

区域 GPS 网实测电离层变化和卫星硬件延迟的可靠性研究*

薛军琛^{1,2†} 宋淑丽¹ 朱文耀¹ 卢秀山²

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 山东科技大学测绘科学与工程学院 青岛 266510)

摘要 根据高精度卫星导航定位的实际需要,介绍了利用中国 GPS 区域网双频相位平滑伪距实测数据,准实时监测区域网电离层电子总含量 (TEC) 变化和 GPS 卫星硬件延迟 (DCB) 的方法和结果.着重研究了区域网独立测定 DCB 的可靠性,利用中国境内的 GPS 站点分别构造了 3 个大小不同的区域网,通过实测 DCB 和垂直电子总含量 (VTEC) 与 CODE (Center for Orbit Determination in Europe) 结果的比对表明:为了获得区域网准实时测定 DCB 的可靠结果,对区域网的大小有一定的要求;利用中国 GPS 区域网,准实时测定的 VTEC 和 DCB 的比较精度可达 2.0 TECu 和 0.25 ns.

关键词 天体测量, 地球: 大气, 方法: 解析

中图分类号: P 128; **文献标识码:** A

1 引言

对于广大的 GNSS (Global Navigation Satellite System) 单频用户,为了获得一定精度的自主导航定位结果,必须实现准实时信号传播路径的电离层延迟改正.国际上全球 GPS 分析中心 CODE、JPL (Jet Propulsion Laboratory) 等给出的电离层产品能满足广大 GPS 单频用户定位中电离层延迟改正的需要,但这些产品都是事后发布,满足不了“准实时”的要求.为了发展我国独立自主的卫星导航事业,为广大的 GNSS 单频用户的自主导航定位提供电离层延迟改正的服务,开展利用中国区域 GPS 网独立解算区域电离层 TEC 变化和 GPS 卫星硬件延迟的研究至关重要.

电离层作为地球大气层的一部分,对无线电波的传播有着显著的影响,其具体表现为电离层的折射效应,而折射效应引起的电离层时延则是距离观测的主要误差源之一.利用卫星信标测量 TEC 的传统方法有微分 Doppler 法和 Faraday 旋转法,但这两种方法都有一定的局限性^[1].GPS 高精度、高时空分辨率、全天候、实时性强的特点,已成为监测电离层 TEC 的主要手段.目前国际 GPS 服务 IGS (International GPS Service) 和一些主要的全球 GPS 分析中心 (如 CODE、JPL 等) 已为用户提供全球电离层 TEC 时空

2010-07-20 收到原稿, 2011-03-05 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10603011)、863 计划 (2009AA12Z307) 和知识创新青年基金 (5120090304) 资助

† jcxue@shao.ac.cn

变化信息的日常服务. 利用 GPS 技术监测 TEC 的过程不可避免地要涉及到系统硬件延迟 (DCB). DCB 即 GPS 码间偏差又称仪器偏差 (IB) 或频间偏差 (IFB) 或硬件延迟, 是指由于硬件延迟造成的同一时刻不同频率或同一频率不同伪码观测测量之间的时间偏差, 包含卫星码间偏差和接收机码间偏差^[1-2]. 利用 GPS 测量 TEC 的主要误差源为 GPS 系统硬件延迟, 其最大误差可达 7 ns 左右或 9 ~ 30 TECu (1 ns=2.86 TECu)^[1,3], 因此 GPS 系统硬件延迟的确定是 GPS 技术监测 TEC 的基础. 确定 GPS 系统硬件延迟后, 才能获取电离层 TEC 时空变化的可靠信息, 进而开展电离层预报^[4]、电离层不均匀体探测^[5]等.

硬件延迟的确定与所采用的电离层模型密切相关. 目前与 GPS 技术有关的全球性电离层函数模型主要是 CODE 的 15×15 球谐函数模型 (详情参见网站: <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>) 和美国 JPL 的全球统一的三角格网电离层模型 (详见 Mannucci 等^[6]); 根据 Brian D. Wilson 和 Anthony J. Mannucci 的研究, 三角格网模型 (TRIN) 较适用于快速实时监测 TEC 的需要. 区域性的电离层函数模型主要有单站模型^[1,3,7]、多项式模型^[2,5,8]、三角级数模型^[9]以及低阶球谐函数模型^[10-12]等. 这些电离层函数模型均是基于单层电离层球壳的假设. 区域性的电离层函数模型中, 单站模型主要用于单站上空局部地区电离层 TEC 的监测, 可取得不错的结果; 对有一定跨度的局域网则用多站模型较好, 根据章红平等^[8]的研究尤以多项式模型和低阶球谐函数模型精度较高, 但是多项式模型由于其自身参数设置的局限性, 会引起模型展开畸变, 导致区域网边缘估计精度较低的现象出现.

GPS 系统硬件延迟的确定经历了从卫星与接收机硬件延迟组合确定^[1,3,5,7-8,13]到各自独立确定^[6,11-12,14]的过程. 对单站模型, 卫星与接收机硬件延迟强相关, 只能确定它们的组合值; 对具有一定跨度的区域网, 利用多站模型可独立地确定卫星与各测站接收机的硬件延迟. 问题是多大跨度的区域网, 才能保证独立解算的卫星、测站接收机的硬件延迟和电离层 TEC 变化信息是可靠的. 特别是对于目前我国不断涌现的区域 GPS 网, 以及我国北斗系统只在中国区域布网的条件下, 能否独立可靠地监测系统硬件延迟和电离层的变化, 需要进行深入的分析研究. 为了考察区域网准实时独立生成电离层产品的可靠性和精度, 同时也为了考察网的大小对结果的影响, 本文利用中国地区 GPS 站点资料以及上海 GPS 综合应用网的有关资料, 采用多项式模型, 研究构建不同网形解算电离层 VTEC 及卫星、接收机硬件延迟, 并针对解算结果进行分析, 同时对其中出现的问题予以解释.

2 利用 GPS 测量 TEC 的原理

GPS 的 L 载波相位观测和 P 码观测方程如下:

$$\begin{aligned}
 L_{1j}^i &= \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{trop}j}^i - d_{\text{ion}1j}^i - \lambda_1 b_{1j}^i \\
 L_{2j}^i &= \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{trop}j}^i - d_{\text{ion}2j}^i - \lambda_2 b_{2j}^i \\
 P_{1j}^i &= \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{trop}j}^i + d_{\text{ion}1j}^i + dq_{1j} + dq_1^i \\
 P_{2j}^i &= \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{trop}j}^i + d_{\text{ion}2j}^i + dq_{2j} + dq_2^i
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中 ρ_j^i 为 i 星到 j 站的星地间距, L_{1j}^i 、 L_{2j}^i 为双频载波相位观测量, P_{1j}^i 、 P_{2j}^i 为双频 P 码伪距观测量, c 为真空光速, dt^i 、 dt_j 分别是卫星与接收机的钟差, $d_{\text{trop}j}^i$ 为对流层延迟, dq_{kj} 、 dq_k^i 为不同频率 ($k=1,2$) 的接收机与卫星硬件延迟, λ_k 为不同频率波长, b_{kj}^i 为不同频率的初始值, 包含整周模糊度和卫星与接收机硬件延迟, $d_{\text{ion}kj}^i$ 是不同频率的电离层延迟. 同时, 电离层一阶延迟量占总延迟的 99% 以上, 对 GPS 等高频系统的电离层研究与应用, 电离层折射指数一般仅考虑一阶项, 因此, 高频系统电离层延迟的一阶级数表达式如下:

$$d_{\text{ion}} = 40.28 \frac{TEC}{f^2}, \quad (2)$$

其中 TEC 为信号路径上的电离层电子总含量, 单位是 10^{16} el/m², f 为信号频率, 其单位是 Hz, d_{ion} 的单位是 m. 结合 (1)~(2) 式, 方程又可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} L_{kj}^i &= \Psi - 40.28 \frac{TEC}{f_k^2} - \lambda_k b_{kj}^i \\ P_{kj}^i &= \Psi + 40.28 \frac{TEC}{f_k^2} + dq_{kj} + dq_k^i, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\Psi = \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{trop}j}^i$. 对双频 GPS 观测, 可采用几何无关组合 P_4 (即 P 码伪距观测值之差) 来进行电离层的研究, 即:

$$P_4 = P_{2j}^i - P_{1j}^i = 40.28 \frac{TEC}{f_2^2} - 40.28 \frac{TEC}{f_1^2} + dq_j + dq^i, \quad (4)$$

其中 $dq_j = dq_{2j} - dq_{1j}$ 、 $dq^i = dq_2^i - dq_1^i$ 分别是接收机、卫星硬件延迟部分. 由此, 对于双频 GPS 观测数据, 将两个频率值代入上式, 可得测站至卫星路径上的总电子含量的观测方程如下:

$$TEC = 9.52437(P_{2j}^i - P_{1j}^i - dq_j - dq^i). \quad (5)$$

3 计算方法

本文采用了单层电离层多项式展开模型来模拟区域 VTEC 的变化. 该模型将 VTEC 看作是纬度差 $\phi - \phi_0$ 和太阳时角差 $S - S_0$ 的函数, 其具体表达式为:

$$VTEC = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\phi - \phi_0)^i (S - S_0)^k, \quad (6)$$

式中 E_{ik} 表示模型系数, ϕ_0 为测区中心点的地理纬度, S_0 为测区中心点 (ϕ_0, λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 的太阳时角, $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$, λ_0 为测区中心点的地理经度, λ 为信号路径与单层交点的地理经度, t 为观测时刻, n 、 m 为多项式展开的阶数. 将测站至卫星路径上的 TEC 投影到 VTEC, 所用的投影函数如下 (单层高度 450 km):

$$mf(z) = \frac{1}{\cos(z)}, \quad (7)$$

其中 z 为穿刺点高度角. 通过 (5)~(7) 式, 最终可得到利用双频 GPS 伪距观测值之差 $P_{2j}^i - P_{1j}^i$ 来确定 VTEC 电离层延迟模型的观测方程:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\phi - \phi_0)^i (S - S_0)^k + 9.52437 \cos(z) dq_j + 9.52437 \cos(z) dq^i \\ & = 9.52437 (P_{2j}^i - P_{1j}^i) \cos(z). \end{aligned} \quad (8)$$

为了避免 (8) 式右端伪距观测值 $P_{2j}^i - P_{1j}^i$ 噪声大而影响电离层 VTEC 的模拟精度, 我们采用高精度的载波相位观测平滑伪距观测值的方法, 来提高伪距观测的精度. 相位平滑伪距有很多方法, 这里选取其中一种方法, 即 L_4 组合观测值平滑 $\Delta P_2 P_1$ 法. 在 (8) 式的解算中, 如果将测站、卫星的硬件延迟分别设置成独立参数, 进行最小二乘估计时, 法方程系数矩阵是秩亏的, 不能直接解算. 为此, 引入以下约束条件:

$$\sum_{i=1}^n q^i = 0, \quad (9)$$

其中 n 为卫星个数, q^i 为 i 卫星的硬件延迟. 本文对电离层多项式模型按 3×4 阶进行展开, 如果观测时段跟踪 n 颗卫星, 有 m 站进行观测, 则上述待估参数个数为 $12+n+m$ (远远低于传统组合硬件延迟参数个数), 而单站在 4 h 的观测时段内采样数一般大于 1 000 个, 所以本方程组合是可以参与求解的.

4 中国 GPS 区域网解算 VTEC 和 DCB 的结果

为了考察区域网大小对测定卫星硬件延迟的精度和可靠性, 对中国区域 GPS 台站, 按照网形大小分别选取 3 个网进行试验. 首先是上海城市网 (SH_city) (所选网站都是上海 GPS 监测网在上海市内的 GPS 台站), 然后是上海周边区域网 (SH_vicinity) (所选网站是长江三角洲地区的 GPS 站点), 最后选取的是中国地区网 (China_vicinity) (所选网站大多是中国境内的 GPS 观测站). 中国地区网与上海两个小网相互间完全独立, 没有公共站.

SH_city 网由 6 个上海 GPS 站组成, 它们分别是: shjs, shnh, shph, shys, btdy, bthm. 该网的经度跨度为 $119.58^\circ \sim 124.91^\circ$, 纬度跨度为 $29.07^\circ \sim 31.98^\circ$. SH_vicinity 网由 9 个长三角地区 GPS 站组成, 它们是: bthz, btdf, btdy, bthm, btgc, shys, shnh, ahma, zjhz. 该网的经度跨度为 $118.52^\circ \sim 122.05^\circ$, 纬度跨度为 $30.23^\circ \sim 33.29^\circ$. China_vicinity 网则选取 16 个全国的 GPS 站组成, 它们是: dxin, dlha, xnin, lhas, xiag, guan, xiam, luzh, wuhn, shao, zhnz, xiaa, yanc, tain, bjfs, jixn. 该网的经度跨度为 $91.10^\circ \sim 121.20^\circ$, 纬度跨度为 $23.18^\circ \sim 40.99^\circ$ (3 网站点分布情况见图 1 穿刺点分布图).

数据采用了 2007 年 10 月 11 日至 10 月 16 日 (相应的年积日为 284 ~ 289) 6 d 的数据, 采用多站联合求解、分段建模的方法. 需要注意的是, 分段建模没有考虑时段之间连续性的问题, 即把全天 24 h 分成 6 段, 以每 4 h 观测资料建立相互独立的区域电离层模型, 而把卫星、接收机硬件延迟在 24 h 内视作不变量一起进行解算. 为了对所选站点上空数据覆盖情况有所了解, 图 1 的 3 幅图表明了 3 网 GPS 站点上任选 1 d 的穿刺点的分布情况.

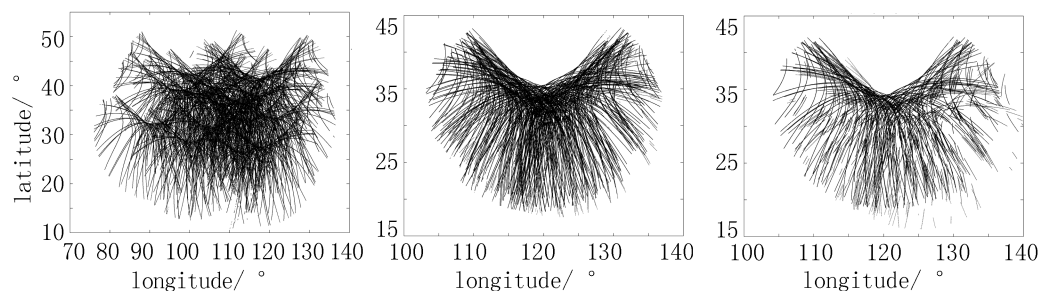


图 1 中国地区网(左)、上海周边区域网(中)和上海城市网(右)的 GPS 站点上空穿刺点分布图

Fig. 1 Distributions of pierce points over GPS stations of China_vicinity (left), SH_vicinity (middle) and SH_city (right)

为了对本文计算得到的结果进行验证, 下载了 CODE、JPL 以及 IGS 相应年积日 (284 ~ 289) 的 IONEX 数据文件, 从中提取出相应的卫星硬件延迟进行比对, 比对时以解算精度较高的 CODE 结果做基准^[15-16], 所得到的精度指标是相对于 CODE 结果的比较精度. 目前 CODE 每天进行一次数据后处理, 同时解算上述电离层球谐函数模型参数、接收机和卫星的双频测码伪距频率间的电路延迟差. 另外, CODE 还采用最小二乘配置的方法, 对上述电离层模型参数进行时间序列分析, 预报 1 d、2 d 后的全球电离层 TEC 的时空分布, 并以 IONEX 格式、球谐系数形式、GPS 广播星历采用的电离层 Klobuchar 模型的 8 参数形式对外发布. CODE 的电离层产品已被国际电离层研究用户广泛应用. 图 2 为这 3 家在 288 d 相应卫星硬件延迟的比较, 左图给出了 3 家计算各 GPS 卫星硬件延迟的结果, 右图给出了 JPL-CODE 和 IGS-CODE 之间的偏差. 另外 5 d 的结果在表 1 中列出. 表 1 中给出了年积日 284 ~ 289 6 d, IGS、JPL 和中国 3 个 GPS 区域网生成的 DCB 相对于 CODE 的系统偏差和 RMS (单位: ns).

表 1 JPL、IGS 和 3 个中国 GPS 区域网计算的卫星 DCB 与 CODE 的比较

Table 1 Comparison of satellite DCBs computed from JPL, IGS and three Chinese GPS regional networks with that of CODE

	D284		D285		D286		D287		D288		D289	
COMPOBJ	RMS	BIAS	RMS	BIAS	RMS	BIAS	RMS	BIAS	RMS	BIAS	RMS	BIAS
JPL	0.1372	0.0024	0.1524	0.0013	0.1521	0.0026	0.1370	0.0024	0.1407	0.0015	0.1497	0.0022
IGS	0.0860	-0.1167	0.0730	-0.1160	0.0689	-0.1158	0.0561	-0.1155	0.0682	-0.1158	0.0827	-0.1159
China_vic	0.3029	-0.1166	0.3410	-0.1160	0.2269	-0.1158	0.2139	-0.1155	0.2283	-0.1157	0.2029	-0.1159
SH_vic	0.9765	-0.0157	0.9339	-0.0153	0.8838	-0.0111	0.8698	0.0030	0.8674	-0.0045	0.9050	-0.0004
SH_city	1.0789	-0.1166	1.0392	-0.1159	0.9808	-0.1158	0.9833	-0.1155	0.9633	-0.1157	0.9983	-0.1159

表 1 第 1 列是参与比较的对象名称, 其他几列为分析得到的各天参与比较的精度指标 (RMS 和 BIAS). 从图 2 和表 1 可看出, JPL、IGS 和 CODE 计算的 DCB 相差都不是很大. CODE 与 IGS 间有一个 0.1 ns 量级的系统偏差, 去除这个系统偏差后, 其 RMS 仅为 0.06 ~ 0.07 ns; CODE 与 JPL 间无明显的系统偏差, 而 RMS 较大, 达 0.13 ~ 0.14 ns.

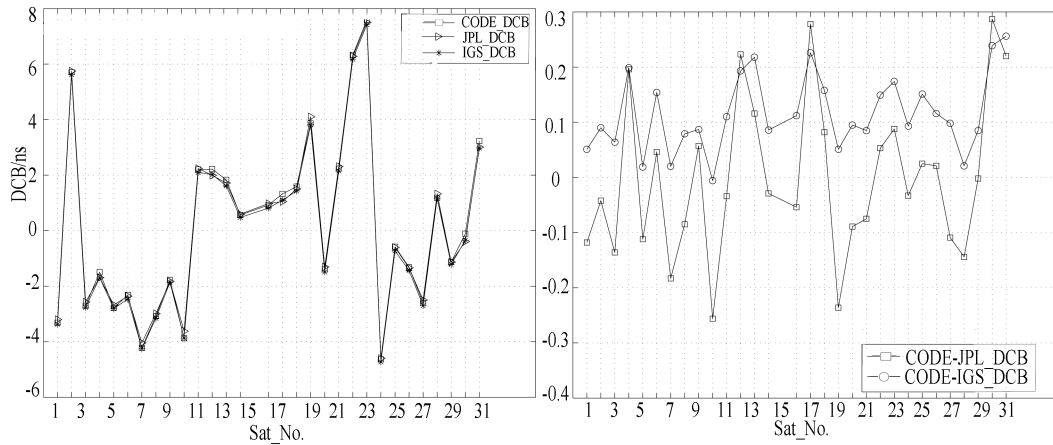


图 2 JPL、IGS 和 CODE 解算的卫星硬件延迟结果比较

Fig. 2 Comparisons of satellite DCBs computed from JPL, IGS and CODE

利用中国境内的 3 个区域网的 GPS 观测资料 (年积日 284 ~ 289 6 d) 进行独立解算 DCB 和电离层 TEC 建模的试验, 并将解算的结果与 CODE 的结果进行了比对, 比对的结果一并在表 1 中列出. 图 3 给出了 3 个区域网独立解得的各颗 GPS 卫星的 DCB 与 CODE 间的偏差 (年积日 288 d).

从图 3 和表 1 可以看出, 我们利用电离层多项式模型解算的 DCB 结果是可靠的. 中国地区网 (China_vicinity) 独立解算 DCB 与 CODE 的结果比较, 6 d 均有一个约 0.1 ns 的系统偏差, 而且 IGS 和 China_vicinity、SH_city 网每天具有几乎完全相同的系统偏差 (其原因下面讨论); 去除系统偏差后, 这 3 个网生成的 DCB 相对于 CODE 的 RMS 分别为 0.25 ns、0.91 ns 和 1.00 ns (相当于信号路径延迟为 6 cm、27 cm、30 cm), 而且 6 d 的结果基本相同. 从这些比对结果可看到, 区域网解算 DCB 是可行的, 解算的精度随着网跨度的增大而提高, 以中国 GPS 区域网解算 DCB 的精度已基本能满足高精度卫星导航定位电离层改正的实际需要. SH_city 和 SH_vicinity 网结果相差不是很大, 可能是两网的大小覆盖区域相差不大引起的.

关于 IGS 和 China_vicinity、SH_city 网解算 DCB 与 CODE 比较具有几乎完全相同系统偏差的原因, 来自解算采用了同样的约束条件 (9) 式. 如果 IGS 和 China_vicinity、SH_city 网解算 DCB 中用的卫星与 CODE 完全一样, 则有:

$$\sum_{i=1}^n (q_{\text{IGS,etal.}}^i - q_{\text{CODE}}^i) = \sum_{i=1}^n q_{\text{IGS,etal.}}^i - \sum_{i=1}^n q_{\text{CODE}}^i = 0. \quad (10)$$

因此, 它们解算的 DCB 相对于 CODE 不可能出现系统偏差. 但实际情况是 IGS 等网解算中均比 CODE 少用了 32 号 GPS 卫星, 这时 IGS 等网解算 DCB 相对于 CODE 的 BIAS,

可用下式计算:

$$\begin{aligned}
 BIAS &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (q_{IGS,etal.}^i - q_{CODE}^i) \\
 &= \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^{n-1} q_{IGS,etal.}^i - \sum_{i=1}^n q_{CODE}^i + q_{CODE}^n \right) \\
 &= \frac{1}{n-1} q_{CODE}^n,
 \end{aligned} \tag{11}$$

由此可见, 这个系统偏差正是由 CODE 解算的 32 号 GPS 卫星的 DCB 引起的. 查证该卫星这 6 d CODE 的 DCB 值分别为 -3.498 ns、-3.479 ns、-3.471 ns、-3.464 ns、-3.470 ns、-3.477 ns, 将它们除以 30 (所用的卫星数), 正好就是表 1 中列出的这 6 d 的系统偏差: -0.1166 ns、-0.1160 ns、-0.1157 ns、-0.1155 ns、-0.1157 ns、-0.1159 ns. 这个系统偏差来自 (9) 式, 约束条件 (9) 式意味着假设所有观测到的 GPS 卫星硬件延迟的平均延迟为零, 这显然不一定符合实际情况. 这就可能导致解得的各卫星 DCB 与实际的 DCB 存在一个系统偏差. 但这个系统偏差不是本质的, 它并不影响导航定位的精度, 因为这个系统性偏差会吸收到接收机的钟差里.

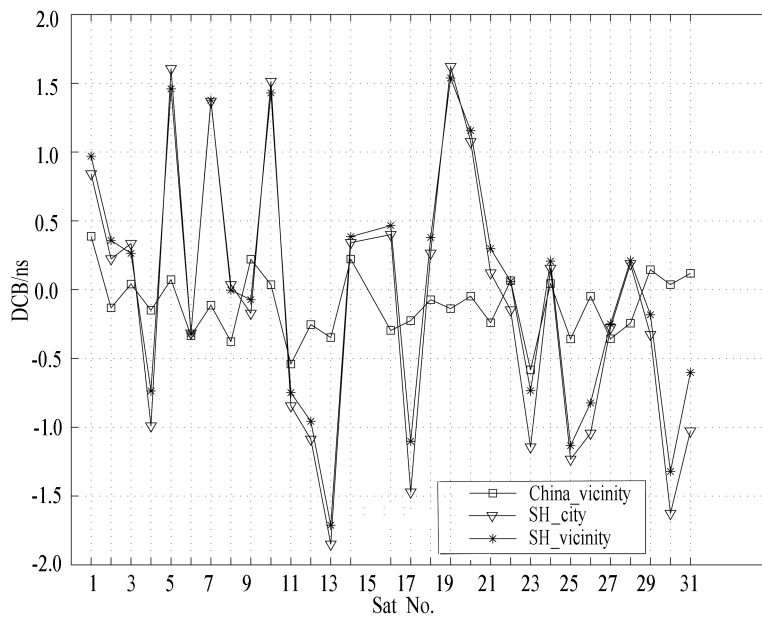


图 3 中国地区 3 个区域网解算的卫星 DCB 与 CODE 的比较

Fig. 3 Satellite DCB comparison between the results of three Chinese GPS networks and that of CODE

对整个计算过程质量, 可用去除系统偏差后的 RMS 来估计. 但 RMS 毕竟是一个内部符合检核标准, 为了进行外部检核, 进一步考察我们区域网多项式电离层建模的可靠性和精度, 将生成的中国区域的 VTEC 结果与 CODE 的相应结果进行了比对. 利用 CODE 提供的 GIM 模型, 模型文件形式为 CODwww.ION 文件, 下载连续 6 d 的数据, 分别进行单天比对. 在计算中除了发现 SH_vicinity 网的 zjhz 站的观测存在一些问题外, 3 个

区域网的其它所有测站观测均属正常. 表 2~5 给出了与 CODE 产品比对的结果, 表 2、表 3、表 4 分别给出了 SH_city、SH_vicinity、China_vicinity 3 个区域网解得的各测站 VTEC 与 CODE 产品的单天比对结果 (以 285 d 为例, 其它 5 d 的结果类似). 表中的第 2 列为与 CODE 结果直接比对的 RMS, 第 3 列为去除系统偏差后的 RMS, 第 4 列为两者间的系统偏差 BIAS; 表中的最后一行为 3 个区域网的 RMS 和 BIAS 的平均值. 表 5 给出了 3 个区域网各测站和整个网 6 d 平均的相对于 CODE 结果的 RMS 和 BIAS.

从表 2~5, 我们可得到下面一些结果: (1) 3 个独立区域网生成的 VTEC 无论是单天解还是 6 d 的平均值与 CODE 比较, 呈现一致性的 RMS 和 BIAS, 各测站间的差别也不大, 这表明在本观测时段内我们区域网多项式电离层建模生成的 VTEC 是稳定和可靠的. (2) 对 3 个区域网的 ORG_RMS (原始的比较 RMS 值)/ CRT_RMS (去除系统偏差的改正 RMS 值)/ ORG_BIAS (原始的比较 BIAS 值) 结果比较, 无论是单天解还是 6 d 的平均值, 均是 China_vicinity 网最优, SH_vicinity 网次之, SH_city 网较差. 它们在去除系统偏差后的相对于 CODE 结果的 RMS 6 d 平均值分别为 1.9250 TECu、2.0891 TECu、2.4994 TECu. 这样的精度已能满足高精度导航定位中电离层延迟改正的需要. (3) 3 个独立的区域网解算的 VTEC 与 CODE 的结果呈现一致性的系统偏差 (SH_city 网、SH_vicinity 网、China_vicinity 网分别为 -4.3733 TECu、-4.1226 TECu、-3.6338 TECu). 这个系统偏差的量级远大于 DCB 的系统偏差 (约为 -0.1 ns), 它对电离层延迟的影响至少要比 DCB 大一个量级, 因此这个系统偏差显然不是来自 DCB, 而是反映了中国 GPS 网与 CODE 解算的 VTEC 之间的确存在较大的系统偏差. 全国分布的 China_vicinity 网与上海附近的两个小网 (SH_vicinity 网和 SH_city 网) 之间没有公用站, 两者之间解算的 VTEC 的结果相互完全独立, 两者之间出现的一致性系统偏差, 正说明了中国 GPS 区域网解算的 VTEC 在上海地区得到了可靠的外部检核. 因此, 3 个网解算 VTEC 与 CODE 的结果呈现出一致性的系统偏差意味着 CODE 在中国地区的 VTEC 分布确实存在一定的系统偏差. 产生这个系统偏差的原因, 一部分可能是 CODE 生成 TEC 全球解时, 能用的中国境内的 IGS 站较少所致; 另一部分则可能是区域建模模型误差所致.

当然, 以上的结果均是在本文考察的时段内得到的, 更严谨的结论需今后计算更多的时段来论证. 另外, 本文考察的时段属电离层活动的平静期, 估计在电离层活动期监测的结果要差些.

表 2 SH_city 网解得的 VTEC 与 CODE 结果的比对

Table 2 Comparison of VTEC computed from SH_city with that of CODE

STANAM	ORG_RMS(TECu)	CRT_RMS(TECu)	ORG_BIAS(TECu)
shjs	7.2431	3.1523	-6.6423
shnh	7.0904	3.1963	-6.4130
shph	7.3235	4.5030	-5.7902
shys	7.2682	3.4880	-6.4691
btdy	5.7575	2.2187	-5.3132
bthm	5.7270	2.2101	-5.2843
SH_city	6.7350	3.1281	-5.9854

表 3 SH_vicinity 网解得的 VTEC 与 CODE 结果的比对

Table 3 Comparison of VTEC computed from SH_vicinity with that of CODE

STANAM	ORG_RMS(TECu)	CRT_RMS(TECu)	ORG_BIAS(TECu)
bthz	5.6075	2.2180	-5.1519
btdf	5.3800	2.0816	-4.9613
btdy	5.4303	2.1805	-4.9735
bthm	5.3892	2.1540	-4.9406
btgc	5.4957	2.1582	-5.0543
shys	6.8705	3.4882	-6.0004
shnh	6.6629	3.1722	-5.9302
ahma	5.8983	2.6898	-5.2548
zjhz	6.1442	4.7078	-4.0617
SH_vicinity	5.8754	2.7611	-5.1496

表 4 China_vicinity 网解得的 VTEC 与 CODE 结果的比对

Table 4 Comparison of VTEC computed from China_vicinity with that of CODE

STANAM	ORG_RMS(TECu)	CRT_RMS(TECu)	ORG_BIAS(TECu)
dxin	4.1781	1.6170	-3.8577
dlha	4.0078	1.5223	-3.7078
xnin	3.9519	1.6636	-3.5855
lhas	4.3881	2.2523	-3.7676
xiag	4.9862	2.8665	-4.1043
guan	4.6815	2.5958	-3.9037
xiam	4.4823	2.6255	-3.6330
luzh	4.3834	2.2834	-3.7426
wuhn	4.4815	2.6930	-3.5829
shao	4.1323	2.2442	-3.4747
zhnz	3.9411	1.7102	-3.5522
xiaa	4.4198	2.7387	-3.4739
yanc	4.0799	1.8600	-3.6313
tain	3.8961	1.6140	-3.5477
bjfs	3.9636	1.5207	-3.6603
jixn	4.0011	1.7625	-3.5925
China_vicinity	4.2484	2.0981	-3.6761

表 5 3 网 6 d 解得 VTEC 与 CODE 比对的平均值

Table 5 6-d mean values of the comparison of VTEC computed from three Chinese GPS regional networks with that of CODE

STANAM	ORG_RMS(TECu)	CRT_RMS(TECu)	ORG_BIAS(TECu)
shjs	5.2007	2.4784	-4.5420
shnh	5.1334	2.4311	-4.4883
shph	5.3244	3.3577	-4.0784
shys	5.2488	2.6563	-4.4887
btdy	4.8210	2.0858	-4.3173
bthm	4.7753	1.9872	-4.3185
SH_city	5.0839	2.4994	-4.3733
bthz	4.6849	2.0718	-4.1705
btdf	4.5333	1.8325	-4.1288
btdy	4.5655	2.0799	-4.0283
bthm	4.5161	1.9737	-4.0314
btgc	4.5810	2.0645	-4.0529
shys	5.0266	2.7155	-4.1834
shnh	4.9005	2.4825	-4.1854
ahma	4.9688	2.5516	-4.2001
zjhz	5.8902	4.9361	-3.0994
SH_vicinity	4.7221	2.0891	-4.1226
dxin	4.5652	1.7795	-4.2577
dlha	4.3103	1.6011	-4.0122
xnin	4.1372	1.6355	-3.7917
lhas	4.1305	2.1183	-3.5425
xiag	4.3620	2.2562	-3.7258
guan	4.1420	2.0994	-3.5650
xiam	4.1514	2.2312	-3.5010
luzh	4.0704	1.9424	-3.5492
wuhn	4.3244	2.6961	-3.3060
shao	3.8510	2.0481	-3.2426
zhnz	3.8497	1.5643	-3.4832
xiaa	4.3257	2.5935	-3.4118
yanc	4.1899	1.7240	-3.8072
tain	3.8432	1.5219	-3.5069
bjfs	4.0198	1.4277	-3.7537
jixn	4.0068	1.5619	-3.6836
China_vicinity	4.1480	1.9250	-3.6338

5 结论

本文利用中国境内的 3 个不同跨度、相互间完全独立的区域 GPS 网 2007 年 10 月 11 日至 10 月 16 日 6 d 的 GPS 实测数据, 采用多项式电离层模型, 考察了区域网独立生成 GNSS 的电离层 TEC 产品—区域网上空的 VTEC 和 GNSS 卫星的硬件延迟 DCB 的可行性和所能达到的比对精度. 通过与国际 GPS 分析中心 CODE 事后精密的电离层

产品比较, 得到如下的一些初步结论:

(1) 3 个区域网独立生成的 VTEC 和卫星的 DCB 与 CODE 的相应产品比较, 对不同的天、不同的站呈现一致性的 RMS 和 BIAS. 这表明利用多项式电离层建模生成的区域网 VTEC 和 DCB 是稳定和可靠的, 本文采用的方法是正确的. 对 3 个区域网 VTEC 的 $ORG_RMS / CRT_RMS / ORG_BIAS$ 结果比较, 均是 China_vicinity 网最优, 去除系统偏差后的 RMS 相对于 CODE 的 VTEC 6 d 平均值为 1.925 TECu. 这表明利用中国现有的全国 GPS 网, 独立生成中国上空的 VTEC 和卫星的 DCB 是可行的, 可达到较高的精度, 能满足我国广大的 GNSS 导航用户的需要.

(2) 不同的 GPS 网生成的卫星的 DCB 出现一致性的系统偏差的原因, 来自解算采用了同样的约束条件 (9) 式, 而又用了不同的卫星所致. 此约束条件意味着假设所有观测到的 GPS 卫星硬件延迟的平均延迟为零, 这显然不一定符合实际情况. 这就可能导致解得的各卫星 DCB 与实际的 DCB 存在一个系统偏差. 但这个系统偏差不是本质的, 它并不影响导航定位的精度.

(3) 3 个完全独立的区域网解算的 VTEC 与 CODE 的结果呈现一致性的系统偏差, 表明 CODE 电离层产品中在中国地区的 VTEC 分布确实存在一定的系统偏差. 产生这个系统偏差的原因一部分可能是 CODE 生成 TEC 全球解时, 能用的中国境内的 IGS 站较少所致; 另一部分则可能是区域建模模型误差所致. 这也意味着, 利用中国 GPS 网的实测资料生成的中国境内的有关电离层产品, 可优于 CODE 的相应产品.

(4) 中国 GPS 网独立测定的 DCB 和 VTEC 的结果与 CODE 的结果相比, 去除系统偏差后的 RMS 分别为 0.25 ns 和 2.0 TECu, 已足以满足广大 GNSS 单频用户实现高精度准实时导航定位中电离层延迟改正的需要. 更可靠的评估尚待落实到高精度的定位结果上. 以上的初步结论是在本文考察的时段内得到的, 这些结论尚有待计算更多的时段, 采用更多的方法来严格论证.

参 考 文 献

- [1] 常青, 张东和, 肖佐, 等. 科学通报, 2000, 45: 1676
- [2] 宋小勇, 杨志强, 焦文海, 等. 大地测量与地球动力学, 2009, 29: 127
- [3] 常青, 张东和, 肖佐, 等. 地球物理学报, 2001, 44: 596
- [4] 李志刚, 程宗颐, 冯初刚, 等. 地球物理学报, 2007, 50: 327
- [5] 朱文耀, 章红平, 黄 斌, 等. 地球物理学报, 2004, 47: 941
- [6] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, et al. RaSc, 1998, 33: 565
- [7] Lanyi G. TDA Progress Report, 1986, 85: 1
- [8] 章红平, 施闯, 唐卫明. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33: 805
- [9] 袁运斌, 欧吉坤. 自然科学进展, 2005, 15: 1015
- [10] Wilson B D, Mannucci A J, Edwards C D. RaSc, 1995, 30: 639
- [11] Meza A, Brunini C, Bosch W, et al. AdSpR, 2002, 30: 401
- [12] Todorova S, Schuh H, Hobiger T, et al. Vermessung & Geoinformation, 2007, 2: 80
- [13] 袁运斌, 欧吉坤. 测绘学报, 1999, 28: 110
- [14] Wilson B D, Mannucci A J, Edwards C D. Subdaily Northern Hemisphere Ionospheric Maps Using an Extensive Network of GPS Receivers. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory
- [15] Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. JGeod, 2009, 83: 263

[16] Feltens J. IGS Presentation. JPL Ionosphere Workshop, December 1-3, 1998

A Research on the Reliability of Ionospheric VTEC and Satellite DCB from Regional GPS Network

XUE Jun-chen^{1,2} SONG Shu-li¹ ZHU Wen-yao¹ LU Xiu-shan²

(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(2 *Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510*)

ABSTRACT According to the requirement of high-precision satellite navigation, the method and result of quasi-real-time monitoring the variation of the regional ionospheric TEC (total electron content) and GPS satellite differential code bias (DCB) are introduced. The pseudo-range data smoothed by dual-frequency carrier phase are used from the GPS networks in China. Especially, the feasibility of retrieving DCB independently from the regional GPS networks with different sizes is studied. Three networks based on the GPS stations in China are constructed. The comparison of the computed DCB and VTEC (vertical total electron content) with those of CODE (Center for Orbit Determination in Europe) shows that it is necessary to consider the size of regional network in order to obtain the reliable result of local quasi-real-time measured DCB; the compared precisions of the regional quasi-real-time measured VTEC and DCB are about 2.0 TECu and 0.25 ns, respectively.

Key words astrometry, earth: atmosphere, methods: analytical