

附加 IRI 模型约束的全球电离层建模及定位精度分析

杨玲¹, 周春元¹, 苏小宁², 李博峰¹

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用载波相位平滑伪距的全球电离层建模方法, 确定了添加国际参考电离层(IRI)模型约束和不同数据选取策略的有效性和必要性。实验分析表明, 采用 P_1 、 P_2 原始双频观测数据并添加 IRI 模型约束后, 部分历元电离层建模的整体效果得到了显著提高, 在观测数据不足的区域定位误差在北、东、高方向上分别减小了 0.260 m、0.146 m 和 0.103 m, 验证了该方法的有效性; 将 C_1 观测值作为低精度数据取代缺失 P_1 观测值后, 电离层建模的整体效果进一步提升, 但损失了模型精度, 在观测数据不足的区域定位误差在北、东、高方向上分别增加 0.524 m、0.111 m 和 1.549 m, 说明了利用 P_1 、 P_2 双频观测数据的必要性。

关键词: GNSS(Global Navigation Satellites System); 全球电离层; IRI (International Reference Ionosphere) 模型; 球谐函数; 定位精度

中图分类号: P228

文献标志码: A

Global Ionospheric Modeling and Positioning Accuracy Analysis with IRI Model Constraints

YANG Ling¹, ZHOU Chunyuan¹, SU Xiaoning², LI Bofeng¹

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The effectiveness and necessity of adding International Reference Ionosphere (IRI) model constraints and different data selection strategies are determined in the global ionospheric modeling with the carrier-to-code leveling method. The experimental analyses show that by using the original dual-frequency P_1 and P_2 observations with IRI model constraints, the overall effect of ionospheric modeling is significantly

improved at some epochs. Specifically, in those areas where observations are insufficient, the positioning errors are significantly reduced by 0.260 m, 0.146 m, and 0.103 m in the North, East, and Up directions respectively, which verifies the effectiveness of the method. After replacing the missing P_1 observations with C_1 observations as low-accuracy data, the overall quality of ionospheric modeling is further improved, although the model accuracy is slightly lost. In areas without sufficient observations, the positioning errors are increased by 0.524 m, 0.111 m, and 1.549 m in the North, East, and Up directions respectively, indicating the necessity of using the P_1 and P_2 dual-frequency observation data.

Key words: GNSS (Global Navigation Satellites System); global ionosphere; IRI (International Reference Ionosphere) model; spherical harmonics; positioning accuracy

电离层延迟是全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)进行导航定位的一种重要误差源,也是致使一般差分GNSS系统的定位精度随用户和基准站间的距离增加而迅速降低的主要原因^[1-2]。由电离层引起的GNSS导航信号时延可达数米甚至百米级,会严重削弱导航定位的精度和可靠性。目前GNSS可以长期连续监测电离层活动,基于双频观测数据利用载波相位平滑伪距的方法进行电离层总电子含量(total electron content, TEC)的提取被证明是一种精度较高的手段^[3-5]。基于提取的高精度电离层TEC观测数据,利用球谐函数可建立全球电离层模型(Global Ionosphere Map, GIM),反映电离层TEC的时空分

收稿日期: 2021-01-05

基金项目: 上海市自然科学基金面上项目(20ZR1462000); 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金(19R02)

第一作者: 杨玲(1986—), 女, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为GNSS异常探测、抗差估计和好性评估。E-mail: lingyang@tongji.edu.cn

通信作者: 周春元(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为电离层建模及导航定位增强。

E-mail: cyzhou@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

布特征和电离层活动规律,并为单频 GNSS 接收机用户提供电离层延迟改正,从而提高导航定位的精度^[6-7]。

从 1998 年起,IGS(International GNSS Service)电离层工作组的各分支中心基于 GNSS 双频观测数据开始独立解算全球电离层产品,IGS 提供的电离层产品为各分支中心产品的加权平均值^[8]。由于在海洋和南极区域测站数目较少,在这些区域利用球谐函数进行全球电离层建模时存在异常值现象,已有相关研究利用不等式约束最小二乘来消除建模区域的 TEC 负值^[9]。为弥补观测数据的不足,利用前一日的 GIM 产品或经验模型在数据缺失区域添加虚拟观测也被证明是有效的方法^[10-11]。本文利用最新的国际参考电离层(International Reference Ionosphere, IRI)模型 2016 版本在观测数据不足的区域添加虚拟观测值进行约束,分析模型的改善效果,并利用单点定位结果评估添加 IRI 模型约束的有效性。同时,对于只存在 C_1 、 P_2 观测值的测站,在 C_1 、 P_1 码间偏差改正效果不佳的情况下,考虑将 C_1 观测值作为低精度的 P_1 观测值,增加全球的观测数据,分析建模效果并在定位中评估数据选取策略的必要性。

1 全球电离层建模基本原理

1.1 求解 STEC 的方法

GNSS 原始观测量包含伪距和载波相位等,伪距观测方程可表示为

$$P_i = \rho_0 + d_{\text{ion},i} + d_{\text{trop}} + c(\delta_i^s - \delta_{r,i}) + d_i^s + d_{r,i} + \varepsilon \quad (1)$$

式中: P_i 为载波 i ($i = 1, 2$) 上的伪距观测值; ρ_0 为卫星和接收机之间的真实距离; $d_{\text{ion},i}$ 为电离层延迟量; d_{trop} 为对流层延迟量; δ_i^s 、 $\delta_{r,i}$ 为卫星和接收机钟差; d_i^s 、 $d_{r,i}$ 分别为卫星和接收机的码延迟量, s 和 r 分别为卫星和接收机编号; c 为光速; ε 为随机噪声。

在进行电离层延迟和差分码偏差(differential code bias, DCB)估计时,通常对 P_1 、 P_2 观测值进行组合,得到组合的 P_4 观测值为

$$\begin{cases} P_4 = P_1 - P_2 = (d_{\text{ion},1} - d_{\text{ion},2}) + c \cdot D^s + c \cdot D_r \\ d_1^s - d_2^s = c \cdot D^s, d_{r,1} - d_{r,2} = c \cdot D_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: $d_{\text{ion},1}$ 、 $d_{\text{ion},2}$ 分别为 L_1 、 L_2 载波上的电离层延迟; D^s 、 D_r 分别为卫星和接收机差分码偏差。为获取更精确的 DCB 估计,需利用载波 L_4 ($L_4 = L_1 - L_2$) 观测值对 P_4 观测值进行逐弧段的平滑处理。在进行载

波相位平滑伪距之前,应利用 MW 组合或电离层残差组合检测历元中的周跳和粗差,并进行剔除^[1]。

根据电磁波信号穿过电离层介质时群速、相速的关系, GPS 测距码伪距和载波相位观测值所受到的电离层延迟误差大小相等、符号相反^[12]。仅顾及 f^2 项时,电磁波在电离层中传播时所受到的电离层延迟可表示为

$$d_{\text{ion},i} = \frac{40.28}{f_i^2} \cdot \int N_e \cdot ds = \frac{40.28}{f_i^2} \cdot I \quad (3)$$

式中: f_i 表示载波 i 的频率; $\int N_e \cdot ds$ 表示沿着信号传播路径 s 对电子密度 N_e 进行积分,并将其称为倾斜路径上的总电子含量 I , I 以 TECU (total electron content unit) 为单位, 1 TECU 表示每平方米含有 10^{16} 个电子。将式(3)代入式(2)中,经过变换可得到

$$k \cdot P_4 = I + k \cdot c \cdot D^s + k \cdot c \cdot D_r \quad (4)$$

其中, $k = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40.28(f_2^2 - f_1^2)} = -9.524\ 370\ 022\ 8$ 。

1.2 球谐函数模型

电离层分布在距离地面 60~2 000 km 高度范围内,信号传播路径的高度角和方位角各不相同,为将倾斜路径的总电子含量转化到天顶方向,利用单层模型将路径上的所有自由电子都集中在 F_2 层高度处。转换关系可描述为^[1-2]

$$\begin{cases} V = F(z) \cdot I \\ F(z) = \cos \left(\arcsin \left(\frac{R}{R+H} \sin(\alpha z) \right) \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 为地球半径,取 6 371 km; H 为近似单层高度; α 为常数,取 0.978 2。

为适应电离层的区域特征,通常采用球谐函数模型进行全球电离层建模。球谐函数模型可表示为^[13]

$$V(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (A_{nm} \cos ms + B_{nm} \sin ms) \quad (6)$$

式中: $V(\beta, s)$ 为地面上空某一高度的球壳上纬度为 β 、经度为 s 处的垂直总电子含量; n_{max} 为拟合时采用的最大阶数; β 为电离层穿刺点地心纬度; $s = \lambda - \lambda_0$ 是日固坐标系中穿刺点经度, λ 、 λ_0 分别为穿刺点的经度和真太阳时; A_{nm} 、 B_{nm} 为全球电离层模型系数; \tilde{P}_{nm} 是标准化的勒让德多项式。

将式(4)、(5)和(6)进行结合并变换,可得到组合观测方程为

$$kF(z) \cdot P_4 = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\beta) (A_{nm} \cos ms + B_{nm} \sin ms) + kF(z) \cdot c \cdot (D^s + D_r) \quad (7)$$

式中: A_{nm} 、 B_{nm} 为待求电离层模型参数; D^s 、 D_r 即为待求卫星和接收机的差分码偏差。由于组合观测方程(7)是奇异的, 通常添加所有 GPS 卫星 DCB 和为零的基准约束, 实现观测方程的满秩, 从而分离卫星和接收机的 DCB。

1.3 IRI 模型约束

IRI 模型是根据大量电离层探空数据得到的电离层经验模型, 可计算海拔 50~2 000 km 范围内的电子密度等参数, 2 000 km 以上至 GPS 卫星轨道高度范围内的电子密度可根据 IRI 模型外推获得^[14-15]。2 000 km 以下电子密度的方程式可描述为

$$f(h) = y_j e^{\omega(h-h_j)} \quad (8)$$

式中: $f(h)$ 为高度 h 对应的电子密度; y_j 为高度 h_j 对应的电子密度; ω 为待求系数。根据最小二乘解算系数 ω 后可外推 2 000 km 高度以上的电子密度, 累加 50 km 至 GPS 卫星轨道高度范围内的电子密度即可得到总电子含量。

由于 IGS 测站在大西洋、南半球部分海洋地区分布较为稀疏, 导致该地区无穿刺点覆盖。在穿刺点空白区域逐历元利用 IRI 模型计算虚拟穿刺点处的 VTEC 作为虚拟观测值参与球谐函数建模, 实现对全球电离层模型的约束。由于 IRI 模型计算的 VTEC 精度较低, 通常降低虚拟观测值的权重, 而平滑后的 P_4 计算所得 VTEC 权重默认为单位权^[16]。虚拟观测方程为

$$V(\beta_{\text{IPP}}, s_{\text{IPP}}) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\beta_{\text{IPP}}) (A_{nm} \cos ms_{\text{IPP}} + B_{nm} \sin ms_{\text{IPP}}) \quad (9)$$

式中: β_{IPP} 、 s_{IPP} 为所添加虚拟观测点的经纬度坐标。在进行模型约束时, 通常需要经过一轮的解算, 求得卫星和接收机的 DCB 参数, 将式(7)转化为式(6)。考虑到卫星和接收机 DCB 短期内的稳定性, 亦可利用前一日的卫星和接收机 DCB 参数代入式(7), 得到式(6)中纯净的 VTEC 观测方程。最终联立式(6)和式(9)进行解算, 便可得到附加 IRI 模型约束的全球电离层模型。

2 实验及分析

实验选取 2019 年 10 月 2 日(年积日为 275)全球

420 个测站的观测数据, 数据采样率为 30 s, 其中 205 个测站包含 P_1 、 P_2 伪距双频观测数据, 其余 215 个测站 P_1 观测值缺失, 但存在 C_1 、 P_2 双频观测数据。实验中利用 GPS 单系统进行建模, 采用 4 种建模方案: ①基于 P_1 、 P_2 观测值的全球电离层建模, 相关结果记为 P1-P2; ②在方案 1 的基础上, 在 RMS 值超限区域利用 IRI 模型进行约束, 相关结果记为 P1-P2-Limited; ③将 C_1 观测值作为低精度数据取代缺失的 P_1 观测值, 相关结果记为 C1-P2; ④在方案 3 的基础上, 在 RMS 超限区域利用 IRI 模型进行约束, 相关结果记为 C1-P2-Limited。

通过数据预处理, 可获得方案 1 和方案 3 测站上空的电离层穿刺点分布情况如图 1a 和 1b 所示。可见, 由于东太平洋和南半球海洋区域测站分布较少, 其大气上方无电离层穿刺点分布。经过首轮解算, RMS 值超限区域基本位于此范围内, 因此方案 2 重点考虑在 A、B、C、D 4 个区域添加虚拟观测值, 如图 1a 所示; 方案 4 重点考虑在 E、F、G 3 个区域添加虚拟观测值, 如图 1b 所示。

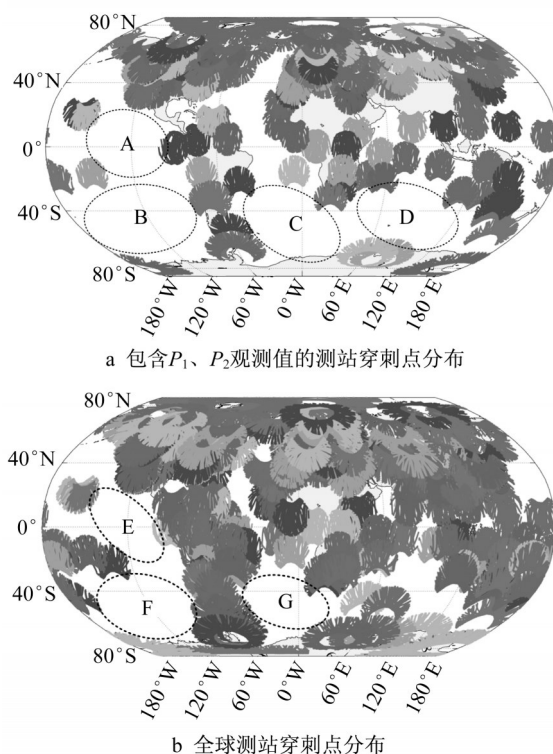


图 1 电离层穿刺点分布

Fig. 1 Distribution of IPP

采用如表 1 中的设置及处理策略进行解算, 得到卫星、接收机 DCB 和电离层参数, 并利用电离层参数建立全球的电离层模型。

表 1 设置及处理策略

Tab. 1 Strategies for setting and processing

设置及处理类别	设置及处理策略
观测量	GPS:P ₁ 、P ₂ 、C ₁ 、L ₁ 、L ₂
卫星轨道	精密星历内插
截止高度角	15°
周跳探测	MW 组合
近似 F ₂ 层高度	450 km
球谐模型展开阶数	15 阶
电离层参数预报频率	2h/组
添加虚拟观测 RMS 阈值	3 TECU
虚拟观测点插值密度	0.25° × 0.50° (纬度 × 经度)
虚拟观测值权重 ^[6]	0.05
C ₁ 观测值权重	0.5

2.1 模型解算精度分析

实验中,方案 2 和方案 4 加入了虚拟观测值,但方案 1 与方案 2、方案 3 与方案 4 的 DCB 解算结果相同,仅在添加虚拟观测值后电离层参数的求解中存在差异。将解算的 DCB 结果与 IGS 提供的 DCB 产品进行对比,评定方案 1 与方案 3 中模型参数的解算

精度。统计 2 种方案下卫星 DCB 的解算偏差及偏差分布如图 2a 和 2b 所示,接收机 DCB 的解算偏差及偏差分布如图 3a 和 3b 所示。

可以看出,利用 P₁、P₂ 观测值时,由于精码伪距具有较高的精度,虽然参与解算的测站数较少,但卫星 DCB 的解算偏差均在 0.1 ns 之内,90% 的接收机 DCB 解算偏差在 0.6 ns 之内;P₁ 观测值缺失时,将 C₁ 观测值作为低精度的 P₁ 观测值后,所有测站的观测数据均可参与解算,90% 的卫星 DCB 解算偏差在 1 ns 之内,90% 的接收机 DCB 解算偏差在 0.8 ns 之内。对比 C₁ 作为低精度 P₁ 观测值前后,DCB 解算精度有所下降,分析原因可能为:C₁ 码本身测距精度较低,且 C₁ 码与 P₁ 码之间存在码间偏差,将 C₁ 作为低精度的 P₁ 观测值后,虽然观测数据增加,但由于添加的观测值精度较低,导致参数解算精度整体略有下降,但大部分的 DCB 解算偏差仍在 1 ns 之内,这也验证了模型参数解算的有效性。

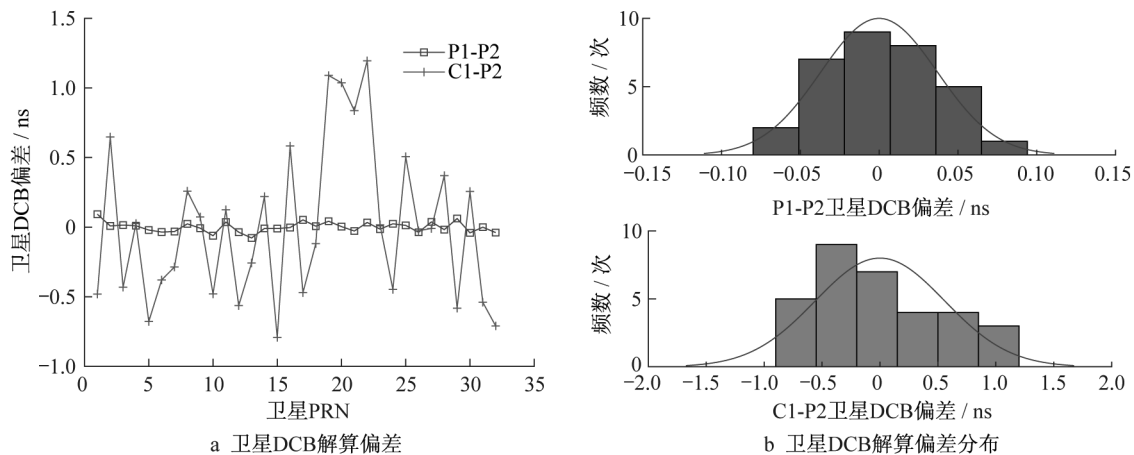


图 2 方案 1、3 卫星 DCB 解算偏差对比

Fig. 2 Comparison of satellite DCB solution deviations of schemes 1 and 3

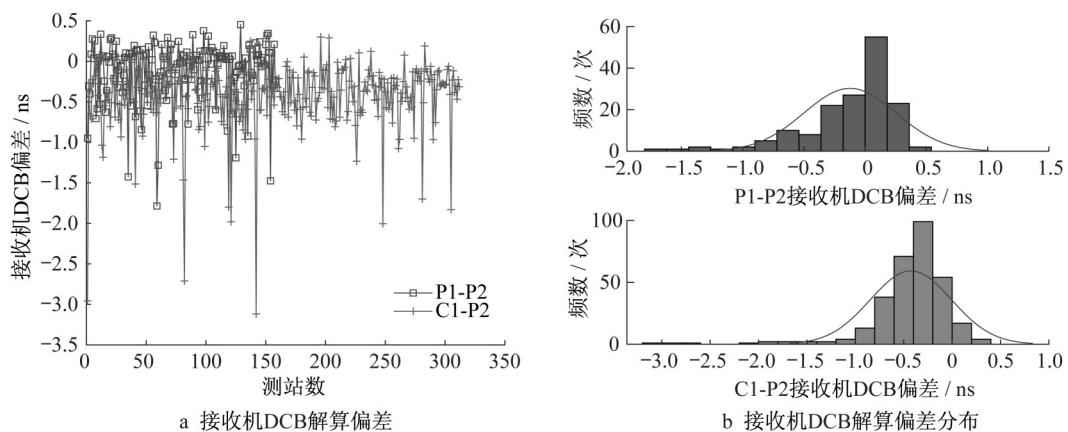


图 3 方案 1、3 接收机 DCB 解算偏差对比

Fig. 3 Comparison of receiver DCB solution deviation of schemes 1 and 3

将每种方案解算的12组电离层参数利用球谐函数模型展开,加入历元、经纬度信息可得到一天内任意时刻、任意经纬度的电离层VTEC值。图4分别统计了2019年10月2日0:00、6:00、12:00和18:00时刻不同方案的电离层建模结果与IGS产品的差值,在默认IGS提供的电离层产品精度较高的情况下,分析不同方案建模结果的优劣。

该图显示,方案1中,由于含有 P_1 、 P_2 观测值的测站在海洋区域数量较少且分布不均匀,导致在太平洋东部、大西洋中部和印度洋南部海域建模结果存在异常值。方案2中添加虚拟观测值后,6:00和12:00时刻在太平洋南部和印度洋南部海域的异常值范围显著减小,建模效果显著提升;0:00时刻在印度洋西南部的异常值改善效果显著,而太平洋大

部分异常值改善效果甚微;18:00时刻2种方式的建模效果无显著差异。结合对比其他时刻的建模结果表明,添加虚拟观测值后,观测数据在全球得到充分补充,建模效果在部分区域提升明显,但较为稀疏的虚拟观测数据对模型的约束力并不强,使得改善效果存在不确定性,并不能从根本上解决观测数据缺失的问题。

方案3中将 C_1 观测值作为低精度的 P_1 观测值后,观测数据明显增多,与方案1相比建模异常值的范围显著缩小,全球整体建模效果提升显著,但在东太平洋无测站的海域依然存在异常值现象。方案4中添加虚拟观测值后,由于添加虚拟观测的范围有限且精度较低,与方案3相比各历元的建模效果无显著差异。

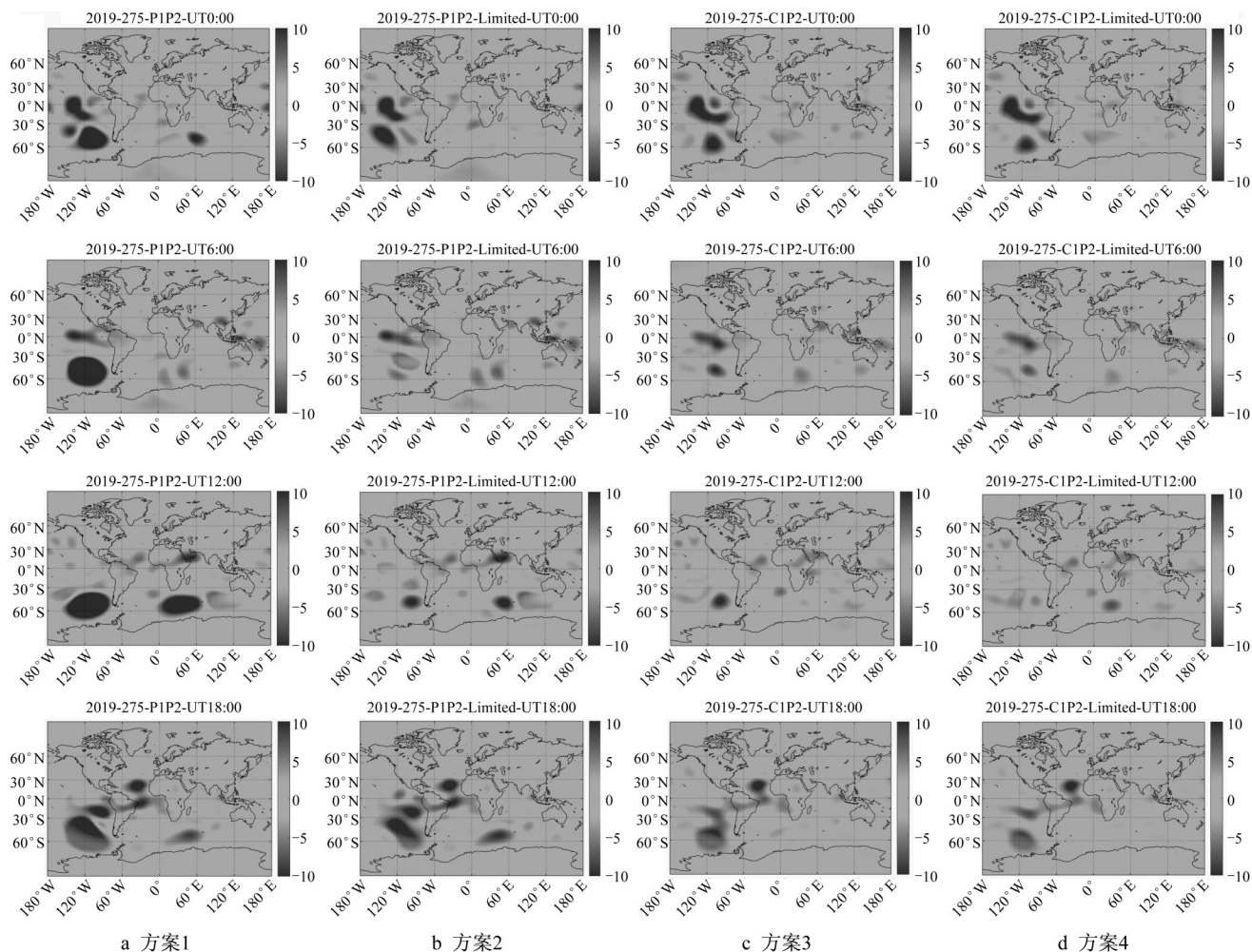


图4 附加IRI模型约束前后全球电离层VTEC对比(单位:TECU)

Fig. 4 Comparison of global ionospheric VTEC after addition of IRI model constraints (unit: TECU)

为客观分析建模效果,统计了4种方案各历元时刻电离层VTEC值与IGS参考值差值的平均值(Mean)、均方根(RMS)和标准差(STD)如图5所

示,4种方案所有历元各统计量的均值如表2所示。

可以看到,与方案1相比,方案2中添加IRI模型约束后,8:00和20:00时刻的各统计量绝对值都有

所减小,说明模型的内外符合精度都有提升,模型改善效果显著;其他历元时刻的 Mean 的绝对值均有所增大,RMS 值均有不同程度的减小。统计所有历元时刻的 Mean、RMS 和 STD 平均值后发现,Mean 平均值的绝对值由 0.41 增大到 0.69,RMS 和 STD 的平均值分别由 4.22、4.14 减小为 2.99、2.85,模型内符合精度降低而外符合精度有所提高,分析原因可能为添加虚拟观测值后在观测数据较多的区域模型精度略有降低,但在观测数据缺失区域建模效果提升显著。所有历元附加约束前后 STD 值均有不同程度的减小,说明附加 IRI 模型约束可显著降低模型中异常值的概率,改善了建模效果。

方案 3 中利用部分 C_1 观测值作为低精度 P_1 观测值后,与方案 1 相比各历元 Mean 值的绝对值均有所增大,而 RMS 值除 14:00 时刻外均减小,说明加入额外的低精度观测数据后,模型内符合精度降低而外符合精度提高。方案 4 中添加 IRI 模型约束后,整体建模效果略好于方案 3,但并无显著差异。总体而言,利用 IRI 模型添加虚拟观测值和利用 C_1 观测值作为低精度 P_1 观测值的目的是为了增加观测量,扩大电离层穿刺点的覆盖范围,提升全球整体建模的效果,但是由于添加的多余观测数据精度往往更低,因此会降低电离层模型的内符合精度。

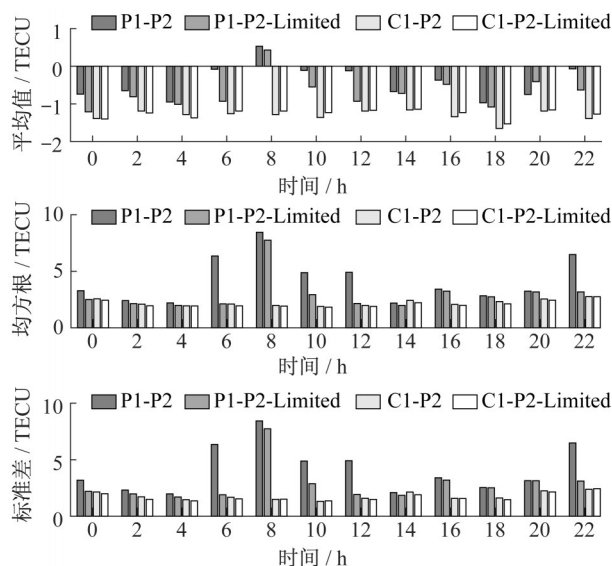


图 5 附加 IRI 模型约束前后各统计量对比

Fig. 5 Comparison of statistics after addition of IRI model constraints

2.2 定位精度分析

为分析不同方案电离层建模效果的优劣,采用

表 2 不同方案全部历元统计量均值统计

Tab. 2 Mean value of all epoch statistics in different schemes

方案	平均值	均方根	标准差
1	-0.41	4.22	4.14
2	-0.69	2.99	2.85
3	-1.31	2.22	1.78
4	-1.26	2.12	1.69

(单位:TECU)

伪距单点定位的方式评定不同方案所得电离层产品的定位效果。考虑到全球 IGS 测站的分布及赤道附近电离层双驼峰结构的影响,以经度 0° 、纬度 30°N 和 30°S 为分界线将全球划分为 6 大区域并标记为 A、B、C、D、E 和 F,每一区域选取 6 个测站的观测数据用于定位精度分析,区域划分及参与测试的测站分布如图 6 所示。

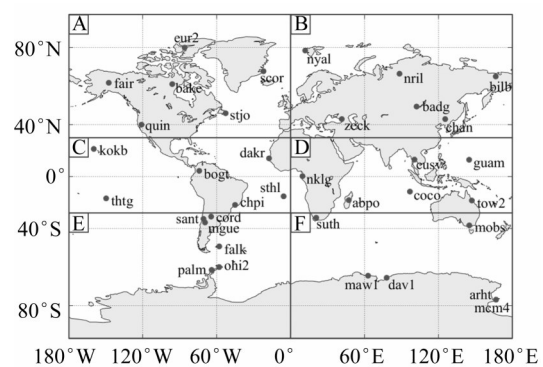


图 6 区域划分及测试测站分布

Fig. 6 Area division and distribution of test stations

在定位中,分别加入 4 种方案所得到的电离层产品用于修正电离层延迟量,同时添加 Klobuchar 模型和 IGS 提供的 GIM 产品作为对比。为客观地分析不同方案电离层产品的定位效果,统计了各区域 6 个测站定位偏差的平均 RMS 分布如图 7 所示,各方向的平均定位误差(95% 显著水平)如图 8 所示。可以看出,4 种方案电离层产品的定位效果普遍优于 Klobuchar 模型,在观测数据较多的 A、B、D 和 F 区域,利用不同方案电离层产品的定位效果与 IGS 提供的 GIM 产品效果相当,而在缺少观测数据的 C 和 E 区域,不同方案电离层产品的定位效果表现出较大的差异。

可以发现,方案 2 中添加虚拟观测值之后,与方案 1 相比在测站数据较多的 A、B、D 和 F 区域各方向的 RMS 整体有略微增大的趋势,N、E、U 方向 RMS 值增大的平均值为 0.015 m、0.001 m 和 0.002 m。

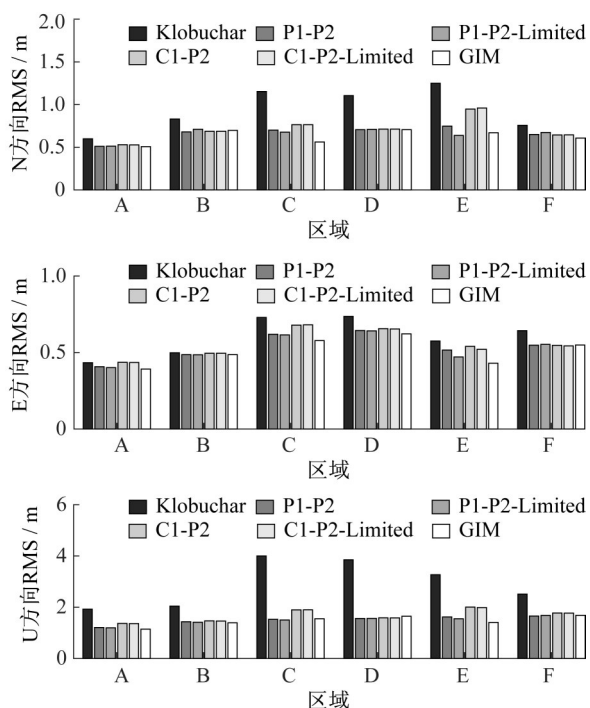


图7 不同方案各区域平均RMS分布

Fig. 7 Average RMS distribution of different schemes in each area

而在测站数据较少的C和E区域,各方向上的RMS显著减小,其中以E区域N、E方向最为明显,RMS分别减小0.109 m、0.073 m,U方向减小0.045 m。图8显示,添加虚拟观测值后,在A、B、D和F区域各方向定位误差整体略微增大,N、E、U方向定位误差平均增加0.016 m、0.003 m和0.012 m,在观测数据较少的C区域定位误差略微减小,而观测数据最少的E区域定位误差减小更为显著,N、E、U方向上分别减小0.260 m、0.146 m和0.103 m。说明在加入低精度虚拟观测值之后,对于观测数据较多的区域,重新解算电离层模型时参数精度有所下降,影响了该区域电离层模型的精确建立,最终导致定位效果略有下降。而在观测数据不足的南半球海洋区域,添加低精度虚拟观测值一定程度上弥补了观测数据不足的问题,改善了电离层参数中异常值的出现,增加了该区域电离层模型的整体符合度,并一定程度上提升了该地区的定位效果。

方案3中将 C_1 观测值作为低精度 P_1 观测值之后观测数据显著增多,与方案1相比,在观测数据较多的A、B、D和F区域RMS和定位误差有略微增大趋势,而在观测数据不足的C和E区域RMS和定位误差的增大趋势则更为显著,其中E区域的RMS在N、E、U方向上分别增加0.200 m、0.024 m和0.384

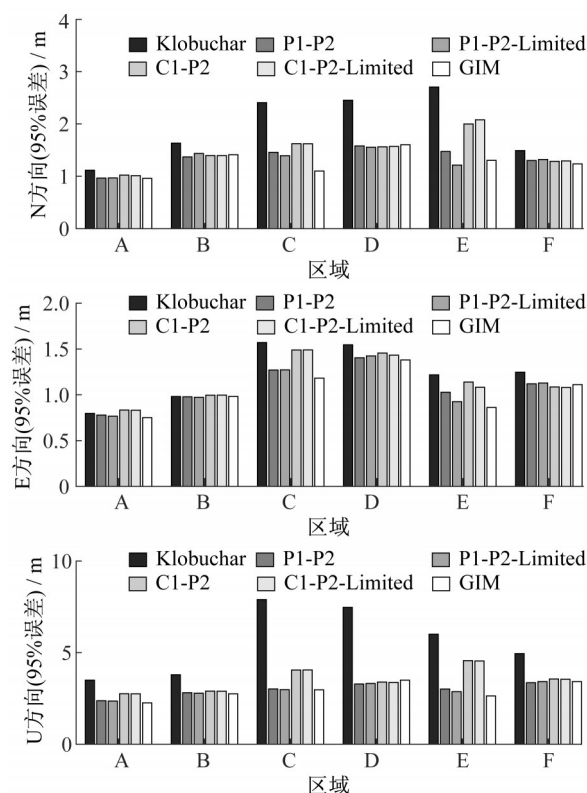


图8 不同方案各区域平均定位误差(95%显著水平)

Fig. 8 Average positioning error of different schemes in each area (95% significant level)

m,定位误差在N、E、U方向上分别增加0.524 m、0.111 m和1.549 m,方案3的定位效果整体不如方案1,说明利用 C_1 观测值作为低精度的 P_1 观测值后,虽然图4a和4c直观显示全球整体建模效果有所提升,但是一定程度上损失了模型的精度,导致在测试区域采用方案3的电离层模型的定位效果并不如方案1。

以上分析表明,4种方案中方案2整体最优,与方案1相比,虽然在测站数目较多区域的定位效果有所下降,但下降幅度仅在厘米级,而在缺少观测数据的区域,定位效果的提升能达到分米级,且在严重缺少观测数据的E区域最为明显。因此,在利用载波相位平滑伪距的方法进行全球电离层建模时,选取利用包含 P_1 、 P_2 双频观测值的观测数据是非常有必要的,在观测数据严重不足的区域,利用IRI模型添加虚拟观测值能在保证定位精度的基础上提升模型整体的建模效果,而存在 C_1 、 P_2 观测值时,则不建议将 C_1 观测值作为低精度的 P_1 观测值参与电离层模型的建立。

3 结论

采用载波相位平滑伪距的全球电离层建模方法,分析对比 4 种电离层建模方案的效果差异,评定了不同方案所得到的电离层产品在单频伪距单点定位中的改善效果,最终确定了不同数据选取策略和添加 IRI 模型约束的必要性和有效性。

基于 P_1 、 P_2 原始双频观测数据添加 IRI 模型约束后,部分历元电离层建模整体效果改善显著,异常值出现范围显著缩小,但是该方法降低了模型的内符合精度,且无法从根本上解决观测数据缺失的问题。在定位效果上,添加 IRI 模型约束后,在观测数据不足的区域定位误差显著减小,N、E、U 方向上分别减小 0.260 m、0.146 m 和 0.103 m。因此在进行全球电离层建模时,利用 IRI 模型在观测数据不足区域进行约束是非常有效的。

将 C_1 观测值作为低精度 P_1 观测值后,电离层整体建模效果明显提升,但模型精度损失严重,数据不足区域的定位误差在 N、E、U 方向上分别增加 0.524 m、0.111 m 和 1.549 m。因此进行全球电离层建模时,利用包含 P_1 、 P_2 双频观测值的观测数据是非常有必要的,而存在 C_1 、 P_2 观测值时,则不建议将 C_1 观测值作为低精度的 P_1 观测值参与电离层模型的建立。

作者贡献声明:

杨 玲:统筹论文的研究工作,指导论文的研究方向并修改论文。

周春元:查找文献、分析数据,负责论文的撰写。

苏小宁:提供部分测站数据及相关问题的咨询。

李博峰:参与部分数据分析,提供修改意见。

参考文献:

- [1] 刘经南,陈俊勇,张燕平,等. 广域差分 GPS 原理和方法 [M]. 北京:测绘出版社,1999.
LIU Jingnan, CHEN Junyong, ZAHNG Yanping, *et al.* The theory and method of wide area differential GPS [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999.
- [2] 李征航,张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法 [M]. 武汉:武汉大学出版社,2009.
LI Zhenghang, ZHANG Xiaohong. New techniques and precise data processing methods of satellite navigation and positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
- [3] BRUNINI C, AZPILICUETA F J. Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content [J]. Journal of Geodesy, 2009, 83: 773.
- [4] BRUNINI C, AZPILICUETA F. GPS slant total electron content accuracy using the single layer model under different geomagnetic regions and ionospheric conditions [J]. Journal of Geodesy, 2010, 84: 293.
- [5] ZHANG B C, TEUNISSEN P J G, YUAN Y B, *et al.* Joint estimation of vertical total electron content (VTEC) and satellite differential code biases (SDCBs) using low-cost receivers [J]. Journal of Geodesy, 2018, 92: 401.
- [6] 王成,王解先,段兵兵. 附有国际参考电离层约束的全球电离层模型 [J]. 武汉大学学报:信息科学版,2014,39(11):1340.
WANG Cheng, WANG Jiexian, DUAN Bingbing. Global ionospheric model with international reference ionosphere constraint [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(11): 1340.
- [7] JAKOWSKI N. Ionosphere monitoring [M]//TEUNISSEN P J, MONTENBRUCK O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham: Springer, 2017.
- [8] FELTENS J. IGS ionosphere models comparison [R]. Darmstadt: European Space Agency, 1998.
- [9] ZHANG H P, XU P L, HAN W H, *et al.* Eliminating negative VTEC in global ionosphere maps using inequality-constrained least squares [J]. Advances in Space Research, 2013, 51: 988.
- [10] 刘磊,姚宜斌,孔建,等. 附加 GIM 约束的全球电离层建模 [J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(1):67.
LIU Lei, YAO Yibin, KONG Jian, *et al.* Global ionosphere modeling with GIM constraint [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(1): 67.
- [11] WANG C, SHI C, ZHANG H P, *et al.* Improvement of global ionospheric VTEC maps using the IRI 2012 ionospheric empirical model [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2016, 146: 186.
- [12] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, COLLINS J. Global positioning system: Theory and practice [M]. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [13] JIN R, JIN S G, FENG G P. M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases [J]. GPS Solution, 2012, 16: 541.
- [14] BILITZA D, MCKINNELL LA, REINISCH B, *et al.* The international reference ionosphere today and in the future [J]. Journal of Geodesy, 2011, 85: 909.
- [15] BILITZA D, ALTADILL D, TRUHLIK V, *et al.* International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions [J]. Space Weather, 2017, 15(2): 418.
- [16] 王月良,李博峰,王苗苗,等. 附加经验模型虚拟观测的全球电离层球谐函数建模 [J]. 地球物理学进展,2017,32(3):1043.
WANG Yueliang, LI Bofeng, WANG Miaomiao, *et al.* Global ionosphere spheric harmonic function modeling with virtual TEC observations of empirical models [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1043.