利用 GPS 分析电离层波动现象

章红平^{①②} 朱文耀^{①③} 彭军还^① 黄城^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 100039; ^③现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092. E-mail: hpzhang@shao.ac.cn)

摘要 利用中国境内连续运行的 GPS 跟踪站提供的高时空分辨率的双频观测数据, 初步分析了 2003 年 11 月 3 日太阳耀斑期间电离层的波动特性. 当天 PRN23 号 GPS 卫星的 VTEC 及其变化率曲线表明, 此次电离层波动基本沿着经线向南运动, 且主要包含了两种频率的运动. 另外, 结合局域面 VTEC 涨落的谱分析及穿刺点与电离层波动的相对运动分析表明, 中纬度地区, 这两种频率的波动主要体现为周期分别为 1 小时左右和 20~30 分钟的运动; 周期为 1 小时左右的大尺度电离层波动, 其振幅会达到 1~2 TECU 左右, 速度会达到 120~150 m/s, 且波动速度会随着纬度的降低而变快; 周期为 20~30 分钟的小尺度电离层波动, 其振幅约为 0.4~0.7 TECU, 速度在 30~40 m/s 左右.

关键词 GPS VTEC 电离层波动现象 谱分析 相对运动 小波分析

太阳的周期性活动对电离层产生很大的影响, 耀斑爆发期间太阳发射的大量软、硬 X 射线、EUV 辐射的突然增加会使电离层的电子密度有一个较大的增加, 从而产生各种电离层异常现象, 如电子含量突增、短波消逝、突然频漂、突然相位异常、磁钩扰等^[1]. 耀斑爆发期间太阳的剧烈活动还会引起地球磁场的扰动, 从而产生磁暴现象, 并会引发大、中、小不等尺度的电离层行扰^[2]. 电离层的这些异常现象对通讯、卫星对地观测、深空探测等现代科学技术产生了很大的影响, 因此, 其研究得到了许多学者的重视. 从观测方法上看, 传统的对电离层的研究工作主要借助于电离层测高仪、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^[3~5]. 而 GPS 技术的出现为电离层各种现象的研究提供了一个新的手段. GPS 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, 因此, 自 20 世纪 90 年代以来, 利用 GPS 来监测电离层总电子含量(Total Electron Content, 即 TEC, $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ 个电子/m}^2$)的时空变化已成为一种较理想的方法, 可以广泛用于探测和研究电离层的不规则结构^[6]、地磁暴对电离层的影响^[7~9]、电离层对太阳耀斑的响应^[5,10]等. 对于耀斑期间电离层的响应, 以往研究表明, GPS 技术可以敏感地探测到电离层 TEC 的突增现象^[3,4,11]; GPS 技术与其他技术手段联合, 可有效的分析促使 TEC 突增的物理机制^[11], 验证相关的电离层理论(如 Chapman 电离理论^[14]、GPS 技术

还可用于分析电离层行扰的物理特性^[2,12,13], 对此, Saito 等人^[12]借助日本 GEONET 网提供的 GPS 观测数据, 很好地分析了电离层行扰的周期和传播特性. 对于电离层波动特性, Gross 的研究表明, 赤道区域的电离层会出现驻波的现象, 这可能是南北半球电离层波动相向传播在赤道区域相干形成的^[14]. 由于电离层行扰是大气重力波在电离层中的反映^[15,16], 而波动现象是电离层行扰的表现特征, 为此, 本文利用中国地壳运动 GPS 监测网、上海地区 GPS 综合应用网以及国际 IGS 组织中国及周边区域内 GPS 跟踪站的数据, 得到 VTEC 及其相对变化, 细致分析了 2003 年 11 月 3 日太阳耀斑期间电离层的波动现象.

1 数据结果分析

1.1 GPS 网及数据

目前, 国内常年连续运行的多功能 GPS 跟踪网主要有中国地壳运动 GPS 监测网和上海地区 GPS 综合应用网. 其中地壳运动 GPS 监测网由 25 个台站组成, 台站遍布全国, 而上海地区 GPS 综合应用网由 14 个台站组成, 主要覆盖了江、浙、沪、皖四省市. 图 1 给出了这两个 GPS 网台站(图中的小圆圈)的分布情况, 其中包含了国际 IGS 组织的五个 GPS 站(wuhn, shao, urum, lhas, twtf). 图 1 还给出了 2003 年 11 月 3 日 UTC01:30 时, 这些台站观测的卫星的穿刺点(图中的星形点)的分布情况. 数据处理时采用了这些台站采集的双频伪距和载波相位观测数据, 其采样间隔为 30 秒, 截止高度角为 15° .

图 1 中国区域内 GPS 点位分布图

1.2 数据处理

利用 GPS 进行电离层的研究中, 电离层单层模型(Single Layer Model, 即 SLM)常常被用来分析天顶方向或垂直方向总电子含量(Vertical TEC, 即 VTEC)的时空变化特性及其对无线电信号传播的影响. SLM 模型即是假定电离层中所有自由电子都集中在 F 层某一高度处(如 375 km)的一个厚度为无限薄的单层球壳上, Schaer¹⁾的研究表明, 对于中纬度地区, 当 SLM 模型单层壳的高度取为 428.8 km, 投影函数取为穿刺点处卫星的天顶距的余弦时, 则它与电离层 Chapman 剖面投影一致性最好, 为此, 本文采用了单层壳的这一高度. 另外, 为了计算 VTEC 及其相对变化量, 在此利用 P 码伪距观测量, 用 $\Delta P_2 P_1$ (即 $P_2 - P_1$) 替代 L4 (即 $\lambda_1 \cdot \varphi_1 - \lambda_2 \cdot \varphi_2$) 的方法^[17]来估计相位模糊度. 此外, 卫星和接收机电路的硬件延迟偏差对计算 VTEC 有较大影响, 数据处理时将其看作待估参数引

入观测方程, 采用最小二乘法解算^[17].

对于载波相位观测数据, 穿刺点上的 VTEC 的计算公式如下:

$$\text{VTEC} = F \cdot (\lambda_1 \cdot \varphi_1 - \lambda_2 \cdot \varphi_2 + \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2 + R_1 - R_2) \cdot \cos z, \quad (1)$$

式中 λ_1, λ_2 为 L1, L2 载波的波长, φ_1, φ_2 为载波相位的观测值, N_1, N_2 为载波相位的模糊度, R_1, R_2 分别为对应的硬件延迟, z 为穿刺点上卫星的天顶距, VTEC 的单位为 TECU (1 TECU = 10^{16} el/m²).

当卫星在运动时, 穿刺点在 SLM 球壳上运动, 相邻两历元对应的穿刺点上 VTEC 的差值可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta \text{VTEC} = F \cdot [& (\lambda_1 \cdot \varphi_1 - \lambda_2 \cdot \varphi_2)_{i+1} \cos(z_{i+1}) \\ & - (\lambda_1 \cdot \varphi_1 - \lambda_2 \cdot \varphi_2)_i \cos(z_i) \\ & + T \cos(z_{i+1}) - T \cos(z_i)], \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $F = \frac{1}{40.3} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}$, $T = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2 + R_1 - R_2$,

1) Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. Ph.D thesis, The University of Bern, Bern, Germany, 1999

在不长的时间内 T 为常数, 在计算 VTEC 相对变化时, T 可以利用 P 码伪距和相位观测量, 采用 Kalman 滤波, 或多历元取平均值^[17]的方法近似求解.

1.3 单卫星 TEC 分析

根据 SLM 模型电离层单层壳的高度、任意时刻 GPS 卫星的在轨位置以及测站的位置, 可以计算出穿刺点的地理坐标及其随时间变化的轨迹曲线. 图 2 给出了 SHPD 站(31.13°, 121.33°)在时段 UTC 00:00~05:00 内观测的卫星穿刺点的轨迹曲线. 该图表明, 该时段内 PRN23 号卫星的穿刺点东西方向的运动跨度不到 1°, 即它基本上是沿着经线向南运动, 而其他卫星的穿刺点的运动方向与经线方向有较大的夹角. 另外, 其他 GPS 跟踪站观测到的 PRN23 号卫星的穿刺点轨迹表明, 该观测时段内, 中纬度地区东经 90°~东经 125°范围内, GPS 跟踪站观测的 PRN23 号卫星, 其穿刺点轨迹东西跨度最大为 4.5°, 且在 120°左右其东西跨度最小, 而南北跨度一般在 12°以上, 即 PRN23 号卫星穿刺点基本上沿着经线向南运动.

图 3 给出了观测时段 UTC 00:00~03:26 内, ahma(31.42°, 118.31°), shpd(31.13°, 121.33°), wuhn(30.31°, 114.21°), lhas(29.39°, 91.06°) 4 个 GPS 跟踪站上观测的 PRN23 号卫星的 VTEC 随纬度变化的曲线. 该 VTEC 曲线已经消去了线性趋势项, 且已经归算到天顶方向. 图 3 表明, 这 4 条曲线表现出了波形, 且曲线间明显存在着相位差. 这表明电离层此时存在一种波形状的不均匀结构, 由于电离层本身存在运动^[6], 故此时电离层存在波动现象. 另外, 由于 PRN23 号从

图 3 时段 UTC 00:00~03:26 内四测站上观测的 PRN23 号卫星的 VTEC 随纬度变化曲线

高纬向低纬运动, 故图 3 中纬度高的测站, 它观测到的 VTEC 曲线先到达波峰或波谷. 这就表明, 此时电离层波是从高纬到低纬方向传播. 另外, 结果表明, 图 3 中 shpd 站观测的 VTEC 曲线的周期为 167 分钟, 其他 3 个波形的周期在 150~170 分钟之间. 此外, 该时段内中纬度的这些站跟踪的 PRN23 卫星, 其穿刺点的运动速度均在 70~90 m/s 之间.

图 4 给出了该观测时段内这四个中纬度测站跟踪的 PRN23 号卫星的 VTEC 随经度变化的曲线. 图 4 中, 横坐标为经度差, 是指 PRN23 号卫星的穿刺点轨迹上各点的经度与该轨迹平均经度的差值. 从图 4

图 2 时段 UTC 00:00~05:00 内 SHPD 站观测的卫星的穿刺点轨迹

图 4 时段 UTC 00:00~03:26 内四测站上观测的 PRN23 号卫星的 VTEC 随经度变化曲线

中可以看出, lhas 站跟踪的 PRN23 号卫星的 VTEC 曲线, 其相位与其他三曲线的相位差别较大, 这是由于 lhas 站的经度与另外 3 个站的经度相差较大的缘故. 另外, 图 4 中, 各曲线波形相位差较明显, 且经度愈大, VTEC 波形愈先到达波峰或波谷, 故波形运动方向是向西.

由图 3 和图 4 可知, 此时电离层波朝西南方向运动, 这与 Saito^[12]利用 TEC 扰动等值线图分析的结果一致. 另外, 比较这两图可知, 图 3 中各测站纬度相差很小, 最大仅为 2° , 而各曲线之间的相位差已经很明显, 计算结果表明, wuhn 和 lhas 站的纬度相差不到 1° , 但两波形曲线纬线方向的相位差已经达到 1° . 而图 4 中, shpd 站和 ahma 站经度差几乎达到 3° , 但两波形曲线的相位差仅为 0.2° . 这就表明, 电离层的这种波形运动方向基本上是沿着经线向南传播.

图 5 给出了 6 个 GPS 站上观测的 PRN23 号卫星穿刺点上 VTEC 相对变化曲线(由公式(2)计算), 其中曲线右端标出了测站名及其地理纬度. 图 5 表明, 各曲线也都表现出了波形特征, 尽管波形时有时无, 但仍能够分辨出各曲线之间的相位差, 且该波形主周期项为 20 分钟左右, 振幅在 0.15 TECU/min 左右. 各曲线间的相位差及 PRN23 号卫星穿刺点的运动方向表明, 该尺度的波形运动也是从高纬向低纬运动. 由于这种波形运动的周期和振幅都较小, 波动能量较低, 容易受到湍流、涡流等大气不规则运动等偶然因素的影响, 因此图 5 中的波形特征时有时无.

图 5 6 测站跟踪的 PRN23 卫星穿刺点上 VTEC 的相对变化曲线

实际上, 图 3 对应了电离层的大尺度波动, 而图 5 对应了小尺度的电离层波动. 此外, 数据分析表明, 图 3 和图 5 中的曲线没有叠加其他更长或更短周期的运动. 因此, 我们推断电离层此时主要存在两种不同频率的波形运动. 但这是否表明图 3 和图 5 中 VTEC 波形的周期是电离层波动的周期呢? 穿刺点在这些时段内的运动速度是否就是电离层波的运动速度呢?

1.4 相对运动分析

图 6 给出了中低纬度地区 3 个测站 xiaq (25.36° , 100.15°), twtf (24.57° , 121.10°), xiam (24.26° , 118.05°) 上跟踪的 PRN23 号卫星的 VTEC 随纬度变化的曲线. 图 6 中 xiaq 的经度为 100.15° , 它跟踪的 PRN23 号卫星, 其穿刺点轨迹偏离经线方向较大, 因而, 与 xiam, twtf 两站跟踪的 PRN23 号卫星穿刺点轨迹的相似性差别较大. 故图中 xiam, twtf 两站的 PRN23 号卫星的 VTEC 曲线纬度方向上的相位差较明显, 而与 xiaq 站的 PRN23 号卫星的 VTEC 曲线相位差不太一致. 另外, 图 6 中曲线上的数字是近似零相位点或波峰相位点的观测历元时刻. 表 1 给出了这 3 条 VTEC 波形曲线分别完成半个周期所经历的时间, 以及穿刺点分别在这些半周期内的平均速度. 由表 1 可以看出, 随着 PRN23 号卫星的向南运动, 其穿刺点的速度在变快, 相应的 VTEC 曲线完成半个周期经历的时间也变短. 出现这种现象, 是由于穿刺点的运动与电离层波动的运动构成了相对运动.

图 6 三测站上观测的 PRN23 号卫星穿刺点的 VTEC 随纬度变化曲线

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/972004-272>

表1 PRN23号卫星穿刺点 VTEC 曲线分段经历半波长的时间及速度

测站	起止历元及时段长/min	起止纬度/(°)	平均速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
xiag	368~410/21	18.65176°~15.58323°	289
	272~368/48	22.43103°~18.65176°	156
	120~272/76	25.47297°~22.43103°	79
twtf	365~393/14	19.61359°~18.08377°	216
	295~365/35	21.87963°~19.61359°	128
	200~295/47.5	24.22442°~21.87963°	73
xiam	399~362/18.5	18.31314°~16.22509°	223
	362~291/35.5	20.92527°~18.31314°	146
	291~200/45.5	23.01284°~20.92527°	90

此时, 由于中纬度、中低纬度地区的 GPS 跟踪站, PRN23 号卫星穿刺点与电离层的运动构成相对运动, 且二者运动方向基本一致, 两者的相对运动关系可用图 7 表示. 设波速为 v , 穿刺点的运动速度为 v_1 , 电离层波动方程如下:

$$y = A \cdot \sin[2\pi f \cdot (t - x/v)]. \quad (3)$$

当穿刺点 A 在电离层波上作同向运动时, 其 VTEC 也随着波的运动而上下振动, 因此, 其轨迹上的 VTEC 序列构成了波形, 对应的方程为:

$$y_1 = A \cdot \sin[2\pi f \cdot |1 - v_1/v| \cdot t], \quad (4)$$

故电离层波动的速度 v 与穿刺点的运动速度 v_1 之间的关系为:

$$v = \begin{cases} [T_1/(T_1 - T)] \cdot v_1 & (v_1 < v, T_1 > T) \\ [T_1/(T_1 + T)] \cdot v_1 & (v_1 > v) \end{cases}. \quad (5)$$

上式中 T_1 为穿刺点轨迹上 VTEC 序列构成的波形的周期, T, f 分别为电离层波动的周期和频率, x 为波上任一点到波源的距离.

由公式(5)可知, 当已知穿刺点的运动速度 v_1 , 穿刺点上 VTEC 波形的周期 T_1 , 以及该 VTEC 波形对

图7 穿刺点与电离层波的相对运动

应电离层波的周期 T , 就可以计算出该频率的电离层波动速度.

由公式(4)可知, 当穿刺点和电离层运动速度相差越大, 穿刺点的 VTEC 波形完成半个周期的时间相对越短. 另外, 随着纬度降低, 电离层波动速度也会变化^[2]. 为了粗略确定图 6 中 VTEC 波形曲线对应频率的电离层波的运动速度及其随纬度的变化, 可以近似认为各曲线中每个周期内电离层波的速度等于其平均速度.

例如, 对于 xiam 站观测的 PRN23 号卫星的 VTEC 曲线, 假定在 200~362 这个周期内电离层波动速度等于其平均值 $\bar{v}$, 则穿刺点完成 200~291, 291~362 这两次半周期所花的时间与相对运动速度差成简单的比例关系, 即:

$$t_1/(v_1 - v') = t_2/(v_2 - v'),$$

式中 t_1 和 t_2 分别为 VTEC 波形的周期, 在此对应为 200~291 和 291~362. 由此近似计算可知, 此时(纬度较高)的电离层波动的速度为 115 m/s. 同理, xiam 站 VTEC 曲线对应的电离层波动在 291~399 这个周期(纬度较低)的电离层波动平均速度为 172 m/s.

同理, 可以近似的确定出 xiag 的 VTEC 曲线对应的电离层波在 120~368 这个周期内的平均速度为 109 m/s, 在 272~410 这个周期内的平均速度为 196 m/s. twtf 的 VTEC 曲线对应的电离层波在 168~365 这段时间内的平均速度为 96 m/s, 在 295~393 这个周期内的平均速度为 153 m/s. 这些 VTEC 曲线对应的电离层波动在不同时间段和地理纬度上速度的差异表明, 本次观测到的电离层波动的传播速度随着纬度的降低而增大; 而且, 在中纬度地区, 电离层波动的速度在 90 m/s 以上. 这种分析是在假定电离层该频率的波动在这三个多小时内保持不变的前提条件下的, 事实上, 电离层波动的频率会发生变化^[2], 但对于图 3 和图 6 所对应的大尺度的运动, 文献[2]的分析表明可近似认为这三个多小时内电离层波动频率保持不变.

1.5 局域面 VTEC 涨落分析

上述分析确定了电离层波动的方向, 判断出了电离层波动包含的多频率运动的特征, 并粗略的确定了电离层波动的大尺度运动的运动速度, 但我们并不知道电离层波动的频率大小, 以及所对应的速度特征.

为此, 我们在 SLM 球壳上选择了一区域, 以该区域电离层面为对象来研究其运动. 数据处理时, 我

们将该区域电离层面用密集交错的经纬线格网化, 并利用该区域内所有穿刺点上 VTEC 相对变化值, 内插出格网点上 VTEC 的相对变化值, 并将该区域面内所有格网点的 VTEC 相对变化值取平均, 用这一平均值时间序列反映该区域面电离层 VTEC 的变化.

根据图 1 中 GPS 站及穿刺点的分布情况, 我们选取了 $N28.0^{\circ} \sim 34.0^{\circ}$, $E118.0^{\circ} \sim 123.0^{\circ}$ 这一区域为研究对象, 该区域内 GPS 参与分析的台站总数达 15 个, 穿刺点个数大于 100. 利用上述方法, 我们可以得到该区域面的两条 VTEC 变化率曲线, 该曲线实际上反映了区域面上 VTEC 的平均涨落情况. 根据该涨落情况, 我们可以研究电离层的某些运动(如波动)特征. 图 8 给出了 2003 年 11 月 3 日 X2.7 级耀斑期间该区域面上 VTEC 对时间的变化率曲线. 该曲线序列中部分点的起伏比较大, 表现出粗差的形式.

图 8 区域面上 VTEC 的变化率曲线

1.6 频谱分析和小波分析

为了更有效的分析图 8 中时间系列的周期特性, 我们采用了 FFT 谱分析和小波分析两种方法. 其中, 谱分析方法可以有效的发现时间系列的周期性趋势项, 小波分析可以有效的进行信号的消噪处理, 并进行时间序列的多分辨率分析^[18,19].

由于引起电离层 VTEC 变化的非均衡、非平稳的物理因素有很多, 如太阳活动、大气动力学运动等, 因此, 该时间序列实际上是非平稳的. 对此, 小波分析可以有效的分辨出不同频率结构, 并进行非平稳消噪处理, 而谱分析方法可以用于发现序列的周期性趋势项, 但当高频噪声较强时, 谱分析结果受干扰较大, 甚至不能反映低频信号的周期特征. 此外, 谱

分析要求信号为零均值, 因此, 谱分析前必须对该序列进行高频消噪和线性拟合消除趋势项的处理. 另外, 图 8 原始曲线系列中存在许多粗差, 而小波滤波可以有效的抑制它们的影响, 为此, 我们采用了 Coiflets 小波系对图 8 中的平均序列进行了消噪处理, 平滑后的曲线如图 9 所示. 另外, 二项式系数滤波(又名杨赤中滤波)也可以达到同样的效果, 且该方法去噪后能保持信号趋势的同时, 并保证相位不发生畸变^[20].

尽管图 8 和图 9 反映出了区域面上 VTEC 涨落的周期特性, 但不能准确的区分出这些周期的大小. 为此, 我们对图 9 中的序列进行了谱分析, 图 10 给出了谱分析的结果, 其中频率带 1 内的 3 个峰值的能谱十

图 9 利用 Coiflets 小波系和二项式系数(杨赤中)滤波后的 VTEC 变化率曲线

图 10 FFT 谱分析功率谱图

分接近,且位于中间峰值的左右;另外,电离层波动的周期具有区域性、时效性,而区域面上 VTEC 涨落是平均后的效果,因此,可以推断 VTEC 涨落主要表现出了两种频率带的周期特性,即 25 分钟左右(频率带 2)、60 分钟左右(频率带 1)的周期,其中 60 分钟左右周期涨落的功率谱最强。

由于电离层波是低层大气重力波、潮汐和行星波等大气流体运动穿透到电离层,受到离子阻尼引起的波动现象^[21],因此,局域面 VTEC 的涨落周期等于电离层波动周期。由此,根据区域面 VTEC 涨落的周期特性,我们可以写出某周期的 VTEC 涨落函数式如下:

$$\text{VTEC} = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \theta_0), \quad (6)$$

$$d(\text{VTEC})/dt = A \cdot 2\pi f \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \theta_0), \quad (7)$$

式中 A, f, θ_0 分别为 VTEC 周期变化的振幅、频率和初始相位。由于图 8 中的曲线实际上是 VTEC 对时间导数的曲线。由(6)和(7)式可知, VTEC 及其变化率曲线具有相同的周期,振幅之间存在线性关系。当 VTEC 变化率曲线某频率对应的振幅为 A_1 , 则 VTEC 涨落对应该频率的振幅为 $A = A_1 \cdot 2\pi / T_1$ 。为了分别得到电离层波在两个不同频率上的振幅,根据图 10 谱分析得到的结果,以及小波多分辨分析的思想,我们采用了 Coiflets 小波系对图 8 中 VTEC 变化率系列进行分解、重构,其结果如图 11 所示。

图 11 中上方的曲线是 20~30 分钟的周期系列,其振幅在 0.1~0.15 TECU/min 左右,下方的曲线是 60 分钟左右的周期系列。其振幅约为 0.1~0.22 TECU/min,由(6)和(7)式可知,这两个周期对应的 VTEC 振幅分别约为 0.4~0.7, 1~2.0 TECU。

事实上,对于中纬度地区的大尺度电离层波动现象,图 3 和图 6 中的 VTEC 曲线基本上反映了该频率域内电离层波动振幅的大小,其振幅约为 2~3 TECU 左右,但该振幅包含了电离层上述两个频率运动的综合影响,以及其他偶然因素的影响。另外,图 6 中 PRN23 号卫星 VTEC 的相对运动的粗略分析表明,该频率波的运动速度应在 90 m/s 以上。依据局域面平均 VTEC 序列的频谱分析结果,大尺度波动的周期约为 1 小时,而图 3 中中纬度地区跟踪的 PRN23 号卫星 VTEC 波形的周期为 150~170 分钟,穿刺点运动的速度约为 70~90 m/s,由公式(5)计算可知,电离层大尺度波动的速度约为 120~150 m/s。

对于小尺度的波动现象,图 5 中的 VTEC 相对变化波形曲线的主周期项为 20 分钟左右,振幅为 0.15 TECU/min,依据频谱分析的结果,该波形对应的电离层波动的周期应为 25 分钟左右。依据公式(6)和(7)可知,这种小尺度波动的振幅在 0.4~0.7 TECU 左右;另外,此时图 5 中中纬度地区跟踪的 PRN23 号卫星穿刺点运动速度约为 70~90 m/s,而 $T = 25 \text{ min}$, $T_1 = 20 \text{ min}$,依据公式(5)的第 2 种情况,该频率的电离层波动速度约为 30~40 m/s。

2 小结

电离层中不同频率的运动特征一直以来是许多研究者比较关心的问题,而 GPS 技术提供了一个全新的途径,相应的研究也有许多。对于中国地区电离层的研究,图 1 表明,国内地面 GPS 跟踪网台站密度较小,且分布不均匀,从而导致穿刺点覆盖不均匀,很难用它来绘制高分辨率的 TEC 扰动图,并以此来精细的分析电离层的扰动特征。但在中低纬度地区、

图 11 区域面上 VTEC 变化率序列的多分辨分析图

尤其是 120°附近的 GPS 站跟踪的 PRN23 号卫星, 其穿刺点的轨迹基本上沿着经线向南运动, 据此并利用几个不同纬度的测站上 PRN23 号卫星的 TEC 波形相位差的变化, 本文分辨出了 2003 年 11 月 3 日太阳耀斑期间电离层波动运动的传播方向——基本上沿经线方向从高纬度向低纬度传播. 另外, 依据卫星穿刺点的运动与电离层波动构成相对运动的关系, 并利用中低纬度地区 GPS 站跟踪的 PRN23 号卫星 VTEC 波形曲线周期的变化, 本文粗略的估计出了此次电离层大尺度波动的运动速度及其变化特征——电离层波动随着纬度的降低, 其速度在变快. 此外, 局域面上 VTEC 的涨落分析和 PRN23 号卫星 VTEC 曲线及 VTEC 变化率曲线表明, 此次耀斑期间电离层波动主要存在着周期为 1 小时和 25 分钟的两种运动, 其振幅分别为 2.0~3.0 和 0.4~0.7 TECU. 这两种频率的运动, 其速度分别为 120~150 和 30~40 m/s 左右. 这些结果是在利用中国区域内现有的 GPS 台站上连续观测的数据分析的初步结果, 随着国内 GPS 跟踪网的不断加密和完善, 利用 GPS 进行电离层活动的更精细特征的研究将成为可能, 并将推动电离层研究进一步走向实际应用, 为空间天气学、卫星导航和现代卫星通讯提供充足的数据和有力的保障.

致谢 非常感谢两位评审专家提出的宝贵建议和意见, 也非常感谢中国科学院上海天文台提供的上海地区 GPS 综合应用网、中国地壳运动 GPS 监测网的 GPS 观测数据. 本工作受中国科学院百人计划(804156)、国家自然科学基金(批准号: 40174009)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJXC2-SW-T1)、上海科技发展基金(JC14012)和广西青年自然科学基金(9912008)资助.

参 考 文 献

- 张东和, 萧佐. 太阳耀斑期间向日面电离层相关扰动现象与分析, 科学通报, 2002, 47(2): 96~98[摘要] [PDF]
- Zhang D H, Igarashi K, Xiao Z, et al. The Observation of Large Scale Travelling Ionospheric Disturbances Based on GPS Network. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(4): 469~475
- Afraimovich Edward L, Kosogorov Eugene A, Leonovich Ludmila A. The use of international GPS network as the global detector (GLOBDET) simultaneously observing sudden ionospheric disturbances. Earth Planes Space, 2000, 52: 1077~1082
- 万卫星, 袁洪, 刘立波, 等. 2000 年 7 月 14 日特大耀斑引起的电离层 TEC 突然增强现象. 中国科学, A 辑, 2001, 31(增刊): 120~125[摘要] [PDF]
- Zhang D H, Xiao Z. The study of ionospheric TEC during the flare on Nov. 22, 1998 by means of 4 GPS receivers over China. Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis, 2000, 36(3): 414~421
- 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[DOI]
- 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[DOI]
- 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[DOI]
- 张东和, 肖佐, 古士芬, 等. 2000 年 4 月 6-8 日磁暴期间电离层 TEC 观测研究. 空间科学学报, 2002, 22(3): 212~219
- Davis K, Hartmann G K. Studying the ionosphere with the Global Positioning System. Radio Science, 1997, 32(4): 1695~1703[DOI]
- Zhang J, Ou J K. On Effect of Solar Flare on Vertical Total Electric Contents in Ionosphere. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(2): 96~100
- 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[DOI]
- 万卫星, 宁百齐, 袁洪, 等. 电离层扰动的 GPS 探测. 空间科学学报, 1998, 18(3): 247~251
- Gross S H, Reber C A, Huang F T. Large-scale Waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite. IEEE Trans on Geoscience Remote Sensing, 1984, GE-22: 340
- Balthazor R L, Moffett R J. A study of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances at equatorial latitudes. Annale Geophysicae, 1997, 15: 1048~1056
- Huang C S, Li J. Ionospheric disturbances produced by atmospheric gravity waves in the equatorial F region. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(6): 722~731
- 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. 95~114
- 朱文耀, 符养, 李彦. GPS 高程导出的全球高程震荡运动与季节变化. 中国科学, D 辑, 2003, 33(5): 470~481[摘要] [PDF]
- Härdle W, Kerkycharian G, Dominique Picard, Alexander Tsybakov, Wavelets, Approximation, and Statistical Applications. Berlin: Springer Press, 1998
- 彭军还. 数字滤波器的频谱窗和噪声压缩度. 测绘学院学报, 2001, 18(4): 246~249
- 熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论. 武汉: 武汉大学出版社, 1999

(2004-11-26 收稿, 2005-02-20 收修改稿)

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/972004-272>