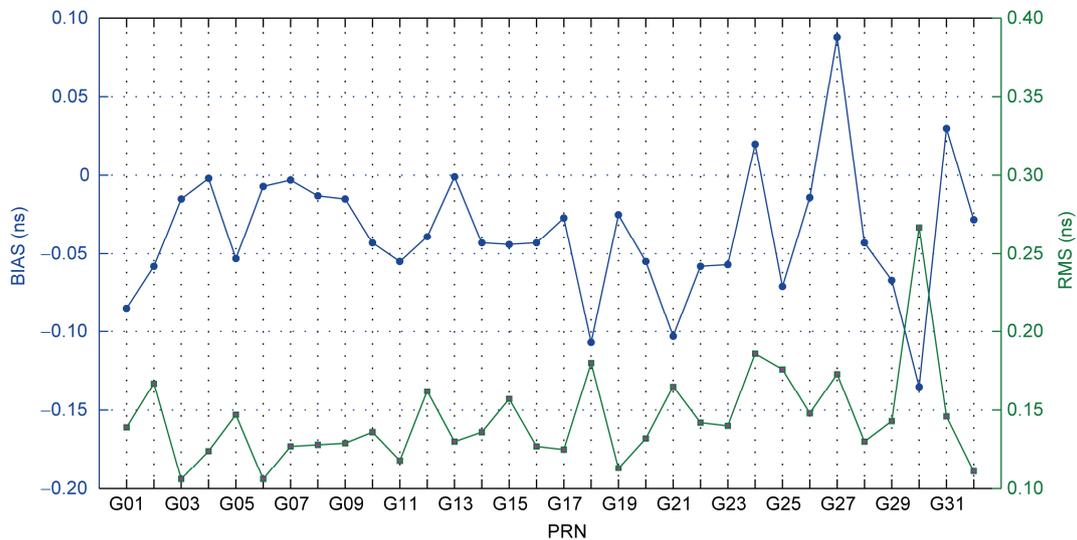


图5 (网络版彩图)GIM/SHA 计算的各 GPS 卫星的 DCB 相对于 IGS 的统计结果. 横轴为卫星号 PRN, 左纵轴为 BIAS, 右纵轴为 RMS(单位: ns)

Figure 5 (Color online) Statistics of GPS P1P2 DCB of GIM/SHA with respect to IGS. The left vertical axis is BIAS, the right vertical axis is RMS (unit: ns).

表 4 单系统与双系统解算 BDS 卫星 DCB 长时段稳定性统计(单位: ns)

Table 4 Stability for Beidou satellite DCB based on single system and dual system over a long term (unit: ns)

| TYP | PRN | MONO | | DUAL | | Difference | |
|------|-----|-------|--------|-------|--------|------------|---------|
| | | STDV | MEAN | STDV | MEAN | DIFSTDV | DIFMEAN |
| GEO | C01 | 0.271 | 15.018 | 0.306 | 14.922 | -0.035 | 0.096 |
| | C02 | 0.236 | 5.094 | 0.351 | 5.244 | -0.115 | -0.150 |
| | C03 | 0.299 | 4.699 | 0.290 | 4.539 | 0.009 | 0.160 |
| | C04 | 0.449 | 4.073 | 0.556 | 4.300 | -0.107 | -0.227 |
| | C05 | 0.316 | 0.029 | 0.364 | 0.118 | -0.048 | -0.089 |
| IGSO | C06 | 0.235 | 0.687 | 0.233 | 0.694 | 0.002 | -0.007 |
| | C07 | 0.262 | 4.040 | 0.255 | 4.097 | 0.007 | -0.057 |
| | C08 | 0.225 | 2.377 | 0.206 | 2.441 | 0.019 | -0.064 |
| | C09 | 0.186 | -6.034 | 0.134 | -6.062 | 0.052 | 0.028 |
| | C10 | 0.305 | -5.950 | 0.245 | -6.013 | 0.060 | 0.063 |
| MEO | C11 | 0.240 | -7.202 | 0.233 | -7.023 | 0.007 | -0.179 |
| | C12 | 0.364 | -5.730 | 0.278 | -5.572 | 0.086 | -0.158 |
| | C13 | 0.233 | -7.206 | 0.249 | -7.306 | -0.016 | 0.100 |
| | C14 | 0.330 | -4.367 | 0.245 | -4.378 | 0.085 | 0.011 |

上述 14 颗 3 种类型(GEO, MEO, IGSO)卫星 DCB 长时间标准差统计结果表明, 对于 BDS 卫星 DCB 的解算, 总体上双系统解算 BDS 卫星 DCB 稳定性稍优于单系统, 两种方法解算 BDS 卫星 DCB 均值的差别为 0.007~0.227 ns; IGSO 卫星比 GEO 和 MEO 的 DCB 稳定性高, 这应该与目前 BDS 跟踪站分布有关, 且双系统明显优于单系统解算结果; 双系统解算的 IGSO 和 MEO 卫星 DCB 长期稳定性都优于 0.3 ns, 个别卫星 C10, C12, C14 的单系统解算结果超过 0.3 ns; 对于 GEO 卫星双系统解算 DCB 稳定性比单系统差, 原因需要进一步研究. 本文也统计了 32 颗 GPS 卫星此时间段内的稳定性, 除个别星异常外, GPS 卫星 DCB STDV 均在 0.1 ns 水平. BDS 卫星 DCB 的统计均方差偏大的主要原因是目前全球分布的跟踪站远少于 GPS 测站.

4.2 接收机 DCB 结果分析

接收机 DCB 是利用导航数据建立电离层模型时的附件产品之一, 对其进行稳定性分析对于监测接收机的硬件性能以及实时电离层变化具有重要意义. 本文对使用单系统、双系统解算的该时段内的 BDS 接收机 DCB 长时段稳定性进行了统计分析, 如表 5 所示. 由统计结果可知, 接收机 DCB 稳定性明显比卫星差, 且双系统解算的稳定性明显优于单系统结果, 两种方法解算接收机 DCB 的均值差别达到 3 ns, 稳定性差别达到 2 ns. 所以, 双系统建模对于提高接收机的稳定性具有重要作用.

5 结论

本文建立了基于 BDS/GPS 双系统的全球电离层模型 GIM/SHA 利用 IGS 最终电离层产品、未参与建模站的 GPS 实测 VTEC 和海洋测高数据对模型进行了外符合精度评估, 并给出了 GPS 和 BDS 系统 DCB 解算结果及统计分析. 本文的主要结论如下:

(1) 利用 IGS 最终电离层产品对 GIM/SHA 最终电离层产品进行评估, 平均 RMS 为 3.34 tecu, 整个时段的比较结果表明, GIM/SHA 的统计 BIAS 整个时段最大不超过 2.80 tecu, 平均为 0.74 tecu, 存在一个较小的系统偏差, 这与 IGS 各分析中心的精度水平相当, 说明 GIM/SHA 最终电离层产品精度是可靠的. 对于系统偏差中出现季节效应的原因, 是因为在冬夏两季电离层变化比较平稳, 模型测定的精度较高, 而春秋两季电离层变化剧烈, 模型测定精度较低.

(2) 利用未参与建模的 34 个 IGS 站(VALIDS)的 GPS 实测数据对 GIM/SHA 最终电离层产品外符合检验结果表明, 近一年 BIAS 为-0.46 tecu; RMS 最大不超过 6.50 tecu, 平均为 3.78 tecu. 全年 RMS 随时间的变化呈现明显的季节性变化特征, GIM/SHA 精度夏季最高, 冬季次之, 春秋两季较差, 这与全球电离层变化的季节性特征相符.

(3) 利用海洋测高的 VTEC 来评估 GIM/SHA 时, 必须使用一个约为 0.9 的相对比例因子, 将双频测高数据计算的 TEC 从 Jason-2 轨道外推到 GNSS 轨道高

表 5 单系统与双系统解算 BDS 接收机 DCB 长时段稳定性统计(ns)

Table 5 Stability for Beidou receiver DCB based on single system and dual system over a long term (ns)

| SITN | MONO | | DUAL | | DIFFERENCE | |
|------|-------|--------|-------|--------|------------|---------|
| | STDV | MEAN | STDV | MEAN | DIFSTDV | DIFMEAN |
| ABMF | 2.559 | 26.752 | 1.656 | 28.415 | 0.903 | -1.663 |
| AREG | 2.989 | 20.967 | 1.224 | 22.331 | 1.765 | -1.364 |
| BRST | 0.968 | 24.648 | 0.603 | 25.576 | 0.365 | -0.928 |
| BRUX | 0.821 | 18.651 | 0.352 | 19.239 | 0.469 | -0.588 |
| CEBR | 1.036 | 14.532 | 0.544 | 15.839 | 0.492 | -1.307 |
| CHPG | 2.824 | 22.258 | 1.464 | 23.866 | 1.360 | -1.608 |
| CUT0 | 1.250 | 21.656 | 1.014 | 23.092 | 0.236 | -1.436 |
| DLF1 | 1.071 | 21.575 | 0.767 | 22.128 | 0.304 | -0.553 |
| FAA1 | 3.182 | 13.999 | 2.519 | 14.995 | 0.663 | -0.996 |
| GRAC | 1.785 | 25.824 | 1.718 | 26.794 | 0.067 | -0.970 |
| JFNG | 2.438 | 20.623 | 1.020 | 22.821 | 1.418 | -2.198 |
| KIR8 | 0.784 | 21.690 | 0.504 | 21.968 | 0.280 | -0.278 |
| KIRU | 0.715 | 15.427 | 0.511 | 15.604 | 0.204 | -0.177 |
| KOUR | 4.092 | 13.715 | 1.778 | 13.976 | 2.314 | -0.261 |
| KZN2 | 0.535 | 22.658 | 0.347 | 22.022 | 0.188 | 0.636 |
| LMMF | 3.433 | 24.514 | 1.581 | 25.956 | 1.852 | -1.442 |
| MAL2 | 1.266 | 13.744 | 1.207 | 16.638 | 0.059 | -2.894 |
| MAR7 | 0.778 | 23.956 | 0.528 | 23.901 | 0.250 | 0.055 |
| MAS1 | 2.161 | 15.360 | 2.144 | 16.267 | 0.017 | -0.907 |
| MGUE | 1.880 | 12.781 | 1.344 | 14.788 | 0.536 | -2.007 |
| NNOR | 1.289 | 13.816 | 0.851 | 15.291 | 0.438 | -1.475 |
| ONS1 | 1.070 | 21.767 | 0.808 | 21.867 | 0.262 | -0.100 |
| REDU | 0.706 | 15.132 | 0.331 | 15.708 | 0.375 | -0.576 |
| REUN | 1.377 | 23.815 | 1.042 | 22.993 | 0.335 | 0.822 |
| RGDG | 2.382 | 20.393 | 0.832 | 23.170 | 1.550 | -2.777 |
| SIN1 | 0.771 | 18.603 | 1.057 | 21.941 | -0.286 | -3.338 |
| UCAL | 1.241 | 25.010 | 0.444 | 25.945 | 0.797 | -0.935 |
| UNBS | 1.559 | 17.134 | 0.728 | 18.731 | 0.831 | -1.597 |
| UNX3 | 1.106 | 16.360 | 0.913 | 17.063 | 0.193 | -0.703 |
| VILL | 1.024 | 15.402 | 0.553 | 16.748 | 0.471 | -1.346 |
| WARK | 1.321 | 28.033 | 1.013 | 28.004 | 0.308 | 0.029 |

度处, 以得到等效电离层剖面 VTEC. 调整后两者间无明显的系统偏差, RMS 均值为 5.91 tecu. RMS 随季节的变化也与全球电离层变化的季节性特征相符. 相应地, 以同样的海洋测高 VTEC 评估 GIM/IGS, RMS 均值为 5.11 tecu. 根据海洋测高 VTEC 的实际精度, 可得 GIM/SHA 和 GIM/IGS 在全球海洋地区的平均精度分别为 5.09 和 4.14 tecu.

(4) 由 GPS/BDS 双系统数据建立全球电离层模型中生成的 GPS 卫星 P1P2 DCB 无系统性偏差, 统计

RMS 平均为 0.114 ns, 这与国际 IAACs 统计结果精度相当; 对于 BDS 卫星 DCB 的解算, 总体上双系统解算 BDS 卫星 DCB 稳定性稍优于单系统, 两种方法解算 BDS 卫星 DCB 均值差别为 0.007-0.227 ns; IGSO 卫星比 GEO 和 MEO 的 DCB 稳定性高, 且双系统明显优于单系统解算结果; 双系统解算的 IGSO 和 MEO 卫星 DCB 长期稳定性均优于 0.3 ns, GEO 卫星双系统解算 DCB 稳定性比单系统差. 对于接收机 DCB, GPS/BDS 双系统的解算结果优势明显.

致谢

感谢 CODE, JPL 提供的电离层 IONEX 格式产品; 感谢 IGS 数据中心及 Dr. CAREY Noll 在数据使用方面的帮助; 感谢 Dr. SCHAROO R 对海洋测高产品使用的帮助; 感谢 Dr. FANG P 和 Prof. CHENG ZY 对本人工作的建议和帮助.

参考文献

- 1 Schaer S, Gurtner W, Feltens J. Ionex: The ionosphere map exchange format version 1. In: The Proceedings of the IGS AC Workshop. Darmstadt, 1998
- 2 Feltens J, Dow J, Martín-Mur T, et al. Using gps for ionospheric corrections of esa tracking data. *Space Flight Dynam*, 1997, 403: 121–125
- 3 Mannucci A, Wilson B, Yuan D, et al. A global mapping technique for gps-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Sci*, 1998, 33: 565–582
- 4 Hernández-Pajares M, Juan J, Sanz J. New approaches in global ionospheric determination using ground gps data. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 1999, 61: 1237–1247
- 5 Schaer S. Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system. *Geod-Geophys Arb Schweiz*, 1999, 59
- 6 Imel D A. Evaluation of the topex/poseidon dual-frequency ionosphere correction. *J Geophys Res-Oceans*, 1994, 99: 24895–24906
- 7 Ho C, Wilson B, Mannucci A, et al. A comparative study of ionospheric total electron content measurements using global ionospheric maps of gps, topex radar, and the bent model. *Radio Sci*, 1997, 32: 1499–1512
- 8 Hernández-Pajares M, Juan J, Sanz J, et al. The igs vtec maps: A reliable source of ionospheric information since 1998. *J Geodesy*, 2009, 83: 263–275
- 9 Scharroo R, Smith W H. A global positioning system-based climatology for the total electron content in the ionosphere. *J Geophys Res-Space Phys*, 2010, 115: A10318, doi: 10.1029/2009JA014719
- 10 Huang J, Wang P, Ruan R G, et al. Study on precise point positioning accuracy affected by DCB (in Chinese). *J Geodesy Geodyn*, 2010, 30: 110–112 [黄健, 汪平, 阮仁贵, 等. DCB 对精密单点定位精度影响研究. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30: 110–112]

Global ionosphere model based on BDS/GPS dual-system observations

XUE JunChen^{*}, SONG ShuLi & ZHU WenYao

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

In order to overcome the weakness of GIM based on BeiDou single system and improve the accuracy of GIM and differential code bias (DCB), we created the GIM products based on BDS/GPS dual system assisted with GPS. In this study, we do analysis on the accuracy of GIM based on BDS/GPS and the auxiliary function for DCB monitoring by GPS. The ionosphere observations of BeiDou and GPS over 336 d from February 11, 2013 to January 13, 2014 in solar high activity have been used to generate a set of global ionosphere grids (GIM/SHA) with sphere harmonics at spatial resolution of 15×15 degree and order. The comprehensive accuracy assessment for the GIM/SHA products is provided by using IGS final products (GIM/IGS), real-measured vertical total electron content (VTEC) by dual-frequency observations and VTEC by Jason-2 radar altimetry. Our study reveals: (1) Comparing the VTEC on global grids with that of three kinds of assessment data, the average RMS of GIM/SHA is in the range of 3–6 tecu with a little systematic bias; (2) For the estimated PIP2 DCB of GPS satellites, the bias between GIM/SHA and IGS is within 0.1 ns with RMS less than 0.2 ns; (3) For the estimated B1B2 DCB of satellites and receivers based on BeiDou single system and dual system, the difference of mean values is within 0.01–0.227 ns and the solution based on the dual system is a little better than that based on the single system, but GIM/SHA can obviously improve the stability for receiver DCB by using GPS observations. From the long-term stability statistics for 14 BeiDou satellites' B1B2 DCB, the stability is at 0.2–0.3 ns level, while slightly worse for that of GEO satellites.

GIM, GPS, BDS, IGS, vertical total electron content, differential code bias

PACS: 91.10.Fc, 91.10.Pp, 91.10.pa, 94.20.Cf

doi: 10.1360/SSPMA2015-00130