

高精度多普勒频高图的获取和分析*

袁志刚 宁百齐 万卫星

(中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

摘 要

电离层高频反射回波的多普勒频移是研究电离层扰动的一个重要参数。在数字测高仪探测中, 高分辨率的多普勒频移一般在漂移测量中获得, 但这种测量方式探测的频点少, 不能获得扰动的高度剖面; 而在频高图模式下, 虽然工作的频点多, 能够获得电子浓度的高度剖面的信息, 但探测的多普勒频移的分辨率低, 无法用来精确检测电离层扰动。实际的电离层高频回波一般为窄带信号, 由此本文中提出了一种新的分析方法, 利用 DGS-256 数字测高仪频高图模式下记录的 16 个多普勒通道的数据, 通过反傅里叶变换还原成时域信号, 采用最小二乘法估计相邻时间点的相位差, 获得高精度多普勒频高图。作为实例, 利用该方法分析武汉电离层现象台数字测高仪观测站的观测数据, 得到了多频点的多普勒频移曲线。结果表明: 在 DGS-256 数字测高仪频高图模式下能够得到高精度多普勒频高图, 这在电离层扰动探测和研究中很有意义。

关键词 数字测高仪—频高图—多普勒频移

1 引言

电离层高频反射回波的多普勒频移是研究电离层运动的一个重要参数。国内外很多学者很早就利用高频反射回波的多普勒频移来研究电离层的运动和变化, 并取得了一系列成果^{[1]~[3]}。例如, 在国外 Davies 首先提出了基于镜反射理论的高频多普勒频移的表达式^[4], Bertel 等提出过利用多频多普勒频移记录反演电离层运动的公式^[5]。在国内, 李钧首先导出了各向同性条件下高频电波多普勒频移与电子浓度等值面的法线运动速度 V 之间的联系^[6], 万卫星等推导出各向异性条件下, 由多频多普勒频移的观测值反演电离层运动速度剖面的反演公式^[7]等。

电离层数字测高仪是当前电离层地面探测的一种常规手段。它利用电离层对高频无线电波的反射, 探测 F_2 层峰高以下的电离层结构和状态。DGS-256 数字测高仪是美国麻州 Lowell 大学在 20 世纪 80 年代研制的新型测高仪^{[8],[9]}, 其探测精度及自动化方面都大大优于传统的模拟自动测高仪, 不仅可以测量回波的虚高, 而且可以得到回波信号的幅度、多普勒频移、到达角和极化等参量。20 世纪 90 年代后期, 我们对武汉电离层现象台的 DGS-256 进行升级和改造^[10], 不仅增强了频高图自动分析度量能力, 而且实现了数据网上传输、发布和系统的远程控制等新功能, 达到了当前国际同类设备的先进水平。DGS-256 数字测高仪一般有三种工作模式: 频高图模式, 定频测量模式和漂移测量模式。高分辨率的多普勒频移一般在漂移测量中获得, 它是通过对几个工作频率积分较长的时

* 国家自然科学基金资助项目 (40134020), 国家重点基础研究项目 (G2000078407)

2001-11-30 收到原稿, 2002-05-09 收到修定稿

间得到较高的多普勒分辨率^[11]. 具体地说, DGS-256 数字测高仪的漂移模探测仪在 1—2 个频点上进行, 并且只能得到 1—2 个相应高度上的电离层扰动信息. 在通常的频高图模式下, 仪器的工作频点多, 能够获得电子浓度的高度剖面的信息, 但由于每个频点的积分时间较短, 多普勒频移的分辨率很低, 无法用于电离层扰动的精确分析. 鉴于上述情况和电离层扰动研究的需要, 本文提出一种新的分析方法, 即在 DGS-256 数字测高仪常规的频高图模式下, 利用频高图模式下记录的 16 个多普勒通道的数据, 可获得高精度多普勒频高图, 用以观测研究电离层扰动随时间和高度的变化特征.

2 分析方法

为了说明我们的高精度多普勒频移的提取方法, 先简要介绍 DGS-256 数字测高仪在频高图工作模式下的数据采集、处理及记录过程. DGS-256 数字测高仪发射高频调制脉冲波后, 采用复值采样技术采集回波信号, 即在每一个高度窗口上采集一对复数点^[5]. 对应于同一探测频率重复发射 N (N 是可变的, 由程序事先设定) 个脉冲进行探测, 然后在对应于每个脉冲的被测高度范围内, 分成 128 或 256 个步进的高度窗口, 对应的高度间隔为 5 km 或 2.5 km, 取遍所有 N 个脉冲属于同一高度窗口的复采样值, 就得到了 N 个属于该高度的复值采样点的系列, 其中采样点的时间间隔为脉冲重复周期 T . 再将得到的复值采样数据做离散傅里叶变换 (DFT), 就得到了以载波频率为中心的多普勒谱线. 在数据记录中, 由于仪器设计时存储器的限制, DGS-256 数字测高仪只记录零频附近的 16 条多普勒谱线, 即通常所说的 16 个通道. 由于信号的积分时间较短, 频域内多普勒频移的分辨率很低. 在常用的垂直探测中, 寻常波 (O 波) 和非常波 (X 波) 要各占 8 个通道, 因此只记录 8 条 O 波的多普勒谱线, 下面我们讨论利用有限的多普勒谱线得到高精度多普勒频移的方法.

2.1 将频域信号还原成时域信号

在 DGS-256 测高仪的数据采集中, 对回波中频窄带信号进行正交采集得到一对复数点, 且一对复点的采样间隔为载波周期的 $3/4$. 设中频信号的复振幅为 $Z(t)$, 中频信号为 $s(t)$, 则

$$s(t) = z(t)e^{-i2\pi f_0 t}, \quad (1)$$

其中, f_0 表示中频载波的频率. 那么 $t = t_n$ 时刻的一次复值采样为 $s(t_n - 0.75/f_0)$ 和 $s(t_n)$, 由于信号的窄带性, 即在量级为载波周期的时间范围内观测波形时, 它可近似看成以 f_0 为频率的正弦波, 由 (1) 式可得到: $x(t_n) = s(t_n - 0.75/f_0)$. 令

$$y(t_n) = s(t_n). \quad (2)$$

由 (1)、(2) 式可得

$$z(t_n) = z_n = (-x(t_n) + iy(t_n))e^{-i2\pi f_0 t_n}. \quad (3)$$

其中, $t_n = nT$, T 为脉冲重复周期. 在 DGS-256 数字测高仪中, 中频载波的频率为 225 kHz, 而脉冲重复率一般为 50、100 或 200 Hz, 故由 (3) 式可得:

$$z(t_n) = z_n = -x(t_n) + iy(t_n). \quad (4)$$

将对应于同一探测频率的同一个高度窗口的 N (N 为积分的脉冲数) 对复值采集的数据点作 DFT 计算, 得到复值频域系列 $D(m)$, 则:

$$D(m) = \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{-i\omega_m t_n}. \quad (5)$$

其中, $\omega_m = m\omega_0$ ($m = \pm 1/2, \pm 3/2, \dots$), $\omega_0 = \frac{2\pi}{NT}$.

设探测频率为 f_c , 首先将 f_c 的 O 波 (X 波的处理方法类似) 的 8 个多普勒通道的数据取出, 每一个通道内应有 N_1 ($N_1 = 128$) 个高度窗口的多普勒谱线. 在 N_1 个高度窗口内找到谱线幅度最大的窗口作为接收主要反射回波的窗口. 设该窗口上的复值谱线为 $D(m)$, 对 $D(m)$ 进行 IDFT 计算还原时域系列 $Z'(n)$, 由 (5) 式可得:

$$z'(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=-7/2}^{m=7/2} D(m) e^{imn\omega_0}, \quad (n = \pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2, \pm 7/2). \quad (6)$$

这样就将频域系列 $D(m)$ 计算还原时域系列 $Z'(n)$.

2.2 多普勒频移的提取

数字测高仪发射的高频窄带调制信号在电离层实际传播过程中, 可能存在多个反射点和多径的问题, 但可以在接收时用时间窗口采样的方式来区分, 同时利用偏振天线区分 O 波和 X 波, 因此可以用准单色波理论来处理一定高度窗口和一定波模的回波 [9]. 当接收信号为单频窄带回波的情况下, 回波相位 $\phi(t, r)$ 是接收时间 t 和接收天线位置 r 的函数, 一级泰勒级数展开得到:

$$\phi(t_i, r_i) = \phi_0 + \omega t_i - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}. \quad (7)$$

其中, ϕ_0 表示初相位,

$$\omega = \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad \mathbf{k} = -\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}}. \quad (8)$$

在一次频高图测量过程中, 对应于探测频率 ω_0 而言, 回波的中心波矢 $\mathbf{k}$ 可认为是一定值, 那么可通过回归的方法, 利用某一天线的接收信号的时间采集系列, 估计出回波的中心频率 ω , 其中 (8) 式中的微分用差分计算来代替, 这样就可计算出多普勒频移 $\Delta\omega$.

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0, \quad (9)$$

由 (6) 式计算的复值系列可得到相位系列 $\phi(n)$:

$$\phi(n) = \arctan \left\{ \frac{\text{Re}[Z'(n)]}{\text{Im}[Z'(n)]} \right\} \quad (10)$$

其中, $\text{Re}[Z'(n)]$ 、 $\text{Im}[Z'(n)]$ 分别表示 $Z'(n)$ 的实部和虚部.

由 (8), (9), (10) 式, 利用最小二乘法线性回归的方法, 可估计出多普勒频移 $\Delta\omega$.

2.3 多普勒频高图的处理

对每个探测频率的信号经过前两步处理后, 就可得到多普勒频高图. 在实际探测中, 频高图中的某一频率或频段中经常受到各种外界的干扰, 引起测量误差, 因此剔除频移曲线上的奇异点及光滑处理是必要的 [12]. 在实际处理时, 根据探测的虚高, 可将 E 层和 F 层的多普勒曲线分别处理, 处理 E 层时取 E 层起始频率到临界频率的曲线, F 层亦采用同样的取法, 经处理后可得到高精度多普勒频高图.

3 实例分析和讨论

我们利用以上的方法, 对武汉电离层现象台的 DGS-256 数字测高仪的观测数据进行分析, 获得了一些很有意义的实验结果, 这里结合图 1、图 2 做一简要说明.

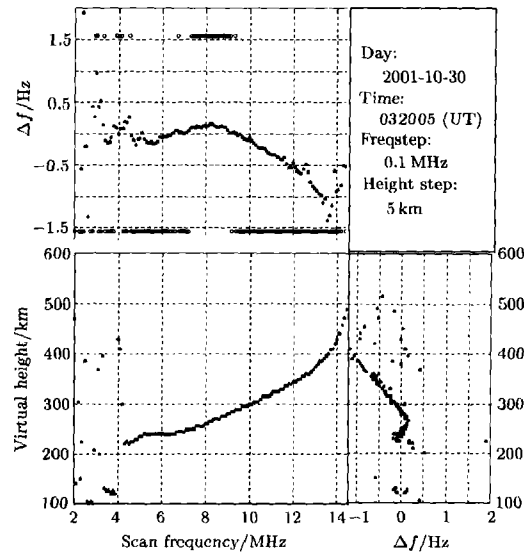


图 1 在频高图模式下的多普勒频高图
Fig.1 Dopplionogram in ionogram mode

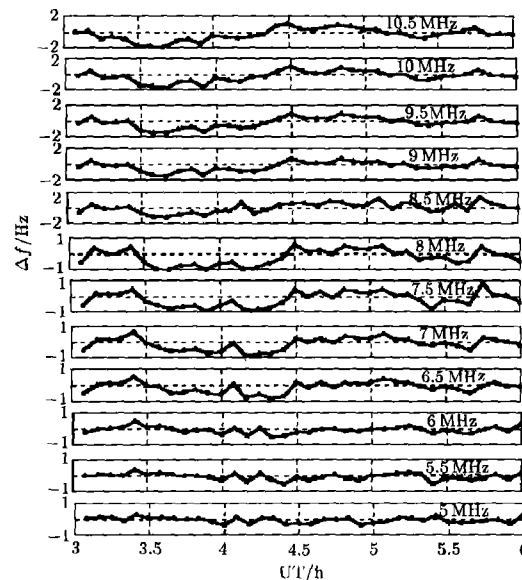


图 2 多频多普勒频移随时间的变化曲线
Fig.2 Variations of multiple-frequency Doppler shift with time

如图 1 所示, 左下方的曲线代表虚高随探测频率的变化曲线(通常所说的频高图), 而左上方表示多普勒频移随探测频率的变化, 其中空心圆圈点代表 O 波的 8 条谱线中幅度最大的谱线, 处理后得到的多普勒频移则用实点表示. 由该图可知 O 波的 8 条谱线的峰值主要落在零频附近的两条谱线上, 空心圆圈点的跳跃性明显, 而处理后可以得到比较连续的多普勒频移曲线, 可以满足进一步电离层运动剖面反演的需要. 图 1 的右边则表示相应的多普勒频移随虚高变化的曲线, 由图可以看出多普勒频移随着虚高的增加呈现出明显的波动性, 在 F_2 层的临界频率附近的多普勒频移曲线变得发散, 这是因为当探测频率接近 F_2 层的临界频率时, 等离子体介质对高频脉冲波包的色散增强.

图 2 给出了多普勒频移随时间的变化曲线图, 从图中可以看出, 在不同的工作频率下, 即在不同的反射高度, 多普勒频移随着时间变化曲线, 扰动曲线存在着明显的波动性, 它们的起伏特征一般都非常相似, 且存在着相位延迟, 即等相面倾斜, 表现为重力波的典型特征, 对这些扰动曲线进行频谱分析表明: 扰动的准周期在 15—30 min 之间, 属于中尺度电离层声重波扰动.

4 结束语

以上介绍了利用 DGS-256 数字测高仪频高图模式下记录的 16 个多普勒通道的数据以获取高精度多普勒频高图的方法, 并应用该方法对武汉电离层现象台数字测高仪站的观测数据进行分析, 得到了多普勒频移随发射频率的变化曲线和不同探测频率下回波的多普勒频移随时间的变化曲线. 分析结果表明: 在频高图模式下得到的高精度多普勒频高图, 能灵敏地反映电离层运动剖面的信息, 这在电离层扰动探测和研究中具有重要意义. 此外, 利用该方法既不影响 DGS-256 数字自动测高仪在频高图模式下的常规观测, 又能得到高精度的多普勒频高图, 这将更大程度上发挥 DGS-256 测高仪的功能. 作为下一步的工作, 我们一方面正在开展利用已获取的高精度多普勒频高图反演电离层扰动剖面, 同时, 将利用多天线获取到达角频高图, 观测研究电离层的运动方向.

参 考 文 献

- [1] Hou Jiechang, Wu Qinglin. A study of radio inverse method of ionospheric isorefractive index surface motion velocity profile. *Chin. J. Space Sci.*, 1988, 8(3):194—201. in Chinese (侯杰昌, 吴庆麟. 电离层等折射指数面速度剖面的无线电反演研究. 空间科学学报, 1988, 8(3):194—201)
- [2] Okuzawa T F O, O Tsukio. Observation of TID by an array of HF Doppler sounders. *Sol. Terr. Environ. Res. Japan*, 1978, 2:141—144
- [3] Wright J W, Pittlway M L V. Application of dopplionograms and gonionograms to atmospheric gravity wave disturbances in the ionosphere. *Radio Sci.*, 1982, 87(A3):1719—1721
- [4] Davies K. Ionospheric radio. London: Peter Peregrinus Ltd, 1989
- [5] Bertel L, Guyader P. Multiple frequency Doppler sounding of the ionosphere theory and experimental comparison with incoherent scatter results. *Radio Sci.*, 1984, 19:879—890
- [6] Li Jun. Doppler frequency shifts of a HF radio wave caused by the ionospheric acoustic gravity waves. *Chin. J. Geophys.*, 1983, 26(1):1—8. in Chinese (李钧. 电离层声重波引起的高频多普勒频移. 地球物理学报, 1983, 26(1):1—8)
- [7] Wan W, Li J. Spectral behaviour of TIDs detected from rapid sequence ionograms. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, 55(1):47—55

- [8] Bibl K, Reinisch B W, Kitrosser D F. General Description of the Compact Digital Ionospheric Sounder. ULCAR, 1981
- [9] Reinisch B W. New Techniques in ground-base ionospheric sounding and studies. *Radio Sci.*, 1986, **21**(3):331—346
- [10] Ning Baiqi, Lin Chen, Wang Bingkang. Upgrading and networking of DGS-256 Digisonde. *Chin. J. Radio Sci.*, 2000, **15**(1):90—96. in Chinese (宁百齐, 林晨, 王炳康. DGS-256 电离层数字测高仪的升级与联网. 电波科学学报, 2000, **15**(1):90—96)
- [11] Wan Weixing, Li Jun, Zhang Zhaoming, B W Reinisch. Study of ionospheric gravity wave disturbances from drift measurements of a Digisonde. *Chin. J. Geophys.*, 1993, **36**(5):561—569. in Chinese (万卫星, 李钧, 张兆明, Reinisch B W. 用数字测高仪漂移测量研究电离层声重波扰动. 地球物理学报, 1993, **36**(5):561—569)
- [12] Zhang Zhaoming, Zhu Guangkun. Analysis of ionospheric disturbances by means of high resolution dopplionograms. *Chin. J. Geophys.*, 1988, **31**(2):121—127. in Chinese (张兆明, 朱岗昆. 利用高分辨率多普勒频高图观测和分析电离层扰动. 地球物理学报, 1988, **31**(2):121—127)

ACQUIREMENT AND ANALYSIS OF HIGH ACCURATE DOPPLIONOGRAM

YUAN Zhigang NING Baiqi WAN Weixing

(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract

The Doppler shift of radio wave echoes reflected from ionosphere is an important parameter to observe ionospheric movements. Generally, high resolution Doppler shift could be obtained in drift mode with digital ionosonde. In this mode, only a few working frequencies are used, so ionospheric disturbance profile with height cannot be acquired. However, in ionogram mode, though Digisonde works with many sounding frequencies, the resolution of Doppler shift is too low to detect ionospheric disturbances precisely. In this paper, a new analysis method is given based on the fact of narrow band of ionospheric echoes, through converting sixteen Doppler channel data to temporal domain by IDFT and estimating the phase differences of adjacent time by least square method, the high accurate dopplionogram could be acquired in ionogram mode. In order to prove the effectiveness of the method, some experiments have been carried out with Digisonde-256 at Wuhan Ionospheric Observatory. The experimental results have revealed that the high accurate Dopplionogram can be acquired, and the present method is very useful in experimental investigation of ionospheric disturbances.

Key words Digital ionosonde, Ionogram, Doppler shift