0254-6124/2023/43(4)-0618-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHAO Gangquan, WANG Caiyun, LIU Dapeng, LI Lingling. Development of a Low-power Ionosonde in Yinchuan and Analysis of Preliminary Test Results (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 618–626. DOI:10.11728/cjss2023.04.220127011

低功耗电离层垂测仪系统及在银川地区的试验

赵港权[1,2,3] 王彩云[1,3] 刘大鹏[4] 李玲玲[5]

1(中国科学院大学国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

4(国家自然灾害防治研究院 北京 100085)

5(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

摘 要 研制了一台低功耗电离层垂测仪，该系统采用新型 Delta 天线、可变接收时长和类巴克码脉冲编码设计，安装在宁夏银川地震监测试验场。2021 年 8 月开展了全天连续观测试验，观测获得的科学数据验证了垂测仪的探测能力和探测效率。试验结果表明：F_2 层临界频率日变化与银川地区太阳高度角日变化趋势存在一定的正相关性；采用图像处理技术实现了原始频高图中 O/X 波自动分离，获得两极化波临界频率之差约为 0.7 MHz，与银川当地 0.5 倍磁旋频率 0.7 MHz 基本一致。该电离层垂测仪系统运行稳定，试验数据可靠，对后续星地联合多维度探测和信号处理具有一定的算法参考和数据积累意义。

关键词 电离层垂测仪，类巴克码，图像处理，O/X 波分离，临界频率

中图分类号 P352

Development of a Low-power Ionosonde in Yinchuan and Analysis of Preliminary Test Results

ZHAO Gangquan[1,2,3] WANG Caiyun[1,3] LIU Dapeng[4] LI Lingling[5]

1(*National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

3(*Key Laboratory of Microwave Sensing*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

4(*National Institute of Natural Hazards*, *Beijing* 100085)

5(*Aerospace Information Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100094)

Abstract A low-power ionosonde is developed, with a pair of new kind Delta antenna and barker-liked coding technique. A varied sampling duration is utilized in the receiving windows to improve the

2022-01-26 收到原稿，2022-04-08 收到修定稿

E-mail：zhaogangquan19@mails.ucas.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

test efficiency. The ionosonde is built in Yinchuan Earthquake Monitoring Test Site, Ningxia Hui Autonomous Region of China. The continuous observation test was carried out for a whole day in August 2021. The preliminary test result shows that the diurnal variation of the critical frequency of the F_2 layer has a positive correlation as of the solar elevation angle in Yinchuan area. An image processing technique is employed for the automatic separation of the O/X waves in the original ionograms. The difference between the critical frequencies of the two polarized waves is about 0.7 MHz, which is basically consistent with the local 0.5 times magnetic spin frequency of Yinchuan, which is 0.7 MHz also. The operation of the ionosonde is stable, and the obtained data are reliable, which provides a valuable algorithm reference and data accumulation significance for the subsequent in-depth processing of satellite-ground joint multi-dimensional data.

Key words Ionosonde, Barker codes, Image processing, O/X wave separation, Critical frequency

0 引言

短临地震前经常伴随空间电离层异常现象[1], 地震前兆与空间电离层之间具有复杂关联特征[2]。张衡一号卫星是中国首颗电磁监测卫星, 于 2018 年成功发射, 主要用于监测空间电磁场参数与电离层扰动, 开展空间物理与地震前兆研究[3], 对中国及其周边区域展开电离层监测与前兆跟踪[4]。

利用垂测仪对电离层垂直探测是电离层研究中历史最悠久, 至今仍非常重要的一种地基探测手段[5], 常用型号有美国 DPS-4 D[6]、加拿大 CADI[7]、中国科学院研制的 DAS-DIS[8] 以及武汉大学的 WMI 系列[9]等, 上述垂测仪已在相关台站投入使用。中国科学院地质与地球物理研究所研制的 PDI2 垂测仪其探测周期小于 1 min, 高度分辨率达到 2.5 km。

为深入探究空间电离层异常变化与地震前兆之间的关联, 实现空天地电离层星地协同比对观测, 本文研制了一台集低功耗、可变接收时长、脉冲编码、探测速度快等特征的电离层垂测仪, 安装于宁夏银川地震监测试验场, 开展全天候实时电离层探测。该电离层垂测仪具有功率低、接收时长可变等特点[10], 可实现 1～30 MHz 全波段探测。通过对 2021 年 8 月 19 日全天试验数据的初步处理, 绘制出该地区全天的时变频高图, 并对比分析频高图日变化与当地太阳高度角日变化之间的相关性[11–13]。采用图像处理技术完成 O/X 波的自动分离[14–17], 由 O/X 波临界频率的差值计算出磁旋频率[18], 并与银川当地磁旋频率参考值进行比对验证。该试验结果为后续“张衡一号”星地信号联合处理、深入分析该地区电离层特征参数以及电离层扰动异常与地震前兆的关联特性提供了研究基础。

1 系统研制

1.1 系统设计

探测周期与高度分辨率是垂测仪的两项重要指标。本文电离层垂测仪采用可变接收延时的方式设置不同工作频率的收发间隔, 可大大缩短回波信号的探测周期, 提高探测效率。应用相关接收技术, 采用大时宽发射脉冲, 解决了距离分辨率与作用距离的矛盾, 同时降低了峰值发射功率(小于 400 W)。图 1 所示为电离层垂测仪系统原理。

由图 1 可以看出, 该垂测仪系统主要包括天线单元、接收单元、发射单元、时序控制单元等主要功能模块。天线单元采用两部相互正交的 DELTA 天线, 交替发射, 同时接收。

接收单元与相互正交的两部天线连接, 能够实现左右旋两极化回波的同步接收; 该单元将接收到的电离层回波信号进行放大、混频、滤波、采集、FFT 处理, 获得原始频高图中回波频率、反射虚高、信号强度等基础信息。

发射单元主要用于生成脉冲编码调制的射频信号。该单元采用 DDS 技术, 可灵活设置脉冲编码方式, 能够生成巴克码、互补码等多种编码码元。两发射通道分别与两部正交天线连接, 交替发射线极化波。收发通道之间采用多级隔离开关, 总隔离度大于 100 dB, 并采用收发分时工作模式, 能够保证系统在长

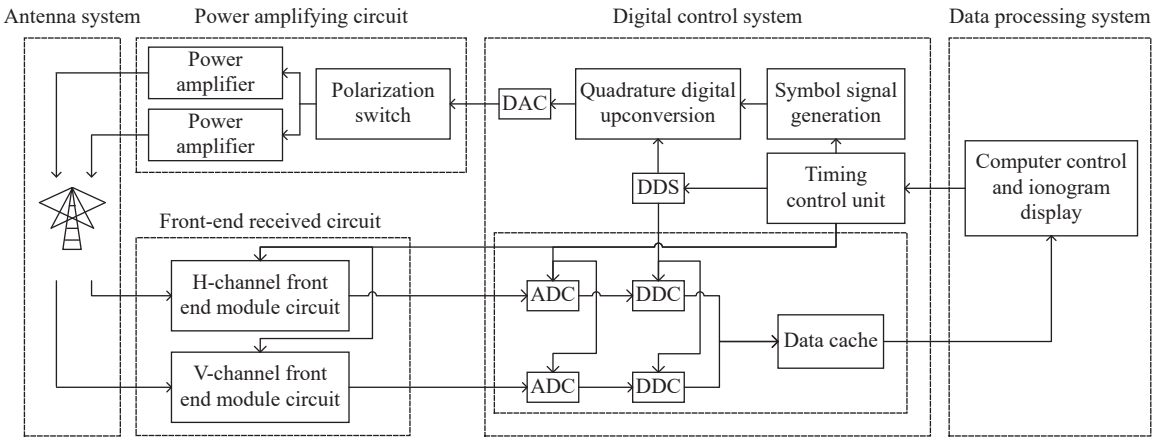

图 1 垂测仪系统原理

Fig. 1 System block diagram of the ionosonde

时间全功率工作状态下, 接收通道的安全性和可靠性。

时序控制单元完成垂测仪系统收发时序控制, 生成基带脉冲编码信号, 实时采集并传输回波数据至上位机。

该垂测仪设计有内校准回路, 针对每个探测频率, 发射两个内校准脉冲, 实时校准两路收发通道的幅相不平衡, 以实现探测脉冲的准确幅相测量。表 1 给出了该垂测仪的主要系统参数。

1.2 正交 DELTA 天线

如图 2 所示, 垂测仪天线单元采用正交架设的两部 Delta 天线, 中间为主支撑杆 1 个, 高 30 m; 四周为辅助支撑杆 4 个, 高约为 6 m, 底边跨度约 50 m, 天线沿南北向和东西向正交架设。天线正常工作发射功率 < 400 W, 实测两天线在全工作频段内(1～30 MHz)最大驻波比小于 2, 隔离度小于–20 dB。

在回波探测主频段 1～10 MHz 内, 两天线隔离度小于–30 dB; 天线方向图垂直向上且增益较高, 无明显裂瓣出现, 能够实现复杂背景杂波下弱回波的高精度探测。表 2 为该 Delta 天线的主要技术参数。

天线实物如图 3, 安装于银川郊外地震监测试验场, 该场地开阔平坦, 电磁干扰较少, 适合于垂测仪长时间连续运行。馈线电缆经地埋管线进入机房, 射频主机与控制单元安装于机房内。

1.3 发射信号选择

电离层垂测仪通常选用巴克码或互补码作为编码序列, 本系统根据实际应用需求, 选用一种码长为 40 位的类巴克码[19,20], 图 4 给出 40 位类巴克码的码型及自相关函数。

表 1 垂测仪主要系统参数

Table 1 Main parameters of the ionosonde

指标名称	设计参数
探测频率/MHz	1～30
探测高度/km	70～600
步进频率间隔/kHz	25
脉冲持续宽度/μs	400
发射峰值功率/W	400
接收机带宽/kHz	100
高度分辨率/km	1.5
A/D采样率/MHz	40
A/D采样位数/bit	12
脉冲编码方式	类Barker码
天线形式	Delta天线

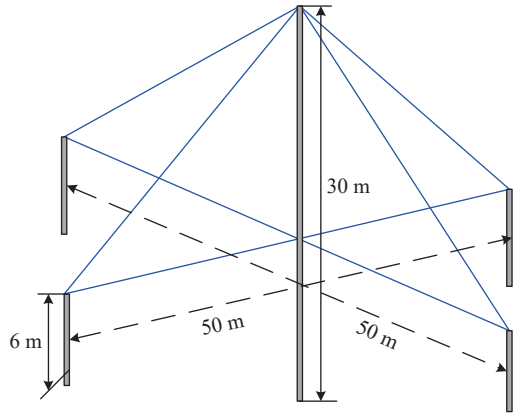

图 2 垂测仪天线架设

Fig. 2 Ionosonde antenna installation diagram

表 3 列出了三种编码方式的性能比对。其中, 互补码的探测周期是其他两种编码方式的两倍, 13 位巴克码的总旁瓣电平(LSL)低于 40 位类巴克码, 但类巴克的峰值旁瓣电平(PSL)与噪声抑制度(NS)均明显优于 13 位巴克码与 16 位互补码; 且在作用距离相同的条件下, 40 位类巴克码对应的高度分辨率可达 1.5 km, 分别为 13 位巴克码与 16 位互补码的 3 倍和 2.5 倍, 因此本垂测仪系统选用 40 位类巴克码的编码方式。垂测仪发射脉冲持续时间 400 μs, 子脉冲宽度 10 μs, 利用可变接收延时的方式实现主频段探测周期小于 2 min, 大幅度提高了探测效率。

1.4 回波信号处理

从原始回波数据中获取电离层频高图, 需要对回波数据进行通道不平衡校准、中值滤波、门限判别、相关峰值检测与判读等。

为保证两接收通道(H/V)的幅相一致性[12], 垂测仪设计有自校准环路, 每频点发射 2 个自检脉冲, 100 个测量脉冲, 定频校准两通道的幅相不平衡。计算校准信号的 H/V 比值, 若 H/V>1, 则将 V 通道的数据值乘以(H/V); 若 H/V<1, 则将 H 通道的数据值除以(H/V)。

经校准后的回波数据与 40 位类巴克码作相关处理, 累积平均后对幅度取绝对值。由于当地短波通信等背景杂波的干扰, 相关处理后波形底噪较高且变化无规律。本文针对探测回波的背景特征, 采用中值滤波方法, 能够有效抑制背景杂波, 其处理结果如图 5 所示。红色和蓝色分别代表滤波前和滤波后的相关波形, 图中明显可见经中值滤波后底噪大幅降低。对滤波后数据设置合理的峰值判别门限, 提取有效相关峰值信息。

图 5(b)为经过门限判别后有明显相关峰的回波图形, 记录相关峰值的横纵坐标与当前探测频率, 作为绘

表 2 Delta 天线主要参数

Table 2 Main parameters of the Delta antenna

天线相关指标	本项目设计参数
W/m	50
H/m	36
α/(°)	26
β/(°)	54
匹配负载/Ω	600
发射功率/W	约400

图 3 垂测仪正交 Delta 天线

Fig. 3 Orthogonal Delta antenna of the ionosonde

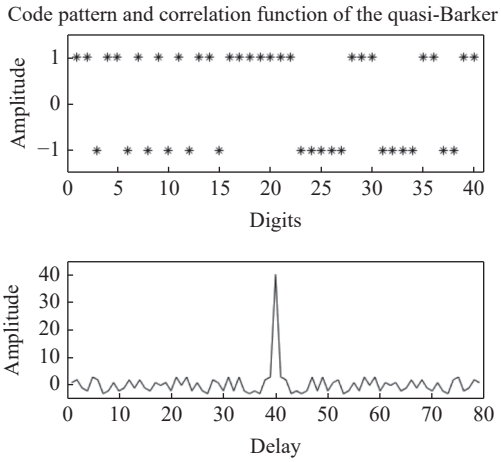

图 4 40 位类巴克码与其自相关函数

Fig. 4 40 bit Barker-like code and its autocorrelation function

表 3 三种不同编码方式性能比对

Table 3 Performance comparison of the three coding methods

码型	PSL/dB	LSL/dB	NS/dB	脉宽/μs	探测周期	高度分辨率/km
13位巴克码	–11.14	–0.35	5.57	30	T	4.5
16位互补码	–5.06	—	6.02	25	2 T	3.75
40位类巴克码	–11.25	0.97	8	10	T	1.5

制频高图的三要素:探测频率、反射虚高与回波幅度。

图 6 分别为电离层活跃的日间午后与电离层回波较弱的午夜时分探测到的频高图。图中不同颜色表征信号能量大小。可以明显看出,即使在夜间电离层回波较弱情况下,依然能获得清晰连续的回波描迹,表明该垂测仪回波信噪比高,数据质量好,系统运行稳定可靠。

2 初步探测试验结果分析处理

2021 年 8 月 19 日在银川试验场进行了全日间电离层回波探测,记录下日出前至日落后全日间频高图的变化形态。初步探测处理结果表明,银川地区电离层 F_2 层 O 波临界频率与太阳高度角变化呈现出正相关性;由 O/X 波临界频率得出的磁旋频率与当地经

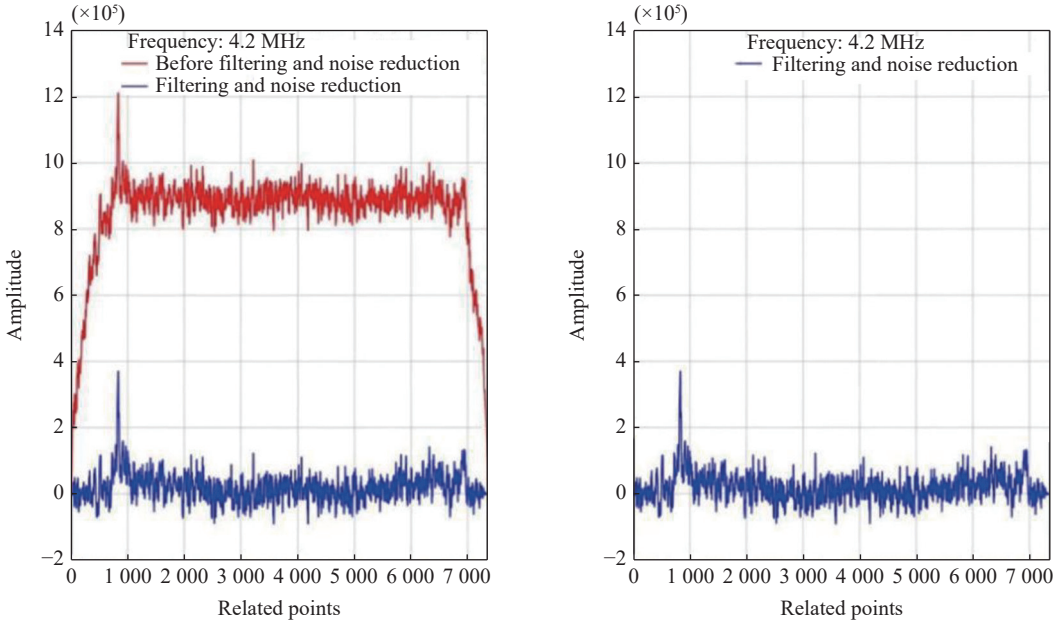

图 5 （a）滤波与门限判别前相关波形对，（b）滤波与门限判别后相关波形对

Fig. 5 Comparison of the correlation waveforms before (a) and after (b) the median filtering and the threshold recognition

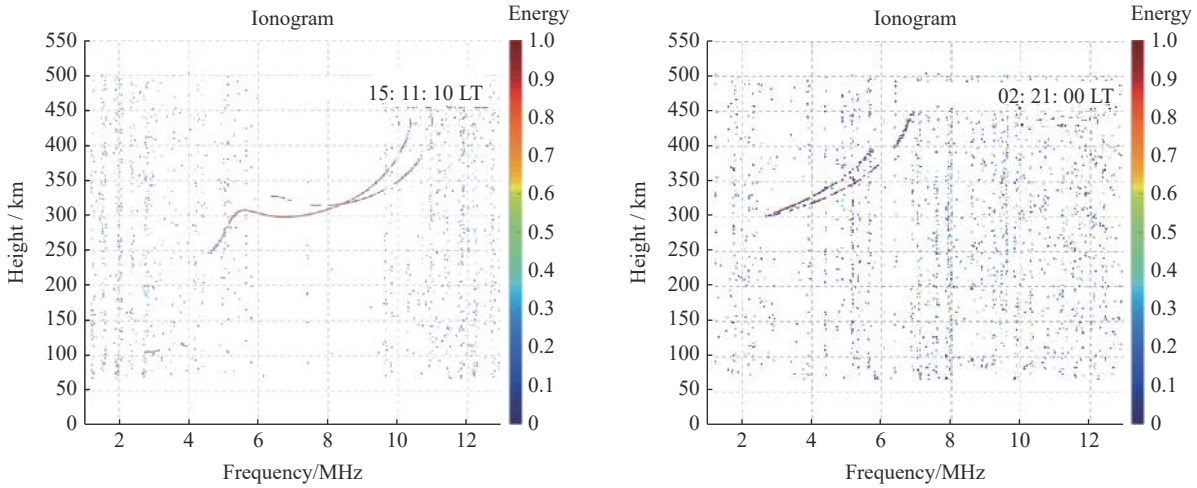

图 6 日间午后与夜间频高图比对。（a）日间午后频高图，（b）夜间频高图

Fig. 6 Comparison of the ionograms in daytime and nighttime. (a) The daytime ionogram, (b) the nighttime ionogram

验值具有一致性。本文采用形态学等图像处理技术，去除频高图中的杂波和噪声，最大限度保留 O/X 波描迹并实现二者自动分离与临界频率判读，准确获得了两种波型的描迹，为后续电离层回波数据的多维处理提供了一种新的技术手段。

2.1 电离图日变监测

太阳辐射是电离层主要电离源，电离层变化受其调制，电离层日变化是电离层最基本、最显著的变化特征，不仅是众多电离层现象的出发点，也是电离层经验模型需要呈现的最基本特征。基于电离层特征在不同地理区域存在较大差异，本文讨论结果基于银川地区 2021 年 8 月 19 日电离层探测数据。

图 7 给出 2021 年 8 月 19 日白天的频高图。由于该试验场地尚处于初步建设阶段，供电与网络等基础设施尚未完善，本文仅对 8 月 19 日白天采集的试验数据进行分析处理。

由图 7 可见，日间受太阳辐射强，电离层电子浓度较高，反射回波信号较强。白天时段相较于日落后时段，回波描迹特征变化显著，频高图中呈现出明显分层结构。

电离层 F_2 层临界频率和峰值高度是电离层两个极为重要的参数，在此主要分析 F_2 层临界频率的日变化趋势与银川地区太阳高度角日变化间的关系。本节选用不同时段 O 波 F_2 层临界频率进行对比。

表 4 为 2021 年 8 月 19 日不同时刻 F_2 层 O 波临界频率值与太阳高度角对比。

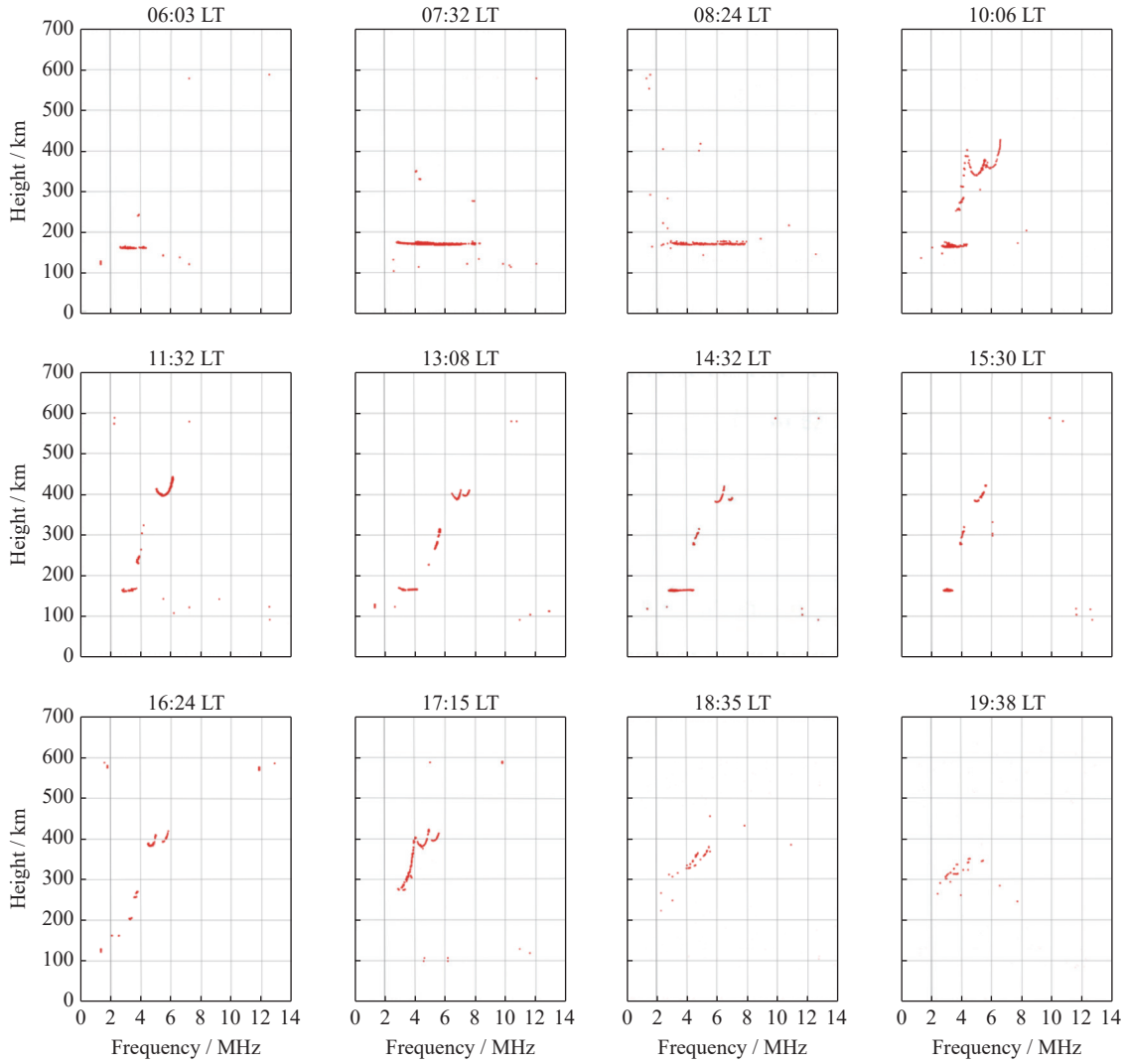

图 7 2021 年 8 月 19 日不同时刻记录的银川地区日间频高

Fig. 7 Ionogram in Yinchuan area recorded at different time on 19 August 2021

表 4 日间 O 波临界频率与太阳高度角对比

Table 4 Comparison between the critical frequency of O-wave and the solar altitude angle in daytime

时间(LT)	10:06	11:31	12:56	13:08	14:32	15:30	16:24	17:15
O波临界频率/MHz	5.7	6.2	7.0	7.2	6.5	5.6	5.2	5.0
太阳高度角/(°)	50	61	75	75	70	60	48	37

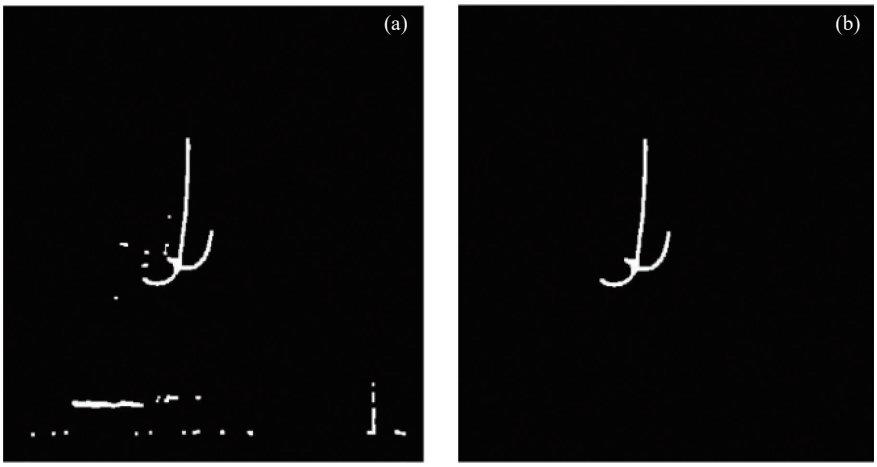

图 8 连续分量标记法处理前后对比。(a) 膨胀处理后原始频高, (b) 筛选出的 F 层描迹

Fig. 8 Comparison of ionograms before and after continuous component labeling. (a) Ionogram after expansion treatment, (b) F-layer trace screened out

由表 4 可以看出, 电离层 F_2 层 O 波临界频率与太阳高度角呈现相似的变化趋势, 两者均在日出后逐渐增加, 并于 13:00 LT 达到最大值, 此后又逐渐减小, 表明两者间存在正相关性, 可见 F_2 层临界频率具有明显日变化规律。

2.2 O/X 波分离

2.2.1 消除杂波及形态学处理

原始频高图中存在较多的背景噪声, 需要先进行滤噪处理, 再做 O/X 波分离与特征参数提取。

对滤波后的图像选用最大类间方差法进行阈值分割, 通过计算目标与背景像素点灰度值的差异, 以方差最大作为判断准则, 找出最能反映目标和背景像素之间差异的阈值, 像素值低于阈值被计为背景, 其余视为目标像素, 阈值分割后图像转为二值图像。

此方法在移除干扰杂波的同时, 会损失少量描迹信息, 导致描迹出现细小断裂, 对受到较强干扰的频高图尤为严重。为保证描迹的连续性和完整性, 对描迹进行形态学处理, 使用结构元素对图像进行膨胀处理修补细小断点, 对一次膨胀无法修补的断点, 进行二次膨胀。

利用连通分量标记法快速统计出整个频高图中独立区域的个数及其面积大小, 基于电离层频高图的基本特征, 选取面积最大的区域为主干 F 层描迹, 滤除其他连通域, 提取出 F 层主体描迹。图 8 为连通分量标记法处理后的图像。

2.2.2 O/X 波分离

最大连通域处理后, 再次对图像进行描迹腐蚀、细化, 将一定宽度的轮廓逐次去其边缘, 变为单像素的骨架图, 骨架图中 O/X 波相互交叉。为精确提取 O/X 波独立描迹, 本文采用单焦点分割连通域的方法: 骨架图中两条曲线均由单像素点构成, 其交点为一单像素点。定位到交点位置, 然后将交点的像素值转化为 0 (0 为黑色背景, 1 为白色回波描迹)。转化前两条相交的曲线为一个连通域, 当把交点从 1 转化为 0 之后, 曲线部分就被自动分 4 个区域。

将图像放置在平面直角坐标系中, 拟合出两条曲线的方程并确定交点坐标, 该交点为 O/X 波的交叉部分; 由于 O/X 波之间相差半个旋转频率的平移距离, 且 O 波在左, X 波在右, 据此将连通域 1, 3 分支计为 O 波, 连通域 2, 4 分支计为 X 波; 分离后, 将交点像素点重新由 0 置 1, 至此完成 O/X 波的自动分离。O/X 波分离过程如图 9 所示。

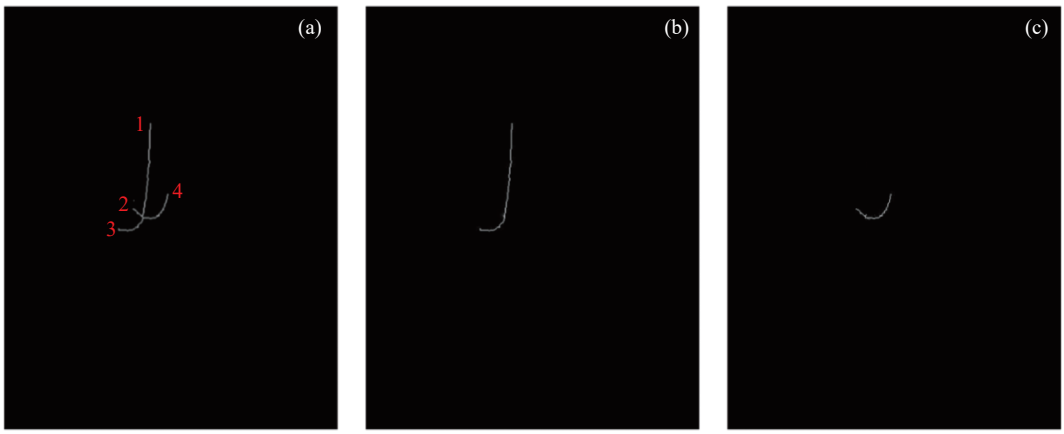

图 9 O/X 波分离 （a）频高图骨架，（b）O 波描迹，（c）X 波描迹

Fig. 9 O / X wave separation. (a) Ionogram skeleton diagram, (b) O-wave trace, (c) X-wave trace

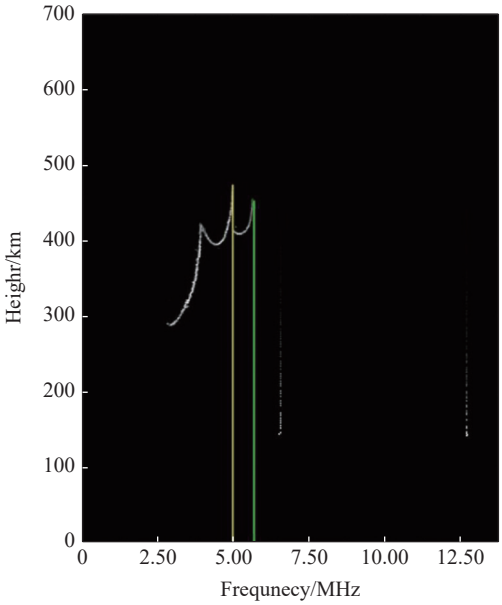

图 10 经插值处理的图像（黄色垂线与 x 轴交点为 O 波临界频率，绿色垂线与 x 轴交点为 X 波临界频率）

Fig. 10 Interpolated image (the intersection of yellow vertical line and x axis is the critical frequency of O wave, and the intersection of green vertical line and x axis is the critical frequency of X wave)

2.3 旋转频率对比验证

处理后的频高图中 X 波描迹在临界频率部分描迹缺失，需对 X 波根据描迹特征做插值处理，以便读取 X 波 F_2 层临界频率。由于 X 波和 O 波临界频率部分的描迹形态基本平行且高度相似，可根据 O 波描迹对 X 波进行插值。令a为频率变量，b为高度变量，f为曲线斜率，当$f=-\dfrac{a}{b}$时，高度 h 出现极大值，曲线靠近该点时斜率趋近于无穷大，所以$f=-\dfrac{a}{b}$点对应的横坐标即为临界频率。图 10 为插值后图像，图 10 中两条垂线与横坐标交点依次为 O 波临界频率与 X 波临界频率。

理论上，O/X 波描迹的临界频率之差如下：

$$\frac{1}{2}f_{\mathrm{H}} \approx (f_{\mathrm{X}} - f_{\mathrm{O}})\,.$$

其中，f_{X}为 X 波临界频率，f_{O}为 O 波临界频率，二者相差约为半个磁旋频率。

插值拟合得到的 X 波临界频率f_{X}为 5.0 MHz，O 波临界频率f_{O}约为 5.7 MHz，二者相差约 0.7 MHz，与银川地区 0.5 倍磁旋频率参考值 0.7 MHz 相一致。

3 结论

为了与“张衡一号”卫星进行空间电离层探测同步比对校验，在宁夏银川地震监测试验场研制了一台低功耗、可变接收时长的电离层垂测仪，系统目前运行稳定可靠。对 2021 年 8 月 19 日白天探测试验数据进行了初步分析处理，结果表明：电离层 F_2 层 O 波临界频率日变化与银川地区太阳高度角日变化趋势一致，存在正相关性；采用图像处理技术实现了频高图 O/X 波自动分离与判读，并获得两极化波临界频率之差约为 0.7 MHz，与银川当地 0.5 倍磁旋频率参考值 0.7 MHz 基本一致，试验结果表明该体制电离层垂测仪系统运行正常，试验数据稳定，回波处理方法有效，对后续星地联合多维度数据深入处理具有一定的算法参考和数据积累意义。

参考文献

[1] HAO Yongqiang, LI Quanhan, GUO Jianguang, *et al.* Imaging of the large-scale ionospheric disturbances induced by seismic waves using GPS network in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(11): 3925-3932 (郝永强, 李泉翰, 郭建广, 等. 利用中国GPS站网对地震波引发的大尺度电离层扰动的观测[J]. 地球物理学报, 2021, **64**(11): 3925-3932)

[2] ZHAO S F, SHEN X H, LIAO L, *et al.* A lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling model for ELF electromagnetic waves radiated from seismic sources and its possibility observed by the CSES[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, **64**(11): 2551-2559

[3] YANG Chao, YONG Shanshan, WANG Xin'an, *et al.* Research on Indonesia Ms 7.4 earthquake based on data of Zhangheng-1 electromagnetic satellite[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, **57**(6): 997-1005 (杨超, 雍珊珊, 王新安, 等. 基于张衡一号电磁卫星数据对印尼Ms 7.4地震的研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, **57**(6): 997-1005)

[4] WANG Lanwei, HU Zhe, SHEN Xuhui, *et al.* Data processing methods and procedures of CSES satellite[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2018, **22**(S1): 39-55 (王兰炜, 胡哲, 申旭辉, 等. 电磁监测试验卫星(张衡一号)数据处理方法和流程[J]. 遥感学报, 2018, **22**(S1): 39-55)

[5] DING Zonghua. Studies on Autoscaling and Analysis of Ionograms[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics & Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2006 (丁宗华. 电离层频高图自动度量与分析的方法研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉物理与数学研究所), 2006)

[6] REINISCH B W, GALKIN I A, KHMYROV G M, *et al.* New Digisonde for research and monitoring applications [J]. *Radio Science*, 2009, **44**(1): RS0A24

[7] ZHU Zhengping, NING Baiqi, SUN Fenglou, *et al.* Study of passive receiving observation mode for ionospheric digital ionosonde[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, **29**(4): 389-396 (朱正平, 宁百齐, 孙凤娄, 等. 电离层数字测高仪被动接收观测模式研究[J]. 空间科学学报, 2009, **29**(4): 389-396)

[8] WANG Shun, CHEN Ziwei, ZHANG Feng, *et al.* A new design for digital ionosonde[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 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)

[9] GONG W L, CUI X, PAN L Y. Design and application of the digital multifunctional ionosonde[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, **10**(7): 1303-1309

[10] JIN Mengya, GUO Wei, LIU Peng, *et al.* Design of digital control system for high-performance ionosonde based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(4): 580-588 (靳梦雅, 郭伟, 刘鹏, 等. 基于FPGA的高性能电离层测高仪数控系统设计[J]. 空间科学学报, 2021, **41**(4): 580-588)

[11] WEI Zidong, HUO Xiaoping, HE Shengyun, *et al.* Simulation and analysis on the optimum horizontal dip angle and aspect of a fixed PV——taking Yinchuan City of Ningxia as a case[J]. *Journal of Xian University of Architecture Technology* (*Natural Science Edition*), 2012, **44**(5): 700-706 (魏子东, 霍小平, 贺生云, 等. 固定式光伏最佳水平倾角及朝向的模拟分析——以宁夏银川地区为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, **44**(5): 700-706)

[12] LIU Libo, CHEN Yiding, ZHANG Ruilong, *et al.* Some investigations of ionospheric diurnal variation[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, **52**(6): 647-661 (刘立波, 陈一定, 张瑞龙, 等. 电离层日变化特性研究简述[J]. 地球与行星物理论评, 2021, **52**(6): 647-661)

[13] XU Zhonghua, LIU Ruiyuan, LIU Shunlin, *et al.* Variations of the ionospheric F_2 layer critical frequency at Zhongshan Station, Antarctica[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(1): 1-8 (徐中华, 刘瑞源, 刘顺林, 等. 南极中山站电离层F_2层临界频率变化特征[J]. 地球物理学报, 2006, **49**(1): 1-8)

[14] LIU Han. Study on Automatic Scaling of the F Layer Traces in Ionogram[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (刘汉. 垂直探测电离图F层描迹自动判读方法的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011)

[15] HU Hui, ZHOU Chen, JIANG Chunhua, *et al.* Method for automatic scaling of O wave traces from ionograms[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, **33**(4): 1351-1357 (胡辉, 周晨, 姜春华, 等. 一种提取频高图中O波描迹新方法[J]. 地球物理学进展, 2018, **33**(4): 1351-1357)

[16] LIU Chuang. Study on Automatic Measurement of Layer F_2 in Ionograms Based on Image Processing[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (刘闯. 基于图像处理的频高图F_2层描迹自动解译研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014)

[17] WANG Shun, CHEN Ziwei, ZHANG Feng, *et al.* A method for separating O wave and X wave in digital ionosonde[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(2): 186-193 (王顺, 陈紫微, 张锋, 等. 一种数字电离层测高仪系统中O波与X波的分离方法[J]. 空间科学学报, 2014, **34**(2): 186-193)

[18] WU Renxi. Automatic Scaling of F Layer for Ionogram Based on BP Neural Network[D]. Wuhan: South-Central Minzu University, 2015 (吴仁喜. 基于BP神经网络的电离层频高图F层自动度量[D]. 武汉: 中南民族大学, 2015)

[19] SUN Zhishen, LIU Xiaojun, ZHAO Bo. Application of complementary codes in ionosphere sounding[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, **11**(21): 5047-5052 (孙直申, 刘小军, 赵博. 互补码在电离层探测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2011, **11**(21): 5047-5052)

[20] CHEN Kun. Design of the Ionosonde[D]. Wuhan: South-Central Minzu University, 2009: 6-26 (陈锟. 电离层数字测高仪的研制[D]. 武汉: 中南民族大学, 2009: 6-26)