0254-6124/2014/34(2)-168–12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Xiaolan, Ma Guanyi. Derivation of TEC and GPS hardware delay based on dual-frequency GPS observations (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(2): 168-179, doi:10.11728/cjss2014.02.168

基于双频 GPS 观测的电离层 TEC 与硬件延迟反演方法*

王晓岚[1,2] 马冠一[2]

1(中国科学院大学 北京 100049)

2(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要 利用全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 的双频观测数据反演得到电离层的总电子含量 (Total Electron Content, TEC), 使得广域甚至全球范围高时空分辨率的电离层观测研究成为可能, 但由于 GPS 卫星和接收机对信号的硬件延迟可导致 TEC 测量系统偏差, 因此, 需要探索反演 TEC 并估测 GPS 卫星与接收机硬件延迟的有效算法. 本文根据电离层电波传播理论, 阐述了基于双频 GPS 观测提取电离层 TEC 的方法, 给出 TEC 与硬件延迟的基本关系. 综合研究了 TEC 与硬件延迟的反演方法, 进行分析与归纳分类, 在此基础上提出了有待深入研究的问题.

关键词 GPS, 电离层, TEC, 硬件延迟

中图分类号 P 352

Derivation of TEC and GPS Hardware Delay Based on Dual-frequency GPS Observations

WANG Xiaolan[1,2] MA Guanyi[2]

1(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

2(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

Abstract The ground-based GPS receivers and hence networks enable studies of the ionosphere on a large regional or global scale by measuring the ionospheric TEC from dual-frequency GPS observations. However, originated in the hardware delay of the GPS satellite and receivers, a systematic bias affects the accuracy of the TEC derivation greatly. For accurate estimation of TEC, satellite and receiver instrumental biases should be removed from TEC measurements properly. This paper gives a comprehensive review of the algorithms on TEC and GPS hardware delays derivations. Starting from ionospheric radio wave propagation, the paper describes how the TEC is related with hardware delays. Then the TEC derivation methods are analyzed, evaluated and categorized into 3 main types.

* 中国科学院科技创新重点部署项目 (KGFZD-125-14-005-2)、中国科学院重点部署项目 (KJCX2-EW-J01)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KGCX2-EW-407-1) 和中国科学院国家天文台青年人才基金项目 (NAOCQN) 共同资助

2013-05-13 收到原稿, 2013-12-27 收到修定稿

E-mail: xlwang@bao.ac.cn

Finally, some suggestions are provided for further research on derivation of TEC and hardware delay.

Key words GPS, Ionosphere, TEC, Hardware delay

0 引言

电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 是表征电离层特性的重要参数之一. 利用卫星导航系统观测电离层 TEC 是一种新的观测手段, 其基本原理是根据电离层对电波的时延与色散效应来测量电离层 TEC, 从而利用 GPS-TEC 对电离层进行研究. 随着 GPS 应用的深入与拓展, 大规模的 GPS 观测网在许多地区相继构建, 使得广域甚至全球范围高时空分辨率的电离层观测研究成为可能. 近年来, 中国北斗卫星导航系统开始对中国及其周边区域进行探测, 利用北斗卫星开展电离层观测与基于 GPS 的相关观测原理是相同的, 其对促进电离层研究以及北斗卫星导航系统的发展和应用具有重大意义.

利用 GPS 反演 TEC 不仅可以监测电离层及预测电离层磁暴, 深入研究太阳风暴与地球磁层、热层的相关活动, 利用计算得到的高时空分辨率 TEC 还可建立区域或全球电离层延迟改正模型, 进而改善 GPS 用户 (特别是单频 GPS 用户) 的导航定位精度. 然而, 在利用 GPS 双频观测数据反演 TEC 时, GPS 卫星和接收机对信号产生的硬件延迟会带来系统偏差, 这种硬件延迟已成为 TEC 测量的最大误差源, 甚至可能导致 TEC 的数据为负值. 研究表明, GPS 卫星的硬件延迟一般在 $-10\sim10$ ns 之间变化, 如果忽略 GPS 卫星的硬件延迟影响, TEC 误差可达 30 TECU[1]. 因此, 在利用 GPS 系统反演 TEC (简写为 GPS-TEC) 时, 必须估测出 GPS 系统硬件延迟并予以剔除.

针对不同 GPS 观测系统相关研究提出了相应的 GPS-TEC 和硬件延迟反演方法. 其基本思想是利用 GPS 双频观测数据, 将 TEC 和硬件延迟作为待估参数代入观测方程, 再对 TEC 和硬件延迟进行估算 [2]. 在 GPS 系统应用初期, 针对单台 GPS 接收机的电离层观测, 将 TEC 表征为纬度和经度的多项式, 采用最小二乘法对本地 TEC 的模型系数以及卫星和接收机的联合硬件延迟进行估算 [3−4]. 随着 GPS 应用的推广, 基于多台 GPS 接收机的观测数据, 提出了采用卡尔曼滤波方法对 TEC 和硬件延迟进行估算的反演方法 [5]. 美国加州帕萨迪纳喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 利用 GPS 网观测数据生成了全球 TEC 图, 该观测网由 250 多台连续工作的 GPS 接收机组成, 将球面按照纬度和经度划分为 $2.5^\circ\times5.0^\circ$ 网格, 在太阳–地磁参考坐标系下利用双三角曲线建立 TEC 模型, 采用卡尔曼滤波方法同时得到 TEC 和硬件延迟 [1,6]. 美国麻省理工学院 Haystack 天文台开发了一种软件 MAPGPS, 该软件可以自动下载并处理 GPS 双频数据, 获得电离层 TEC 并生成全球 TEC 图 [7]. 日本国立信息通信技术研究院通过 GPS 地球观测网系统 (GPS Earth Observation Network, GEONET) 反演出实时 TEC 图, 利用 300 多台 GPS 接收机数据, 假设在 $2.0^\circ\times2.0^\circ$ (纬度 × 经度) 网格内任意一点的 TEC 都是相同的, 采用最小二乘法获得日本上空的 TEC 和硬件延迟 [8]. 在中国, 有研究利用 IGS 网站的 GPS 观测数据, 采用多项式拟合表征电离层模型, 估算电离层 TEC 值和 GPS 系统硬件延迟, 并分析了 TEC 随季节变化的特性 [9]; 另有研究基于小规模的 GPS 接收机网, 采用 $1.0^\circ\times3.5^\circ$ (纬度 × 经度) 的网格划分, 提出了反演 TEC 和硬件延迟的算法 [10−11].

本文重点研究基于双频 GPS 观测反演 TEC 与硬件延迟的方法, 分析反演方法的特点并进行归纳分类, 在此基础上提出了进一步的研究重点.

1 基于 GPS 观测数据的 TEC 反演

1.1 斜向 TEC 提取

忽略电子和离子速度分布, 只考虑平均电子的漂移速度, 从单电子运动方程出发, 结合等离子体的结构方程, 依据 Appleton-Hartree 公式及电波传播基本理论, 由电离层引起的 GPS 信号相位超前和群时延可表示为如下形式:

$$\delta t_{\rm p}=\frac{1}{c}\int_S(n_{\rm p}-1){\rm d}s=-\frac{40.31}{cf^2}\int_S N_{\rm e}{\rm d}s,$$

$$\delta t_{\rm g}=\frac{1}{c}\int_S(n_{\rm g}-1){\rm d}s=\frac{40.31}{cf^2}\int_S N_{\rm e}{\rm d}s. \qquad (1)$$

其中, $\int_S N_{\mathrm{e}}\mathrm{d}s$ 表示沿卫星信号传播路径 S 对电子密度 N_{e} 进行积分, 即以底面面积为一个单位面积, 沿信号传播路径贯穿整个电离层的一个柱体中所包含的总电子含量, 定义符号 N_{TEC}, 有

$$N_{\mathrm{TEC}} = \int_S N_{\mathrm{e}}\mathrm{d}s, \tag{2}$$

因此, 由电离层引起的载波相位超前量和码波延迟量分别为

$$\begin{aligned} \delta t_{\mathrm{p}} &= -\frac{40.31}{f^2}N_{\mathrm{TEC}}, \\ \delta t_{\mathrm{g}} &= \frac{40.31}{f^2}N_{\mathrm{TEC}}. \end{aligned} \tag{3}$$

GPS 卫星在频率 f_1 (1575.42 MHz) 和频率 f_2 (1227.6 MHz) 两个载波频率上发射导航信号, GPS 双频接收机可以分别得到两个频率上的伪距观测值和载波相位观测值. 在仅考虑对流层延迟、电离层延迟及接收机钟差的条件下, GPS 双频接收机伪码测量观测方程如下 [12]:

$$\begin{aligned} P_1 &= \rho + c(\mathrm{d}T - \mathrm{d}t) + c\delta t_{\mathrm{g1}} + \delta\rho_{\mathrm{trop}}, \\ P_2 &= \rho + c(\mathrm{d}T - \mathrm{d}t) + c\delta t_{\mathrm{g2}} + \delta\rho_{\mathrm{trop}}. \end{aligned} \tag{4}$$

其中, P_1 和 P_2 分别为两个频率 f_1 和 f_2 测得的伪距观测值, ρ 为卫星与接收机的真实距离, δt_{g1} 和 δt_{g2} 分别为电离层引起的对应于频率 f_1 和 f_2 的群时延, c 为真空光速, $\mathrm{d}T$ 和 $\mathrm{d}t$ 分别为卫星与接收机的钟差, $\delta\rho_{\mathrm{trop}}$ 为对流层延迟量. 由式 (4) 可以得到沿 GPS 信号传播路径上的电离层斜向 TEC, 即

$$N_{\mathrm{TECsp}} = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)}(P_2 - P_1), \tag{5}$$

类似地, 利用相位观测量也可以得到电离层斜向 TEC, 有

$$N_{\mathrm{TECsl}} = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)}(L_1\lambda_1 - L_2\lambda_2 + N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2). \tag{6}$$

其中, $k = 80.62\ \mathrm{m^3{\cdot}s^{-2}}$ 表示电离层折射率; L_1 和 L_2 为载波相位观测量; λ_1 和 λ_2 分别为两个载波的波长; N_1 和 N_2 分别为两个载波上的整周模糊度, 其是一个未知的常数.

可以看出, 由伪距观测得到的 TEC 是绝对测量值, 而载波测量得到的 TEC 是相对测量值. 由于伪距测量噪声大于载波相位测量噪声, 可以利用载波相位观测量平滑伪距观测量, 从而获得传播路径上精度较高的 TEC 值. 为此, 通常采用引入平滑量 B_{rs}, 从而得到高精度的斜向 TEC 值 [8], 有

$$B_{\mathrm{rs}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(N_{\mathrm{TECsp}i} - N_{\mathrm{TECsl}i})\sin^2\alpha_i}{\sum_{i=1}^{N}\sin^2\alpha_i}. \tag{7}$$

其中, N 为一次卫星过顶的有效采样次数. Ma 等 [8] 引入卫星仰角 α_i 的正弦平方作为权重因子是为了抑制低仰角时 GPS 接收机受到的多路径效应的影响. 这样即可得到高精度的斜向 TEC, 即

$$N_{\mathrm{TECs}} = N_{\mathrm{TECsl}} + B_{\mathrm{rs}}. \tag{8}$$

对于电离层研究, 更为关注的是观测站垂直方向的 TEC, 即 VTEC. 另外, GPS 卫星和接收机的硬件延迟也需要从 N_{TECsl} 中剔除.

1.2 垂直 TEC 和硬件延迟的获取

在 GPS 观测中, 同历元时刻来自不同卫星的 GPS 信号到某一测站时, 在其传播路径方向上的 TEC 值也不相同. 卫星仰角越小, 卫星信号在电离层中的传播路径越长, TEC 值就越大. 对于同一测站, 相同历元可观测到不同方位的 GPS 卫星信号, 其经过的传播路径不同, 不同路径上的 TEC 也不相同. 通常用 VTEC 来表示天顶方向的总电子含量, VTEC 可以反映测站上空电离层的总体特征, 因此被广泛采用 [2].

天顶方向通过电离层的信号路径最短, 因此, 垂直方向上的总电子含量 (VTEC) 最少. 通常所用的电离层 TEC 参数实际上是垂直方向上的总电子含量, 以 $10^{16}\mathrm{m^{-2}}$ 为单位 (TECU).

利用式 (5) 和式 (6) 求得的是信号传播路径上的斜向 TEC. 为将其换算为天顶方向的总电子含量 VTEC, 可以引入电离层单层模型 SLM (Single Layer Model). 如图 1 所示, SLM 模型假定电离层中所有自由电子都集中在一个厚度无限薄的单层上, 单层距地面的高度一般取 350~450 km.

图 1 中, S 为卫星位置, R 为接收机位置, P 为信号传播路径与电离层的交点即穿刺点, α 为卫星仰角, χ 为天顶角, R_{e} 为地球平均半径, h 为假设的电离层高度, 则有

$$\frac{R_{\mathrm{e}} + h}{\cos\alpha} = \frac{R_{\mathrm{e}}}{\sin\chi}. \tag{9}$$

利用式 (9) 可以得到卫星的天顶角

$$\chi = \arcsin\Big(\frac{R_{\rm e}\cos\alpha}{R_{\rm e}+h}\Big). \tag{10}$$

穿刺点 P 处的 VTEC 可表示为

$$N_{\rm VTEC} = N_{\rm TECs}\cdot\cos\chi. \tag{11}$$

由于 $N_{\rm TECsl}$ 中包含了卫星硬件延迟和接收机硬件延迟, 因此利用式 (11) 获得穿刺点的 VTEC 也会受到硬件延迟的影响, 使 VTEC 存在较大偏差, 甚至可能导致 VTEC 的数值为负. 在利用双频 GPS 观测值测量 TEC 时, 必须尽可能准确估算并剔除 GPS 系统的硬件延迟. 因此, 在考虑硬件延迟的条件下, 穿刺点 P 处的 VTEC 可表示为

$$N_{\rm VTEC} = (N_{\rm TECs} - b_{\rm s} - b_{\rm r})\cos\chi. \tag{12}$$

其中, $b_{\rm s}$ 为卫星的硬件延迟, $b_{\rm r}$ 为接收机的硬件延迟.

2 GPS-TEC 与硬件延迟的反演算法

GPS-TEC 和硬件延迟的反演方法有多种, 这些反演方法大致可分为三类: 一是卡尔曼滤波方法, 二是多项式函数模型, 三是网格法. 对于每一类反演方法, 采用观测站个数及模型类型不同, 考虑网格空间分辨率等因素, 针对不同情况下的 TEC 和硬件延迟, 各种反演方法具有不同特性.

2.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是对随机信号进行估计的算法之一 [5,13]. 该方法将被估计量看做系统状态, 并假设该状态的变化满足一定随机过程, 从而采用被估计量的统计信息, 利用量测方程将已知的量测量与被估计量联系起来. 该方法最大的优点是采用了递推算法, 因而适用于实时计算.

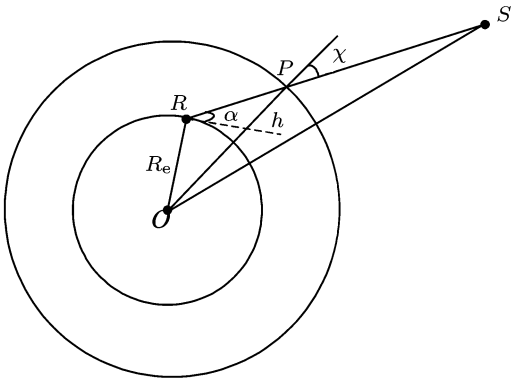


图 1 电离层 SLM 模型

Fig. 1 Single Layer Model (SLM) of Ionosphere

为了将卡尔曼滤波方法应用于反演电离层 TEC 和硬件延迟, 一般选择日地坐标系, 并假设 VTEC 在短时间内不发生明显变化, 根据双频 GPS 观测数据计算得到斜向 TEC 后, 将 TEC 围绕测站天顶方向线性展开, 只保留一阶项, 即可得到卡尔曼滤波所要求的量测方程:

$$\begin{aligned} N^i_{{\rm TECs}j}(k) =& S(e^i_j)[a_j(k)+ \\ & b_j(k){\rm d}\theta^i_j + c_j(k){\rm d}\phi^i_j + b_{{\rm s}_i} + b_{{\rm r}_j}]. \end{aligned} \tag{13}$$

其中,

$$S(e^i_j) = \sec\Big[\arcsin\Big(\frac{R_{\rm e}}{R_{\rm e}+h_i}\cos e^i_j\Big)\Big], \tag{14}$$

$${\rm d}\theta^i_j = \theta^i_j - \theta_j, \tag{15}$$

$${\rm d}\phi^i_j = \phi^i_j - \phi_j, \tag{16}$$

$N^i_{{\rm TECsl}j}$ 为接收机 j 至卫星 i 的斜向 TEC, $a_j(k)$ 为接收机所处位置的 VTEC, θ^i_j 和 ϕ^i_j 为电离层穿刺点在日地坐标系中的经纬度, θ_j 和 ϕ_j 为接收机在日地坐标系中的经纬度, $b_{{\rm s}_i}$ 为卫星硬件延迟, $b_{{\rm r}_j}$ 为接收机硬件延迟. 待估计状态是 $a_j(k), b_j(k), c_j(k), b_{{\rm s}_i}$ 和 $b_{{\rm r}_j}$. 一般假定所有卫星硬件延迟的总和为零, 由此可以确定接收机相对于卫星硬件延迟的平均值.

假设待估状态满足随机游走过程, 卡尔曼滤波方法所要求的状态方程为

$$\begin{aligned} a_j(k) =& a_j(k-1) + b_j(k-1)[\theta_j(k) - \theta_j(k-1)]+ \\ & c_j(k-1)[\phi_j(k) - \phi_j(k-1)] + w_{j,a}(k), \\ b_j(k) =& b_j(k-1) + w_{j,b}(k), \\ c_j(k) =& c_j(k-1) + w_{j,c}(k), \\ b_{{\rm s}_i}(k) =& b_{{\rm s}_i}(k-1) + w_j(k), \\ b_{{\rm r}_j}(k) =& b_{{\rm r}_j}(k-1) + w_j(k). \end{aligned} \tag{17}$$

将量测方程和状态方程写为矩阵相乘的形式, 设状态矢量 $\boldsymbol{X}_k$ 为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{X}_k =& [a_j(k) \quad b_j(k) \quad c_j(k) \quad b_{{\rm r}_j}(k) \\ & b_{\rm s1}(k) \quad b_{\rm s2}(k) \quad \cdots \quad b_{\rm s32}(k)]^{\rm T}. \end{aligned} \tag{18}$$

假设有 m 个观测量, 则观测量 $\boldsymbol{Z}_k$ 为

$$\boldsymbol{Z}_k = [\, N^1_{\mathrm{TECs}j} \quad N^2_{\mathrm{TECs}j} \quad \cdots \quad N^m_{\mathrm{TECs}j} \,]^{\mathrm{T}}. \tag{19}$$

矩阵 $\boldsymbol{H}_k$ 为 $m \times (m+4)$ 阶量测矩阵, 有

$$\boldsymbol{H}_k = \begin{bmatrix} A & A\alpha & A\delta & 1 & \cdots & 1 & \cdots & \cdots \\ B & B\beta & B\varepsilon & 1 & \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C & C\rho & C\eta & 1 & \cdots & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix}. \tag{20}$$

矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$ 为 $(m+4) \times (m+4)$ 阶状态转移矩阵, 有

$$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & D & E & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{21}$$

其中,

$$\begin{aligned} &A = S(e^1_j) \quad \alpha = \mathrm{d}\theta^1_j \quad \delta = \mathrm{d}\phi^1_j, \\ &B = S(e^2_j) \quad \beta = \mathrm{d}\theta^2_j \quad \varepsilon = \mathrm{d}\phi^2_j, \\ &C = S(e^m_j) \quad \rho = \mathrm{d}\theta^m_j \quad \eta = \mathrm{d}\phi^m_j, \\ &D = \theta_j(k) - \theta_j(k-1), \\ &E = \phi_j(k) - \phi_j(k-1). \end{aligned}$$

状态方程为

$$\boldsymbol{X}_k = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\boldsymbol{X}_{k-1} + \boldsymbol{W}_k. \tag{22}$$

量测方程为

$$\boldsymbol{Z}_k = \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{V}_k. \tag{23}$$

假设 $\boldsymbol{W}_k$ 和 $\boldsymbol{V}_k$ 均为零均值白噪声序列, 前者为系统噪声, 后者表示量测噪声.

Sardon 等 [5] 针对 19 个月的 GPS 数据估测了 19 台接收机的硬件延迟, 选取电离层高度为 355 km, 利用卡尔曼滤波方法, 估计出绝大部分 (17 台) 接收机的硬件延迟标准差在 1 ns 以内. Chang 等 [14] 给出了用于估计 GPS 系统硬件延迟的卡尔曼滤波状态方程和观测方程, 并给出了滤波器初值的计算方法, 进而对 GPS 系统硬件延迟及卫星和接收机硬件延迟的稳定性进行了评价, 通过对 GPS 双频数据进行处理, 图 2 给出了各卫星相对于接收机和相对于硬件延迟平均值的标准差, 从图 2 可以看出, 相应硬件延迟标准差均不超过 0.22 ns 和 0.18 ns, 图 3 给出的是 TEC 周日变化, 可以看出, 其很好反映了 TEC 的周日变化特点.

Li 等 [15] 利用 BJFS 台站 2004 年 1 月 3 日伪距观测量计算的 TEC 作为卡尔曼滤波器的输入量, 得到每个时刻的状态估计值, 从图 4 可以看出, 除去卫星和接收机硬件延迟后, 电离层穿透点处的 TEC 明显反映了 TEC 的日变化. 对计算得到的 2004 年全年卫星和接收机硬件延迟进行统计, 图 5 给出了 BJFS 站 GPS 接收机硬件延迟的逐日变化, 从图 5 可以看出, 年平均值为 15.42 TECU, 标准差为 2.04 TECU. 图 6 给出的是所有卫星硬件延迟的年标准差, 坐标 0 点表示 BJFS 接收机的值, 从图 6 可以看出, 全年所有卫星硬件延迟标准差都在 1.85 TECU 以下, 标准差的平均值为 1.35 TECU. 该方法得到的硬件延迟与 CODE 发布的硬件延迟偏差范围在 −0.89~2.98 TECU, 偏差平均值为 0.56 TECU, 标准差为 0.96 TECU.

综上, 基于卡尔曼滤波不同求解硬件延迟的方法均得到了较一致的解算结果, 说明卡尔曼滤波方法对于求解硬件延迟是一种有效的算法.

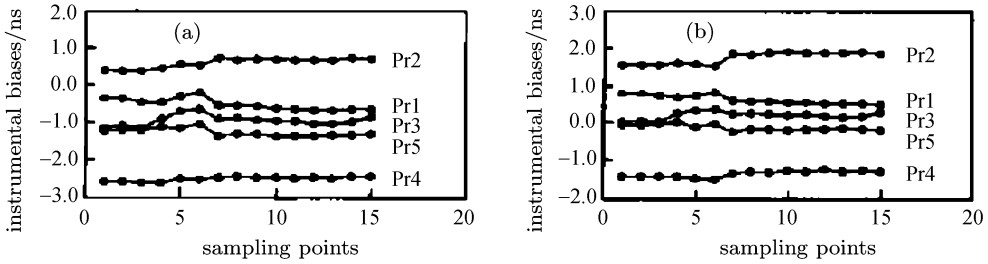


图 2 相对于接收机 (a) 与平均值 (b) 的卫星硬件延迟

Fig. 2 Satellite instrumental biases relative to receiver (a) and the mean (b)

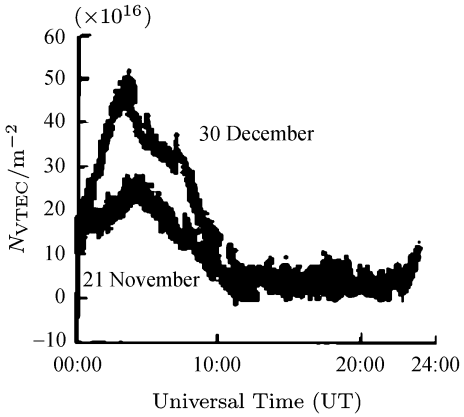


图 3 北京地区上空 TEC 的周日变化

Fig. 3 Diurnal change of vertical TEC over Beijing

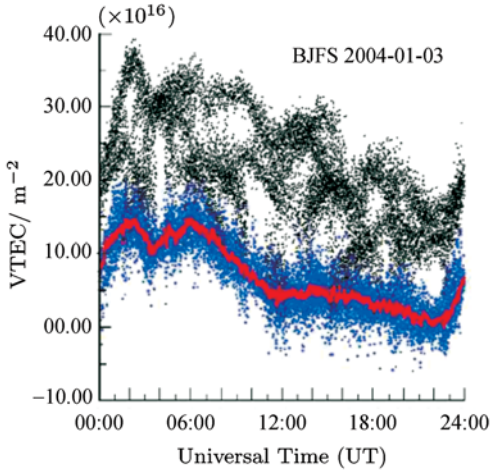


图 4 BJFS 站观测的 2004 年 1 月 3 日 TEC

Fig. 4 Variation of TEC on January 3, 2004 observed at BJFS station

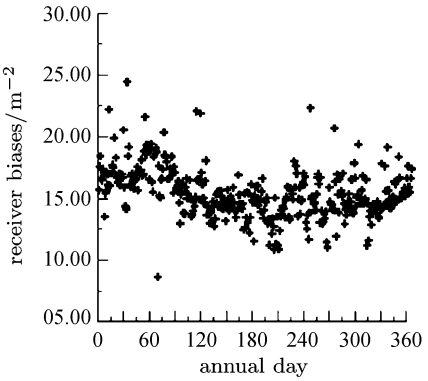


图 5 2004 年 BJFS 站接收机硬件延迟的年变化

Fig. 5 Daily variation of receiver instrumental bias in 2004 at BJFS

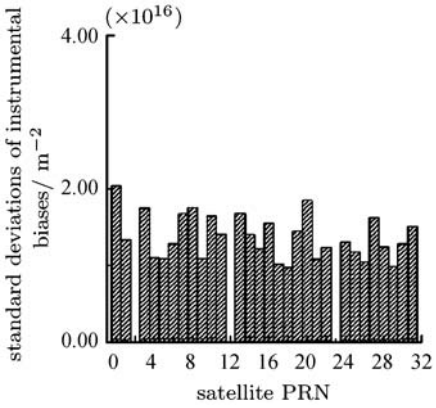


图 6 2004 年所有卫星及接收机硬件延迟的年标准差

Fig. 6 Standard deviations of instrumental biases for all GPS satellites and receiver in 2004

应用卡尔曼滤波方法估算 GPS-TEC 和硬件延迟需要建立准确的状态方程 (系统模型) 和量测方程 (观测模型). 卡尔曼滤波算法的关键是建立系统的状态方程, 但其往往只能用近似模型来代替, 势必导致模型出现误差, 从而对滤波产生影响. 另外, 卡尔曼滤波方法采用对每个历元数据进行估算的方式, 若对多站数据进行估算会大大增加数据处理时效. 因此, 对于该方法而言, 如何建立系统的状态方程及提高数据的解算速率尚需深入研究.

2.2 多项式函数模型

多项式模型方法采用某种数学模型来拟合一段时间内由各观测站观测值求得的 VTEC, 进而建立起该时段的区域性或全球性电离层模型. 目前多采用曲面拟合模型与球谐模型.

2.2.1 曲面拟合模型

曲面拟合模型是将 N_{VTEC} 看为纬度差 $(\varphi-\varphi_0)$ 和太阳时角差 $(S-S_0)$ 的函数, 其具体表达式为

$$N_{\mathrm{VTEC}}=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}E_{ij}(\varphi-\varphi_0)^i(S-S_0)^j. \qquad (24)$$

其中, n, m 为多项式阶数; 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 时的太阳时角, 时角差 $S-S_0=(\lambda-\lambda_0)+(t-t_0)$, 这里 λ 为穿刺点的地理经度, t 为观测时刻; E_{ij} 为多项式模型系数. 由此可得到观测方程为

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}E_{ij}(\varphi-\varphi_0)^i(S-S_0)^j=$$
$$9.524\,37(P_2-P_1-b_{\mathrm{s}}-b_{\mathrm{r}})\cos\chi. \qquad (25)$$

组成观测方程后, 可采用最小二乘法进行参数估计, 统一解算出多项式数学拟合模型的系数 E_{ij} 以及卫星和接收机的硬件延迟.

Coco 等 [4] 利用夜间 TEC 数据, 采用曲面拟合模型, 将电离层模型高度取值为 350 km, 给出了基于单站测量数据求解硬件延迟的方法, 对 Block-I GPS 系统的测量表明, 卫星与接收机的联合硬件延迟标准偏差为 0.5 ns.

Huang 等 [16] 以中国 GPS 广域差分系统 (WAAS) 电离层误差改正问题为背景, 利用不同纬度上的 8 个 GPS 台站在 2000 年连续 59 天的观测数据, 评估了 GPS-TEC 硬件延迟求解方法的精度和有效性, 结果表明, 采用同样的求解方法处理磁暴期间以及磁纬较低台站数据得出的结果其稳定性明显下降, 因此, 求解时对观测数据和方法的慎重选择是很有必要的.

2.2.2 球谐模型

局部区域的曲面拟合模型一般不能用于模拟全球电离层 TEC, Schaer 等 [17] 研究表明, 利用球谐函数来模拟全球电离层活动是基本可行的. 球谐模型利用球谐展开级数函数对 VTEC 进行表征, 用于建立全球性电离层模型. 球谐模型的数学表达式如下:

$$N_{\mathrm{VTEC}}(\varphi,\lambda)=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{n}\tilde{P}_{nm}(\sin\varphi)\big[\tilde{C}_{nm}\cos(m\lambda)+\tilde{S}_{nm}\sin(m\lambda)\big]. \tag{26}$$

式中, φ 为穿刺点处地磁纬度; λ 为太阳–地磁参考框架下穿刺点处的地方时角; $n_{\max}$ 为球谐函数展开的最大阶数; $\tilde{P}_{nm}(\sin\varphi)=MC(n,m)P_{nm}(\sin\varphi)$ 为归一化后的勒让德函数, 这里 $MC(n,m)$ 为归一化函数; $\tilde{C}_{nm}$ 和 $\tilde{S}_{nm}$ 为未知的球谐函数系数.

目前, 国际 GPS 服务 (International GPS Service, IGS) 机构的各电离层工作组利用 GPS 观测资料模拟全球性电离层 TEC, 并提出了不同的全球 TEC 模拟方法. 例如, 欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 和欧洲空间运行中心 (European Space Operations Center, ESOC) 作为 IGS 的分析中心, 均采用电离层高度为 450 km 和 15 阶球谐函数模型表述全球电离层延迟的变化, 时间分辨率为 2 h[17−18]; 美国 JPL 采用电离层高度为 450 km, 不仅利用球谐函数模拟全球电离层 [19], 还将相近各点间的电离层假定为线性相关, 形成三角型格网电离层模型 [1]. 中国科学院测量与地球物理研究所提出了 IGGDCB 方法 [20], 电离层高度选取 375 km, 利用球谐函数对各单站的 VTEC 进行独立建模, 证实在太阳活动高年 (2001 年) 和太阳活动低年 (2009 年) GPS 卫星的硬件延迟分别可达到约 0.13 ns 和 0.1 ns.

综上可知, 多项式函数模型是采用不同的数学拟合模型对 VTEC 进行表征的, 曲面拟合模型由于不是正交函数基, 难以扩展到很高的阶数, 从而不能保证全球范围内的高时空分辨率, 因此适于区域性 TEC 的反演, 相应球谐模型则更适于全球性 TEC 的反演, 但如何选择最恰当的模型才能更为准确地反映出不同地区的 TEC 变化趋势尚需深入研究.

2.3 网格法

网格法的基本思路是将观测上空的区域按照一定划分尺度规定出若干个网络, 根据背景 TEC 在小空间范围和短时间内变化不大的特点, 假设同一网格内垂直 TEC 相等. 目前研究表明, 依据观测站点数量划分, 网格法可分为单站网格法 (自适应网格法) 和多站联合网格法.

2.3.1 自适应网格法

这种方法利用单站 GPS 双频数据, 将电离层按照地方时和纬度划分成大小为 $0.1\,\mathrm{h}\times0.5^\circ$ 的均匀网格, 采用的电离层高度为 400 km[15]. 假设每个网格内的 VTEC 相等, 有:

$$(N_{\mathrm{TECsl}i}-b_{\mathrm{s}i}-b_{\mathrm{r}})S(\alpha_{\mathrm{i}})=(N_{\mathrm{TECsl}k}-b_{\mathrm{s}k}-b_{\mathrm{r}})S(\alpha_k), \tag{27}$$

即

$$S(\alpha_k)(b_{\mathrm{s}k}+b_{\mathrm{r}})-S(\alpha_i)(b_{\mathrm{s}i}+b_{\mathrm{r}})=N_{\mathrm{TECsl}k}-N_{\mathrm{TECsl}i}. \tag{28}$$

其中, $N_{\mathrm{TECsl}k}$ 和 $N_{\mathrm{TECsl}i}$ 分别表示观测站接收机对于卫星 k 及卫星 i 倾斜路径上的 TEC, $S(\alpha_k)$ 和 $S(\alpha_i)$ 分别表示 $N_{\mathrm{TECsl}k}$ 及 $N_{\mathrm{TECsl}i}$ 穿刺点处的倾斜因子, $b_{\mathrm{s}k}$ 和 $b_{\mathrm{s}i}$ 分别表示卫星 k 及卫星 i 的硬件延迟, b_{r} 为观测站接收机硬件延迟. 由式 (28) 可以看出, 待求参数为每一颗 GPS 卫星的硬件延迟及该观测站接收机的硬件延迟. 对于时间采样间隔为 30 s 的 GPS 双频接收机, 一天内得到的观测方程远多于未知数, 观测方程组是超定方程组, 按照已有算法 (例如奇异值分解法等) 可以得到最小二乘意义下的最

优解, 从而进一步获得 GPS 卫星硬件延迟以及该观测站接收机的硬件延迟.

Li[13] 等采用该方法由 BJFS 台站 2004 年数据计算了电离层 TEC 以及卫星和接收机的硬件延迟, 并与卡尔曼滤波方法的解算结果进行比较. 图 7 给出的是 BJFS 站 2004 年 1 月 3 日电离层 TEC 的日变化, 可以看出自适应网格法得到的电离层 TEC 要比卡尔曼滤波法得到的 TEC 大 3~4 TECU 左右. 图 8 所示为所有卫星硬件延迟的年平均值, 从图中可以看出, 利用两种方法解算的卫星硬件延迟偏差范围为 −2.99 ~1.61 TECU, 偏差的平均值为 −0.09 TECU, 标准差为 0.95 TECU. 此外, 将自适应网格法解算结果与 CODE 公布的硬件延迟结果进行了比较 (见图 9), 可以看出, 两种方法得到的硬件延迟偏差范围为 −1.54~0.22 TECU, 平均值为 −0.46 TECU, 标准差为 0.47 TECU. 分析认为, 利用该方法解算的硬件延迟标准偏差与观测站的纬度有关, 在中国区域, 纬度越低, 估算的硬件延迟偏差越大, 说明硬件延迟的解算精度依赖于当地的电离层环境状态.

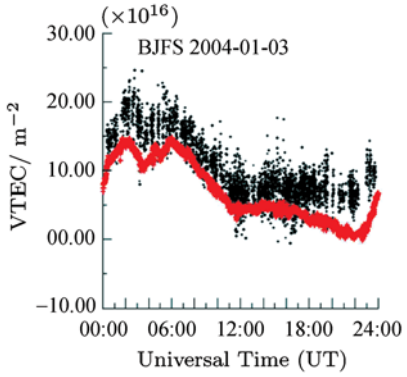


图 7 卡尔曼滤波法与自适应网格法所得 TEC 的比较

Fig. 7 Comparative study of TEC from Kalman filter and self-adjusted cell method

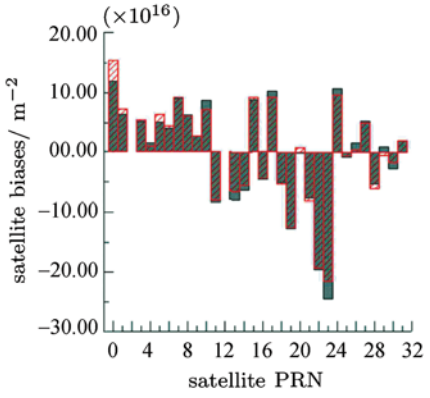


图 8 所有卫星及接收机硬件延迟的年平均值

Fig. 8 Yearly averages of instrumental bias for all satellites and BJFS's receiver

2.3.2 多站联合网格法

利用网格法对 TEC 和硬件偏差的反演可以基于单站观测数据, 也可以利用多站数据进行联合反演. 对于拥有高密度 GPS 网的地方, 例如日本, 可以联合台网中几百甚至上千台接收机进行联合反演 [8,21]. 多站联合网格法将 GPS 网上空的区域按照一定间距划分为若干个网络, 根据背景 TEC 在小空间范围和短时间内变化不大的特点, 假设同一个网格内垂直 TEC 相等, 把所有接收机的观测量组成方程组联合求解 TEC 和系统硬件延迟. 利用多站数据进行联合反演时, 由于观测站点多, 数据的时空分辨率高, 因此反演结果相对单站观测更加精确可靠.

Otsuka 等 [22] 提出一种新方法来构建日本上空 TEC 地图, 该方法采用超过 1000 台 GPS 接收机数据, 时间分辨率为 30 s, 空间分辨率按照经纬度划分, 其网格大小为 0.15°×0.15° (纬度 × 经度), 选取电离层高度为 400 km, 采用最小二乘法去除 GPS 卫星和接收机的硬件延迟, 对利用该方法得到的 TEC 与 MU 雷达获得的电离层 TEC 值进行比较, 其差值的平均值约为 2 TECU. 将该方法应用于 1998 年 9 月 25 日磁暴期间的 GPS 观测数据, 发现磁暴期间日本南部夜间 TEC 急剧增加.

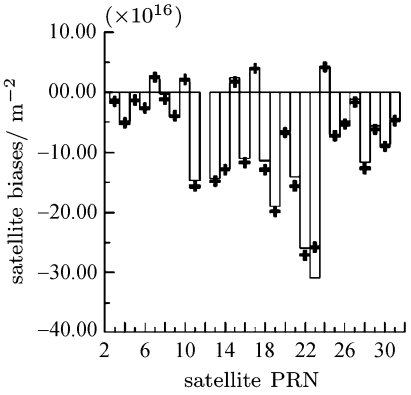


图 9 2004 年 CODE 公布的卫星硬件延迟 (加号) 与自适应网格法解算的硬件延迟 (矩形框) 比较. 卫星硬件延迟均为相对于 1 号卫星的结果

Fig. 9 Comparative studies of satellite instrumental biases from self-adjusted cell method (square) and COED (plus). The biases are relative to PRN1's value

Ma 等 [8] 采用 209 台 GPS 接收机对日本上空 TEC 和硬件延迟进行了反演. 将日本上空 TEC 划分为 32 个网格, 其网格大小为 2.0° × 2.0° (纬度 × 经度), 选取电离层高度为 400 km, 采用最小二乘法去除 GPS 卫星和接收机的硬件延迟, 同时还提出一种利用卫星硬件延迟简单快速估算单台接收机硬件延迟的方法, 该方法得到的单台接收机硬件延迟与反演得到的 GEONET 接收机硬件延迟偏差在 ±2 ns 范围内.

Ma 等 [11] 利用由 4 个接收机组成的小规模 GPS 网反演 TEC 与硬件延迟. 该方法中将接收机链上空 TEC 划分为 60 个网格, 选取电离层高度为 400 km, 采用时间分辨率为 15 min, 空间分辨率为 1.0° × 3.5° (纬度 × 经度) 的 2006 年 4 季中 16 天的 GPS 双频数据进行反演. 图 10 给出的是利用该方法得到的 TEC 图, TEC 标准精度估计为 5 TECU, 图 11 和图 12 分别给出了卫星硬件延迟和接收机硬件延迟, 从图中可以看出, 卫星的硬件延迟平均值为 0.9 ns, 4 台接收机的标准偏差为 0.37~0.855 ns, 因此该方法是有效的并适合于小规模 GPS 网 TEC 和硬件延迟反演. 在同一电离层条件下, 采用文献 [11] 中选用的观测数据, 选取不同的电离层高度, 初步分析表明, 高度的不同对 TEC 估测精度影响并不明显, 但 TEC 值有些许不同, 450 km 与 350 km 对应 TEC

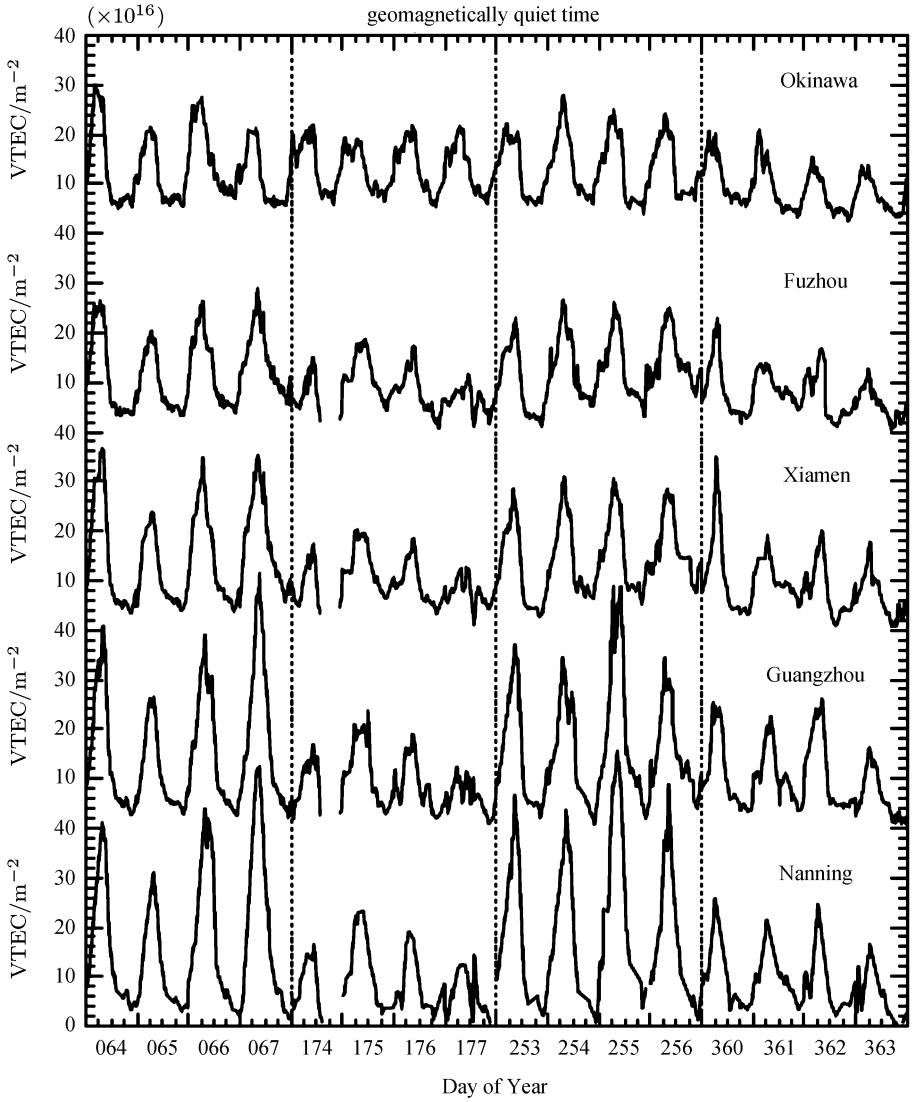


图 10 2006 年 GPS 接收机上空 TEC

Fig. 10 Maps of TEC over the GPS receiver chain in 2006

相差约为 3 TECU. 可以看出, GPS-TEC 对电离层高度的依赖性尚需进一步研究.

分析表明, 单站网格法数据处理时由于站点少, 势必影响估算精度, 而多站网格法估算精度较高, 但需要较为密集的 GPS 接收机站点. 因此, 针对不同应用区域, 结合实际需求, 灵活采用不同网格估算方法是非常重要的.

3 结语

GPS 卫星导航系统为研究电离层 TEC 提供了一种高效的观测手段. 作为表征电离层特性的重要参数之一, TEC 对于建立电离层模型, 研究并揭示电离层的时空变化和活动规律以及改善 GPS 用户 (特别是单频 GPS 用户) 的实时导航定位精度具有重要意

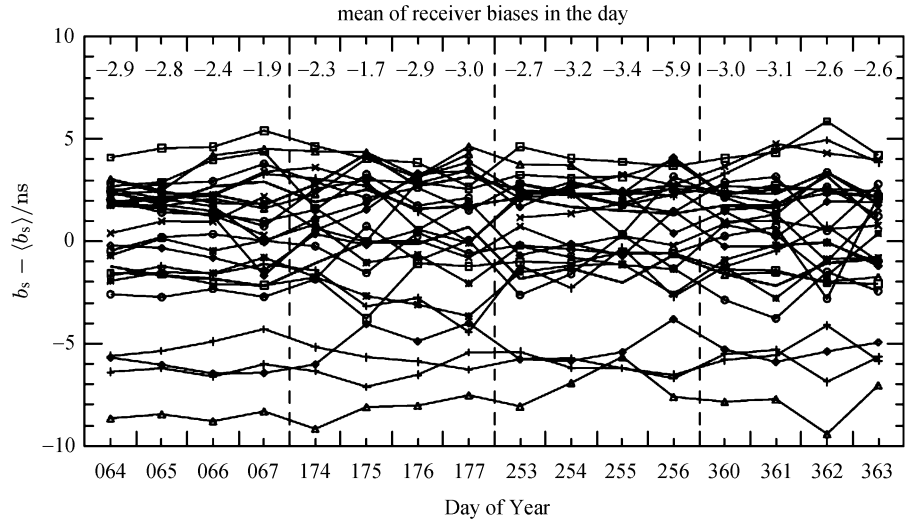


图 11 所有卫星的硬件延迟 (相对延迟)

Fig. 11 Derived satellite biases (here shown is the relative bias)

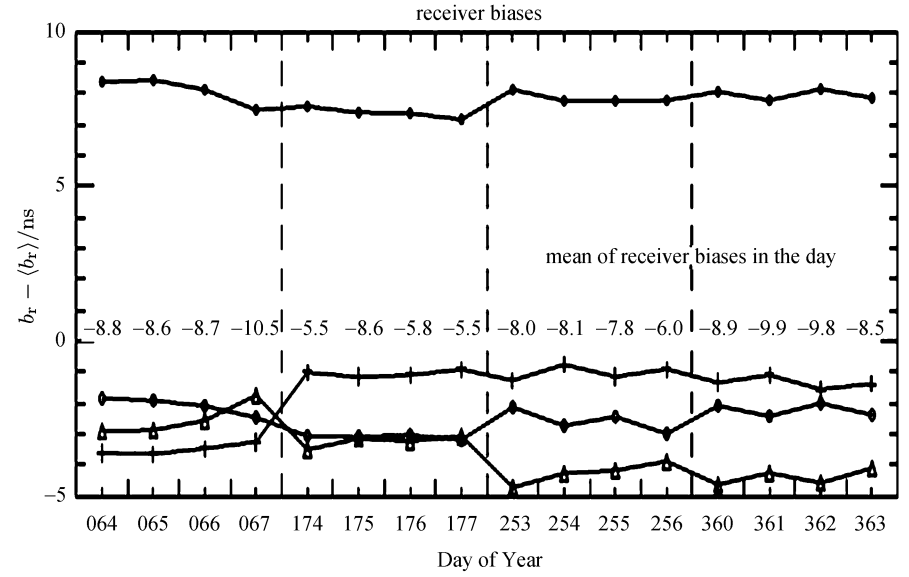


图 12 2006 年四个接收机的硬件延迟 (相对延迟)

Fig. 12 Biases of the 4 GPS receivers (here shown is the relative bias) in 2006

义. 利用双频 GPS 观测数据对 TEC 和硬件延迟进行反演时, GPS 接收机选用单站还是多站联合方式, 所在地区、电离层薄层模型高度、方程求解算法等诸多因素都会影响电离层 TEC 的估测结果, 对此还需要进行深入细致的研究. 通过对已有相关模式方法的特点分析, 可以得出以下结论.

(1) 目前提出的所有电离层 TEC 反演方法均基于电离层薄层模型, 其高度取值在 350~450 km 之间. 高度选择的合理性以及高度偏差对 TEC 的估算具有重要影响, 对于不同地区、不同地方时, 电离层电子密度随高度的分布是不同的, 因此, 探索不同地区相应电离层高度及其对 TEC 估测的影响对获得高时空分辨率的 TEC 研究具有重要意义.

(2) 在建立 TEC 与硬件延迟反演算法时均需对电离层 TEC 的特性做预先假设, 例如, 假设其区域均匀分布, 假设其利用多项式函数模型进行表征. 这就需要更进一步研究各种假设条件或模型是否能够更为准确地反映 TEC 的时空变化特征, 从而获得更为准确的 TEC 估测.

(3) TEC 反演算法从电离层物理出发, 通过由伪距和载波相位观测量得到的斜向 TEC 最终通过数学解算得到 TEC. 但是, 数学解算处理得好, 未必在物理方面符合电离层的实际情况. 此外, 目前尚没有一个测量 TEC 的标准. 因此, 研究对反演出的 TEC 准确度及精度进行评价的方法对这一领域分析的推进具有重要价值.

(4) 目前 TEC 与硬件延迟反演研究方法大都针对背景电离层 TEC 进行估测, 在电离层扰动条件下, 如何选择电离层模型及确定电离层高度假设, 从而精确估测 GPS-TEC, 应进行进一步深入研究.

随着电离层相关研究的不断深入, 对电离层 TEC 的估测精度要求会越来越高. 中国自主研制的北斗卫星导航系统的发展以及基于北斗卫星导航系统的电离层观测将为电离层 TEC 和卫星硬件延迟的反演方法研究提供条件.

参考文献

[1] Mannucci A, Wilson B, Yuan D, *et al.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements [J]. *Radio Sci.*, 1998, **33**(3):565-582

[2] Liu Jingnan. Principles and Methods of Wide Area Differential GPS [M]. Wuhan: Surveying and Mapping Press. 1999. In Chinese (刘经南. 广域差分 GPS 原理和方法 [M]. 武汉: 测绘出版社, 1999)

[3] Lanyi G E, Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations [J]. *Radio Sci.*, 1988, **23**(4):483-492

[4] Coco D S, Coker C, Dahlke S R, Clynch J R. Variability of GPS satellite differential group delay biases, aerospace and electronic systems [J]. *IEEE Trans.*, 1991, **27**(6):931-938

[5] Sardon E, Rius A, Zarraoa N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations [J]. *Radio Sci.*, 1994, **29**(3):577-586

[6] Iijima B, Harris I, Ho C, *et al.* Automated daily process for global ionospheric total electron content maps and satellite ocean altimeter ionospheric calibration based on Global Positioning System data [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**(16):1205-1218

[7] Rideout W, Coster A. Automated GPS processing for global total electron content data [J]. *GPS Solut.*, 2006, **10**(3):219-228

[8] Ma G, Maruyama T. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan [J]. *Ann. Geophys.*, 2003, **21**:2083-2093

[9] Cai Changsheng, Gao Jingxiang, Li Zhenghang. Monitoring seasonal variarions of ionospheric TEC using GPS measurements [J]. *Geomat. Inf. Sci. Wuhan Univ.*, 2011, **36**(10):1218-1221. In Chinese (蔡昌盛, 高井祥, 李征航. 利用 GPS 监测电离层总电子含量的季节性变化 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, **36**(10):1218-1221)

[10] Gao Wei. Derivation of GPS-TEC and Instrumental Biases in the Equatorial Anomaly Region [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2008. In Chinese (高伟, 赤道异常区电离层 GPS-TEC 与系统硬件偏差反演 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2008)

[11] Ma G, Gao W, Li J, *et al.* Estimation of GPS instrumental biases from small scale network [J]. *Adv. Space Res.*, 2013, doi.org/10.1016/j.asr.2013.01.008

[12] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: Principles and Applications [M]. Washington: Artech House Publishers, 2006

[13] Li Qiang, Feng Man, Zhang Donghe, *et al.* Methods of estimation of GPS instrumental bias from single site's GPS data and comparative study of results [J]. *J Peking Univ: Nat. Sci.*, 2007, **2**(2):37-44. In Chinese (李强, 冯曼, 张东和, 等. 基于单站 GPS 数据的 GPS 系统硬件延迟估算方法及结果比较 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, **2**(2):37-44)

[14] Chang Qing, Zhang Donghe, Xiao Zuo, Zhang Qishan. A method for estimation GPS instrumental biases and its application in TEC calculation [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2001, **40**(5):596-601. In Chinese (常青, 张东和, 萧佐, 张其善. GPS 系统硬件延迟估计方法及其在 TEC 计算中的应

用 [J]. 地球物理学报, 2001, **40**(5):596-601)

[15] Li Qiang, Feng Man, Zhang Donghe, Xiao Zuo, Shi Liqin. Methods of estimation of GPS instrumental bias from single site's GPS data and comparative study of results [J]. *J. Peking Univ.: Nat. Sci.*, 2008, **44**(1):149-156. In Chinese (李强, 冯曼, 张东和, 萧佐, 师立勤. 基于单站 GPS 数据的 GPS 系统硬件延迟估算方法及结果比较 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, **44**(1):149-156)

[16] Huang Zhi, Yuan Hong, Wan Weixing. Test of GPS TEC hardware biases estimating methods [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2003, **18**(4):472-476. In Chinese (黄智, 袁洪, 万卫星. GPSTEC 硬件偏差估计方法的有效性 [J]. 电波科学学报, 2003, **18**(4):472-476)

[17] Schaer S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System [J]. *Geod.-Geophys. Arb. Schiweiz*, 1999, **59**: 01

[18] Feltens J. Development of a new three-dimensional mathematical ionosphere model at European Space Agency/European Space Operations Centre [J]. *Space Weather*, 2001, **5**, S12002, doi:10.1029/2006SW000294

[19] Wilson B D, Mannucci A J, Edwards C D. Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive network of GPS receivers [J]. *Radio Sci.*, 1995, **30**(3):639-648

[20] Li Z, Yuan Y, Li H, *et al*. Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites [J]. *J. Geod.*, 2012, **86**:1059-1076, doi:10.1007/s00190-012-0565-4

[21] Øvstedal O. Absolute positioning with single-frequency GPS receivers [J]. *GPS Solut.*, 2002, **5**(4):33-44

[22] Otsuka Y, Ogawa T, Saito A, *et al*. A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan [J]. *Earth Planets Space*, 2002, **54**:63-70

[23] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Date Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press. 2005. In Chinese (李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005)

[24] Zhang Hongping, Shi Chuang, Tang Weiming. United solution to polynomial VTEC modeling and DCB analysis using ground-based GPS observations [J]. *Geom. Inf. Sci. Wuhan Univ.*, 2008, **33**(8):805-809. In Chinese (章红平, 施闯, 唐卫明. 地基 GPS 区域电离层多项式模型与硬件延迟统一解算分析 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, **33**(8):805-809)

[25] Zhang D, Zhang W, Li Q, *et al*. Accuracy analysis of the GPS instrumental bias estimated from observations in middle and low latitudes [J]. *Ann. Geophys.*, 2010, **28**(8):1571-1580

[26] Jin R, Jin S, Feng G. M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases [J]. *GPS Solut.*, 2012, **16**:541-548

[27] Gao Y, Heroux P, Liao X, *et al*. GPS instrumental bias between receivers [C]//ION 55th Annual Meeting. Cambridge: Institute of Navigation, 1999

[28] Feltens J. The activities of the ionosphere working group of the International GPS Service (IGS) [J]. *GPS Solut.*, 2003, **7**(1):41-46

[29] Rao G S. GPS satellite and receiver instrumental biases estimation using least squares method for accurate ionosphere modeling [J]. *J. Earth Syst. Sci.*, 2007, **116**(5):407-411

[30] Brunini C, Azpilicueta F J. Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content [J]. *J. Geod.*, 2009, **83**(8):773-785

[31] Brunini C, Azpilicueta F. GPS slant total electron content accuracy using the single layer model under different geomagnetic regions and ionospheric conditions [J]. *J. Geod.*, 2010, **84**(5):293-304

[32] Zhang D, Zhang W, Li Q, *et al*. Accuracy analysis of the GPS instrumental bias estimated from observations in middle and low latitudes [J]. *Ann. Geophys.*, 2010, **28**:1571-1580

[33] Choi B, Cho J, Lee S. Estimation and analysis of GPS receiver differential code biases using KGN in Korean Peninsula [J]. *Adv. Space Res.*, 2011, **47**(9):1590-1599

[34] Li Dong, Wang Jing, Song Shuli, Lu Xiushan. Calculating the differential code bias bases on the areal ionosphere mode [J]. *Eng. Surv. Mapping*, 2011, **20**(6):40-44. In Chinese (李东, 王静, 宋淑丽, 卢秀山. 基于区域电离层建模的硬件延迟参数估计 [J]. 测绘工程, 2011, **20**(6):40-44)

[35] Wang Hu, Wang Jiexian, Bai Guixia, Zhu Weidong. Real-time monitoring of ionosphere changes in the Shanghai region by GPS technology [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5):602-606. In Chinese (王虎, 王解先, 白贵霞, 朱卫东. 利用 GPS 技术实时监测上海区域电离层变化 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(5):602-606)