

HE Dejiang, ZHU Zhengping, LAN Jiaping, NING Baiqi, HU Lianhuan. Multi-frequency Doppler fast detection and analysis of meso-micro scale ionospheric disturbances (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(2): 158-167. DOI:10.11728/cjss2017.02.158

# 电离层中小尺度扰动的多频多普勒 快速探测与分析\*

贺德江<sup>1</sup> 朱正平<sup>1</sup> 蓝加平<sup>1</sup> 宁百齐<sup>2</sup> 胡连欢<sup>2</sup>

1(中南民族大学电子信息工程学院 武汉 430074)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

**摘要** 电离层反射回波的高频多普勒频移测量是研究电离层扰动的重要方法之一。利用基于单频信号相位变化率测量的实时探测方法,获取连续高精度多频多普勒频高图,以实现中小尺度电离层扰动的快速探测研究。该方法被应用于敏捷式高性能电离层无线电多频探测系统样机平台。经验证在该平台上获取的多普勒频移分辨率可达 0.039 Hz,频高图探测周期最短小于 1 min。基于这种快速探测方法和平台在武汉观测站进行了较长时间的观测和数据采集,获得高精度多普勒频移并反演出电子浓度等值面法向运动速度,得到电离层反射寻常波的多普勒频高图和垂直扰动速度等信息,进而推演出电离层扰动随时间和空间的实时变化特征。对这些时域信号进行频谱分析,初步结果显示这些扰动主要是由极区活动激发的中国中部地区冬季出现率较高的中尺度 TID。此外,对三种常用的电离层扰动反演分析方法进行了对比研究,结果显示电离层扰动的变化趋势基本一致,说明观测数据和研究方法可靠稳定,为多频多点电离层扰动的传播特性观测研究提供了基础。

**关键词** 电离层中小尺度扰动,快速探测,多频探测系统,多普勒频移,电子浓度等值面法向运动速度

**中图分类号** P 352

## Multi-frequency Doppler Fast Detection and Analysis of Meso-micro Scale Ionospheric Disturbances

HE Dejiang<sup>1</sup> ZHU Zhengping<sup>1</sup> LAN Jiaping<sup>1</sup>

NING Baiqi<sup>2</sup> HU Lianhuan<sup>2</sup>

1(College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074)

2(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract** Measuring the HF Doppler frequency shifts of ionospheric echoes is one of the important ways to study ionospheric disturbances. We use the real-time detection method based on measuring the phase-change rate of single frequency signals, and obtain continuous high-precision multi-frequency Doppler ionograms to achieve fast detection and study of meso-micro scale ionospheric

\* 国家自然科学基金项目资助 (41474135, 41127003, 41134120)

2016-01-14 收到原稿, 2016-04-27 收到修定稿

E-mail: zpzh2007@sina.com

disturbances. This method is applied to the multi-frequency detection system which is jointly developed by the Chinese Academy of Sciences and South-Central University for Nationalities. It is verified that the Doppler resolution obtained from this platform can be up to 0.039 Hz and the minimum ionogram period is less than 1 minute. We collect a long-time raw data of the ionosphere based on this new detection method and platform in Wuhan observatory. Through the way of acquiring high-precision Doppler frequency shifts and the method of inverting the normal velocity of electron concentration isosurface, the Doppler ionograms and vertical disturbed velocity of O waves are obtained. Furthermore, the real-time changes of ionospheric disturbances with time and space are deduced. By the spectrum analysis on these time domain signals, preliminary results show that these disturbances are mainly mesoscale TIDs motivated by the Polar activities which often appear in winter in central China. This paper also compares the three commonly used inversion methods. The results show that the ionospheric disturbances have almost the same change trends. It indicates that the observation data and the research methods are reliable and stable, which provides an important basis for observing and researching the multi-frequency and multi-point propagation characteristics of ionospheric disturbances.

**Key words** Meso-micro scale ionospheric disturbances, Fast detection, Multi-frequency detection system, Doppler shift, Normal velocity of electron concentration isosurface

## 0 引言

利用现代电离层多频无线电探测系统的实时探测数据,反演电离层结构和运动的高度剖面,是研究电离层扰动的重要实验手段。其中,探测电离层反射面运动情况的高频多普勒技术,由于其使用设备相对简单、测量精度较高及可靠性好等优点,在研究各种尺度电离层扰动的领域应用非常广泛。Davies<sup>[1]</sup>首先提出了基于镜反射理论的高频多普勒频移的表达式, Bertel等<sup>[2]</sup>提出了利用多频多普勒频移记录反演电离层运动的公式。Fridman等<sup>[3,4]</sup>采用GPSII(GP-S电离层反演)算法,利用信号延迟、多普勒频移和到达角等数据同化反演了实时动态电离层扰动模型。Chilcote等<sup>[5]</sup>通过测量商业AM无线电广播信号的多普勒频移探测夜间TID,证明AM无线电信号可用于检测和监控夜间TID及其产生的相关影响。Li<sup>[6]</sup>导出了各向同性电离层条件下高频电波多普勒频移与电离层电子浓度等值面法向运动速度 $V$ 之间的联系,指出利用多频系统的多普勒频移精确反演 $V(Z)$ 剖面的可能性。Wan等<sup>[7]</sup>在假定电离层规则扰动的情况下,将文献[6]的结论推广到各向异性,并考虑地磁场影响,给出了利用回波的多普勒频移、回波到达角矢量以及群路径时间变化率反演电离层介质动

力学参量的具体计算方法。Yuan等<sup>[8-10]</sup>提出了一种在DGS-256数字测高仪上获得高精度多普勒频高图的方法,用于反演 $V$ 随时间和高度的二维变化,并采用多通道最大熵谱估计法提取了较高精度电离层扰动波场的中心频率和相速度等参数。Zhu等<sup>[11,12]</sup>在CADI数字测高仪平台上开发并实现了电离层高精度高频多普勒频移参量的时域探测方法。

传统电离层多频探测系统是在某一个频点上持续探测较长的时间 $T$ ,此时多普勒频移的分辨率 $dt = 1/T$ 。如果要得到分辨率优于0.05 Hz的多普勒频移,则探测仪器必须在同一频点上连续探测20 s以上。很多的多频探测系统都是使用这种模式进行单频或多频多普勒探测的。如果应用上述技术进行多普勒探测,假设扫频间隔0.1 MHz,探测频率为0.5~20 MHz(共196个频点),当需要的多普勒频移分辨率为0.05 Hz时,大约需要65 min来完成一张频高图的测量。这从电离层动力学角度来说是完全不可行的,因为频高图如同在某一给定时刻的电离层快照,其必须能够真实且实时地捕捉到电离层短时间内的动态变化,因此采用这种技术的探测系统,在对于周期较短的电离层中小尺度扰动的探测上具有较大局限性。因此,需要提出一种快速敏捷的探测方法来提取多普勒频移。

由中国科学院地质与地球物理研究所与中南民族大学合作研制的敏捷式高性能多频无线电探测系统样机,在不影响多普勒频移探测精度的同时,采用扫频过程中交替发射多频率点探测信号的方法大大缩短了探测周期(最短可小于 1 min),完全满足对电离层中小尺度扰动探测性能的要求.其具有不同于以往无线电探测系统的显著特点是,多普勒频移的分辨率和精度较高,探测速度快,能便携用于流动观测临时布阵探测,抗干扰能力较强,频高图探测效果好,参数可灵活设置并可开展电离层瞬态变化等多种探测模式的探测研究.这些特点都有助于实现新的探测方法和观测技术的应用.利用该软硬件平台在武汉观测站进行了较长时间的试运行和观测,得到大量原始数据文件和常规观测模式下诸如频高图等日常格式的文件.通过对原始数据中回波信号提取、分析以及各种数字信号处理运算,不仅获取回波的虚高和多普勒频移,得到多频多普勒频移随时间的变化特性,估算不同时段电离层扰动周期,而且按照三种不同的计算方法反演出电子浓度等值面的法向运动速度随时间和高度的二维扰动场,并且验证了实验结果与理论研究的一致性,从而为常规电离层观测、中小尺度的扰动探测以及后续的高度和水平运动演变特性分析研究提供一种经济有效的手段.

## 1 数据提取与分析方法

### 1.1 多普勒频移的快速提取

多普勒频移的获取通常有两种方法:一种是采用 FFT 技术得到高频窄带回波信号的多普勒频移;另一种是通过计算时域信号相位随时间的变化率来获取的,与 FFT 方法相比,其速度快,精度高,完全满足电离层中小尺度扰动(扰动周期短)的实时捕捉和获取,但其需要回波信号具有单频特性,而该方法所用硬件平台对回波信号进行了 O 波与 X 波的软件区分,使回波信号具有单频性质.本实验所采集的数据中每个探测频点的发射脉冲个数  $N$  为 64,采样频率为 10 Hz,则多普勒频移的分辨率为  $10/64 = 0.156$  Hz;如果将脉冲个数  $N$  改为 256,则多普勒频移的分辨率可达 0.039 Hz,但探测周期相对较长,由于探测和分析电离层的扰动尺度需要以短时间内精细的多普勒频移变化为基础,所以在计算时应选用获取高精度多普勒频移的方法.图 1(a) (b) 是分别采

用以上两种方法获得的多普勒频移,从图中可看出,图 1(b) 的计算结果比图 1(a) 精度更高,取值更连续.因此,本实验采取计算单频回波时域信号相位随时间变化率的方法计算多普勒频移.在软件分离出 O 波与 X 波以后,利用 O 波或者 X 波的表达式计算出回波信号的相位系列  $\Phi_n, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ,采用最小二乘线性回归的方法,可以计算得到多普勒频移<sup>[12]</sup>

$$\Delta\omega = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (t_i - \bar{t}) [\Phi(t_i) - \bar{\Phi}]}{\sum_{i=1}^{N-1} (t_i - \bar{t})^2}, \quad (1)$$

### 1.2 电子浓度等值面法向运动速度的反演

应用等效镜反射理论,可以得到电子浓度等值面法向运动速度  $V$  值的近似表达式<sup>[6,13]</sup>:

$$V = -\frac{c}{2\omega} \Delta\omega. \quad (2)$$

在考虑地磁场影响的基础上,可进一步推导出精度较高的反演  $V$  的方法,即以分段线性函数来逼近  $V$  随等离子体频率  $\omega_N$  的分布,得到用于多普勒频高图分析的反演公式为<sup>[7,14]</sup>

$$V(\omega_i) = -\sum_{j=0}^i M_{ij}^{-1} \Delta\omega(\omega_j) (c/2\omega_j), \quad (3)$$

式中,  $M_{ij}$  为台站系数,  $M_{ij}^{-1}$  为  $M$  逆矩阵的元素,  $\omega_j$  为探测频率.

在忽略地磁场影响的条件下,简化对电波多普勒

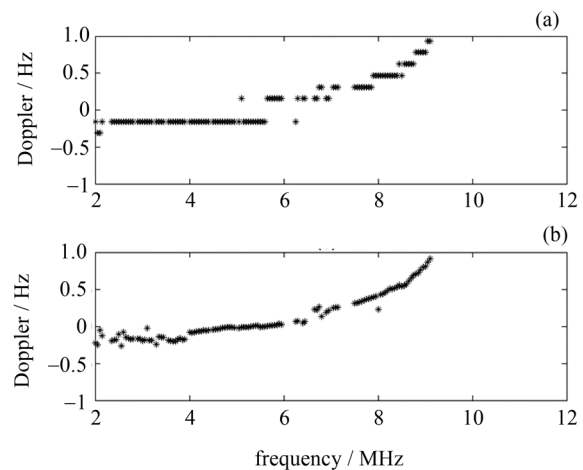


图 1 应用 FFT 方法 (a) 和  $d\Phi/dt$  方法 (b) 计算多普勒频移的结果对比

Fig. 1 Contrast of Doppler shift between the results by FFT method (a) and  $d\Phi/dt$  method (b)

频移表达式:

$$\Delta\omega = \int_{\Gamma} V \cdot dk$$

的计算, 可以得到计算多普勒频移的简化公式为<sup>[15]</sup>

$$\Delta f_i = -\frac{2f_i}{c} \sum_{j=1}^i \frac{1}{2}(V_j - V_{j-1}) \cdot (\mu_{i,j} - \mu_{i,j-1}) + \frac{2f_i}{c} V_0, \quad (4)$$

式中  $\mu_{i,j}$  表示电波折射指数.

在新的多频无线电探测平台上使用这三种方法获取了同一数据反演的电子浓度等值面法向运动速度, 比较结果表明了三种方法结论的一致性. 具体结果将在第 2 节进行讨论.

## 2 实验结果与讨论

利用安装在武汉观测站的多频无线电探测平台, 对武汉地区上空电离层进行了较长时间的观测, 得到大量原始数据并对这些数据进行处理和分析, 获取一些有意义的实验观测结果. 下面以对 2015 年 12 月 1 日和 2 日数据的分析结果为例进行讨论.

图 2 给出的是 2015 年 12 月 1 日 11:58 LT 采集于武汉观测站的多普勒频高图, 其中图 2(b) (c) 分别反映 O 波的一次回波与二次回波的多普勒频移随虚高和频率的变化. 从图 2(c) 中可以看出, 当探测频率小于 8 MHz 时, 随着频率的增加多普勒频移逐渐增大, 当探测频率大于 8 MHz 时, 随着频率的增加多普勒频移逐渐减小, 并且二次回波的多普勒频移约为一次回波多普勒频移的 2 倍. 从总体上看, 该时刻的多普勒频移与探测频率成正比, 但是在接近临界频率

时, 多普勒频移与探测频率成反比, 说明该时刻整体上对回波多普勒频移起主导作用的是微分效应, 这种现象主要是由回波反射高度变化引起的, 与电离层运动有关; 当探测频率接近临界频率时, 积分效应变得明显, 主要是因为该频段多普勒频移此时主要受反射高度以下非偏移区内电子浓度变化的影响<sup>[16]</sup>.

图 3 给出的是 2015 年 12 月 1 日 13:58 LT—16:33 LT 和 16:44 LT—20:09 LT 以及 12 月 2 日 07:58 LT—10:33 LT 和 10:38 LT—13:13 LT 的多频多普勒频移, 分别用图 3(a)~(d) 表示. 图中横坐标为本地时间, 纵坐标为探测频率, 灰度值表示多普勒频移大小. 从图 3 可以直观发现, 这 4 个时间段各频点的多普勒频移变化幅度连续, 扰动特征明显, 所以从选取的各个时间段内可以大致估算每个时间段的波扰动周期. 图 4 是对应于图 3 同时段的多频多普勒频移随时间的变化曲线, 可以较准确地估算每个时段波扰动的尺度范围, 图中 0.1 MHz 的频率间隔对应多普勒频移 0.5 Hz. 从图 4 可以看出, 这 4 个时间段的多普勒频移随时间的变化曲线都呈现出明显的波动性, 并且在不同探测频率即不同反射高度下, 其起伏特征均十分相似. 图 4(b) 是包含日落时段的多频多普勒频移变化曲线, 与其他时间段相比, 该时间段多普勒频移变化幅度很大, 周期较长, 是因为日落导致电离层电子浓度急剧下降, 使得多普勒频移发生了明显变化.

为较准确地估算这 4 个时间段的扰动周期, 对图 4 的扰动曲线分别进行小波分析和相关周期图<sup>[17]</sup>分析, 结果如图 5 和图 6 所示. 与傅里叶频谱分析方法相比, 小波分析能得到时域信号频谱随时间的演变过程, 对电离层扰动这种非平稳过程的研究十分有效, 而相关周期图的分析方法则能得到扰动周期的

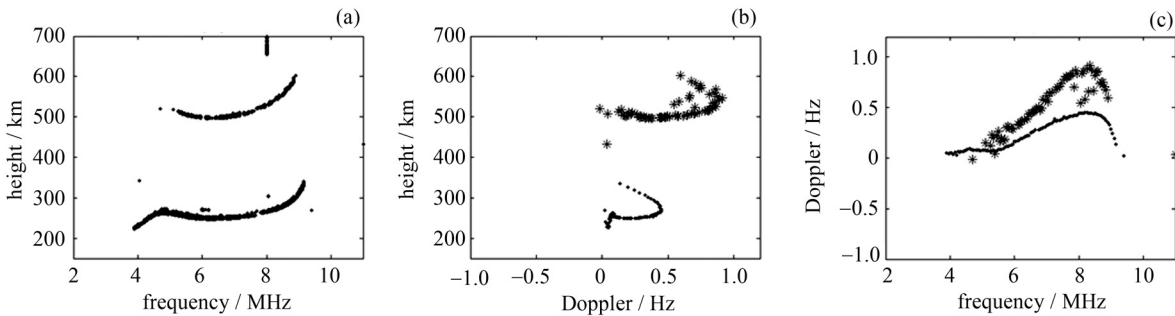


图 2 2015 年 12 月 1 日 11:58 LT 武汉观测站的多普勒频高图. 频率步长 0.05 MHz, 高度步长 0.625 km  
 Fig. 2 Doppler ionogram of Wuhan at 11:58 LT on 1 December 2015. The frequency step is 0.05 MHz, and the height step is 0.625 km

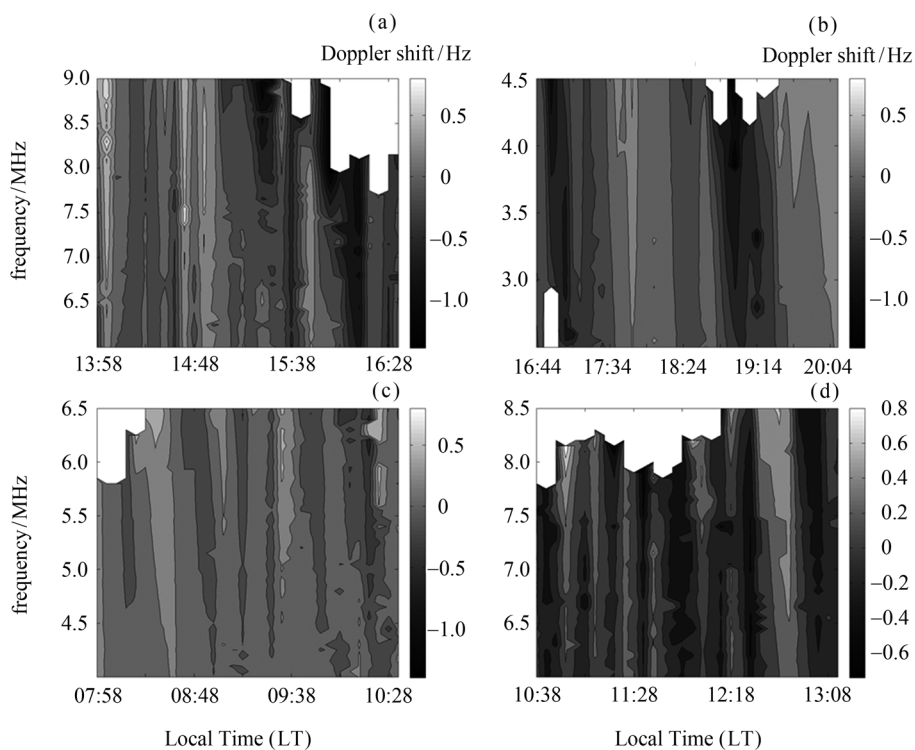


图3 2015年12月1日至2日武汉观测站24小时内的多频多普勒频移

Fig. 3 Contours of multiple-frequency Doppler shift from 1 December 2015 to 2 December 2015 within 24 hours in Wuhan

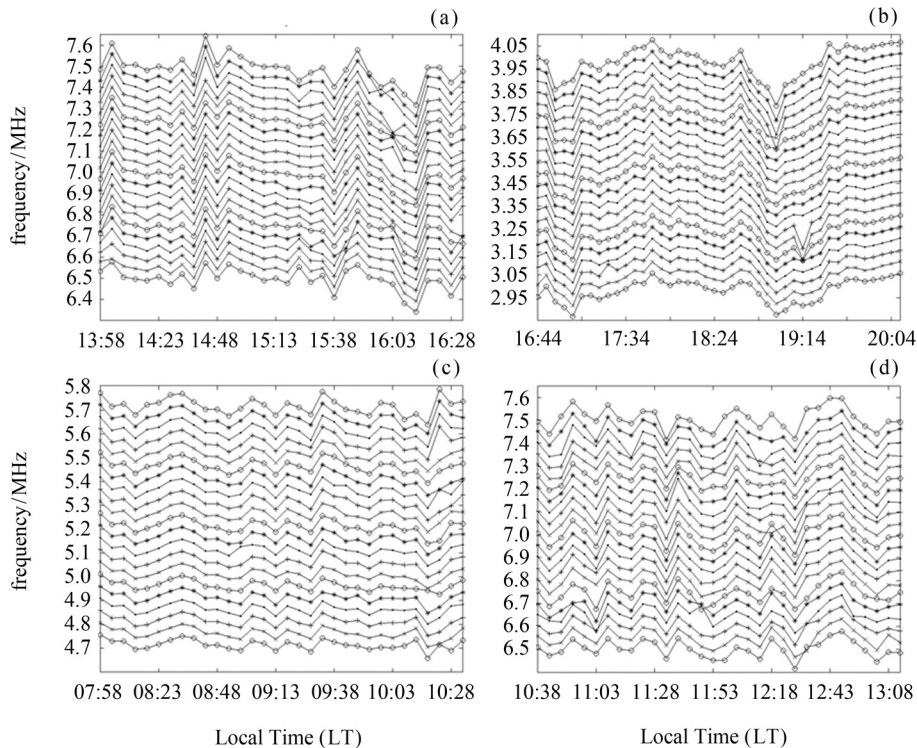


图4 2015年12月1日至2日武汉观测站24小时内的多频多普勒频移变化

Fig. 4 Variations of multiple-frequency Doppler shift from 1 December 2015 to 2 December 2015 within 24 hours in Wuhan

精细结构, 是对小波分析的有益补充. 从总体上看, 图 5(a) (c) (d) 的扰动准周期相差不大, 在 30~50 min 范围内, 图 5(b) 的扰动准周期较长, 在 80 min 以上.

从图 6(a)~(d) 可以分别估算出相应的扰动准周期约为 50, 100, 30 和 37 min, 可见这两种分析方法的结果基本是一致的, 说明对各时间段扰动周期的估算是

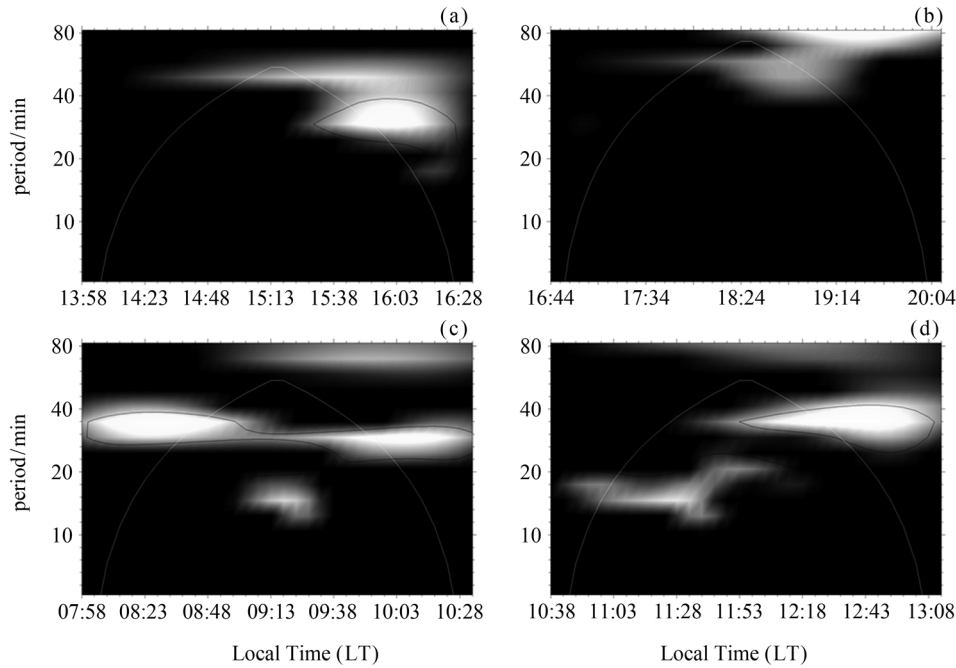


图 5 2015 年 12 月 1 日至 2 日武汉观测站 24 小时内多普勒频移扰动周期的小波分析  
Fig.5 Wavelet analyses of Doppler shift disturbance period from 1 December 2015 to 2 December 2015 within 24 hours in Wuhan

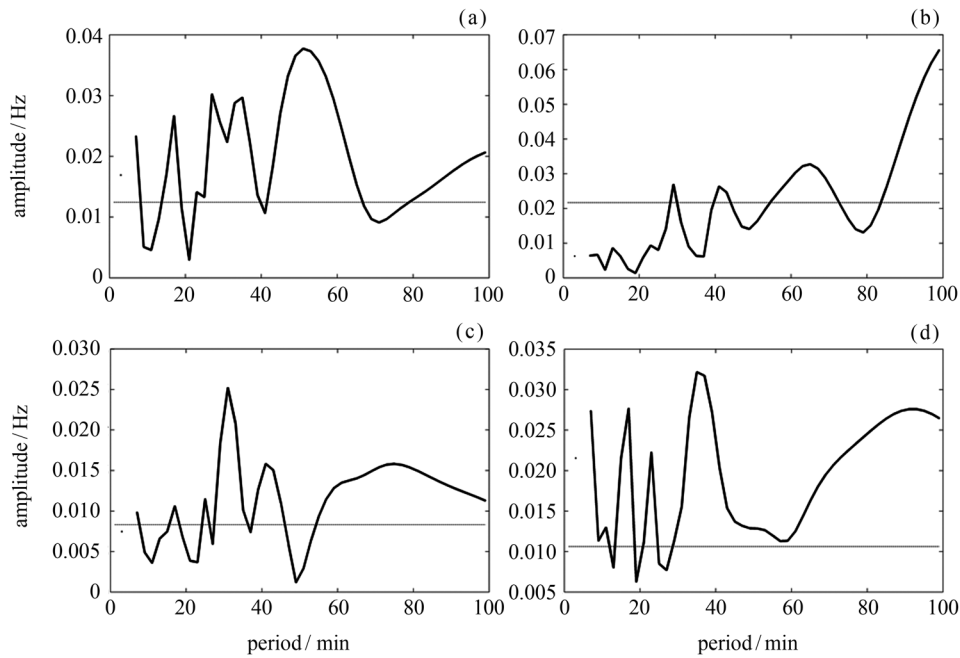


图 6 2015 年 12 月 1 日至 2 日武汉观测站 4 个时段多普勒频移扰动周期的相关周期图分析  
Fig.6 Correloperiodogram analyses of Doppler shift disturbance period from 1 December 2015 to 2 December 2015 within four time segments in Wuhan

准确的. 因此, 可以近似用中尺度 TID 来解释 12 月 1 日 13:58 LT–16:33 LT、12 月 2 日 07:58 LT–10:33 LT 和 10:38 LT–13:13 LT 的扰动现象, 用大尺度 TID 来解释 12 月 1 日 16:44 LT–20:09 LT 的扰动现象. 根据文献 [18] 对武汉地区电离层扰动时空尺度的统计分析, 实验中观测到的中尺度 TID 符合冬季常见的南向优势方向 (由极区向赤道) 声重波扰动的的时间尺度范围和季节特征, 所以该扰动的激励源很可能与极区电急流或极区等离子体对流运动有关. 12 月 1 日 16:44 LT–20:09 LT 观测到的大尺度 TID 可能与日落时刻太阳 EUV 辐射通量变化过程的快慢以及电离层中离子损失过程的快慢有关<sup>[19]</sup>. 另外, 从图 5(c) (d) 还可以明显看出, 该中尺度 TID 上叠加有小范围短周期 (约 15 min) 的扰动, 这种现象很可能与武汉地区附近上空大气急流不稳定有关<sup>[18,20,21]</sup>.

图 7 是按照等效镜反射理论反演的整 24 h 的电子浓度等值面法向运动速度  $V$  的波动曲线. 每条曲线代表一个相应探测频点的速度随时间的变化, 曲线向下波动表示大气重力波在电离层中能量是向上传播的<sup>[22]</sup>. 将多频无线电探测系统测得的  $F_2$  层最低频率至临界频率之间各个频点的波动曲线进行叠加, 从纵向对比中可以清楚发现同一频高图上各频点垂直扰动速度变化趋势的一致性. 图 4 的分析结果表明, 12 月 1 日 14:00 LT–16:30 LT 和 12 月 2

日 08:00 LT–12:00 LT 的扰动是中尺度 TID, 观察图 7 同时间段  $V$  的扰动形态, 可以发现中尺度 TID 随高度演变的典型特征<sup>[14]</sup>: 在低电离层高度上, 与重力波有关的  $V$  的扰动幅度较弱, 而且扰动周期性不太明显, 说明扰动是由多种成分的弱扰动叠加而成的. 随着高度增加,  $V$  的扰动幅度逐渐增强, 波形变得更加光滑和规则, 这说明真实大气的作用和电离层对重力波的响应在物理场  $V$  中的表现是随着高度增加对  $V$  进行了滤波和放大的. 从对图 4(b) 的分析得知, 12 月 1 日 16:45 LT–20:00 LT 的扰动是大尺度 TID, 观察图 7 同时间段  $V$  的扰动形态可以发现,  $V$  的扰动幅度随高度的增加变化并不明显, 在某些时刻甚至有减小的趋势, 说明该大尺度扰动的源观测点较远并具有导制波的特征, 并且扰动的波形较为规则, 没有随高度的增加而发生形变, 这时大气层和电离层的滤波作用已很不明显.

为验证观测数据与研究方法的可靠性与稳定性, 分别采用式 (2)~(4) 的方法对 5 h 内电子浓度等值面法向运动速度  $V$  进行了反演. 图 8 是根据式 (2) 假定电离层是等效镜反射时的反演结果, 图 9 是根据式 (4) 忽略地磁场影响时的反演结果, 图 10 是根据式 (3) 考虑地磁场存在时的反演结果. 通过对比可以明显看出, 利用这三种方法反演的  $V$  的变化趋势大致相同, 并且垂直扰动速度幅度均在  $\pm 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以

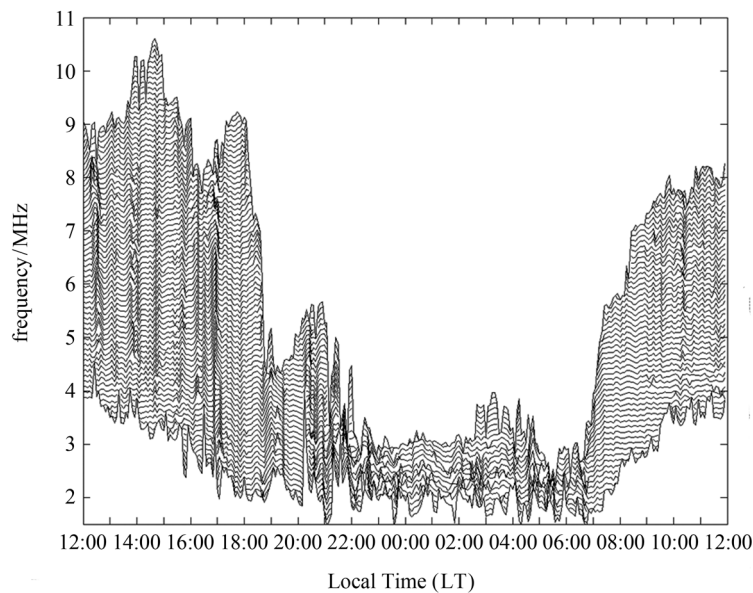


图 7 2015 年 12 月 1 日 12:00 LT 至 2 日 12:00 LT 武汉观测站 24 h 电子浓度等值面法向运动速度随时间的变化

Fig. 7 Variations of Doppler velocity with time in Wuhan from 12:00 LT on 1 December 2015 to 12:00 LT on 2 December 2015

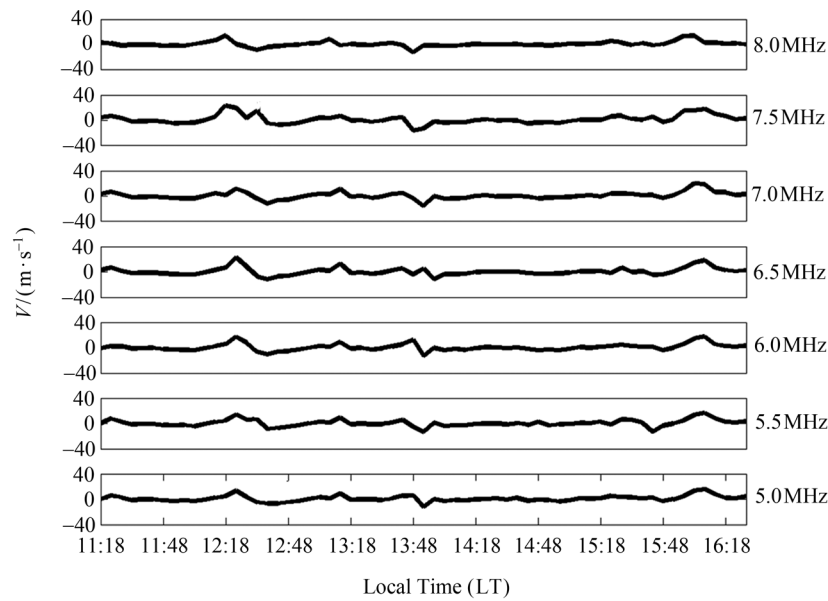


图 8 根据式 (2) 反演的电子浓度等值面法向运动速度随时间和频率的变化  
 Fig. 8 Variations of the normal velocity of electron concentration isosurface with time and frequency according to Eq. (2)

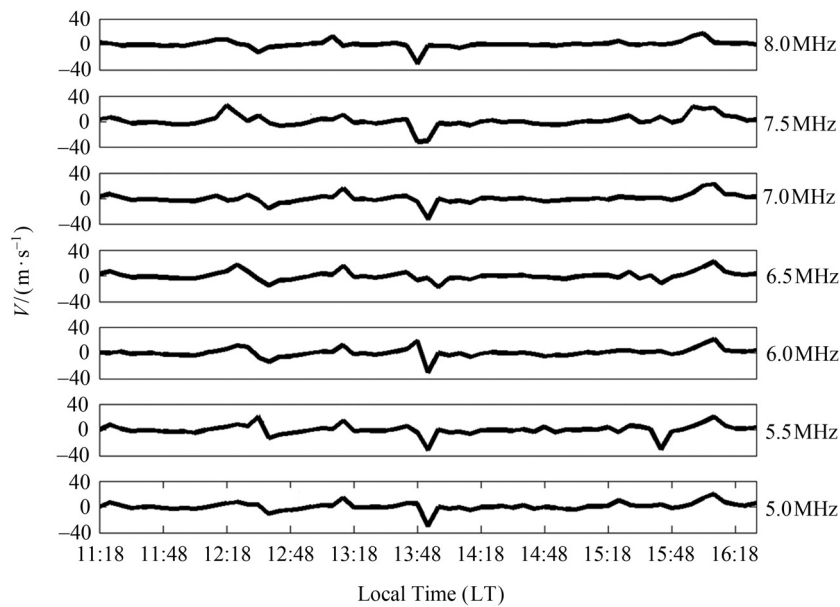


图 9 根据式 (4) 反演的电子浓度等值面法向运动速度随时间和频率的变化  
 Fig. 9 Variations of the normal velocity of electron concentration isosurface with time and frequency according to Eq. (4)

内. 从这三幅图中都可以看出, 扰动的等相面都有或多或少的倾斜, 这是因为无线电波在电离层中传播时电波的射线方向与波矢方向没有重合, 导致电波反射点不是位于电离层入口处的正方向, 而是向一边发生偏斜. 当考虑了地磁场的影响时, 相比于另外两种反

演方法, 利用式 (3) 反演的波动曲线细节变化更加精细, 等相面的倾斜也更加明显, 因此在反演精度上这种方法是要优于另两种方法的. 但总体上来说, 当假定电离层是等效镜反射即按照式 (2) 反演时, 虽然计算结果不可避免地存在一些误差, 但是这些误差通常



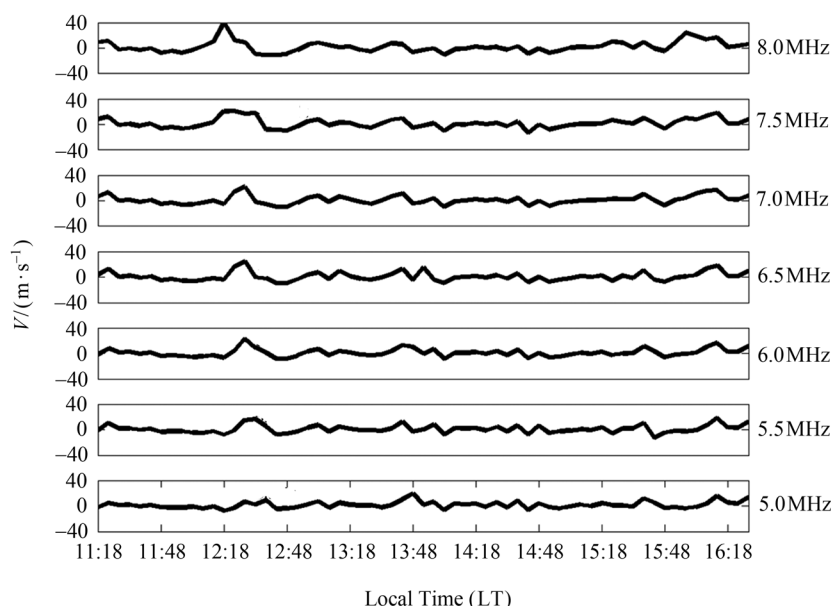


图 10 根据公式 (3) 反演的电子浓度等值面法向运动速度随时间和频率的变化

Fig. 10 Variations of the normal velocity of electron concentration isosurface with time and frequency according to Eq. (3)

对于计算电离层扰动的一些参数影响不大. 因此, 按照反演公式 (2), 利用单个频点的多普勒频移计算的电子浓度等值面法向运动速度  $V$ , 其精度已基本满足用于电离层扰动参数的计算, 所以在已获取多个频点的多普勒频移时, 为简化运算, 也可应用式 (2) 来进行反演<sup>[15]</sup>. 在分析处理电离层垂测数据时, 可以根据实际需要选取合适的反演方法进行计算.

### 3 结语

应用中国科学院地质与地球物理研究所与中南民族大学合作研制的敏捷式高性能电离层无线电多频探测系统开展对电离层中小尺度扰动的快速探测与分析, 从实验中可以发现该系统具有以下优点: 设计的软硬件控制系统有效实现了工作参数捷变、探测提速等功能; 抗干扰能力强, 频高图信噪比高, 并可开展电离层瞬态变化等多种探测模式的观测研究; 从该平台上获取的多普勒频移、分辨率和精度均较高, 反演电子浓度等值面法向运动速度  $V$  的可靠性高, 可作为探测中小尺度电离层扰动的有利工具. 利用从该平台上采集的原始数据, 在简单介绍获取高精度多普勒频移和反演电离层电子浓度等值面法向运

动速度  $V$  的三种方法的基础上, 获取了多普勒频高图, 分析多频多普勒频移的变化, 并采用小波分析和相关周期图分析方法估算不同时段扰动周期, 反演了  $V$  随时间和空间的二维变化, 并对反演  $V$  的三种方法进行对比.

实验结果表明: 从新的多频无线电探测平台上获取的多普勒频移等信息能很好地反映电离层中小尺度扰动特征, 且本次实验观测到的扰动主要是中国中部地区冬季出现率高的中尺度 TID; (2) 所采用三种反演方法的结果基本一致, 说明观测数据与研究方法是稳定可靠的; 当采用式 (3) 即考虑地磁场的影响时精度最高, 但在对反演精度要求不高的情况下, 可以采用近似反演公式的计算结果来大致分析电离层的扰动特征. 因此, 利用该平台以及相应的计算方法, 可以初步判断电离层中小尺度扰动的源、垂直扰动速度、垂直扰动波长和扰动周期等, 这些都是研究电离层中小尺度扰动极为有用的参数, 对于研究大尺度电离层扰动的高度演变和水平传播等都具有十分重要的作用. 在下一步工作中, 将着重开展在保证探测频高图质量条件下的天线小型化和无线电软件化技术的应用, 以实现敏捷数字电离层探测系统电离层扰动传播特性研究的多点观测和流动观测.

## 参考文献

- [1] DAVIES K. Ionospheric Radio [M]. London: Peter Peregrinus Ltd., 1989
- [2] BERTEL L, GUYADER P. Multiple frequency Doppler sounding of the ionosphere theory and experimental comparison with incoherent scatter results [J]. *Radio Sci.*, 1984, **19**(1): 879-890
- [3] FRIDMAN S V, NICKISCH L J, AIELLO M, HAUSMAN M. Real time reconstruction of the three-dimensional ionosphere using data from a network of GPS receivers [J]. *Radio Sci.*, 2006, **41**(5): RS5S12. DOI:10.1029/2005RS003341
- [4] FRIDMAN S V, NICKISCH L J, HAUSMAN M. Inversion of backscatter ionograms and TEC data for over-the-horizon radar [J]. *Radio Sci.*, 2012, **47**(2): RS0L10. DOI:10.1029/2011RS004932
- [5] CHILCOTE M, LABELLE J, LIND F D, *et al.* Detection of traveling ionospheric disturbances by medium-frequency Doppler sounding using AM radio transmissions [J]. *Radio Sci.*, 2015, **50**(3): 249-263
- [6] LI Jun. Doppler frequency shifts of a HF radio wave caused by the ionospheric acoustic-gravity waves [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1983, **26**(1): 1-8 (李钧. 电离层声重波引起的高频多普勒频移 [J]. *地球物理学报*, 1983, **26**(1): 1-8)
- [7] WAN Weixing, LI Jun. Spectral behaviour of TIDs detected from rapid sequence ionograms [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, **55**(1): 47-55
- [8] YUAN Zhiguang, NING Baiqi, WAN Weixing. Acquisition and analysis of Doppler ionogram with high precision [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(3): 234-239 (袁志刚, 宁百齐, 万卫星. 高精度多普勒频高图的获取和分析 [J]. *空间科学学报*, 2002, **22**(3): 234-239)
- [9] YUAN Zhigang, NING Baiqi, WAN Weixing, YUAN Hong. Acquisition and analysis of Doppler ionograms with high accuracy in the ionogram mode from Digisonde 256 [J]. *Radio Sci.*, 2004, **39**(2): RS2021. DOI:10.1029/2002RS002779
- [10] YUAN Zhigang, NING Baiqi, LIU Libo, WAN Weixing, ZHAO Biqiang. A new method for determining the meridional wind velocity during an ionospheric storm [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(6): 1290. DOI:10.1029/2002-GL016469
- [11] ZHU Zhengping, NING Baiqi. Time domain method for HF Doppler frequency shift with high precision in ionospheric vertical sounding [J]. *J. South-Central Univ. Natl.: Nat. Sci. Ed.*, 2007, **26**(3): 40-42 (朱正平, 宁百齐. 电离层高精度高频多普勒频移参量的时域探测方法 [J]. *中南民族大学学报: 自然科学版*, 2007, **26**(3): 40-42)
- [12] CHEN Kun, ZHU Zhengping, NING Baiqi, *et al.* Developing a new mode for observation of ionospheric disturbances by digital ionosonde in ionospheric vertical sounding [J]. *Radio Sci.*, 2012, **47**(3): RS3009. DOI:10.1029/2011RS004968
- [13] WAN Weixing, LI Jun. Inverting ionospheric movement and structural height profile by the reflected echoes of HF radio waves [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1987, **7**(2): 85-93 (万卫星, 李钧. 由高频无线电波反射回波参数反演电离层运动和结构的高度剖面 [J]. *空间科学学报*, 1987, **7**(2): 85-93)
- [14] WAN Weixing, LI Jun. HF radio diagnostics of the ionospheric AGW disturbance [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1989, **32**(6): 609-620 (万卫星, 李钧. 电离层声重波扰动的高频无线电诊断 [J]. *地球物理学报*, 1989, **32**(6): 609-620)
- [15] ZHANG Zhaoming, ZHU Gangkun. Using high resolution Dopplionogram observe and analyze ionospheric disturbances [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1988, **31**(2): 121-127 (张兆明, 朱岗. 利用高分辨率多普勒频高图观测和分析电离层扰 [J]. *地球物理学报*, 1988, **31**(2): 121-127)
- [16] LONG Xianling, HOU Jiechang. On the frequency variation of radio waves reflected from the ionosphere [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1979, **22**(4): 387-395 (龙咸灵, 侯杰昌. 关于电离层反射电波频率变化的问题 [J]. *地球物理学报*, 1979, **22**(4): 387-395)
- [17] APOSTOLOV E M, ALTADILL D, ALBERCA L F. Characteristics of quasi-2-day oscillations in the  $f_0F_2$  at northern middle latitudes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A7): 12163-12171
- [18] WAN Weixing, YUAN Hong, NING Baiqi, LI Jun. Time and space scale statistic analysis of ionospheric disturbances in central China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1995, **15**(4): 301-306 (万卫星, 袁洪, 宁百齐, 李钧. 我国中部地区电离层扰动时空尺度的统计分析 [J]. *空间科学学报*, 1995, **15**(4): 301-306)
- [19] GALUSHKO V G, PAZNUKHOV V V. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator [J]. *Ann. Geophys.*, 1998, **16**(7): 821-827
- [20] TITHERIDGE J E. Periodic disturbances in the ionosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**(1): 243-252
- [21] GOE G B. Jet stream activity detected as wavelike disturbances at mid-latitude ionospheric F region height [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1971, **92**(1): 190-206
- [22] KENNETH J W L. Ionospheric observations made by a time-interleaved Doppler ionosonde [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **42**(7): 1218-1230