第 21 卷 第 1 期 天 文 学 进 展 Vol.21, No.1
2003 年 3 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Mar., 2003

GPS 监测电离层活动的方法和最新进展

王小亚 [1,2] 朱文耀 [1]

(1. 中国科学院上海天文台 上海 200030)
(2. 香港理工大学土地测量与地理资讯学系 香港)

摘 要

全球定位系统 (GPS) 可以快速、准确地提供电离层总电子含量 (TEC) 信息。简要介绍了 GPS 技术精确测量 TEC 、监测电离层的原理和方法，指出进行 TEC 绝对量估计时求解差分群延迟 (DCB) 的重要性，以及建立多层和实时电离层监测模型的必要性。分析了影响 TEC 估计的主要误差源，着重介绍了目前 GPS 监测电离层的最新成果和进展。

关 键 词 天体测量学 — 全球定位系统 — 综述 — 电离层监测 — 差分群延迟 — 误差源分析

分 类 号 P129, P352

1 引 言

众所周知电离层是围绕地球的一层离子化的大气，它的电子密度、稳定程度和厚度等都在不断变化着，这些变化主要是受太阳活动的影响。太阳发生质量喷发时 (如日珥质量喷发) 可产生数以百万吨计的物质磁云飞入空间，当这些磁云到达地球电离层时，就会使电离层的电子密度发生很大变化，产生所谓的电离层暴，造成严峻的空间天气状况，严重时可以中断无线电通信系统和损害地球轨道卫星 (如通信卫星) 。因此对电离层活动的监测和预报，或许可以给出早期的预警信息，以便及时保护贵重的通信卫星，揭示太阳和电离层中某些现象发生的规律性，以及了解地球磁场及其他圈层变化和相互作用的规律。

以前，电离层的监测通常是通过复杂的雷达系统实现的，其中电子密度监测的方法有两种：一是通过电离层探测仪得到电离图；二是通过多频卫星信号的地面接收，如地面 GPS 技术得到信号沿径电离层的总电子含量 (TEC) 。GPS 卫星发射的信号经过电离层时会使电磁信号发生色散从而造成电离层延迟，其大小与沿径的电子密度的积分 (即斜向总电子含量 $STEC$)

国家重点基础研究发展项目 (G1998040703) 资助课题 国家自然科学基金项目 (40174009) 资助课题
中国科学院知识创新重要方向项目 (KJCX2-SW-T1) 资助课题
特约稿 2001-11-09 收到 2002-08-09 收到修定稿

成正比，这一方面是GPS 定位和导航的一个重要误差源，另一方面也可通过双频及多频观测对 TEC 进行测量。

GPS 监测电离层自 20 世纪 90 年代初就已开始，其方法不断更新和提高，逐渐趋于高精度、近实时、高分辨率的时间和空间监测，对电离层活动的监测也越来越实用和精确，为电离层活动及其所反映的太阳活动规律的监测和研究提供了一条新的途径，也为地球上层大气动力学的研究注入了新的活力。1998 年国际 GPS 服务 (IGS) 就已意识到 GPS 是监测电离层活动最主要的技术手段，特别是全球范围的 IGS 网已成为提取全球电离层信息的唯一手段 [1]，因此我们试图对地面 GPS 监测电离层的方法及其测量精度进行全面论述，并对 GPS 监测电离层现象及其所反映的太阳活动规律的最新进展给予简单介绍。

2 GPS 监测电离层的原理和方法

由于电离层对微波信号是色散的，所以双频 GPS 可对电离层活动进行直接测量。GPS 双频接收机通常可以收到双波段 ($f_1 = 10.23 \times 154$ MHz； $f_2 = 10.23 \times 120$ MHz) 的载波相位和伪距测量数据。当信号从卫星上发射经过电离层、对流层最后传播到接收机时，途中会受到电离层色散、对流层折射的影响，若再考虑卫星和接收机钟的偏差及它们各自的仪器延迟偏差，观测方程可写为 [2]：

$$\begin{aligned} \phi_{kj}^{i} &= R_j^i - \alpha_k I_j^i - \lambda_k (b_{kj}^i + N_{kj}^i), \\ P_{kj}^{i} &= R_j^i + \alpha_k I_j^i + \mathrm{d}q_{kj} + \mathrm{d}q_k^i. \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $\alpha_k = 40.3/f_k^2$, k 取为 1 和 2，分别代表 f_1 和 f_2 频段 (下同)； λ_k 为 f_k 相应的波长； i 和 j 分别代表卫星号及接收机号； ϕ_{kj}^i 和 P_{kj}^i 分别为相位观测量和伪距观测量； R_j^i 与波段无关，它包括无介质时卫星与接收机间距离的理论值、对流层延迟改正和卫星、接收机钟的偏差改正；方程右边第二项为电离层延迟改正，在忽略高阶电离层延迟改正的情况下，它与 $STEC$ 成正比， I_j^i 就是 $STEC$； b_{kj}^i 为卫星与接收机仪器相延迟偏差的总和； $\mathrm{d}q_{kj}$、$\mathrm{d}q_k^i$ 分别为接收机和卫星仪器群延迟的偏差； N_{kj}^i 代表整周模糊度。

(1) 式中 R_j^i、$\mathrm{d}q_{kj}$、$\mathrm{d}q_k^i$、b_{kj}^i、N_{kj}^i 和 I_j^i 为未知量。一颗卫星一个接收机的一次观测有 4 个方程，因此必须对 (1) 式进行处理才能得到电子含量的信息。通常采用单层电离层总电子含量、多层电离层电子含量和电离层总电子含量变化这 3 种模型来监测电离层，其中后两种模型还在不断完善中，有望得到突破。下面分别介绍这 3 种模型。

2.1 单层电离层总电子含量监测模型

单层电离层总电子含量监测模型是假设整个电离层的电子集中分布在一个很窄的单球层里，通常选期望的最大电子密度高度作为该单层模型的高度，约为 300~400 km。该模型通过映射函数将斜向总电子含量投影到单球壳高度上，得到在该球壳上的电子含量，以研究电离层活动等。获得精确的单层电离层总电子含量的方法通常有两种：同时求解频段相关与无关量；只求解频段相关量，详细介绍可参阅有关文献 [1~4]。

将方程 (1) 中 L_1、L_2 载波相位测量和伪距测量的观测量分别相减，消去与频段无关的量，

整理得：

$$L_4 = \phi_{1j}^i - \phi_{2j}^i = -40.3\left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right)F(z)VTEC(\beta, s) + B_4, \tag{2}$$

$$P_4 = P_{1j}^i - P_{2j}^i = 40.3\left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right)F(z)VTEC(\beta, s) + b_4. \tag{3}$$

其中，$B_4 = -\lambda_1(b_{1j}^i + N_{1j}^i) + \lambda_2(b_{2j}^i + N_{2j}^i)$；$b_4 = (\mathrm{d}q_{1j} - \mathrm{d}q_{2j}) + (\mathrm{d}q_1^i - \mathrm{d}q_2^i)$；$F(z)$ 为映射函数，它是卫星高度角和所选的单层电离层模型高度的函数，具体形式可参见有关文献 [3, 4]；$VTEC(\beta, s)$ 为垂直的总电子含量，它是接收机和卫星连线与所选的电离层层面交点 (电离层交叉点) 的地理纬度 β 和日心经度 s 的函数 [3]；b_4 就是所谓的差分群延迟偏差 (DCB)；B_4 是与模糊度和相位延迟偏差有关的常数偏差。s 与地方时 LT 相差 π，即 $s = LT - \pi \approx UT + \lambda - \pi$。

对局部 TEC 模型来说，$VTEC$ 可采用多项式的形式，即

$$VTEC = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} E_{nm}(\beta - \beta_0)^n (s - s_0)^m. \tag{4}$$

对区域或全球 TEC 模型，$VTEC$ 可应用勒让德多项式进行展开，即

$$VTEC = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{n} \widetilde{P}_{nm}(\sin\beta)(a_{nm}\cos ms + b_{nm}\sin ms). \tag{5}$$

其中 (4) 式和 (5) 式中的有关量可参阅文献 [3]。

国内有许多人在利用方程 (2) 和 (3) 求解 $VTEC$ 时，丢掉了方程 (3) 中的 b_4 项即 DCB 项，然后将方程 (2) 和方程 (3) 进行平均或加权平均先求得 B_4 [4,5]，再利用方程 (2) 求得 $VTEC$。还有些人甚至只利用丢掉 b_4 项的方程 (3) 来求解 $VTEC$，这些做法都严重影响了 TEC 的估计精度。b_4 不是一个随机变量或白噪声，即使采用加权平均也不能消除或减少它的影响，因为 b_4 项虽然在短时间内变化很小，但其长期变化则显示为一个季节性的周期变化，这可能与接收机所存在的环境温度、季节以及该量本身就有变化等因素有关，需进一步研究才能探测它的特性和产生机制 [4]。b_4 的忽略对有些接收机可引起 16 TECU 的误差 (TECU 是 TEC 的单位，1 TECU= 1×10^{16} el/m^2)，因此忽略 b_4 的影响对于一般的电离层监测及其模型的建立是不可接受的 [4,5]。另外，仅利用伪距观测量求解 TEC 的精度是非常差的，难以满足建立模型和科学研究的需要。

2.2　双层或多层电离层电子含量监测模型

随着对 GPS 监测电离层认识的深入，目前人们已逐渐采用双频相位观测，通过电离层电子密度的离散来得到电离层不同层面上的电子含量分布，建立双层或多层电离层电子含量的监测模型。多层解一般需要积累几个小时的 GPS 数据才能将未知量全部解出，在此期间总电子含量的变化被认为是随机游走过程，而仪器延迟偏差被视作常数，通过 Kalman 滤波就可得到双层或多层的电子含量分布模型。通常仅利用地面 GPS 观测即可获得两层 $10^\circ \times 10^\circ$ 网格的电离层电子密度分布 [6]。

地基 GPS 电离层监测资料如果能加上电离层电子密度垂直剖面的资料，就可将电离层电子含量的分层模型增加到 5~8 层。垂直剖面资料目前主要由电离层探测仪直接提供，但近几

年发展起来的地球低轨道卫星的 GPS 掩星技术已成为提供全球尺度的电离层电子密度垂直剖面的新手段 [7] 。

多层电离层电子密度监测模型避免了单球层模型隐含的映射函数是固定的假设，提高了 TEC 的估计精度，特别适用于电离层梯度较大 (如接近太阳活动高峰或接近地磁赤道附近) 时的情形。另外，它考虑了一条信号线 (经过好几个网格) 隐含的水平梯度，这对低高度角观测、太阳活动高峰期及地磁赤道附近观测尤其重要。同时多层模型将水平分辨率和垂直分辨率结合起来，更好地揭示了电离层的空间结构特性，再加上 GPS 实时电离层探测的特点，不仅有望精确研究电离层各层的活动情况，而且也为研究地球上层大气动力学提供了条件 [7,8] 。

2.3 电离层总电子含量变化监测模型

通常 GPS 估计电离层总电子含量是在考虑仪器延迟偏差的同时将它模拟为绝对量，即认为某区域或某网格内的电离层总电子含量是常数。这个方法的缺点是没有完全利用精确的相位观测量，而是采用了双频相位和伪距观测量的混合；由于还要估计仪器延迟偏差，致使必须累积一定时间间隔的观测才能对电子含量进行估计；另外，在网格化模型中还存在离散误差；某些情况下仪器延迟偏差和 TEC 之间还存在相关等。这些都降低了 TEC 的监测精度 [9] 。为了克服上述缺点，利用方程 (2) 相位观测量，采用 TEC 的连续时间差分或利用地球自转和 GPS 卫星轨道的 “共振” 周期差分，来提高模型的时间敏感性和空间分辨率是一种有效的方法，它们可以消去仪器的延迟偏差和相位模糊度，使得仅用相位观测量就可获得斜向 TEC 时间变化，此外对它进行单球层电离层投影模拟也可对电离层现象进行全球或区域监测 [3,9] 。

3 误差分析

影响 $VTEC$ 估计精度的因素较多，下面介绍主要的影响因素。

首先从观测量本身的误差开始。伪距观测 P 码的精度大约为 30 cm ($\sigma_{\mathrm{P}_2} = 30$ cm)， C/A 码的精度更低，根据误差传播原理可得利用伪距求解斜向 TEC 所能达到的最高精度为

$$\sigma_{\mathrm{tec}} = \frac{f_1^2 f_2^2 \sqrt{\sigma_{\mathrm{P}_1}^2 + \sigma_{\mathrm{P}_2}^2}}{40.3(f_2^2 - f_1^2)} \approx \frac{f_1^2 f_2^2 \sqrt{2\sigma_{\mathrm{P}_2}^2}}{40.3(f_2^2 - f_1^2)} = 4.0 \text{ TECU}. \tag{6}$$

由于载波相位测量的精度可达 mm 级，比伪距测量精度高 2 个量级，因而它的测量误差在计算 TEC 时可完全忽略。

第二个就是 2.1 节讨论过的 DCB ，它在一天内的变化一般小于 1 TECU ，但其随季节、温度等因素的变化，对不同接收机、不同卫星来说是不同的，一般影响在 3~16 TECU 。因此， DCB 实际上是 GPS 计算 TEC 绝对量时的最大误差源 [2,4] 。

第三个是由 TEC 到 $VTEC$ 的映射函数的选择误差 [10] 。这里涉及到两个问题，一是高度截止角的选择。当选择不同的高度截止角如 10° 或 20° 时，其结果差大约在 1~2 TECU ，且这个差在正负值之间平滑变动，这可能由所观测区域的电离层球壳高度的平滑变动所致。假定球壳高度为 350 km ，如果有效高度高于 350 km ，那么低高度角的映射误差将使电离层 $VTEC$ 被低估；反之，若有效高度低于 350 km ，那么电离层 $VTEC$ 就被高估。二是映射函数方位对称性的假设 [11] 。实际的电离层电子密度分布较复杂，一般不是方位对称的，由此引

起的误差也较复杂。数值模拟和理论时延计算的结果显示，赤道电离层异常区和中纬度电离层低槽 (trough) 区在日出期间，即在电离层水平梯度明显的地区和时间段内，对称模型的电离层延迟估计将产生 20%~40% 的误差，由此引起 $VTEC$ 的测量误差达 20%~40% 。

第四个是电离层单球层模型平均球壳高度的不确定性 [10] 。目前高度取值有： 350 km 、355 km 、 400 km 和 450 km 等；而且在进行 $VTEC$ 估计时总是近似假定电离层球壳高度处处为常数。Chapman 剖面模拟显示只要高度选择正确，由薄球壳映射函数就可近似得到实际的电子密度分布剖面的映射函数，即当高度处处选择正确时，映射函数的误差影响可减少。

第五个是高阶电离层效应的影响 [12] 。上面的估计都没有考虑电离层的高阶效应，而实际上二阶、三阶效应通常可分别引起天顶方向的延迟达 0~2 cm 和 0~2 mm，从而产生大约 0.2 TECU 的误差。

另外，许多 GPS 测量中未考虑的误差因素如多路径效应也会对 $VTEC$ 产生影响，其一般小于 0.7 TECU 。

综上所述，仅用伪距 (即使是 P 码) 观测直接求解 TEC 的精度是很差的，只有用相位观测结合伪距观测并考虑仪器 DCB 的影响才能得到精确的 TEC 绝对量，一般 TEC 精度可好于 2 TECU 。电离层 TEC 的变化非常复杂，它在几分钟内就可以变化 0.3 TECU ，而一般电离层现象也只是引起几个 TECU 的变化，因此，只有高精度的 TEC 监测结果才可能用来建立精确的电离层模型，才可能通过对 $VTEC$ 的详细研究来探测电离层的活动。

4　GPS 应用于监测电离层活动的最新进展

鉴于 GPS 技术在监测电离层活动 —— 快速提供准确的电离层 TEC 的重要作用，IGS 成立了 IGS 的电离层工作组，并于 1998 年 6 月正式启动。该工作组最重要的短期目标是提供日常的全球电离层 TEC 的图像和 GPS 卫星的 DCB 值；中长期目标是开发一个较成熟的电离层模型和为用户提供一个近实时的电离层服务；最终目标是建立一个独立的 IGS 的电离层模型。全球有 5 个电离层联合分析中心 (IAAC) 向 IGS 的电离层工作组提供它们的产品。这 5 个中心包括：瑞士伯尔尼大学天文研究所 (CODE) 、法国的欧洲空间操作中心 (ESOC) 、美国的喷气推进实验室 (JPL) 、加拿大的国家能源中心 (NRCan) 和西班牙的 Catalonia 工艺大学 (UPC) 。这些产品全部送至 ESOC 进行比较综合，形成一个 IGS 的 “平均” 解。具体解算方法可参阅文献 [13] 。

目前 IGS 的日常服务是每天给出 12 幅全球电离层 TEC 变化图像 (每 2 h 给出一幅) 和每天一组 GPS 卫星的 DCB 值。但这两项服务不是实时的，尚有几天的延迟。在正常情况下，各个 IAAC 的 TEC 图像与 IGS “平均” 图像的偏差在北半球为 5 TECU ；但在赤道和南半球存在较多的问题，原因是这些区域 IGS 的台站覆盖率太差。

除了日常服务外，电离层工作组还在 1999 年 8 月 11 日的日全蚀时，组织了全球范围的沿着日全蚀带从北美东海岸过欧洲至中东的 80 多个 IGS 地面跟踪站的监测活动。这次活动以极高的采样速度 (1 点 /s) 进行了连续的电离层变化监测，给出了日全蚀过程中全球电离层 TEC 变化的精细图像 [14] 。

近几年来，地球低轨道卫星 (LEO) 在电离层监测中的应用引起了人们的关注 [15,16]。用于掩星研究的已运行的 LEO 卫星有 OERSTED 、 CHAMP 、 SAC-C 和 GRACE 等，它们为全球尺度的电离层监测开辟了一条新途径。在电离层中对 GPS 的掩星观测将成为提供电子密度结构垂直剖面的新的有效手段，尤其利用 CHAMP 、 SAC-C 和 GRACE 等卫星可望获得电离层顶端等离子层极有价值的信息。应用资料同化技术，海量的 LEO 掩星数据将从根本上改善有关电离层外层电子密度结构的知识，而这正是当前建立电离层模型最欠缺的内容。全球范围内地基 GPS 和 LEO 卫星掩星得到的监测结果综合分析，有望获得一个全球尺度的四维电离层电子结构的图像，它们将为电离层研究的各个领域，如等离子体的生成、衰减和传输，电离层磁暴，电离层扰动的移动 (TID) ，闪烁，低槽和电离层与等离子层之间的偶合等作出重要的贡献。下面分别对这些领域作一些简单介绍。

4.1 太阳耀斑监测

当太阳发生耀斑时，太阳的 X 射线和紫外辐射增强，这使电离层电子密度大面积增加。监测电离层电子密度增加的观测方法主要有：基于信标卫星的法拉第旋转法、地面上的非干涉散射雷达测量法和应用高频多普勒在耀斑期间的频移法。结果表明，不同方法、不同耀斑引起电离层 TEC 的增加大约在 4~10 余 TECU 。故可用 GPS 来监测耀斑引起的电子密度增加，从而监测耀斑的发生和它所引起的电离层活动情况 [5,17] 。

4.2 磁暴 (storm) 和低槽 (trough) 监测

太阳耀斑引起的高强度电磁辐射作用于地球大气后所引起的地球磁场的急剧变化称为磁暴。高能质子沿地球磁场落到高纬度地区，同自然大气相互作用产生离子，形成红、绿光。同时这些质子也产生电子和强大的电磁场反应，导致电离层总电子含量急剧变化，这可由 GPS 监测的总电子含量来反映。由电离层诱发的这种磁暴，在高纬度地区可能持续几小时至几天，在中、低纬度地区一般较少出现。但有些强大的磁暴也可能扩展到中纬度地区，如 1989 年 3 月的磁暴 [18] 。

电子密度低槽是极区和亚极区的普遍现象，它会使电子密度大幅度降低。通常发生在晚间，有向赤道方向移动的趋势，然后再返回高纬度地区，至于其物理机制至今还不太清楚 [19] 。

4.3 电离层不规则活动 (包括闪烁 scintillations) 的监测

在平静情况下，电离层变化可以看做是一个稳定的时间序列。然而在有活动的情况下，电离层变化会引起无线电信号相位和振幅较大的波动，这是导航系统的主要误差源，也可能是 GPS 测量失锁和周跳增加的原因。全球 GPS 监测电离层 TEC ，将有助于全球范围内研究各种太阳和地球物理条件下电离层不规则活动的产生、演化和发展，特别适合磁暴、高空天气的研究和应用 [4,19] 。

4.4 电离层扰动 (perturbation) 和赤道异常现象的监测

太阳活动如日珥和耀斑的质量喷发通常产生大量粒子和电磁辐射，这可导致地球磁层和电离层的扰动，这些扰动影响到电离层就会形成电离层暴，使得电离层密度分布、总电子含量和电离层电流系统产生巨大扰动，从而干扰卫星通信、中断电子能量流动，也可给电离层垂直延迟的精确确定带来麻烦。因此，检测电离层暴、预报空间天气是很有意义的。

全球 GPS 网可提供近实时的全球电离层总电子含量，它不仅是探测电离层暴、检测它们行为的一个新的有力工具，而且也是更好更全面地理解电离层暴现象、探测电离层结构的一个

新的有力工具。通过分析任一时刻电离层总电子含量与平静时刻电离层总电子含量的变化来辨认、刻画和分类电离层暴的方法称为差分映射方法，这种方法的前景就是它有在全球范围内近实时地研究电离层暴的能力。目前它已可近实时得到采样率为 15 min 的全球电离层总电子含量图 (GIM)，这些图可提供大的电离层扰动，特别是电离层暴的早期信息。电离层暴期间，总电子含量的增加阶段多发生在电离层暴的早期；总电子含量减少的阶段一般需较长时间才能形成 [20]。中性物质构成变化是 TEC 增加和降低的原因，热层环流和构成的变化可引起中纬度电离层 O_2/N_2 比例的变化。若比例降低会导致 F 层等离子密度降低，从而引起 TEC 降低。GIM 可得到电离层暴期间电离层的全球变化，包括扰动区的移动、扩张和增强，有助于这些全球变化的解释和认证。在极区，由于电子和粒子雨产生的焦耳热会引起高纬度地区大气压的增加，产生 meridinal 风，并由快速移动的中性和电离层大气波动 (TAD/TID) 传到较低纬度地区，而增强的赤道信风会将等粒子体抬到更高的 F 层，从而引起赤道附近电离层异常和小尺度的不规则变化 [16]。GPS 还可监测由浅层地震、爆炸等强垂直地面活动所引起的次声压力波与电离层引力波耦合产生的电离层电子密度变化 [21]。

4.5　电离层 Tomography 技术应用

电离层是一种微弱的电离气体层，它能以各种方式影响电波传播。按电子密度的不同，电离层可分为 D、E、F1、F2 和 H 层，各层的主要特性和对 GPS 定位的影响不同，因此可通过层析技术 Tomography 得到电离层总电子含量的两层或多层分布情况，以便监测电离层不同层的活动，研究电离层现象对不同层的影响，深入探测各层的特性 [22]。GPS 在这方面的研究和应用还处于起步阶段，相信随着 GPS 监测电离层方法和层析技术的改进，以及其他电离层监测技术的发展，此领域的研究和应用将会进入一个崭新的阶段。

参 考 文 献

1　Feltens J, Schaer S. In: Dow J M, Kouba J, Springer T eds. IGS 1998 Analysis Center Workshop, Darmstadt, Germany: ESA/ESOC, 1998: 225

2　Sardon E, Rius A, Zarraoa N. Radio Sci., 1994, 29(3): 577

3　Rothacher M, Mervart L. Bernese GPS Software Version 4.0, Switzerland, 1996

4　Warnant R. In: Dow J M, Kouba J, Springer T eds. IGS 1998 Analysis Center Workshop, Darmstadt, Germany: ESA/ESOC, 1998: 249

5　张东和，萧佐．北京大学学报，2000, 36(3): 415

6　Juan J M, Rius A, Hernandez-Pajares M *et al*. GRL, 1997, 24(4): 393

7　Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 1999, 61: 1237

8　Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J. GRL, 2000, 27(16): 2473

9　Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J. GRL, 1997, 24(13): 1643

10　Wilson B D, Mannucci A J, Edwards C D. Radio Sci., 1995, 30(3): 639

11　Tsedilina E E, Weitsman O V. Radio Sci., 1994, 29(3): 625

12　Bassiri S, Hajj G A. Manuscripta Geodaetica, 1993, 18: 280

13　Feltens J, Schaer S. IGS 1999 Technical Report, 2000: 265

14　Feltens J, Noll C. CDDIS Bulletin, 1999, http://cddisa.gsfc.nasa.gov/bulletin/volume_15/vol15no1.html#d

15　Jakowski N. IGS 1999 Technical Reports, 2000: 299

16　Engeln A, Buhler S, Kirchengast G *et al*. GRL, 2001, 28: 775

17 Afraimovich E L. Radio Sci., 2000, 35: 1417
18 谢世杰，韩明锋. 测绘工程， 2000, 9(1): 9
19 Pi X, Mannucci A J, Lindqwister U J *et al.* GRL, 1997, 24(18): 2283
20 Ho C M, Mannucci A J, Lindqwister U J *et al.* GRL, 1996, 23(22): 3219
21 Calais E, Minster J B. GRL, 1995, 22(9): 1045
22 Feltens J. In: Dow J M, Kouba J, Springer T eds. IGS 1998 Analysis Center Workshop, Darmstadt, Germany: ESA/ESOC, 1998: 285

Methods and Progress on Monitoring Ionosphere Activity by GPS

Wang Xiaoya[1,2] Zhu Wenyao[1]

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

(*2. Department of Land Surveying and Geo-informatics, The HongKong Polytechnic University, HongKong*)

Abstract

Precise information on the ionospheric Total Electron Content (TEC) can be quickly provided by using GPS (Global Positioning System) . The theory and methods to monitor the activities of ionosphere by GPS are discussed. It points out that TEC can be used to establish the highly accurate ionosphere model and satisfy the needs of scientific study, and TEC is derived by utilizing the phase observation and solving the differential code bias (DCB) only. The main error sources of TEC estimate are analyzed and the latest progress of ionospheric activities monitored by GPS is described.

Key words astrometry—Global Positioning System (GPS)—review—ionospheric monitor—Differential Code Bias (DCB)—error sources analysis