0254-6124/2024/44(5)-0782-12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HAN Sijia, LIANG Zhenzhen, GUO Wei, WANG Caiyun, FANG Qingyu, LI Lingling. Observation of a Strong Ionospheric Storm Based on Electron Density Inversion of Yinchuan Vertical Ionosonde (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(5): 782–793. DOI:10.11728/cjss2024.05.2023-0148

基于银川电离层垂测仪电子浓度反演的一次强电离层暴观测*

韩思佳[1,2] 梁珍珍[1,2] 郭 伟[1]
王彩云[1] 方青钰[1,2] 李玲玲[3]

1(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

摘 要 根据银川电离层垂测仪的回波数据, 采用脉冲压缩技术, 使用 Bernoulli 映射序列对发射信号进行编码, 解决实际探测中回波信号混合强杂波干扰的问题, 从而获得高质量频高图. 为从图中提取电离层的关键信息, 将信号处理问题转换成计算机视觉中的语义分割任务, 构建原始频高图数据集, 并进行离散化和人工标注等预处理. 通过训练 cGAN 神经网络分析得到频高图中各层回波的特征参数, 达到分割不同描迹的目的. 采用改进式国际参考电离层底部反演模型和 NeQuick 顶部模型对垂测仪上空的电子浓度剖面进行反演, 根据张衡一号卫星的实测数据对顶部的计算结果进行修正. 通过将计算得到的总电子浓度与 CDDIS 公开的数据结果对比, 验证了垂测仪数据的准确性. 在此基础上, 结合高沙窝磁通门的地磁数据, 垂测仪于 2023 年 4 月 23－24 日的大地磁暴期间成功观测到电离层异常变化的全过程并给出了总电子浓度变化结果, 为探究中国西部电磁环境变化提供准确可靠的观测数据.

关键词 电离层垂测仪, Bernoulli 映射序列, cGAN 网络, 频高图, 电子浓度反演, 磁暴观测

中图分类号 P352

Observation of a Strong Ionospheric Storm Based on Electron Density Inversion of Yinchuan Vertical Ionosonde

HAN Sijia[1,2] LIANG Zhenzhen[1,2] GUO Wei[1]
WANG Caiyun[1] FANG Qingyu[1,2] LI Lingling[3]

1(*Key Laboratory of Microwave Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

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

* 国家民用空间基础设施陆地观测卫星共性应用支撑平台项目资助 (2017-000052-73-01-001735)

2023-12-19 收到原稿, 2024-01-04 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

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

Abstract This study is based on the echo data from the Yinchuan vertical ionosonde. The ionosonde supports scanning in the frequency range from 1 to 30 MHz, with a distance resolution of 1.5 km and a reception window ranging from 67.5 km to 560.1 km. It utilizes pulse compression technology and encodes the transmission signal using Bernoulli mapping sequences, successfully resolving the issue of echo signal mixture with strong clutter interference in practical detection, thus obtaining Ionograms of high quality. In order to extract key information of ionosphere from the ionograms, the signal processing problem is transformed into a semantic segmentation task in computer vision, constructing an original ionograms dataset, and undergoing preprocessing such as discretization and manual annotation. By training a cGAN neural network to analyze the characteristic parameters of each layer's traces in the ionograms, the goal of segmenting different traces is achieved. The network is suitable for processing various types of ionograms under calm conditions, with an accuracy rate of over 95%, effectively saving time in manual parameter measurement and improving processing efficiency. An improved bottom inversion model of the International Reference Ionosphere and the NeQuick top model is used to invert the electron density profile above the ionosonde, while the top calculation results are corrected according to the actual measurement data from "CSES-1". By comparing the total electron content calculated with the data results publicly available from CDDIS, the accuracy of the ionosonde data is verified. On this basis, combined with the geomagnetic data acquired by the Gaoshaowo magnetometer, the ionosonde successfully observed the entire process of ionospheric anomalies during the geomagnetic storm on 23–24 April, 2023, and provided the results of the total electron content changes, offering accurate and reliable observational data for exploring the electromagnetic environment changes in western China.

Key words Vertical ionosonde, Bernoulli map code, cGAN, Ionograms, Electron density inversion, Magnetic storm observation

0 引言

电离层作为近地空间的重要组成部分, 是电磁波传播的重要载体. 电离层垂直探测是电离层地面探测技术中最为成熟的方式之一[1,2]. 垂测仪收发系统置于同一位置, 发射机垂直向电离层发射高频无线电磁波, 当发射频率等于电离层的等离子体频率时电磁波发生全反射, 接收机测量回波到达时间, 获取频率与高程的对应关系. 根据电离层频率与高度对应的曲线图, 可进一步获取电离层参数和电离层扰动信息等.

目前, 国外主要使用的电离层垂直探测仪有 CADI(加拿大), DPS-4D(美国) 及 IPS-71(澳大利亚), 中国有 WMI 与 PDI2(武汉) 等. 常用的电子浓度反演软件有 ARTIST(美国)、UDIDA(加拿大) 以及 Autoscala(意大利) 等[3]. 此外, 国内外均有研究或相关机构公开发布电离层的观测数据供研究和使用, 例如美国的 NOAA 以及中国的子午工程, 后者经过几十年的建设, 二期工程已至收尾阶段[4–6]. 上述设施为国内外进一步分析地球空间环境、发展电离层物理科学提供了有力的软硬件支撑及数据支持[7–10]. 但遗憾的是, ARTIST 等软件仅支持解析其库内在编台站数据的反演剖面, 库外台站数据无法根据该软件进行准确反演. 因此, 中国对电离层的研究仍旧依赖国外软件, 这限制了电离层反演的自主应用.

近年, 中国科学院国家空间科学中心联合中国科学院空天信息创新研究院在国家民用空间基础设施"十二五"项目的支持下, 于甘肃、宁夏建设了张衡一号电磁卫星比测校验场, 其中包含一台自主研发的电离层垂直探测仪. 该设备安置于宁夏银川, 可全天候实时监测电离层动态, 并每日自动推送相关数据[11–14]. 垂测仪系统采用脉冲压缩技术, 发射高频脉冲波进行电离层探测, 并首次应用一组 40 位 Bernoulli 映射序列, 解决回波信号干扰问题, 取得较好效果[15]. 相较于传统图像处理技术, 垂测仪通过 cGAN 网络提取强干扰频高图中回波描迹来判读相应参数, 极大地提升了处理效率. 同时根据张衡一号卫星搭载的朗缪尔探

针[16,17]实测数据修正顶部 Chapman 反演模型的系数, 并结合改进式 IRI 模型绘制电子浓度剖面图[18–20]. 最终, 实测结果获得了与 CDDIS 公开数据较高的拟合程度, 验证了垂测仪数据的真实性及处理流程的可靠性.

本文基于 2023 年 4 月 23－24 日发生的大地磁暴事件, 结合高沙窝镇 (距银川直线距离约 100 km) 磁通门监测的地磁数据, 观测到电离层在磁暴期间变化的全过程, 通过上述流程对当地电离层变化开展分析. 该磁暴引发了电离层负暴, 观测结果显示, 电离层各层在磁暴初相、主相、恢复相期间存在不同特征. 电离层总电子浓度在主相期间下降至 8 TECU 左右, 在持续约 41 h 恢复相期恢复至磁暴前的 78%. 此外, 电离层还发生了 F_2 层高度上升和临界频率降低的现象, 这与中国科学院国家空间科学中心空间环境预报中心公布的结果具有一致性. 目前, 银川电离层垂测仪系统运行稳定, 数据处理流程高效准确, 可为后续探究中国西部地区电离层异常变化提供可靠的业务化探测数据.

1 系统配置与编码类型

1.1 系统配置

银川电离层垂测仪由天线单元、射频收发单元、数字信号处理与控制单元和数据处理单元组成, 结构如图 1 所示[11,12]. 该系统的单次发射脉宽为 400 μs, 采用 40 位编码序列, 码元宽度为 10 μs, 提供多种编码选择类型, 收发保护间隔设置为 50 μs, 支持 1～30 MHz 频段扫描, 具有 3 种可选的步进频率, 即 25, 50, 100 kHz, 分别对应于 7.36, 3.68 和 1.84 min 的扫频时长. 系统的距离分辨率为 1.5 km, 接收窗口的范围在 67.5～560.1 km 之间. 每个频率的编码序列依次发射 100 次, 被电离层反射回到接收机与本地信号做 100 次的自相关累计, 由峰值位置确定虚高的数值. 当前, 银川电离层垂测仪每隔 15 min 对电离层进行一次观测, 采样率与多数常用垂测仪一致.

垂测仪天线系统采用一发双收体制, 两台 delta 天线正交架设, 分为东西向和南北向. 每台天线高约 30 m, 由 4 个 6 m 支撑杆辅助支撑. 天线顶部负载可承受 2000 W 的最大发射功率. 两天线在 1～30 MHz 频率范围内实测最大驻波比小于 2, 隔离度大于 20 dB, 1～10 MHz 主频段隔离度大于 30 dB, 能够实现在复杂背景噪声环境下的高精度探测. 在系统数控单元的控制下, 两台天线交替发射正交极化波, 同时接收电离层的反射回波来获取电离层的变化情况. 整个系统部分的具体细节参数参见表 1 和图 2.

1.2 编码类型

现代电离层探测仪系统多采用 13 位巴克码和 16 位互补码[21–26]. 上述两种编码在性能优越、应用广泛的同时, 也具有明显的缺点, 例如巴克码有码长的限制, 而互补码在一次发射须先后发射两组波形, 这增加了一倍探测时长. 由于空间电磁环境复杂, 垂测仪在接收到有效信号的同时也会接收到来源不定的干扰信号. 银川电离层垂测仪在运行初期采用了 40 位类巴克码作为发射信号编码类型, 接收机接收到的回波中存在着明显杂波信号. 出现在 70 km 和

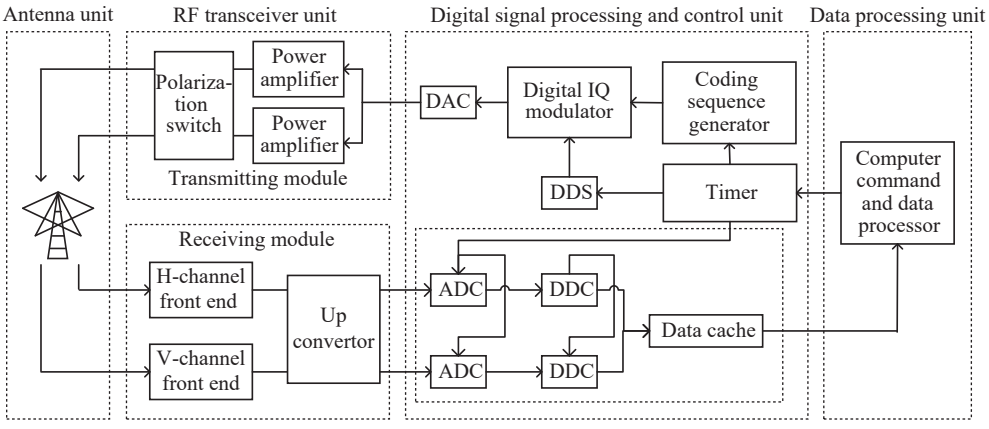

图 1 垂测仪系统

Fig. 1 Diagram of the vertical ionosonde

表 1　银川电离层垂测仪系统参数

Table 1　Yinchuan vertical ionosonde system parameters

指标	参数
天线	Delta天线
传输峰值功率/W	500
编码类型	40位Bernoulli序列、类巴克码、m序列
码元时宽/μs	10
工作频率/MHz	1～30
步进频率/kHz	25, 50, 100
接收机带宽/kHz	100
IF/MHz	70
ADC采样/MHz	40
相干累积次数	100
探测距离/km	67.5～560.1
距离分辨率/km	1.5
探测时长/min	7.36, 3.68, 1.84
采样间隔/min	15

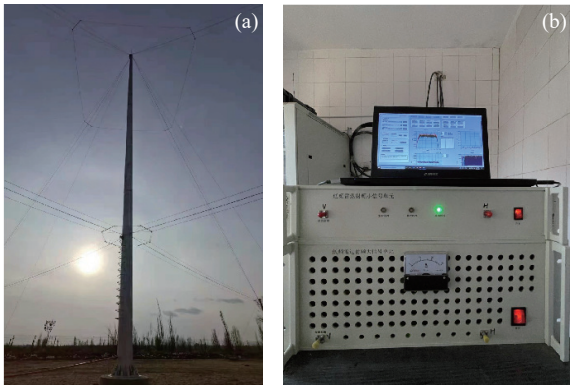

图 2　垂测仪硬件组成部分. (a) Delta 天线, (b) 操作主机

Fig. 2　Field deployment of the vertical ionosonde. (a) Delta antenna, (b) operations master

500 km 的虚高处, 频率范围 4.5～8 MHz, 恰好处在日间电离层 F_2 层临界频率附近, 严重影响相应参数判读, 延误后续工作. 采用 Bernoulli 映射序列作为编码类型与 40 位类巴克码进行对比试验, 结果如图 3 所示. 两组原始信号分别采样于 2022 年 4 月 6, 7 日. 严重干扰通常出现在类巴克码的自相关函数两侧的肩部, 伴随着噪声电平的增加, 有效信号被抑制, 信噪比降低, 反映在频高图上即为大面积的椒盐噪声

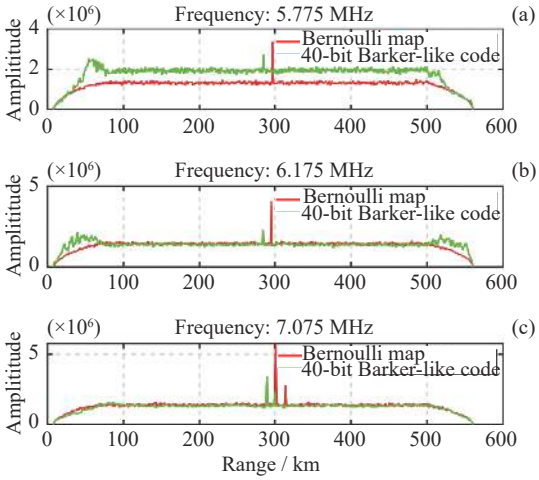

图 3　两种编码在不同反射频率下的自相关函数对比

Fig. 3　Comparison of the two sequences ACFs at different frequencies

以及垂线噪声. Bernoulli 映射序列的统计独立性使其对干扰信号具有良好的抑制作用, 在提升信号强度的同时, 将自相关函数两侧凸起的干扰噪声消除, 在 5.775 和 6.175 MHz, 信杂比的最大改善甚至高达 5 dB[15,27].

2　电子浓度反演

2.1　描迹提取

频高图中回波描迹提取主要面临的问题在于如何将 F_2 层 O 波与 X 波分离. 通常有硬件电路分离以及常规图像处理技术方法. 前者通过向电离层发射不同旋向的圆极化信号再接收, 从而将两种波分离. 该方法要求收发天线保持相同旋向, 同时设备系统应具有较高灵敏度[28]. 后者一般通过腐蚀、膨胀等操作消除图中噪声、连接并提取描迹主干, 再经斜率外推等拟合方法将 O 和 X 波分离, 获得主要参数. 该方法在拟合过程中会引入误差, 影响参数的判读. 以上两种方法的本质在于阈值去噪, 即通过设置阈值, 抑制杂波, 提取有效信号[29,30]. 阈值去噪在一般环境下去噪效果显著, 基本满足任务要求. 但在强干扰弱信号环境中, 低于阈值的有效信号会被视为杂波而一并剔除, 影响参数度量效果.

采用 cGAN 网络提取频高图中的回波描迹. 收集近一年中的频高数据, 构建一个包含 9000 组训练数据、1000 组测试数据以及 10000 组验证数据的回波

描迹提取数据集. 将原始频高数据映射为二维图像, 分别对不同层的回波描迹做分类标注, 映射为不同的颜色, 使原本点、线的问题转化为图像处理中语义分割的问题, 如图 4 所示. 为了实现从频高图中分割描迹区域, 使用条件生成式对抗神经网络 (cGAN), 包含生成网络 (generator) 和判别网络 (discriminator). 在训练过程中, 生成网络的作用是生成尽可能真实的分割结果以欺骗判别网络, 而判别网络的目标是尽可能把生成网络生成的结果与标注的真值区分开, 因此生成网络和判别网络的训练过程构成动态博弈, 促进了彼此的学习能力, 最终实现了准确的描迹提取. 网络的损失函数如下:

$$\min_G \max_D V(D,G) = E_{x\sim p_{\text{data}}(x)}\left[\lg D(x)\right] + E_{z\sim p_z(z)}\left[\lg\left(1-D\left(G(z)\right)\right)\right]. \tag{1}$$

其中, D为判别网络函数, G为生成网络函数, x为网络的输入, E表示期望值, p表示不同的数据分布. 图 4 中左列为根据银川电离层垂测仪采集的回波数据绘制的原始频高图, 右列为经由 cGAN 网络分类提取的描迹图, 各层描迹被映射为不同颜色用以区分.

在训练集上经过充分训练后, GAN 网络模型可以在验证集上实现准确的描迹提取. 遍历所有测试集数据, 发现在空间环境平稳的条件下, 各层描迹基本都能完整提取. 无论是早上存在 Es 层与 E 层粘连,

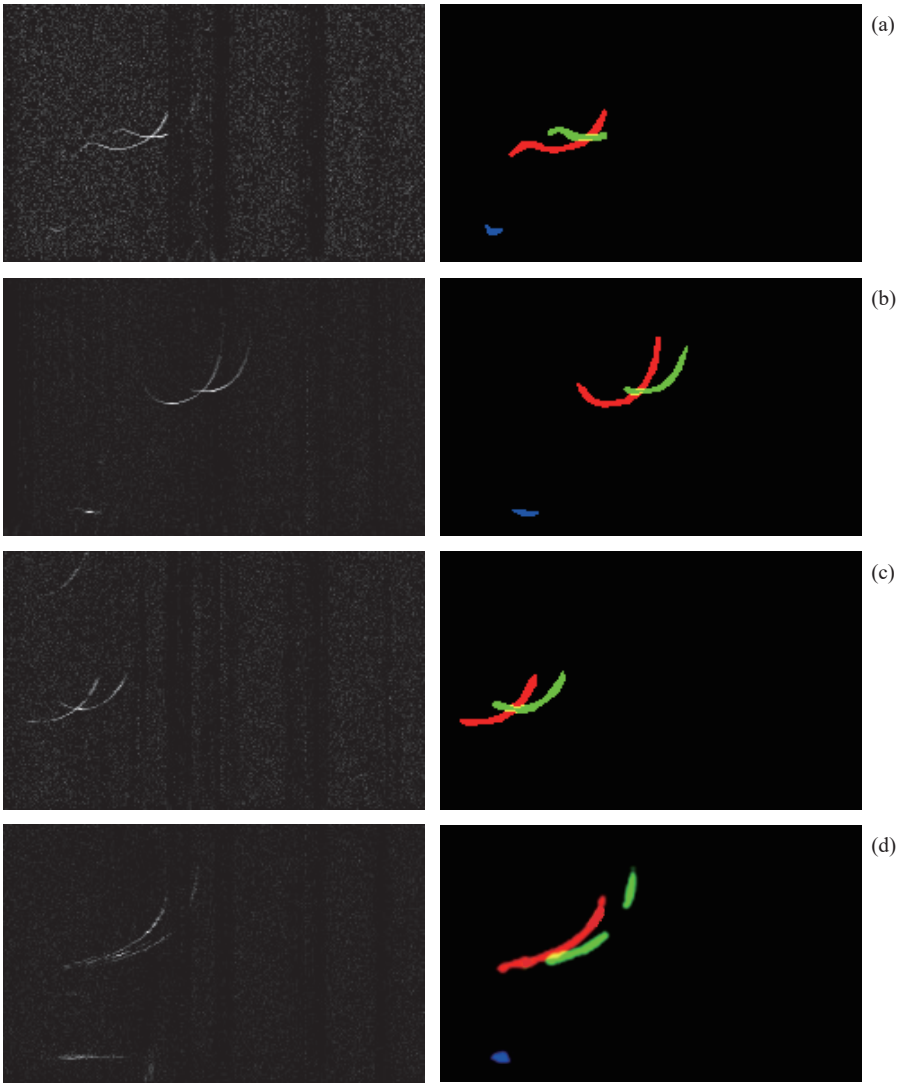

图 4 原始频高图及其对应的分类 (右列为经由 cGAN 网络分类提取的描迹)

Fig. 4 Original ionograms and its corresponding classification graph (Trace extracted by cGAN network classification is listed on the right)

以及 E 层发生二跳与 F_1 层相交, 或是夜间 E 层消失, 只有 F_2 层 O 和 X 波存在, 乃至 F_2 层产生二跳、断连, 都可以完整分离, 准确率在 95% 以上. 模型的有效性得到了验证.

该方法在处理频高图时无需使用函数拟合提取参数, 而通过分析当前频高图的特征图, 获取描迹特征. 网络将噪声视作背景而抑制, 将描迹视作前景而提取, 分析前景获取各层参数. 此种方法在降低误差引入率的同时较人工处理提高处理效率, 可在短时间内完成一天乃至一周的数据处理.

2.2 反演模型

电离层垂直探测底部电子浓度反演常用的模型有 Reinisch 和 Huang 等基于国际参考电离层 (International Reference Ionosphere, IRI) 改进的垂测反演模型、NeQuick 模型和 QPS 模型等[31–35], 顶部通常使用模型为 var-Chapman 模型[36,37], 通常为模型值, 使用虚线绘制. 本文基于改进的 IRI 电离层反演模型、采用意大利的 Carlo Scotto 提出的反演方法对获取的频高图进行计算, 理论反演曲线如图 5 所示[18,19,38,39], 表述电子浓度与高度关系的反演模型如下:

$$N_{EF}(h)=N_{\mathrm{m,E}}\left[1-\left(\frac{h-h_{\mathrm{m,E}}}{y_{\mathrm{m,E}}}\right)^2\right],\quad h_{\mathrm{b}}E\leqslant h\leqslant h_{\mathrm{m,E}};\tag{2}$$

$$N_{DE}(h)=a_0h^3+b_0h^3+c_0h^3+d_0,\quad h_{\mathrm{m,E}}<h\leqslant h_{\mathrm{v,E}};\tag{3}$$

$$N_{CD}(h)=(N_{\mathrm{m,E}}-\delta N_{\mathrm{v,E}})\left[1+\left(\frac{h-h_{\mathrm{v,E}}}{y_{\mathrm{mv}}}\right)^2\right],\quad h_{\mathrm{v,E}}<h\leqslant h_{\mathrm{m,E}}+\delta h_{\mathrm{v,E}};\tag{4}$$

$$N_{AB}(h)=N_{\mathrm{m,F_2}}\frac{\exp(-X^{B_1})}{\cosh X},\quad X=\frac{h_{\mathrm{m,F_2}}-h}{B_0},\ h_{\mathrm{m,F_1}}\leqslant h\leqslant h_{\mathrm{m,F_2}};\tag{5}$$

$$N_{BC,1}(h)=N_{AB}(h'),\quad h'=h_{\mathrm{m,F_1}}\left[1-\left(\frac{h_{\mathrm{m,F_1}}-h}{h_{\mathrm{m,F_1}}}\right)^{1+D_1}\right],\quad \frac{(h_{\mathrm{m,F_1}}+H_{\mathrm{st}})}{2}\leqslant h<h_{\mathrm{m,F_1}};\tag{6}$$

$$N_{BC}(h)=N_{AB}\left(h''\right),\quad h''=h_{\mathrm{m,F_1}}\left[1-\left(\frac{h_{\mathrm{m,F_1}}-\mu}{h_{\mathrm{m,F_1}}}\right)^{1+D_1}\right],\quad h_{\mathrm{m,E}}+\delta h_{\mathrm{v,E}}<h\leqslant H_z;\tag{7}$$

$$N_{\mathrm{top}}=N_{\mathrm{m,F_2}}\exp\{c[1-z-\exp(-z)]\},\quad z=\frac{h-h_{\mathrm{m,F_2}}}{H_T},\ h_{\mathrm{m,F_2}}\leqslant h\ .\tag{8}$$

式 (7) 中,

$$\mu=\begin{cases}h, & H_{\mathrm{st}}=h_{\mathrm{m,E}}+\delta h_{\mathrm{mv,E}};\\ H_Z+\dfrac{T}{2}-\left[T\cdot\left(\dfrac{T}{4}+H_Z-h\right)\right]^{0.5}, & H_{\mathrm{st}}>h_{\mathrm{m,E}}+\delta h_{\mathrm{mv,E}};\\ H_Z+\dfrac{T}{2}+\left[T\cdot\left(\dfrac{T}{4}+H_Z-h\right)\right]^{0.5}, & H_{\mathrm{st}}<h_{\mathrm{m,E}}+\delta h_{\mathrm{mv,E}};\end{cases}\quad T=\frac{(H_Z-H_{\mathrm{st}})^2}{H_{\mathrm{st}}-(h_{\mathrm{m,E}}+\delta h_{\mathrm{mv,E}})}.\tag{9}$$

上述公式表明, 电离层底部可以分为五部分处理, EF 段为 E 层, CD 和 DE 分别为谷区的上下部分, BC 段同样为两部分 F_1 层和 F_1 与谷区顶部的连接层, AB 段为 F_2 层.

反演过程中, E 层最大高度 $h_{\mathrm{m,E}}$ 和半厚度 $y_{\mathrm{m,E}}$ 通常视作已知参数, 依据模型分别设置为 110 km 和 15 km, E 层临界频率可通过频高图判读或通过计算当时与太阳高度角的关系得到. 谷区顶部 C 点处电子浓度与 $h_{\mathrm{m,E}}$ 处相同, D 点电子浓度由 $N_D=N_{\mathrm{m,E}}-\delta N_{\mathrm{v,E}}$ 确定, 谷区半厚度 y_{mv} 以及 DE 段系数均由整个剖面的连续性确定. 在 F_1 和 F_2 层均存在的情况下, A 和 B 两点横坐标各代表 F_1 和 F_2 层电子浓度最大处, 由 $N_{\mathrm{e}}=1.24\times10^{10}\times f_0^2$ 得出, f_0 为当前层临界频率, $h_{\mathrm{m,F2}}$ 由 E 层临界频率与 F_2 层临界频率共同确定, $h_{\mathrm{m,F1}}$ 则是根据 L-condition 判定是否存在 cusp 从而直接判读或使用模型值间接得到[40]. $N_{BC,1}$ 中的 H_{st} 由 $N_{AB}=N_{\mathrm{m,E}}$ 确定, N_{BC} 中的 H_{st} 由 $N_{BC,1}=N_{\mathrm{m,E}}$ 确定. 当无 F_1 层时, $D_1=0$. 综合上述参数, 找出与实测点均方根误差最小的多组参数, 再根据模型虚高与实测虚高相关系数最高的一组作为剖面的参数. N_{top} 中 H_T 为 $h_{\mathrm{m,F2}}$ 处对应中性大气标高值[41], c 为待定系数, 一般为 0.5, 也可根据朗缪尔探针测量值修正. 此时, 整个剖面由式 (2)～(9) 以及 $N_{EF}, N_{DE}, N_{CD}, N_{AB}, N_{BC}$ 和 N_{top} 共同确认. 以上即为绘制一张电子浓度剖面图的全部流程. 本文反演的 TEC 结果是由 E 层高度 95 km 至电离层顶部 1000 km 内电子浓度垂直剖面积分所得.

图 6(a)～(d) 为张衡一号卫星经过垂测仪上空约 500 km 时, 根据其搭载的朗缪尔探针所测得数据对

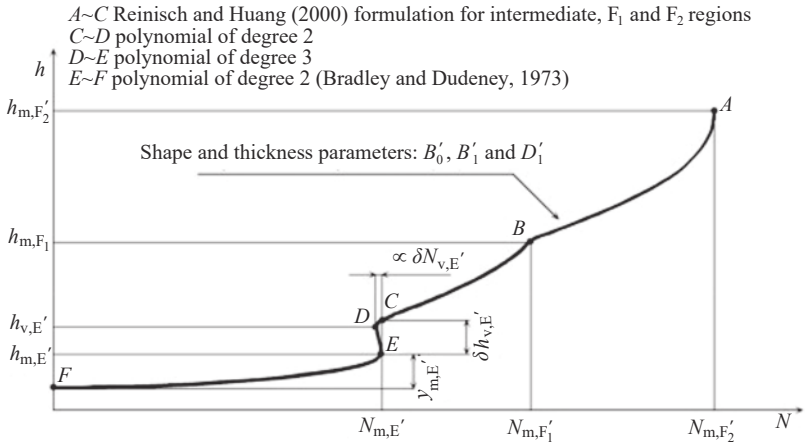

图 5 理论电离层电子浓度反演曲线

Fig. 5 Theoretical ionospheric electron density inversion curves

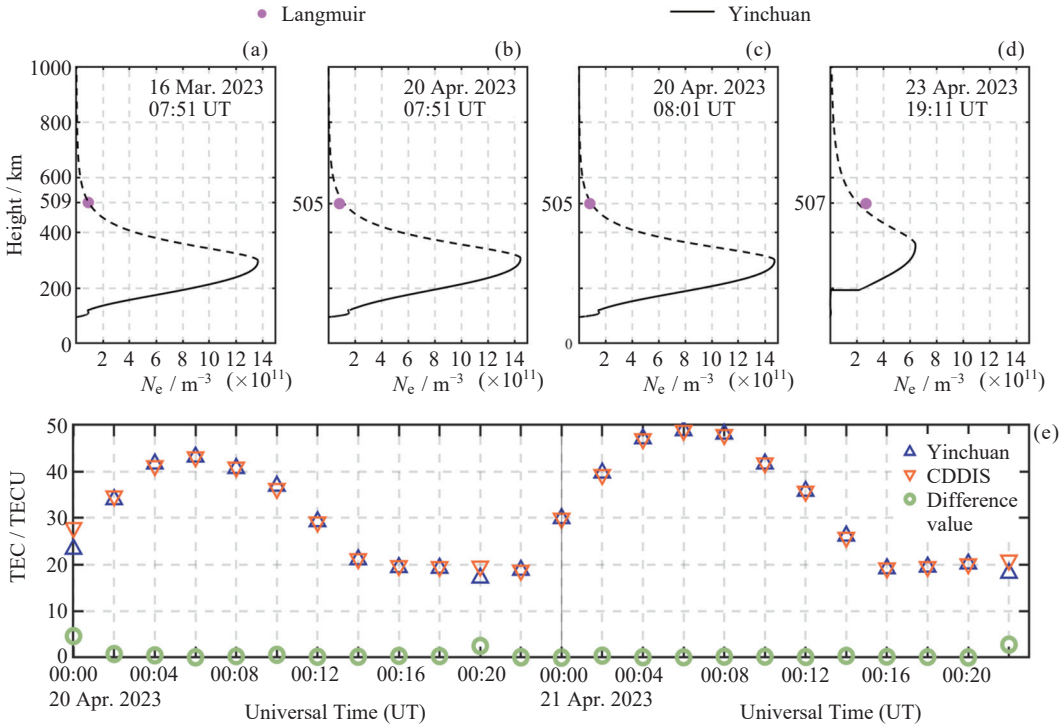

图 6 典型电子浓度剖面及日变化. (a)~(d) 经由朗缪尔探针修正电子浓度剖面, (e) 当地总电子浓度日变化

Fig. 6 Electron density profile and diurnal variation of typical ionograms. (a)~(d) modified electron density profiles *via* Langmuir probe, (e) diurnal variation of local TEC

顶部模型的参数修正. 朗缪尔探针浸入电离层等离子体内部, 对其施加不同电压, 收集电流值、探针表面积及施加电压差值即可得到当前位置的电子浓度、等离子体温度等信息. 有研究将张衡一号卫星探测数据与 SWARM-B 卫星数据对比验证, 认为张衡一号卫星观测数据集具有重要的研究价值, 探测结果具有准确性[42,43]. 朗缪尔探针为修正顶部电子浓度反演模型的系数提供了修正依据, 弥补了地面探测无法探究电离层顶部的不足, 提高顶部反演结果的精度. 图 6(e)为根据上述算法流程绘制的平静日单日总电子浓度变化情况与 CDDIS 公开数据的结果对比. 在结合朗缪尔探针修正顶部反演模型参数后, 总电子浓度实测值

与 CDDIS 公开数据相比, 均值偏差仅为 0.3 TECU, 二者具有很高一致性, 验证了垂测仪数据的准确性. 整套算法可在短时间内给出高准确度的电子浓度剖面反演结果, 实时监测电离层的动态情况, 及时捕捉电离层异常变化.

3 电离层暴观测

近年处于太阳活动的高发时期[44], 根据北京时间 2023 年 4 月 23 日 17:00 至 24 日 23:00 (世界时 4 月 23 日 09:00 至 24 日 15:00) 发生的大地磁暴事件, 结合设置在高沙窝的磁通门获取的地磁数据, 对整个电离层垂测仪的回波数据进行电子浓度反演及分析, 如图 7 所示.

该磁暴事件由太阳日冕层物质抛射 (CME) 到达地球引起. 从图 7 可以看出, CME 为地磁场带来强烈扰动, 引起了大地磁暴, 磁暴的初始相在 23 日 15:00 UT, 持续约 7 h, Kp 指数由 3.33 升至 4.667, 期间 f_0F_2 下降约 4 MHz, TEC 下降约 10 TECU. 磁暴在 23 日 22:00 UT 进入主相, 持续约 13 h, Kp 指数升至 7 以上, 地磁总场下降约 150 nT, f_0F_2 基本在 4.5 MHz 左右, 同时 TEC 降至 20 TECU, 最低至 8.29 TECU, 较平静日同时段下降约 30 TECU. 磁暴于 24 日 09:00 UT 进入恢复相, 持续时长约 40 h, Kp 指数降至 4 以下, 电离层恢复平静, f_0F_2 升至 10 MHz 左右, TEC 升至 40 TECU 左右. AE 指数于 4 月 23 日 10:00 UT 升至 500 nT 以上, 并在 14:00 UT 升至 1000 nT, 甚至多次出现 AE 指数超过 2000 nT 的现象, 造成了强烈的极区焦耳加热*. 不同地区对此次地磁暴的响应不同甚至相反. 此次地磁暴造成亚洲中纬地区上空中性气体成分的变化, [O]/[N_2] 浓度比值下降, 因而发生电离层负暴事件, 持续时长约 2～3 d[45].

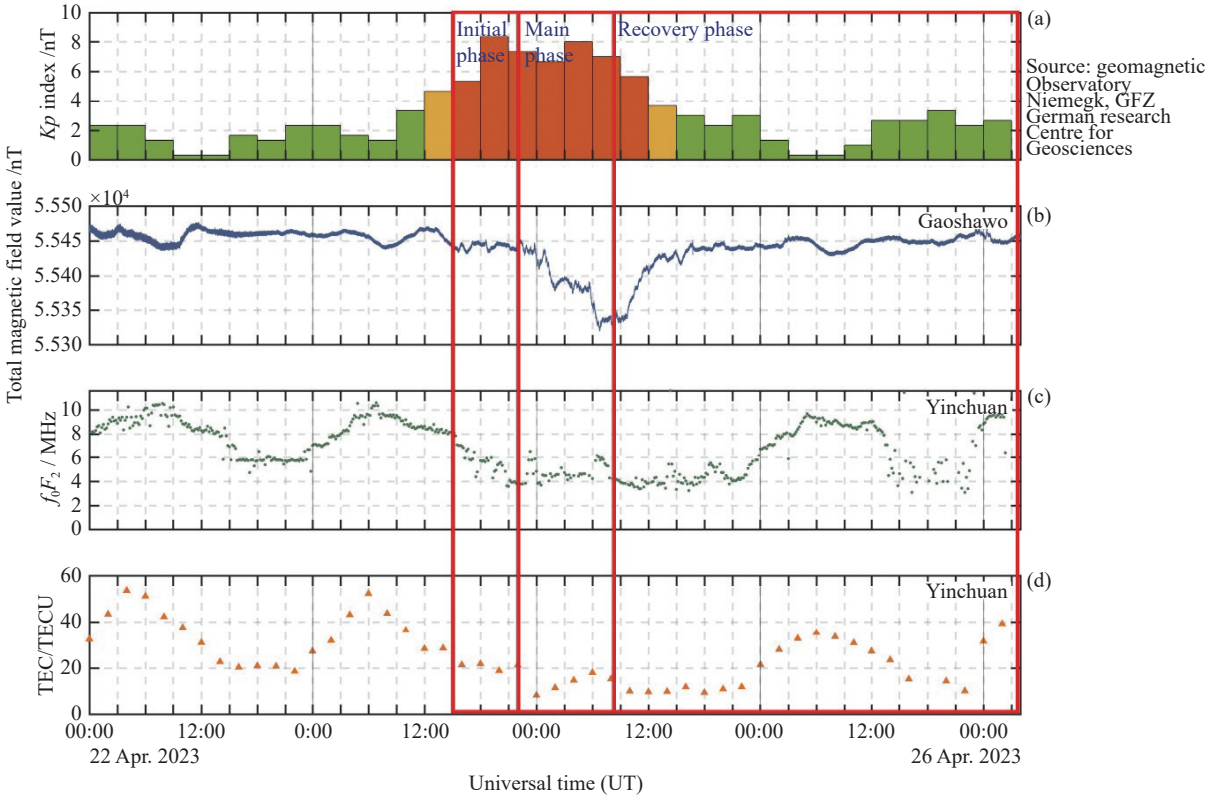

图 7 Kp 指数 (a), 高沙窝磁通门地磁总场 (b), 当地 F_2 层临界频率 (c), 总电子浓度 (d) 的变化情况

Fig. 7 Variations of Kp index (a), total magnetic field value of Gaoshavo flux gate (b), critical frequency of F_2 layer (c), and total electron content(d)

* https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_realtime/index.html

电离层于 4 月 23－25 日期间日变化频高图如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 磁暴发生前后, 频高图中各层回波主描迹清晰, 各层临界频率可从图中直接读出. 由于磁暴发生时间临近当地傍晚, 磁暴干扰和太阳高度角减小均为导致 F_2 层临界频率降低的原因如图 8(a)～(c) 08:00 UT－14:00 UT 所示. 随着磁暴持续增强, 频高图中回波描迹强度变弱, 不再清晰可见, 噪点数量增多, 有效采样点减低. 期间整个描迹向频高图左上方漂移, f_0F_2 减小至 7.7 MHz, $h_{\mathrm{m,F2}}$ 升高约 40 km. 时间处在当地夜间, f_0F_2 持续降低, 最后维持在 4 MHz 左右, 较 4 月 22 日同一时段下降约 1.5～2 MHz, 同时 F_2 层升至 300 km 以上, 如图 8(d)～(f) 17:00 UT－22:00 UT 所示. 4 月 24 日日间, 地磁场强度依然维持在大地磁暴水平, 回波描迹强度变弱, F_2 层一直维持在 300 km 左右高度, 较平静日同时段升高约 15～20 km. f_0F_2 未随太阳升高而增加, 一直保持在较磁暴夜间稍高的数值, 约为 5 MHz. 尤其在当地太阳高度角最高的 12:00 LT－14:00 LT (04:00 UT－06:00 UT), f_0F_2 理应出现当日最大值的时段, 也依然维持低值, 较前日 (22 日) 降低约 4～6 MHz, 如图 8(g)～(l) 所示. 4 月 24 日, 在当地夜间时分, 此时地磁暴事件结束, 地磁场恢复至平静状态, 如图 8(m)～(o) 所示. 同时, F_2 层临界频率约为 5 MHz, 较前日同时段有小幅上升. 4 月 25 日日间, 频高图中虽有噪点, 但回波主描迹清晰可辨, 可通过图中的曲线直接判读各层参数, f_0F_2 随太阳升高而增至 10.5 MHz 左右, $h_{\mathrm{m,F2}}$ 回落至 300 km 以下, 可以断定, 电离层重建基本完成, 状态基本恢复如平静日时, 如图 8(p)～(r) 所示.

结合垂测仪数据, 联系上述模型对电离层各层关键信息进行提取及电子浓度反演, 结果如图 8 所示. 在地磁场遭受影响后的 6～8 h, 电离层才给出延迟反应. 这种扰动对电离层的影响, 映射至频高图中, 即 F_2 层高度升高, f_0F_2 较以往平静时期同时段更低. F_2 层是垂直空间电子密度最大的区域, 因此较低的 f_0F_2 导致整个电离层总电子浓度水平下降, 并在磁暴干扰整个期间持续保持极低水平. 这种状态一直延续到磁暴结束后的 8 h 才有所回升. 在此期间, 电离层逐渐恢复平静, 总电子浓度缓慢升高, 但也并未完全恢复至磁暴发生前的水平. 尤其在 25 日午间, 较磁暴

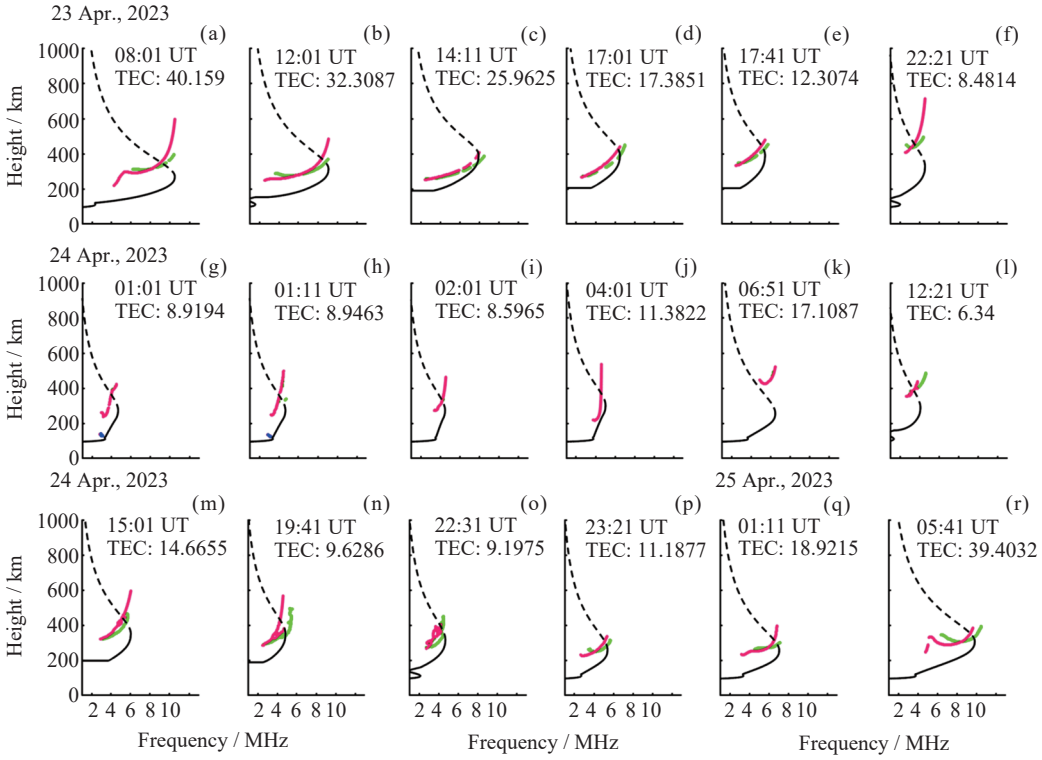

图 8　2023 年 4 月 23－25 日电离层日变化频高图

Fig. 8　Diurnal variation of the ionograms on 23－25 April 2023

发生前日 (22 日) 同时段下降约 12 TECU 之后, 电离层于 26 日逐步恢复正常.

4 结论

垂直探测是电离层观测的传统手段之一. 根据 2023 年 4 月的一起由日冕层物质抛射引起的地磁扰动事件, 结合地磁监测数据, 对银川电离层垂测仪进行性能分析. 垂测仪选择 Bernoulli 编码序列探测电离层, 并采用神经网络对回波进行描迹提取, 通过改进型电子浓度反演模型计算电离层总电子浓度变化情况. 在日冕物质到达地球后, 高沙窝镇的磁通门监测到地磁场立刻发生剧烈变化, 当地地磁场总值下降 150 nT. 由于电离层具有惰性[46], 频高图在磁暴发生 6～8 h 后才直观显示了电离层的异常变化. 同时地磁扰动也导致 F_2 层复合率增加, $h_{m,F2}$ 升高、f_0F_2降低以及 TEC 下降. 银川电离层垂测仪回波数据于平静日的反演结果与 CDDIS 观测结果具有高度一致性, 且在磁暴期间成功捕捉到电离层异常变化并经过数据处理及时给出监测结果.

综上所述, 银川电离层垂测仪系统设备在大地磁暴期间依然运行良好, 具有抗干扰性, 其回波数据真实有效, 实现了对电离层的实时监测, 弥补了 ARTIST 软件无法给出其库外台站电子剖面结果的不足, 实现了电离层准确观测的业务化运行, 为探索中国西部地区电磁环境变化提供了可靠的设备和数据支持.

参考文献

[1] DAVIES K. Ionospheric Radio[M]. London: P. Peregrinus on Behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1990

[2] GHEBREBRHAN O, LUCE H, YAMAMOTO M, *et al*. Interference suppression factor characteristics of complementary codes for ST/MST radar applications[J]. *Radio Science*, 2004, **39**(3): RS3013

[3] XIAO Z W, WANG J, LI J, *et al*. Deep-learning for ionogram automatic scaling[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(4): 942-950

[4] LIU Libo, CHEN Yiding, YUE Huijun, *et al*. General aeport on "response and application models of the ionosphere over 120°E meridional chain"[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2016, **13**(20): 180-181 (刘立波, 陈一定, 乐会军, 等. "120°E 子午链上空电离层响应和应用模式"一般性科技报告 [J]. 科技创新导报, 2016, **13**(20): 180-181)

[5] WANG Wei, YAN Yihua, TAN Baolin, *et al*. Wide-band solar radio spectral monitoring in the phase II of Chinese meridian project[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(1): 1-5 (王威, 颜毅华, 谭宝林, 等. 子午工程二期宽波段太阳射电频谱监测 [J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 2024, **55**(1): 1-5)

[6] WANG Zheng, CAO Guangwei, HU Lianhuan, *et al*. Domestic global navigation satellite system ionospheric total electron content and scintillation monitor prototype testing and data quality comparison analysis for the phase II of Chinese meridian project[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(1): 77-93 (王铮, 曹光伟, 胡连欢, 等. 子午工程二期 GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪样机测试及数据对比分析 [J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 2024, **55**(1): 77-93)

[7] ZHU Zhengping. Studies of Observation Mode in Ionospheric Vertical Sounding[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics (WIPM) of Chinese Academy of Sciences, 2006 (朱正平. 电离层垂直探测中的观测模式研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (武汉物理与数学研究所), 2006)

[8] SCOTTO C. A method for processing ionograms based on correlation technique[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 2001, **26**(5): 367-371

[9] PEZZOPANE M, SCOTTO C. Automatic scaling of critical frequency f_0F_2 and MUF $(3000)F_2$: a comparison between autoscala and ARTIST 4.5 on Rome data[J]. *Radio Science*, 2007, **42**(4): RS4003

[10] PEZZOPANE M, SCOTTO C. Software for the automatic scaling of critical frequency f_0F_2 and MUF(3000)F_2 from ionograms applied at the ionospheric observatory of Gibilmanna[J]. *Annals of Geophysics*, 2004, **47**(6): 1783-1790

[11] JIN Mengya. Antenna Design and Digital Control System Development of a High Performance Ionosonde[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020 (靳梦雅. 一种高性能电离层测高仪的天线设计与数控系统研制 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2020)

[12] 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)

[13] ZHAO Gangquan. Ionospheric Radar Echo Data Processing in Yinchuan Area[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2022 (赵港权.

银川电离层雷达回波数据处理 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2022)

[14] ZHAO Gangquan, WANG Caiyun, LIU Dapeng, *et al*. Development of a low-power ionosonde in Yinchuan and analysis of preliminary test results[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 618-626 (赵港权, 王彩云, 刘大鹏, 等. 低功耗电离层垂测仪系统及在银川地区的试验 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(4): 618-626)

[15] HAN S J, GUO W, LIU P, *et al*. Chaotic coding for interference suppression of digital ionosonde[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(15): 3747

[16] LIU C, GUAN Y B, ZHENG X Z, *et al*. The technology of space plasma *in-situ* measurement on the China seismo-electromagnetic satellite[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, **62**(5): 829-838

[17] PEZZOPANE M, PIGNALBERI A. The ESA swarm mission to help ionospheric modeling: a new NeQuick topside formulation for mid-latitude regions[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 12253

[18] SCOTTO C. Electron density profile calculation technique for Autoscala ionogram analysis[J]. *Advances in Space Research*, 2009, **44**(6): 756-766

[19] WANG Huaxu, GUO Wenling, WEI Na, *et al*. The method improvement of ionospheric vertical profile model[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, **32**(1): 73-78 (王华旭, 郭文玲, 蔚娜, 等. 电离层垂直剖面建模方法改进研究 [J]. 电波科学学报, 2017, **32**(1): 73-78)

[20] ZEREN Zhima, LIU Dapeng, SUN Xiaoying, *et al*. Current status and scientific progress of the Zhangheng-1 satellite mission[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, **54**(4): 455-465 (泽仁志玛, 刘大鹏, 孙晓英, 等. 张衡一号电磁卫星在轨情况及主要的科学成果 [J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 2023, **54**(4): 455-465)

[21] TSMOTS I, RIZNYK O, RABYK V, *et al*. Implementation of FPGA-based barker's-like codes[C]//Proceedings of the XV International Scientific Conference "Intellectual Systems of Decision Making and Problems of Computational Intelligence". Cham: Springer, 2020: 203-214

[22] 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)

[23] LIU T X, YANG G B, HU Y G, *et al*. A novel ionospheric sounding network based on complete complementary code and its application[J]. *Sensors*, 2019, **19**(4): 779

[24] BOSTAN S M, URBINA J V, MATHEWS J D, *et al*. An HF software-defined radar to study the ionosphere[J]. *Radio Science*, 2019, **54**(9): 839-849

[25] SEMETER J, BUTLER T, HEINSELMAN C, *et al*. Volumetric imaging of the auroral ionosphere: initial results from PFISR[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, **71**(6/7): 738-743

[26] LI J, LIU M, OU J P, *et al*. A novel radar waveform design for suppressing autocorrelation side-lobe based on chaotic and single fusion encoding method[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2022, **111**: 77-88

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

[28] 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)

[29] XU Gaofeng. Study on Parameters Extraction in Ionogram Based on Image Processing[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (徐高峰. 基于图像处理的电离层垂测频高图参数提取方法的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014)

[30] LU Hongguang. Study on Automatic Scaling of E, Es in Ionogram Based on Image Processing[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (卢红光. 基于图像处理的垂测频高图 E、Es 层描迹自动判读研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013)

[31] REINISCH B W, HUANG X Q. Low latitude digisonde measurements and comparison with IRI[J]. *Advances in Space Research*, 1996, **18**(6): 5-12

[32] HUANG X Q, REINISCH B W. Vertical electron density profiles from the Digisonde network[J]. *Advances in Space Research*, 1996, **18**(6): 121-129

[33] HUANG H, MOSES M, VOLK A E, *et al*. Assessment of IRI-2016 f_0F_2 and h_mF_2 model options with digisonde, COSMIC and ISR observations for low and high solar flux conditions[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(5): 2093-2103

[34] BILITZA D, PEZZOPANE M, TRUHLIK V, *et al*. The international reference ionosphere model: a review and description of an ionospheric benchmark[J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, **60**(4): e2022RG000792

[35] EZQUER R G, SCIDÁ L A, MIGOYA ORUÉ Y O, *et al*. NeQuick 2 total electron content predictions for middle latitudes of north American region during a deep solar minimum[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, **154**: 55-66

[36] WATANABE S, MIYOSHI Y, TSUCHIYA F, *et al*. Mode ling of topside ionosphere and plasmasphere[J]. *Research Square*, 2021

[37] MARINOV P, KUTIEV I, BELEHAKI A, *et al*. Modeling the plasmasphere to topside ionosphere scale height ratio [J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2015, **5**:

A27

[38] SCOTTO C, SABBAGH D. Improvements in bottomside electron density definition in the autoscala program[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **65**(5): 1432-1438

[39] SCOTTO C, SABBAGH D, IPPOLITO A. Accuracy of h_mF_2 estimations, including IRI-2020 options and ionograms validated parameters, compared to ISR measurements at Millstone Hill[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **72**(8): 3202-3211

[40] SCOTTO C, RADICELLA S M, ZOLESI B. An improved probability function to predict the F_1 layer occurrence and L condition[J]. *Radio Science*, 1998, **33**(6): 1763-1765

[41] NAVA B, COÏSSON P, RADICELLA S M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, **70**(15): 1856-1862

[42] PIGNALBERI A, PEZZOPANE M, ALBERTI T, *et al*. Modeling the topside ionosphere effective scale height through in situ electron density observations by low-earth-orbit satellites[J]. *Universe*, 2023, **9**(6): 280

[43] YAN R, GUAN Y B, SHEN X H, *et al*. The Langmuir probe onboard CSES: data inversion analysis method and first results[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 479-488

[44] SUN Xiaoying, DUAN Suping, LIU Weining. Correlation analysis between magnetic storms and solar extreme ultraviolet radiation during the 23rd solar cycle[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(5): 697-703 (孙晓英, 段素平, 刘维宁. 第 23 太阳活动周太阳极紫外辐射与磁暴相关性分析 [J]. 空间科学学报, 2021, **41**(5): 697-703)

[45] ARSLAN TARIQ M, LIU L B, SHAH M, *et al*. Longitudinal variations of ionospheric responses to the February and April 2023 geomagnetic storms over American and Asian sectors[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(6): 3033-3049

[46] XIONG Nianlu, TANG Cunchen, LI Xingjian. Introduction to Ionospheric Physics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1999 (熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999)

作者简介

韩思佳 女, 1994 年 12 月出生于内蒙古自治区包头市. 现为中国科学院国家空间科学中心在读博士研究生, 主要研究方向为电离层探测技术、电子浓度反演等.
E-mail: hansijia18@mails.ucas.ac.cn

郭 伟 (通信作者) 男, 1967 年 7 月出生于吉林省长春市. 现为中国科学院国家空间科学中心研究员、博士生导师, 主要研究方向为电离层探测技术, 主、被动雷达系统设计与研制, 目标信息获取与处理, 微波遥感器测试与定标等.
E-mail: guowei@nssc.ac.cn