0254-6124/2007/27(3)-204-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhu Zhengping, Ning Baiqi, Wan Weixing. Measurement and analysis of ionospheric virtual height with high precision. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(3): 204~210

电离层虚高的高精度测量与分析*

朱正平[1,2,3] 宁百齐[1] 万卫星[1]

[1](中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

[2](中国科学院武汉物理与数学研究所)

[3](中国科学院研究生院)

摘 要 为了提高电离层虚高测量精度，介绍了利用电离层回波相位实现高精度虚高测量的方法，并以 CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) 电离层数字测高仪为研究平台，进行组合脉冲控制和回波相位测量分析，开展了一系列虚高测量实验，并与传统的利用回波时间延迟的虚高测量方法进行了分析比较. 实验结果表明，基于回波相位的测量分析方法与回波时延测量分析方法相比，其虚高测量精度高一个量级以上，这对精确反演电离层峰下电子浓度剖面及研究电离层精细结构具有重要意义.

关键词 电离层虚高；回波相位；回波时延

中图法分类号 P 353

Measurement and Analysis of Ionospheric Virtual Height With High Precision

ZHU Zhengping[1,2,3] NING Baiqi[1] WAN Weixing[1]

[1](*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100029)

[2](*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Science*)

[3](*The Graduate School of Chinese Academy of Science*)

Abstract In order to improve the spacial resolution of ionospheric virtual height in vertical ionospheric sounding, a high precision virtual height measurement experiment are carried out by means of ionospheric echo's phase measurement and corresponding data analysis processing arithmetic with modern digital ionosonde. When two radio frequency pulse signals, the frequency difference of which is a fixed value are transmitted and the echo's phase difference is measured, the ionospheric virtual height with high precision can be acquired. According to this ionospheric virtual height sounding principle, the observation mode of ionospheric virtual height with high precision is realized. In this mode, the measured height resolution of the ionospheric virtual height is increased by more than ten times, that is, from 6 km to about 200 m, which can entirely satisfy the observation research demand of the ionospheric fine structure and small scale disturbances. Through a series of virtual height measurement experiments by using combinational pulses control and echo's phase measurement analysis based on CADI ionosonde, some meaningful results are obtained and some comparisons are made

* 国家自然科学基金项目 (40574072) 和中国科学院创新方向性项目 (kzcx3-sw-144) 共同资助

2006-08-25 收到原稿， 2006-12-20 收到修定稿

with TOA (Time Of Arrival) method. Experimental results reveal that the height resolution of ionospheric virtual height measurement with echo's phase method is ten times higher than that of virtual height measurement with TOA method. This is very important in that electron density profile under ionospheric peak can be accurately inversed and ionospheric fine structure can be carefully studied.

Key words Ionospheric virtual height, Echo's phase, Time of Arrival

1 引言

电离层数字测高仪是地面观测研究电离层的主要常规设备，它的主要应用是得到电离层虚高随发射频率的变化图，即频高图. 目前最常使用的虚高测量方法是通过垂直发射扫频高频脉冲波，当电波频率 f 等于电离层等离子频率 $f_{\rm p}$ 时，信号发生反射，测量从电离层反射的回波到达接收机的时间延迟 TOA (Time Of Arrival), 获得各频率点电离层虚高，这种方法称为 TOA 测量方法.

现代数字测高仪一般均是按上述方法实现虚高测量的，如 Digisonde, CADI, IPS-71 等型号的数字测高仪. 这类数字测高仪由于受发射脉冲宽度和接收机带宽的限制，虚高的测量精度均较低，一般为几公里. 例如，一个典型的数字测高仪的单脉冲宽度为 50 μs, 峰值发射功率为 10 kW, 接收机带宽为 20 kHz, 其虚高测量精度为 7.5 km. 若要获得更高精度的虚高测量，就必须要减少发射脉冲宽度，接收机的带宽也要相应加大. 如果背景噪声为随机噪声，为保证系统信噪比不变，也必须要保证发射机的峰值发射功率保持恒定，而且发射机的峰值发射功率与脉冲宽度成反比. 因此, 对于一个宽度为 1 μs 的发射脉冲，要获得与 50 μs 发射脉冲宽度等价的系统信噪比，就需要发射机的峰值发射功率提高到 500 kW, 如此大功率的发射机已很不实用. 此外，在电离层观测台站，由于各种发射机和接收机位置相距较近，为了避免相互干扰，发射机和接收机的带宽都要求尽可能小，最好在 50 kHz 以下 (对应于 20 μs 发射脉冲宽度), 这也限制了发射脉冲宽度的减小，从而限制虚高测量精度的提高. 虽然近年来采用脉冲编码技术可大大降低数字测高仪的峰值发射功率 [3],[4], 但对于提高电离层虚高测量精度没有明显改善.

采用测量两个频率相差几千赫兹信号的相位差是提高电离层虚高测量精度的一种有效方法，在电离层测高仪的发展过程中，曾开展过许多研究和实验，特别是 Dynasonde 电离层数字测高仪，在利用回波相位获得电离层信息，包括虚高测量方面，取得了一系列研究成果 [5]~[10], 由于这种方法存在 2π 模糊度问题，并且抗干扰能力较差，迄今未见广泛应用.

因此，发展和研究实用的高精度电离层虚高测量方法和技术对于提高电离层数字测高仪探测能力是十分重要的. 为了发展电离层虚高的高精度测量，我们以 CADI 数字测高仪为实验平台，开发了新的系统控制与数据分析软件，设计了新的发射脉冲组合，并将 TOA 方法测量的可靠性与相位测量的高精度相结合，在 CADI 数字测高仪上实现了电离层虚高的高精度测量模式. 本文对基于回波相位的虚高测量原理和精度进行了分析，介绍了高精度电离层虚高测量模式的实现方法，并给出了实验观测结果与.

2 基于相位的虚高测量原理和精度

2.1 测量原理

电磁波在空间的传播可以表示为

$$E(t,z)=E_{\rm m}\exp[{\rm j}\,(wt+\varphi_0-Kz)], \tag{1}$$

波的空间相位表示为

$$\varphi(z)=Kz=\frac{\omega}{c}\times 2h^*=\frac{4\pi f}{c}\int \mu {\rm d}h, \tag{2}$$

将式 (2) 分别对时间 t 和频率 f 求偏导，有

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}=\frac{4\pi f}{c}\frac{\partial h^*}{\partial t}=\frac{4\pi f}{c}v^*, \tag{3}$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial f}=\frac{4\pi}{c}\int\frac{\partial(f\mu)}{\partial f}{\rm d}h=\frac{4\pi}{c}\int\mu'{\rm d}h=\frac{4\pi}{c}h'. \tag{4}$$

将 φ 用泰勒级数展开，有

$$\varphi(t,f)=\varphi(t_0,f_0)+\frac{\partial\varphi}{\partial t}(t-t_0)+\frac{\partial\varphi}{\partial f}(f-f_0)+\varepsilon(0)\approx$$

$$\varphi_0 + \frac{4\pi f_0 v^*}{c}(t - t_0) + \frac{4\pi}{c}h'\delta f, \tag{5}$$

$$\varphi(t_m, f_\mathrm{n}) = \varphi_{m,n} = \varphi_0 + \frac{4\pi f_0 v^*}{c}(t_m - t_0) + \frac{4\pi}{c}h'\delta f_\mathrm{n}, \tag{6}$$

$$\Delta\varphi \hat{=} \varphi_{m,n} - \varphi_0 = \frac{4\pi f_0 v^*}{c}\delta t_m + \frac{4\pi}{c}h'\delta f_\mathrm{n}. \tag{7}$$

式 (7) 中， $\varphi_{m,n}$ 和 φ_0 由回波信号相位测量得到，而相速度 v^* 可由式 (3) 测量计算求得，因此，虚高 h' 就可由式 (7) 计算得到. Whitehead 等人对这种基于相位的虚高测量原理和方法进行了较为详细的论证和讨论 [11],[12].

2.2 测量精度分析

回波相位 $\Delta\varphi$ 的测量值范围为 $[-\pi, \pi]$, 但由于相位测量中存在 2π 模糊度问题，相位实际值应表示为 $\Delta\varphi = [-\pi, \pi] + 2N\pi$, N 为整数. 若 $\Delta\varphi$ 变化一个 2π 整周期，设虚高变化量为 $\Delta h'$, 在不考虑相位随时间变化即多普勒频移影响的情况下 (实际情况是多普勒频移影响较小), 则有如下关系式成立:

$$\frac{4\pi}{c}\Delta h'\delta f_\mathrm{n} = 2\pi \Rightarrow \Delta h' = \frac{c}{2\delta f_\mathrm{n}}. \tag{8}$$

式 (8) 中，电磁波标量速度 $c = 3 \times 10^5$ km/s, δf_n 为小的频率差值，当相位变化 2π 整周期时，若 δf_n 为 2 kHz, 则虚高变化量 $\Delta h'$ 为 75 km; 若 δf_n 为 4 kHz, 则虚高变化量 $\Delta h'$ 为 37.5 km; 若 δf_n 为 8 kHz, 则虚高变化量 $\Delta h'$ 为 18.75 km; 若 δf_n 为 16 kHz, 则虚高变化量 $\Delta h'$ 为 9.375 km. 可见，两个频率差值 δf_n 越大，相位变化 2π 整周期时的虚高变化越小，这说明所测回波相位中所含的 2π 模糊度数越多.

另外，关于测量精度问题，在 CADI 数字测高仪的数据输出格式中，回波信号的同相和正交分量 I 和 Q 的采样位数为 8 位，即 I, Q 的取值区间为 $[-128, +127]$, 相应的数据分辨率为 1/128, 回波相位 φ 可由下式计算

$$\varphi = \arctan\frac{Q}{I}. \tag{9}$$

对上式进行微分运算，有

$$\mathrm{d}\varphi = \frac{I\mathrm{d}Q - Q\mathrm{d}I}{I^2 + Q^2}. \tag{10}$$

由式 (10) 可知，相位 $\mathrm{d}\varphi$ 的分辨率为 $360^\circ/128$, 但考虑到 I 和 Q 在大多数情况下不能达到满量程，因此， $\mathrm{d}\varphi$ 的实际分辨率估计为 $360^\circ/100 = 3.6^\circ$ 是合理的. 由下式可计算虚高的相对变化量，即所能达到的测量精度:

$$\frac{4\pi\delta h'}{c}\delta f_\mathrm{n} = \frac{2\pi}{100} \Rightarrow \delta h' = \frac{1.5}{\delta f_\mathrm{n}}. \tag{11}$$

式 (11) 表明，若 δf_n 为 2 kHz, 则虚高测量精度 $\delta h'$ 为 0.75 km; 若 δf_n 为 4 kHz, 则虚高测量精度 $\delta h'$ 为 0.375 km; 若 δf_n 为 8 kHz, 则虚高测量精度 $\delta h'$ 为 0.1875 km; 若 δf_n 为 16 kHz, 则虚高测量精度 $\delta h'$ 为 0.093 75 km. 可见，两个频率差值 δf_n 越大，虚高的测量精度越高.

综上所述，频率差值 δf_n 的选择影响到相位测量中的 2π 模糊度数和虚高测量精度， δf_n 越大，虚高测量精度越高，但相位测量中所含的 2π 模糊度数就越多；反之， δf_n 越小，虚高测量精度就越低，但相位测量中所含的 2π 模糊度数越少. 因此，大量的实验结果表明， δf_n 取 8 kHz 较为合适.

值得注意的是, 电离层随着时间而不断变化, 所产生的多普勒频移将给虚高测量带来一定的误差. 由虚高测量基本公式 (4) 可知，电离层虚高 h' 满足

$$h' = \frac{c}{4\pi}\frac{\partial\varphi}{\partial f}. \tag{12}$$

式 (12) 中，所测量的相位差是总的变化量，既含有发射频率偏移所产生的相位变化，又含有多普勒频移所产生的相位变化. 这里，假设所测量的相位总变化量仅是频率的函数，即所测量的是 $\mathrm{d}\varphi/\mathrm{d}f$, 有

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}f} = \frac{\partial\varphi}{\partial f} + \frac{\partial\varphi}{\partial t}\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}f}, \tag{13}$$

因此，由多普勒频移所产生的虚高测量误差为

$$\Delta h' = \frac{c}{4\pi}\frac{\partial\varphi}{\partial t}\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}f}. \tag{14}$$

由式 (14)，设电离层 F 层引起的多普勒频移为典型值 1 rad/s, CADI 数字测高仪的脉冲重复频率为 40 Hz, 固定频率偏移值为 8 kHz, 代入式 (14), 有

$$\Delta h' = \frac{c}{4\pi} \times 1 \times \frac{1}{40} \times \frac{1}{8 \times 10^3} \approx 75\ \mathrm{m}. \tag{15}$$

有多种方法可以减小或消除由于多普勒频移产生的虚高测量误差. 由式 (14) 可知，一种最简单的方法是通过增大这两个频率之间的差值 δf_n 就可以减小这种误差, 但这种方法是以增加相位测量中 2π 模糊度数为代价的. 另外一种方法是在虚高测量的同时用多个相同频率的发射脉冲测量多普勒频移, 根据式 (7), 利用所测回波信号相位减去由于多普勒

频移产生的相位所得的相位差来计算虚高，即可消除由于多普勒频移所产生的虚高测量误差．本文即是采用这种方法.

图 1 给出了考虑和不考虑多普勒频移影响时所测得的频高图误差的比较，观测时间是 2006 年 4 月 19 日 1425 LT, 观测地点是北京观测站 (40.3°N, 116.2°E). 图 1(a) 是考虑了多普勒频移影响情况下所测得的频高图，图 1(b) 所示是利用考虑了多普勒频移影响情况下所测得的频高图减去未考虑多普勒频移影响情况下所测得的频高图的 O 波和 X 波的虚高差的柱状图．由图 1 可见，多普勒频移对虚高测量的误差只有几米，所以通常可以不考虑回波多普勒频移对虚高测量的影响.

3 高精度电离层虚高观测模式的实现

高精度虚高测量实验硬件平台是从加拿大引进的 CADI 数字测高仪, 它是一种低功率, 使用脉冲编码技术，灵活简便的常规型电离层数字测高仪 [13].

为了开展垂直探测中基于相位虚高测量的实验, 以 CADI 数字测高仪为硬件平台, 在 Windows 下开发了新的虚高观测模式，设计实现了系统控制、数据分析和处理软件，模式应用软件工作流程如图 2 所示．其功能主要包括利用发射频率表和频率偏置表设计发射脉冲集, 利用发射脉冲集控制 DDS 和发射机发射扫频高频脉冲波，同时控制接收机采集回波信号并将原始数据读入计算机内存缓冲区中；然后对缓冲区的原始数据进行一系列实时快速的分析、处理和计算，主要包括基于 TOA 方法的回波信号识别、2π 模糊度数确定、相位获取、多普勒频移计算、基于相位测量方法的虚高计算等；最后在计算机屏幕上实时显示，同时以二进制文件的形式保存数据．此外，系统工作时，也可以将未经任何处理的原始数据以二进制文件形式保存下来，以备将来对原始数据做进一步脱机分析处理.

基于相位的虚高测量中，脉冲集的设计与发射较为重要, 下面进行特别说明. 系统发射脉冲是以扫频方式工作的，对于每一个发射频率都编制了脉冲集，发射脉冲的扫频方式如图 3 所示．图 3 中 f_{PRF}

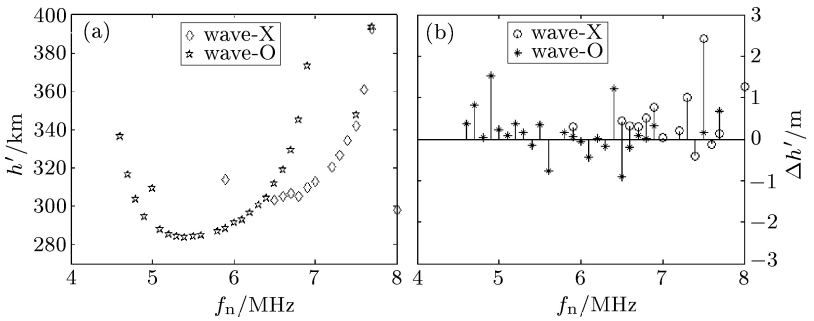


图 1 多普勒频移对频高图测量精度的影响

Fig.1 Ionogram error caused by ionospheric Doppler shift

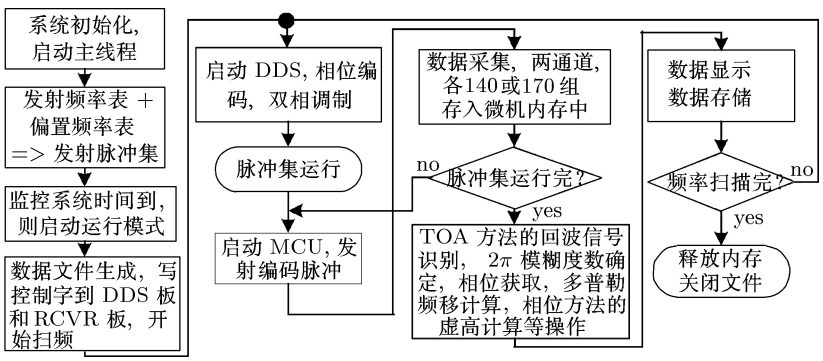


图 2 模式应用软件工作流程

Fig.2 Work flow chart of mode application software

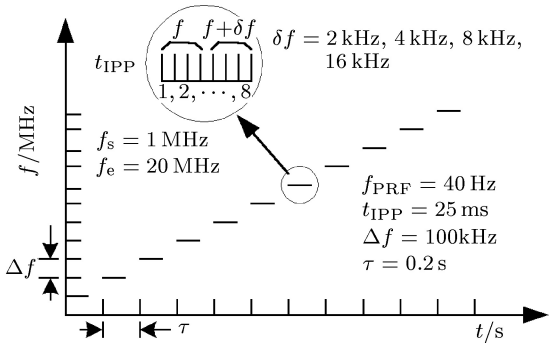


图 3 发射脉冲的扫频方式

Fig.3 Sketch map of scan frequency mode for transmitted pulses

表示发射脉冲的重复频率, t_{IPP} 表示每个发射脉冲之间的时间间隔, δf 表示发射频率之间的频率偏移, 每一个短划线代表某一频率所发射的脉冲个数 N. 在虚高测量中, 对应每一个频率都发射有 8 个脉冲, 其中前 4 个脉冲发射频率为预定值 f, 第 5 个脉冲发射频率为 $f+2$ kHz, 第 6 个脉冲发射频率为 $f+4$ kHz, 第 7 个脉冲发射频率为 $f+8$ kHz, 第 8 个脉冲发射频率为 $f+16$ kHz, 在监控程序中, 实际上已经制定了频率偏置表 0, 0, 0, 0, 2, 4, 8, 16 kHz, 系统所发射的频率是由预定发射频率表与对应的频率偏置表相加后的结果. 利用前 4 个相同频率的发射脉冲, 首先测量这 4 个脉冲回波信号的相位, 然后用相位随时间的变化关系求出电波反射面的多普勒频移. 这有两方面作用, 一方面可以由此得到电离层垂直扰动信息, 另一方面利用这个多普勒频移值可消除多普勒频移对虚高测量的影响, 减少虚高测量误差. 在每一个探测频率, 每发射一个脉冲, 两个接收通道按不同的高度 (90~507 km 高度范围, 3 km 高度分辨率) 分别采集 M 对 (典型值为 140) 复信号 (同相分量 I 和正交分量 Q) 存入计算机内存缓冲区中, 利用这两个通道的 $2\times M\times N$ 对复信号首先通过软件方法将 O 波和 X 波分开, 以获得单一的窄带回波信号, 然后对应每一个高度利用所获得的 N 对 O 波 (或 X 波) 复信号, 分别求取相位值. 利用发射频率为 f 和 $f+\delta f$ 两个发射脉冲的回波信号的相位差, 减去多普勒频移所引起的相位差, 利用式 (12) 可求得虚高 h'. 对一次扫频中所有的探测频率进行相同的处理后, 即可获得较高精度的频高图. 若 δf 为 8 kHz, 相位变化一个 2π 整周期时, 对应的虚高变化为 18.75 km, 而 CADI 的相位测量精度为 3.6°, 因此, 虚高的测量精度可达 18.75 km/100=0.1875 km, 而采用 TOA 方法时 CADI 的虚高测量精度是 6 km (40 μs 脉冲宽度), 因此, 基于相位的虚高测量方法大大提高了虚高测量精度.

观测实例与分析

下面给出的所有观测实例的观测地点均为北京观测站 (40.3°N, 116.2°E), 试验硬件平台为 CADI 数字测高仪, 利用了新开发的模式观测软件进行了实验、观测、处理与分析.

图 4 给出了利用基于相位方法所测量的回波相位差随频率的变化曲线, 观测时间是 2006 年 3 月 28 日 1238 LT. 图 4 所示是发射两个频率相差 8 kHz 高频信号的 F_2 层 X 回波信号的相位差随频率的变化, 频率范围为 5.8~7.8 MHz, 扫描频率间隔为 0.1 MHz, 在每个频率点上, 都发射了两个频率信号, 一个是 f, 另一个是 $f+\delta f$, 此处的 δf 为 8 kHz. 按照式 (12) 虚高的相位测量原理, 图 4 中曲线正比于虚高. 由图 4 可见, 这种相位差曲线高精度测量也反映了虚高测量的高精度. 通常, 其他的虚高测量方法都极大地平滑掉了虚高的这种变化细节 [1],[2],[14],[15], 而虚高的这种微小变化对于精确反演电子浓度剖面又极为重要. 因此, 高精度的虚高测量不仅能获得 O 波和 X 波的精确虚高以反演电子浓度剖面, 而且在研究电离层精细结构等方面也具有重要意义.

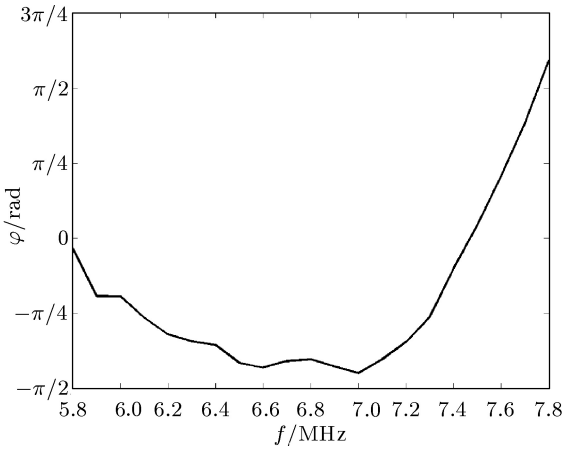


图 4 F 层 X 回波相对相位随频率 (5.8~7.8 MHz) 的变化

Fig.4 Variation of F-layer X echo's relative phase with frequencies (5.8~7.8 MHz)

图 5 所示为用两种测量方法所得到的频高图比较, 观测时间为 2006 年 3 月 28 日 1242 LT, 图中扫

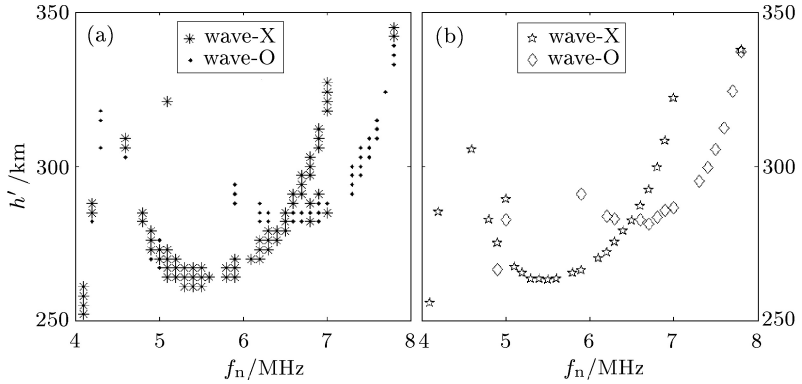


图 5 TOA 方法与相位测量方法所测频高图的比较

Fig.5 Comparison of ionograms measured by TOA method and phase method

描频率间隔为 0.1 MHz. 图 5(a) 为用传统的 TOA 方法测量所得到的频高图，虚高测量精度为 6 km, 图 5(b) 为用本文所介绍的基于相位测量方法所得到的频高图，两个频率差值为 8 kHz, 考虑了消除电离层多普勒频移的影响，虚高测量精度为 187.5 m.

图 6 所示为 2006 年 4 月 11 日 1710 LT 开始测量的 F_2 层虚高随时间的变化曲线, 系统工作时间间隔为 5 min, 探测频率为 5.1 MHz, 频率偏移为 8 kHz. 很显然， O 波和 X 波虚高随时间不断变化，且变化幅度较小 (小于 20 km), 但 O 波和 X 波虚高的变化趋势是相似的，与实际情况相符.

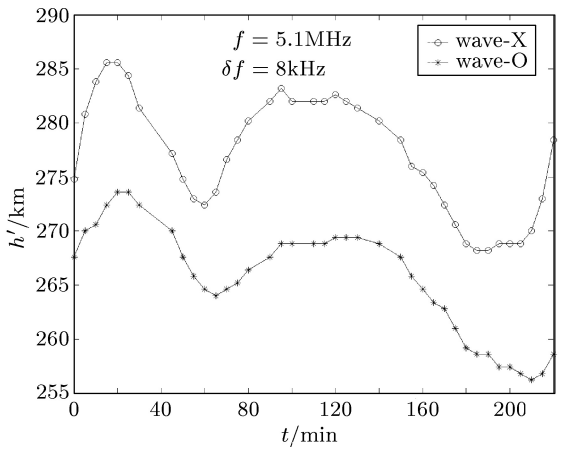


图 6 单个频率 $f = 5.1$ MHz 时 F_2 层虚高随时间的变化

Fig.6 Variation of F_2 layer's virtual height for single frequency 5.1 MHz with time

图 7 所示为在 2006 年 4 月 14 日磁暴期间两个频率信号 (6.2 MHz 和 7.4 MHz) O 波虚高随时间的变化曲线. 横坐标的开始时间为 2006 年 4 月 14 日 1125 LT, 横坐标的时间间隔为 5 min. 由图 7 可以看出，从 2006 年 4 月 14 日 1245 LT 开始，电离层虚高有明显的抬升现象，到 1345 LT 时，虚高达到最大值，此时 6.2 MHz 探测频率虚高增幅达到了 93 km, 7.4 MHz 探测频率的虚高增幅达到了 129 km. 此后，虚高又开始下降，到 1525 LT 时又恢复到暴前状态.

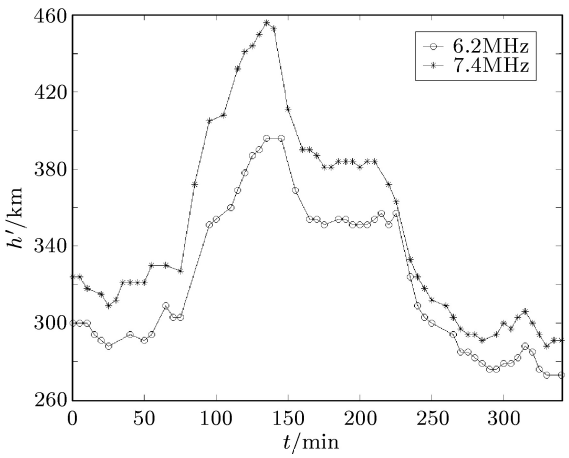


图 7 2006 年 4 月 14 日磁暴期间 6.2 MHz 和 7.4 MHz 两频率信号 O 波虚高随时间变化

Fig.7 Variation of wave-O's virtual height with time for frequency 6.2 MHz and 7.4 MHz respectively On April 14, 2006

4 结论

通常使用的两种虚高测量方法中， TOA 方法测量可靠性高但测量精度低，相位测量方法精度高但抗干扰性能差. 本文综合了 TOA 方法的可靠性

和相位测量方法的高精度，以 CADI 数字测高仪为硬件开发平台，开发了新的系统控制、数据分析与处理软件，实现了新的高精度虚高测量模式. 在这种方法中，首先通过 TOA 方法可靠性的特点粗略确定回波位置，并以此确定相应的 2π 模糊度数，然后通过两个频率相差几千赫兹的相位差测量并扣除多普勒频移影响，通过相位测量方法计算回波信号所对应的精确高度值. 也就是说，利用 TOA 方法确定相位方法的 2 π 模糊度，再用相位测量获得高精度的虚高. 通过在 CADI 数字测高仪硬件平台上的实验工作表明，综合了 TOA 方法和相位方法的高精度虚高测量模式实用可行，稳定可靠，所获得的频高图精度高，实时性强. 当然，这种测量方法要求电离层回波信号为窄带单频信号，虽然在大多数情况下可以满足，但在夜间干扰较大等情况下，相位测量会有较大误差，虚高测量精度会降低. 总体来说，高精度虚高观测模式的实现，使我们能够利用常规的数字测高仪获得比通常 TOA 方法精度高一个量级以上的数字频高图. 作为下一步的工作，我们将利用所测量的电离层反射 O 波和 X 波的高精度虚高来精确反演电离层峰下电子浓度剖面，同时利用所测量的高精度频高图研究电离层的精细结构及电离层小尺度扰动.

参考文献

[1] Devlin J C, Dyson P L, Hammer P R. A pulse synthesis technique for improving ionosonde resolution. *Radio Sci.*, 1977, **12**:767∼777

[2] Paul A K, Wright J W, Fedor L S. The interpretation of ionospheric radio drift measurements, VI, Angle-of-arrival and group path [echolocation] measurements from digitized ionospheric soundings: The group path vector. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1974, **36**:193∼214

[3] Gao S, MacDougall J W. A dynamic ionosonde design using pulse coding. *Can. J. Phys.*, 1991, **68**:1184∼1189

[4] Huang J, MacDougall J W. Legendre coding for digital ionosondes. *Radio Sci.*, 2005, **40**: RS4013, doi:10.1029/2004RS003123

[5] Wright J W, Pitteway M L V. Real-time data acquisition and interpretation capacities of the Dynasonde, 1 Data acquisition and real-time display. *Radio Sci.*, 1979, **14**(5):815∼825

[6] Wright J W, Pitteway M L V. Real-time data acquisition and interpretation capabilities of the Dynasonde, 2 Determination of magnetoionic mode and echolocation using a small spaced receiving array. *Radio Sci.*, 1979, **14**(5):827∼835

[7] Pitteway M L V, Wright J W. Toward an optimum receiving array and pulse set for the Dynasonde. *Radio Sci.*, 1992, **27**(4):481∼490

[8] Tsai L C, Berkey F T, Stiles G S. On the derivation of an improved parameter configuration for the Dynasonde. *Radio Sci.*, 1993, **28**(3):785∼793

[9] Wright J W, Pitteway M L V. A new data acquisition concept for digital ionosondes: Phase-based echo recognition and real-time parameter estimation. *Radio Sci.*, 1999, **34**(4):871∼882

[10] Harris C R. Solution of the aliasing and least squares problems of spaced antenna interferometric measurements using lattice methods. *Radio Sci.*, 2003, **38**(2): 1018, doi:10.1029/2002RS002732

[11] Whitehead J D, Malek A. A suggested method of accurately measuring the virtual height of reflection of radio waves from the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1963, **25**:599∼601

[12] Whitehead J D, Kantarizis E. Errors in the measurement of virtual height using a phase ionosonde. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1967, **29**:1483∼1488

[13] Zhu Zhengping, Ning Baiqi. Study of disturbance observation mode in ionospheric vertical sounding. *Chin. J. Radio Sci.*, 2007 (accepted). in Chinese (朱正平，宁百齐. 电离层垂直探测中扰动观测模式研究. 电波科学学报, 2007. 已接收)

[14] Hammer P R, Bourne I A. A high resolution ionosonde, 1, Technique and analysis methods. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1976, **38**:935∼943

[15] Hammer P R, Bourne I A. A high resolution ionosonde, 2, Equipment and preliminary results. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1976, **38**:945∼956

[16] Bibl K, Reinisch B W, Kitrosser D F. Digisonde 256: General Description of the Compact Digital Ionospheric Sounder. ULCAR, 1981

[17] Reinisch B W. Modern ionosondes. In Modern Ionospheric Science. Germany: European Geophysical Society, 1996. 440∼458