0254-6124/2019/39(2)-167–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LAN Jiaping, NING Baiqi, ZHU Zhengping, HU Lianhuan, SUN Wenjie, LI Guozhu. Development of agile digital ionosonde and its preliminary observation (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(2): 167-177. DOI:10.11728/cjss2019.02.167

敏捷数字电离层测高仪系统研制及初步观测 *

蓝加平[1,2,3,4,5] 宁百齐[1,2,4] 朱正平[3]
胡连欢[1,2,4] 孙文杰[1,2,4] 李国主[1,2,4,5]

1(中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室 北京 100029)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 北京空间环境国家野外科学观测研究站 北京 100029)

3(中南民族大学电子信息工程学院 武汉 430074)

4(中国科学院地球科学研究院 北京 100029)

5(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

摘 要 在小型天线和低发射功率条件下, 保证电离层测高仪观测数据质量和提高观测速度一直是电离层垂测的技术难点. 针对这一问题, 基于新近发展的高速数字芯片和射频器件, 采用窄带跟踪滤波、脉冲压缩、编码复用和天线均衡匹配等技术, 设计和研制一种敏捷数字电离层测高仪. 该系统采用数米高的小型收发天线和便携式主机系统, 配置任意频率扫描方式频高图、高分辨率多普勒频高图和斜向探测等多种工作模式, 具有可流动观测布站、系统参数灵活捷变及适合快速电离层扰动探测等能力. 敏捷数字电离层测高仪为组网观测获得大范围电离层时空变化和电离层快速扰动及传播提供了一种有效的探测手段.

关键词 敏捷垂直探测, 数字电离层测高仪, 频高图, 电离层扰动

中图分类号 P 523

Development of Agile Digital Ionosonde and Its Preliminary Observation

LAN Jiaping[1,2,3,4,5] NING Baiqi[1,2,4] ZHU Zhengping[3]
HU Lianhuan[1,2,4] SUN Wenjie[1,2,4] LI Guozhu[1,2,4,5]

1(*Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

2(*Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

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

4(*Institutions of Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

5(*College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

* 国家自然科学基金项目资助 (41574149, 41127003, 41474135, 41727803)
2018-06-12 收到原稿, 2019-01-25 收到修定稿
E-mail: nbq@mail.iggcas.ac.cn

Abstract Ionosonde, as one of the most important instruments for ionospheric observation, is usually deployed at permanent stations because of its large size antennas and main machine. Owing to the increasing spatial and temporal resolution requirements of ionosonde observations, the development trend of ionosonde is toward agile in field site setup and ionospheric disturbance detection. In recent years, some important achievements have been made in lowering the transmitting power and reducing the size of the main machine. However, it is still a standing technical issue to perform fast ionospheric sounding and produce high quality ionogram under small antennas and low transmitting power condition. In regards to this issue, based on the newly developed high speed digital circuits and RF devices, an agile digital ionosonde is designed and developed by using the narrow band tracking filtering, pulse compression, code multiplexing and antenna matching techniques. The agile digital ionosonde uses small transmitting and receiving antennas with several meters height and portable main machine. Its main characteristics include mobile observation, system parameters agility and fast ionospheric disturbance detecting. It is configured with arbitrary frequency sweeping vertical sounding, high Doppler resolution vertical sounding and oblique sounding observation mode. The observations performed at several stations in China indicate that the agile digital ionosonde can be well employed to make fast measurements with high quality ionogram and is suitable for permanent and temporary stations. The agile digital ionosonde will provide an important way to sense ionospheric temporal and spatial variations, especially the fast disturbance and its propagation in a large area.

Key words Agile vertical sounding, Digital ionosonde, Ionogram, Ionospheric disturbances

0 引言

电离层测高仪是从地面探测电离层最常用的设备. 其通过发射不同频率的高频无线电波, 测量经电离层反射的不同频率信号的回波时延, 从而获得不同频率上的电离层反射虚高, 即电离层频高图, 然后经过度量反演获得电离层参量和峰下电子浓度剖面等电离层结构和变化信息. 电离层测高仪已有 80 多年使用历史, 20 世纪 80 年代之前均使用模拟电离层测高仪 (简称模拟测高仪), 80 年代之后逐渐发展为数字电离层测高仪 (简称数字测高仪). 早期的电离层测高仪采用较大的发射天线 (高于 40 m) 和较高的发射峰值功率 (几千瓦以上), 例如美国的 DGS256 电离层测高仪 [1] 和日本的 10C 电离层测高仪 [2], 发射功率都高达 10 kW, 主机设备体积庞大, 耗电量也较高.

随着微电子和计算机技术的发展, 现代数字测高仪采用脉冲压缩和相干累积等技术, 使电离层测高仪的发射功率显著降低, 主机设备的体积和重量也都有了很大程度减小. 代表性的仪器如美国的 DPS4D 数字测高仪和加拿大的 CADI 数字测高仪 [3,4], 在降低发射功率、系统数字化、主机小型化、数据实时处理和远程控制通信等方面均有重要进展. 此外, 中国电波传播研究所、武汉大学和中国科学院电子学研究所等单位也研制开发了数字测高仪 [5,6], 并在有关台站应用. 为解决发射功率低带来的电离层回波信号弱和环境噪声干扰强等问题, 这些数字测高仪通常在每个探测频率上发射多个脉冲进行相干累积以获得较好的电离层回波信噪比. 这种方式带来的问题是观测速度较慢, 难以通过加密观测监测电离层中的快速扰动和变化 [7]. 以 DPS4D 数字测高仪为例, 以 25 kHz 步进执行 1∼20 MHz 扫频观测, 每个频率 16 次相干累积, 完成一次探测需要约 8 min. 此外, 这些现代数字测高仪的收发天线系统仍然较为庞大, 特别是发射天线高度通常在 30 m 以上, 其收发天线占地面积在 8000 m^2 以上. 如果使用数米高的小型发射天线, 难以获得满足科学要求的电离层频高图观测数据. 因此, 由于现代数字测高仪仍需使用较大的发射天线, 占地较大, 安装复杂, 只能在一些固定观测站使用, 无法根据研究需要开展灵活布站和流动观测.

为了实现快速灵活布站, 对电离层扰动等各种暂

态现象进行时间和空间高分辨观测, 本文提出并研制了 PDI2 敏捷数字电离层测高仪 (简称 PDI2 数字测高仪). 与现有数字测高仪相比, 其具有如下特点.

(1) 系统安装架设方便. 支持最低架设高度 4 m, 长度 28 m 的折合偶极子天线. 因此, 其既可像现有的电离层测高仪在固定台站工作, 又能灵活方便地临时安装, 针对特定科学目标进行空间布阵观测.

(2) 系统参数灵活. 可以灵活设置和快速捷变, 具有多种观测模式, 能够满足各种电离层探测方式的需要.

(3) 系统探测速度快. 一张电离层频高图的测量时间小于 1 min, 可用于电离层扰动等快速变化的连续监测.

本文通过对 PDI2 数字测高仪软硬件结构、工作原理和性能指标的分析, 给出了系统现有的工作模式和特色. 在此基础上, 给出了 PDI2 数字测高仪利用不同工作模式的实际观测结果, 并与当前国际先进的数字测高仪比较, 说明新系统的性能和探测能力.

1 PDI2 数字测高仪结构与工作原理

PDI2 数字测高仪系统硬件由上位机控制平台、收发控制子系统、发射机和天线系统 4 部分组成, 如图 1 所示.

1.1 结构

1.1.1 上位机控制平台

平台由采集计算机和处理计算机组成. 采集计算机通过 PCI 接口与收发控制子系统连接, 发送系统参数和工作模式等指令并收集探测数据; 处理计算机完成用户交互、数据处理以及远程数据传输与控制等任务.

1.1.2 收发控制子系统

收发控制子系统完成工作时序的产生、扫频信号的发射控制、回波信号的接收处理以及上位机数据传输与通信等功能. 子系统由时序控制模块、GPS 同步基准时钟模块、射频脉冲发生模块、跟踪调谐放大模块、下变频模块、预处理模块和总线接口模块组成, 模块之间通过自主设计的 ICSA 总线连接, 时序控制单元是 ICSA 总线的主控设备, 其根据上位机下载的配置信息控制所有从设备协调有序工作. GPS 同步基准时钟模块以同步于 GPS 信号锁定的高稳恒温晶振为基准源, 向整个系统提供准确的 UTC 时间、同步脉冲信号和参考频率信号. 射频脉冲发生器模块采用 DDS 芯片技术设计, 按照配置参数的要求产生射频扫频编码脉冲信号和本振信号. 跟踪调谐放大模块是接收系统的前端信号处理模块, 由 5 个具有自校功能的低噪声窄带跟踪调谐放大单元构成, 完成弱信号放大和带外噪声抑制功能. 下变频模块以低

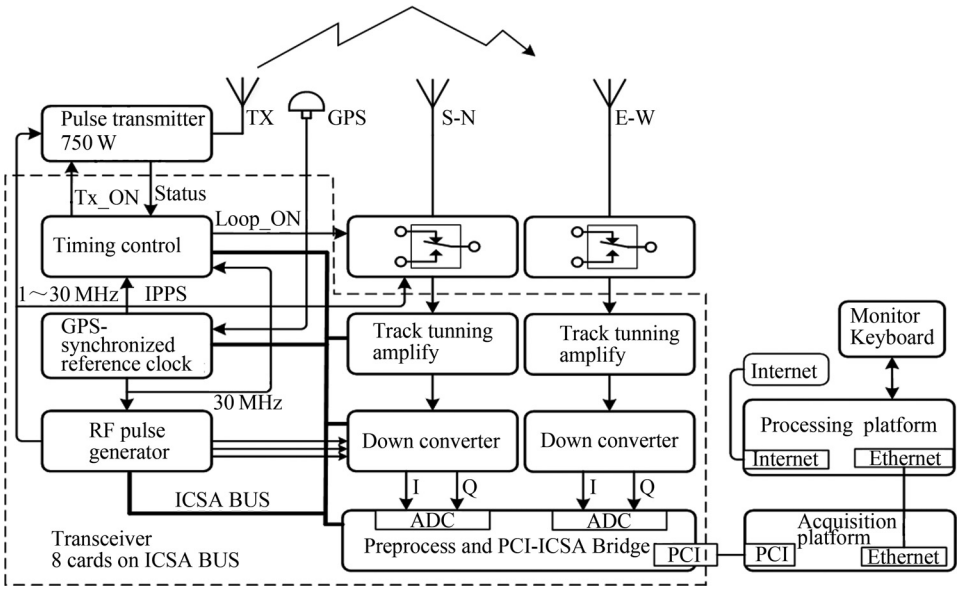


图 1 PDI2 数字测高仪系统组成

Fig. 1 Block diagram of PDI2 digital ionosonde

噪高动态范围射频组件为关键器件, 将 1~30 MHz 的高频回波信号变换为便于处理的基带信号. 预处理与总线接口模块由 FPGA, A/D 转换和 PCI 接口芯片等组成, 完成数据采集、脉冲压缩运算和 PCI 总线接口与通信等功能.

1.1.3 发射机

发射机由射频驱动、射频放大、阻抗匹配、无源滤波、射频功率检测和匹配测量等部分构成, 采用自动信号检测与匹配技术, 使发射天线在整个系统工作频段具有较好的功率均衡和阻抗匹配, 从而在较小的折合偶极子天线上获得较好的射频发射效果.

1.1.4 天线系统

PDI2 数字测高仪采用 1 发 2 收天线系统. 发射天线通常采用高度 4~9 m, 长度为 28 m 的双线折合偶极子天线, 最低可支持低至 4 m 高度的折合偶极子天线, 接收天线通常采用 2 个正交排列的高度 3~4 m、长度 28 m 的双线折合偶极子天线.

1.2 工作原理

为了便于临时安装进行流动观测, PDI2 数字测高仪系统采用架设高度低和易于安装的双线折合偶极子天线, 其比现有数字测高仪通常采用的 30~40 m 高的菱形或三角形发射天线尺寸和占地面积大为减小. 小型发射天线的应用通常使电离层回波信号有较大幅度的减弱, 特别是在 1.0~4.0 MHz 的低频端尤为严重, 这导致电离层频高图质量大大下降. 为解决这一技术难题, PDI2 数字测高仪除了采用相位编码脉冲压缩、射频干扰消除 (RFIM) 和相干积分等技术以外 [8−10], 还专门研发窄带跟踪调谐放大、发射信号功率自动均衡和宽带匹配等技术, 同时针对电离层回波信号开发了高效信号处理方法. 这些技术保证了 PDI2 数字测高仪在小型天线系统下能快速获得质量较好的电离层频高图. 此外, 系统通过脉冲复用技术提高探测速度, 通过频率交错技术获取高分辨率的多普勒电离层频高图. 表 1 为 PDI2 数字测高仪的主要性能指标.

2 观测工作模式设计与实现

为了便于灵活设置工作参数和观测模式, PDI2 数字测高仪采用模块化设计, 并使用高速微处理器和可编程逻辑器件对底层硬件进行控制, 使所有运行参数均可由上位机控制平台进行配置. 基于系统灵活的软硬件结构, 可根据电离层探测需要, 开发各种探测模式. 目前该系统有三种主要工作模式.

2.1 频高图模式

频高图模式是 PDI2 数字测高仪的主要探测模式. 在该模式中, 每个频率的探测过程被分解为若干个探测脉冲, 每个探测脉冲的工作流程分为 t_0~t_4 四个阶段, 各个阶段的软硬件参数均能够以频率为区分标志进行独立设置, 使得系统工作参数能够灵活设置, 探测脉冲时序如图 2 所示.

第 1 阶段 (t_0~t_1) 探测准备. 在此阶段 ICSA 总线上各个功能模块根据本次脉冲的频率、编码、码元宽度、增益等信息对各自板上的硬件进行设置.

表 1 PDI2 数字测高仪主要性能指标

Table 1 PDI2 specifications

参数	性能指标
频率范围/MHz	1.0~30.0
接收带宽/kHz	70
接收灵敏度/dBm	−120
动态范围/dB	60 (瞬态) 120 (瞬态 + 调节)
扫频步进/kHz	25, 50, 100 (或自主设定)
脉冲重复频率/Hz	100, 200 (或自主设定)
编码方式	16 (位互补码, 13 位巴克码或自主设定)
码元宽度/μs	33.3 (或自主设定 10~100)
发射峰值功率/W	750
高度范围/km	80~1200
高度分辨率/km	2.5, 5.0
相干积分次数	2^n, $n = 0$~10
多普勒分辨率/Hz	0.0125~12.5
工作模式	频高图模式 (扫频、定频和任意频率图案)、高分辨率多普勒频高图模式、斜测模式等
主机尺寸/cm	50×40×55 (宽 × 高 × 深)
主机重量/kg	40
系统功耗/W	150 (待机), 220 W (探测)
天线系统	1 发 2 收, 采用双线折合偶极子天线. 其中 1 根发射天线高 4~9 m, 长度 28 m; 2 根接收天线正交排列, 天线高度 3.5~4 m, 长度 28 m; 天线场地约 1000 m^2

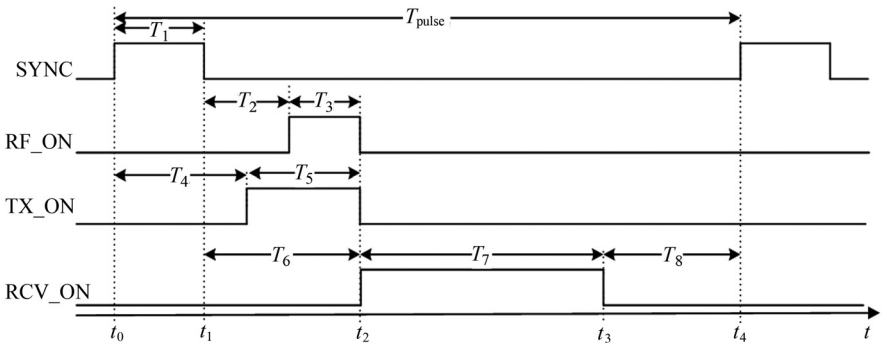


图 2 频高图模式探测脉冲时序

Fig. 2 Timing diagram of detecting pulse under ionogram measuring mode

第 2 阶段 (t_1~t_2) 射频编码脉冲发射. 在此阶段根据射频脉冲功放的特性参数, 提前给出门控开通信号, 然后射频脉冲发生器输出的射频编码脉冲信号经放大后馈到发射天线. t_3 是射频编码脉冲的时间长度, 由设定的编码长度和码元时长决定.

第 3 阶段 (t_2~t_3) 回波信号接收. 在 t_2 时刻关闭射频信号和射频功率放大器门控信号, 接着打开接收开关让射频回波进入信号处理电路, 同时数据采集电路开始持续采集 t_7 时长. 探测高度窗口由所设定的 t_7 时长决定. 在此期间工作的接收系统前端电路采用窄带跟踪调谐放大技术, 对带内回波信号进行放大并对带外干扰进行抑制, 这有效提高了接收系统的灵敏度和抗干扰能力.

第 4 阶段 (t_3~t_4) 后续参数配置. 在此阶段时序控制单元从上位机系统下载的频高图探测参数中解析出下一个脉冲的频率、编码等所有工作参数, 并在 t_4 时刻以前将这些参数以广播的方式向 ICSA 总线上的所有从设备发出, 然后等待下一个探测脉冲的启动时刻 t_4 到来.

为了实现 PDI2 数字测高仪系统便于移动、参数灵活和测量快速的目标, 系统采用的主要技术如下.

(1) 通过对系统发射机与发射天线一体化设计, 实现发射系统的功率均衡和信号匹配.

(2) 基于数字频率合成产生频率及相位灵活控制的射频和参考信号, 配合频率表设计方案, 实现线性扫频、对数扫频和定频探测, 并可按任意频率点扫描工作, 满足各种频高图模式扫频方式的设计.

(3) 采用 16 位互补双码脉冲压缩编码与脉冲复用, 射频干扰消除和极化数字分离等技术, 有效提高系统接收信号灵敏度、抗干扰和快速测量能力.

提高数字测高仪电离层频高测量速度, 对于观测研究电离层扰动和快速变化具有重要意义, 也是现代数字测高仪发展的一个重要方向. PDI2 数字测高仪采用互补码脉冲复用和软件区分极化等方法来提高电离层频高测量速度.

互补码具有零旁瓣噪声的优点, 在现代数字测高仪中得到普遍应用 *. 但是互补码需要发射两次脉冲才能得到一个消除了旁瓣的脉冲数据, 速度比单脉冲方式慢了一倍, 时序如图 3(a) 所示. 针对该问题, 本文采用脉冲复用方法, 原理如图 3(b) 所示, 即当前脉冲利用上一个脉冲的数据进行互补压缩运算消除旁瓣, 得到本次探测数据, 当次脉冲的数据同时用于消除下一个脉冲的旁瓣. 因此 N 次探测需发射的脉冲数从 $2N$ 降为 $N+1$, $N \geqslant 16$ 时 (数字测高仪常用的累积次数) 速度快了将近一倍, 与单码方式相当.

在 O 波与 X 波的分离上, DPS4D 数字测高仪等采用分时分离方法, 即发射两次圆极化波, 利用正交接收天线先后接收左旋信号和右旋信号完成 O 波和 X 波的分离. 在 PDI2 数字测高仪中, 采用单天线发射线极化波的方式. 由于地球电离层的色散特性, 该极化波被分裂成为 O 波和 X 波. 因此, 正交的 2 个接收天线同时收到 O 波和 X 波信号, 将这 2 路信号接收到计算机之后, 采用数字分析方法一次性将 O 波和 X 波分离出来. 因此, 只需要发射一次脉冲即可完成 O 波和 X 波的分离, 比分时分离方法的速度快一倍.

由上述分析可知, 积分次数、频率点数、脉冲周期相同时, PDI2 数字测高仪探测速度是国际先进

*http://www.digisonde.com/dps-4dmanual.html

的 DPS4D 数字测高仪的 4 倍. 此外, 系统通过采用窄带跟踪调谐放大、射频干扰消除和发射系统功率与信号匹配等技术, 在相同的天线条件下可使用更少的积分次数 (通常是 8 次) 达到较好的探测效果.

2.2 高分辨多普勒频高图模式

快速高分辨率测量不同频率的多普勒频移, 对于观测研究电离层运动、不同尺度电离层扰动与传播以及其高度演变特性具有重要作用 [11−15]. 但在现代数字测高仪中, 如 DPS4D 数字测高仪, 常规测量的电离层频高图中每个频率点的多普勒分辨率很低, 通常为 0.5 Hz 左右, 如果需要获得高分辨率的回波多普勒频移, 探测频率点通常为 2∼4 个 (称为漂移探测模式)[16], 这是因为在常规使用的逐频点扫描探测方法中, 提高多普勒频移分辨率与降低探测时间存在矛盾. 根据快速傅里叶变换原理, 多普勒分辨率为积分时间的倒数, 如获得 0.05 Hz 的多普勒分辨率, 则每个频点的积分时间为 20 s, 即每 20 s 探测一个频点. 因此, 对于一张 160 个频点 (1∼17 MHz, 步进 0.1 MHz) 的电离层频高图需要耗时 53.3 min, 而实际观测中一般要求在数分钟之内完成. 在 PDI2 数字测高仪中, 采用频率交错技术解决该矛盾, 以获得具有高分辨率的多普勒频高图. 实际的电离层垂直探测表明, 电离层回波信号的多普勒频移变化范围通常为 ±2.5 Hz, 其多普勒分辨率需优于 0.1 Hz. 因此, 若对每个频点用 5 Hz 的脉冲重复频率进行持续时间 20 s 的探测, 即可获得多普勒分辨率为 0.05 Hz. 动态范围为 ±2.5 Hz 的观测数据. 脉冲重复频率 5 Hz 也即探测脉冲时间间隔 T 为 200 ms, 而有效数据窗口只需要 10 ms. 另外 190 ms 的时间可以完成其他 19 个频点探测, 即 20 s 内完成 20 个频点的高精度多普勒探测, 每个频点平均耗时 1 s, 速度比原来提高 20 倍, 时序如图 4 所示. 例如一张 160 个频点的电离层频高图, 耗时只需 160 s 即 2.67 min. 也就是说, 在 PDI2 数字测高仪中, 获取一次频率范围 1∼17 MHz、步进频率间隔 0.1 MHz、160 个频点、多普勒分辨率 0.05 Hz 的多普勒频高图, 测量时间小于 3 min, 完全满足电离层探测研究的要求.

基于 PDI2 数字测高仪灵活的系统参数控制能力, 根据上面介绍的探测方式, 通过设计频率交错扫描方式, 并配合相应的数据存储和分析技术, 提出了一种高分辨率多普勒频高图模式, 并在实际探测中获得较好应用.

2.3 斜测模式

电离层测高仪的斜向探测方式一般采用一台电

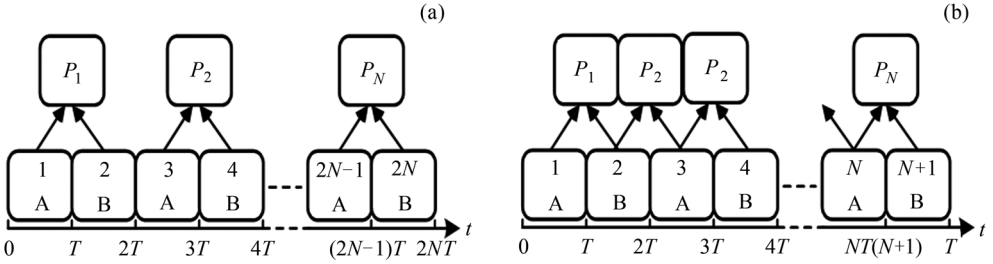


图 3 数字测高仪探测脉冲组合. (a) 常规数字测高仪互补码探测. (b) PDI2 数字测高仪互补码脉冲复用探测 (1 A 表示第 1 个脉冲使用 A 码发射, P_N 表示经过压缩叠加后得到第 N 个脉冲数据)

Fig. 3 Pulse groups of ionogram. (a) Pulse groups of normal ionosonde, (b) PDI2 ionosonde. (1 A shows that the first pulse is transmitted using code-A, and P_N shows that the Nth pulse data is obtained by means of pulse compression algorithm)

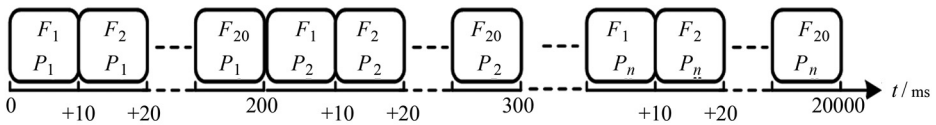


图 4 PDI2 数字测高仪频率交错探测技术时序

Fig. 4 Timing diagram of frequency multiplexing of PDI2 ionosonde

离层测高仪发射扫频信号, 另外一台相距数百公里到上千公里的电离层测高仪同步接收信号, 获得不同频率信号在收发中点反射的电离层回波, 得到不同频率信号回波时延, 得到斜测电离层频高图, 进而获得反射点处的电离层参量. 由于受多跳传播等多种因素的影响, 电离层斜向探测信号路径复杂难以确定, 电离层斜向探测主要用于电离层传播信道的监测和分析研究. PDI2 数字测高仪采用 GPS 卫星信号时间同步, 实现收发系统的探测和接收, 获得斜测电离层频高图. 发射站和接收站的 PDI2 数字测高仪均采用各自的 GPS 接收机秒脉冲信号进行同步, 系统专门设计开发了 GPS 同步时钟模块. 该模块以 GPS 时钟为参考源, 利用 GPS 秒脉冲无累积误差的特性, 对本地高稳定度的恒温晶振进行调校, 得到准确度优于 1.0×10^{11} 的基准时钟源, 从而使收发台站之间的参考时钟频差满足高频多普勒测量误差要求. 同时, 以该基准时钟源复现 UTC 时间基准, 复现的秒脉冲和时钟用于同步控制, 从而克服了直接使用 GPS 接收机秒脉冲带来偶发同步失败的问题.

3 观测实验结果

PDI2 数字测高仪研制过程中, 先后在中国有关台站和临时场地开展观测实验, 完善系统功能和观测模式, 得到了一些实验结果.

3.1 小型天线电离层测高仪探测结果对比

为了验证 PDI2 数字测高仪在小型天线条件下的观测效果, 在中国科学院地质与地球物理研究所北京台站, 利用该设备与美国 DPS4D 数字测高仪开展了同站对比观测实验. 观测中 PDI2 数字测高仪和 DPS4D 数字测高仪均采用小型化天线. 其中, DPS4D 数字测高仪的发射天线塔高为 15 m, 采用正交双通道 28 m 长折合偶极子天线, 接收天线为 4 个正交环形有源天线, 正三角形天线阵边长为 27 m, 收发天线的尺寸均为 DPS4D 数字测高仪标准配置的一半左右 [1]. PDI2 数字测高仪的发射天线高 9 m, 接收天线高 3.5 m. 发射和接收天线均采用 28 m 长折合偶极子天线. DPS4D 数字测高仪峰值发射功率 300 W, 探测一次需 3 min. PDI2 数字测高仪峰值发射功率 600 W, 探测一次用时小于 1 min. 对比观测时 PDI2 数字测高仪提前 1 min 开始观测, 避免两台数字测高仪信号互相干扰. 由图 5 可见, 同样在采用小型化天线的条件下, PDI2 数字测高仪回波信号质量明显优于 DPS4D 数字测高仪. PDI2 数字测高仪获取的电离层频高图中, F 区一次回波比较清晰和连续, 二次回波也较为明显. 此外, 图 5 给出的 DPS4D 数字测高仪的电离层频高图中几乎没有 E 层和 Es 层回波, 而 PDI2 数字测高仪电离层频高图中 E 层和 Es 层回波也较为清晰.

3.2 邵阳临时野外站连续观测结果

采用 PDI2 数字测高仪, 在湖南邵阳建立了临时野外观测点. 发射和接收天线均采用 28 m 长折合偶极子天线, 其中发射天线高 4 m, 相互正交的两个接收天线高 3 m. 图 6 为 2017 年 2 月 11 日邵阳站 PDI2 数字测高仪观测结果, 这里给出整小时电离层频高图. 由图 6 可以看到, 无论是白天还是夜间, PDI2 数字测高仪均能探测到清晰的电离层频高图. 图 7 为邵阳站电离层频高图标定后得到的 2017 年 3 月电离层 F_2 层临界频率日变化曲线, 其结果非常连续和平滑, 这表明 PDI2 数字测高仪具有良好的观测效果.

3.3 电离层快速变化和扰动探测

现代数字测高仪常规垂测通常每 15 min 执行一次. 在国际地球物理日联合观测等情况下采用加密观测, 每 5 min 探测一次, 这种时间分辨率的探测数据对电离层中快速变化和扰动的捕捉能力较弱. PDI2 数字测高仪具备连续每 1 min 探测一次电离层频高图能力, 满足电离层快速变化和扰动探测的需要. 图 8 给出 PDI2 数字测高仪连续每分钟探测模式观测到的一次电离层快速扰动发生时电离层频高图描迹变化过程. 从图 8 可以看出, 探测区域内的扰动现象从开始到结束约持续 7 min, 而常规观测数字测高仪采用每 15 min 探测一次, 无法完整捕捉到上述电离层频高图. 这种快速扰动探测将在电离层 F 层不均匀体初始 “种子” 过程研究中发挥重要作用 [17].

3.4 高分辨率多普勒频高图

采用以上频率交错技术实现的高分辨多普勒频高图探测模式, 开展多频率高分辨率多普勒频高图观测. 在该观测模式中, 脉冲重复频率 100 Hz, 在交错系数等于 10 的情况下, 频点等效采样率 10 Hz, FFT 点数 128 点, 此时的频高图多普勒频谱分辨率可达 0.078 Hz. 设置频率范围 2~ 12 MHz, 步进 0.05

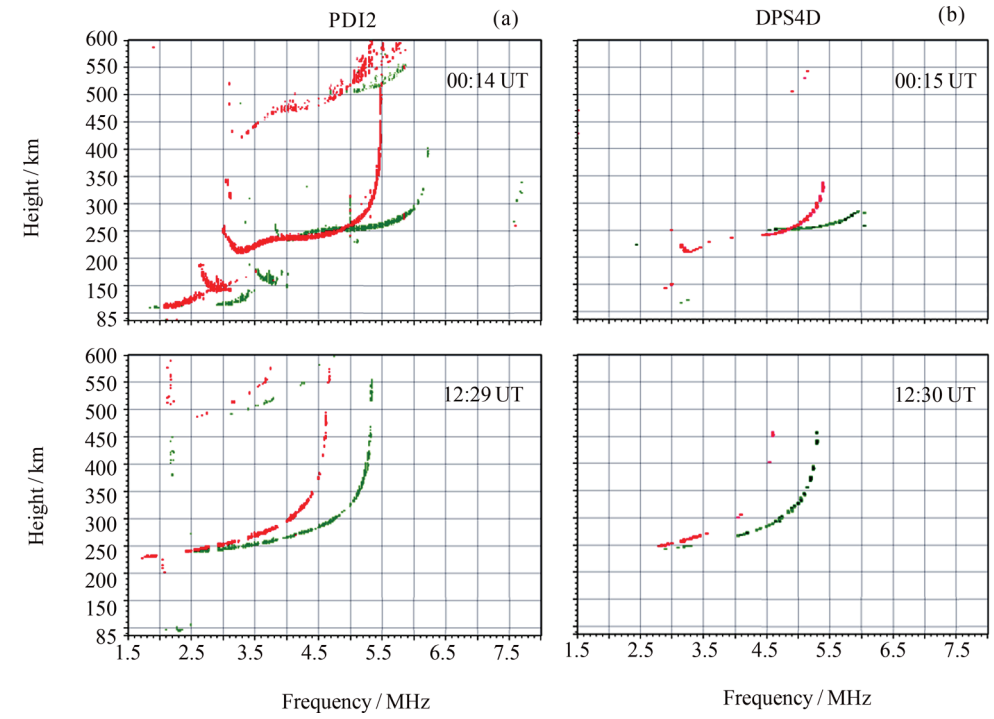


图 5 2017 年 9 月 26 日北京台站 PDI2 与 DPS4D 数字测高仪电离层频高观测结果对比

Fig. 5 Comparison of the ionograms recorded by PDI2 ionosonde and DPS4D ionosonde on 26 September 2017 at Beijing observatory

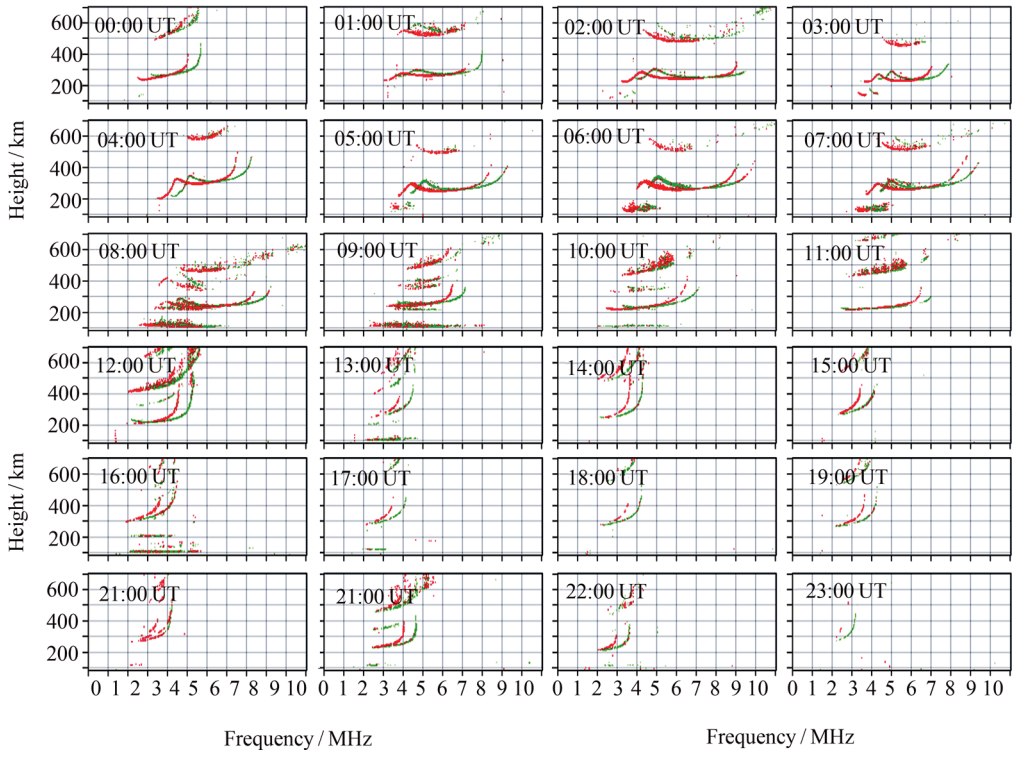


图 6 PDI2 数字测高仪 2017 年 2 月 11 日在邵阳临时站连续观测的电离层频高图

Fig. 6 Ionograms observed by the PDI2 ionosonde on 11 February 2017 at Shaoyang temporary station

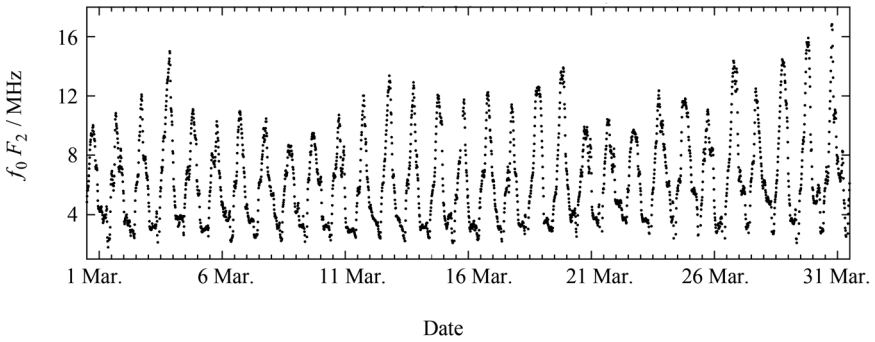


图 7　2017 年 3 月 PDI2 数字测高仪在邵阳 (26.9°N, 111.5°E) 临时站观测得到的电离层临界频率 (f_0F_2)

Fig. 7　Ionospheric critical frequency (f_0F_2) derived from PDI2 ionosonde measurement in March 2017 at Shaoyang temporary station (26.9°N, 111.5°E)

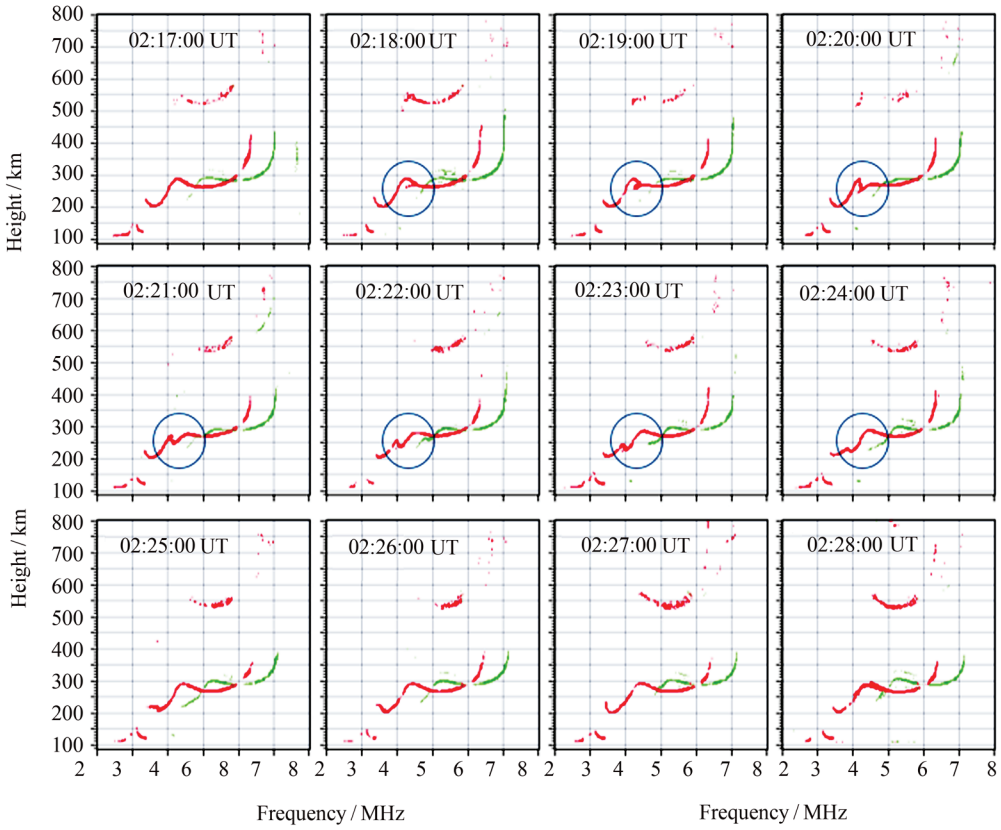


图 8　2017 年 9 月 25 日 PDI2 数字测高仪在北京地区探测的电离层快速扰动频高图

Fig. 8　Fast ionospheric disturbance recorded on 25 September 2017 by PDI2 ionosonde at Beijing

MHz, 频率个数 220, 耗时 284 s.

对电离层频高图中 O 波回波采用 FFT 分析计算多普勒频移, 如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 在虚高处 280~350 km 的 F 层, 存在来自两处电离层反射信号: 一处向上运动, 多普勒频移为负; 另一处向下运动, 多普勒频移为正. 高分辨多普勒测量清楚地区分和给出了不同电离层反射处的电离层运动状态, 为分析研究电离层快速扰动随时间和高度的演变过程提供了一种有效的探测手段.

3.5　斜测电离层频高图

利用 PDI2 数字测高仪的斜测模式, 在相距约 1100 km 的武汉和北京开展了电离层斜向探测实验.

发射站在武汉, 接收站在北京, 2 台数字测高仪采用 GPS 信号进行时间和频率同步. 图 10 分别给出了白天和夜间的斜测电离层频高图, 时间分别是 2017 年 12 月 6 日 02:45:00 UT (10:45 LT) 和 19:45:00 UT (03:45 LT). 从主描迹可以看出, 白天最大可用频率可达 13.6 MHz, 晚上则降到 6 MHz 左右. 两幅图均可以

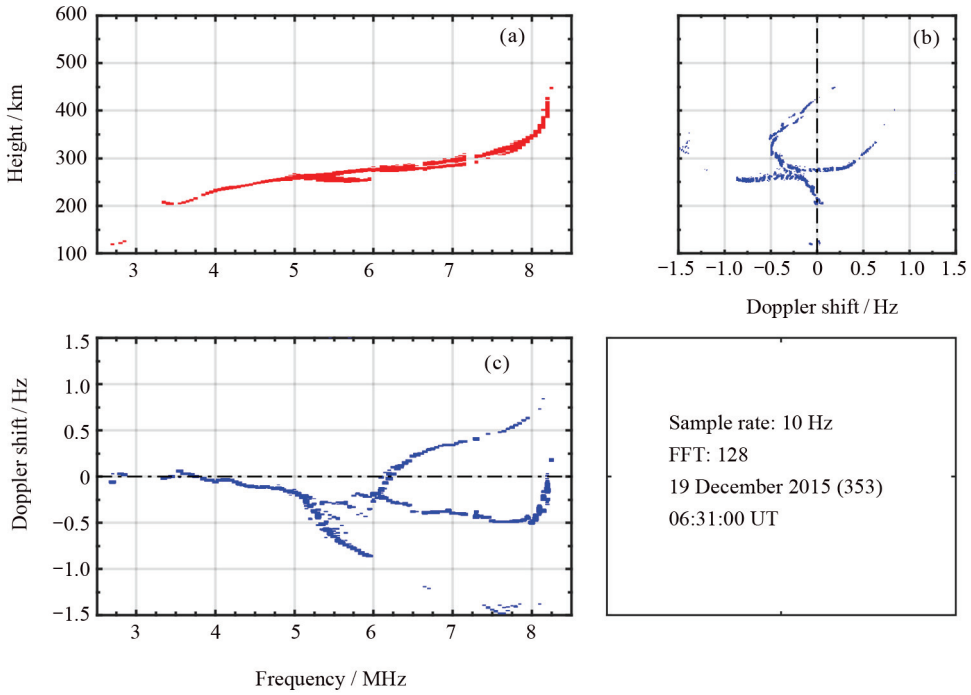


图 9 武汉站采用高分辨率多普勒频高图模式观测的电离层运动与变化. (a) 回波 O 波的电离层频高图, (b) 多普勒频移随高度的变化, (c) 多普勒频移随频率的变化,

Fig. 9 Ionospheric movement and variation detected by PDI2 at Wuhan with high resolution Doppler ionogram mode. (a) The trace of O wave in ionogram, and corresponding Doppler shift variation with virtual height (b) and frequency (c), respectively

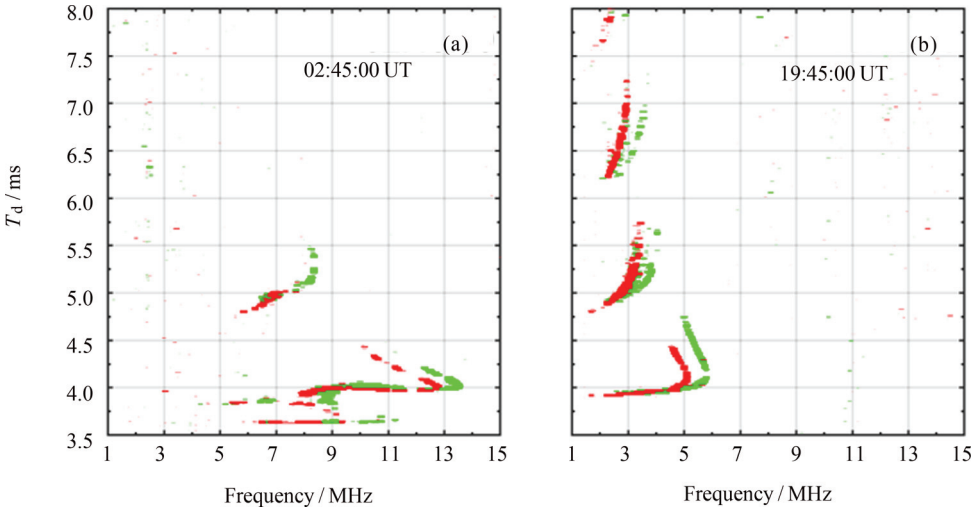


图 10 2017 年 12 月 6 日武汉到北京之间的斜测电离层频高图 (红色描迹为 O 波, 绿色描迹为 X 波)

Fig. 10 Ionograms recorded on Dec. 6, 2017 with oblique sounding mode between Wuhan and Beijing (Red and Green traces represent the Ordinary and Extra-ordinary waves, respectively)

观察到高波和低波描迹以及低波路径基本与频率无关等斜测电离层频高图基本特性.

4 结论

针对电离层测高仪流动观测和快速扰动探测需要, 提出并研制 PDI2 数字测高仪. 根据电离层高频探测特点开发了低噪窄带跟踪滤波、射频干扰抑制、互补编码脉冲复用、频率交错和发射信号均衡与匹配等新技术. 研制系统具有可流动布站观测, 参数灵活捷变和适合快速电离层扰动探测等能力. 此外, 开发了任意频率扫频方式频高图, 高分辨多普勒频高图和斜向探测等多种工作模式. 其主要特点如下.

(1) 系统安装架设方便, 支持最低架设高度 4 m, 长度 28 m 的折合偶极子天线, 收发天线占用场地不大于 1000 m^2. 因此, PDI2 数字测高仪既可像现有的电离层测高仪在固定台站工作, 又能灵活方便的临时流动观测, 针对特定科学目标进行空间布阵观测.

(2) 系统参数可以灵活设置和快速捷变, 具有灵活配置频率扫描方式的频高图模式, 采用频率交错方式的高分辨多普勒频高图模式和收发双站时频同步的斜向探测模式, 也可根据需要开发新的探测模式, 从而满足不同科学目标对电离层探测方式的需求.

(3) 系统探测速度快, 可长期连续工作给出时间分辨率优于 1 min 的电离层频高图, 获得多频率多普勒频移变化曲线, 用于监测电离层扰动等快速变化.

在北京、武汉、邵阳和三亚等地开展的流动或长时间连续观测表明, PDI2 数字测高仪工作稳定、性能可靠、数据质量高, 具有较高的时间与多普勒分辨率以及连续观测能力, 可为观测研究电离层扰动等各种暂态现象、电离层与低层大气和磁层等耦合过程提供了一种有效的探测手段.

致谢 中国科学院地质与地球物理研究所空间环境探测实验室北京台站、武汉台站和三亚台站观测人员在 PDI2 数字测高仪试验调试和运行期间提供了帮助和支持. DPS4D 数字测高仪的数据来源于国家地球系统科学数据共享平台 (地球物理科学数据中心).

参考文献

[1] BIBL K. 60 years of ionospheric measurements and studies [J]. *Adv. Radio Sci.*, 2004, **2**: 265-268

[2] KATO H. Ionospheric observation and observation information processing system [J]. *J. Commun. Res. Lab.*, 2002, **49**(4): 135-142

[3] REINISCH B W, GALKIN I A, KHMYROV G M *et al.* The New Digisonde for Research and Monitoring Applications [J]. *Radio Sci.*, 2009, **44**: RS0A24. DOI:10.1029/2008RS004115

[4] MACDOUGALL J W. Canadian Advanced Digital Ionosonde Users Manual [R]. Scientific Instrumentation Ltd, 1997

[5] CHEN G, ZHAO Z, LIA S, *et al.* WIOBSS: The Chinese low-power digital ionosonde for ionospheric backscattering detection [J]. *Adv. Space Res.*, 2009, **43**(9): 1343-1348

[6] WANG S, CHEN Z, ZHANG F, *et al.* A new design for digital ionosonde [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 849-857 (王顺, 陈紫微, 张锋, 等. CAS-DIS 数字电离层测高仪系统研制 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(6): 849-857)

[7] LI G, NING B, ABDU M A, *et al.* First observation of presunset ionospheric F region bottom-type scattering layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 2017, **122**: 3788-3797

[8] REINISCH B W, GALKIN I A, KHMYROV M, *et al.* Advancing digisonde technology: the DPS-4D [C]. AIP Conference Proceedings, 2008, **127**: 974. DOI: 10.1063/1.2885022

[9] SUN Z, LIU X, ZHAO B. Application of complementary codes in ionoshpere sounding [J]. *Sci. Tech. Eng.*, 2011, **11**(21): 5047-5052

[10] CHEN G, ZHAO Z, Zhu G, *et al.* HF radio-frequency interference mitigation [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, **7**(3): 479-482

[11] MORGAN M G. Locating TID sources with a north-south chain of rapid-run ionosondes in western Québec [J]. *Radio Sci.*, 1983, **18**(6): 1066-1076

[12] KOZLOVSSKY A, TURUNEN T, ULICH T. Rapid-run ionosonde observations of traveling ionospheric disturbances in the auroral ionosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2013, **118**(8): 5265-5276

[13] KENNETH J W L. Ionospheric observations made by a time-interleaved Doppler ionosonde [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **42**: 1218-1230

[14] YUAN Z, NING B. Acquirement and analysis of Doppler ionogram with height accuracy in the ionogram mode from Digisonde256 [J]. *Radio Sci.*, 2004, **39**: RS2021. DOI: 10.1029/2002RS002779

[15] ZHU Z, NING B. Study of disturbance observation mode in ionoshperic vertical sounding [J]. *Chin J. Radio Sci.*, 2007, **22**(5): 760-766

[16] MORRIS R J, MONSELESAN D P, HYDE M R, *et al.* Southern polar cap DPS and CADI ionosonde measurements: 2. F-region drift comparison [J]. *Adv. Space Res.*, 2003, **33**: 937-942

[17] LI G, NING B, ABDU M A, *et al.* Precursor signatures and evolution of post-sunset equatorial spread-F observed over Sanya [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**. DOI: 10.1029/2012JA017820.