

GPS 全球电离层 TEC 的并行算法建模 及初步结果分析

高广辉^{1,2}, 王小亚¹, 吴 斌¹

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 根据高精度卫星导航定位和全球电离层活动监测的需要, 利用全球 370 多个 GPS 基准站的双频相位实测数据, 监测全球电离层总电子含量变化和 GPS 卫星及接收机的 *DCB*。由于数据量大、数据处理时间长, 很难实现高精度快速建模, 为此我们采用 OpenMP 并行算法来加快数据处理速度。实验表明, 相对于串行处理, 并行处理在 8 核服务器下能加速 7 倍以上, 在 48 核服务器下能加速超过 40 倍。将本文的初步建模结果与 CODE、JPL 等分析中心的结果进行比较, 表明用该方法建立的模型是可靠的。其卫星 *DCB* 结果相对于 CODE 发布的结果精度为 0.4 ns, 相对于 JPL 发布的结果其精度达到 0.3 ns。其测站 *DCB* 相对于 2 个分析中心结果的精度均优于 2 ns, 垂直总电子含量相对于各分析中心的 GIM 产品的精度都在 5.3 TECU 以内, 相对于 CODE 的结果的精度最高, 达 4 TECU。

关 键 词: GPS; 全球电离层 TEC 模型; *DCB*; 并行算法

中图分类号: P228.4, P122

1 引 言

电离层延迟是 GPS 定位和导航的主要误差源之一, 其大小主要取决于传播路径上总电子含量和电磁波的频率。在正常太阳活动条件下, 这个延迟量通常在几米到几十米之间, 但在严重电离层扰动情况下, 该值可能超过 100 m。在美国取消 SA (Selective Availability) 政策后, 电离层影响成为 GPS 定位和导航的最大误差源。在高精度 GPS 定位中, GPS 观测值必须进行电离层改正。电离层总电子含量 (TEC, Total Electron Content) 的变化可以通过电离层探测仪、空基 GPS 无线电掩星和地基 GPS 等进行监测。自 20 世纪 90 年代以来, 随着 GPS 技术的发展和测站在全球范围内的广泛分布, GPS 已成为全天候、连续、高时空分辨率、高精度地监测电离层的有力工具, 成为监测全球电离层变化和活动的唯一手段^[1]。

目前普遍应用的电离层延迟改正模型是 GPS 广播星历中发布的 Klobuchar 模型, 但该模型仅能改正总电离层影响的 50% 左右^[2,3], 因此我们需要更精确的电离层延迟改正模型。在过去几年中, 许多学者研究了基于地面 GPS 网络观测数据进行电离层建模的方法, 提出了许多电离层 TEC 模型, 如三角级数展开模型、二维多项式模型、球谐函数模型等。而一般情况下, 电离层延迟的改正效果越好, 其改正模型的复杂程度就会越高。为了建立较高精度的电离层模型, 本文采用球谐函数模型对电离层建模。为了方便与国际分析中心的结果比较,

收稿日期: 2011-04-15; 修回日期: 2011-05-13

资助项目: 国家自然科学基金 (10873029); 国家 863 计划 (2006AA12A107); 上海市自然科学基金 (07ZR14133)

球谐展开阶数为 15 阶, 与 CODE (Center for Orbit Determination in Europe) 采用的球谐阶数相同。

目前, 中国国内已进行了大量的区域性 GPS 电离层活动监测、电离层 TEC 建模及电离层误差修正等研究 [4], 但是对全球实测电离层模型的研究较少, 全球电离层 TEC 模型有助于精确修正单频低轨卫星或空间飞行器无线电测量的电离层误差, 也是监测全球电离层活动、研究其与其他圈层活动关系的基础 [5], 同时对电离层全球范围内活动特性的研究, 如赤道异常的研究、南北半球电离层周年变化不对称性的研究等, 有显著意义 [6]。

2 利用 GPS 建立电离层 TEC 模型

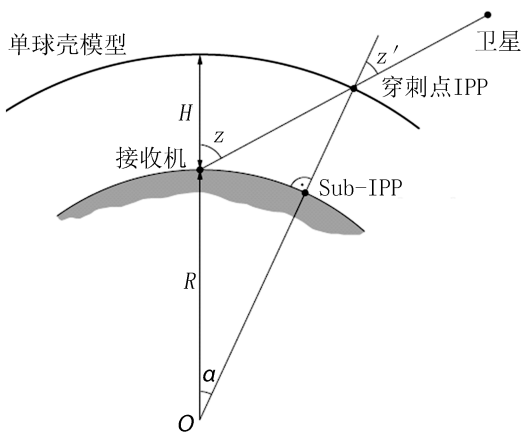


图 1 单层电离层模型

电离层处在距离地面约 100~1000 km 的高度范围内, 通常在海拔 350~450 km 高度处, 电离层中的自由电子含量密度最高。为了简化模型又不影响问题本质, 通常以单球壳模型来描述整个电离层, 即认为所有的自由电子都集中在海拔 350~450 km 的某一高度处的一个无限薄层 (球壳) 上 [7]。本文采用的球壳高度为 450 km, 如图 1 所示。接收机与卫星连线在穿刺点 IPP (Ionospheric Pierce Point) 处与薄层相交, 假设 O -IPP 方向上的自由电子都集中于穿刺点 IPP 上。在地心坐标系中, 穿刺点的位置以球坐标 (ϕ, λ) 表示, 假设 $(x_r, y_r, z_r)^T$ 为监测站坐标, $(x_s, y_s, z_s)^T$ 为卫星位置, 则可以求

出穿刺点 IPP 的坐标 $(x, y, z)^T$, 地心至 IPP 方向与监测站至卫星方向的夹角为穿刺点处的天顶距 z' 。

关于从卫星传播到接收机的 GPS 信号, 其电离层延迟为:

$$\Delta d_{\text{ion}} = \pm \frac{40.3}{f^2} \times F_z \times VTEC, \quad F_z = \frac{1}{\cos z'} \quad (1)$$

式中 $VTEC$ 为穿刺点 IPP 处天顶方向的总电子含量, 对伪距改正时式 (1) 中取正, 对相位改正时式 (1) 中取负。

观测方程可写成:

$$\begin{aligned} \text{伪距测量方程: } P_i &= \rho + \frac{40.3}{f_i^2} \times F_z \times VTEC + b^s - b^r + \Delta \\ \text{相位测量方程: } \phi_i \lambda_i &= \rho - \frac{40.3}{f_i^2} \times F_z \times VTEC - N_i \times \lambda_i + B^s - B^r + \Delta \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $i = 1, 2$, ρ 为接收机至卫星的几何距离, b^s 为伪距观测量的卫星电路延迟偏差, b^r 为伪距观测量的接收机电路延迟偏差, 改正项 Δ 包括: 接收机钟差项、卫星钟差项、对流层延迟

项、卫星和监测站天线相位中心改正、相对论改正、多路径改正等, 均与频率无关, λ 和 N 分别为波长和整周模糊度, B^s 为相位观测值的卫星电路延迟偏差, B^r 为相位观测值的接收机电路延迟偏差。

将 2 个载波的伪距测量方程和相位测量方程分别相减, 消去无量量, 整理得:

$$\begin{aligned} P_4 &= P_1 - P_2 = 40.3 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \times F_z \times VTEC + dcb \\ L_4 &= \phi_1 \lambda_1 - \phi_2 \lambda_2 = -40.3 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \times F_z \times VTEC + \Delta Amb + DCB \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $dcb = (b_1^s - b_2^s) - (b_1^r - b_2^r)$, $\Delta Amb = -(N_1 \lambda_1 - N_2 \lambda_2)$, $DCB = (B_1^s - B_2^s) - (B_1^r - B_2^r)$ 。

式 (3) 即为电离层延迟观测方程, P_4 和 L_4 为电离层延迟观测量。由此可解出电离层总电子含量 $VTEC$ 的表达式如下:

$$\begin{aligned} VTEC &= -\frac{1}{40.3 F_z} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_4 - dcb) \\ VTEC &= \frac{1}{40.3 F_z} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_4 - \Delta Amb - DCB) \end{aligned} \quad (4)$$

式中的 DCB 和 dcb 分别为伪距和相位观测中卫星和接收机的总硬件延迟 (Differential Code Bias), L_4 是相位组合观测量, 其噪声水平要比伪距组合观测量 P_4 低很多, 但存在一个模糊度组合常数 ΔAmb 。在没有周跳的情况下, 可以根据长时间的 P_4 , L_4 之差的平均值来近似求得 ΔAmb 。周跳可以根据相邻历元间 L_4 的差值 $L_4(i) - L_4(i-1)$ 进行探测。由于伪距观测值的噪声较大, 我们采用相位观测值 L_4 进行建模。

本文采用球谐函数模型对全球电离层垂直 TEC 进行建模, 其勒让德多项式展开形式如下:

$$VTEC(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) \quad (5)$$

其中, $VTEC(\beta, s)$ 是垂直的总电子含量 (单位为 TECU); n_{\max} 表示二维泰勒级数展开纬度 β 方向的最大阶数; β 表示穿刺点的地理纬度或地磁纬度; s 为日固系中穿刺点的经度, s 与地方时有关:

$$s = \lambda - \lambda_0 \approx UT + \lambda - \pi \quad (6)$$

UT 为世界时, λ 表示穿刺点对应的地理经度, λ_0 是太阳的经度; $\tilde{P}_{nm} = \Lambda(n, m) P_{nm}$ 为 n 阶 m 次归一化缔合勒让德函数, 其中 P_{nm} 为勒让德函数, $\Lambda(n, m)$ 为归一化函数, 定义为:

$$\Lambda(n, m) = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{0m})}{(n+m)!}} \quad (7)$$

δ 表示克罗内克函数; a_{nm}, b_{nm} 是电子总含量 TEC 的球谐函数系数, 是待估的全球电离层模型参数。

将 *VTEC* 的展开式带入到式 (3) 的相位观测方程中, 整理得:

$$L_4 - \Delta Amb = -40.3 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \times F_z \times \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) + DCB \quad (8)$$

(8) 式即为最终解算参数和 *DCB* 用到的观测方程, 其中假定 *DCB* 在一天之中是常数, 而模型参数 (球谐函数系数) 则每 2 小时求一组, 采用复弧法解算模型参数和 *DCB*, 由于卫星 *DCB* 和测站 *DCB* 是相关的, 为了得到绝对 *DCB*, 假设所有卫星的 *DCB* 之和等于 0, 作为约束条件代入方程求解参数。

3 并行算法的引入和并行性能的初步测试

为建立全球电离层模型, 串行算法处理一天的数据大概要花费 7~8 h, 这是准实时建模所不能容忍的, 因此我们采用并行算法。鉴于我们目前已有的 PC 服务器是单机多核多 CPU, 因此研发了单机的 OpenMP 并行算法, 用来调用所有 CPU 进行数据处理。

OpenMP 全称 Open Multiple Processing, 是一套由 OpenMP Architecture Review Board 牵头设计的, 并已被广泛接受的, 用于共享内存并行系统的多线程程序设计的指导性编译器 (Compiler Directive)。OpenMP 支持的编程语言包括 C、C++ 和 Fortran 语言, 而支持 OpenMP 的编译器包括 Sun Compiler, GNU Compiler 和 Intel Compiler 等。OpenMP 提供了对并行算法的高层抽象描述, 程序员通过在源代码中加入专用的 `#pragma omp` (Fortran 用的是 `!$OMP`) 来指明自己的意图, 由此编译器可以自动将程序并行化, 并在必要之处加入同步互斥以及通信。

OpenMP 提供的这种对于并行描述的高层抽象降低了并行编程的难度和复杂度, 这样程序员可以把更多的精力投入到并行算法本身, 而非其具体实现细节上。对于基于数据分集的多线程程序设计, OpenMP 是一个很好的选择。同时, 使用 OpenMP 也提供了更强的灵活性, 可以较容易地适应不同的并行系统配置。线程粒度和负载平衡是传统多线程程序设计中的难题, 在 OpenMP 中, OpenMP 库从程序员手中接管了这 2 方面的部分工作。但是, 作为高层抽象, OpenMP 并不适合需要复杂的线程间同步和互斥的情况, 不能在非共享内存系统 (如计算机集群) 上使用, 在这样的系统上 MPI 使用较多。

并行的性能主要受机器性能和算法性能影响。其中机器性能指的是 CPU 和存储器的一些基本性能指标以及并行通信速度等; 算法性能主要体现在算法的加速比和算法的效率上。并行系统的加速比是指对于一个给定的应用, 并行算法 (或并行程序) 的执行速度相对于串行算法 (或串行程序) 的执行速度加快了多少倍。对于固定计算荷载的并行问题, 加速比可以使用 Amdahl 定律计算, 即对一个已给定的计算问题, 假设串行所占的百分比为 α , 则使用 q 个处理机的并行加速比为:

$$S_p(q) = \frac{1}{\alpha + (1 - \alpha)/q} \quad (9)$$

Amdahl 定律表明, 当 q 增大时, $S_p(q)$ 也增大。但是, 它是有上界的, 无论使用多少处理机, 加速的倍数不能超过 $1/\alpha$ 。

使用 OpenMP 并行处理数据可以大大提高计算速度。本文利用全球 376 个测站一天的 GPS 数据进行电离层建模, 串行处理大概需要花费 7~8 h, 在 8 核 PC 服务器下并行处理只要 60 多分钟即可完成, 实际加速比在 7~8 倍之间, 这与加速比的理论值相符。在本文模型的并行程序中, 串行部分所占比例不足 1%。为了进一步提高解算速度, 以便进行长时间的电离层 TEC 建模和 *DCB* 分析, 将程序移植到一个 48 核 PC 服务器下进行试算, 发现处理一天的数据只需要 10 min 左右, 加速比超过 40 倍, 这为长期和系统地利用全球 GPS 数据研究电离层提供了条件。

4 数据处理

本文采用 2010 年 1 月 1 日全球分布的 376 个 IGS 站的 GPS 观测数据进行建模。观测数据为双频 GPS 伪距相位观测量, 采样间隔为 30 s, 卫星观测高度截止角为 15° 。这些 GPS 观测站的全球分布情况如图 2 所示, 基本上实现了全球覆盖, 北纬 30° 以北的测站密度较大, 特别在欧洲和北美部分地区测站密度明显高于其他区域。海洋以及非洲北部的测站分布情况较差, 特别是在南半球的海洋区域测站覆盖率更低。

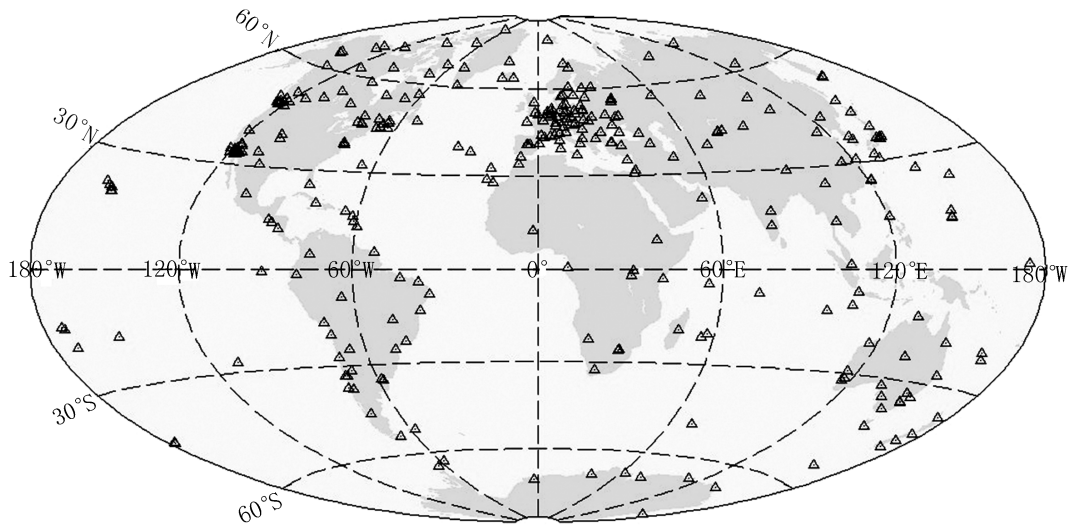


图 2 建模选用的 GPS 观测站的全球分布情况

在利用 *VTEC* 模型进行建模计算时, 观测值可以采用伪距观测量和相位观测量。相位观测值精度高, 但较容易得到的是精确的相对 TEC, 要得到绝对 TEC, 就要在相位观测值中引入模糊度, 过多的模糊度将给模型解算带来不可预知的影响且增加计算量。伪距观测值计算简便, 得到的是绝对 TEC, 但精度较低。通常情况下, 采用相位联合伪距的方法进行

VTEC 建模, 采用相位平滑伪距的方法提高观测值的精度。主要的平滑方法有: 卡尔曼滤波改善 P_4 组合观测值法、利用 L_4 组合观测值平滑 P_4 法以及 L_4 代替 P_4 法。本文采用的是 L_4 组合观测值代替 P_4 组合观测值法进行观测值的平滑, 具体公式如下:

$$(L_4)_{sm}(i) = (L_4)_{obs}(i) - \Delta Amb$$

$$\Delta Amb = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((L_4)_{obs}(i) + P_4(i)) \quad (10)$$

式中, $(L_4)_{obs}(i)$ 为第 i 个历元的 L_4 组合观测值, $(L_4)_{sm}(i)$ 为改正后的 L_4 组合观测值, 是电离层建模用到的观测数据, ΔAmb 为根据伪距观测值和相位观测值之差计算得到的模糊度粗值, n 为一个观测弧段内总的观测个数。在求 ΔAmb 之前需要先进行粗差与周跳的检测, 周跳检测采用的是三差法, 检测条件为: 当 $[(L_4)_{obs}(i+1) - (L_4)_{obs}(i)] - [(L_4)_{obs}(i) - (L_4)_{obs}(i-1)] > \varepsilon$ 时, 认为有周跳发生, 这里 ε 可以根据不同的需要选取, 本文取 $\varepsilon = 0.3$ m。当检测到周跳后, 用该周跳值对周跳发生后的观测值进行修正, 保证观测的连续性, 如果无法修正周跳, 则引入新的模糊度参数, 标记为新的观测弧段, 分别求 ΔAmb 。

图 3 为改正后的 L_4 组合观测值及相应的 P_4 组合观测值对照图, 星号表示的是 P_4 组合观测值, 点表示的是 $(L_4)_{sm}$ 组合观测值。由图可以看出 P_4 组合观测值的离散度很大, 噪声甚至达到几米, 因此会大大影响建模精度。实际上当连续观测一颗卫星时, 穿刺点的轨迹应该是连续的, 所以电离层延迟量也应该是连续变化的, 改正后的 L_4 组合观测值更接近实际的电离层延迟量。在数据处理过程中为了保证模糊度粗值 ΔAmb 的计算精度, 将时间较短的观测弧段去掉, 仅保留连续观测 1 h 以上的观测弧段。

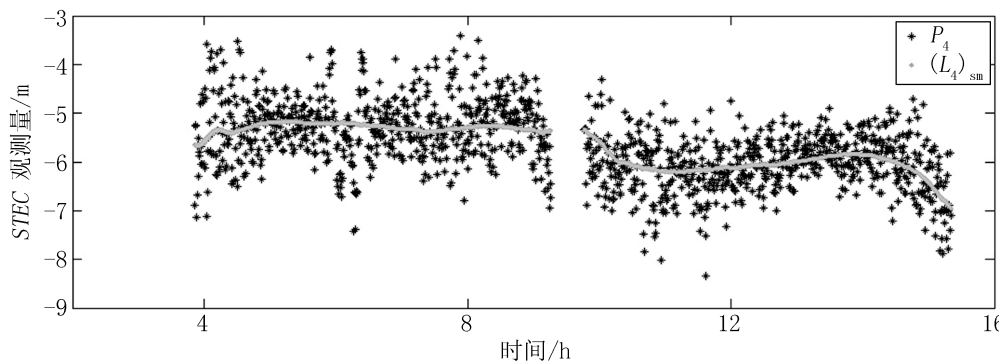


图 3 电离层延迟观测值 P_4 及 $(L_4)_{sm}$ 组合观测值对照图

5 计算结果和分析

本文选取的球谐函数阶数为 15 阶, 每个弧段待求解的球谐函数系数有 256 个, 若每 2 h 给出一幅全球的 TEC 图, 那么一天需要解 $256 \times 12 = 3072$ 个球谐函数系数, 若卫星和测站的 DCB 认为是一天一组常数, 则一共有 32 个卫星 DCB 和 376 个测站 DCB 待求解。

解算得到的 *DCB* 值与 CODE 和 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 发布的卫星及测站 *DCB* 的比较图见图 4a 和图 4b, 本文的模型值用 MODEL 表示。由图 4a 可以看出解算得到的卫星 *DCB* 与 CODE 和 JPL 发布的 *DCB* 相比较, 差值均在 1 ns 以内, 根据计算得到的模型值相对于 CODE 的卫星 *DCB* 的 RMS 为 0.4 ns, 相对于 JPL 的卫星 *DCB* 的 RMS 为 0.3 ns, 可以认为卫星 *DCB* 的解算精度达到了 0.3~0.4 ns。图 4b 给出了本文模型、CODE 及 JPL 公共的 100 多个测站的 *DCB* 结果比较, 可以看到, 测站 *DCB* 相对于卫星 *DCB* 差异较大, 测站 *DCB* 的本文模型值与 CODE 和 JPL 发布值之间的差异大部分都在 3 ns 以内, 个别测站较差, 超过 5 ns。本文模型的测站 *DCB* 值相对于 CODE 发布的测站 *DCB* 的 RMS 为 2.0 ns, 相对于 JPL 的测站 *DCB* 的 RMS 为 1.9 ns, 可以得出本文测站 *DCB* 的精度优于 2 ns。

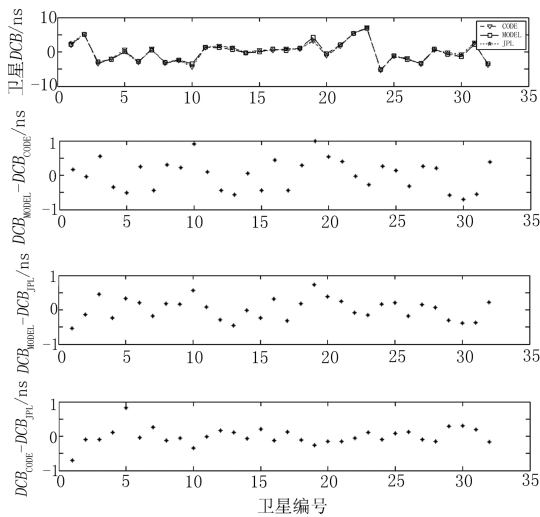


图 4a 卫星 *DCB* 的本文模型值、CODE 发布值和 JPL 发布值的比较

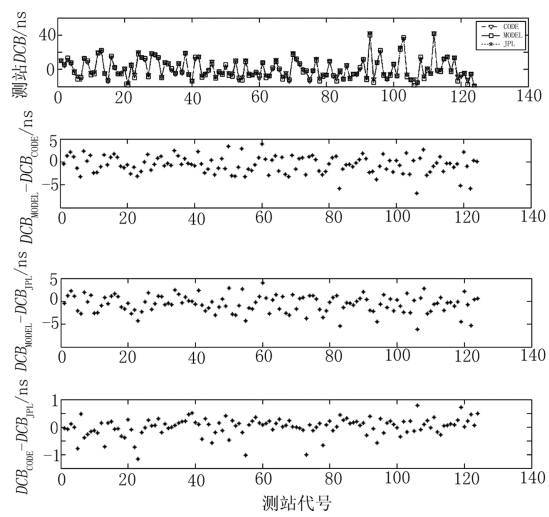


图 4b 测站 *DCB* 的本文模型值、CODE 发布值和 JPL 发布值的比较

为了比较方便, 根据模型参数生成纬度分辨率为 2.5° , 经度分辨率为 5° 的全球电离层 TEC 分布图 (GIM, Global Ionospheric Model), 本文以 2010 年 1 月 1 日 00:00 的一幅 GIM 为例, 分析了本文模型的 GIM 和 CODE 分析中心的 GIM 的比较结果。图 5 第一幅为本文模型 GIM, 第二幅为 CODE 发布的 GIM, 第三幅为本文模型 GIM 相对于 CODE 发布的 GIM 的残差分布图, 由前 2 幅图可以看出, TEC 模型值和分析中心给定值的全球分布情况大体一致, 最大值都出现在西经 170° 附近, 其他地区 TEC 变化相对较平稳; 本文模型 GIM 在太平洋南部、印度洋南部以及非洲撒哈拉沙漠地区都出现明显异常区域, 在残差图中表现尤为明显, 参照图 2 (测站分布图) 可以发现, 出现较大残差的区域基本都是没有测站或者测站较少的区域, 因此在这些区域残差较大可能是由于测站覆盖率低、实测数据匮乏所导致的。

为了进一步比较模型 GIM 和各 IGS 分析中心发布的 GIM 之间的差异, 将本文模型 GIM 与各分析中心 GIM 的残差 RMS 以及各分析中心间 GIM 的残差 RMS 进行了统计, 如表 1 所示, 本文模型 GIM 相对于各分析中心 GIM 的残差 RMS 都在 5.3 TECU 以下, 最好

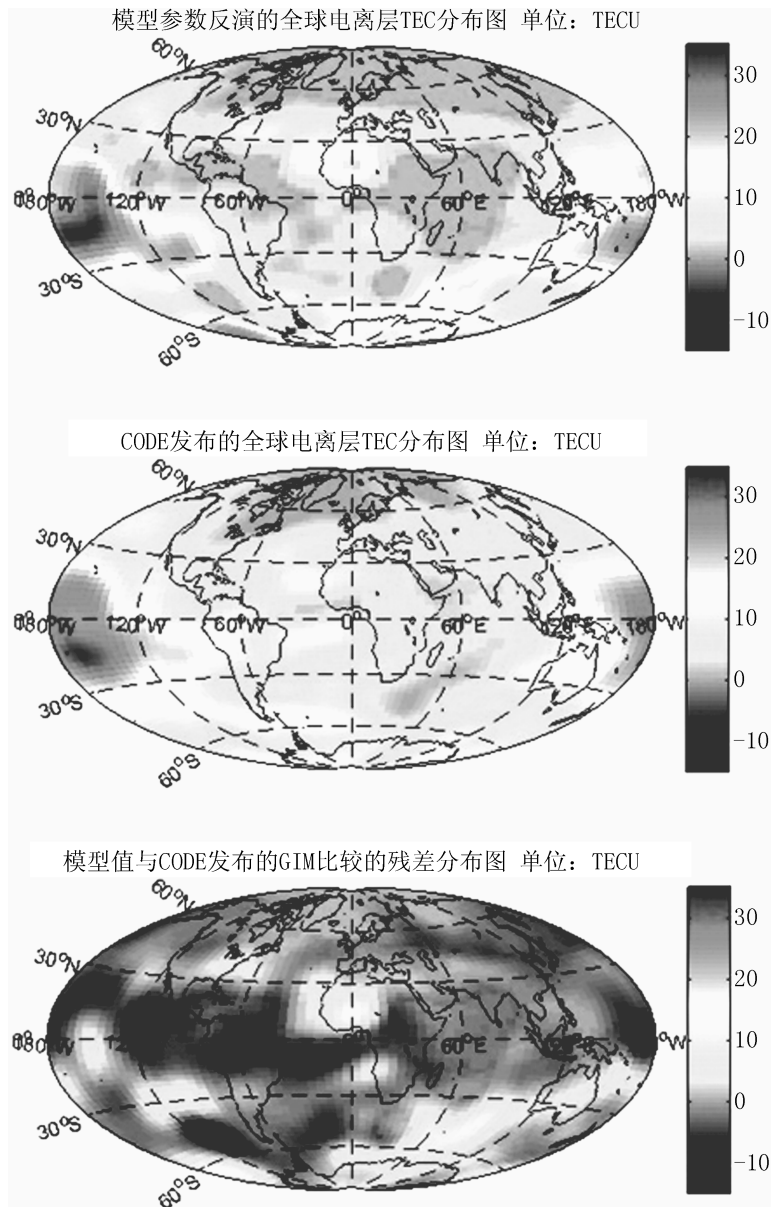


图5 模型 GIM 与 CODE 发布的 GIM 对照图及残差图 (2010 年 1 月 1 日 0 时)

的是相对于 CODE 的 4.02 TECU, RMS 之所以这么大主要是由于南半球部分海洋区域及非洲沙漠等几块区域的残差太大, 最大残差接近 15 TECU, 而在 RMS 统计时没有去掉任何值。由各分析中心间的比较情况可以看出, 除了相对于 IGS 的 RMS 有小于 2 TECU 的外, 分析中心间的 RMS 也都在 3 TECU 左右, 最大 RMS 接近 4 TECU。各分析中心的 GIM 相对于 IGS 的 GIM 的残差 RMS 较小, 主要是由于 IGS 的 GIM 是根据各分析中心的结果综合得出的最优结果, 而本文模型结果却相对于 CODE 的 GIM 的残差 RMS 最小, 可能是由于本文采用的球谐函数建模与 CODE 一致的缘故。

表 1 模型 GIM 与各分析中心 GIM 的 RMS 比较

分析中心	RMS /TECU				
	MODEL (本文)	CODE	JPL	EPC	ESA
CODE	4.02	—	—	—	—
JPL	5.28	3.68	—	—	—
EPC	4.65	2.75	3.76	—	—
ESA	5.30	2.62	3.84	3.25	—
IGS	4.33	1.62	2.44	1.99	2.09

6 结论与讨论

本文基于 GPS 观测数据,采用球谐函数建模的方法计算全球电离层 TEC,结果大致反映了全球电离层的活动规律和一般变化,可以满足通常精度的电离层改正和电离层活动监测需求。建模结果与 CODE、JPL 等分析中心的结果的比较,表明用该方法建立的模型是可靠的,其卫星 DCB 相对于 CODE 发布的 DCB 的精度为 0.4 ns,相对于 JPL 发布的 DCB 的精度达到 0.3 ns,其测站 DCB 相对于两个分析中心结果的精度均优于 2 ns,垂直总电子含量 (VTEC) 相对于各分析中心的 GIM 产品的精度都在 5.3 TECU 以内,相对于 CODE 的结果的精度最高,达 4 TECU,这主要是由于本文与 CODE 采用的模型相同。

由于南半球海洋区域和非洲沙漠地区的测站很少,VTEC 模型结果较差,为了进一步提高建模精度,可能需考虑引入海洋测高数据联合建模或者采用插值方法对无观测数据的地区进行插值,以保证电离层变化的连续性,从而提高建模精度。

引入并行算法进行全球电离层建模可以大大加快建模速度,这为系统性分析本文模型与其他 IGS 分析中心发布的结果间的系统差提供了条件,也为电离层活动的长期监测和 DCB 变化特性分析和准实时电离层 TEC 建模奠定了基础。

参考文献:

- [1] 袁运斌. 博士论文. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2002
- [2] 向淑兰, 何晓薇, 牟奇峰. 微计算机信息, 2008, 24(6-1): 200
- [3] 章红平, 平劲松, 朱文耀等. 天文学进展, 2006, 24(1): 16
- [4] 刑楠, 王小亚, 胡小工. 空间科学学报, 2011, 31(2): 236
- [5] Ridley A J, Deng Y, Toth G. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, 68: 39
- [6] Mendillo M, Huang C L, Pi X Q. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2005, 67: 1377
- [7] 章红平. 博士论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2006
- [8] 黄善琪, 王小亚, 王解先. 天文学报, 2009, 50(1): 60
- [9] Wen D B, Yuan Y B, Ou J K. J Earth Syst Sci, 2007, 116(3): 235
- [10] Astafyeva E I, Afraimovich E L, Oinats A V et al. Advances in Space Research, 2008, 42: 763
- [11] Barabashov B G, Maltseva O, Pelevin O. Advances in Space Research, 2006, 37: 978
- [12] 田言涛, 王小亚, 黄斌. 天文研究与技术 (国家天文台台刊), 2008, 5(1): 25
- [13] 袁运斌, 欧吉坤. 自然科学进展, 2003, 13(8): 885
- [14] 耿长江, 唐卫明, 章红平. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 105
- [15] Steigenberger P, Rothacher M, Dietrich R. Journal of Geophysical Research, 2006, 111

Global Ionospheric Modeling using GPS Data with Parallel Algorithms

GAO Guang-hui^{1,2}, WANG Xiao-ya¹, WU Bin¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;* 2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049*)

Abstract: To satisfy the requirement of high-precision satellite navigation and monitoring global ionospheric TEC variation, the data from about 370 GPS stations around the globe are used to model TEC and Differential Code Bias (DCB) of GPS satellite and station. In order to get high accuracy in quasi real-time, the OpenMP parallel algorithm is selected to speed up the computing process, which can achieve more than 7 times faster with 8 CPUs and more than 40 times faster with 48 CPUs. In comparison with the results of CODE and JPL, our results from OpenMP shows that the global ionospheric model is reliable and can provide satellite DCBs with the accuracy better than 0.4 ns, and the accuracy of station DCBs better than 2 ns. The accuracy of Vertical Total Electron Content (VTEC) up to 5.3 TECU.

Key words: GPS; global ionospheric TEC model; DCB; parallel algorithms