

GPS 与格洛纳斯电离层电子总含量建模的 差异性分析及改进

韩 玲, 王解先, 王明华

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 为了提高多模 GNSS (global navigation satellite system) 电离层电子总含量 (TEC) 的计算精度, 基于全球及中国区域研究了 GPS (global positioning system) TEC 和 GLONASS (global orbiting navigation satellite system) TEC 的差异及变化规律. GPS TEC 精度要优于 GLONASS TEC, 两者相关性随纬度降低而降低, 并且 GLONASS TEC 较之 GPS TEC 存在一定程度的低估; TEC 精度差异与星座配置、信号体制及轨道周期差异有关, 并受到本地时影响, F2 层临界频率 (foF2) 存在类似情况. 基于 GPS TEC 和 GLONASS TEC 的差异性, 对组合建模时伪距观测权函数进行改进, 平均偏差约改进 20%, 内符精度约改进 15%.

关键词: 电离层; 电子总含量 (TEC); GPS (global positioning system); GLONASS (global orbiting navigation satellite system); F2 层临界频率 (foF2)

中图分类号: P208

文献标志码: A

Difference Analysis and Improvement of Ionospheric TEC Modeling of GPS and GLONASS

HAN Ling, WANG Jiexian, WANG Minghua

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To improve the total electron content (TEC) accuracy retrieved by multi-mode GNSS (global navigation satellite system), this paper addresses the distinctions of TEC retrieved from GPS (global positioning system) and GLONASS (global orbiting navigation satellite system) using global and Chinese GNSS stations. It indicates that TEC retrieved from GPS is more accurate than that from GLONASS. The regional model results in China show that the GPS/GLONASS TEC correlation coefficients increase with latitude and GLONASS underestimates TEC compared with GPS. The difference has the relationship with constellation configuration, signal

system and orbit design difference. The TEC difference has latitude and local time dependency, and critical frequency of F2 layer (foF2) has similar phenomena with local time and geographic latitude dependency. Based on the study, a newly weighting function is designed for GLONASS measurements. The results show that the method will improve the bias and the root mean square (RMS) by 15% and 20% respectively in GPS and GLONASS combine mode.

Key words: ionosphere; total electron content (TEC); GPS (global positioning system); GLONASS (global orbiting navigation satellite system); critical frequency of F2 layer (foF2)

GNSS (global navigation satellite system) 双频接收机已广泛应用于电离层的监测与研究^[1-2]. GPS (global positioning system) 采用码分多址在 L1 和 L2 波段上提供伪距和载波相位观测值. GLONASS (global orbiting navigation satellite system) 采用频分多址 (FDMA) 在 15 个信号频段上播发信息. GLONASS 经常与 GPS 结合用以提高电子总含量 (TEC) 的观测精度, 认为两者具有较强的一致性^[3-6]. 然而, 由于两者在信号结构、卫星星座配置、轨道倾角等方面的差异性, 导致两者 TEC 间系统差异值在纬度、本地时等方面呈现规律性变化. 利用 MGEX (multi-GNSS experiment)/IGS (internal GNSS service) 以及中国地壳运动监测网 (CMONOC) 提供的高精度和高时空分辨率的 GPS/GLONASS 数据, 对这一差异性进行研究. 最后, 基于对两者差异规律性的认识, 提出了对 GPS/GLONASS 权重策略的改进并验证了 TEC 计算精度.

收稿日期: 2017-11-14

基金项目: 国家自然科学基金 (40974018)

第一作者: 韩 玲 (1980—), 女, 博士生, 主要研究方向为卫星大地测量与应用. E-mail: lhan1024@outlook.com

通信作者: 王解先 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为卫星大地测量与应用. E-mail: wangjiexian@tongji.edu.cn

1 利用 GPS/GLONASS 对电离层建模

为了减少 TEC 观测值的噪声水平,基于载波相位平滑伪距观测量形成的电离层残差组合(GF)可以计算出 TEC^[3],如下所示:

$$I = -\frac{1}{40.28} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\bar{P}_4 - \Delta B_S + \Delta B_R) \quad (1)$$

式中: \bar{P}_4 为平滑后的双频伪距差; ΔB_S 为卫星相对电路硬件的延迟偏差(DCB); ΔB_R 为接收机 DCB; f_1 和 f_2 分别为 GPS 和 GLONASS 的 L1 和 L2 中心频点. GPS 的 L1 和 L2 中心频点分别为 1 575. 42 MHz 和 1 227. 60 MHz. GLONASS 采用频分多址技术,不同卫星通道号对应不同的频率. GLONASS 的 L1 频段为 $1\ 602\ \text{MHz} + k \times 0.562\ 5\ \text{MHz}$, L2 频段为 $1\ 246\ \text{MHz} + k \times 0.437\ 5\ \text{MHz}$,其中 k 为卫星通道号.

基于 TEC 单层球壳模型^[7-10],需要将斜向 TEC (STEC)通过投影函数转换为垂向 TEC(VTEC). 基于欧洲定轨中心(CODE)改进后的投影函数(MSLM)如下所示:

$$f(z) = \frac{1}{\cos z} \sin z' = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha z)$$

式中: $f(z)$ 为投影函数; H 为假设的电离层薄层高度,取 450 km; R 为地球半径(6 387 km); z 为卫星高度角; α 为常数,取 0. 978.

采用球谐函数模型对全球 VTEC 进行建模,选取多项式模型对区域建模,如下所示:

$$V = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm} (\sin \varphi)^i (\tilde{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \tilde{S}_{nm} \sin(m\lambda))$$

$$V = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k \quad (1)$$

式中: φ 为地磁纬度; λ 为日固系的穿刺点经度; n_{\max} 为球谐函数的最大阶数; \tilde{P}_{nm} 为 n 阶 m 次归一化缔合勒让德函数,本文中取至 15 阶,2 h 估计一次,待估模型参数为 $16 \times 6 \times 2$,DCB 每天估计 1 次; \tilde{C}_{nm} 和 \tilde{S}_{nm} 为待估的球谐系数; S_0 为测区中心点(φ_0, λ_0)在该时段中央时刻 t_0 时的太阳时角. 多项式模型 E_{ik} 估计方法与此类似,通过最小二乘法将 DCB 和模型系数进行分离^[11],如下所示:

$$\bar{P}_G = 40.28 \frac{f_i^2 - f_j^2}{f_i^2 f_j^2} V_G(\varphi, \lambda) f(z) + (D_{Gs} + D_{Gr})$$

$$\bar{P}_R = 40.28 \frac{f_i^2 - f_j^2}{f_i^2 f_j^2} V_R(\varphi, \lambda) f(z) + (D_{Rs} + D_{Rr})$$

式中: D_{Gs} 、 D_{Gr} 、 D_{Rs} 、 D_{Rr} 为待估参数; V_G 和 V_R 分别为 GPS 和 GLONASS 计算的 VTEC. 为了避免法方程奇异并增强鲁棒性,需要增加约束方程,即假设所有 GPS 和 GLONASS 卫星 DCB 的加和分别为零,如下所示:

$$\sum_{j=1}^{32} D_{Gs_j} = 0$$

$$\sum_{j=1}^{24} D_{Rs_j} = 0$$

TEC 以 TECU(total electron content unit)为单位,1 TECU 相当于每平方米有 10^{16} 个电子.

2 全球建模差异性分析

利用 2014 年 7 月 1 日全球 495 个 MGEX/IGS 台站进行球谐函数建模. 测站分布如图 1 所示.

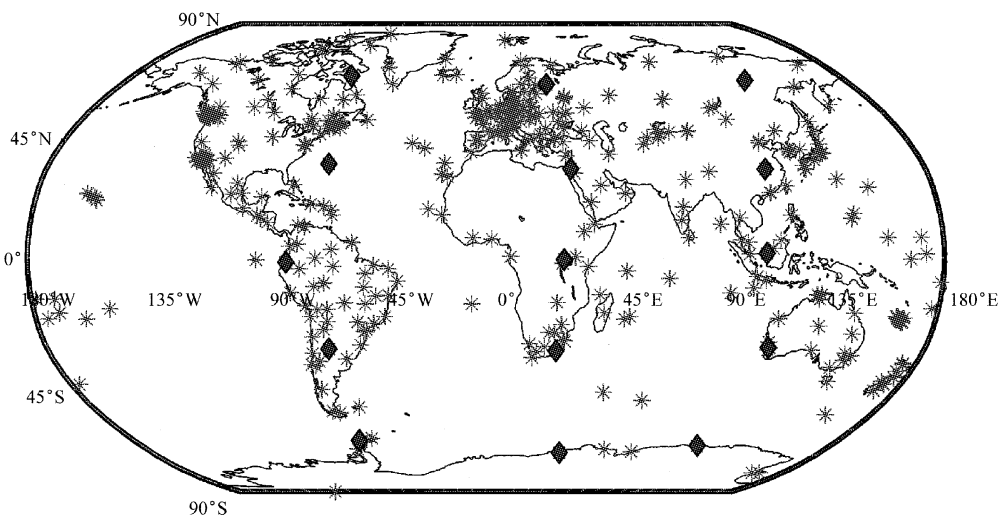


图 1 MGEX/IGS 全球台站分布
Fig.1 Distribution of MGEX/IGS stations

分别利用 GPS 和 GLONASS 观测值对全球 VTEC 建模并计算,生成经度 5°、纬度 2.5°为间隔的 VTEC 格网图,以 CODE global ionosphere maps (GIM)作为参考.图 2a 和图 2b 分别给出世界时 9 时 GPS VTEC 以及 GLONASS VTEC 与 CODE GIM 计算结果差异.由图 2 可以看出,GPS VTEC 精度要优于 GLONASS VTEC 精度.GPS VTEC 及 GLONASS VTEC 的均方根误差(RMS)分别为 2.3 TECU 和 4.6 TECU.利用 GLONASS 观测值建模得出的 VTEC 存在偏差,均值要低于 CODE GIM 计算结果.GPS VTEC 及 GLONASS VTEC 与 CODE GIM 计算结果的平均偏差分别为 0.8 TECU 和 1.4 TECU.

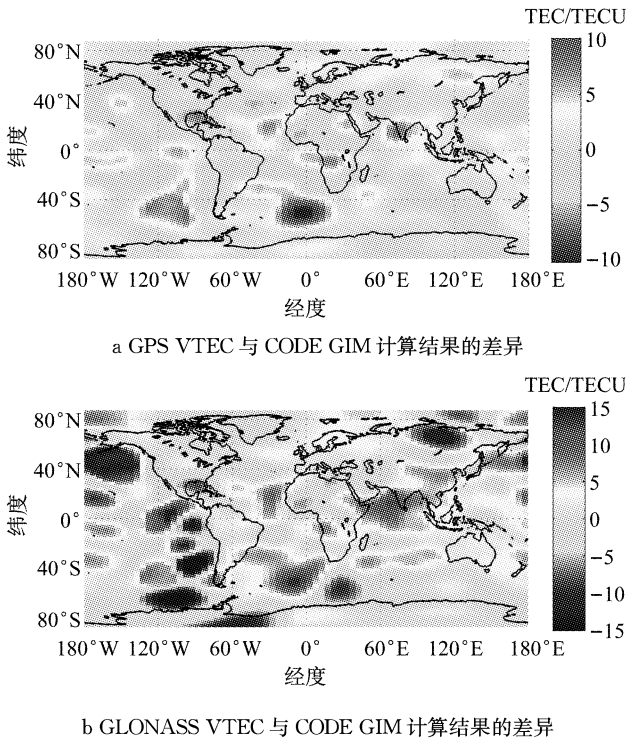


图 2 GPS VTEC 和 GLONASS VTEC 与 CODE GIM 计算结果的差异

Fig.2 Difference between GPS/GLONASS VTEC and CODE GIM calculation results

由图 3 可见,GPS C1W-C2W 的 DCB 与 CODE GIM 计算结果差异在±0.15 ns 以内,RMS 为 0.06 ns. GLONASS C1P-C2P 的 DCB 与 CODE GIM 计算结果差异在±0.60 ns 以内,RMS 为 0.30 ns.图 3 中,PRN 指伪随机噪声码.

由图 1 和图 2 可见,测站分布虽然基本实现了全球覆盖,但是对非洲北部、两极及赤道附近海洋区域测站空间分辨率差,特别是南半球海洋区域.如 90°W 至 180°W、135°E 至 180°E 区域,有效测站密度

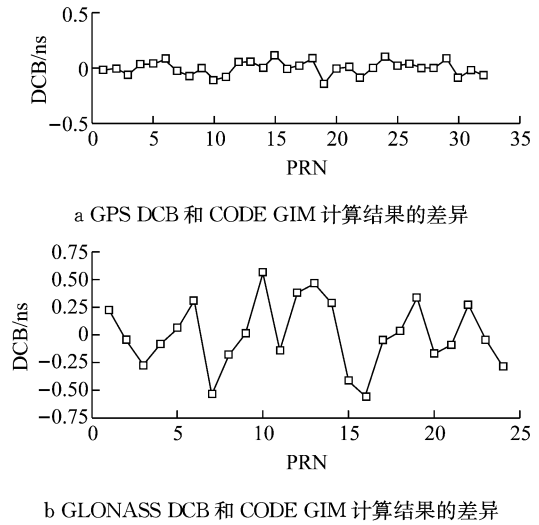


图 3 GPS DCB 和 GLONASS DCB 与 CODE GIM 计算结果的差异

Fig.3 Difference between GPS/GLONASS DCB and CODE GIM calculation results

小且个数少,对 TEC 估计可靠性较低.为了避免台站分布不均匀带来的系统偏差,选取了台站覆盖较好的区域,经度在 60°W、30°E 以及 120°E,纬度在 60°S 至 60°N 附近的 15 个台站,如图 1 中菱形形点所示.如表 1 所示,GPS TEC 系统偏差和内符精度均要优于 GLONASS TEC.相比于 CODE GIM 计算结果,GPS TEC 的系统偏差为 -0.7 TECU, GLONASS TEC 的系统偏差为 -1.6 TECU. GPS 内符精度为 0.4~2.3 TECU, GLONASS 内符精度

表 1 GPS TEC 和 GLONASS TEC 差异在全球不同经纬度台站的平均偏差以及内符精度

Tab.1 Difference between average and standard deviation of GPS TEC and GLONASS TEC over the world in different stations TECU

台站	经度	纬度	GPS TEC		GLONASS TEC	
			平均偏差	内符精度	平均偏差	内符精度
PALM	64.1°W	64.8°S	-0.7	1.2	-1.8	1.4
SYOG	39.6°E	69.0°S	0.5	0.8	1.2	1.8
CASI	110.5°E	66.2°S	0.3	1.0	0.5	1.2
CORD	64.5°W	31.5°S	-0.2	0.9	-2.2	1.5
RBAY	28.8°E	32.1°S	-0.8	0.4	-1.9	0.9
NNOR	115.8°E	31.0°S	0.4	0.6	-1.0	1.0
SAGA	78.6°W	1.6°S	0.5	2.3	-1.4	3.0
MBAR	30.7°E	0.6°S	-1.3	1.0	-3.9	2.3
NAUR	110.4°E	1.5°N	-2.4	1.9	-3.4	2.2
BRMU	64.7°W	32.3°N	-2.1	1.6	-2.1	1.8
WUHN	114.3°E	30.5°N	-0.4	1.5	-3.7	2.9
RAMO	34.8°E	30.6°N	-0.9	1.6	-0.7	2.0
WHIT	68.5°W	63.7°N	-0.6	1.0	-0.9	1.6
YAKT	129.7°E	62.0°N	-1.1	1.2	-1.9	2.1
SVTL	29.8°E	60.5°N	-1.6	0.6	-1.7	0.9

为0.9~3.0 TECU. 中高纬区域台站精度要优于低纬区域台站精度,如低纬赤道区域 NAUR 台站的 GPS TEC 和 GLONASS TEC 系统偏差分别为 -2.4 TECU 和 -3.4 TECU, SAGA 台站的 GPS TEC 和 GLONASS TEC 台站内符精度则为 2.3 TECU 及 3.0 TECU,要高于其他中高纬台站,这与低纬赤道地区的电离层活动水平以及特性有关.

3 中国区域差异性分析

为了更为细致地描述 GPS TEC 和 GLONASS TEC 在中国区域的差异特性,采用了中国地壳运动

监测网数据. 如图4所示,黑点表示所有的260个观测台站,星形点表示选取的用以比较的台站,这4个台站坐标与子午工程电离层测高仪坐标非常接近. 根据多项式模型分别利用 GPS 以及 GLONASS 观测值对中国区域进行建模(见式(1)).

3.1 GPS TEC 和 GLONASS TEC 差异与纬度的关系

图5给出海南和漠河上空在2014年7月至8月(DOY182至DOY239)的GPS TEC 和 GLONASS TEC 以及两者之间的差异值. 表2给出了GPS TEC 和 GLONASS TEC 差异在不同纬度台站的中值、中误差以及相关系数.

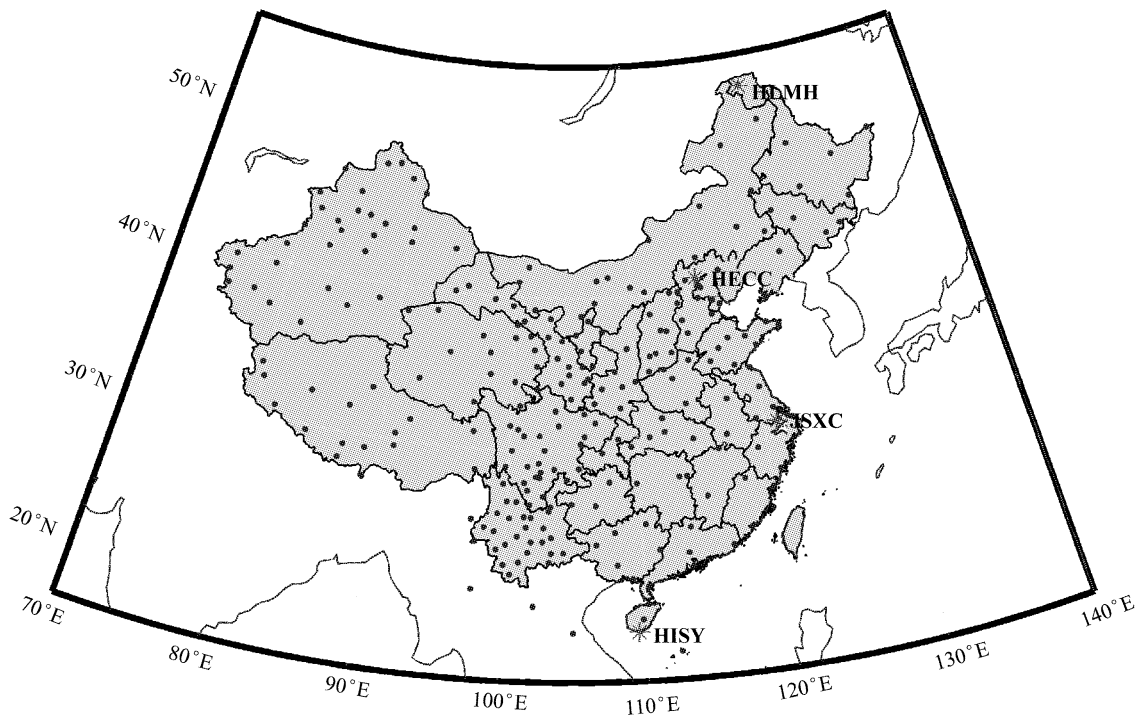


图4 中国地壳运动监测网台站分布

Fig.4 Distribution of CMONOC stations

(1) 与全球区域类似,中国区域 GPS TEC 精度优于 GLONASS TEC 精度. 在低纬区域,如海南台站 HISY, GPS TEC 内符精度约为 1.5 TECU, GLONASS TEC 内符精度约为 1.8 TECU. 在高纬区域,如漠河台站 HLMH, GPS TEC 内符精度约为 0.9 TECU, GLONASS TEC 内符精度约为 1.1 TECU.

(2) GLONASS TEC 比 GPS TEC 平均低约 0.2~0.4 TECU, 并且 GPS TEC 和 GLONASS TEC 的相关系数随着纬度的降低而下降,变化范围为 0.985~0.992,如表2所示. 图6给出了 GLONASS TEC 和 GPS TEC 的相关图.

表2 GPS TEC 和 GLONASS TEC 差异在不同纬度台站的中值以及中误差

Tab.2 Difference of GPS and GLONASS average and standard deviation over China in different stations

台站	经度	纬度	Δ TEC 中值	Δ TEC 标准差	相关系数
HISY	109.5°E	18.2°N	-0.4	3.39	0.985
JSXC	121.0°E	31.0°N	-0.3	1.34	0.987
HECC	115.8°E	40.9°N	-0.3	0.77	0.990
HLMH	122.5°E	52.9°N	-0.2	0.61	0.992

(3) 中国区域 GPS TEC 和 GLONASS TEC 差异的标准差会随着纬度降低而增大,两者在低中高纬地区的4个台站 Δ TEC中值分别为-0.4、-0.3、

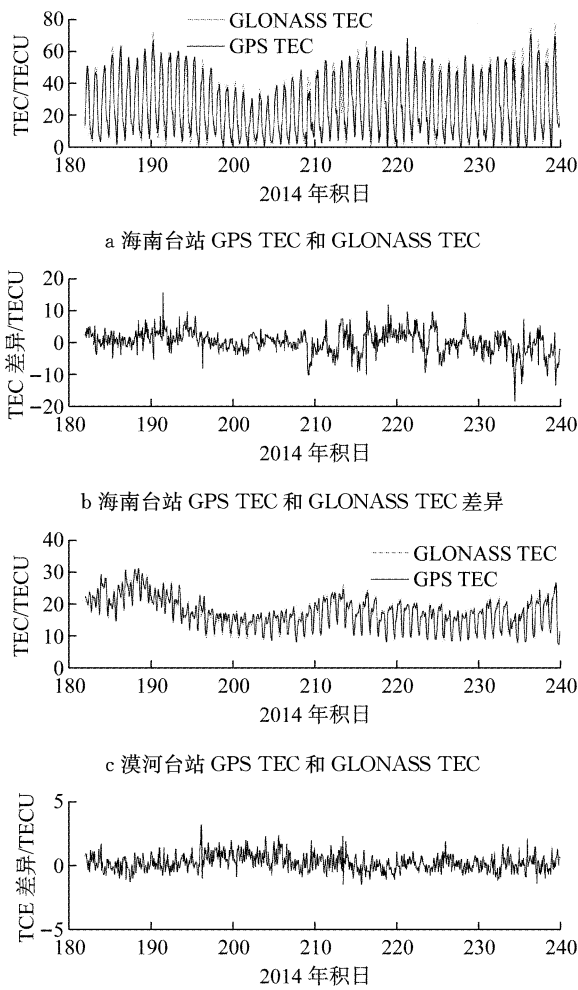


图 5 海南和漠河台站上空 GPS TEC 和 GLONASS TEC 差异

Fig.5 Difference between GPS TEC and GLONASS TEC over Hainan and Mohe stations

-0.3、-0.2 TECU.

(4) 中国区域内低纬台站的 GPS TEC 和 GLONASS TEC 在夜间(LT00~LT05)相对稳定,在日间(LT11~LT16)则变化相对剧烈,而高纬台站在日间和夜间相差不大,在夜间有时甚至比在日间更为剧烈,如表 3 所示.低纬 HISY 台站,GPS 和 GLONASS 日间 TEC STD(标准差)比夜间要大约 0.2~0.3 TECU;高纬 HLMH 台站,GPS 和 GLONASS 日间 TEC STD 比夜间甚至要小 0.2 TECU.

3.2 GPS TEC 和 GLONASS TEC 差异与卫星配置关系

GPS 卫星星座分布在六个倾角为 55°的圆形轨道上,周期为 11 小时 58 分,轨高为 19 130 km. GLONASS 卫星星座分布在三个倾角为 64.8°的轨

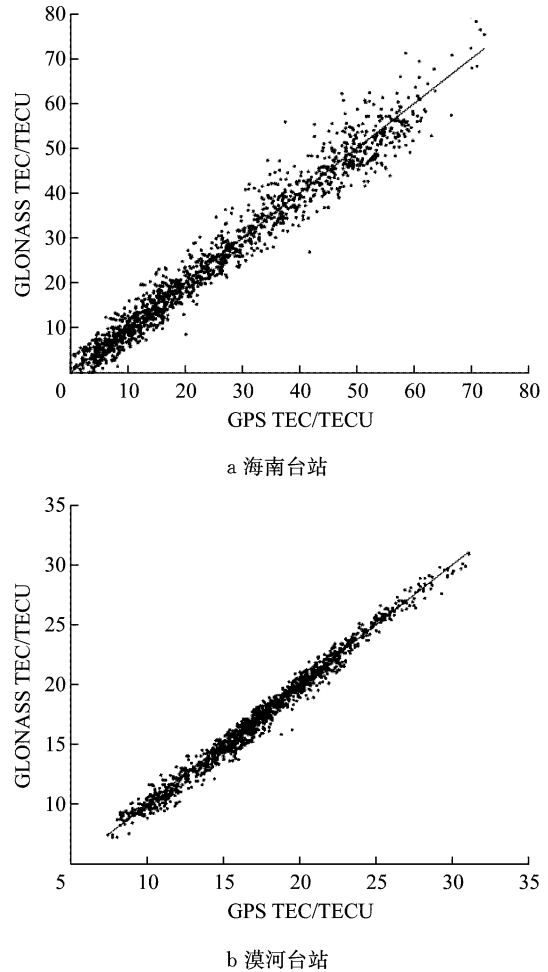


图 6 海南和漠河台站 GPS TEC 和 GLONASS TEC 相关系数图

Fig.6 GPS and GLONASS correlation coefficient map over Hainan and Mohe stations

表 3 海南和漠河台站日间和夜间 GPS TEC 和 GLONASS TEC 标准差差异

Tab.3 GPS and GLONASS TEC STDs over Hainan and Mohe stations in different local times

台站	夜间 GPS TEC STD	日间 GPS TEC STD	夜间 GLONASS TEC STD	日间 GLONASS TEC STD
HISY	1.49	1.63	1.74	2.01
HLMH	1.08	0.86	1.17	0.92

道上,周期为 11 小时 16 分,轨高为 21 150 km^[4].不同的轨高及卫星运行周期导致不同时空分布特征.图 7 和图 8 表征了上海 JSXC 台站上空 GPS 和 GLONASS 卫星可见持续时间及数目的差异,GPS 的可见持续时间要长,平均卫星数目比 GLONASS 要多约 2.6 颗星.

图 9 中,灰色代表 GLONASS 的穿刺点轨迹(IPP),黑色则代表 GPS 穿刺点轨迹.由于轨道倾角的差异,GLONASS 的穿刺点轨迹所在纬度明显高于 GPS,尤其在高纬地区覆盖面积更广.在中低纬地

区, GLONASS 穿刺点纬度要比 GPS 高 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$, 在高纬地区可达 $4^{\circ}\sim 5^{\circ}$, 这有利于高纬地区或极区电离层研究, 但中低纬的覆盖范围不及 GPS. 另外, 两个系统的频率和码率不同, GPS 的码率为 1.023 MHz, 码长为 1 023 个码片, GLONASS 的码率为 0.511 MHz, 码长为 512 个码片, 不同的码率及码长会导致不同的码分辨率和伪距噪声. GPS 较高的分辨率及较低的伪距噪声, 和前面提及较多的卫星数

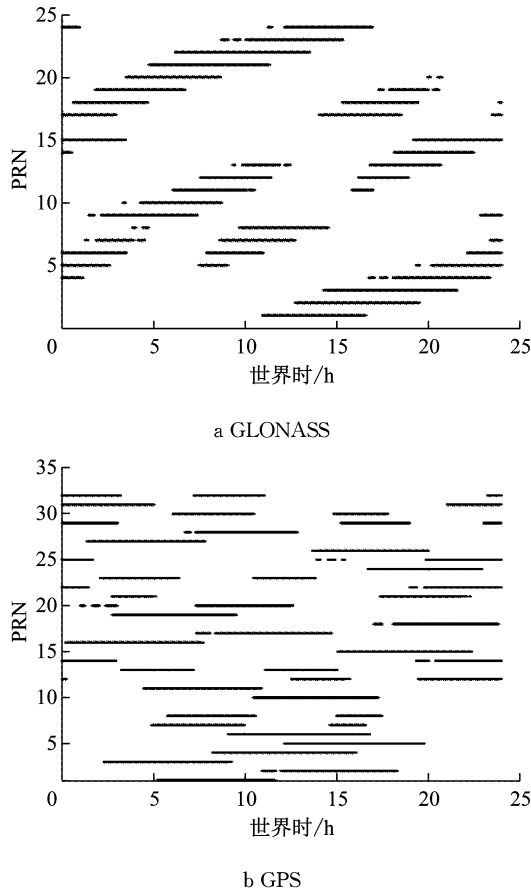


图 7 JSXC 台站上空 GPS 和 GLONASS 卫星可见持续时间

Fig.7 Passing time of GPS and GLONASS over JSXC station

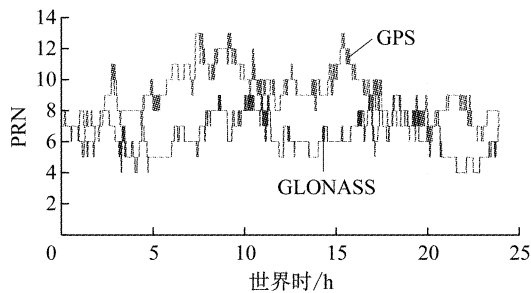


图 8 JSXC 台站上空 GPS 和 GLONASS 卫星数目
Fig.8 Satellite number of GPS and GLONASS over JSXC station

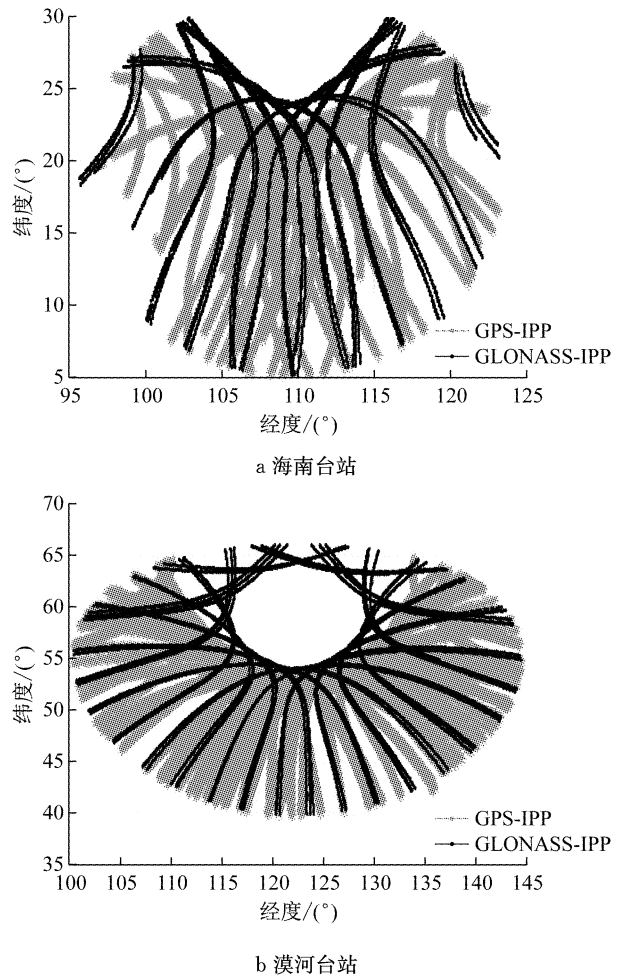


图 9 海南和漠河台站上空 GPS/GLONASS 穿刺点轨迹
Fig.9 GPS IPP and GLN IPP over Hainan and Mohe stations

目, 使得 GPS TEC 计算精度优于 GLONASS TEC^[12-14].

3.3 GPS 和 GLONASS 的 TEC 差异与 foF2 及本地时关系

为了进一步研究 TEC 差异与 F2 层临界频率 (foF2) 以及本地时的关系, 从子午工程海南和漠河台站获取了 2014 年 7 月至 8 月电离层测高仪数据, 对 foF2 时间序列进行了提取分析, 如图 10 和图 11 所示.

(1) foF2 的变化对本地时具有一定的依赖性. 如图 10 所示, 图 10a 和图 10b 分别表示 2014 年 7 月至 9 月海南和漠河台站 foF2 与本地时关系, 水平趋势线表示月均值. 低纬台站 foF2 日间 TEC STD 要显著大于夜间, 如海南台站 foF2 的日间 STD 为 1.94 MHz, 夜间 STD 为 1.65 MHz. 高纬台站 foF2 的日间与夜间 STD 的差异相近, 夜间 STD 甚至要略大于日间 STD, 如漠河台站日间 TEC STD 为 0.78 MHz, 而夜间 TEC STD 达到 1.12 MHz, 夜间反而更强, 这可能与夏季高纬地区的电离层夜间增

强现象有关^[15]。

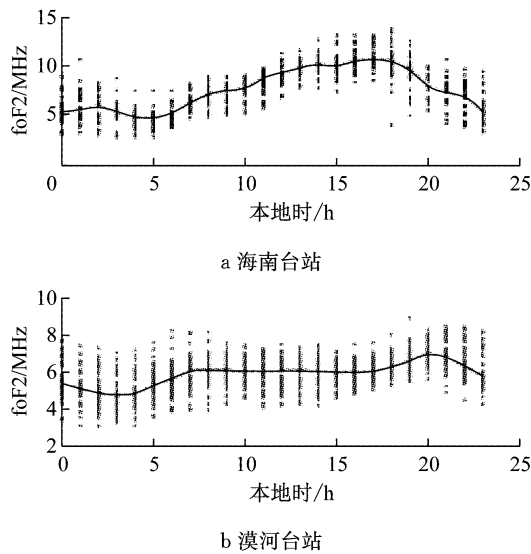


图 10 海南和漠河台站上空 foF2 与本地时关系

Fig.10 foF2 variation with local time over Hainan and Mohe stations

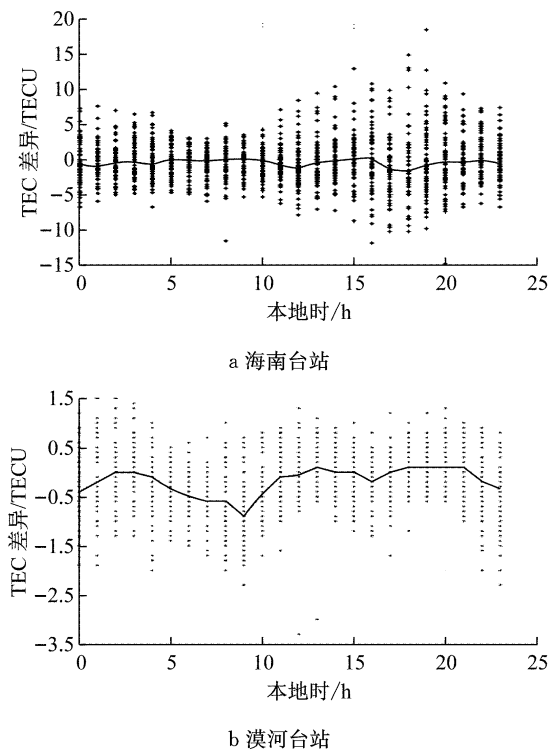


图 11 海南和漠河台站上空 TEC 差异与本地时关系

Fig.11 GPS TEC and GLONASS TEC difference variation with local time over Hainan and Mohe stations

(2) 低纬台站 TEC 差异在夜间相对稳定,在日间则变化相对剧烈,而高纬台站日间与夜间的系统差异变化并不明显.低纬海南台站,日间 TEC 差异的 STD 约为 3.6 TECU,夜间 TEC 差异的 STD 约为 2.6 TECU,而高纬漠河台站,日间 TEC 差异的

STD 约为 0.5 TECU,夜间 TEC 差异的 STD 为 0.6 TECU,如表 4 所示.

表 4 GPS TEC 和 GLONASS TEC 差异以及 foF2 的标准差在海南及漠河台站日间和夜间的对比

Tab.4 STD of GPS TEC and GLONASS TEC difference and foF2 over Hainan and Mohe stations

台站	日间 foF2 STD/MHz	夜间 foF2 STD/MHz	日间 ΔTEC STD/MHz	夜间 ΔTEC STD/MHz
海南	1.94	1.65	3.6	2.6
漠河	0.78	1.12	0.5	0.6

4 GPS 和 GLONASS 组合权重策略改进

基于以上 GPS TEC 和 GLONASS TEC 的差异性分析,综合本地时、纬度等相关关系,对 GPS 和 GLONASS 进行组合建模时,对 GLONASS TEC 的伪距观测权函数优化,如下所示:

$$W = \frac{\sin e}{\sigma^2} f(\varphi) \cos\left(1 + 0.5 \cos \frac{\pi(t + \beta/15)}{12} - 1\right)$$

式中: e 为观测值高度角; σ^2 为观测噪声; $f(\varphi)$ 为与纬度有关的权重系数; t 为世界时(UT); β 为地理经度.该函数假定在午夜时权重较大,正午时权重较小.GPS 和 GLONASS 组合建模,与 CODE GIM 采用一致的 256 个台站,并以 2014 年 DOY182 世界时 9 时数据差异来绘图.原 GLONASS 与 GPS 观测权重比为 5 : 1^[3],如图 12a 所示,原平均偏差为 0.41 TECU,RMS 为 3.1 TECU;权重修改后,如图 12b 所示,平均偏差为 0.3 TECU,RMS 为 2.6 TECU.平均偏差改进约 20%,RMS 改进约 15%.

5 结语

本文首先描述了基于 GPS 和 GLONASS 双频伪距相位观测值计算电离层的建模方法,对于全球区域采用 15 阶球谐函数模型,对中国区域则采用多项式模型.全球建模结果与 CODE GIM 计算结果相比,GLONASS 估计的 VTEC 和 DCB 精度明显较差.与 CODE GIM 相比,GPS VTEC RMS 及 GLONASS VTEC RMS 为 2.3 TECU 和 4.6 TECU.GPS C1W-C2W 的 DCB 差异在 ±0.15 ns 以内,RMS 为 0.06 ns.GLONASS C1P-C2P 的 DCB 在 ±0.60 ns 以内,RMS 为 0.30 ns,计算结果基本可靠.中国区域建模 TEC 的月数据分析表明,GPS 和 GLONASS 的 TEC 差异与纬度、星座配置以及本地时具有较明显关系.基于这些相关性,对于组合建模时 GLONASS 的伪距观测权函数,不再简单认定与 GPS 的权重比

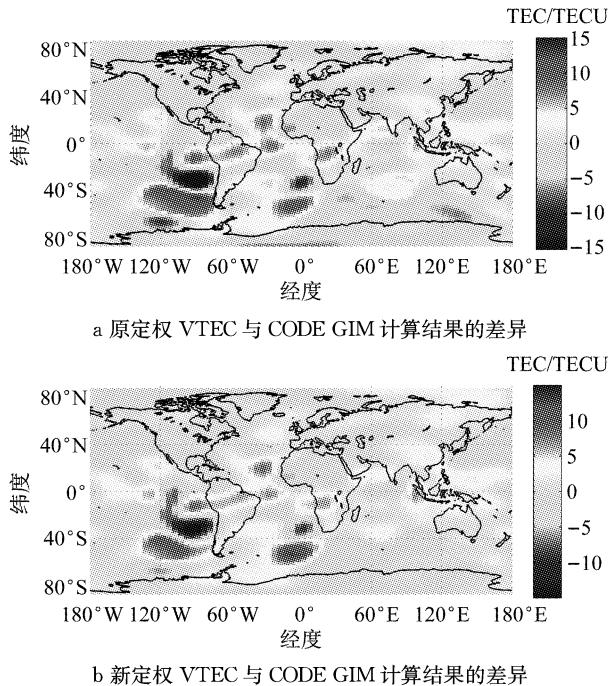


图 12 GPS 和 GLONASS 建模的定权策略改进前后的 VTEC 与 CODE GIM 计算结果的差异

Fig.12 Comparison of GPS and GLONASS VTEC difference before and after modification and CODE GIM calculation results

为 5:1,而是引入本地时、观测噪声以及纬度的关系来定义权函数,所得结果比之前平均偏差改进约 20%,RMS 改进约 15%。后续工作中,需引入长时间全球数据对权函数进行优化,以进一步提高模型精度。

参考文献:

- [1] COSTER A, GAPOSCHKIN E, THORNTON L. Real-time ionospheric monitoring system using GPS [J]. *Navigation*, 1992,39(2): 191.
- [2] ANGHEL A, CARRANO C, KOMJATHY A, *et al.* Kalman filter-based algorithms for monitoring the ionosphere and plasmasphere with GPS in near-real time [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, 71(1): 158.
- [3] 谢益炳,伍吉仓,陈俊平,等. GPS 和 GLONASS 组合的全球实测电离层 TEC 建模[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2014, 39(8):930.
XIE Yibing, WU Jicang, CHEN Junping, *et al.* Global ionospheric TEC modeling using measured GPS and GLONASS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8):930.
- [4] 陈鹏,陈家君. GPS/GLONASS 融合的全球电离层格网模型结果分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(5):70.
CHEN Peng, CHEN Jiajun. Analysis of global ionospheric grid model integrated GPS/GLONASS [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamic*, 2014, 34(5):70.
- [5] JAKOWSKI N, HEISE S, WEHRENPFFENING A, *et al.* GPS/GLONASS-based TEC measurements as a contributor for space weather forecast [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, 64:729.
- [6] SHAGIMURATOV I, VHERNYAK Y, ZAKHARENKOVA I, *et al.* Use of GLONASS for studying the ionosphere [J]. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2015, 9(5):770.
- [7] BIRCH M J, HARGREAVES J K, BAILEY G J. On the use of an effective ionospheric height in electron content measurement by GPS reception [J]. *Radio Science*, 2002, 37(1):15.
- [8] BLEWITT G. An automatic editing algorithm for GPS data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199.
- [9] MEGGS R W, MITCHELL C N. A study into the errors in vertical total electron content mapping using GPS data [J]. *Radio Science*, 2006, 41(1):8.
- [10] RRAMA R, NIRANJAN K. On the validity of the ionospheric pierce point (IPP) altitude of 350 km in the Indian equatorial and low-latitude sector [J]. *Annals of Geophysics*, 2006, 24: 2159.
- [11] SMITH D A, ARAUJO-PRADERE E A, MINTER C, *et al.* A comprehensive evaluation of the errors inherent in the use of a two-dimensional shell for modeling the ionosphere [J]. *Radio Science*, 2008, 43(6):23.
- [12] LI L X, ZHANG D H, ZHANG S R, *et al.* Influences of the day-night differences of ionospheric variability on the estimation of GPS differential code bias [J]. *Radio Science*, 2015, 50:339.
- [13] 薛军琛,宋淑丽,朱文耀,等. 区域 GPS 网实测电离层变化和卫星硬件延迟的可靠性研究 [J]. *天文学报*, 2012, 36:73.
XUE Junchen, SONG Shuli, ZHU Wenyao, *et al.* A study on the reliability of the ionospheric VTEC and satellite DCB derived from regional GPS network [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2012, 36:73.
- [14] VHERNYAK Y, MYLNIKOVA A, KUNITSYNC V. Influence of GPS/GLONASS differential code biases on the determination accuracy of the absolute total electron content in the ionosphere [J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, 55(6):763.
- [15] SINGH A K, SARDAR N, RIZVI S, *et al.* Night time enhancement of ionospheric parameters [J]. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 2013, 42:240.