0254-6124/2009/29(4)-389–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhu Zhengping, Ning Baiqi, Sun Fenglou, Chen Kun. Study of passive receiving observation mode for ionospheric digital ionosonde. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(4): 389∼396

电离层数字测高仪被动接收观测模式研究*

朱正平[1] 宁百齐[2] 孙奉娄[3] 陈 锟[1]

[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)

[3](中南民族大学等离子体物理研究所)

摘 要 利用 CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) 电离层数字测高仪平台, 实现了新的电离层数字测高仪被动接收观测模式. 利用新开发的观测模式, 在观测台站开展了一系列实验观测研究, 经过信号处理和信息提取, 获得了电离层特征参量 f_0F_2 回归方程, 高频信道背景噪声分布, 电离层 D 层对电波的吸收等电离层探测信息. 实验观测结果表明, 所获取的 f_0F_2 与主动探测结果相关性在 0.84 以上, 高频信道背景噪声分布以及电离层 D 层吸收状况与电离层实际分析结果相吻合.

关键词 被动接收模式; 电离层测高仪; 电离层观测模式

中图法分类号 P 353

Study of Passive Receiving Observation Mode for Ionospheric Digital Ionosonde

ZHU Zhengping[1] NING Baiqi[2] SUN Fenglou[3] CHEN Kun[1]

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

[2](*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences*)

[3](*Institute of Plasma Physics, South-Central University for Nationalities*)

Abstract In order to study ionospheric passive sounding method and technology, this paper realizes a new ionospheric passive sounding mode on the CADI platform. That is to say, this paper improves scan frequency receiving function of CADI's receiver, receives various space signals by using the receiver, extracts ionospheric characteristic parameters f_0F_2 and high frequency channel property parameters. The proposal and realization of the new passive sounding mode based on the ionospheric digital ionosonde for the first time not only alleviates the congestion problem of the ionospheric high frequency band, but also provides an economical and effective method for the ionosphere and high frequency channel monitoring. The paper will have an extended application perspective in the space environment monitoring and forecasting.

Key words Passive receiving mode, Ionospheric digital ionosonde, Ionospheric observation mode

---

* 国家自然科学基金项目 (40774089, 40574072) 和湖北省自然科学基金项目 (2008CDB045) 共同资助

2008-12-26 收到原稿, 2009-04-30 收到修定稿

E-mail: zpzhu2007@sina.com

1 引言

电离层数字测高仪一般均工作在主动探测方式, 即通过垂直发射扫频高频脉冲波, 当所发射的电波频率等于电离层等离子体频率时, 即 $f = f_{\mathrm{p}}$, 信号就会发生反射. 然后在地面测量从电离层反射的回波, 记录回波到达接收机的时间延迟, 获得各频率点电离层的虚高, 也就是通常所说的电离层频高图. 由于数字测高仪要主动发射高频脉冲波, 因此这种探测方式称为主动探测. 电离层数字测高仪的这种主动探测方式具有探测参量丰富准确, 探测方法和技术成熟等优点. 特别是 20 世纪 90 年代随着微电子技术 (DDS 和 DSP) 和网络通信技术的发展, 集成度更高、功率更小、功耗更低、速度更快、精度更高、功能更多且能实时联网的现代电离层数字测高仪被研制出来并投入使用[1]~[3], 伴随着这些集成了先进电子技术的高级电离层数字测高仪的问世, 一些新的垂直探测观测模式也被开发出来并进行了实地观测研究[4]~[6]. 这些新观测模式的研究开发, 一方面大大扩展了电离层数字测高仪的探测能力, 另一方面也可以获得有关电离层用常规探测方法所得不到的更多有用观测信息.

电离层数字测高仪的主动探测方式目前仍是世界上电离层地面无线电探测最常使用的方法之一. 但需要指出的是, 电离层数字测高仪的这种主动探测也会产生如下问题:

第一, 需要较大功率的发射设备, 因此增加了探测系统的成本和设备的复杂性;

第二, 这种探测方法所发射的探测信号在本已拥挤不堪的高频段又产生了新的干扰源, 会对其他短波信道产生影响.

因此, 如何利用来自电离层反射的本已存在的各种空间信号资源, 进行电离层被动探测一直是为人们感兴趣并富有挑战的课题.

利用空间无线电信号开展电离层的被动探测, 很多学者从 20 世纪 80 年代开始进行了大量的实验研究, 并取得了很多有价值的成果. 这些成果在电离层高频信道的频率选择、优化及预测等方面发挥了重要作用. Jowett 等[7] 在 1989 年研制了一种线性调频信号 (chirp 信号) 接收机, 用于接收 chirp 发射机所发射的线性调频连续波信号. 世界上当时处于工作状态的 chirp 发射机有 40 多个, 通过对不同发射机所发射的 chirp 信号的检测和处理, 大大提高了高频信道传播参数 (最大可用频率 MUF 和最小可用频率 LUF 等) 的预测精度, 在高频通信管理中发挥了重要作用. Masrani[8],[9] 等在 1990 年提出了一种不用发射高频探测信号选择最佳高频通信频率的被动探测方法, 并进行了一系列相应实验. 结果表明, 这种方法在消除高频通信多径效应方面有重要应用. 之后的 1994 年, 他们又提出了无线电信号的被动探测用于确定高频通信通道传播条件的一种实验研究方法. 研究主要集中在三个方面, 即无线电信号的被动监测接收方法, 应用观测信息改善高频信道离线预测模式, 以及将模式预测结果应用于自动高频无线电系统中. 实验采用的设备是由 286 IBM-PC 机、TMS320C25 数字信号处理板及 ICOM ICR71E 无线电接收机组成, 所监测的信号包括广播服务信号, 频谱占有测量中的噪声信号, 标准时间信号等. Piggin 等[10] 在 1996 年提出了一种称之为被动频率监测 (PFM) 方法用于改善高频信道频率管理. 这种探测方法无需发射高频探测信号, 可以较为精确地评估信道的最大可用频率 (MUF) 和信噪比 (SNR) 等参量. 系统所接收的是已知广播台所发射的调幅信号和短波无线电信号. 此外, 很多国外学者[11]~[13] 也使用高频无线电信号的被动探测在高频信道的幅度分布、频谱功率测量、电离层吸收测量、高频干扰测量等方面进行了大量的探索性研究工作, 取得了一些很有价值的成果. 在中国, Zhou[14] 曾利用高频接收机扫频接收高频噪声, 通过分析计算这些环境噪声的所谓干扰重心频率参量, 寻求其与电离层特征参数 f_0F_2 的相关关系, 并开展了一系列实验观测, 取得了一些有意义的结果.

为了探索电离层被动探测方法和技术, 我们通过借鉴国际上有关电离层无线电信号被动探测方面的研究成果, 在电离层数字测高仪平台上开发了一种电离层被动接收观测模式. 这不仅对研究发展电离层被动探测实用方法和技术具有重要作用, 同时对于提高电离层数字测高仪的探测能力, 减少电离层高频信道的噪声污染等都具有十分重要的意义.

本文研究所用的数字测高仪是 CADI 数字测高仪. 它使用了基于 PC 机总线结构的硬件设计方式和直接数字频率合成 (DDS) 技术, 使得它的硬件结构高效开放, 系统控制和数据端口明确, 信

号流程清晰. 这种设计特点正好为我们进行电离层被动探测研究提供了一个理想的试验平台. 本文利用 CADI 数字测高仪为实验平台, 开发实现了一种新的电离层被动接收观测模式, 通过接收机扫频接收各种空间信号, 经过数据处理和信息提取, 获取电离层特征参数和高频信道特性参数等有用信息, 开展对电离层的观测研究.

2 CADI 数字测高仪被动接收模式

CADI 数字测高仪系统被动接收原理如图 1 所示, 模式工作流程如图 2 所示. 这种模式与垂直探测中其他观测模式最大的不同在于发射机处于关闭状态, 并不发射射频脉冲信号; 接收机仍然是扫频工作, 但所接收的并不是常规观测中测高仪本身所发射而经过电离层反射的射频信号, 而是来自其他射频源的各种空间信号.

实验观测时, 为了不影响 CADI 数字测高仪日常频高图模式的正常观测, CADI 数字测高仪的模式运行软件 CADIRUN2K 同时运行于两种工作模式, 即频高图模式和被动接收模式. 因此, 新开发的观测模式的运行与观测并不影响电离层数字测高仪的日常观测任务, 即 CADI 数字测高仪在获取常规数字频高图的同时, 也可以获得新观测模式下各种新的探测信息. 频高图模式中, 发射扫频的射频编码脉冲, 发射脉冲重复频率是 40 Hz, 每个频率发射 8 个脉冲, 接收机带宽 35 kHz, 观测的时间分辨率为 15 min. 被动接收模式中, 不发射探测脉冲, 接收机带宽 35 kHz, 观测的时间分辨率是 60 s, 即每 60 s 被动接收观测模式运行一次, 相应地进行一次扫频数据接收.

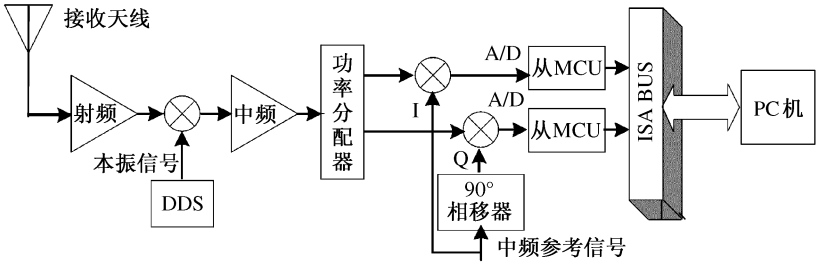


图 1 CADI 系统被动接收原理

Fig. 1 Passive receiving principle schematic diagram of CADI

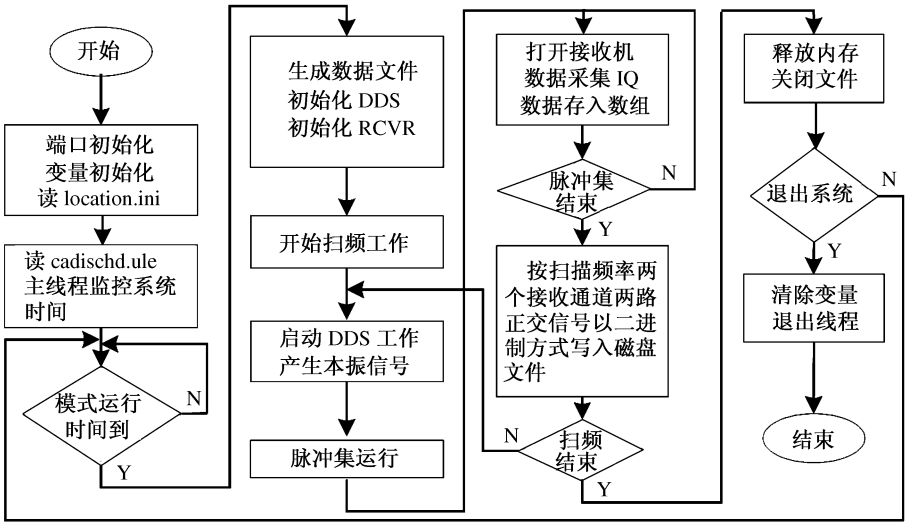


图 2 被动接收模式应用程序流程

Fig. 2 Application program flowchart of passive receiving mode

3 被动接收模式中数据处理方法

3.1 获取干扰重心频率, 提取电离层f_0F_2

在这种被动接收探测方法中, 所采集的信号是来自空间的直接或经过电离层传播的各种空间信号. 显然, 在高频波段出现在接收机接收点的信号, 有很大一部分是接收点周围来自各个方向的无数个短波发射源所发射的信号经过电离层传播到达接收点后叠加的总效应. 虽然这些发射源距接收点的距离各不相同, 各自的辐射功率也互不一样, 但它们所发射的信号总要经过电离层介质来传播这一点是共同的. 因此, 接收点处所接收的各个频率点信号能量的大小必定受当时电离层状况的影响. 在反映电离层特性与频率有关的参量中, F_2 层临界频率无疑是很重要的一个. 这样, 为了找到各个频率点信号能量的累积效应, 以便建立与电离层临界频率之间的相关关系, 可以借助于随机过程中数学期望的概念, 引进短波段干扰重心频率的定义. 干扰重心频率, 设 $D(F_i)$ 是均匀地分布在 1∼14 MHz 上的 N 个频率点中第 i 个频率 F_i 上所接收的空间信号能量, $i=0,1,2,\cdots,N-1$, 则称

$$F_{\rm IC}=\frac{\sum\limits_{i=0}^{N-1}F_iD(F_i)}{\sum\limits_{i=0}^{N-1}D(F_i)}$$

为干扰重心频率 (Interference Centroid Frequency, ICF), 定义符号为 $F_{\rm IC}$. 式中, F_i 和 $D(F_i)$ 计算公式分别为

$$F_i=(1+i\times 0.05)\text{MHz},\quad i=0,1,2,\cdots,N-1; \tag{1}$$

$$E_i=I_i^2+Q_i^2,\quad i=0,1,2,\cdots,M-1; \tag{2}$$

$$\overline{E}_k=\frac{\sum\limits_{i=0}^{M-1}E_i}{M},\quad k=0,1,2,\cdots,N-1; \tag{3}$$

$$D(F_i)=\overline{E}_k,\quad k=0,1,2,\cdots,N-1. \tag{4}$$

式 (1) 和 (2) 中的 N 和 M 分别表示扫频个数和每个频率点上所采集的数据点数, 式 (2) 中的 I_i 和 Q_i 是接收回波信号的两个正交分量. 由上述表达式可以看出, 干扰重心频率 ICF 是短波段上各频率点空间信号能量的一阶矩, 是一种以空间信号能量大小为加权因子的频率加权平均值. 测定了各频率点 F_i 上的空间信号能量, 就能较容易得到 ICF. 一旦得到了 ICF, 就可以利用回归方法, 开展干扰重心频率 ICF与临频 f_0F_2 的相关分析.

3.2 高频段内噪声能量分布数据处理算法

对于每一个频率点所接收的 M 对复数据, 分别求取信号能量, 然后求平均值, 信号能量计算公式如下:

$$E_i=N_{{\rm R}i}^2+N_{{\rm I}i}^2,\quad i=0,1,\cdots,M-1; \tag{5}$$

$$E_k=\frac{\sum\limits_{i=0}^{M-1}E_i}{M},\quad k=0,1,\cdots,N-1. \tag{6}$$

式 (5) 和 (6) 中的 M 和 N 分别表示每个频率点所采集的数据点数和扫频个数, 式 (5) 中的 $N_{{\rm R}i}$ 和 $N_{{\rm I}i}$ 分别表示被动接收信号的两个正交分量. 模式每工作一次, 扫频接收多个频率信号, 共可得到这些不同频率的空间信号能量值. 对于每一次扫频, 在每个探测频率点可得到一个信号能量值, 有 N 个频率点将有 N 个信号能量值, k 为扫频次数. 每一次扫频得到的一维矢量表示为

$$\boldsymbol{E}_j=[E_0,\ E_1,\ E_2,\ \cdots,E_{N-1}],\quad j=1,2,\cdots,k. \tag{7}$$

在一个频高图模式周期内, 可以进行 k 次扫频接收, 对应这 k 次接收得到一个空间信号能量矩阵:

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}E_0(t_1) & E_1(t_1) & \cdots & E_{N-1}(t_1)\\ E_0(t_2) & E_1(t_2) & \cdots & E_{N-1}(t_2)\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ E_0(t_k) & E_1(t_k) & \cdots & E_{N-1}(t_k)\end{bmatrix}. \tag{8}$$

在这个矩阵中, 对应于相同的频率点信号能量再分别求平均, 可得到一个一维的信号能量矢量. 这个矢量随世界时变化:

$$\boldsymbol{E}_{\rm UT}=[E_0,\ E_1,\ E_2,\cdots,E_{N-1}]. \tag{9}$$

若以横坐标表示 UT, 以纵坐标表示扫频接收频率 (以 0.05 MHz 为扫频间隔), 以第三维表示空间信号能量值, 则经过上述处理后就可以得到空间信号能量在 UT 时间和扫频频率上的三维分布.

3.3 电离层 D 层对无线电波吸收测量数据处理算法

电离层 D 层对电离层无线电波的吸收主要集中在低频段, 通过选取低频段一段合适的频率范

围 (本文选取 3~6 MHz), 利用接收机扫频接收这段频率范围内来自电离层的空间信号能量, 对这些空间信号能量进行相干积分, 求取的总能量必能反映电离层对电波的吸收状况. 在 UT 时间上分别测量总的相干能量将能够获得电离层 D 层对无线电波吸收随 UT 的分布规律.

数据处理方法是, 对于每一个扫描频率 F_i, 共进行 M 次扫频接收, 每一次接收在 P 个高度上求取信号能量, 得到信号能量矩阵. 对这个信号能量矩阵再求取相对于 F_i 的信号平均能量, 有

$$E_{\mathrm{S}}(t_i,h_j)=S_I^2(t_i,h_j)+S_Q^2(t_i,h_j),\quad i=1,\cdots,M,\quad j=1,\cdots,P. \tag{10}$$

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(F_i)=\begin{bmatrix} E_{\mathrm{S}}(t_1,h_P) & E_{\mathrm{S}}(t_2,h_P) & \cdots & E_{\mathrm{S}}(t_M,h_P)\\ E_{\mathrm{S}}(t_1,h_{P-1}) & E_{\mathrm{S}}(t_2,h_{P-1}) & \cdots & E_{\mathrm{S}}(t_M,h_{P-1})\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ E_{\mathrm{S}}(t_1,h_1) & E_{\mathrm{S}}(t_2,h_1) & \cdots & E_{\mathrm{S}}(t_M,h_1) \end{bmatrix}. \tag{11}$$

$$\overline{E}_{\mathrm{S}}(F_k)=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{P}E_{\mathrm{S}}(t_i,h_j)}{M\times P},\quad k=0,1,2,\cdots,L-1. \tag{12}$$

式 (12) 中 L 表示扫频接收的频率个数. 然后, 再将所选频率范围内的信号平均能量求和, 得到相对于 UT 时 t 的信号总能量:

$$E_{\mathrm{S}}(t)=\sum_{i=0}^{L-1}\overline{E}_{\mathrm{S}}(F_i),\quad t\in\mathrm{UT}. \tag{13}$$

如果上述时间分辨率足够高, 就可以找出这种相干积分与电离层 D 层吸收的关系, 以此为依据, 测量电离层 D 层对无线电波的吸收.

4 实验结果与分析

利用在 CADI 数字测高仪平台上开发实现的被动接收观测模式, 我们在中国科学院地质与地球物理研究所北京观测站进行了两次连续的实地观测记录. 一次是 2006 年 9 月 27 日 (总第 270 天) 00:00 UT 至 24:00 UT 一整天的观测, 另一次是 2006 年 10 月 9 日至 2006 年 10 月 11 日 (总第 282 至 284 天) 共 3 天的连续观测. 为了不影响常规频高图模式工作, 在被动接收模式实验观测的同时, 也运行了频高图工作模式. 频高图模式工作的时间间隔是 15 min, 被动接收模式工作的时间间隔是 60 s. 因此, 一个频高图模式周期 (15 min) 内, CADI 数字测高仪系统共采集一个数字频高图数据文件, 14 个被动接收模式数据文件.

图 3 所示为 2006 年第 270 天以及第 282 至 284 天中 CADI 数字测高仪在被动接收模式下所获得的空间信号能量时频分布. 从图 3 中可以看出, 这 3 天中, 在 10:00—15:00 UT 时间段内, 对应于 18:00—21:00 LT, 空间信号能量比其他时间段内要大, 其原因是由于晚间电离层 D 层对无线电波的吸收减弱, 远地中短波广播等各种信号容易经电离层反射传播到接收机被接收机接收. 这也说明这种模式所接收的空间信号与实际情况是相符的, 确能反映电离层当时的状况.

图 4 所示为 2006 年第 270 天以及第 282 至 284 天 ICF与本地的临界频率 f_0F_2 的比较. 横坐标为 UT, 时间间隔是 15 min, 纵坐标表示频率, 单位为 MHz. 由图 4 可见, ICF 与 f_0F_2 有较强的相关性, 其相关系数分别为 0.89929, 0.90249, 0.84026 和 0.8994. 这 4 天中, ICF 与 f_0F_2 总的相关系数为 0.85345.

图 5 所示为 2006 年这 4 天中 ICF 与 f_0F_2 数据经过一元线性回归方法, 求取二者之间线性回归方程的处理结果, 图 5 中直线为 ICF 与 f_0F_2 线性回归曲线, 线性回归方程如下:

$$f_0F_2=1.2191\times F_{\mathrm{IC}}-3.0763\,(\mathrm{MHz}). \tag{14}$$

根据上述观测结果可以看到, ICF 与 f_0F_2 的变化趋势基本是一致的, 其相关系数最小在 0.84, 最大在 0.90, 但变化细节仍有差别. 这 4 天中, ICF 约在 10:00 LT 出现最大, 而 f_0F_2 均在约 13:00 LT 最大. 在 4 天中, 第 270 天 ICF 整天变化形态与 f_0F_2 最为相似.

图 6 所示为 2006 年第 270 天及第 282 至 284 天测量的电离层 D 层对无线电波吸收, 由图 6 可以看出, 电离层低频段的信号能量累积效应在 10:00—14:00 UT (对应于 18:00—22:00 LT) 最大, 说明电离层 D 层对无线电低频段信号吸收减弱, 再加上这个时间段内短波信号增多, 与实际情况相吻合.

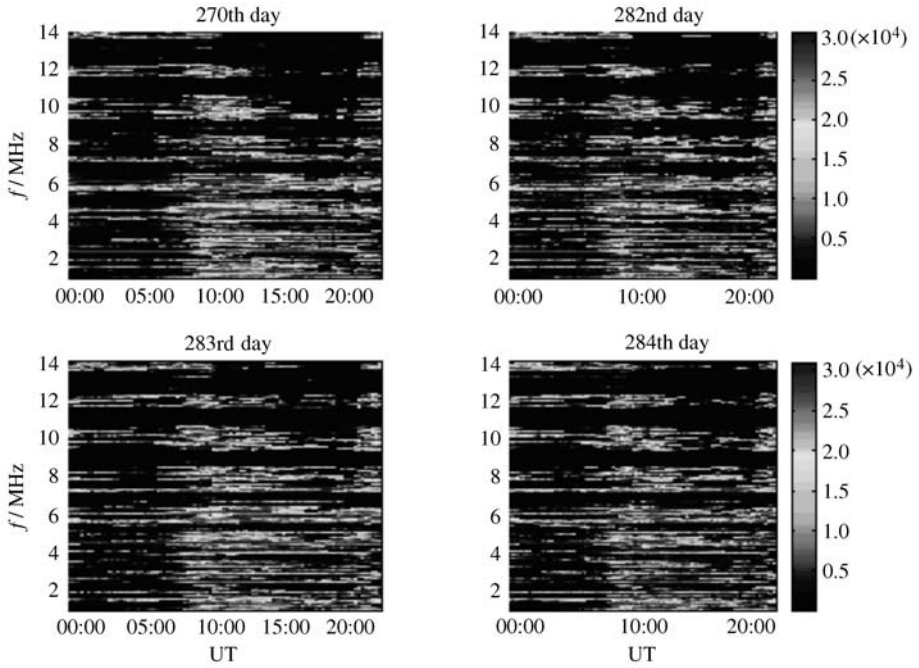


图 3 2006 年第 270 天和第 282 至 284 天的空间信号能量时频分布

Fig. 3 Space signal energy distribution with time and scan frequency on the 270th, 282nd, 283rd and 284th day of 2006

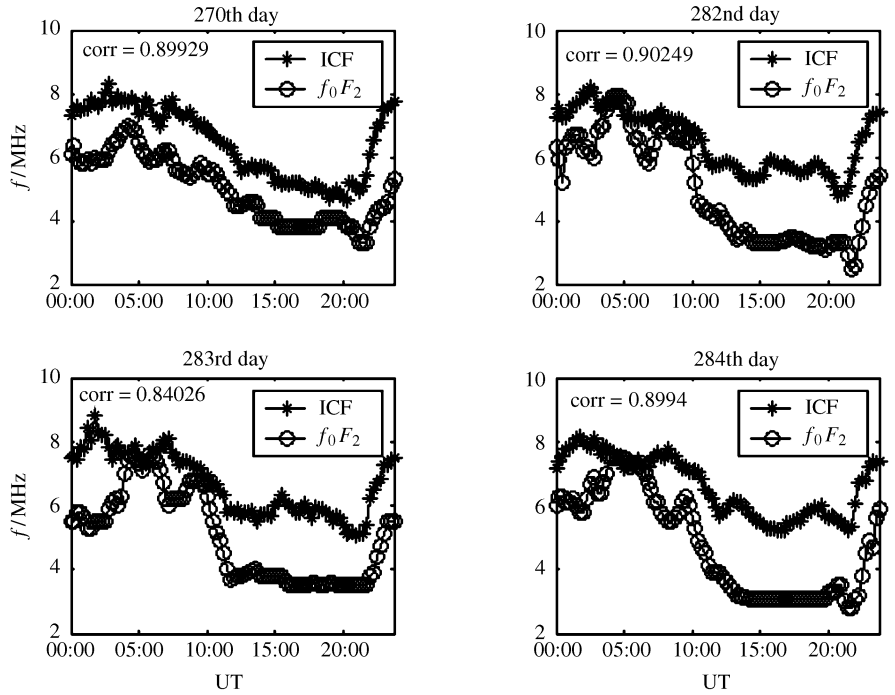


图 4 2006 年第 270 天及第 282 至 284 天 ICF 与 f_0F_2 的比较

Fig. 4 Comparison of ICF with f_0F_2 on the 270th, 282nd, 283rd and 284th day of 2006

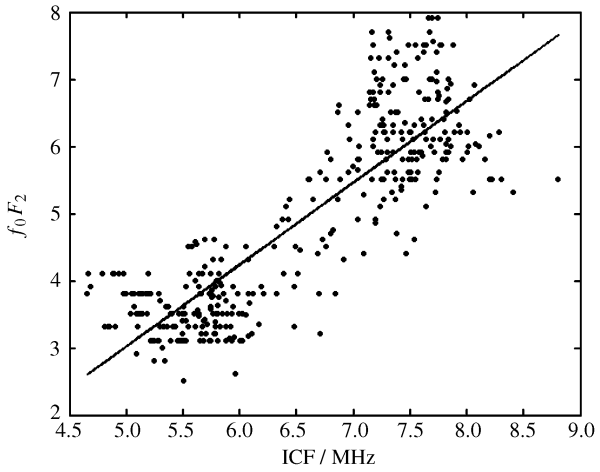


图 5 2006 年第 270 天及第 282 至 284 天 ICF 与 f_0F_2 线性回归曲线

Fig. 5 Linear Regression curve of ICF and f_0F_2 on the whole 4 days of 2006

5 结论

以 CADI 数字测高仪为硬件平台, 在对电离层垂直探测各种观测模式研究的基础上, 开发实现了一种新的被动接收观测模式, 并进行了一系列被动接收观测实验, 获取了一些观测结果. 尝试利用被动接收模式下得到的 ICF 与电离层重要特征参数之一的临界频率 f_0F_2 进行相关分析比较. 从分析结果可以看出, ICF 与电离层临界频率 f_0F_2 的总体变化趋势是一致的, 具有较高程度的相关性, 相关系数达到了 0.84 以上. 从这些相关性分析的实例中, 通过线性拟合, 可以求出 ICF 与电离层特征参数 f_0F_2 的经验公式. 这为被动接收模式下获取电离层特征参数提供了一条重要途径. 然而, ICF 与 f_0F_2 相关性分析中的具体细节又存在着一定的差别. 产生这种情况的主要原因可能是, 被动接收模式实验时, 所接收到的信号中含有来自非电离层反射的直接噪声和干扰贡献, 其接收的信号并不完全取决于电离层. 这也是这种无源探测方法数据分析处理的困难所在. 此外, 在新的被动接收观测模式下, 还测量得到了高频通道背景噪声的时频分布以及电离层 D 层对无线电波的吸收状况. 下一步的工作中, 可以采用多点观测,

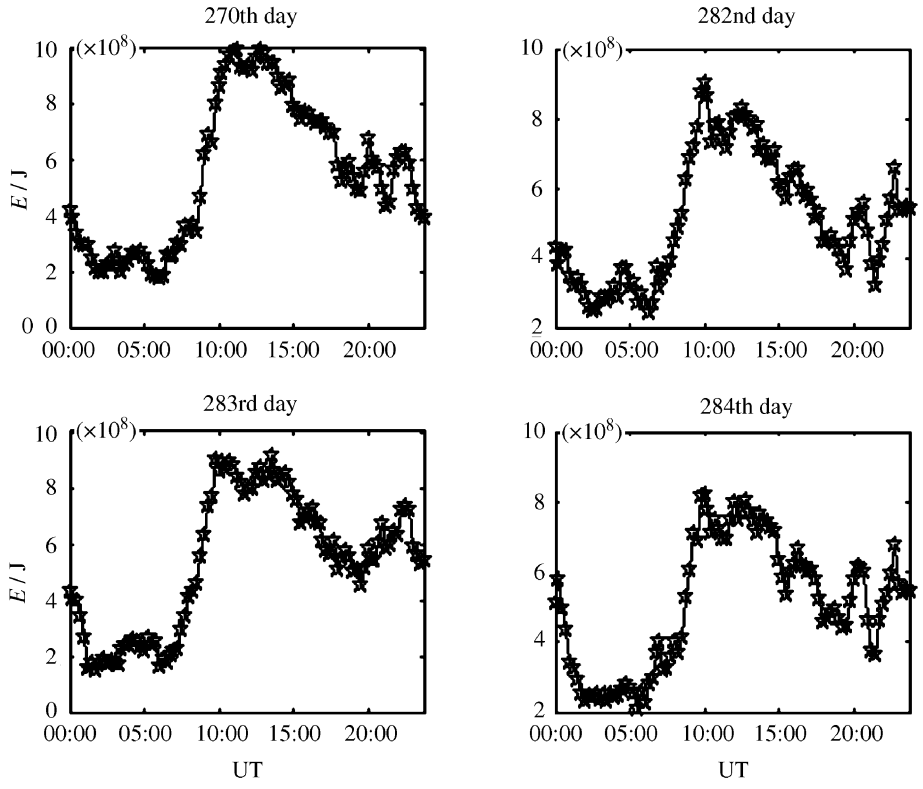


图 6 2006 年第 270 及第 282 至 284 天电离层 D 层吸收状况

Fig. 6 Ionospheric layer D absorption to radio wave on the whole 4 days of 2006

改善数据分析处理算法, 并进行更长时间的观测研究, 以获得更为可靠理想的观测结果.

参考文献

[1] Bodo W Reinisch. Modern Ionosondes. Katlenburg-Lindau: European Geophysical Society, 1996. 441∼458

[2] Ivan A Galkin, Davud F Kitorsser, Zarko Kecic, Bodo W Reinisch. Internet access to ionosondes. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1999, **61**(2):181∼186

[3] 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)

[4] Zhu Zhengping, Ning Baiqi. Study of disturbance observation mode in ionospheric vertical sounding. *Chin. J. Radio Sci.*, 2007, **22** (5):760∼766. 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, **22**(5):760∼766)

[5] 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. in Chinese (朱正平, 宁百齐, 万卫星. 电离层虚高的高精度测量与分析. 空间科学学报, 2007, **27**(3):204∼210)

[6] Yuan Zhigang, Ning Baiqi, Wan Weixing. Acquisition and analysis of Doppler ionogram with high precision. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(3):234∼239. in Chinese (袁志刚, 宁百齐, 万卫星. 高精度多普勒频高图的获取和分析. 空间科学学报, 2002, **22**(3):234∼239)

[7] Jowett A P, Darnell M, Riley N G. Passive monitoring of chirpsounder transmitters as an aid to HF frequency management. In: Adaptive HF Management, IEE Colloquium on Publication, London, UK, 1989. 111∼115

[8] Masrani K D, Riley N G. Passive monitoring of HF radio signals in determining multi-path. In: IEE Colloquium on Methods of Combating Multi-path, 1990

[9] Masrani K D, Riley N G. Passive sensing of radio signals in automated and the updating of off-line prediction models. In: IEE proceedings on Seventh International Conference Antennas and Propagation, UK: University of York, IEE CP-333, 1994. 893∼897

[10] Piggin P W, Darnell M, Gallagher M. Passive monitoring for improved HF frequency management. In: Frequency Selection and Management Techniques for HF Communications, IEE Colloquium on Publication, London, UK, 1996

[11] Lott G K, Vincent W R, Jauregui S. HF signal amplitude distributions and total spectrum power measurements. In: HF Radio Systems and Techniques, 1994.

[12] Sahr J D, Gidner D M, Chucai Zhou, Lind F D. Passive VHF radar for ionospheric physics. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2001, **63**:117∼122

[13] Sahr J D, Melissa Meyer. Opportunities for passive VHF radar studies of plasma irregularities in the equatorial E and F regions. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2004, **66**:1675∼1681

[14] Zhou Guonai. A method of passive real time frequency selection based on HF interference centroid frequency. In: HF Radio Systems and Techniques, IET Proceedings on Fifth International Conference, Edinburgh, Scotland, 1991. 286∼289