

Zhu W Y, Zhang H P, Huang C, et al. Monitoring of small-scale ionospheric heterogeneities using local GPS network. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(6):941~948

## 利用 GPS 监测电离层不均匀结构探讨

朱文耀<sup>1</sup> 章红平<sup>1,2</sup> 黄 成<sup>1</sup> 金双根<sup>1</sup>

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 100039

**摘 要** 利用上海地区 GPS 综合应用网提供的高时空分辨率的双频 GPS 观测资料, 研究了该区域内一电离层不均匀体的产生、消亡过程. 首先, 采用 Kalman 滤波的方法改善双频伪距之差的观测精度, 并利用参数估计的方法计算该时段内相应的硬件延迟. 再根据电离层单层模型, 利用 GPS 双频观测量、测站位置和 GPS 精密星历, 求出 GPS 信号穿刺点的坐标和垂直方向电离层的电子含量; 然后内插并获取其等值线图. 等值线图随时间的变化表明, 受离子体湍流的影响, 2003 年 9 月 8 日北京时间 9 时 40 分左右在 38°N、118°E 左右产生了一电离层不均匀体, 其尺度大约在 50km 左右, 生存时间大约为 5min. 受地球重力场和高空风场的影响, 该不均匀体向东北方向扩散. 然后, 利用大气扩散模型, 按扩散方程计算分析了该不均匀体可能发生的电离层层区. 理论计算表明, 该不均匀体发生在电离层扩展 F 区, 高度在 350km 左右.

**关键词** GPS 总电子含量 扩散方程 电离层不均匀体

**文章编号** 0001-5733(2004)06-0941-08 **中图分类号** P352 **收稿日期** 2003-12-16, 2004-06-08 **收修定稿**

## MONITORING OF SMALL-SCALE IONOSPHERIC HETEROGENEITIES USING LOCAL GPS NETWORK

ZHU Wen-Yao<sup>1</sup> ZHANG Hong-Ping<sup>1,2</sup> HUANG Cheng<sup>1</sup> JIN Shuang-Gen<sup>1</sup>

1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Based on the high spatio-temporal resolution GPS dual-frequency data provided by Shanghai GPS Comprehensive Application Network, an ionospheric heterogeneity and its process of arising and disappearing were monitored and studied. First, Kalman Filter is used to improve the accuracy of  $P_2 - P_1$ , and the hardware delay of GPS system is estimated by the least square method. Then according to the single layer model (SLM) of the ionosphere and the altitude of the SLM shell, the accurate positions of GPS satellites and receivers, and the observations of dual-frequency, the ionosphere pierce points' (IPPs) location and their Total Electron Content (TEC) are obtained, then the contour maps of TEC are derived using the interpolating technique. The variations of TEC reflected by these maps as time goes indicate that due to the turbulent flow of the atmosphere, an ionospheric heterogeneity, whose scale is about 50 km and existence time 5 minutes, located at 38°N and 118°E came to being at 2003-09-08-01:40 UTC. It diffused northeastward, which was caused by the upper air winds and geomagnetic field. After analysis with diffusion equation under 1976 U. S. standard atmosphere,

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40174009), 中国科学院重要方向项目(KJCX2-SW-T1)和上海科技发展基金项目(JC14012)资助.

**作者简介** 朱文耀, 男, 研究员、博士生导师, 主要从事大地测量与地球动力学方面的研究. E-mail: zhuw@shao.ac.cn

we find that the heterogeneity appeared at the height of 350km above the ground.

**Key words** GPS, Total Electron Content (TEC), Diffusion equation, Ionospheric heterogeneity.

## 1 引言

电离层中不均匀结构的存在及其不规则变化对无线电信号的传播产生相位和振幅的随机变化(即电离层闪烁)<sup>[1,2]</sup>,影响了信号传播的质量,降低了导航系统的性能,为此,很多学者进行了相关的研究.传统的电离层研究工作主要借助于信标卫星的 FARADAY 旋转法、地面上的非相干散射雷达测量、高频多普勒的频移观测以及无线电导航台对地球同步卫星的 VHF 观测等<sup>[3,4]</sup>.GPS 技术具有成本低、时空分辨率高、数据量大、全天候连续观测、基本全球覆盖等优点,为电离层的监测提供了一个全新的途径.20 世纪 90 年代以来,利用 GPS 双频观测来监测总电子含量(Total Electron Content,即 TEC)的时空变化已成为一种较理想的方法.随着全球 GPS 永久监测网的布设,各区域、局域 GPS 综合应用网的建成,利用密集分布连续运行的多功能 GPS 监测网进行高时空分辨率的电离层动态监测已广泛用于探测和研究电离层的不规则结构<sup>[5]</sup>、地磁暴对电离层的影响<sup>[6,7]</sup>、电离层对太阳耀斑的响应<sup>[8,9]</sup>、电离层行扰的物理特性<sup>[4,10]</sup>等.国际 IGS 组织自 1998 年以后开始提供全球大尺度的电离层变化图<sup>[11,12]</sup>.

对于电离层不均匀结构,其生存时间与尺度有直接关系,小的不均匀结构的产生、消亡过程往往在几分钟甚至更短的时间内完成.对其监测需要更高时空分辨率的 TEC 数据,这就对地面 GPS 跟踪网观测站分布的密度提出了一定的要求.上海 GPS 综合应用网可以提供分辨率为  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$  的二维 TEC 时空变化等值线图<sup>[13]</sup>,有利于监测尺度为数十公里的电离层不均匀体.本文利用该网提供的实测资料,进行了小尺度电离层不均匀体监测,获得了快速变化的 TEC 等值线图像,利用大气模型,据扩散方程探讨了一电离层不均匀体的生灭过程.

## 2 GPS 观测数据及处理

### 2.1 上海地区 GPS 综合应用网简介

上海地区 GPS 综合应用网自 2002 年 6 月开始运行,由 14 个地面 GPS 基准站和中心处理站组成,

并配置 Ashtech 双频 GPS 接收机,采样间隔设置为 30s.地面 GPS 基准站的分布为:上海地区 5 个,周边江、浙、皖地区共 9 个(如图 1 所示),基本上覆盖了长江三角洲地区,中心处理站设在上海天文台.该 GPS 网连续 24h 全天候观测,可用于实时监测该地区电离层总电子含量、对流层大气可降水量(Precipitable Water Vapour)的时空变化.本文采用该 GPS 网于 2003 年 9 月 8 日(年积日 251)采集到的观测数据.

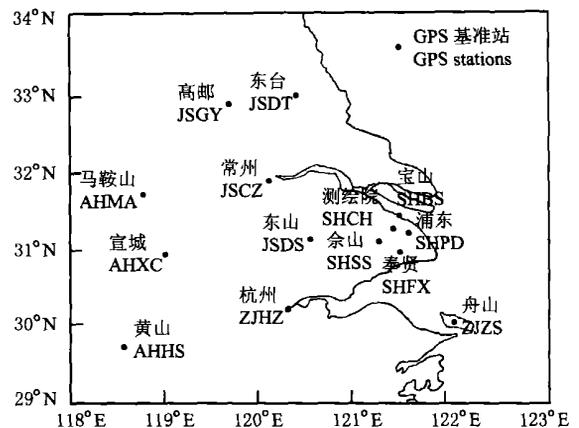


图 1 上海综合 GPS 应用网 GPS 台站的分布

Fig. 1 The distribution of GPS sites in Shanghai GPS comprehensive application network

### 2.2 数据及处理

由于电离层的空间分布在距离地面 100km 以上,而电子含量在离地面 300km 到 500km 之间达到最大值,图 2 给出了利用 IRI 国际电离层模型计算得到的电子含量空间分布图.该图表明,垂直方向上的总电子含量主要集中在 F 层,在利用 GPS 反演的总电子含量的时空变化时,可以假定电离层中所有自由电子主要集中在 F 层某一高度处(如 375km)的一个厚度为无限薄的单层上,由此建立电离层电子含量的单层模型,并用它来有效地监测电子含量的时空变化<sup>[2]</sup>.

根据电离层单层模型,依据某时刻跟踪站和它所观测到的卫星的空间位置,可计算出 GPS 信号与该单层交点的(即穿刺点)空间位置<sup>[2]</sup>.利用 GPS 信号中两个不同频率的伪距之差即可计算得到信号路径上的总电子含量,并按某一投影关系,即可得到该

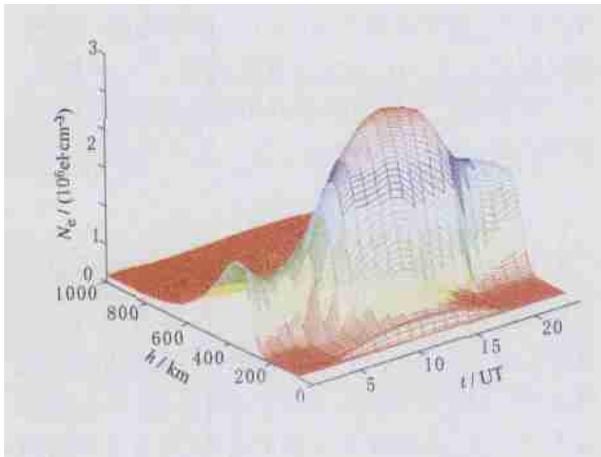


图 2 IRI 模型计算得到的电子含量时空分布图  
Fig. 2 The spatial distribution of TEC estimated from IRI model

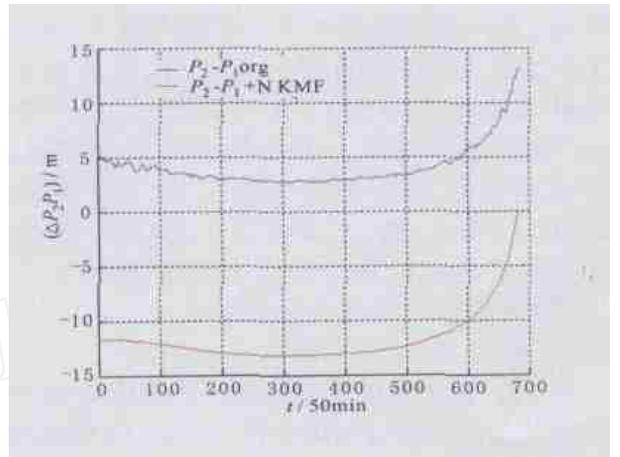


图 3 SHPD 站观测的 PRN18 号卫星  $P_2 - P_1$  的 Kalman 滤波前后的结果  
Fig. 3  $P_2 - P_1$  of PRN18 observed at site SHPD before and after Kalman filter

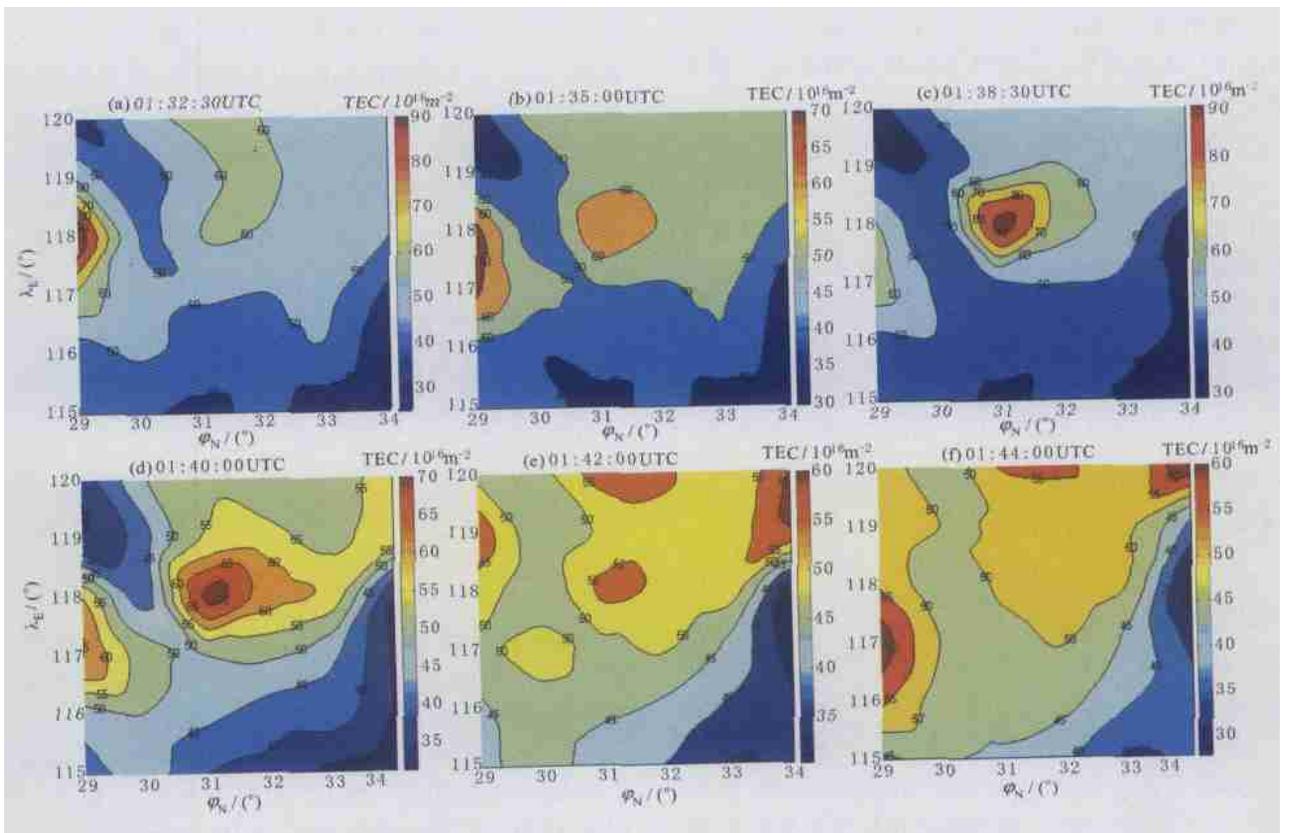


图 4 2003 年 9 月 8 日不同时刻的 VTEC 等值线图  
Fig. 4 VTEC contour maps at six different epochs on Sep. 8, 2003

穿刺点的天顶方向上的电子含量 (Vertical Total Electron Content, 即 VTEC). 为了获取穿刺点的准确位置、得到高精度的电子含量的观测值, 本文的计算工作均在 ITRF2000 框架下进行, 卫星坐标采用国际 IGS 组织发布的 GPS 卫星精密星历 (精度为 5cm), 测站坐标根据一年多的 GPS 观测资料, 进行整体平差得到, 精度为几个毫米. 为了得到准确的、高精度的 VTEC 值, 本文采用了 Kalman 滤波的方法和硬件延迟参数估计的方法来改善  $P_2 P_1$  的精度, 消除硬件系统误差对它的影响.

2.2.1 利用 Kalman 滤波改善  $P_2 P_1$

由于电子含量的计算与 GPS 信号双频伪距之差直接相关, 而 GPS 精码伪距  $P_1$ 、 $P_2$  的观测精度较低 (0.3m 左右), 为了提高电子含量估算的精度, 本文采用了 Kalman 滤波的方法, 利用更高精度的观测值——GPS 相位观测值 (观测精度为毫米级) 来平滑改善伪距之差  $P_2 P_1$  的观测精度. 具体模型如下<sup>[2]</sup>

利用  $L = P_2 P_1 - L_4$ ,  $X = Amb = N_1 \lambda_1 - N_2 \lambda_2$  ( $L$  为观测量,  $X$  为待估参数), 构造如下的标量系统

$$\begin{cases} X_{k+1} = X_k + \dot{X}_k, \\ L_{k+1} = X_{k+1} + \dot{L}_{k+1}, \end{cases}$$

其中,  $L_4 = \lambda_1 - \lambda_2$ ,  $N_1$  和  $N_2$  分别为两载波观测值的整周模糊度,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为相应频率载波的波长,  $\dot{L}_k$  和  $\dot{X}_k$  为相位观测值, 观测噪声  $\dot{L}_{k+1}$  和动态噪声  $\dot{X}_k$  为零均值的白噪声系列, 且相互独立, 与初值  $X_0$  也不相关. 当动态噪声  $\dot{X}_k$ 、观测噪声  $\dot{L}_{k+1}$  和初值  $X_0$  的协方差  $D$ 、 $D_k$ 、 $D_{X(0)}$  已知,  $E(\dot{X}_0) = X(\dot{0}/0)$  时, Kalman 滤波方程的解为

$$\begin{cases} \tilde{X}(k/k) = \tilde{X}((k-1)/(k-1)) + J_k [L_k - \tilde{X}((k-1)/(k-1))], & (1a) \\ D_X(k/k) = (1 - J_k) D_X(k/(k-1)), & (1b) \\ J_k = D_X(k/(k-1)) [D_X(k/(k-1)) + D(k)]^{-1}, & (1c) \\ D_X(k/(k-1)) = D_X((k-1)/(k-1)) + D(k). & (1d) \end{cases}$$

图 3 给出了浦东 (SHPD) 站跟踪的 PRN18 号卫星的双频伪距之差  $P_2 P_1$  的 Kalman 滤波前后的曲线图. 卫星在天空运行, 它与地面跟踪站之间的距离随时间变化的曲线应是光滑连续的, 但由于 P 码伪距的观测精度较差, 未经滤波的曲线跳跃性较大, 部分成锯齿状 (如图 3 蓝线), 利用高精度的  $L_1$ 、 $L_2$  载波相位观测值滤波平滑后, 其曲线连续性好 (如图 3

红线), 且观测精度有了显著提高. 根据 (1b) 式可计算得到平滑后  $P_2 P_1$  的精度. 图 3 的数据表明, 平滑后  $P_2 P_1$  的精度约为 0.043m, 而原来的  $P_2 P_1$  的观测精度为 0.41m 左右, 精度提高了一个量级. 图 3 中两曲线之间的差距是由相位观测量模糊度的存在引起的, 图 3 红线是  $L_4$  加上了一整数后的结果.

2.2.2 接收机硬件延迟的估计

由于接收机输出的 GPS 信号中隐含有卫星电路和接收机电路的硬件延迟误差 (在短时间内可视为常数), 该项误差可达到几纳秒<sup>[2]</sup>, 故在估算电离层延迟时, 必须消除该误差的影响. 为此, 本文采用了以下的方法, 在估算电子含量之前, 进行了硬件延迟的估计.

$$\begin{cases} P_1^j = \lambda_1 + \lambda_{ion}^j P_1 + q_1^j, \\ P_2^j = \lambda_2 + \lambda_{ion}^j P_2 + q_2^j, \\ \lambda_1^j = \lambda_1 + \lambda_{ion}^j + b_1^j, \\ \lambda_2^j = \lambda_2 + \lambda_{ion}^j + b_2^j, \end{cases}$$

式中,  $\lambda_i$  是由卫星到接收机的几何距离、卫星轨道误差、卫星和接收机钟差、对流层延迟、多路径效应以及测量噪声组成,  $q_i^j$  ( $i=1, 2$ ) 分别为两个频率的卫星和接收机硬件群延迟的总和;  $b_i^j$  ( $i=1, 2$ ) 分别为两个频率的模糊度和 GPS 接收机相位延迟的总和. 根据该式以及 VTEC 与延迟间的关系, 采用 VTEC 模型<sup>[2]</sup>, 构建观测方程

$$\begin{aligned} L_{ion}^j + B_{ion}^j &= \lambda_{ion}^j \cdot VTEC^j \cdot \sec \lambda^j + q^j, & (2) \\ &= 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2}, \\ B_{ion}^j &= \frac{\sum_{i=1}^N \{ [P_{ion}^j(t_i) - L_{ion}^j(t_i)] / [1/\lambda^j(t_i)]^2 \}}{\sum_{i=1}^N \{ [1/\lambda^j(t_i)]^2 \}}, \end{aligned}$$

其中,  $L_{ion}^j = \lambda_1^j - \lambda_2^j$ ,  $P_{ion}^j = P_2^j - P_1^j$ ,  $N$  为采样个数,  $q^j$  为组合硬件延迟,  $\lambda^j(t_i)$  为权重因子;  $\lambda^j$  为相应测站观测的卫星在穿刺点处的天顶距.

对方程 (2) 采用最小二乘并组建设法方程, 即可估计出 GPS 系统的硬件延迟. 利用上海 GPS 综合应用网, 计算得到该时段内测站 SHPD 观测到 GPS 卫星的 GPS 硬件延迟结果参见表 1.

表 1 中的数据表明, 该时段的观测中, GPS 系统的硬件延迟最大会达到 2 ~ 3ns, 对应距离在 0.6 ~ 1m 之间, 这对于 VTEC 的估计而言, 其影响



表 1 各卫星与测站 SHPD 的硬件延迟(单位:ns)

Table 1 Hardware delay of SHPD receiver and the observed satellites(unit :ns)

PRN	1	2	5	6	9	14
硬件延迟	1.072782	- 1.001696	- 0.683726	0.317197	- 0.57247 8	- 1.475743
PRN	15	16	18	23	30	
硬件延迟	- 0.964927	- 1.546889	- 2.474892	- 2.621113	- 0.614 922	

不可忽视,必须给予校正.为此,本文的结果都进行了硬件延迟的改正.

### 3 观测结果及分析

根据上述方法计算获得的穿刺点的经纬度及其 VTEC 值,我们就可以得到不同时刻的电离层 VTEC 的等值线图.

图 4(a~f)给出了不同时刻分辨率为  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$  的 VTEC 等值线图.比较这几幅图,我们可以发现,在 01:32 UTC(图 4a),  $(31^\circ \text{N}, 118^\circ \text{E})$  处的电子含量与周围没有太大的差别,还没有出现 TEC 的峰值,但有一条形的 TEC 为  $60 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  的电子密集带扩散延伸到此.在 01:35 UTC(图 4b),该条形电子密集带已经部分扩散,形成了右上角一片以  $50 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  为背景的 TEC 等位面,而  $(31^\circ \text{N}, 118^\circ \text{E})$  附近出现一 TEC 为  $60 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  的电子云团.由于受某种因素的影响,该电子云团的电子含量突然迅速增加,在 01:38:30 UTC(图 4c),电子含量达到了最大值—— $90 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ ,而其周围的 TEC 也相应地增加,形成了一形如小山的带电粒子密集的不均匀体.产生这种急剧变化的原因可能是由于大气湍流引起的.该不均匀体中心的尺度(即  $90 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  对应的电子云团)约为 50km(网格中 1 对应的空间距离约在 100km).

随后,该不均匀体开始扩散.图 4d 中,  $55 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  等值线的扩散和  $60 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  等值线的右方的尖尖表明,该不均匀体的扩散有向北,沿  $118^\circ$  经线延伸的趋势,这主要是由地球磁场(重力场驱动)的影响引起的.另外,图 4d 中  $55 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$  等值线也有向东的趋势,且图 4e、4f 的扩散表明,该不均匀体扩散分成两部分,一部分向东,另一部分在东北角.这就表明,除了地球磁场(即地球重力波的驱动)的作用外,还有其他的外力作用,使得该不均匀体扩散方向发生改变.这种外力,在高空中只可能是高空风场或气流的作用,而且,其方向应该是向东偏北方

向.因此,可以判断,该电离层不均匀体产生的主要原因是大气湍流,同时,受地球磁场和高空风场的作用,该不均匀体向东北方向扩散.图 4 表明,整个扩散过程经历大约 5min,即该电离层不均匀体的生存时间仅为 5min 左右.

### 4 计算分析

假设不均匀电离体为球形,它开始扩散时刻  $t=0$ ,该电离体有均匀电子浓度  $KN$ ,这里  $N$  为背景电离层介质的电子浓度, $K$  为大于 1 的常数.对于本次观测,根据图 4 中不均匀体中电子含量的变化可知: $N = 50 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ ,  $K=1.8$ .按照扩散方程:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \nabla^2 N, \quad (3)$$

其中  $D$  为扩散系数.在球对称的情形下,边界条件为

$$N(r)|_{t=0} = \begin{cases} KN, & r \leq r_0, \\ N, & r > r_0, \end{cases}$$

根据方程(3)在边界条件下的解,可写出在球中心处电子浓度  $N(0, t)$  的表达式为<sup>[7]</sup>

$$\frac{N(0, t)}{N} = 1 + (K - 1) \left[ \phi \left( \frac{r_0}{2\sqrt{Dt}} \right) - \frac{r_0}{\sqrt{Dt}} \exp \left( - \frac{r_0^2}{4Dt} \right) \right], \quad (4)$$

其中,  $\phi(s) = \int_0^s e^{-x^2} dx$ .这里近似认为  $\frac{N(0, t)}{N} = 1.05$  时的  $t$  为生存时间  $T$ .当  $\frac{N(0, t)}{N} = 1.05$ ,  $K$

$= 1.8$  时,方程(4)的数值近似解为  $\frac{r_0}{2\sqrt{Dt}} = 0.37052$ ,故  $r_0 = 0.74104 \sqrt{Dt}$ .很明显,电离层不均匀结构的尺度  $r$  与大气扩散系数  $D$  和生存时间  $T$  相关,且是它们的增函数.对于扩散系数  $D$ ,根据 Chapman 和 Cowling 的计算公式<sup>[14,15]</sup>,有

$$D = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{gH}{8}} \frac{1}{nr_1^2} \left( 1 + \frac{m}{m_1} \right)^{\frac{1}{2}},$$

式中,  $n$  是气压标高为  $H$  处的分子浓度,  $r_1$  表示有

效碰撞距离,  $m$ 、 $m_1$  分别为大气的平均分子质量和气体某成分的分子质量. 根据美国 1976 标准大气<sup>[16]</sup> (部分参数见附表), 可以计算出扩散系数与高度间的关系, 图 5 给出了部分计算结果.

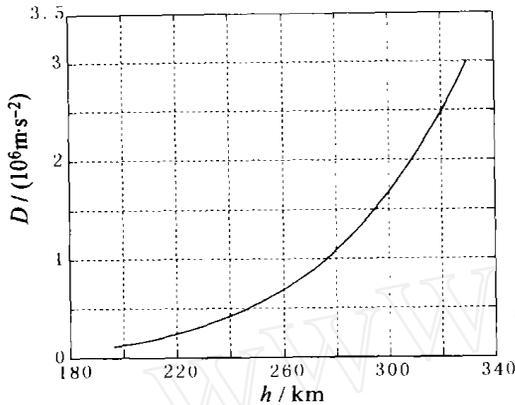


图 5 扩散系数与高度间的关系

Fig. 5 Relationship between diffusion coefficients and height

图 5 表明, 大气扩散系数  $D$  随高度增加而增加, 而不均匀体的尺度的计算与扩散系数和生存时间相关, 因此, 给定不均匀体的生存时间  $T$ , 就可以得出不均匀体的尺度与高度之间的变化关系. 图 6 给出了生存时间分别为 200、300、400s 时对应的不均匀体的尺度  $b$  与高度之间的变化曲线. 而本次观测到的电离层不均匀体的生存时间在 300s 左右, 尺度在 50km 左右. 参照图 6, 可以粗略地判断出, 该不均匀体发生的高度为 350km 左右, 即该不均匀体产生在 F 层. 这个高度刚好处于电离层中电子含量的峰值区域. 这就表明, 由于电离层单层模型的前提假设条件, 上述的计算结果主要反映这一高度上的电离层的运动变化, 计算结果与前提假设基本吻合.

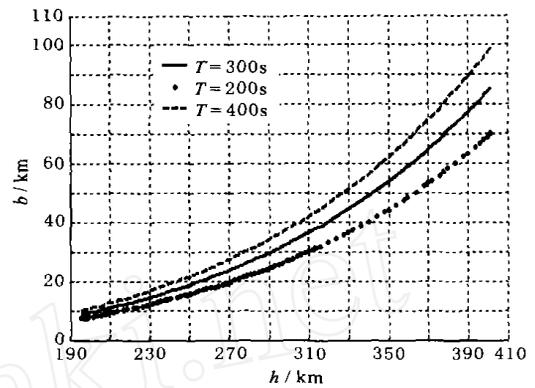


图 6 电离层不规则体尺度与高度间的关系

Fig. 6 Relationship between ionospheric heterogeneity's scale and height

## 5 结 论

上海 GPS 综合应用网的这次监测结果表明, 利用密集的地面 GPS 跟踪网观测到的高时空分辨率的双频观测数据, 采用单层电离层模型, 利用等值线图和大气扩散方程, 可以有效地监测电离层不均匀体的变化及其运动扩散过程, 计算分析电离层不均匀体发生的三维空域. 本文提出的方法也适用于监测不同尺度的电离层不均匀体的产生、扩散和消亡及其运动过程, 确定其发生的区域. 电离层不均匀体的时空变化的监测对于高空大气现象及其物理特性的研究具有十分重要的意义. 而 TEC 二维等值线图为此提供了一个新的更加直观的数据源, 为高空天气监测及预报提供了方便. 本文的监测结果也可以用于改正卫星导航系统信号的电离层延迟, 提高其导航定位精度, 满足当代高精度导航的需求.

附表 美国 1976 标准大气模型中与扩散参数相关的参数 (部分数据列表)

Appendix Table Part data of the 1976 U. S. standard atmosphere

高度 (km/ m)	电子数密度 ( $10^{15} \text{el} \cdot \text{m}^{-3}$ )	重力加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	高度 (km/ m)	电子数密度 ( $10^{15} \text{el} \cdot \text{m}^{-3}$ )	重力加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
196/ 35341	8. 137	9. 2288	257/ 45929	1. 622	9. 0593
197/ 35554	7. 884	9. 2260	259/ 46208	1. 550	9. 0536
198/ 35765	7. 641	9. 2231	261/ 46483	1. 402	9. 0484
199/ 35975	7. 407	9. 2203	263/ 46755	1. 417	9. 0429
200/ 36163	7. 102	9. 2175	265/ 47023	1. 355	9. 0374
202/ 36594	6. 757	9. 2119	267/ 47287	1. 297	9. 0320
204/ 37000	6. 362	9. 2063	269/ 47548	1. 241	9. 0265
206/ 37399	5. 995	9. 2007	271/ 47806	1. 189	9. 0211
207/ 37597	5. 822	9. 1979	273/ 48060	1. 138	9. 0156

续表

高度(km/m)	电子数密度( $10^{15}\text{el}\cdot\text{m}^{-3}$ )	重力加速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	高度(km/m)	电子数密度( $10^{15}\text{el}\cdot\text{m}^{-3}$ )	重力加速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )
209/37988	5.493	9.1923	275/48312	1.090	9.0102
210/38182	5.337	9.1895	277/48559	1.045	9.0048
212/38564	5.041	9.1839	279/48804	1.002	8.9993
214/38942	4.765	9.1783	281/49046	0.9603	8.9939
217/39498	4.385	9.1699	283/49284	0.921	8.9885
219/39863	4.151	9.1643	285/49519	0.8833	8.9831
222/40400	3.829	9.1560	287/49752	0.8474	8.9777
224/40763	3.631	9.1504	289/49981	0.8132	8.9723
227/41272	3.356	9.1421	290/50095	0.7967	8.9696
229/41642	3.167	9.1365	292/50320	0.7648	8.9642
232/42114	2.952	9.1282	293/50432	0.7494	8.9615
234/42444	2.807	9.1227	295/50653	0.7197	8.9561
236/42768	2.670	9.1171	297/50871	0.6912	8.9507
238/43089	2.541	9.1116	299/51086	0.6640	8.9453
239/43247	2.480	9.1088	300/51193	0.6509	8.9427
241/43561	2.361	9.1033	302/51405	0.6254	8.9373
244/44025	2.197	9.0590	304/51614	0.6011	8.9319
246/44328	2.094	9.0895	306/51820	0.5779	8.9266
248/44628	1.997	9.0840	308/52024	0.5556	8.9212
249/44777	1.951	9.0813	310/52226	0.5343	8.9158
251/45071	1.862	9.0758	312/52425	0.5193	8.9105
253/45361	1.777	9.0703	314/52622	0.4944	8.9052
255/45647	1.697	9.0648	316/52817	0.4756	8.8998

注:高度栏“/”左边的为几何高度,右边的为气压标高。

## 参考文献

- [1] Andrzej W WERNIK, Lucilla ALFONSI, Massimo MATERAS-SI. Ionospheric irregularities, scintillation and its effect on systems. *Acta Geophysica Polonica*, 2004, **52**(2): 237 ~ 249
- [2] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平等. 广域差分 GPS 原理和方法. 北京:测绘出版社, 1999  
Liu J N, Chen J Y, Zhang Y P, et al. Theory and Technique of Wide Area Differential GPS (in Chinese). Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999
- [3] Ogawa T. Radar Observations of ionospheric irregularities at Syowa Station, Antarctica: A brief overview. *Ann. Geophysicae*, 1996, **14**: 1454 ~ 1461
- [4] Zhang D H, K Igarashi, Xiao Zuo, et al. The observation of large scale traveling ionospheric disturbances based on GPS network. *Chinese J. Geophys.* 2002, **45**(4): 469 ~ 475
- [5] Pi X, Mannucci A J, Lindqwister U J, et al. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(18): 2283 ~ 2286
- [6] Ho C M, Mannucci A J, Lindqwister U J, et al. Global ionosphere perturbations monitored by the worldwide GPS network. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(22): 3219 ~ 3222
- [7] Ho C M, Mannucci A J, Lindqwister U J, et al. Global ionospheric TEC variation during January 10, 1997 storm. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(14): 2589 ~ 2592
- [8] Zhang Donghe, Xiao Zuo. The correlation of flare's location on solar disc and the sudden increase of total electron content. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(1): 82 ~ 84
- [9] Zhang Jian, Ou Jikun. On effect of solar flare on vertical total electric contents in ionosphere. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2003, **23**(2): 96 ~ 100
- [10] Saito A, Fukao S. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(16): 3079 ~ 3082
- [11] Stefan Schaer. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system [Ph. D. Thesis]. Bern, Germany: The University of Bern, 1999
- [12] Ping J, Kono Y, Matsumoto K, et al. Regional ionosphere map over Japanese islands. *Earth Planets Space*, 2002, **54**: e13 ~ e16
- [13] 金双根, J L Wang, 章红平等. GPS 实时监测和预报电离层电

- 子含量. 天文学报, 2004, 45(2): 213~219
- Jin S G, Wang J L, Zhang H P, et al. Monitoring and predicting the real time ionospheric electron content using GPS. *Chinese Astronomy and Astrophysics* (in Chinese), 2004, 45(2): 213~219
- [14] 赵九章. 高空大气物理学. 北京: 科学出版社, 1965
- Zhao J Z. Upper Air Atmospheric Physics (in Chinese). Beijing: Science Press, 1965
- [15] Chapman S, Cowling T G. The Mathematical Theory of Non-uniform Gases. Cambridge Univ. Press, 1952
- [16] 美国国家海洋和大气局, 美国航空局和美国空军部. 标准大气 (美国, 1976). 任现森, 钱志明译. 北京: 科学出版社, 1982
- National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United States Air Force. U. S. Standard Atmosphere, 1976 (in Chinese). Translated by Ren X M, Qian Z M. Beijing: Science Press, 1982

## 本刊启事

各位作者与读者:

《地球物理学报》在大家的关爱下, 于 1999 年再次成为美国科学信息研究所 (ISI) 检索系统 SCI 收录的少数中文期刊之一. 然而, 由于作者在引用本刊发表的论文时, 对《地球物理学报》使用了不同的外文译名, 诸如 Acta Geophysica Sinica, Chinese J. Geophys., Chinese Journal Geophysics, Chinese J Geophys. (in Chinese), DIQIU WULI XUEBAO 等. 这种情况使得 SCI 无法辨认哪一个名称属于《地球物理学报》, 因而 SCI 不能给出本刊的真实影响因子 (据了解). 为此, 再次申明: 请您在引用本刊发表的论文时 (无论是向本刊或其他刊物投稿), 对本刊刊名务必用以下的统一的英文译名: **Chinese J. Geophys. (in Chinese)**.

谢谢合作!