0254-6124/2026/46(5)-1099-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HAO Yongqiang, ZHANG Donghe. Development and Scientific Achievements of the Ionospheric Doppler Sounder at Peking University: a Forty-year Retrospective (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1099–1109. CSTR:32142.14.cjss.2025–0198. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0198

北京大学电离层高频多普勒频移监测仪研制发展历程*

郝永强[1] 张东和[2]

1(中山大学大气科学学院 珠海 519082)

2(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

摘 要 肖佐教授自 1985 年以来领导研制了北京大学电离层高频多普勒频移监测仪, 实现了基于计算机的数字化数据采集系统, 对电离层扰动开展实时连续监测; 子午工程一期监测仪采用 GPS 驯服频率源与直接数字频率合成技术, 实现了技术升级和设备小型化; 子午工程二期进一步引入软件无线电技术与“一发三收”台阵设计, 形成多空间尺度监测网络. 基于长期的持续观测数据, 肖佐教授领导团队开展了电离层对太阳爆发、磁暴、台风、地震等响应的研究, 在地球空间多圈层耦合研究领域取得了系列开创性成果.

关键词 电离层高频多普勒频移, 电离层扰动, 地球空间多圈层耦合, 子午工程

中图分类号 P352

Development and Scientific Achievements of the Ionospheric Doppler Sounder at Peking University: a Forty-year Retrospective

HAO Yongqiang[1] ZHANG Donghe[2]

1(*School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai* 519082)

2(*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract Since 1985, Professor XIAO Zuo has led the development of the ionospheric Doppler sounder at Peking University. The initial system implemented a computer-based digital acquisition system capable of continuous real-time monitoring of ionospheric disturbances. During the Chinese Meridian Project Phase I, the instrument was upgraded using a GPS-disciplined frequency standard and direct digital synthesis technology, achieving improved performance and hardware miniaturization. In Phase II, further advances were made through the incorporation of software-defined radio techniques and an array configuration of one transmitter and three receivers, enabling a monitoring network that spans multiple

* 东半球空间环境地基综合监测子午链 (子午工程) 项目和国家自然科学基金项目 (42374186) 共同资助

2025-11-21 收到原稿, 2026-03-18 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

spatial scales. Based on the long-term observational datasets obtained from these instruments, Professor Xiao's team conducted pioneering studies on ionospheric responses to solar flares, geomagnetic storms, typhoons, and earthquakes, yielding seminal insights into multi-sphere coupling in geospace. This retrospective provides a comprehensive review of the technological evolution of the instrument and the associated scientific achievements, commemorating Professor Xiao's academic legacy and his enduring contributions to space physics research.

Key words Ionospheric Doppler sounder, Ionospheric disturbances, Geospace multi-sphere coupling, Chinese Meridian Project

0 引言

1960 年前后, 高频多普勒频移探测技术开始应用于电离层的探测研究[1,2], 其原理是通过测量无线电波经电离层反射后的频率偏移来探测电离层的运动和变化. 这种频率偏移是由电波传播相路径的时变引起的, 既包括传播路径上的电波相折射指数的变化, 也包括反射高度的改变造成的几何路径变化. 借鉴一般多普勒效应的概念, 由频率偏移也可得到电离层运动的等效多普勒速度[3–6].

高频多普勒频移探测技术具有连续监测、灵敏度高的特点, 善于捕捉电离层微小的连续变化, 利用其数据可对电离层多种尺度的扰动开展研究, 包括太阳耀斑、磁暴以及台风、雷暴、地震、火山、海啸等大气和地球物理活动所导致的电离层突然变化. 中国在 20 世纪 80 年代已开始了该探测技术相关理论和实验的研究, 由原中国科学院武汉物理研究所在武汉地区建立了高频多普勒台阵, 利用观测数据研究了中国中部地区电离层扰动的特点[7–11]. 由北京大学肖佐教授主持研制的电离层高频多普勒频移监测仪从 1986 年起连续运行, 积累了长期的数据. 与此同时, 肖佐教授主持完成了该设备的持续改进和迭代升级, 后续型号参与了国家重大科技基础设施"东半球空间环境地基综合监测子午链 (子午工程)"的建设, 目前有 20 余台设备长期稳定运行, 形成沿东经 120°子午线, 北至漠河、南至广东的大尺度监测台链.

1 初创与探索: 1985 年第一代监测仪的系统设计与早期成果

在一份写于 1985 年的未发表手稿中, 记录了当时北京大学电离层高频多普勒频移监测仪的设计思路和研制过程. 早期监测仪受制于当时的技术水平, 主要需解决高稳定度频率源与信号频率的快速提取问题. 频率源需采用带恒温槽的晶体振荡器, 才能满足从 MHz 的高频信号中鉴别小于 1 Hz 的频移的要求. 手稿中提到, 在信号分析方面, Watts 和 Davies[2] 的早期设备是利用磁带录音机记录接收机混频后的差拍信号, 完成观测后, 播放磁带并使用频谱分析仪分析信号的频率, 即为电离层的多普勒频移. Huang 等[12] 设计了倍频仪, 使信号可以直接输入频谱分析仪, 从而可实时获得频移量.

手稿中记述了设备的系统构成: 包括一台经维修的 20 世纪 50 年代苏联Кит接收机, 以及一台 56 型接收机, 将两台接收机共用本级振荡器. 该设计的优势在于, 即便本振频率存在波动, 经过平衡混频器后本振带来的频率变化可以被抵消. 56 型接收机接收陕西蒲城天文台发出的 10.00 MHz 时号, 其频率稳定度可达 10^{-9}～10^{-11}. 晶体振荡源的基准频率为 5.000 MHz, 具有约 1 Hz 的微调量. 为了将 5.0000 MHz 频率变成 10 MHz, 在晶体振荡源与Кит接收机的高放单元之间接入二倍频器. 将晶体振荡源频率调至最高输出频率 5.00000145 MHz, 经二倍频后输出 10.0000029 MHz, 经过平衡混频器后得到约 2.9 Hz 的固定频率偏移. 按照该设计, 当电离层回波的多普勒频移为Δf (–2.9～2.9 Hz) 时, 实际测量到的频移为 2.9 Hz+Δf, 即 0～5.8 Hz 的正值, 这样在后续的频率分析中即可避免正负多普勒频移发生混淆. 上述记录提及的 56 型接收机及系统设计框图如图 1 所示.

在信号处理和频移提取部分, 混频器输出的差拍信号经过 0～20 Hz 带宽的低通滤波器后, 把高于 20 Hz 的杂波信号全部滤掉, 并对低通滤波器通带内

的信号进行充分放大. 然后信号经过 f-V 转换器, 把频率的变化量用直流电压表示出来. 频移量被转化为电压值, 由此方可进行测量和记录. 之后, Xiao 等[13]发表于 1987 年的论文中提出了一种数字化的数据采集和处理系统的方案, 即采用 IBM-PC 微机处理 A/D 采集的信号, 用 BASIC 语言编写滤波、信号波形显示、FFT、动态频谱显示等程序, 实现了多普勒频移的实时提取, 并将其数字化地记录在磁盘上.

该设备研制成功后, 持续运行至本世纪初, 积累了近 20 年的观测资料. 肖佐教授带领团队基于这些数据开展了电离层对耀斑的响应、地震和火山的电离层效应、台风导致的电离层扰动和扩展 F 现象等方面的研究[14–21]. 肖佐教授很早就关注了底层大气扰动与电离层的耦合问题, 从 1987－1992 年 24 次强台风期间的高频多普勒数据中发现, 22 次台风事件中均观测到中等尺度的电离层扰动, 并由此系统分析了台风影响下电离层扰动的形态特征[16]. 研究发现, 台风在登陆或靠近大陆海岸时, 电离层中出现行进式扰动, 其周期随时间的推移逐渐变长, 日落前后大振幅的波动常激发中纬度扩展 F 层现象, 表明声重波具有激发电离层不稳定性的种子效应. 图 2(a) 给出了其中一次台风事例的多普勒观测记录. 1991 年皮纳图博火山喷

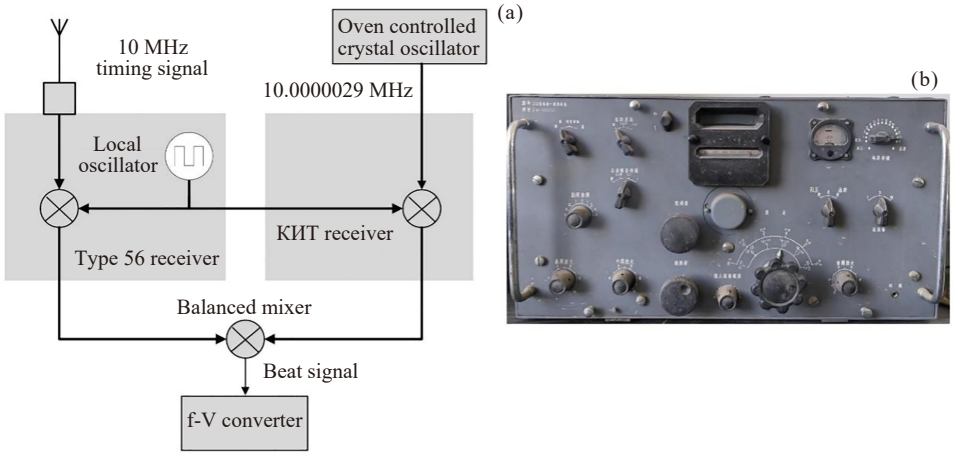


图 1　1985 年高频多普勒监测仪设计方案及所用的 56 型接收机

Fig. 1　System design schematic of the 1985 high-frequency Doppler shift monitor, and photograph of the Type 56 radio receiver

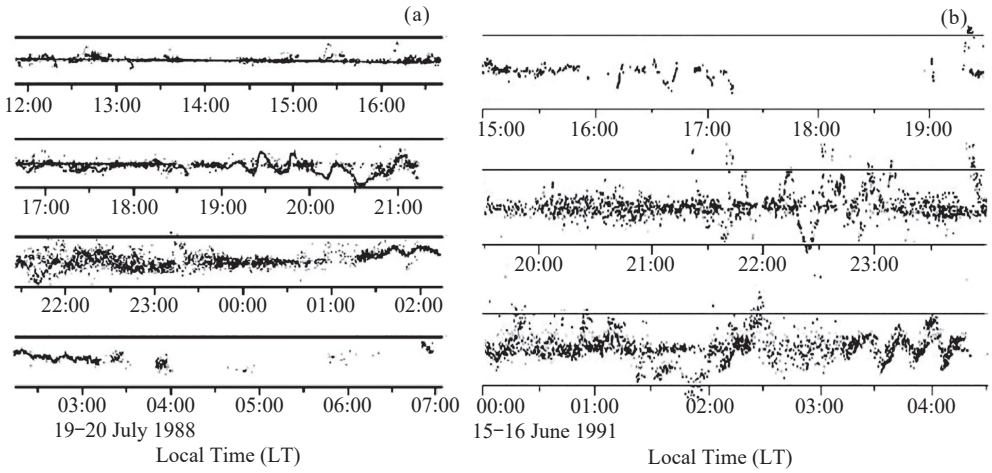


图 2　(a) 1988 年 7 月 19－20 日台风华伦 (Warren) 期间的电离层多普勒观测[16], (b) 1991 年 6 月 15 日皮纳图博火山喷发后的电离层多普勒观测[17]

Fig. 2　Doppler shift records during (a) Typhoon Warren on 19–20 July 1988 [16] and (b) following the Pinatubo volcanic eruption on 15 June 1991 [17]

发期间的记录显示了火山激发的声重波可耦合至电离层, 引起数千公里外的电离层扰动[17]. 如图 2(b) 所示, 在火山喷发后约 1 h (16:00 LT 起), 电离层出现明显波状扰动, 22:00 LT 后又出现大尺度的波动, 至次日凌晨 03:30 LT 后出现周期约 20 min 的自由传播重力波. 图 2 中多普勒记录上下的两条横实线对应±1 Hz.

2004 年苏门答腊地震发生后 25 min(01:24 UT), 位于北京的多普勒观测记录中出现包含快速扰动的波包, 与先期到达的地震波带来的地表震动较为相似, 如图 3(a) 所示. 分析表明, 地表瑞利波以约 3.8 km·s^{-1} 的速度从震中传来, 其激发的大气波动

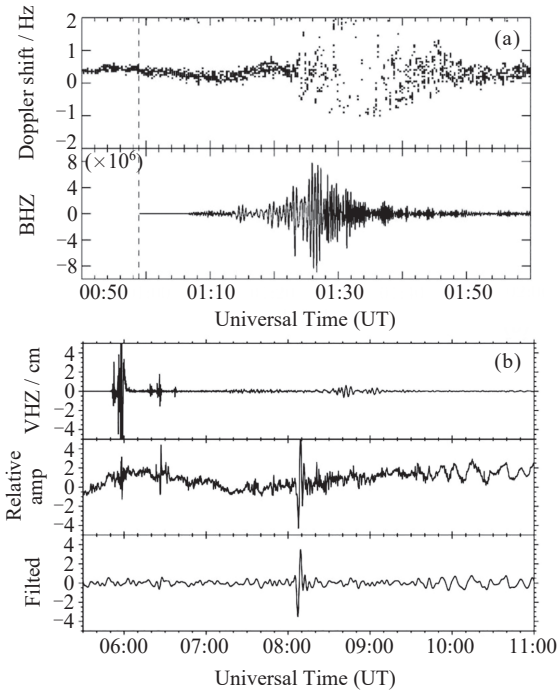


图 3 (a) 2004 年 12 月 26 日苏门答腊地震后在北京获取的电离层高频多普勒记录 (上) 和地震波记录 (下)[17]. (b) 由上至下分别为 2011 年 3 月 11 日东日本地震后在北京记录的地震波、次声波、3～20 min 周期带通滤波后的次声波[23]

Fig. 3 (a) Co-located observations of ionospheric Doppler shift (upper panel) and seismic waveforms (lower panel) recorded in Beijing following the 26 December 2004 Sumatra earthquake [17]. (b) Seismic wave, infrasound signal recorded in Beijing, and band-pass filtered (3–20 min period) infrasound signal (from top to bottom), after the 11 March 2011 Tohoku earthquake [23]

需 5～10 min 向上传播至电离层所在高度. 电离层扰动信号存在 100～400 s 的周期分量, 对应次声波的频率范围[17]. 上述研究表明, 次声波和声重波在大气–电离层耦合中具有重要的作用, 由此推动了北京大学地基大气波动监测仪的研制[22], 图 3(b) 显示了 2011 年东日本大地震发生后在北京获取的次声波观测记录.

还有很多早期的高频多普勒观测资料未公开发表. 图 3 显示了 1989 年和 1991 年两次 *Dst* 最低约 –300 nT 的磁暴期间的观测记录, 是早期微机数据采集程序的原始记录. 在 1989 年 10 月 21 日的磁暴主相期间, 高频多普勒观测记录到电离层的剧烈扰动, 频移超过±1 Hz (图 4a); 在 1991 年 3 月 24 日的磁暴期间, 高频多普勒观测到一种规则的电离层快速周期变化, 并持续较长时间 (图 4b), 这在高频多普勒观测中是一种比较罕见的现象, 可能反映了磁暴期间磁层与电离层之间耦合的波动. 图中多普勒记录上下的两条横实线对应±1 Hz, 两条相似的描迹是由不同的数据处理方法得到的.

2 技术升级与组网观测: 子午工程一期

按照子午工程一期建设的要求, 北京大学自 2008 年起开始研制新一代电离层高频多普勒频移监测仪. 相关技术历经 20 多年已有日新月异的发展, 新一代设备设计充分吸收了 GPS 驯服稳定频率源、超窄带短波信号接收、直接数字频率合成 (DDS) 等新技术, 监测仪系统如图 5 所示. GPS 驯服频率源输出信号的频率准确度与稳定度均可达到 10^{-11} 量级, 足够用于从接收的 10 MHz 短波信号中鉴别 0.1 Hz 量级的频移. 如图 5 所示, 标准 10 MHz 信号借助 DDS 直接数字频率合成技术, 产生 10 MHz+3 Hz 频率信号, 混频后得到 0～6 Hz 的差拍信号输出, 经模数转换输入计算机进行 FFT 处理及数据存储.

基于上述方案, 研制出紧凑型、数字化的新一代电离层高频多普勒监测仪, 仍然接收国家授时中心播发的 10 MHz 标准频率信号. 2010 年子午工程一期建设完工时, 该设备部署在北京大学校本部、昌平校区、密云以及北京大学深圳研究生院, 初步形成多点

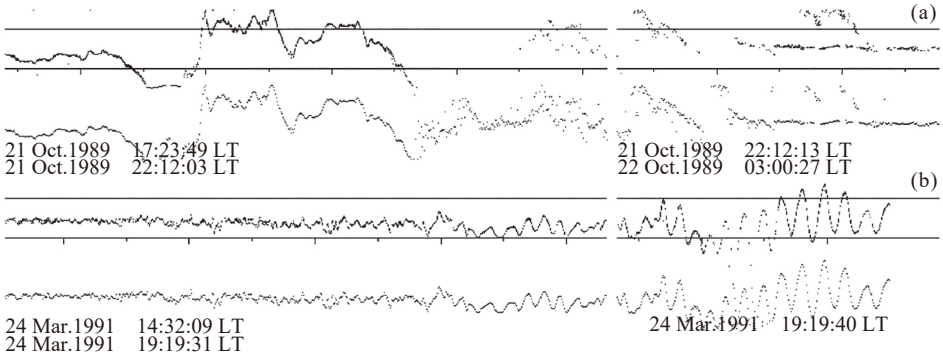


图 4 1989 年 10 月 21 日 (a) 和 1991 年 3 月 24 日 (b) 两次磁暴期间在北京观测到的多普勒频移记录

Fig. 4 Doppler shift records during two major geomagnetic storms: (a) 21 October 1989 event and (b) 24 March 1991 event

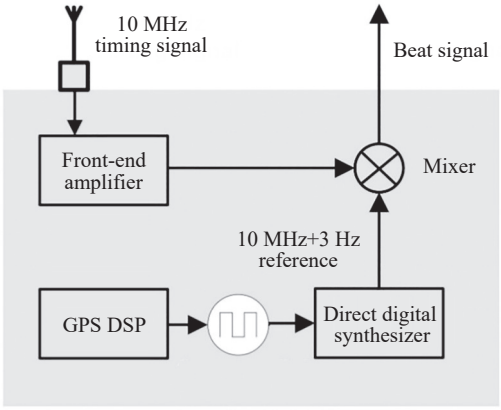


图 5 子午工程一期电离层高频多普勒频移监测仪系统

Fig. 5 System block diagram of the Doppler sounder for the Chinese Meridian Project Phase I

观测. 基于其灵敏捕捉电离层变化的特点, 所得观测数据继续为地震引发的电离层扰动、磁暴产生的大尺度扰动、电离层中的甚低频波动等研究提供了观测依据[23–29].

在子午工程一期的 4 台设备部署完成后, 2011 年 3 月 11 日发生了东日本大地震. 在北京、深圳两地的监测仪均记录到了地震导致的电离层扰动 (该扰动在瑞利波到达后约 6～8 min 发生), 如图 6(a) 所示, 与此同时, 太原、三亚等地观测到地磁场同步扰动[23]. 进一步的研究发现, 在日本和中国远至距震中 4000 km 的多个地磁台站均观测到明显的地磁场扰动, 如图 6(b) 所示, 其出现时间与瑞利波的到达同步, 并延时约 8 min, 主要周期成分为 2.1～3.3 min[24]. 图 6 中灰色曲线为地震波记录, 竖虚线为地震发生时刻, 纵轴为距震中的距离. 这是首次针对地震之后相伴出现的、由高频多普勒观测得到的电离层扰动与地磁场扰动开展的系统性研究, 为地震–电离层耦合提供了多角度的观测证据.

实际上, 在设备的原型试验期间, 已观测到了 2008 年 5 月 12 日汶川地震导致的电离层扰动. 图 7 显示了在瑞利波到达约 7 min 后发生的多普勒频移变化, 同时, 在重庆、恩施和贵阳记录到地磁场 D 分量约 3 min 周期的规则波动, 其出现时间比瑞利波到达当地延迟约 6～9 min, 比电离层总电子含量 (TEC) 扰动提前约 4 min[25]. 图 7 中竖虚线为地震发生时刻, 斜实线对应地震 P 波和瑞利波的传播, 灰色曲线为地震波记录, 纵轴为距震中的距离. 三种观测手段反映出电离层不同高度的电流与等离子体状态的变化, 为地震波能量激发次声波扰动、并由低到高跨圈层传播耦合这一过程提供了观测证据.

子午工程一期的高频多普勒监测仪也支撑了一些日地空间环境扰动的研究. 在 2015 年 3 月 17 日磁暴期间, 北京和深圳的监测仪均记录了大尺度电离层扰动传播 (由北向南) 的过程, 如图 8 所示, 结合 GPS TEC 观测数据, 得到约 600 m·s^{-1} 的扰动传播速度和 75 min 的平均周期[28]. 对 2012 年 3 月 8 日磁暴事件的观测分析发现, 在磁暴急始后约 15 min, 11:20 UT 附近, 多普勒频移出现周期约 1.5 min 的波动, 处于 Pc3-Pc4 甚低频波动频段, 且与地磁场发生的扰动同步、相位一致. 该观测结果表明, 磁层甚低频波能深入低纬电离层的 F 区底部, 为磁层–电离层耦合提供了观测证据[26].

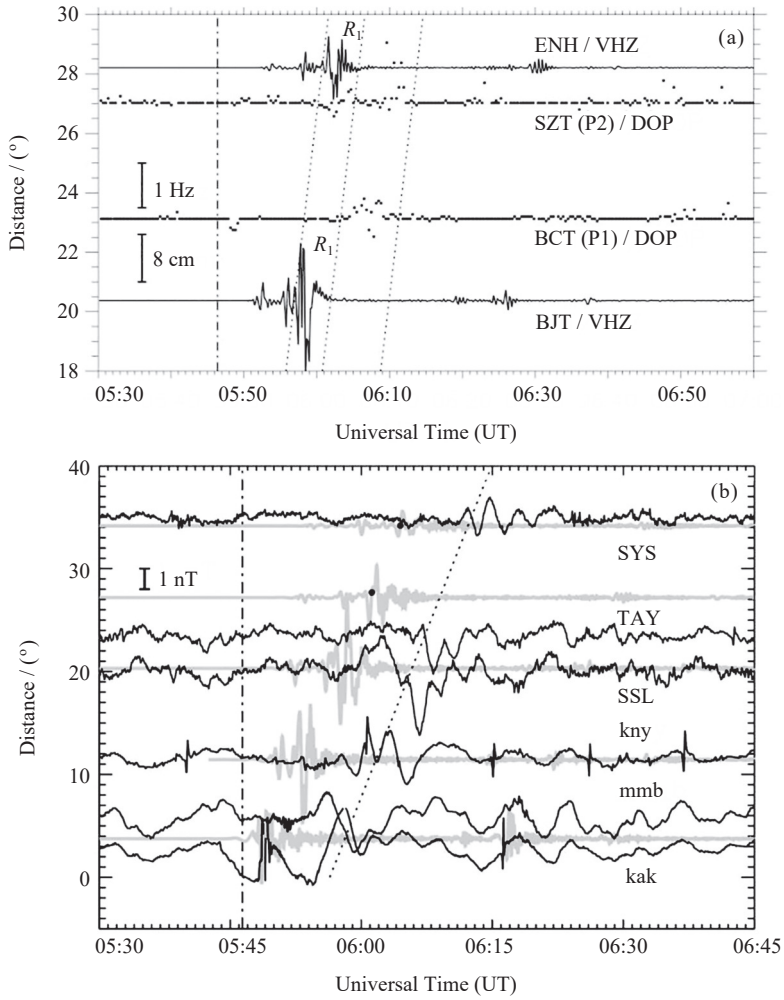


图 6 2011 年 3 月 11 日东日本地震后, 北京与深圳两地电离层多普勒 (DOP) 记录和地震波 (VHZ) 记录 (a)[23] 及日本与中国境内多个地磁台站的地磁场 D 分量记录 (b)[24]

Fig. 6 Multi-point observations following the 11 March 2011 Tohoku earthquake. (a) Doppler shift records (DOP) from Beijing and Shenzhen stations and seismic waves (VHZ) records[23], (b) geomagnetic D-component variations observed at multiple sites in Japan and China[24]

3 基于软件无线电的新一代监测仪: 子午工程二期

子午工程二期建设于 2019 年开工, 目标是建成覆盖中国区域的井字形监测网络[30], 包括在漠河、北京、武汉、深圳 4 地周边各建设一组电离层高频多普勒监测台阵, 每个监测台阵由一个发射站和三个接收站构成. 与前代设备接收授时台非合作信号的工作模式不同, 该系统由发射站在 4.5 MHz 附近频点发射无线电波, 由接收站完成电离层反射信号的接收与处理, 并生成对应的数据产品.

为子午工程二期研制的高频多普勒频移接收机采用了软件无线电技术 (Software Defined Radio, SDR), 如图 9 所示, 主要由软件无线电的射频接收前端和显控计算机构成. 计算机可控制射频前端的采样率、增益等工作参数, 并接收来自射频前端的数字信号, 完成数字下变频、低通滤波等处理, 最后通过 FFT 或 Hilbert 变换等方法获得信号的多普勒频移量. 与传统接收机采用模拟信号前端、在硬件电路中实现接收信号下变频和混频等处理相比, 新方案的“射频直接采样+软件信号处理”架构显著降低了前端设计的复杂度和开发成本, 在接收新自主发射信号

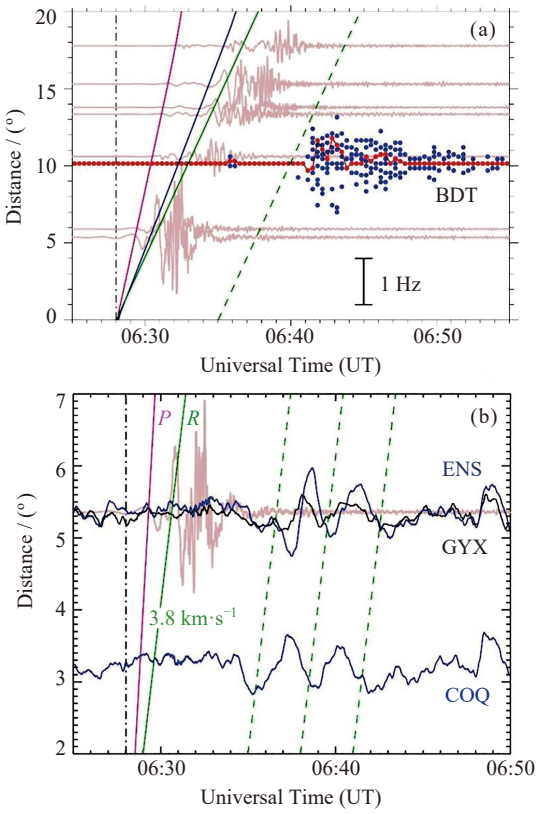


图 7　2008 年 5 月 12 日汶川地震后的电离层多普勒频移变化 (散点)(a) 和恩施 (ENS)、贵阳 (GYX)、重庆 (COQ) 地磁场扰动 (b)[25]

Fig. 7　Observations following the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. (a) Ionospheric Doppler shift (scatter points), (b) geomagnetic disturbances recorded at Enshi (ENS), Guiyang (GYX), and Chongqing (COQ) stations[25]

的同时, 具有兼顾接收传统常用的 5 MHz 和 10 MHz 授时标准频率信号的能力, 由此提供了更加灵活、经济、高效的解决方案[31].

一个发射站和三个接收站构成的“一发三收”式监测台阵, 可反演电离层扰动的传播方向和速度. 如图 10 所示, 利用漠河区域三个接收站观测的多普勒频移变化之间的相对时延, 根据接收站的地理位置, 反演得到扰动的传播速度为 187 m·s^{-1}, 方向为东南, 方位角 116°. 具体反演方法可参看文献 [31].

在子午工程二期建设期间, 太阳进入第 25 活动周的高年, 新部署的设备已经记录了多次大磁暴期间的电离层扰动, 特别是磁暴时从高纬向低纬传播的大尺度行进式扰动, 由北至漠河、南至广东的高频多普勒台网实现了完整的子午链观测. 最近, 一个典型的地球物理事件是 2025 年 7 月 29 日发生的堪察加半岛 8.8 级地震. 地震发生于 23:24:52 UT, 图 11(a) 给出了 5 个高频多普勒台站 (黑龙江漠河、北京、湖北随州、武汉、香港) 观测到的电离层扰动, 从距震中 3000 km 至 5000 km, 扰动发生的时刻逐渐推后, 与图 11(b) 中标记的地震波的传播和到达时间相吻合, 显示了子午工程二期电离层高频多普勒台网在大空间尺度上的监测能力. 图 11(a) 中粉红色虚线表示距震中 3000, 4000, 5000 km 距离; 图 11(b) 中绿色线和蓝色线为地震 P 波和瑞利波的预计到达时间, 虚线为相应的延迟 7 min 的时刻.

4　结论与展望

自 1985 年肖佐教授主持研制北京大学第一代电离层多普勒频移监测仪以来, 至今已 40 年. 他紧跟国际发展前沿, 突破当时的技术条件限制, 在国内较早设计完成了基于计算机的实时数据采集处理系统, 并带领团队对电离层多普勒频移监测仪开展持续的改进与发展. 从模拟电路方案到软件无线电设计, 从接收授时信号到自主发射, 从单点到成网观测, 最终形成了自主设计的现代化电离层探测设备.

经过子午工程一期和二期建设, 该类设备经布设组网, 已构成沿东经 120°子午线、小尺度“一发三收”台阵与大尺度台链相结合的监测网络. 目前, 中国正在发起国际子午圈大科学计划, 未来将在国际合作框架下部署到东南亚等地区, 通过扩展设备的多频点接收能力, 在重点区域建立多发多收台网, 形成多高度、多反射点的立体监测能力. 从全球范围来看, 捷克、阿根廷、南非、日本以及中国台湾等区域建有电离层高频多普勒台网[32–35], 通过国际合作和开展联测将逐渐形成全球性的监测能力.

肖佐教授以其开创性的工作和前瞻视野推动了北京大学电离层高频多普勒监测仪的革新和发展, 在地球空间多圈层耦合领域开展了一系列原创性研究. 本文系统回顾了该设备研制发展过程及相关研究成果, 以纪念肖佐教授的学术思想和治学育人精神.

医学伦理　研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突.

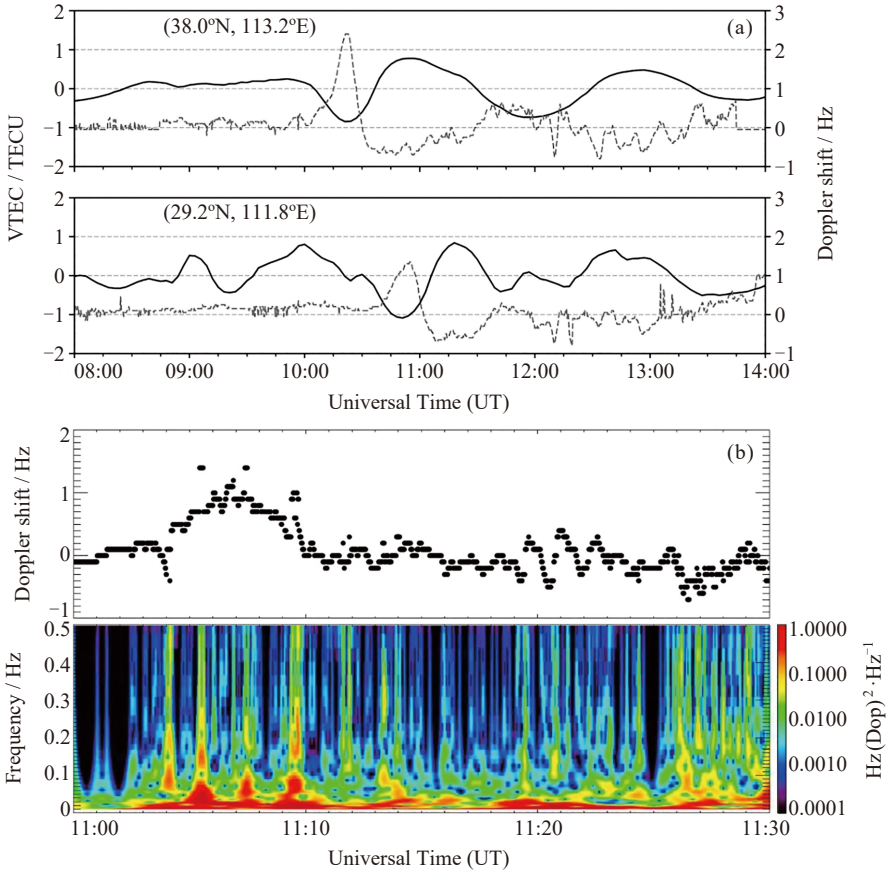


图 8 (a) 2015 年 3 月 17 日磁暴期间电离层高频多普勒 (虚线) 与 GPS TEC(实线) 同时观测到由高纬向低纬传播的大尺度行进式电离层扰动[28]. (b) 2012 年 3 月 8 日磁暴急始时, 在 11:20 UT 附近观测到 1.5 min 周期的多普勒频移变化[26]

Fig. 8 (a) Coordinated observations of ionospheric Doppler shift (dashed line) and GPS total electron content (solid line) during the 17 March 2015 geomagnetic storm, showing large-scale traveling ionospheric disturbances propagating from high to low latitudes[28], (b) Doppler shift variations exhibiting 1.5-min-period oscillations observed near 11:20 UT after the sudden commencement of the 8 March 2012 geomagnetic storm[26]

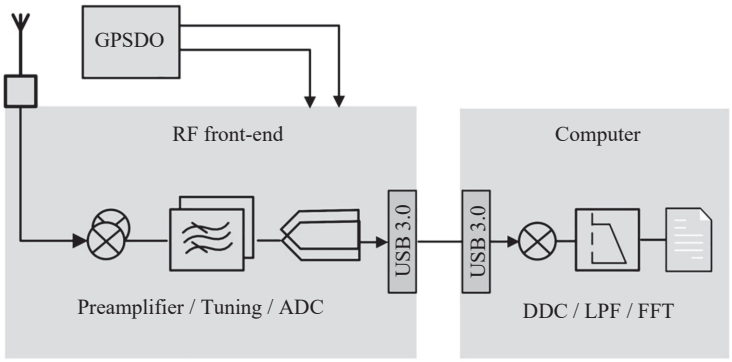


图 9 子午工程二期高频多普勒监测仪系统

Fig. 9 System architecture of the ionospheric Doppler sounding for the Chinese Meridian Project Phase II

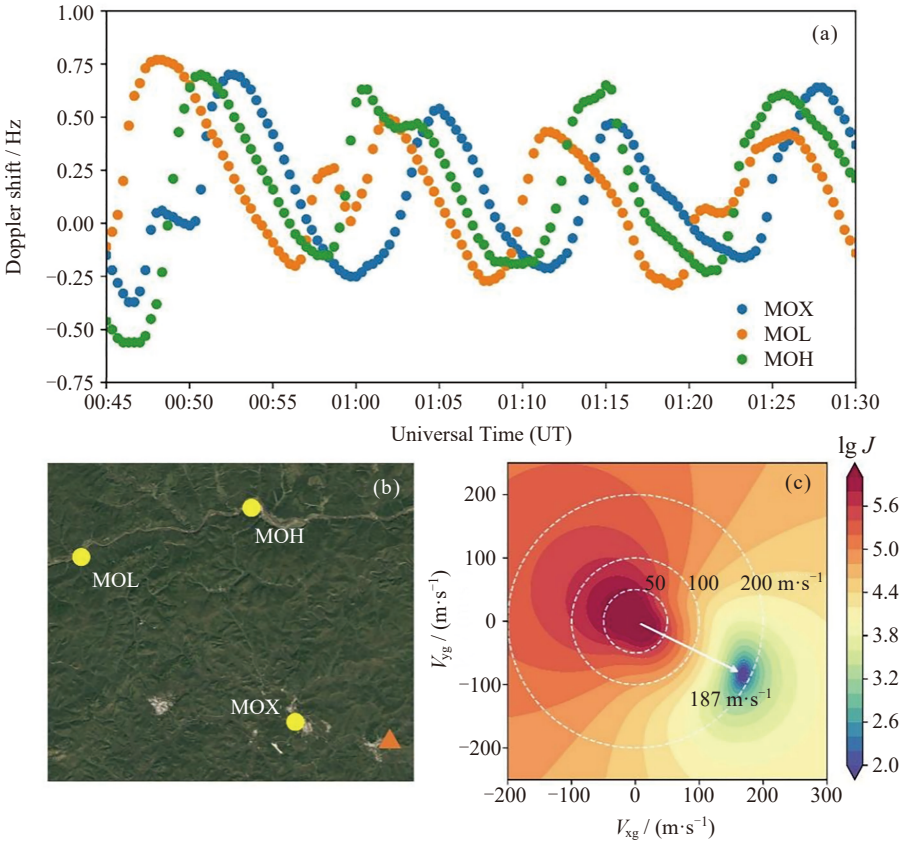


图 10　2024 年 12 月 9 日漠河区域监测到一次电离层中的短周期波动事件. (a) 漠河地区三个接收站记录到的多普勒频移时间序列, (b) 三个接收站的地理位置 (黄色圆点) 和发射站位置 (三角形), (c) 由三站观测反演得到波动传播方向和速度

Fig. 10　Short-period ionospheric oscillations observed in the Mohe region on 9 December 2024. (a) Doppler shift time series recorded at three receiving stations, (b) geographical distribution of the three receivers (yellow dots) and the transmitter (triangle), (c) inverted wave propagation direction and velocity using the 3-receiver array

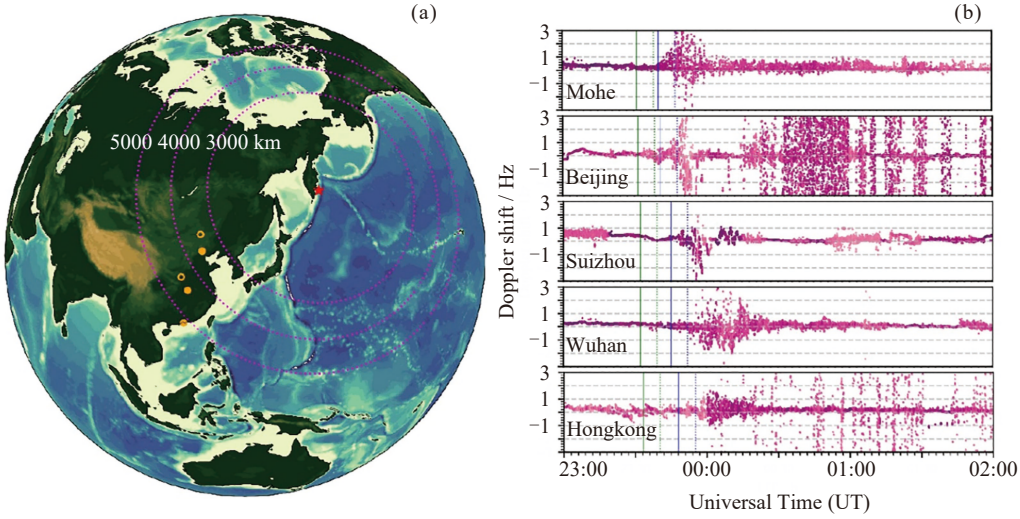


图 11　(a) 2025 年 7 月 29 日堪察加半岛地震的震中位置 (五角星) 和高频多普勒观测点 (黄色点和圈) 位置. (b) 各观测点记录的多普勒频移记录

Fig. 11　(a) Epicenter location (star) of the 29 July 2025 Kamchatka earthquake and Doppler sounder sites (yellow dots/circles). (b) Doppler shift records from the 5 sites

参考文献

[1] OGAWA T. Frequency variations in short-wave propagation[J]. *Proceedings of the IRE*, 1958, **46**(12): 1934-1939

[2] WATTS J M, DAVIES K. Rapid frequency analysis of fading radio signals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, **65**(8): 2295-2301

[3] LONG Xianling, HOU Jiechang. On the frequency variation of radio waves reflected from the ionosphere[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1979, **22**(4): 387-395 (龙咸灵, 侯杰昌. 关于电离层反射电波频率变化的问题 [J]. 地球物理学报, 1979, **22**(4): 387-395)

[4] LIU Xuanmou, GU Tao, CUI Rong, *et al*. Relations between transmission distance and phase/group path for oblique propagation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1985, **5**(1): 69-74 (刘选谋, 顾涛, 崔荣, 等. 相路径与群路径同斜向传输距离的关系 [J]. 空间科学学报, 1985, **5**(1): 69-74)

[5] ZHAO Jiuzhang. Physics of the Upper Atmosphere[M]. Beijing: Peking University Press, 2014 (赵九章. 高空大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014)

[6] HAO Yongqiang, DAI Guofeng, ZHANG Donghe, *et al*. Preliminary results of the ionospheric high-frequency Doppler shift monitor for the Phase II of Chinese Meridian Project[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(1): 53-65 (郝永强, 代国峰, 张东和, 等. 子午工程二期电离层高频多普勒监测仪初步观测结果 [J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 2024, **55**(1): 53-65)

[7] LI Jun. Doppler frequency shifts of a HF radio wave caused by the ionospheric acoustic-gravity waves[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1983, **26**(1): 1-8 (李钧. 电离层声重波引起的高频多普勒频移 [J]. 地球物理学报, 1983, **26**(1): 1-8)

[8] LI Libin, WU Zhenhua, NING Baiqi, *et al*. Some technical aspects of a three-station array for observation of the ionospheric disturbances[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1987, **30**(6): 560-565 (李利斌, 吴振华, 宁百齐, 等. 高频多普勒台阵中的若干技术问题 [J]. 地球物理学报, 1987, **30**(6): 560-565)

[9] NING Batqi, LI Jun. Doppler spectrum of ionospheric irregularities[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1996, **16**(1): 36-42 (宁百齐, 李钧. 电离层不规则结构的多普勒谱特性 [J]. 空间科学学报, 1996, **16**(1): 36-42)

[10] WAN Weixing, YUAN Hong, NING Baiqi, *et al*. A statistical study for the spacial-temporal scale of ionospheric disturbances in middle China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1995, **15**(4): 301-306 (万卫星, 袁洪, 宁百齐, 等. 我国中部地区电离层扰动时空尺度的统计分析 [J]. 空间科学学报, 1995, **15**(4): 301-306)

[11] WAN W X, YUAN H, NING B Q, *et al*. Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortexes around Qinghai- Tibet Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(20): 3775-3778

[12] 黄胤年, 陈盛文, 江长晋. 杜卜勒氏电离层即时观测仪之研制 [C]//电信研究所研究报告汇编. 台湾: 电信研究报告汇编, 1982: 257-280

[13] XIAO Zuo, HUO Hongxian, ZOU Jiqing, *et al*. DQ-87 data processing system for geophysical observations[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1987, **30**(6): 653-658 (肖佐, 霍宏暹, 邹积清, 等. DQ-87 型地球物理数据采集和处理系统 [J]. 地球物理学报, 1987, **30**(6): 653-658)

[14] ZHANG Donghe, XIAO Zuo, GAO Yufen, *et al*. The calculation of lower ionospheric TEC enhancement during initial flare burst using HF Doppler records[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1999, **19**(4): 315-320 (张东和, 萧佐, 高玉芬, 等. 应用高频多普勒方法对耀斑期间电离层 TEC 变化的估算 [J]. 空间科学学报, 1999, **19**(4): 315-320)

[15] XIAO Zuo, LIU Kaijun, ZHANG Donghe. Some typical records of ionospheric Doppler shift and their significance in the study of ionospheric morphology[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2002, **22**(4): 321-329 (肖佐, 刘凯军, 张东和. 典型电离层多普勒记录及其讨论 [J]. 空间科学学报, 2002, **22**(4): 321-329)

[16] XIAO Z, XIAO S G, HAO Y Q, *et al*. Morphological features of ionospheric response to typhoon[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A4): A04304

[17] HAO Y Q, XIAO Z, ZHANG D H. Responses of the ionosphere to the Great Sumatra earthquake and volcanic eruption of Pinatubo[J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23**(7): 1955-1957

[18] XIAO Saiguan, HAO Yongqiang, ZHANG Donghe, *et al*. A case study on whole response processes of the ionosphere to typhoons[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(3): 623-628 (肖赛冠, 郝永强, 张东和, 等. 电离层对台风响应的全过程的特例研究 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(3): 623-628)

[19] XIAO Saiguan, ZHANG Donghe, XIAO Zuo. Study on the detectability of Typhoon-generated acoustic-gravity waves[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2007, **27**(1): 35-40 (肖赛冠, 张东和, 肖佐. 台风激发的声重力波的可探测性研究 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(1): 35-40)

[20] XIAO S G, XIAO Z, SHI J K, *et al*. Observational facts in revealing a close relation between acoustic-gravity waves and midlatitude spread *F*[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A1): A01303

[21] XIAO Saiguan, XIAO Zuo, SHI Jiankui, *et al*. Application of the HF Doppler observations in studying spread-F[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, **55**(7): 2162-2166 (肖赛冠, 肖佐, 史建魁, 等. 电离层高频多普勒记录在扩展-F 研究中的应用 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(7): 2162-2166)

[22] HU Xiaoyan, ZHANG Donghe, HAO Yongqiang, *et al*. Application of atmospheric disturbances monitor on lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(3): 296-303 (胡晓彦, 张东和, 郝

永强, 等. 大气波动监测仪在岩石圈–大气层–电离层研究中的应用 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(3): 296-303)

[23] HAO Y Q, XIAO Z, ZHANG D H. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A2): A02305

[24] HAO Y Q, XIAO Z, ZHANG D H. Teleseismic magnetic effects (TMDs) of 2011 Tohoku earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(6): 3914-3923

[25] ZHAO B Q, HAO Y Q. Ionospheric and geomagnetic disturbances caused by the 2008 Wenchuan earthquake: a revisit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(7): 5758-5777

[26] OUYANG X Y, LIU W L, XIAO Z, *et al*. Observations of ULF waves on the ground and ionospheric Doppler shifts during storm sudden commencement[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(4): 2976-2983

[27] CHEN G, WANG J, WU C, *et al*. Multisite remote sensing for tsunami-induced waves[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, **54**(12): 7177-7184

[28] LIU J, ZHANG D H, COSTER A J, *et al*. A case study of the large-scale traveling ionospheric disturbances in the eastern Asian sector during the 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm[J]. *Annales Geophysicae*, 2019, **37**(4): 673-687

[29] WANG J, CHEN G, YU T, *et al*. Middle-scale ionospheric disturbances observed by the oblique-incidence ionosonde detection network in North China after the 2011 Tohoku tsunamigenic earthquake[J]. *Sensors*, 2021, **21**(3): 1000

[30] WANG C, CHEN Z Q, XU J Y. Introduction to Chinese meridian project-phase Ⅱ[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(5): 718-722

[31] DAI Guofeng, HAO Yongqiang, LIU Fei, *et al*. Ionospheric high-frequency Doppler shift based on a universal software-defined radio platform[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2024, **54**(3): 402-410 (代国峰, 郝永强, 刘飞, 等. 基于通用软件无线电平台的电离层高频多普勒频移监测仪 [J]. 中国科学: 技术科学, 2024, **54**(3): 402-410)

[32] FARGES T, LE PICHON A, BLANC E, *et al*. Response of the lower atmosphere and the ionosphere to the eclipse of August 11, 1999[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, **65**(6): 717-726

[33] LAŠTOVIČKA J, CHUM J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network[J]. *Advances in Space Research*, 2017, **60**(8): 1629-1643

[34] LIU J Y, CHEN C H, SUN Y Y, *et al*. The vertical propagation of disturbances triggered by seismic waves of the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake over Taiwan[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(4): 1759-1765

[35] NAKATA H, NOZAKI K, OKI Y, *et al*. Software-defined radio-based HF Doppler receiving system[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, **73**(1): 209

作者简介



郝永强 男, 中山大学教授、博士生导师, 主要从事电离层物理和电离层探测研究. 先后负责多项国家自然科学基金项目, 承担子午工程电离层高频多普勒监测仪研制任务.

E-mail: haoyq@mail.sysu.edu.cn



张东和 男, 北京大学教授、博士生导师, 从事空间物理、空间天气、电离层物理的教学和科研工作, 先后承担国家重大科研基础工程项目 (子午工程)、国家基金委、863、973、行业专项等科研项目, 主要开展基于 GNSS 数据的电离层 TEC 和闪烁数据处理方法、耀斑的电离层效应、电离层闪烁形态与效应、平流层突然增温与电离层全球响应等方面的研究.

E-mail: zhangdh@pku.edu.cn