

ISSN 2097-1893  
CN 10-1855/P

# 地球与行星物理论评 (中英文)

## Reviews of Geophysics and Planetary Physics

第55卷 第1期 Vol. 55 No. 1 2024

子午工程科学探测

二〇二四年

第一期

总第三百三十一期



### 收录情况

#### 国际数据库:

瑞典开放存取期刊目录 (DOAJ) (2023年入选)  
波兰哥白尼索引期刊数据库 (ICI World of Journals) (2023年入选)  
EBSCO数据库 (2023年入选)

#### 国内数据库:

中国期刊全文数据库 (CNKI)  
中国核心期刊 (遴选) 数据库 (万方数据—数字化期刊群)  
维普网中文科技期刊数据库  
超星期刊域出版数据库  
国家科技学术期刊开放平台

### 地球与行星物理论评 (中英文)

Diqiu Yu Xingxing Wuli Lunping  
(双月刊 1970年创刊)  
2024年 第55卷 第1期 (总第331期)  
2024年1月出版

### Reviews of Geophysics and Planetary Physics

(Bimonthly, Started in 1970)  
Vol. 55 No. 1 (Total No. 331) 2024  
Jan. 2024

主管单位: 中国地震局

主办单位: 中国地震局地球物理研究所

主 编: 丁志峰

编 辑: 《地球与行星物理论评 (中英文)》 编辑委员会

出 版: 《地球与行星物理论评 (中英文)》 编辑部

(北京市海淀区民族大学南路5号)

邮政编码: 100081)

印刷装订: 廊坊市瑞美印务有限公司

订购发行: 本刊编辑部发行组

电子邮箱: dqyxx@cea-igp.ac.cn

电 话: 010-68729337

网 址: <https://www.sjdz.org.cn/>

Responsible Institution: China Earthquake Administration

Sponsored by: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration

Editor-in-Chief: Ding Zhifeng

Edited by: Editorial Board of Reviews of Geophysics and Planetary

Physics

Published by: Editorial Office of Reviews of Geophysics and Planetary

Physics

(No.5 Minzudaxue Nanlu, Haidian District, Beijing 100081, P. R. China)

Distributed in China: Editorial Office of Reviews of Geophysics and

Planetary Physics

<https://www.sjdz.org.cn/>

(如有印书装订问题, 请与本刊编辑部联系调换)

公开发行 国际标准刊号: ISSN 2097-1893 国内统一刊号: CN 10-1855/P 每期定价: 50.00元 (含邮费)

ISSN 2097-1893



中国地震局地球物理研究所 主办  
中国地球物理学会 协办  
中国地震局地球物理勘探中心

# 地球与行星物理论评(中英文)

2024年第55卷第1期(总331期)

(本期特约主编 徐寄遥 刘立波 李国主)

## 目次

### 子午工程科学探测

子午工程二期宽波段太阳射电频谱监测 .....	
..... 王威, 颜毅华, 谭宝林, 谭程明, 冯士伟, 刘飞, 陈林杰, 苏仓	(1)
子午工程二期宽频地磁波监测仪研制 .....	
..... 于向前, 和冬华, 肖池阶, 宗秋刚, 施伟红, 刘斯, 陈鸿飞, 王永福, 邹鸿	(6)
南极长城站哨声波监测仪设备及其初步观测 .....	
..... 顾旭东, 倪彬彬, 徐未, 王市委, 李斌, 胡泽骏, 何昉, 陈相材, 胡红桥	(15)
子午工程二期自动磁通门经纬仪 .....	王喜珍, 范晓勇, 张策, 滕云田, 马新欣, 陈志青 (24)
子午工程二期感应式磁力仪 .....	王喜珍, 冯志生, 居海华, 闫彬, 马新欣, 陈志青 (31)
子午工程二期电离层数字测高仪样机测试与数据质量对比分析 .....	
..... 陈志青, 王国军, 张锋, 胡连欢, 常首民, 王霄	(37)
子午工程二期电离层高频多普勒监测仪初步观测结果 .....	郝永强, 代国峰, 张东和, 肖佐 (53)
曲靖非相干散射雷达观测研究进展与展望 .....	苗建苏, 丁宗华, 代连东, 杨嵩, 吴健 (66)
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 .....	
..... 王铮, 曹光伟, 胡连欢, 谭广远, 尚社平, 胡鹏, 陈志青	(77)
中性风对夜侧电离层纬向四峰结构的影响 .....	熊超, 让心怡, 黄宇阳, 姜国英, 胡坤, 罗伟华 (94)
平流层爆发性增温期间中高层大气行星波研究进展 .....	马铮, 龚韵, 张绍东 (109)
子午工程二期流星雷达样机测试及数据对比分析 .....	
..... 陈志青, 刘子谦, 冯健, 胡连欢, 燕春晓, 袁韦, 吴学森, 郑兵, 周小俊	(120)
子午工程二期漠河大气风温金属成分激光雷达钙原子初步观测结果 .....	
..... 陈峰磊, 荀宇畅, 王泽龙, 杜丽芳, 郑浩然, 陈志青, 程学武, 王积勤, 吴方, 杨国韬	(131)
子午工程二期大气电场仪及其初步观测 .....	李磊, 陈涛, 王诗涵, 提炼, 蔡春林, 李文, 罗静 (138)

### 空间教育

探索空间奥秘, 开启科研之旅 .....	吴叩天, 徐小航, 姜俊南, 沈敖 (144)
----------------------	-------------------------

---

### 封面图片

米波十米波射电日像仪是太阳射电监测的主要设备, 由100面可指向的对数周期天线和定标单元组成, 采用综合孔径的方法在30~400 MHz 上对太阳进行快速频谱成像. 见: 王威等的文章 (doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-016), 页码: 1-5. 图片提供: 王威.

---

本期责任编辑: 朱玉萍 贺杨

# Reviews of Geophysics and Planetary Physics

Vol. 55 No. 1 2024 (Total No. 331)

(Guest Editors: Xu Jiyao Liu Libo Li Guozhu)

## CONTENTS

### INSTRUMENT TECHNOLOGY AND SCIENTIFIC RESEARCHES BASED ON THE MERIDIAN PROJECT

Wide-band solar radio spectral monitoring in the Phase II of Chinese Meridian Project .....	( 1 )
..... Wang Wei, Yan Yihua, Tan Baolin, Tan Chengming, Feng Shiwei, Liu Fei, Chen Linjie, Su Cang	
Development of the wideband magnetic field wave monitor for the Phase II of Chinese Meridian Project .....	
..... Yu Xiangqian, He Donghua, Xiao Chijie, Zong Qiugang, Shi Weihong, Liu Si, Chen Hongfei, Wang Yongfu, Zou Hong	( 6 )
Deployment and initial observations of the Wuhan University very low frequency (WHU VLF) wave detection system at the Great Wall Station in Antarctica .....	
..... Gu Xudong, Ni Binbin, Xu Wei, Wang Shiwei, Li Bin, Hu Ze-Jun, He Fang, Chen Xiangcai, Hu Hong-Qiao	( 15 )
Automatic fluxgate theodolite in the Phase II of Chinese Meridian Project .....	
..... Wang Xizhen, Fan Xiaoyong, Zhang Ce, Teng Yuntian, Ma Xinxin, Chen Zhiqing	( 24 )
The induction magnetometer in the Phase II of Chinese Meridian Project .....	
..... Wang Xizhen, Feng Zhisheng, Ju Haihua, Yan Bin, Ma Xinxin, Chen Zhiqing	( 31 )
Digisonde prototype testing and data quality comparison analysis for Phase II of Chinese Meridian Project .....	
..... Chen Zhiqing, Wang Guojun, Zhang Feng, Hu Lianhuan, Chang Shoumin, Wang Xiao	( 37 )
Preliminary results of the ionospheric high-frequency Doppler shift monitor for the Phase II of Chinese Meridian Project .....	
..... Hao Yongqiang, Dai Guofeng, Zhang Donghe, Xiao Zuo	( 53 )
Progress and prospects based on Qujing incoherent scatter radar measurements .....	
..... Miao Jiansu, Ding Zonghua, Dai Liandong, Yang Song, Wu Jian	( 66 )
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 .....	
..... Wang Zheng, Cao Guangwei, Hu Lianhuan, Tan Guangyuan, Shang Sheping, Hu Peng, Chen Zhiqing	( 77 )
Latitudinal four-peak structure of the nighttime F region ionosphere: Possible contribution of the neutral wind .....	
..... Xiong Chao, Rang Xinyi, Huang Yuyang, Jiang Guoying, Hu Kun, Luo Weihua	( 94 )
Recent research progress on planetary waves in the middle and upper atmosphere during sudden stratospheric warmings .....	
..... Ma Zheng, Gong Yun, Zhang Shaodong	( 109 )
Meteor radar prototype testing and data quality comparison analysis for Phase II of Chinese Meridian Project .....	
..... Chen Zhiqing, Liu Zi-Qian, Feng Jian, Hu Lianhuan, Yan Chunxiao, Yuan Wei, Wu Xuesen, Zheng Bing, Zhou Xiaojun	( 120 )
Preliminary results of Calcium atom analysis by the wind-temperature-metal-constituents LiDAR at Mohe middle-upper atmosphere for the Phase II of Chinese Meridian Project .....	
..... Chen Fenglei, Xun Yuchang, Wang Zelong, Du Lifang, Zheng Haoran, Chen Zhiqing, Cheng Xuewu, Wang Jiqin, Wu Fang, Yang Guotao	( 131 )
Chinese Meridian Project near-surface atmospheric electric field observations .....	
..... Li Lei, Chen Tao, Wang Shihan, Ti Shuo, Cai Chunlin, Li Wen, Luo Jing	( 138 )

### SPACE EDUCATION

A summary report on the Space Physics practical education in 2022 .....	
..... Wu Koutian, Xu Xiaohang, Jiang Junnan, Shen Ao	( 144 )

---

### COVER

The Metric and Decametric waverange radioheliograph is the main equipment for solar radio observation in the Phase II of Meridian Project, consisting of 100 Log periodic antennas and calibration unit. It will observe the Sun at 30-400 MHz with aperture synthesis method. Please refer the article by Wang et al. (doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-016), pp. 1–5. Picture provided by: Wang Wei.

---

MANAGING EDITORS: Zhu Yuping He Yang

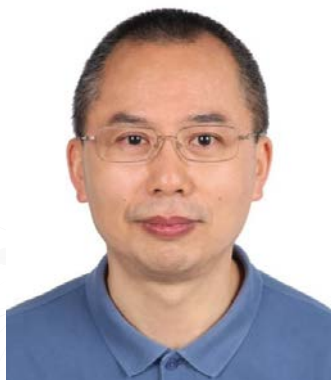
# 寄语

Guest Editor's  
Commentary



## 专刊特约主编 徐寄遥

中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师。2002年度国家杰出青年科学基金获得者。研究专业：空间物理学；研究方向：中高层大气物理学。在空间物理学研究领域主要从事的研究工作包括：（1）中高层大气光化学、动力学以及辐射过程的研究和建模；（2）中高层大气遥感探测技术、信息处理以及分析方法的研究；（3）中高层大气遥感探测设备的研发和实验方案的设计。多年来负责和参与了国家自然科学基金委和中国科学院重大、重点和面上研究项目、“子午工程一期”以及国家重点基础研究973项目等多项研究课题。目前担任“子午工程二期”总工程师。



## 专刊特约主编 刘立波

中国科学院地质与地球物理研究所研究员，黑龙江漠河地球物理国家野外观测研究站站长，国家杰出青年科学基金获得者、万人计划领军人才、享受国务院政府特殊津贴专家。主持973项目课题、国家自然科学基金重点、面上项目等10余项科研任务。从事空间物理研究，在电离层气候学与天气学研究取得系列成果，获国家自然科学基金二等奖（排名第二）。发表SCI论文300余篇、引用9 000余次，多次入选爱思唯尔中国高被引学者榜单。曾（正）任《Frontiers in Astronomy and Space Physics》副编辑、及《Science Bulletin》《地球物理学报》《地球与行星物理论评（中英文）》等期刊编委。



## 专刊特约主编 李国主

中国科学院地质与地球物理研究所研究员，北京空间环境国家野外观测研究站站长，子午工程二期空间环境监测系统副总师。从事空间环境探测技术研发和探测网络建设、电离层和流星物理研究，在低纬电离层和流星不均匀体特征与机制研究取得系列成果，发表SCI论文100余篇，引用2 000余次；获赵九章优秀中青年科学奖、国际无线电联盟青年科学家奖。（曾）主持国家自然科学基金优青、重大科研仪器研制（自由申请）和重点国际合作等科研任务。（曾）任《Journal of Space Weather and Space Climate》等专刊编辑，获JGR: Space Physics优秀审稿人(Outstanding Reviewers)。

## Guest Editor's Commentary

随着子午工程一期运行和二期建设的顺利进行，我国日地空间环境地基探测能力得到极大增强。子午工程探测科学数据在我国乃至国际空间领域的基础科学与应用研究中扮演着日益重要的作用。《地球与行星物理论评（中英文）》期刊特组织出版“子午工程科学探测”专刊，介绍子午工程探测技术、监测数据与科学研究，推进子午工程探测研究交流，提升子午工程探测数据使用度。本专刊集文15篇，介绍了子午工程涉及太阳射电、电离层、中高层大气、地磁与波动活动等探测设备的研制、取得的一些重要科学认识，以及开展的教育实践活动剪影。

希望“子午工程科学探测”专刊的付梓出版，有助于推进我国日地空间环境地基探测能力的提升，也能为相关领域的科学研究提供一份宝贵的参考资料。

特约主编：徐寄遥

刘斌

李国主

王威, 颜毅华, 谭宝林, 谭程明, 冯士伟, 刘飞, 陈林杰, 苏仓. 2024. 子午工程二期宽波段太阳射电频谱监测. 地球与行星物理论评（中英文）, 55(1): 1-5. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-016.

Wang W, Yan Y H, Tan B L, Tan C M, Feng S W, Liu F, Chen L J, Su C. 2024. Wide-band solar radio spectral monitoring in the Phase II of Chinese Meridian Project. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 1-5 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-016.

## 子午工程二期宽波段太阳射电频谱监测

王威<sup>1\*</sup>, 颜毅华<sup>1</sup>, 谭宝林<sup>2</sup>, 谭程明<sup>1</sup>, 冯士伟<sup>3</sup>, 刘飞<sup>2</sup>, 陈林杰<sup>1</sup>, 苏仓<sup>1</sup>

1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2 中国科学院国家天文台, 北京 100101

3 山东大学(威海), 威海 264209

**摘要:** 为实现太阳射电的全波段观测, 子午工程二期太阳-行星际监测链分系统将建设 4 套太阳射电频谱仪, 覆盖十米波-米波-分米波-厘米波波段, 将为太阳物理和空间天气研究和业务提供可靠的数据支撑. 文中介绍了全波段射电频谱仪的系统构成和主要技术参数, 对数据产品和定标过程进行了描述.

**关键词:** 子午工程; 太阳射电; 频谱监测

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-016

中图分类号: P352

文献标识码: A

## Wide-band solar radio spectral monitoring in the Phase II of Chinese Meridian Project

Wang Wei<sup>1\*</sup>, Yan Yihua<sup>1</sup>, Tan Baolin<sup>2</sup>, Tan Chengming<sup>1</sup>, Feng Shiwei<sup>3</sup>, Liu Fei<sup>2</sup>, Chen Linjie<sup>1</sup>, Su Cang<sup>1</sup>

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Shandong University, Weihai, Weihai 264209, China

**Abstract:** To achieve full-band observation of solar radio emissions, the sun-planetary interstellar monitoring chain subsystem of the Phase II of Chinese Meridian Project will construct four sets of solar radio spectrometers covering the decimeter, meter, decameter, and centimeter wavebands, providing reliable data support for solar physics and space weather research and operations. The system configuration and main technical parameters of the full-band radio spectrometer are introduced, and the data products and calibration process described.

**Keywords:** Chinese Meridian Project; solar radio; spectrum monitoring

### 0 引言

可见光波段、紫外和极紫外波段的太阳辐射反映的都是热过程的信息, 对于太阳爆发中的非热过程, 如等离子体不稳定性引起的能量释放、粒子加速和超热粒子传播过程等都是地基光学波段望远镜无法直接观测的. 在地基观测中, 可利用射电天文

手段探测这些非热过程的信息.

在地面上, 可探测的射电波段(主要为 30 MHz 到 15 GHz 之间频段)由于不同频段的探测难度不同, 尤其是宽带高分辨率的连续频谱观测对技术要求很高. 随着新一代厘米-分米波射电日像仪(Mingantu spectral radioheliograph, MUSER)的建成, 我国在 400 MHz~15 GHz 频段的宽带频谱成

收稿日期: 2023-03-03; 录用日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2031134); 国家自然科学基金青年基金资助项目(12003049)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2031134), and the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (Grant No. 12003049)

\*通信作者: 王威(1979-), 男, 正高级工程师, 主要从事太阳射电技术和数据处理研究. E-mail: wangwei1@nssc.ac.cn



像占据了国际领先的地位. 但是, 迄今的太阳射电观测仍然还存在许多空白区, 在宽带频谱观测方面, 国内近年来虽然也取得了许多进展, 在厘米-分米波段的宽带动态频谱观测居国际先进水平并取得了大量研究成果, 但是也仍然存在许多频段空白, 如 2.06~2.60 GHz、7.60~12.00 GHz 等; 现有的太阳射电频谱仪, 在时间分辨率和频率分辨率等参数方面也参差不齐, 部分设备年代久远, 不能长期稳定运行甚至已经停止运行. 无法满足子午工程对探测和研究日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME)、太阳超热粒子、行星际激波和太阳风的需求.

厘米-分米波、米波直到十米波段 (频率大约为 20 GHz~30 MHz 左右) 的射电辐射可以穿透地球大气到达地表, 被地基射电望远镜接收, 在这个频段内的地基望远镜基本上不受地球气候条件的限制, 可以连续观测太阳爆发信号.

频率从 15 GHz~30 MHz 的太阳射电辐射信号的源区大约覆盖了从靠近太阳表面附近的色球层顶到距离太阳表面 1.5~5  $R_{\odot}$  的行星际空间, 在这个区域里发生的爆发主要为太阳耀斑、CME、行星际激波、太阳超热粒子发射等过程, 其中包括爆发的初始能量释放过程和粒子加速源区、CME 的加速区、行星际激波以及太阳风的出发区 (子午工程项目团队, 2017).

在国内探测方面, 我国从上世纪末先后研制建成并投入观测了中国宽带动态频谱仪 (solar broadband radio spectrometers, SBRS) 的 6 个频段的望远镜设备, 观测频率在 70 MHz~7.60 GHz 之间, 频率分辨率和时间分辨率均居当前国际同类设备的先进行列. 但是, 从表 1 可以发现, 国内在 70 MHz 以下和 7.60~12.00 GHz 之间太阳射电观测还是一个空白区. 即使现有的设备也存在时间分辨率和频率分辨率满足不了理论的需求的缺陷.

表 1 宽波段射电频谱仪组成  
Table 1 Instruments of wide band radio spectrometer

序号	名称	观测频段	站址(经纬度)	计划完成时间
1	米波十米波射电日像仪	30~400 MHz	内蒙古锡林郭勒明安图 Lon: E115.25, Lat: N42.71, Alt: 1365 m	2023年11月
2	米波太阳射电频谱仪	90~300 MHz	山东威海荣成槎山 Lon: E122.31, Lat: N36.84, Alt: 53 m	2023年11月
3	分米波太阳射电频谱仪	400~2000 MHz	内蒙古锡林郭勒明安图 Lon: E115.25, Lat: N42.71, Alt: 1365 m	2023年11月
4	厘米波太阳射电频谱仪	2000~15000 MHz	内蒙古锡林郭勒明安图 Lon: E115.25, Lat: N42.71, Alt: 1365 m	2023年11月

在子午工程中, 提出利用谱-像结合方式进行观测, 则可以全面反映太阳射电爆发过程的全貌. 所谓谱-像结合, 是指利用单天线单元和具有高时间分辨率和高频率分辨率的太阳射电宽带频谱仪观测太阳爆发获得宽带频谱特征, 其频率分辨率达到中心频率的 0.3% 左右, 时间分辨率则达到对应频段的 SMB (small microwave bursts) 平均寿命的 1/3 左右, 这样可以识别爆发过程的频谱精细结构和超精细结构; 在对应频段利用多天线阵列组成的射电日像仪, 其频率分辨率达到中心频率的 3%~5% 左右, 时间分辨率则达到秒级, 同时具有较高空间分辨率, 可以给出爆发源的空间位置和源区结构特征的详细观测 (谭宝林等, 2018). 二者联合观测, 同时实现高时间分辨率、高频率分辨率、高空间分辨率和高灵敏度.

因此, 子午工程“太阳-行星际监测链分系统”中将建设一组具有高时间-频率分辨率的太阳射电

超宽带动态频谱仪 (30 MHz~15 GHz) 和一组宽带射电频谱日像仪 (由明安图米波-十米波射电日像仪 30~400 MHz、稻城圆环阵太阳风射电成像望远镜 150~450 MHz 和现有的 MUSER 400 MHz~15 GHz 组成), 可以组成在厘米-分米波、米波、十米波的超宽频带上的综合观测, 综合反演太阳耀斑、CME、行星际激波、太阳超热粒子和太阳风从源区到传播路径上的动力学行为和演变规律全貌.

子午工程将通过太阳-行星际监测链分系统的建设, 形成一组包括光学、射电和粒子探测在内的多波段系列探测手段, 该分系统整体上是独一无二的, 将具有国际领先水平, 对太阳爆发的产生、日冕物质抛射的初发、行星际激波、太阳高能粒子的加速和传播、太阳风的形成、加速及其在行星际空间的传播和结构演化等全过程从源头到近地空间的无缝连接进行动态监测.

具体建设的宽波段频谱仪包括如下四套设备.

# 1 设备构成和主要技术指标

宽波段太阳宽频射电频谱仪分四个频段实现, 基本上都是经由高增益宽带天线接收来自太阳射电辐射信号, 进行低噪声放大和滤波, 并经由光纤传输到室内. 室内接收单元首先将接收到的光信号转

换为电信号, 经过放大、混频和抗混叠滤波后进行 A/D 采样得到相应数字信号; 数字处理单元对所有接收通路的信号进行多通道功率谱估计, 功率谱信号数据进入到数据存储处理单元中进行后处理和存储, 再进行数据标定.

主要技术指标见表 2.

表 2 宽波段射电频谱仪主要技术指标

Table 2 Main parameters of wide band radio spectrometer

序号	频率范围	频率分辨率	灵敏度	动态范围	极化方式	每日可观测时间	时间分辨率
1	30~400 MHz	1 MHz@30~110 MHz 5 MHz@110~400 MHz	≤1 sfu(积分25 ms)	≥45 dB	双线极化	≥8小时	≤100 ms(全频带)
2	90~300 MHz	100 kHz	1 sfu(积分10 ms)	≥60 dB	双线极化	≥8小时	≤1 ms(全频带)
3	400 MHz~2 GHz	≤1 MHz	1 sfu(积分4 ms)	≥45 dB	双圆极化	≥8小时	≤4 ms(全频带)
4	2~15 GHz	≤2 MHz(2~6 GHz) ≤5 MHz(6~12 GHz) ≤10 MHz(12~15 GHz)	2 sfu(积分1 ms)	≥45 dB	双圆极化	≥8小时	≤5 ms(全频带)

当前, 建设在内蒙古锡林郭勒盟明安图的米波十米波射电频谱仪、厘米波射电频谱仪和分米波射电频谱仪设备已完成安装, 正在进行系统调试中. 建设山东威海荣成槎山的米波射电频谱仪已经调试完成, 正在试运行阶段 (图 1、图 2、图 3).



图 1 米波十米波射电频谱仪

Fig. 1 Decametric and metric radio spectrometer



图 2 米波射电频谱仪

Fig. 2 Metric radio spectrometer

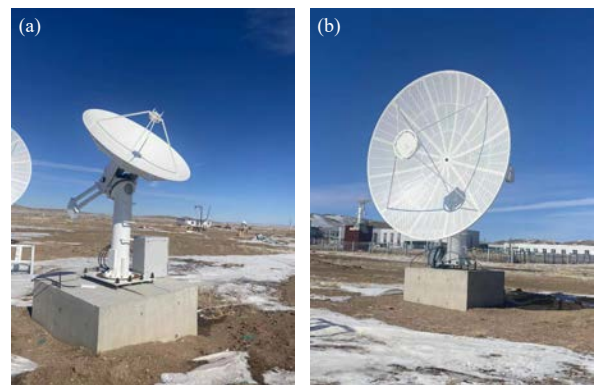


图 3 (a) 厘米波和 (b) 分米波射电频谱仪

Fig. 3 Decametric and centimetric radio spectrometer

# 2 数据产品和标定

数据产品生成包括太阳射电频谱原始数据、太阳射电频谱数据、太阳射电频谱快视图、F10.7 太阳射电流量等四类数据产品.

原始太阳射电频谱为太阳射电频谱仪接收到的信号 (双极化) 经过 AD 采样后作频谱分析得到的数据, 为功率谱信号. 数据存储为 32 位无符号整型的三维数组, 其中第一、二和三维分别表示频率点数、时间点数和极化类型.

太阳射电频谱数据为记录已标定的左旋和右旋极化圆极化, 或者是水平和垂直线极化信号, 数据单位为太阳流量单位 (solar flux unit, sfu), 采用标准的 fits 格式存储.

太阳射电频谱快视图为频谱数据的快照图片, 根据不同的时间和频率分辨率设置不同的图像尺



寸. 通常包含双极化 (双圆或双线) 视图和典型频率的射电流量视图.

F10.7 太阳射电流量为采用文本格式存储的 2804 MHz 的标定后的射电流量, 时间间隔为 1 s.

数据标定主要是将原始观测数据经过处理后得到以太阳光电辐射流量为物理单位的数据. 射电天文文中, 天体射电辐射流量的绝对定标需要用到喇叭天线, 而且需要长期的实验和观测, 人力物力消耗大. 国际上目前较好的太阳射电辐射流量绝对定标精度约 5% 以内. 目前国内和国际上大部分的射电频谱仪和射电望远镜的观测数据一般采用标准源或参考源进行相对定标, 定标精度约 10% 以内 (谭程明, 2002). 近些年国家天文台又研究了气温改正的相对定标方法, 频谱仪的定标误差均在 10 sfu

以内, 其中 2840 MHz 附近的定标误差为 5 sfu, 约为 3.7% 的定标精度达到了国际上绝对定标精度 5% 的水平 (Tan et al., 2009; 谭程明等, 2011).

定标基本原理如图 4 所示. 将接收机开关指向标准噪声源便可测到两个值  $R_n$  和  $R_t$ .  $R_n$  为噪声管与终端温度 (也称环境温度或噪声管不工作状态) 之和  $T_n$  在接收机处的读数,  $R_t$  为终端温度  $T_t$  在接收机处的读数. 同样天线不同指向时, 接收机也可以观测到两个值  $R_s$  (对应太阳射电辐射亮度  $T_s$ ) 和  $R_b$  (对应天空背景射电天线温度  $T_b$ ). 由于这四个信号为同一个接收机接收, 假设接收机工作在线性增益范围内, 就有如下等式:  $\frac{R_s - R_b}{T_s - T_b} = \frac{R_n - R_t}{T_n - T_t}$ . 由此式就可以求得太阳射电天线温度  $T_s$ , 并最终求得辐射流量密度.

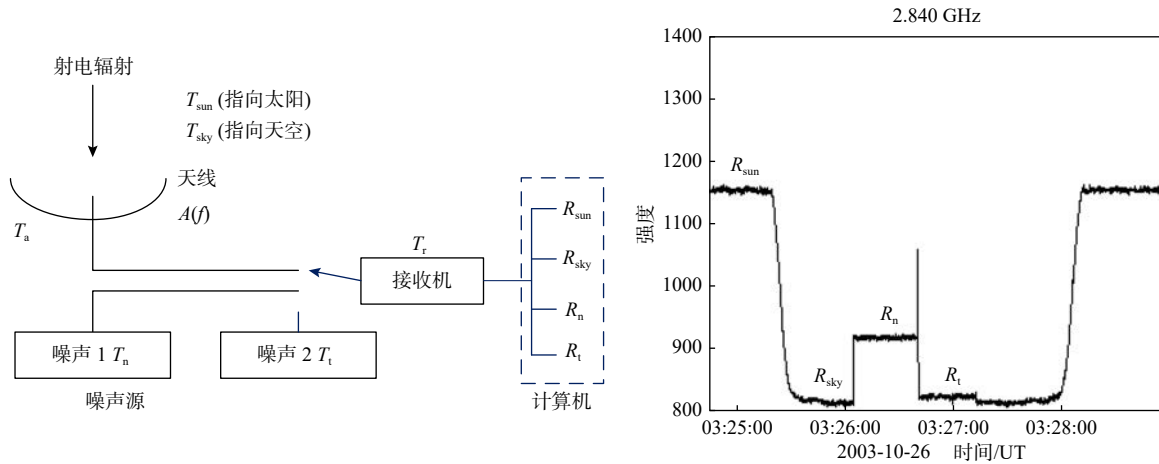


图 4 定标基本原理图

Fig. 4 Principal diagram of calibration

根据以上定标基本原理, 得到定标的基本分析步骤如下:

(1) 定标观测数据采集. 每天早中晚可采集到三组定标观测数据.

(2) 标准太阳射电辐射流量谱数据获得, 一般在国际太阳数据网上可以获得.

(3) 将定标观测数据与标准太阳射电辐射流量谱比较分析, 得到定标系数.

将定标系数应用到监控软件和数据处理软件中即可得到太阳射电辐射流量. 一般短期的数据分析得到定标系数进行定标误差大, 长期的数据分析得到的定标系数定标误差小.

米波太阳射电频谱仪已经完成设备研制, 处于试运行阶段 (Shang et al., 2022; Yan et al., 2020). 该观测设备在 2022-11-11 05:30:15 UT 左右观测到的太阳射电 I 型噪暴 (图 5). 观测频率范围为

90~600 MHz, 频率分辨率为 76.29 kHz, 时间分辨率为 10 ms (山东大学子午工程团队, 2022).

### 3 总结

子午工程二期太阳-行星际监测链分系统建设的四套具有高时间-频率分辨率的太阳射电超宽动态频谱仪, 将弥补国内太阳射电频谱观测的频率空白, 实现从十米波-米波-分米波-厘米波的全波段射电观测. 结合已有的太阳射电成像观测设备——明安图厘米分米波射电频谱仪日像仪和子午工程中新建的米波十米波射电日像仪、稻城圆环阵太阳射电成像望远镜等设备, 将为全波段太阳射电观测提供可靠的数据支撑. 这些观测数据将用于太阳物理和空间天气研究, 还可以为预测空间天气、保障航空航天活动提供重要的数据支撑.

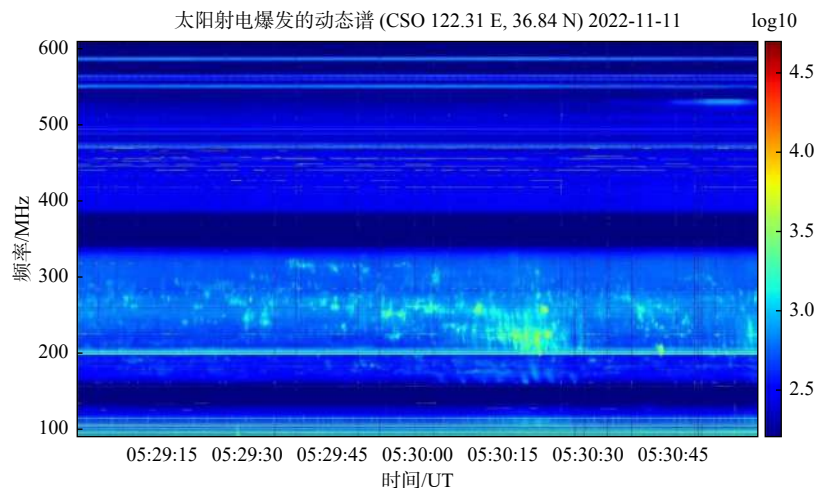


图 5 米波射电频谱仪观测事例

Fig. 5 Observation of metric radio spectrometer

总之, 全波段太阳射电观测是太阳物理和空间天气研究领域的重要手段, 其重要性不容忽视. 随着观测技术的不断提高, 相信未来全波段太阳射电观测将为太阳物理和空间天气研究带来更多的发现和应用.

## References

- Shang Z Q, Xu K, Liu Y, et al. 2022. A broadband solar radio dynamic spectrometer working in the millimeter-wave band[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 258(2): 25.
- Tan B L, Cheng J, Tan C M. 2018. Scaling-laws of radio spike bursts and their constraints on new solar radio telescopes[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 59(4): 37 (in Chinese).
- Tan C M. 2002. Calibration of solar radio bursts and low-frequency radio CME models[D]. Beijing: Beijing Normal University (in Chinese).
- Tan C M, Yan Y H, Tan B L, Xu G R. 2009. Calibration of the solar radio spectrometer[J]. *Science in China Series G Physics Mechanics and Astronomy*, 52(11): 1760-1764.
- Tan C M, Yan Y H, Tan B L, et al. 2011. Design of a data processing system for solar radio spectral observations[J]. *Astronomical Research & Technology*, 8(2): 100-107 (in Chinese).
- Team of Meridian Project. 2017. Proposal of Meridian Project (Phase II) [R]. Beijing: National Space Science Center of CAS, et al (in Chinese).
- Team of Meridian Project of Shandong University. 2022. The metric solar radio spectrometer at Rongcheng station of Weihai has completed system test and obtained the first light observation [EB/OL]. <https://iss.wh.sdu.edu.cn/info/1094/2822.htm> (in Chinese).
- Yan F-B, Liu Y, Xu K, et al. 2020. A broadband digital receiving system with large dynamic range for solar radio observation[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 20(9): 358-366.

## 附中文参考文献

- 山东大学子午工程团队. 2022. 子午工程 II 期威海台荣成站“米波太阳射电频谱仪”完成系统本地联调并获得初光观测 [EB/OL]. <https://iss.wh.sdu.edu.cn/info/1094/2822.htm>.
- 谭宝林, 程俊, 谭程明, 等. 2018. 尖峰爆发标度律及其对新一代太阳射电望远镜参数的约束[J]. *天文学报*, 59(4): 37.
- 谭程明. 2002. 太阳射电爆发的定标和低频射电 CME 模型 [D]. 北京: 北京师范大学.
- 谭程明, 颜毅华, 谭宝林, 等. 2011. 太阳射电频谱观测数据分析系统方案设计[J]. *天文研究与技术*, 8(2): 100-107.
- 子午工程项目团队. 2017. 子午工程二期建议书 [R]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心等.

于向前, 和冬华, 肖池阶, 宗秋刚, 施伟红, 刘斯, 陈鸿飞, 王永福, 邹鸿. 2024. 子午工程二期宽频地磁波监测仪研制. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 6-14. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-007.

Yu X Q, He D H, Xiao C J, Zong Q G, Shi W H, Liu S, Chen H F, Wang Y F, Zou H. 2024. Development of the wideband magnetic field wave monitor for the Phase II of Chinese Meridian Project. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 6-14 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-007.

## 子午工程二期宽频地磁波监测仪研制

于向前<sup>1</sup>, 和冬华<sup>1</sup>, 肖池阶<sup>2\*</sup>, 宗秋刚<sup>1</sup>, 施伟红<sup>1</sup>,  
刘斯<sup>3</sup>, 陈鸿飞<sup>1</sup>, 王永福<sup>1</sup>, 邹鸿<sup>1</sup>

1 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2 北京大学物理学院, 北京 100871

3 长沙理工大学物理与电子科学学院, 长沙 410114

**摘要:** 地球的磁层中存在各种波现象, 其频率从 mHz 延伸到数千 Hz. 这些波的研究一直是空间物理学研究的核心问题. 针对目前世界上地磁台站的波监测设备均为各自测量相对变化、缺乏统一标定、无法进行从高纬到低纬联合观测、无法进行多台设备观测数据的统一对比研究的现状, 本文综合使用磁阻传感器 (探测 ULF 频段: 1 mHz~2 Hz)、巨磁感抗传感器 (探测 ELF 频段: 0.2 Hz~2 kHz) 和线圈传感器 (探测 VLF 频段: 0.2 kHz~10 kHz) 研制新一代的宽频地磁波监测仪, 将这些监测仪放置在 120°E 子午链附近的黑龙江漠河站 (高纬)、北京十三陵站 (中纬)、海南乐东站 (低纬) 等典型区域的地磁台站上, 并对各个台站的设备进行统一的时间、振幅和频率标定, 结合 FY-3E、SMILE 等近地空间卫星数据, 全面提升对地球磁层的各种波现象的探测能力. 研制的宽频地磁波监测仪的性能测试实验表明, 其具有对一定频率 (1 mHz~10 kHz) 的波的探测能力; 其幅度探测范围为:  $\pm 65000$  nT (ULF 频段)、 $\pm 1000$  nT (ELF 频段)、 $\pm 100$  pT (VLF 频段); 在量程范围内又具有较低的非线性误差: ULF 频段 $\leq 0.0446\%$ 、ELF 频段 $\leq 0.51\%$ 、VLF 频段 $\leq 1.18\%$ ; 噪声水平也较低: RMS (方均根) 噪声 $\leq 0.5554$  nT (ULF 频段)、NPS (功率谱) 噪声 $\leq 0.028$  nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (ELF 频段)、NPS (功率谱) 噪声 $\leq 0.24$  pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (VLF 频段). 所有这些特点使得所提出的宽频地磁波监测仪能够满足子午工程二期的波探测需求.

**关键词:** 子午工程二期; 宽频地磁波监测仪; 磁阻传感器; 巨磁感抗传感器; 线圈传感器

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-007

中图分类号: P352

文献标识码: A

## Development of the wideband magnetic field wave monitor for the Phase II of Chinese Meridian Project

Yu Xiangqian<sup>1</sup>, He Donghua<sup>1</sup>, Xiao Chijie<sup>2\*</sup>, Zong Qiugang<sup>1</sup>, Shi Weihong<sup>1</sup>,  
Liu Si<sup>3</sup>, Chen Hongfei<sup>1</sup>, Wang Yongfu<sup>1</sup>, Zou Hong<sup>1</sup>

1 School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

3 School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

**Abstract:** There are various magnetic field waves with frequencies ranging from mHz to thousands of Hz in the Earth's magnetosphere. These waves can be categorized into three classes depending on their period: ULF (mHz to ~ Hz), ELF (~ Hz to hundreds of Hz), and VLF (hundreds of Hz to thousands of Hz). The regular and continuous ultra-low-frequency (ULF) waves in the magneto-sphere, ranging from 1 mHz to a few Hz, are important to

收稿日期: 2023-02-26; 录用日期: 2023-04-21

基金项目: 中国子午二期项目 (8201701679)

Supported by the Phase II of Chinese Meridian Project (Grant No. 8201701679)

第一作者: 于向前 (1983-), 男, 博士, 高级工程师, 从事空间磁场探测研究. E-mail: yuxiangqian@pku.edu.cn

\*通信作者: 肖池阶 (1975-), 男, 教授, 主要从事磁层物理研究. E-mail: cjxiao@pku.edu.cn



geomagnetic micropulsations. Recently, whistler mode waves generated by lightning and extremely low-frequency (ELF) bursts, which can be attributed to earthquakes, were detected near the surface; their frequencies range from several Hz to a few hundred Hz. The research on the characteristics of ionospheric plasma disturbance caused by the known ground-based very low frequency (VLF) transmitters, whose frequencies range from a few hundred to a few thousand Hz, is of great significance for analyzing changes in the ionospheric environment. These magnetic field waves are crucial for studying various space physical phenomena. As the wave monitoring equipment of global geomagnetic stations measures relative changes and a lack of unified calibration, they cannot conduct joint observations from high to low latitudes and unified comparative studies of the observational data from multiple sensors. The magnetoresistance sensor (ULF: 0.1 mHz–2 Hz), giant magneto-inductance sensor (ELF: 0.2 Hz–2 kHz), and coil sensor (VLF: 0.2–10 kHz) is used to develop a new generation of broadband geomagnetic wave monitors, which are placed on the geomagnetic stations in typical areas such as Mohe (high latitude), Beijing's Ming Tombs (middle latitude), and Sanya Ledong (low latitude), near the 120° meridian chain. Combined with the data of near-Earth space satellites such as FY-3E and SMILE, the observation ability of various wave phenomena in the Earth's magnetosphere will be comprehensively improved. The performance test experiment shows that the developed wave monitor can detect the fluctuating magnetic field at a particular frequency (1 mHz–10 kHz); magnetic field detection ranges of:  $\pm 65\,000$  nT (ULF frequency band),  $\pm 1\,000$  nT (ELF frequency band), and  $\pm 100$  pT (VLF band); with low nonlinear errors: ULF frequency band  $\leq 0.0446\%$ , ELF frequency band  $\leq 0.51\%$ , and VLF frequency band  $\leq 1.18\%$ ; and low noise levels: RMS  $\leq 0.5554$  nT (ULF frequency band), NPS  $\leq 0.028$  nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (ELF frequency band), and NPS  $\leq 0.24$  pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (VLF band). These characteristics enable the proposed broadband geomagnetic wave monitor to meet the Phase II of Chinese Meridian Project magnetic field detection requirements.

**Keywords:** Phase II of Chinese Meridian Project; broadband geomagnetic wave monitor; magnetoresistance; giant magnetic inductive sensor; coil sensor

## 0 引言

地球的磁层中存在各种波现象,其频率从 mHz 延伸到数千 Hz (Bleier and Dunson, 2005; Moldwin, 2008; Rae and Watt, 2016). 磁层中规则且连续的超低频 (ULF) 波,范围从 1 mHz 到 ~Hz, 是地磁微脉动的重要组成部分,对于理解波-粒子相互作用非常重要 (Jacobs et al., 1964; Regoli et al., 2018). 最近,在地表附近检测到了由闪电和极低频 (ELF) 爆发产生的哨声模式波,这些爆发可能是由地震引起的,其频率在几 Hz 到几百 Hz 之间 (Bleier and Dunson, 2005). 此外,还存在频率在几百 Hz 到几千 Hz 之间的甚低频 (VLF) 波. 这些波对磁层带电粒子的加速、传输和损失有重要作用,被认为是地球辐射带形成和演化的主要机制 (Jacobs et al., 1964; Regoli et al., 2018). 对这些波的研究一直是空间天气与空间物理学研究的核心问题. 这些波可沿磁力线或横跨磁力线运动,并在其接近地球时与电离层发生相互作用,引起地球表面不同纬度地区的磁场在多个频率上的扰动. 使用多点地磁台站的 ULF/ELF/VLF 地磁波动进行监测,

并将波动数据结合 FY-3E、SMILE 等空间卫星数据,有望获得这些波的激发、传播、耗散等整体信息,从而促进地球辐射带的形成、磁层/电离层耦合等磁层主要科学问题的理解,提升磁暴期间高能电子的产生、输运和损失等空间天气事件的监测和预报.

地面台站的 ULF/ELF/VLF 波动信号的监测具有长期持续、便于监控的优势. 它的组网观测也能建立全球性 (包括不同 L-shell、不同磁地方时) 的 ULF/ELF/VLF 波分布特征,为深入认知、理解各类 (包括自然的与人工的) ULF/ELF/VLF 波的激发特性及 (向上、向下) 传播行为提供必不可少、至关重要的研究窗口与分析手段. 因此,沿 120°E 子午链对 ULF/ELF/VLF 扰动进行观测,并结合多颗卫星数据,可以获得大量 ULF/ELF/VLF 波动的相关信息,从而提升对这些波动的理解,不仅可用于研究各类哨声波在低纬区域的时空分布特征,建立可靠的波动分布模型与传播模型,而且可用于细致、深入地研究极区各类哨声波的磁层与电离层效应.

地磁扰动的频率范围很大. 目前世界上有大量

专门测量 ULF 波、ELF 波或 VLF 波的设备 and 站点, 但均为各自测量相对变化, 缺乏统一标定, 无法进行从高纬到低纬联合观测、无法进行多台设备观测数据的统一对比研究. 自从子午工程一期实施以来, 我国已经在 120°E 子午链附近和 30°N 纬度链上建立了地磁场和地电场的监测网. 子午工程二期计划在如表 1 所示的台站安装一些高精度的 ULF/ELF/VLF 波动测量仪器, 频率测量范围为 1 mHz~10 kHz. 设备属于子午工程二期空间环境监测系统地磁监测网分系统. 这些宽频磁场波动监测仪, 将进行统一的时间和振幅标定, 以用于统一观测和对

比. 首先, 在实验室中, 采用统一的定标设备 (振幅和频率相同) 对各个设备进行振幅和频率的统一标定. 其次, 后续安装在地磁台站后, 还会结合台站其它地磁测量设备的数据对各个设备进行统一的振幅和频率标定. 这将为系统地分析地球子午圈上 ULF/ELF/VLF 波的产生和传播机制、发生率和空间分布、及其空间环境效应提供充足的科学数据. 从而有望对地球辐射带的形成、磁层/电离层耦合等磁层重大科学问题有突破性贡献. 由于宽频地磁波监测仪主要布局在 120°E 子午链附近, 因此, 不能获得波动的地方时分布.

表 1 宽频磁场波动监测仪部署位置清单

Table 1 The installation position of the wideband magnetic field wave monitor

观测站点	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	备注说明
黑龙江漠河站(黑龙江省漠河县北极镇北极村)	122.4E	53.5N	298	除了安装1套宽频磁场波动监测仪以外, 另安装2套超低频磁场波动监测仪, 分别位于宽频磁场波动监测仪东西两侧约100 m处.
北京昌平十三陵站(北京市昌平区十三陵镇德胜口村)	116.2E	40.3N	184	宽频磁场波动监测仪放置在离机房10~15 m附近
海南乐东站(海南省乐东黎族自治县九所新区山脚村中科院台站)	109.6E	18.3N	51	宽频磁场波动监测仪放置在离机房10~15 m附近

## 1 设计方案

### 1.1 总体方案

我们根据子午工程二期地磁波动监测的科学目标, 专门研制新的宽频地磁波监测仪, 在地磁波动频率为 1 mHz~10 kHz 的大范围内, 进行统一的时间、振幅和频率标定, 是对地球磁层的各种波现象观测能力的全新提升.

子午工程二期宽频地磁波监测仪安装台站、组成结构及探测目标如图 1 所示. 根据测量地磁波动随纬度的变化规律, 在这三个台站各安装一套完整的宽频地磁波监测仪 (包含 ULF/ELF/VLF 波探测器). 探测器放置在各地磁台站点的站内离机房

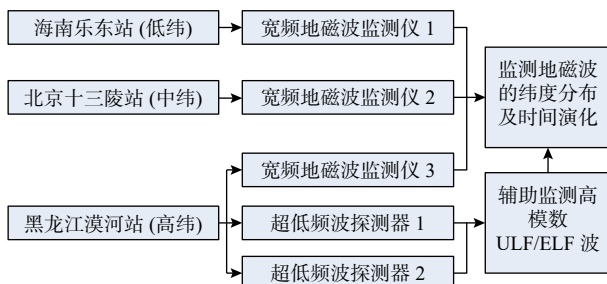


图 1 宽频地磁波监测仪安装台站、组成结构及探测目标  
Fig. 1 Installation station, composition structure, and detection target of the wideband magnetic field wave monitor

10~15 m 附近. 数据采集器放置在各地磁台站点的站内机房. 此外, 为了实现对高纬地区高模数 ULF/ELF 波的环向波模分辨, 在漠河站除了安装一套宽频地磁波监测仪以外, 再安装两套超低频波探测器 (即宽频地磁波监测仪中的 ULF/ELF 波组件), 分别位于宽频地磁波监测仪东西两侧 100 m 处.

监测仪针对频率为 1 mHz~10 kHz 的波进行监测, 因频率跨度大, 分三个频段进行探测: ULF 频段 (1 mHz~2 Hz) 采用磁阻传感器、ELF 频段 (0.2 Hz~2 kHz) 采用巨磁感抗传感器、VLF 频段 (0.2 kHz~10 kHz) 采用线圈传感器. 每个频段的传感器相互独立, 均可实现对三个正交方向的磁场波动的测量. 传统意义上, ULF 频段频率范围从 mHz 到几 Hz, ELF 频段频率范围从几 Hz 到几百 Hz, VLF 频段频率范围从几百 Hz 到几千 Hz. 交叉的频段用于交叉验证和定标. 宽频地磁波监测仪的组成及内部接口如图 2 所示.

### 1.2 磁阻传感器

磁阻传感器基于美国 Honeywell 公司生产的一种 4 段桥式各向异性磁阻传感器 HMC1001 进行设计. 本项目根据 HMC1001 的特征, 设计了基于相敏解调原理的微弱信号提取电路. HMC1001 是单轴

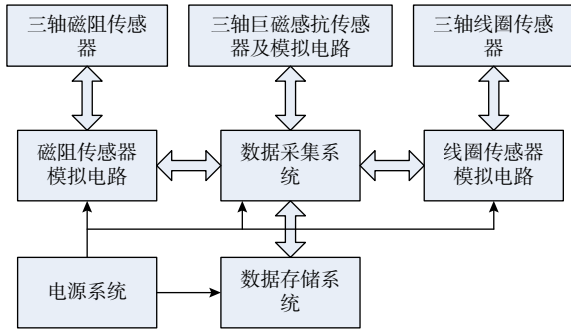


图 2 宽频地磁波监测仪组成及内部接口

Fig. 2 Composition and internal interface of the wideband magnetic field wave monitor

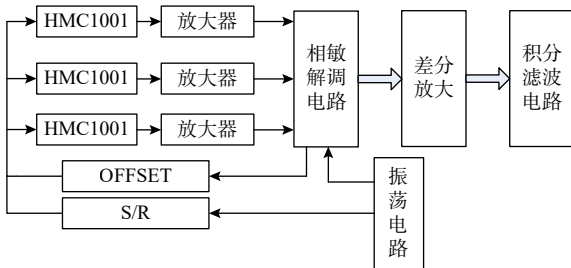


图 3 HMC1001 信号处理电路的电路框图 (于向前等, 2023)

Fig. 3 Circuit diagram of signal processing circuit based on HMC1001 (Yu et al., 2023)

的传感器, 本项目采用三个单轴 HMC1001 传感器组成三轴矢量磁强计. 设计的电路原理框图如图 3 所示.

HMC1001 芯片还自带置位/复位电流带 (S/R) 与偏置电流带 (OFFSET) 功能管脚 (葛丽丽等, 2017). S/R 信号可以消除强磁场对磁场传感器的历史影响, 提高信号输出, 有效地消除温漂、非线性失真等影响, 大大提高了磁阻式传感器的灵敏度 (葛丽丽等, 2017). “HMC1001” 单元输出与所加磁场成比例的微弱电压信号, 该微弱电压信号送至“放大器”单元进行初步放大, 后送至“相敏解调电路”单元进行解调, 随后再送至“差分放大”单元和“积分滤波电路”单元, 输出与所加磁场成比例的放大的电压信号. 输出的电压信号同时作为 OFFSET 进行反馈, 整个电路工作在闭环工作模式. 相敏解调电路受振荡电路的时钟控制. 闭环工作模式还能够稳定电路的工作状态和放大倍数, 减小非线性失真, 扩展频带 (葛丽丽等, 2017). 所研制的三轴磁阻传感器如图 4 所示.

### 1.3 巨磁感抗传感器

巨磁感抗传感器基于 MI-CB-DJ 进行设计. MI-CB-DJ 由日本 AICHI 公司生产 (Honkura, 2002;



图 4 研制的磁阻传感器照片

Fig. 4 Photo of the magnetoresistance sensor

Nakayama and Uchiyama, 2015). 本文亦称之为 AICHI 磁场传感器. 它是一种基于 1993 年在非晶导线中发现的巨磁阻抗 (GMI) 效应的新型微型磁传感器 (Diaz-Michelena, 2009). 施加的轴向磁场强度的变化将导致非晶丝的轴向磁导率的变化, 从而导致其趋肤深度的变化, 然后导致交流阻抗的明显变化, 这种现象被称为 GMI 效应 (Archer et al., 2015). 与传统霍尔传感器、磁阻 (MR) 传感器、巨磁阻 (GMR) 传感器和磁通门传感器相比, AICHI 传感器具有高性能和低功耗的优势 (Diaz-Michelena, 2009).

AICHI 磁场传感器的工作原理如图 5 所示 (Hamada et al., 2014; Honkura, 2002; Kanno et al., 1997; Mohri et al., 2001, 2002; Nakayama and Uchiyama, 2015). 其基本原理为非晶磁性材料 (Co 系) 在高频脉冲电流的激励信号的激励下, 产生趋肤效应, 其磁电阻随外磁场而发生变化的现象. “激励信号”单元输出频率为 1 MHz、占空比为 50%、幅度为 5 V 的高频电流脉冲信号. AICHI

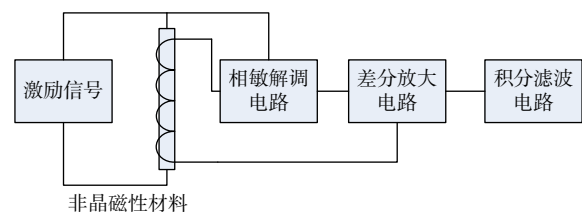


图 5 AICHI 信号处理电路的电路框图

Fig. 5 Schematic of the signal processing circuit based on the AICHI sensor

传感器, 即“非晶磁性材料”单元在该高频电流脉冲激励下, 输出经该高频电流脉冲和外加磁场调制过的信号. 为了能够得到反映外加磁场变化的信号, 就必须对该信号进行解调. 高频电流脉冲为“相敏解调电路”单元提供同步信号. 信号经过“相敏解调电路”单元进行解调, 随后经过“差分放大电路”单元和“积分滤波电路”单元, 得到放大的电压信号, 该电压信号与敏感轴向所加磁场呈比例.

MI-CB-DJ 是单轴的传感器, 本项目采用三个单轴 MI-CB-DJ 传感器组成三轴矢量磁强计, 并根据其特征, 设计了激励信号产生电路. 所研制的三轴巨磁感抗传感器如图 6 所示.



图 6 研制的巨磁感抗传感器照片  
Fig. 6 Photo of the giant magnetic reactance sensor

### 1.4 线圈传感器

线圈传感器的工作原理是基于法拉第电磁感应定理 (Le Contel et al., 2016; Séran and Fergeau, 2005). 与其它类型磁传感器相比, 线圈传感器制

作简单, 成本低, 且频带较宽、灵敏度高, 适合高频磁场测量. 多年来, 一直被地面站用于研究各种波现象 (几 Hz 到几十 kHz). 其工作原理是线圈两端的感应电动势  $e$  与磁感应强度  $B$  随时间的变化率、磁芯的有效导磁率  $\mu_{app}$ 、感应线圈匝数  $N$ 、磁芯的横截面积  $S$  以及电路的放大倍数  $A$  成正比, 即:

$$e = -AN \frac{d\varphi}{dt} = -\mu_{app} NS A \frac{dB}{dt}$$

挑选高磁导率磁芯材料并合理高效地设计布局磁芯, 提高  $\mu_{app}$  和有效面积  $S$  是传感器设计的关键. 本项目设计的线圈传感器采用高电导率的坡莫合金材料作为磁芯, 采用分格方法绕制感应线圈, 以此降低分布电容, 提高频带宽度. 采用超低噪声 JFET 分立放大元器件 MAT12 (电压噪声  $\leq 1$  nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) 设计前置放大器, 采用低噪声集成运放 LT1457 (电压噪声  $\leq 13$  nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) 设计主放大器. 所研制的线圈传感器如图 7 所示.



图 7 研制的线圈传感器照片  
Fig. 7 Photo of the search coil

### 1.5 电源及数据采集系统

电源系统负责给整个监测系统供电. 数据采集

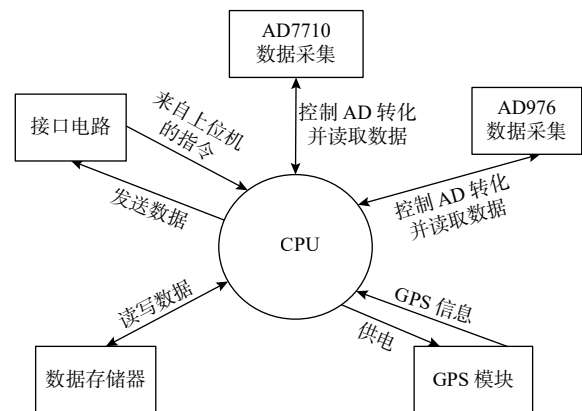


图 8 数据采集系统软件构成及硬件接口  
Fig. 8 Software composition and hardware interface of the data acquisition system

系统软件构成及硬件接口如图 8 所示. 数据采集系统负责传感器输出的模拟信号的 AD 转化, 并将数据打包, 送至数据存储器, 此外, 还接收 GPS/GNSS 时间信号. 三轴磁阻传感器的采样频率为 5 Hz, 由 CPU 控制三个 24 位 AD 转换器 AD7710 完成数据采集, 量程为±65 000 nT, 采样精度优于 0.1 nT; 三轴巨磁感抗传感器的采样频率为 5 kHz, 由 CPU 控制三个 16 位 AD 转换器 AD976 完成数据采集, 量程为±1 000 nT, 采样精度优于 0.01 nT; 三轴线圈传感器的采样频率为 50 kHz, 由 CPU 控制三个 16 位 AD 转换器 AD976A 完成数据采集, 量程为±100 pT, 采样精度优于 1 fT.

## 2 性能测试实验

为了减少地磁场和周围杂散磁场的干扰, 性能测试实验在 6 层坡莫合金磁场屏蔽筒内进行. 屏蔽筒内部尺寸为  $\Phi 600 \times 2000$  mm. 测试时间选择在地磁平静的夜晚 ( $K_p$  指数 $\leq 4$ ), 此时各种外界杂散干扰磁场也小. 磁强计的性能测试实验主要包括量程、非线性度和灵敏度测试、噪声测试和频率响应. 对于性能测试实验, 分频段进行测试.

### 2.1 量程、线性度和灵敏度测试

为了使磁场测量结果真实可靠, 在整个测量范围内, 宽频地磁波监测仪对外界施加磁场的响应应该是线性的, 且外界施加磁场不应超过磁强计的测量范围 (即量程) (于向前等, 2023).

将磁场传感器安装在赫姆霍兹线圈系统中央, 如图 9 所示, 利用高精度电流源给赫姆霍兹线圈系统施加电流, 从而产生标准磁场. 调节标准磁场大小, 同时微调传感器被测轴的指向, 使输出值达到最大, 此为传感器量程. 在量程范围内改变输入标准磁场大小若干次, 同步记录输出电压大小. 传感器在每个磁场施加值下测量至少 100 s, 最后选取

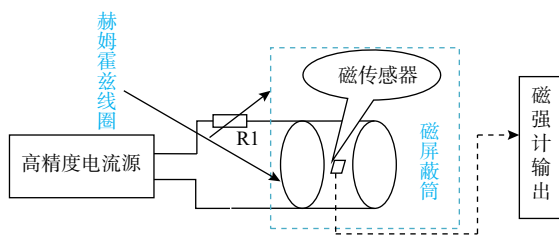


图 9 磁场传感器性能测试实验示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the magnetic field sensor performance test experiment

这 100 s 的平均值作为该测量点的输出. 这里需要注意的是, 由于 ULF 频段的下限频率很低 (1 mHz), 这里施加 DC 磁场. ELF 频段施加正弦磁场的频率为 200 Hz, 施加磁场和输出信号幅度均取峰峰值. VLF 频段施加正弦磁场的频率为 2 kHz, 施加磁场和输出信号幅度也均取峰峰值. ULF 频段和 ELF 频段测试设备有 5 套, VLF 频段测试设备有 3 套, 这里仅给出一组典型测试结果.

完成传感器单个轴向的测试后, 改变传感器轴向指向, 重复上述试验步骤, 测量另外两轴向的性能. 然后根据实际测量值进行数值拟合计算得到传感器的转换系数、非线性误差及量程范围等参数. 测试结果如图 10-12 和表 2-4 所示. 其中, 线性拟合方程为  $B = K \times V + B_0$ .  $B$  为所施加的磁场值, 为已

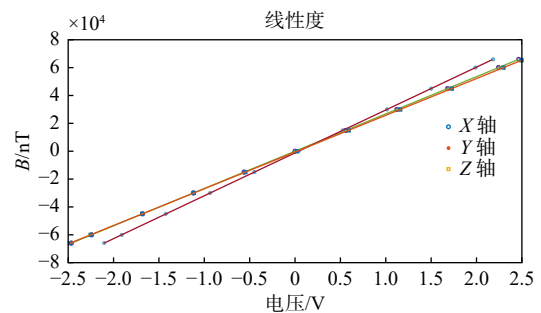


图 10 量程、线性度和灵敏度测试结果 (ULF 频段)

Fig. 10 Range and nonlinearity test results (ULF frequency band)

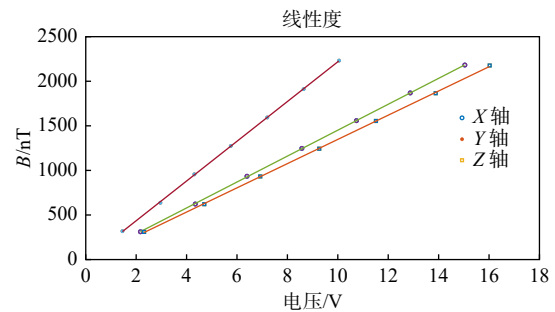


图 11 量程、线性度和灵敏度测试结果 (ELF 频段)

Fig. 11 Range and nonlinearity test results (ELF frequency band)

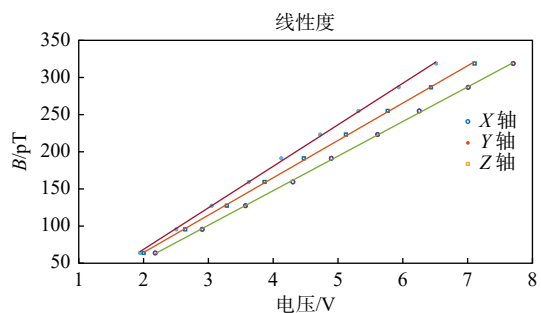


图 12 量程、线性度和灵敏度测试结果 (VLF 频段)

Fig. 12 Range and nonlinearity test results (VLF frequency band)



表 2 灵敏度和非线性度测试结果 (ULF 频段)

Table 2 Sensitivities and non-linearity test results (ULF frequency band)

轴向	$K/(\text{nT}\cdot\text{V}^{-1})$	零点 $B_0/\text{nT}$	非线性误差/%
X	26755.6	15.1	0.0370
Y	30774.0	-1168.6	0.0233
Z	26363.9	-560.5	0.0446

表 3 灵敏度和非线性度测试结果 (ELF 频段)

Table 3 Sensitivities and non-linearity test results (ELF frequency band)

轴向	$K/(\text{nT}\cdot\text{V}^{-1})$	零点 $B_0/\text{nT}$	非线性误差/%
X	145.3	-2.4	0.35
Y	222.8	-10.3	0.51
Z	132.3	-13.3	0.47

表 4 灵敏度和非线性度测试结果 (VLF 频段)

Table 4 Sensitivities and non-linearity test results (VLF frequency band)

轴向	$K/(\text{pT}\cdot\text{V}^{-1})$	零点 $B_0/\text{pT}$	非线性误差/%
X	46.5	-38.5	0.78
Y	55.9	-43.0	1.18
Z	50.3	-36.1	0.79

知数值.  $V$  为磁强计的输出电压, 为测量值.  $K$  为线性拟合系数, 为拟合值.  $B_0$  为线性拟合零点, 为拟合值.  $K$  反映了每单位输出电压代表的磁场值, 即灵敏度.  $B_0$  的拟合数值不一定是磁强计的真实“零点”, 它与磁场屏蔽内的剩余磁场和磁场传感器的零位相关. 由量程测试结果可知, 它的磁场探测范围为:  $\pm 65\,000\text{ nT}$  (ULF 频段);  $\pm 1\,000\text{ nT}$  (ELF 频段);  $\pm 100\text{ pT}$  (VLF 频段). 同时又具有较低的非线性误差 [ (拟合值-实测值) / 量程 ]; ULF 频段  $\leq 0.046\%$ ; ELF 频段  $\leq 0.510\%$ ; VLF 频段  $\leq 1.18\%$ .

## 2.2 噪声

磁场传感器的噪声水平反映了其可以测量的磁场的最小变化量 (于向前等, 2023). 将磁场传感器放置于磁场屏蔽筒内, 进行长时间测试, 即可得到磁场传感器的噪声水平. 噪声测试结果如表 5-7 所示. 由于 ULF 频段测量信号频率较低 (1 mHz), 噪声采用 RMS (方均根) 值, 反映了磁场测量值的离散程度, 它具有明显的白噪声特性. ELF 频段噪声和 VLF 频段噪声采用功率谱密度值 (NPS), 功率谱密度值与频率密切相关, 在整个频率范围内变化. ELF 频段噪声选取工频信号频率 50 Hz 处的功率谱噪声, 为所测频段范围内的最大值. VLF 频

表 5 ULF 频段的噪声测试结果

Table 5 Noise test results (ULF frequency band)

轴向	RMS 噪声/nT
X	0.4777
Y	0.5554
Z	0.4760

表 6 ELF 频段的噪声测试结果

Table 6 Noise test results (ELF frequency band)

轴向	功率谱噪声(NPS) $\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}@50\text{ Hz}$
X	$\leq 0.028$
Y	$\leq 0.027$
Z	$\leq 0.018$

表 7 VLF 频段的噪声测试结果

Table 7 Noise test results (VLF frequency band)

轴向	功率谱噪声(NPS) $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@0.2\sim 10\text{ k}$
X	$\leq 0.24$
Y	$\leq 0.20$
Z	$\leq 0.21$

段噪声也选取测量频段范围内 (0.2 kHz~10 kHz) 的最大功率谱噪声.

## 2.3 频率响应

磁场传感器必须具有探测特定频率范围内的变化磁场的的能力. 频响测试装置与量程测试装置相同, 如图 9 所示. 将磁场传感器安装在赫姆霍兹线圈系统中央, 利用高精度电流源产生正弦电流通入赫姆霍兹线圈, 从而使线圈系统产生交变磁场, 固定输入线圈的电流源大小, 调整磁场变化频率 (ULF 频段: 0.1 mHz~2 Hz; ELF 频段: 0.2 Hz~2 kHz; VLF 频段: 0.2 kHz~10 kHz), 同步记录输出结果, 确定仪器可检测频率范围.

输出电压会随着频率的变化而变化, 这定义为频率响应. 记录正弦磁场的频率和相应频率下的输出电压, 经过计算即可得到频率响应曲线, 如图 13-15 所示. 横坐标为施加磁场的频率, 单位为 Hz; 纵坐标为带宽, 单位为 dB, 为一个工程参数, 计算公式为:  $20 \times \log(V_{\text{out}}/V_{\text{max}})$ , 其中,  $V_{\text{out}}$  为各个频率下的输出电压,  $V_{\text{max}}$  为各个频率下的输出电压最大值. 可以看到, 输出信号幅度会随着频率发生变化. 对于 ULF 频段, 在整个频率 (DC-2 Hz) 范围内, 信号没有衰减, 始终为 0 dB; 对于 ELF 频段, 在整个频率 (0.2 Hz~2 kHz) 范围内, 信号发

生了衰减, 最大为-17 dB; 对于 VLF 频段, 在整个频率 (0.2 kHz~10 kHz) 范围内, 信号发生了衰减, 最大为-12 dB. 我们将在未来的实际探测中进

行幅度校准. 我们还检查了输入磁场和输出电压之间的相位差, 几乎没有差别, 一个典型的输入磁场和输出电压之间的相位关系如图 16 所示.

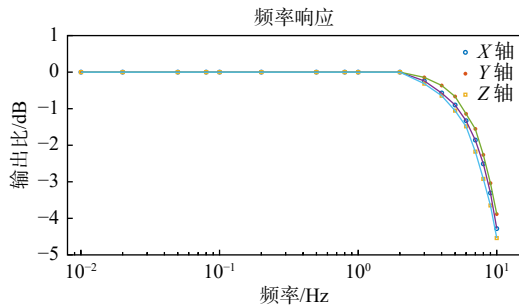


图 13 磁场传感器的频率响应曲线 (ULF 频段)

Fig. 13 Frequency response curve of the magnetic field sensor (ULF frequency band)

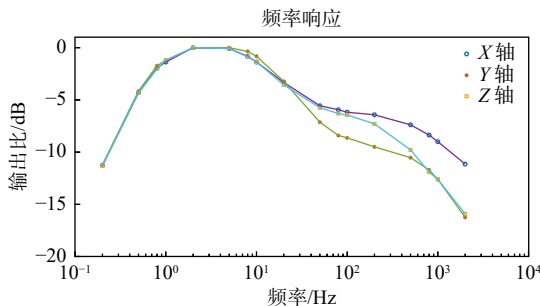


图 14 磁场传感器的频率响应曲线 (ELF 频段)

Fig. 14 Frequency response curve of the magnetic field sensor (ELF frequency band)

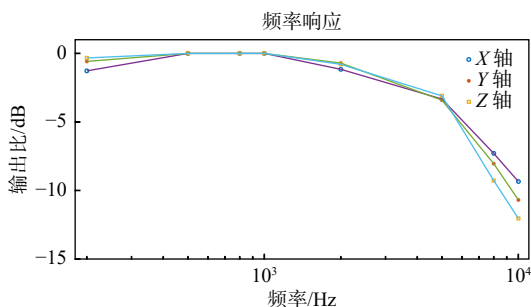


图 15 磁场传感器的频率响应曲线 (VLF 频段)

Fig. 15 Frequency response curve of the magnetic field sensor (VLF frequency band)

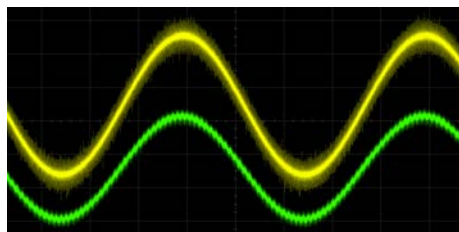


图 16 典型的输入磁场 (上线) 和输出电压 (下线) 之间的相位关系

Fig. 16 The phase relationship between typical input magnetic field (upper line) and output voltage (lower line)

### 3 讨论

本文针对目前世界上的 ULF/ELF/VLF 波监测设备均为各自测量相对变化、缺乏统一标定、无法进行从高纬到低纬联合观测、无法进行多台设备观测数据的统一对比研究的现状, 综合使用磁阻传感器 (探测 ULF 频段: 1 mHz~2 Hz)、巨磁感抗传感器 (探测 ELF 频段: 0.2 Hz~2 kHz) 和线圈传感器 (探测 VLF 频段: 0.2 kHz~10 kHz) 研制新一代的宽频地磁波监测仪, 并对各个台站的设备进行统一的时间、振幅和频率标定, 是对地球磁层的各种波现象观测能力的全新提升. 经过性能实验测试, 它具有对一定频率 (0.1 mHz~10 kHz) 的波动磁场探测的能力, 它的磁场探测范围为:  $\pm 65\,000$  nT (ULF 频段)、 $\pm 1\,000$  nT (ELF 频段)、 $\pm 100$  pT (VLF 频段); 在量程范围内又具有较低的非线性误差: ULF 频段 $\leq 0.0446\%$ 、ELF 频段 $\leq 0.510\%$ 、VLF 频段 $\leq 1.18\%$ ; 噪声水平也较低:  $RMS \leq 0.5554$  nT (ULF 频段)、 $NPS \leq 0.028$  nT/ $\sqrt{Hz}$  (ELF 频段)、 $NPS \leq 0.24$  pT/ $\sqrt{Hz}$  (VLF 频段). 所有这些特点使得所提出的宽频地磁波监测仪能够满足子午工程二期的磁场探测需求.

### 数据与来源

数据来自实验室实测所得.

### 致谢

感谢子午工程二期各级领导的大力支持.

### References

Archer M O, Horbury T S, Brown P, et al. 2015. The MAGIC of CINEMA: First in-flight science results from a miniaturised anisotropic magnetoresistive magnetometer[J]. *Annales Geophysicae*, 33: 725-735.

Bleier T, Dunson C. 2005. ELF magnetic field monitoring of the San Simeon M6.4 quake from both Quakesat and a ground network[C]// Proceedings of the International Workshop on Seismo-Electromagnetics, Tokyo, Japan, March Issue. 2005.

Diaz-Michelena M. 2009. Small magnetic sensors for space applications[J]. *Sensors*, 9: 2271-2288.

Ge L L, Ren Q Y, Zhao H. 2017. Design and performance test of high-

- precision magnetoresistive magnetometer for space applications[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 34(2): 166-170 (in Chinese).
- Hamada N, Shimode A, Tatematsu S, Yamamoto M. 2014. Test-production of high sensitivity multi-core MI element and its characteristics[C]// Proceedings of the International Workshop on Seismo-Electromagnetics, Tokyo, Japan, March Issue. 2005.
- Honkura Y. 2002. Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 249: 375-381.
- Jacobs J, Kato Y, Matsushita S, Troitskaya V. 1964. Classification of geomagnetic micropulsations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 69(1): 180-181.
- Kanno T, Mohri K, Yagi T, et al. 1997. Amorphous wire MI micro sensor using C-MOS IC multivibrator[J]. *IEEE Journals & Magazine*, 33: 3358-3360.
- Le Contel O, Leroy P, Roux A, et al. 2016. The search-coil magnetometer for MMS[J]. *Space Science Reviews*, 199: 257-282.
- Mohri K, Uchiyama T, Shen L P, et al. 2001. Sensitive micro magnetic sensor family utilizing magneto-impedance (MI) and stress-impedance (SI) effects for intelligent measurements and controls[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 91: 85-90.
- Mohri K, Uchiyama T, Shen L P, et al. 2002. Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micro-magnetic sensors (MI sensor and SI sensor) for intelligent measurements and controls[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 249: 351-356.
- Moldwin M. 2008. *An Introduction to Space Weather*[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nakayama S, Uchiyama T. 2015. Real-time measurement of biomagnetic vector fields in functional syncytium using amorphous metal[J]. *Scientific Reports*, 5: 8837.
- Rae I J, Watt C E J. 2016. ULF Waves Above the Nightside Auroral Oval During Substorm Onset[M]// *Low-frequency Waves in Space Plasmas*, 99-120.
- Regoli L, Moldwin M B, Pellioni M, et al. 2018. Investigation of a low-cost magneto-inductive magnetometer for space science applications[J]. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems Discussions*, 7: 129-142.
- Séran H C, Ferreau P. 2005. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research[J]. *Review of Scientific Instruments*, 76(4): 044502.
- Yu X Q, Li J W, Xiao C J, et al. 2023. Vector magnetometer for space applications based on a low-resource magnetoresistance [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1-9 [2023-02-01](in Chinese). <https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2022.111>.

## 附中文参考文献

- 葛丽丽, 任琼英, 赵华. 2017. 面向空间应用的高精度磁阻磁强计设计及性能测试[J]. *航天器环境工程*, 34(2): 166-170.
- 于向前, 李嘉巍, 肖池阶, 等. 2023. 用于空间科学研究的基于磁阻传感器的矢量磁强计 [J/OL]. *北京大学学报 (自然科学版)*: 1-9 [2023-02-01]. <https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2022.111>.

顾旭东, 倪彬彬, 徐未, 王市委, 李斌, 胡泽骏, 何昉, 陈相材, 胡红桥. 2024. 南极长城站哨声波监测仪设备及其初步观测. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 15-23. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-010.

Gu X D, Ni B B, Xu W, Wang S W, Li B, Hu Z - J, He F, Chen X C, Hu H - Q. 2024. Deployment and initial observations of the Wuhan University very low frequency (WHU VLF) wave detection system at the Great Wall Station in Antarctica. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 15-23 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-010.

## 南极长城站哨声波监测仪设备及其初步观测

顾旭东<sup>1,2</sup>, 倪彬彬<sup>1\*</sup>, 徐未<sup>1,2</sup>, 王市委<sup>1</sup>, 李斌<sup>3\*</sup>,  
胡泽骏<sup>3</sup>, 何昉<sup>3</sup>, 陈相材<sup>3</sup>, 胡红桥<sup>3</sup>

1 武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430072

2 湖北珞珈实验室, 武汉 430072

3 中国极地研究中心自然资源部极地科学重点实验室, 上海 200136

**摘要:** 在子午工程二期项目的支持下, 武汉大学 (Wuhan University, WHU) 联合中国极地研究中心研制了一套甚低频 (very low frequency, VLF) 波动探测系统, 并在 2022 年由极地研究中心部署于南极洲的中国长城站 (Great Wall Station, GWS, 62.22°S, 58.96°W)。该探测系统的动态范围为~110 dB, 时间精度为~100 ns, 可为空间物理和空间天气研究提供高分辨率的波动观测数据。本文详细介绍了 WHU VLF (子午工程编码: OCHCH\_WHWM01) 波动探测系统在 GWS 的初步观测结果, 充分验证了系统的优越性能和稳定性。在过去一年的常规运行中, 此系统能精确探测北美和欧洲等区域内各种地基 VLF 台站信号的动态变化。初步分析结果表明, 在多次 X 级太阳耀斑爆发期间, GWS 观测到的人工 VLF 台站信号特性与以往的研究结果高度一致。由于 HWU-GWS (HWU 为发射台站的名称) 路径穿过南大西洋异常 (south Atlantic anomaly, SAA) 区域, 观测结果同时表明, 在磁暴期间, HWU VLF 信号的扰动与磁层电子沉降在时空关系上具有很强的关联性。此外, 此设备也能观测到闪电激发的宽频带哨声波, 在频谱图上呈现特有的清晰色散结构。因此, 在南极独特的地理位置, 地基哨声波监测仪的观测结合其它仪器的观测, 有利于深入开展与极区哨声波传播、低电离层扰动、地面闪电放电和辐射带粒子沉降等相关的空间天气学研究, 对开展全天时空间环境监测具有重要意义。

**关键词:** 哨声波监测仪; 南极长城站; 空间天气; 甚低频波动传播; 子午工程

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-010

中图分类号: P352

文献标识码: A

## Deployment and initial observations of the Wuhan University very low frequency (WHU VLF) wave detection system at the Great Wall Station in Antarctica

Gu Xudong<sup>1,2</sup>, Ni Binbin<sup>1\*</sup>, Xu Wei<sup>1,2</sup>, Wang Shiwei<sup>1</sup>, Li Bin<sup>3\*</sup>,  
Hu Ze-Jun<sup>3</sup>, He Fang<sup>3</sup>, Chen Xiangcai<sup>3</sup>, Hu Hong-Qiao<sup>3</sup>

1 Department of Space Physics, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430072, China

3 MNR Key Laboratory for Polar Science, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

收稿日期: 2023-02-27; 录用日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42188101, 42025404, 42274205, 41874195, 42074119); 国家重点研发计划资助项目 (2022YFF0503700); 中国科学院先导 B 计划资助项目 (XDB41000000); 民用航天技术预研项目 (D020308, D020104, D020303); 湖北珞珈实验室开放基金资助项目 (220100051); 上海科委项目 (21DZ1206100)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42188101, 42025404, 42274205, 41874195, 42074119), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFF0503700), the B-type Strategic Priority Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB41000000), the Pre-research Projects on Civil Aerospace Technologies (Grant Nos. D020308, D020104, D020303), the Open Fund of Hubei Luojia Laboratory (Grant No. 220100051), and the Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan (Grant No. 21DZ1206100)

第一作者: 顾旭东 (1979-), 男, 副教授, 主要从事空间物理、甚低频波动探测和科学应用研究. E-mail:

guxudong@whu.edu.cn

\*通信作者: 倪彬彬 (1978-), 男, 教授, 主要从事空间物理和空间天气学方面的研究. E-mail: bbni@whu.edu.cn

李斌 (1983-), 男, 助理研究员, 主要从事极光粒子加速机制和极光精细结构的研究. E-mail:

libin@pric.org.cn



**Abstract:** A system for the detection of very low frequency (VLF) electromagnetic waves has been developed by Wuhan University (WHU) with the Polar Research Institute of China (PRIC), and has been successfully deployed by PRIC at the Great Wall Station (GWS, 62.22°S, 58.96°W) in Antarctica, as part of the Phase II of Chinese Meridian Project. The system has a dynamic range of ~110 dB and a timing accuracy of ~100 ns, and hence can provide observational data at sufficient resolution to contribute to space physics and space weather research. This paper reports initial measurements of the WHU VLF (Meridian Project-Phase II ID: OCHCH\_WHWM01) wave detection system at GWS, to demonstrate performance of the system.

Data from nearly one year of routine operation indicate that the system is effective in recording the dynamic change of ground-based VLF transmitter signals from North America and Europe. The characteristics of VLF transmitter signals observed at GWS during X-class solar flares are consistent with results from previous studies. The VLF data exhibited a good correlation in space and time with measurements of magnetospheric electron deposition during geomagnetic storms, as detected in the south Atlantic anomaly (SAA) region. The WHU VLF system additionally provides data on the wide-band whistler waves as excited by lightning discharge, the spectrum of which exhibits a distinctive dispersion structure.

The unique position of GWS in Antarctica provides the opportunity to obtain observational data on VLF waves which can be used to investigate multiple aspects of space physics, including the propagation of whistler waves in polar regions, lower ionosphere disturbance, lightning discharge, and radiation belt electron precipitation from the radiation belts. These measurements are of critical importance in monitoring near-Earth space weather.

**Keywords:** whistler wave monitoring equipment; Antarctic Great Wall Station; space weather; VLF wave propagation; Chinese Meridian Project

## 0 引 言

甚低频波动 (very low frequency, VLF) 为频段位于 3~30 kHz 的电磁波, 主要源于雷电和人工发射台站, 可以在由地球表面和低电离层构成的波导里远距离传播 (Barr et al., 2000; Bullough et al., 1976). 随着对甚低频波动独特传播特性的深入研究, 地基甚低频探测系统逐步被用于大气层、电离层、日食、太阳耀斑、宇宙射线等空间环境要素的遥感探测 (如, Belcher et al., 2021; Chevalier et al., 2007; Fishman and Inan, 1988; George et al., 2019; Gólkowski et al., 2021; Ni et al., 2022). 尤其是极区的甚低频波动环境, 它们与地球空间能量粒子的相互作用频繁, 进而影响极区磁层、电离层状态与动力学过程. 极区的地基波动观测手段与极光和带电粒子等观测手段结合起来, 将是深入认知极区空间天气现象的绝佳组合方式, 有利于完善空间天气学建模, 提升空间天气预报/现报准确度.

早期的甚低频接收机只能简单地采集一些频谱信息并保存在磁带中, 主要用于观测闪电激发的哨声波 (Helliwell, 1965). 1990 年代中期, AGO (automated geophysical observatory) 窄带甚低频接收机系统被成功开发, 其带宽最初仅有 2.5 kHz,

后经过逐步扩展, 主要用于研究高纬区域地磁波动 (Shafer et al., 1994). 目前, 斯坦福大学开发的 AWESOME (Atmospheric Weather Educational System for Observation and Modeling of Electromagnetics) 接收机系统灵敏度可达  $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 且可实现 300 Hz~50 kHz 全频段甚低频信号的采集 (Cohen et al., 2010). 近些年来, 此系统工作性能得到了进一步提升, 在闪电监测等近地空间环境无线电测量中发挥了巨大作用. 该系统探测频带扩展到 0.5~470 kHz, 灵敏度最高可达  $0.03 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  (Cohen et al., 2018; Richardson and Cohen, 2021). Penguin (Penguin Micro-VLF Receiver) 是一款高度优化的 VLF 数字采样系统, 其性能优越且能够承受极端极区环境, 主要用于探测极区 VLF 波, 如嘶声波、合声波等 (Lessard et al., 2009). 科研人员在 Penguin 系统的基础上进一步优化设计了 VAT (VLF Advanced Technology Receiver) 系统, 相较于 Penguin 系统, 其功耗更低、灵敏度更高 (Klein, 2009). SAVENT (South America VLF Network) 和 ARRDDVARK [Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition-VLF Atmospheric Research Konsortium] 是两个代表性的窄带甚低频波动探测网络 (Clilverd et al., 2009; Raulin et al., 2009), 为电离层和磁层研究提供了非常有价值

的 VLF 数据。

国外在甚低频领域的研究积累已超过 70 年, 而国内从 1980 年代才逐步进入该研究领域. 大部分地基甚低频探测系统主要用于雷电监测, 接收灵敏度较低. 1980 年代, 武汉大学自主研发了 KDX-87 甚低频接收机系统 (田茂等, 1991), 但受限于当时的电子技术, 性能与国际一流水平尚有距离. 近年来, 基于 FPGA 架构的数字化设计, 武汉大学研发了具有自主知识产权的新型甚低频波动探测系统. 该系统探测能力已达到可与美国 AWESOME 系统相比拟的国际先进水平, 且数字化集成度更高, 相关部件自主可控. 自 2017 年起, 已陆续在国内核心区域建立了数十个观测台站, 组网对甚低频波动开展常规观测, 积累了高质量的观测数据. 借助此系统的观测数据, 团队开展了一系列关于甚低频波传播以及地球空间环境监测的研究, 取得了丰硕的研究成果 (如, Chen et al., 2017; 顾旭东等, 2021; Gu et al., 2021, 2022a, 2022b, 2022c, 2023; 王市委等, 2020, 2022; 易娟等, 2019; Yi et al., 2020; Zhou et al., 2020).

地面甚低频观测具有全天时、覆盖广、易监控的特点, 对深入认知地球空间环境中甚低频波动的传播特性和影响效应具有重要意义. 针对极区特殊的波动环境, 在极区建立高灵敏度、宽频带的甚低频探测系统, 不仅可用于研究各类自然等离子体波动和人工台站信号在极区的时空分布特征, 建立可靠的波动分布模型, 而且可用于系统研究极区波动的磁层与电离层效应. 在子午工程二期甚低频哨声波监测仪项目的支持下, 武汉大学联合中国极地研究中心成功在中国南极长城站 (62.22°S, 58.96°W) 架设了武汉大学甚低频探测设备, 并开始了常规观测. 长城站位于亚极光带, 且毗邻南大西洋地磁异常区, 是监测波动分布和空间天气变化的绝佳位置. 此外, 长城站位于西半球, 极大拓展了我国地面观测网络的地方时覆盖范围, 与国内站点形成昼夜同时观测的能力, 对多方位监测空间天气变化具有重要意义.

## 1 设备和数据

### 1.1 地基甚低频波动探测系统

武汉大学联合中国极地研究中心研发的地基甚低频波动探测系统 (WHU ELF/VLF Wave Detec-

tion System) 具有功耗小、灵敏度高、占地面积小, 架设简单、可无人值守、运行稳定等特点 (Chen et al., 2016; Gu et al., 2022a). 该系统是一套被动无线电信号接收系统, 主要是利用法拉第电磁感应原理, 甚低频信号时变的磁场分量在接收磁天线中转换成电信号, 接收机对这些电信号进行采集从而达到甚低频信号获取的目的. 工作频段为 1~50 kHz, 经由采样率为 250 kHz 的 16 位 AD 采样, 可以连续或间隔工作, 适用于单台设备或者多台设备组网观测. 该探测系统如图 1 所示, 主要由磁环天线、低噪声接收前端、GPS 接收模块、数字接收机和计算机组成. 磁环天线为等腰直角三角形, 分别垂直放置在东西和南北两个方向, 构成一个双通道正交天线系统. 天线产生的信号在前端由电流电压转换器转换为电压信号, 并由低噪声放大器放大到合适范围. 经过放大的单端电压信号由音频信号驱动芯片转换为差分信号, 然后传输至室内的数字接收机进行采集. 数字接收机采用基于 USB 总线和 FPGA 的架构, 主要包括 AD 控制模块、FIFO 模块、USB 接口模块、GPS 同步和校频模块. 系统所需的 UTC 时间、经纬度和高精度秒脉冲由标准 GPS 接收模块提供. 接收机的动态范围为~110 dB, 时间精度可达~100 ns, 能够以较高时间和频率分辨率同时接收人工甚低频台站信号和自然甚低频信号.

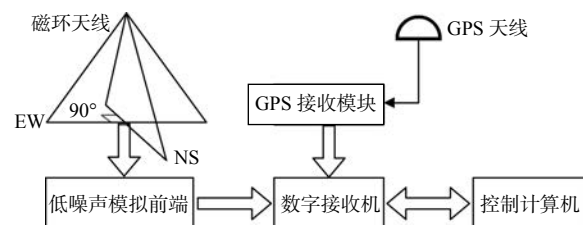


图 1 WHU ELF/VLF 波动探测系统设备组成框图

Fig. 1 Block diagram of the WHU ELF/VLF wave detection system

### 1.2 南极长城站哨声波监测仪设备

在子午工程二期项目的支持下, 武汉大学和中国极地研究中心合作在南极长城站 (GWS, 62.22°S, 58.96°W) 布设了一套上述的地基甚低频波探测系统. 该系统位于亚极光区域, CGM 坐标为 (-48.40° MLat, 11.85° MLon) (Gu et al., 2022a; He et al., 2016), 对应的磁层 L-shell 值约为 2.32. 长城站的电磁环境优越, 可以探测到更多的弱信号, 系统的接收天线尺寸增大以提高灵敏度. 所使用的磁环天线匝数为 5, 等腰直角三角形结构高 6 m, 底 12 m, 等效接收面积为 36 m<sup>2</sup>, 归一化灵敏度

为 $\sim 112 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 对于频率为 10 kHz 的 VLF 信号, 其最小可以探测的信号强度可以达到 $\sim 1.12 \text{ fT}$ . 图 2 给出了南极长城站哨声波监测仪设备安装图, 主要有磁环天线、GPS 天线和设备机房, 设备布局及天线结构详见 Gu 等 (2022a). 室外磁环天线部分采用非金属支撑杆与两个地锚固定, 形成等腰直角三角形结构. 支撑杆靠近底部装配防水、防尘密封的低噪声模拟前端, 通过多芯线缆与室内设备连接. 数字接收机和控制计算机放置在天线附近的设备机房内, GPS 天线安装于机房屋顶. 该设备于 2022 年第一季度完成安装调试, 自 2022 年 3 月起开始甚低频波动的常规观测, 是由我国研制并安装在南极洲用于 ELF/VLF 波动观测的第一个数字化的 VLF 探测设备.



图 2 南极长城站哨声波监测仪设备安装图

Fig. 2 A photograph of the whistler wave monitoring instrument at GWS in Antarctica

### 1.3 南极长城站甚低频观测数据

甚低频探测系统的双通道原始采样数据经过数字滤波, 然后被分成多个离散的时间序列进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 得到宽频信号频谱. 本文中, 对每段数据进行 2048 个数据点的 FFT 变换, 使得频谱的频率分辨率约为 122 Hz, 时间分辨率约为 8.192 ms. 图 3 展示了 2022 年 3 月 30 日 18:00 UT 之后第一个 10 s 内在 GWS 观测到的 ELF/VLF 宽带频谱. 图 3a NS 和图 3b EW 通道信号的总体趋势相近, 但是由于探测系统天线具有很强的方向性, 这些信号的强度在两个方向上表现出一定的差异. 在 1~50 kHz 频率范围内, 有大量 ELF/VLF 辐射的特征信号. 其中, 竖线是由附近的闪电放电引起的甚低频信号, 覆盖几 kHz 至几十 kHz 的频率范围, 这是地球上自然界中最大的甚低频辐射源. 而在 10~30 kHz 之间的水平线状信号则源自分布在世界各地用于全球海洋导航和通信的人工 VLF 发射台站. 此外, 在 28 kHz 附近存在明显的波动干扰信号, 可能来源于附近常规运转的

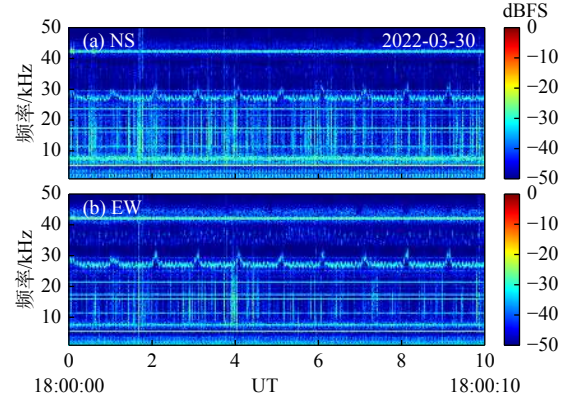


图 3 南极长城站甚低频信号频谱

Fig. 3 Spectrum of VLF signals detected at GWS in Antarctica 设施.

经过仔细核对, 大部分频率/位置已知且在南极长城站能观测到的 VLF 台站信号已被确定, 具体信息如表 1 所示. 位于 GWS 的 WHU ELF/VLF 波动探测系统可以很好地接收来自美国大陆的 NAA、NLK 和 NML 信号, 来自夏威夷的 NPM 信号, 来自欧洲的 ICV、FTA、HUW、GQD 和 DHO 信号, 以及来自印度的 VTX 信号 (此处三位字母代表发射台站的名称). 对探测数据在指定频点进行 MSK 解调, 可以获得台站信号的幅度和相位. 图 4 显示了 2022 年 3 月 30 日在 GWS 接收到的 NS 和 EW 方向的 VLF 台站信号. 图 4a-4e 分别展现了 NPM、HWU、NAA、NLK 和 NML 信号每天的幅度变化. 当接收质量好时, 即具有良好的信噪比时, 信号的幅度一般大于 -50 dB, 数据点比较集中. 同一个台站信号, 在 NS 和 EW 接收方向的数据质量存在一定的差异. 一些发射台站关闭后幅度明显降低, 基本处于背景强度水平. 例如, NPM 很可能在 17:00 UT 左右关闭, 如图 4a 所示. 台站信号的幅度在 24 小时内变化剧烈, 呈现出昼夜转换

表 1 南极长城站观测到的 VLF 信号对应的台站信息

Table 1 Transmitter information corresponding to VLF signals observed at the GWS in Antarctica

台站名称	频率/kHz	发射台站的位置	
		纬度/(°)	经度/(°)
VTX	18.2	08.387015 N	077.752762 E
ICV	20.27	40.923127 N	009.731011 E
FTA	20.9	48.544632 N	002.579429 E
NPM	21.4	21.420166 N	158.151140 W
HWU	21.75	46.713129 N	001.245248 E
GQD	22.1	54.731799 N	002.883033 W
DHO	23.4	53.078900 N	007.615000 E
NAA	24.0	44.644936 N	067.281639 W
NLK	24.8	48.203487 N	121.916827 W
NML	25.2	46.365990 N	098.335638 W

的特性, 且受日出和日落的影响较为突出. 相对来说, 白天传播路径上的信号比夜间更为稳定, 波动

也较小. 日出和日落时会出现几个幅度最小值, 但这些最小值出现的准确时间取决于传播路径. 比如, 在图 4a 中 10:00—17:00 UT 期间连续出现的 6 个幅度最小值. 在这个时间段, 沿着 NPM-GWS 传播路径昼夜交替, 电离层反射高度快速变化, 在传播波导中形成一个过渡区域. 当 VLF 波在此区域传播时, 将会发生波模转换, 由于干扰效应导致接收到的信号出现最小幅度点. 对于其它传播路径, 当信号质量较好时, 日出和日落效应同样非常显著, 但是最小幅度点出现的时间和数量不同.

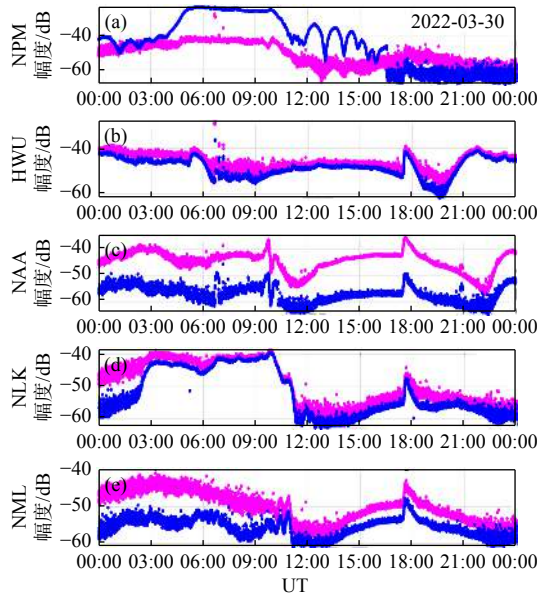


图 4 南极长城站甚低频台站信号, 其中粉色点代表 NS 通道接收到的信号, 蓝色点代表 EW 通道接收到的信号

Fig. 4 VLF transmitter signals at GWS in Antarctica: Pink dots represent signals received by the NS channel and blue dots represent signals received by the EW channel

## 2 空间环境监测

### 2.1 太阳耀斑

太阳耀斑强度由 GOES-16 卫星上的 XRS-B (0.1~0.8 nm) 提供的 X 射线通量表征, 这些数据来自美国国家海洋和大气管理局 (<https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/>). 图 5a 显示, 太阳耀斑开始于 17:20:00 UT 左右, 在 17:42:12 UT 达到峰值, 并在 20:00:00

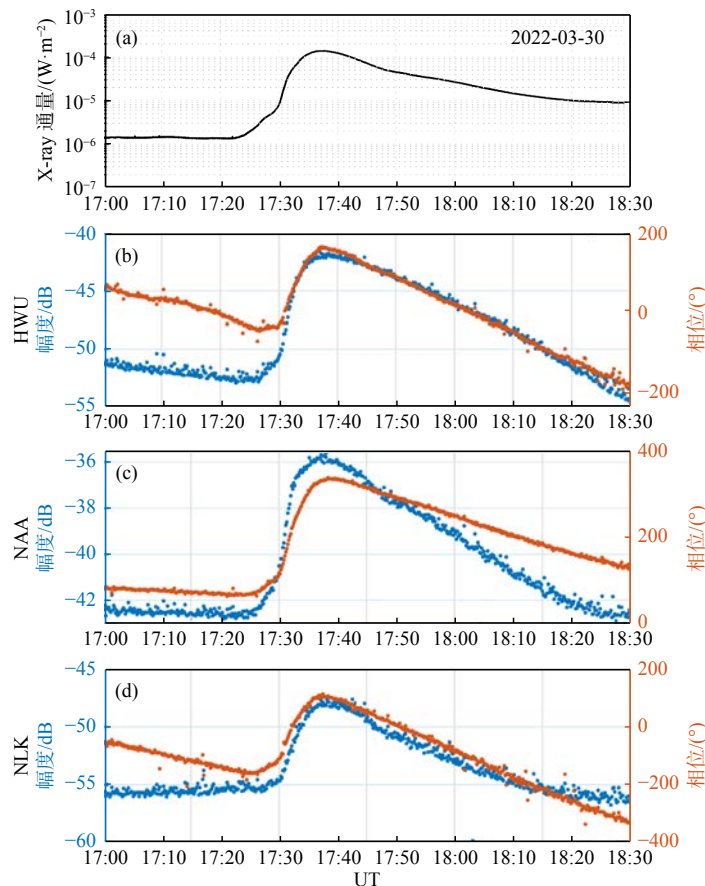


图 5 南极长城站甚低频信号对太阳耀斑的响应

Fig. 5 Responses of VLF signals to solar flares at GWS in Antarctica



UT 左右恢复到耀斑前状态. X 射线通量最大约为  $1.39 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ , 相当于一个 X1.3 级太阳耀斑事件. 图 5b-5e 显示了这次耀斑事件中 HWU、NAA、NLK 和 NML 台站信号的幅度和相位. 台站信号的幅度和相位的变化趋势与 X 射线通量的变化趋势基于一致, 这说明 VLF 信号对太阳耀斑的响应很敏感. 在此次耀斑期间, 四个信号的幅度变化都大于 5 dB, 最大变化接近 10 dB, 相位变化分别为  $207^\circ$ 、 $258^\circ$ 、 $256^\circ$  和  $331^\circ$ . 值得注意的是, 这些幅度和相位变化与之前报道的太阳耀斑事件中的 VLF 测量结果基本一致 (如, Belcher et al., 2021; George et al., 2019; Macotela et al., 2017), 差异主要与信号的频率和传播路径有关. 在深入了解 VLF 波动的传播特性的基础上, GWS 观测数据有望用于详细分析 VLF 台站信号与太阳耀斑强度之间的关系, 进而建立起对太阳耀斑进行地面监测的定量模型.

### 2.2 磁 暴

磁暴是由太阳风和地球磁场之间的相互作用引起的地球磁层的扰动, 一般用地磁指数如 Dst 和

AE 来描述. 由于南大西洋异常区 (SAA) 的局部地磁场非常弱, 地球表面附近的辐射通量相对较高, 南大西洋异常区成为磁层中高能粒子最青睐的进入点. 在磁暴期间, SAA 地区的粒子会沉降至大气中, 从而影响低电离层的电子密度分布, 这反映在地面设备记录的 VLF 台站信号的变化上 (Inan et al., 2007; Peter et al., 2006; Spasojevic and Inan, 2005). HWU-GWS 的传播路径穿过 SAA 区域, 因此 GWS 站点是监测磁暴的绝佳位置. 图 6a 显示 2022 年 4 月 14 日发生了一场中等强度的地磁暴, Dst 指数逐渐下降到约 -90, 之后恢复至正常水平. 与之相比, 2022 年 4 月 13 日的 Dst 约为 -20, 说明地磁情况平静. 特别是在 20:15—22:45 UT 期间 (两条垂直虚线之间), 这两天的 X 射线通量均处于低水平, 没有明显的太阳耀斑事件. 图 6b、6d 分别显示了这两天对应的 HWU 信号幅度, 其中, 图 6e 显示了这两天的差异, 即图 6b 的幅度减去图 6d 的幅度. 很明显, 在没有太阳耀斑爆发的中等地磁暴条件下, HWU 信号的幅度显著增加, 相对于地磁平静期幅度最大变化达到 10 dB 左右. 发射台站信号

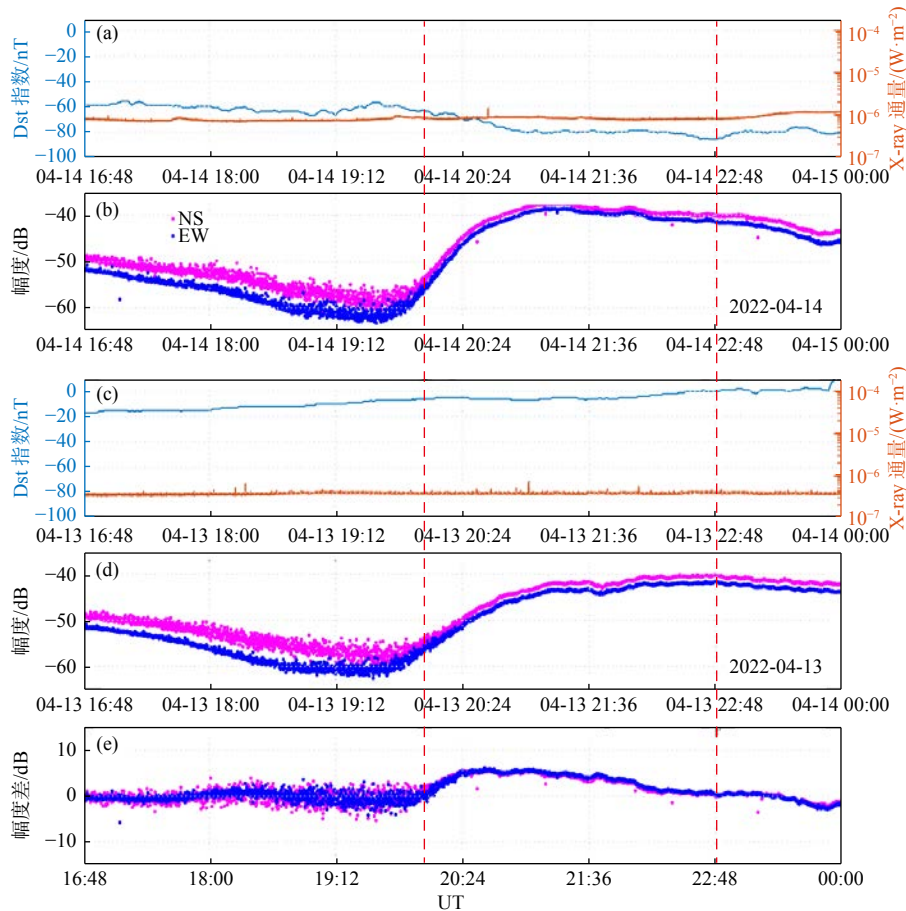


图 6 南极长城站甚低频信号对磁暴的响应

Fig. 6 Responses of VLF signals to a geomagnetic storm at GWS in Antarctica

的时间演变与磁暴的发展密切相关. 这些数据清楚地表明, 磁暴会导致高能粒子沉降至大气中, 导致 SAA 低电离层状态发生变化, 进而影响人工台站 VLF 信号的传播. 因此, 在 GWS 接收 VLF 信号对监测地磁暴和 SAA 区域的变化具有重要意义.

### 2.3 哨声波

闪电是云与云之间、云与地之间或者云体内各部位之间的强烈放电现象, 由多次放电脉冲组成. 全球闪电频发, 其产生的宽频带电磁脉冲, 能够激发出电磁哨声波, 并主要在地球两个半球之间沿着磁力线传播. 哨声波在传播过程中高低频成分之间存在相速度差, 通常情况下高频部分相速度快提前到达, 低频部分相速度较慢后续到达, 形成呈现

频率随时间下降的“L”形态的色散状频谱图 (Gokani, et al., 2015; 徐继生等, 1989). 图 7a-7b 和图 7c-7d 分别展示了南极长城站在 2022 年 8 月 18 日 08:14 UT 和 08:40 UT 观测到的哨声波事例. 从频谱图上可以看到, NS 和 EW 方向均能观测到闪电激发的哨声波, 其具有清晰的色散结构, 然而强度在两个方向上存在差异. 哨声波的持续时间约为 0.6 s, 对应的截止频率约为 2 kHz. 在图 7a-7b 可以看到, 此事例是由多次闪电脉冲激发的哨声波叠加构成, 这与闪电的多次脉冲放电息息相关. 南极长城站位于闪电频发的区域, 便于对哨声波的进行地面常规观测, 有助于了解其传播特征及过程, 揭开近地空间各圈层电磁耦合机理.

除上述应用之外, GWS 的 VLF 设备还可用于

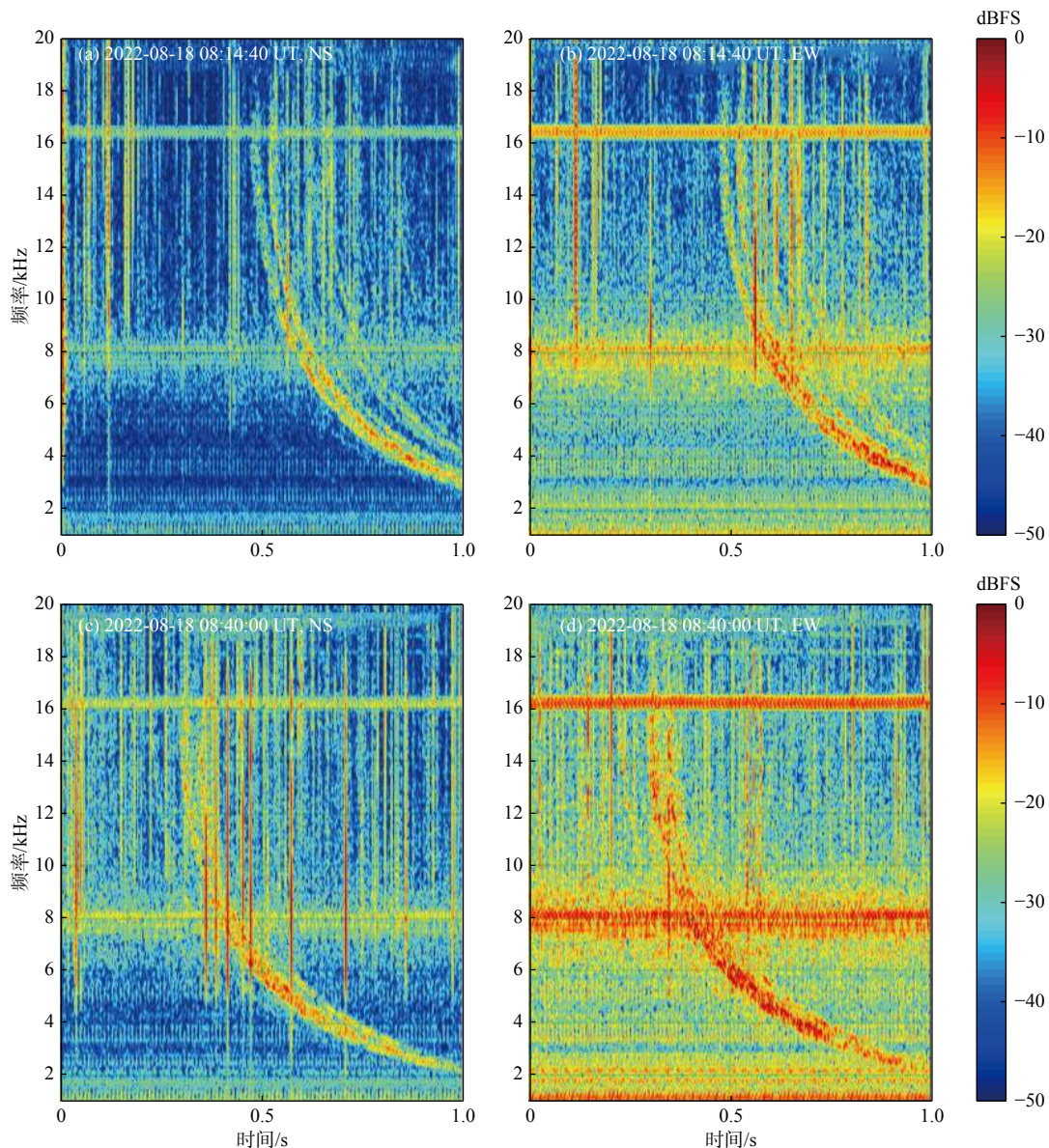


图 7 南极长城站闪电激发的哨声波

Fig. 7 Lightning-induced whistler waves at GWS in Antarctica

监测闪电活动, 例如, 南极周围闪电放电的空间分布和发生率、闪电产生的吱声以及闪电引起的电子沉降 (Inan et al., 2010; Maurya et al., 2012a, 2012b; Salut et al., 2012; Voss et al., 1984). VLF 信号还可与波传播模型一起用于研究低电离层的电子密度变化. 此外, 还可以用于校准导航和通信信号, 提高导航精度和通信质量. 本文所述的 VLF 波探测系统是满足上述科学及应用需求的装置之一.

### 3 结 论

本文详细介绍了架设于南极长城站的子午二期哨声波监测设备, 该系统获得子午工程二期项目的支持, 2022 年初成功部署于南极长城站, 并完成设备的调试和数据传输. 该系统已稳定运行一年时间, 积累了大量关于地球空间环境中甚低频波动的可靠观测数据. WHU VLF 接收机的动态范围为~110 dB, 时间精度为~100 ns, 是迄今为止在南极运行最为可靠且探测灵敏度最高的等离子体波动探测系统之一. 我们报道了耀斑爆发期间, 北美和欧洲甚低频台站信号的典型观测结果, 这些结果与传统观测数据高度一致, 充分验证了探测设备的优越性能. 由于 HWU-GWS 路径穿过 SAA 区域, 这些观测结果也意味着 VLF 波扰动和磁暴期间磁层电子沉降在时空关系上具有很强的关联性. 此设备能够捕捉到清晰的闪电激发的哨声波事件, 无论从功能上还是质量上均满足哨声波监测仪项目的要求. 随着更多数据的积累, 基于南极长城站 VLF 观测的研究将逐步开展, 有望深入认知近地空间环境中甚低频波动的传播特性和影响效应, 对监测空间天气变化具有重要意义.

### 致谢

感谢子午工程二期和中国国家南极科考队对 VLF 波动探测项目的支持, 以及武汉大学电子信息学院 985 基金项目的前期支持. 南极长城站哨声波监测仪的子午工程编码为 OCHCH\_WHWM01, 数据将上传于子午工程数据中心和中国极地科学数据中心.

### References

- Barr R, Jones D L, Rodger C. 2000. ELF and VLF radio waves[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62: 1689-1718. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00121-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00121-8).
- Bellcher S R G, Clilverd M A, Rodger C J, et al. 2021. Solar flare X-ray impacts on long subionospheric VLF paths[J]. *Space Weather*, 19: e2021SW002820. DOI: [10.1029/2021SW002820](https://doi.org/10.1029/2021SW002820).
- Bullough K, Tatnall A R L, Denby M. 1976. Man-made ELF/VLF emissions and the radiation belts[J]. *Nature*, 260: 401-403.
- Chen Y P, Yang G B, Ni B B, et al. 2016. Development of ground-based ELF/VLF receiver system in Wuhan and its first results[J]. *Advances in Space Research*, 57: 1871-1880.
- Chen Y P, Ni B B, Gu X D, et al. 2017. First observations of low latitude whistlers using WHU ELF/VLF receiver system[J]. *Science China Technological Sciences*, 60(1): 166-174.
- Chevalier M W, Peter W B, Inan U S, et al. 2007. Remote sensing of ionospheric disturbances associated with energetic particle precipitation using the South Pole VLF beacon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112: A11306. DOI: [10.1029/2007JA012425](https://doi.org/10.1029/2007JA012425).
- Clilverd M A, Rodger C J, Thomson N R, et al. 2009. Remote sensing space weather events: The AARDDVARK network[J]. *Space Weather*, 7: S04001. DOI: [10.1029/2008SW000412](https://doi.org/10.1029/2008SW000412).
- Cohen M B, Inan U S, Paschal E P. 2010. Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with the AWESOME instrument[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(1): 3-17. DOI: [10.1109/TGRS.2009.2028334](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2028334).
- Cohen M B, Gross N C, Higginson-Rollins M A, et al. 2018. The lower ionospheric VLF/LF response to the 2017 great American solar eclipse observed across the continent[J]. *Geophysical Research Letters*, 45: 3348-3355.
- Fishman G, Inan U. 1988. Observation of an ionospheric disturbance caused by a gamma-ray burst[J]. *Nature*, 331: 418-420. DOI: [10.1038/331418a0](https://doi.org/10.1038/331418a0).
- George H E, Rodger C J, Clilverd M A, et al. 2019. Developing a now-casting capability for X-class solar flares using VLF radiowave propagation changes[J]. *Space Weather*, 17(12): 1783-1799. DOI: [10.1029/2019SW002297](https://doi.org/10.1029/2019SW002297).
- Gokani S A, Singh R, Cohen M B, et al. 2015. Very low latitude ( $L=1.08$ ) whistlers and correlation with lightning activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120: 6694-6706. DOI: [10.1002/2015JA021058](https://doi.org/10.1002/2015JA021058).
- Gołkowski M, Renick C, Cohen M B. 2021. Quantification of ionospheric perturbations from lightning using overlapping paths of VLF signal propagation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126: e2020JA028540.
- Gu X D, Li G J, Pang H, et al. 2021. Statistical analysis of very low frequency atmospheric noise caused by the global lightning using ground-based observations in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126: e2020JA029101. DOI: [10.1029/2020JA029101](https://doi.org/10.1029/2020JA029101).
- Gu X D, Luo F, Peng R, et al. 2021. Response characteristics of very low frequency signals from JJI transmitter to solar flare events[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(5): 1508-1517 (in Chinese). DOI: [10.6038/cjg202100422](https://doi.org/10.6038/cjg202100422).
- Gu X D, Wang Q, Ni B, et al. 2022a. First results of the wave measurements by the WHU VLF wave detection system at the Chinese Great Wall Station in Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127: e2022JA030784. DOI: [10.1029/2022JA030784](https://doi.org/10.1029/2022JA030784).
- Gu X D, Chen H, Wang S, et al. 2022b. Extraction of Alpha transmitter signals from single-station observations using the direction-finding method[J]. *Science China Technological Sciences*, 65: 1727-1737. DOI: [10.1007/s11431-021-2057-2](https://doi.org/10.1007/s11431-021-2057-2).

- Gu X D, Peng R, Wang S W, et al. 2022c. Responses of the very low frequency transmitter signals during the solar eclipse on Dec 26, 2019 over a North-South propagation path[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 2000207. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3056092.
- Gu X D, Yi J, Wang S, et al. 2023. Comparison of VLF signal responses to solar flares along daytime and nighttime propagation paths[J]. *Remote Sensing*, 15(4): 1018. DOI: 10.3390/rs15041018.
- He F, Hu H, Yang H, et al. 2016. Recent progress in Chinese polar upper-atmospheric physics research: Review of research advances supported by the Chinese Arctic and Antarctic expeditions[J]. *Advances in Polar Science*, 27(4): 219-232. DOI: 10.13679/j.advps.2016.4.00219.
- Helliwell R A. 1965. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena[M]. Stanford University Press.
- Inan U S, Golkowski M, Casey M K, et al. 2007. Subionospheric VLF observations of transmitter-induced precipitation of inner radiation belt electrons[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(2): 2106.
- Inan U S, Cummer S A, Marshall R A. 2010. A survey of elf and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges[J]. *Journal of Geophysical Research*, 115: A00E36.
- Klein M E. 2009. Autonomous ultra-low power ELF/VLF receiver system[D]. Stanford University.
- Lessard M R, Weatherwax A T, Spasojevic M, et al. 2009. PENGUIN multi-instrument observations of dayside high-latitude injections during the 23 March 2007 substorm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114: A00C11. DOI: 10.1029/2008JA013507.
- Macotela E L, Raulin J-P, Manninen J, et al. 2017. Lower ionosphere sensitivity to solar X-ray flares over a complete solar cycle evaluated from VLF signal measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122: 12370-12377. DOI: 10.1002/2017JA024493.
- Maurya A K, Veenadhari B, Singh R, et al. 2012a. Nighttime D region electron density measurements from ELF-VLF tweek radio atmospherics recorded at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117: A11308. DOI: 10.1029/2012JA017876.
- Maurya A K, Veenadhari B, Singh R, et al. 2012b. Morphological features of tweeks and nighttime D region ionosphere at tweek reflection height from the observations in the low-latitude Indian sector[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117(A5): A05301. DOI: 10.1029/2011JA016976.
- Ni B, Hua M, Gu X, et al. 2022. Artificial modification of Earth's radiation belts by ground-based very-low-frequency (VLF) transmitters[J]. *Science China Earth Sciences*, 65(3): 5-27. DOI: 10.1007/s11430-021-9850-7.
- Peter W B, Chevalier M W, Inan U S. 2006. Perturbations of mid-latitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111: A03301. DOI: 10.1029/2005JA011346.
- Raulin J-P, David P C M, Hadano R, et al. 2009. The South America VLF NETWORK (SAVNET)[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 104(1-4): 247-261. DOI: 10.1007/s11038-008-9269-4.
- Richardson D K, Cohen M B. 2021. Seasonal variation of the D-region ionosphere: Very low frequency (VLF) and machine learning models[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126: e2021JA029689.
- Salut M M, Abdullah M, Graf K L, et al. 2012. Long recovery VLF perturbations associated with lightning discharges[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117: A08311.
- Shafer D C, Brown A D, Trabucco W J, et al. 1994. A programmable and low-power ELF/VLF receiver for automatic geophysical observatories[J]. *Antarctic Journal of the United States*, 29: 361-362.
- Spasojevic M, Inan U S. 2005. Ground based VLF observations near  $L = 2.5$  during the Halloween 2003 storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 32: L21103. DOI: 10.1029/2005GL024377.
- Tian M, Xu J S, Ma S Y. 1991. KDX-87 Receiving and analysing system for VLF wide-band direction finding[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 34(1): 11-19 (in Chinese).
- Voss H D, Imhof W L, Walt M, et al. 1984. Lightning-induced electron precipitation[J]. *Nature*, 312: 740-742. DOI: 10.1038/312740a0.
- Wang S W, Gu X D, Luo F, et al. 2020. Observations and analyses of the sunrise effect for NWC VLF transmitter signals[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(12): 4300-4311 (in Chinese). DOI: 10.6038/cjg202000358.
- Wang S W, Ni B B, Gu X D, et al. 2022. Sunrise effect of very-low-frequency JJI transmitter signal propagating over an east-west path[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(1): 145-156 (in Chinese). DOI: 10.6038/cjg2021P0052.
- Xu J S, Tian M, Ma S Y, et al. 1989. Multi-stationed wideband direction finding measurements for whistlers at geomagnetic latitudes below  $20^\circ$  in China and some early results[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 32(2): 125-134 (in Chinese).
- Yi J, Gu X D, Li Z P, et al. 2019. Modeling and analysis of NWC signal propagation amplitude based on LWPC and IRI models[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(9): 3223-3234 (in Chinese). DOI: 10.6038/cjg2019N0190.
- Yi J, Gu X, Cheng W, et al. 2020. A detailed investigation of low latitude tweek atmospherics observed by the WHU ELF/VLF receiver: 2. Occurrence features and associated ionospheric parameters[J]. *Earth and Planetary Physics*, 4: 238-245. DOI: 10.26464/epp2020023.
- Zhou R X, Gu X D, Yang K X, et al. 2020. A detailed investigation of low latitude tweek atmospherics observed by the WHU ELF/VLF receiver: I. Automatic detection and analysis method[J]. *Earth and Planetary Physics*, 4(2): 120-130. DOI: 10.26464/epp2020018.

## 附中文参考文献

- 顾旭东, 罗凡, 彭锐, 等. 2021. JJI 甚低频台站信号对太阳耀斑事件的响应特性[J]. *地球物理学报*, 64(5): 1508-1517.
- 田茂, 徐继生, 马淑英. 1991. KDX-87 型甚低频宽带定向接收与微机分析系统[J]. *地球物理学报*, 34(1): 11-19.
- 王市委, 顾旭东, 罗凡, 等. 2020. 基于 NWC 甚低频信号的日出效应的观测与分析[J]. *地球物理学报*, 63(12): 4300-4311. DOI: 10.6038/cjg202000358.
- 王市委, 倪彬彬, 顾旭东, 等. 2022. 东西传播路径上 JJI 台站甚低频信号的日出效应研究[J]. *地球物理学报*, 65(1): 145-156. DOI: 10.6038/cjg2021P0052.
- 徐继生, 田茂, 马淑英, 等. 1989. 磁纬  $20^\circ$  以下地区哨声多台宽带定向观测及其初步结果[J]. *地球物理学报*, 32(2): 125-134.
- 易娟, 顾旭东, 李志鹏, 等. 2019. 基于 LWPC 和 IRI 模型的 NWC 台站信号传播幅度建模分析[J]. *地球物理学报*, 62(9): 3223-3234. DOI: 10.6038/cjg2019N0190.

王喜珍, 范晓勇, 张策, 滕云田, 马新欣, 陈志青. 2024. 子午工程二期自动磁通门经纬仪. 地球与行星物理论评（中英文）, 55(1): 24-30. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-014.

Wang X Z, Fan X Y, Zhang C, Teng Y T, Ma X X, Chen Z Q. 2024. Automatic fluxgate theodolite in the Phase II of Chinese Meridian Project. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 24-30 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-014.

## 子午工程二期自动磁通门经纬仪

王喜珍<sup>1\*</sup>, 范晓勇<sup>1</sup>, 张策<sup>2</sup>, 滕云田<sup>1</sup>, 马新欣<sup>1</sup>, 陈志青<sup>3</sup>

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100023

3 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

### 关键点:

- 自动磁通门经纬仪是我国自主研发的自动化、高精度地磁场绝对观测设备, 实现了磁偏角和磁倾角的自动化测量, 克服了人工观测不足, 提高了观测效率, 扩大了应用范围.
- 与国外同类型观测设备相比, 自动磁通门经纬仪性能指标达到甚至优于同等类型监测设备水平.
- 子午工程首次采用自动磁通门经纬仪开展地磁场绝对测量, 必将推动和改变传统的地磁场绝对观测模式, 提高观测技术水平.

**摘要:** 地磁台站观测有相对记录和绝对观测 2 种, 相对记录数据需经基线值改正后方可得到地磁场要素的实际值. 磁通门经纬仪是获取基线值的基本设备之一, 在地磁观测中发挥着重要作用. 目前台站采用的磁通门经纬仪需人工操作, 人为因素会对观测数据质量产生影响, 因在偏远地区和环境恶劣地区无法实现地磁绝对观测, 造成地磁绝对观测的空间覆盖空白. 子午工程二期将在我国大陆地区首次开展自动化磁偏角和磁倾角地磁绝对观测, 必将推动地磁绝对观测技术创新与发展. 自动磁通门经纬仪是我国自主研发的磁偏角和磁倾角自动化观测设备, 采用无磁材料和压电电机, 通过优化设计与改进加工工艺, 以及引入多参量误差补偿算法, 有效克服和消除了系统误差, 提高了测量精度. 该设备在河北涉县台、吉林合隆台、陕西乾陵台和北京白家疃台等台站开展了长时间的实地观测, 并与台站的人工磁通门经纬仪观测结果进行了对比. 结果表明, 自动磁通门经纬仪的主要性能指标达到了人工磁通门经纬仪水平. 该设备也通过了中国地震局前兆设备入网测试, 功能和性能指标符合地磁台站地磁绝对观测要求.

**关键词:** 子午工程; 地磁监测; 自动磁通门经纬仪; 测量误差

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-014

中图分类号: P315

文献标识码: A

## Automatic fluxgate theodolite in the Phase II of Chinese Meridian Project

Wang Xizhen<sup>1\*</sup>, Fan Xiaoyong<sup>1</sup>, Zhang Ce<sup>2</sup>, Teng Yuntian<sup>1</sup>, Ma Xinxin<sup>1</sup>, Chen Zhiqing<sup>3</sup>

1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2 National Institute of Natural Hazards, Beijing 100023, China

3 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** Absolute observation and relative record are two methods in geomagnetic station observation. The actual values of geomagnetic field elements can be obtained after the relative record data is corrected by baseline data. Fluxgate theodolite is one of the basic tools required to obtain baseline values and plays an important role in geomagnetic observations. At present, fluxgate theodolite used in stations requires manual operation, and human factors affect the observation data quality. Because absolute geomagnetic observation cannot be realized in remote

收稿日期: 2023-03-01; 录用日期: 2023-04-25

基金项目: 国家重大科技基础设施项目（子午工程二期）

Supported by the National Major Science and Technology Infrastructure Projects Grand (Phase II of the Meridian Project)

\*通信作者: 王喜珍 (1972-), 男, 副研究员, 主要从事地球物理观测技术研究. E-mail: wangxz@cea-igp.ac.cn



areas or areas with harsh environments, some blank areas in the coverage of geomagnetic absolute observation exist. The second phase of the Chinese Meridian Project will carry out automatic geomagnetic absolute observation of magnetic declination and inclination for the first time in China's mainland, which will promote the innovation and development of geomagnetic absolute observation technology. The automatic fluxgate theodolite is a self-developed equipment from China for automatic observation of magnetic declination and inclination. It adopts non-magnetic materials and piezoelectric motors, effectively overcomes and eliminates the systematic errors by optimizing the design, improves the machining process, and compensates for the multi-parameter error algorithm, so as to ensure measurement accuracy. The equipment has been applied to long-term practical observation in stations such as Shexian Station in Hebei Province, Helong Station in Jilin Province, Qianling Station in Shanxi Province and Baijiatuan Station in Beijing. Compared with the observation results of artificial fluxgate theodolite in these stations, the results show that the main performance of the automatic fluxgate theodolite is the same as that of the artificial fluxgate theodolite. The equipment has also passed a precursor equipment standard test from the China Earthquake Administration, and its functions and performance meet the requirements of absolute geomagnetic observation for geomagnetic stations.

**Keywords:** Chinese Meridian Project; geomagnetic monitoring; automatic fluxgate theodolite; measuring error

## 0 引 言

子午工程是目前规模最大、观测手段最全、观测物理参量最多、覆盖范围最广的空间地基观测系统,由空间环境监测系统、数据通信系统和科学应用系统组成(王赤等, 2021)。作为空间环境监测系统的重要组成部分之一,地磁监测网分系统主要由分布在东经 100°、120°和北纬 30°、40°附近的 28 个地磁监测站点组成,配置有质子磁力仪、Overhauser 磁力仪、人工磁通门经纬仪、自动磁通门经纬仪、磁通门磁力仪、感应式磁力仪、大气电场仪、地电场仪以及低频磁场波动接收机等监测设备,实现对地磁基本场、感应场、地电场、大气电场、ULF/ELF/VLF 波等空间环境物理对象的监测,为开展地磁场时空变化特征和区域特征、磁层波动的产生和传播、地球辐射带演化及磁层-电离层耦合研究,获取磁暴等空间天气事件的形成机理、变化规律和特征,探索地震圈层耦合关系,为空间天气预报、地震研究提供理论和应用基础。

磁通门经纬仪是经典的地磁磁倾角和磁偏角的测量设备,大多数地磁绝对观测台站均配置该设备。通过测量磁倾角  $I$  和磁偏角  $D$ ,结合台站地磁总场观测值  $F$ ,计算得到地磁各要素基线值,进而校正地磁相对记录数据,获取地磁基本场及其长期变化实际值。目前国内地磁台站配置的磁通门经纬仪均采用人工观测模式,需由观测人员手动操作,每周观测 2 次,通常在每周二和周四地磁相对平静

时段观测(中国地震局监测预报司, 2002)。由于人工观测方式对操作人员的能力和和经验要求较高,观测数据质量受人为因素影响较大,且在偏远和环境恶劣地区难以开展观测等缺点,迫切需要开发自动化磁偏角  $D$  和磁倾角  $I$  观测设备,实现地磁绝对观测的自动化。

在国际气象学和大气物理学会(International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA)的推动下,一些国家和地区开展了自动化磁偏角和磁倾角监测设备的研发,目前已有德国、比利时、中国等研制成功样机,并有较好的实际观测应用。

1996 年,比利时皇家气象学院首次提出自动化磁偏角和磁倾角监测设备的研制思路(Gilbert and Rasson, 1998),于 2004 年开始投入研发,2006 年完成第一代原理样机 AUTODIF MKI(Rasson et al., 2009; Sebastien and Rasson, 2007; Van Loo and Rasson, 2007),2010 年开发完成了第二代样机 AUTODIF MKII。2010 年 IAGA 学术年会上,该研发团队在长春地磁台进行了演示观测(Rasson and Gonsette, 2011)。为了满足在高纬度区地磁观测需要,该团队于 2013 年完成了 Gyro DIF 研发。Gyro DIF 很好地解决了低温环境下工作、极区标志物建设难度大以及通讯困难等问题(Gonsette and Rasson, 2013; Gonsette et al., 2014),并于 2016 年 12 月安装在南极 Livingston 岛开展长期观测(Marsal et al., 2017)。至 2017 年,比利时皇家气象学院自动磁通门经纬仪研发团队已成功开发了

六类适用不同观测环境和要求的 AUTODIF 观测设备 (Poncelet et al., 2017)。

2003 年, 德国布伦瑞克工业大学 Auster 团队首次开发成功 GAUSS (geomagnetic automated system) 地磁绝对观测系统. 该系统基于高斯理论, 通过欧拉变换, 先得到地磁场  $X$  和  $Y$  分量观测值, 结合台站地磁场总强度  $F$ , 推导出  $H$ 、 $D$ 、 $I$ 、 $Z$  等磁场分量 (Auster et al., 2007)。

我国自动磁通门经纬仪研发始于 2012 年, 并于 2017 年研制成功第一代原理样机 (范晓勇等, 2018)。经过不断的改进, 于 2019 年基本定型, 并在地磁台站开展长时间的验证性观测。

纵观各国开发的自动磁通门经纬仪, 尽管其功能和性能达到了人工磁通门经纬仪的水平, 但还没有在地磁台站绝对观测中得到广泛应用. 表 1 给出了各国自动磁通门经纬仪的核心指标。

表 1 国内外自动磁通门经纬仪指标对比

Table 1 Comparison of automatic fluxgate theodolite from different countries

	AutoDIF (比利时)	GyroDIF (比利时)	GAUSS (德国)	AutoDIF (中国)
$D$ 测量精度	6"	-	4"	6"
$I$ 测量精度	6"	-	4"	6"
定向方式	激光对标	光纤陀螺	激光对标	激光对标
驱动方式	压电电机	压电电机	压电电机	压电电机
测量周期	30 min	-	30 min	20 min
每天最大测量组数	48组	12组	24组	72组

子午工程二期将在“#”型站点布设的其中 9 个核心站点 (表 2) 布设自动磁通门经纬仪, 拟于 2023 年底完成安装并投入试运行. 届时将与子午工程一期布设的 Mag-01H 型人工磁通门经纬仪共同组成地磁绝对观测网。

表 2 子午工程二期自动磁通门经纬仪配置站点

Table 2 Installation sites of automatic fluxgate theodolites in the Phase II of Chinese Meridian Project

台站名称	经度/ $^{\circ}$ E	纬度/ $^{\circ}$ N	高程/m
喀什站	75.81	39.51	1309.00
且末站	85.45	38.12	1246.13
噶尔站	80.11	32.52	4403.00
巴塘站	99.11	30.01	2600.00
拉萨城关站	91.00	29.60	3633.00
嘉峪关站	98.22	39.81	1720.00
应城站	113.33	30.92	54.10
满洲里南区站	117.44	49.58	681.78
贺兰站	106.07	38.80	1465.00

# 1 自动磁通门经纬仪

自动磁通门经纬仪主要由磁偏角和倾角测量系统、方位角定向装置和控制器组成 (图 1)。

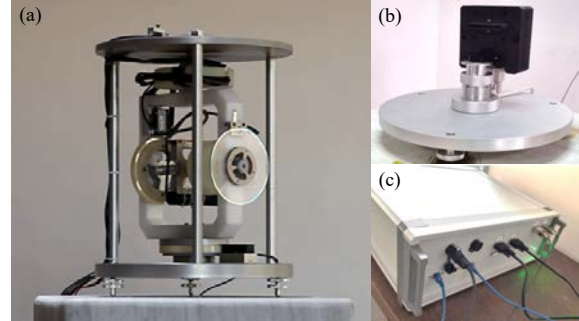


图 1 自动磁通门经纬仪组成. (a) 磁偏角和倾角测量系统; (b) 方位角定向装置; (c) 控制器

Fig. 1 Composition of an automatic fluxgate theodolite. (a) Magnetic declination and inclination measurement system; (b) Azimuth orientation device; (c) Recorder

自动磁通门经纬仪与人工观测磁通门经纬仪的观测原理相同, 不同之处在于观测过程由自动化测量取代人工操作. 自动磁通门经纬仪研制的关键技术主要有两个方面, 一是自动化转动机构设计和高精度转动过程的无磁化, 二是高精度的方位角定向。

## 1.1 磁偏角和倾角测量系统

磁偏角和倾角测量系统是自动磁通门经纬仪的核心部件, 主要由无磁驱动电机、旋转装置、单轴磁通门磁力仪、激光器和光栅码盘等组成 (图 2)。驱动电机采用高精度的无磁压电电机, 在垂直竖轴和水平横轴上均安装 1 个无磁压电电机, 在电机的驱动下, 旋转装置可以绕垂直竖轴或水平横轴来回

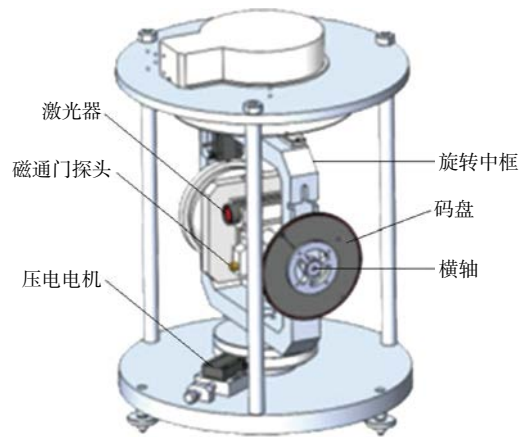


图 2 磁偏角和倾角测量系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic declination and inclination measurement system

转动. 在水平横轴上安装有激光器和单轴磁通门磁力仪, 激光器和单轴磁通门磁力仪的安装轴向平行, 并与水平横轴在水平方向上垂直. 垂直竖轴或水平横轴末端均安装有光栅码盘, 通过接收激光器发射光在方位角定向装置光电探测器的反射光, 实现旋转轴旋转角度测量. 在地理水平面和磁子午面内, 通过单轴磁通门磁力仪的磁场读数, 确定与其正交的地磁矢量方向, 实现对磁偏角  $D$  和磁倾角  $I$  的测量.

磁偏角和倾角测量系统涉及多个转动机构、正交系统、平行系统等, 对各零部件的加工工艺、装配工艺提出很高的要求, 也是引入测量误差的重要因素. 为了减小甚至消除这些测量误差, 在研制过程中采取了相应的措施. 针对水平横轴与磁轴的不正交误差、磁通门传感器零点偏移误差、电机停止误差和竖轴倾斜误差等, 开发了磁偏角和磁倾角的多参量误差补偿算法 (张策等, 2020), 通过该算法可对  $\pm 10'$  以内的电机停止误差和竖轴倾斜误差进行补偿. 实验室测试结果表明, 采用补偿算法可将测量误差减小到  $3''$  以内. 此外, 驱动电机、激光器以及其它弱磁性材料的应用等均会对磁通门传感器造成的干扰, 主要通过材料的选取和优化设计加以克服和解决. 轴承间隙和环境温度也会导致测量误差, 主要通过机械结构设计、元器件选用等予以克服. 加工误差和装配误差等可通过“近零法”测量予以减弱甚至消除.

## 1.2 方位角定向装置

方位角定向装置主要作用是确定方位角, 是确定磁偏角和磁倾角的基础. 磁偏角以地理北作为参考基准, 磁倾角以天顶或水平面作为参考基准. 人工磁通门经纬仪方位角主要通过磁通门经纬仪的望远镜观察远处的标志物来确定. 一方面标志物与仪器之间需有较远距离 (一般需 50 m 以上), 另一方面天气及环境因素对视线影响较大, 影响方位角的观测精度. 自动磁通门经纬仪通过激光照射高精度光电探测器来确定方位角 (图 3), 同等定位精度下, 磁偏角和倾角测量系统与标准物的距离可缩短到 3 m 以内, 且定位速度更快.

## 2 测试与运行

为了进一步验证自动磁通门经纬仪的性能, 自 2019 年起分别在河北涉县台、吉林合隆台、陕西乾陵台和北京白家疃台等台站进行了长时间观测

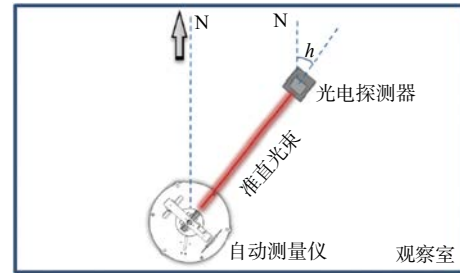


图 3 方位角定向装置原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of azimuth orientation device



图 4 测试运行台站. (a) 河北涉县台; (b) 吉林合隆台; (c) 陕西乾陵台; (d) 北京白家疃台

Fig. 4 Test operation stations. (a) Shexian Station in Hebei Province; (b) Helong Station in Jilin Province; (c) Qianling Station in Shanxi Province; (d) Baijiatuan Station in Beijing

(图 4). 除北京白家疃台外, 其它 3 个台站电磁环境好, 且台站安装有 人工磁通门经纬仪和 Overhauser 磁力仪, 便于对比分析.

2019 年 5 月 1 日至 20 日, 在河北涉县台开展了 20 天对比观测, 台站安装有 MINGO-01A 型人工磁通门经纬仪和 GSM-90F1 型 Overhauser 磁力仪, 该台站电磁场地条件好, 磁场背景噪声均在全国地磁台平均值之下, 是地震局认可的地磁设备比测场地之一. 为了尽可能去除周围环境带来的干扰, 选择夜间磁场相对平静时观测, 每晚 22 时开始自动磁通门经纬仪与台站人工磁通门经纬仪进行同步观测. 将台站人工 MINGO-01A 型磁通门经纬仪观测磁偏角  $D$ 、磁倾角  $I$  值与自动磁通门经纬仪磁偏角  $D$ 、磁倾角  $I$  观测值进行对比, 观测结果见图 5, 两者之间的差值见表 3. 自动磁通门经纬仪观测结果数据采用了误差补差算法.



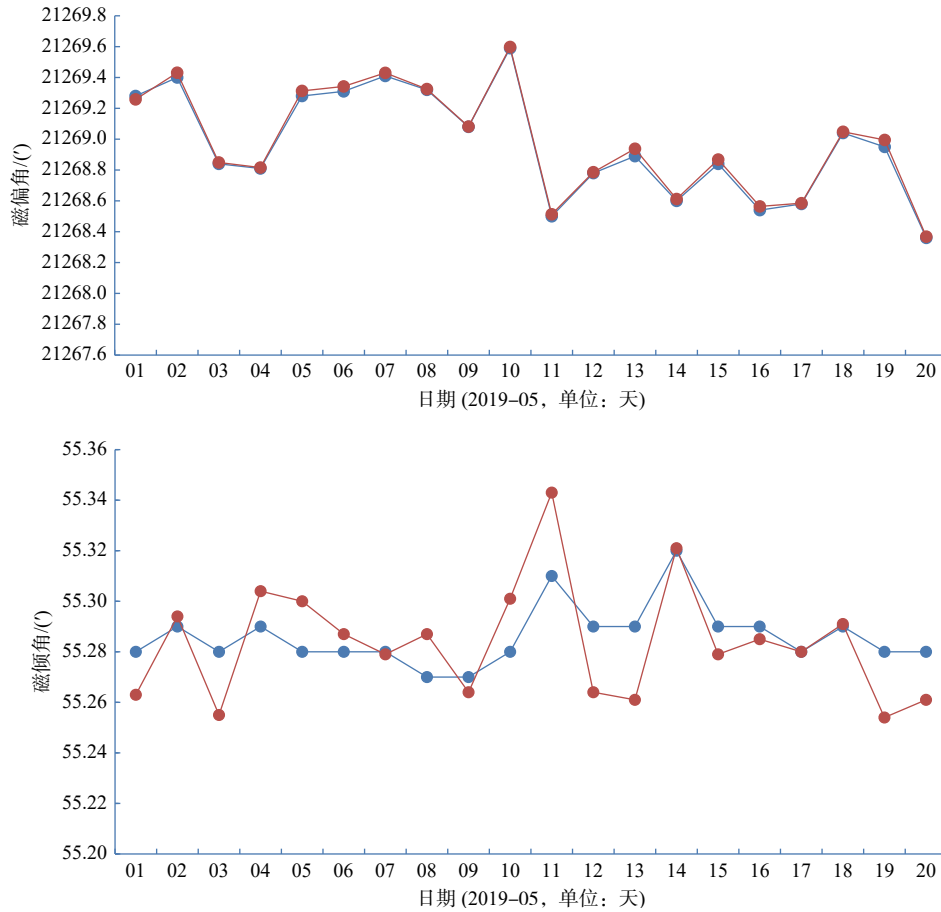


图 5 河北涉县台磁通门经纬仪对比观测结果，蓝色线为台站 MINGO-01A 观测结果，红色线为自动磁通门经纬仪观测结果  
 Fig. 5 Comparative observation results of fluxgate theodolites at Shexian Station, Hebei Province. The blue line is the observation result of MINGO-01A, and the red line is the observation result of the automatic fluxgate theodolite

表 3 台站人工磁通门经纬仪与自动磁通门经纬仪观测值差  
 Table 3 Differences between records of artificial and automatic fluxgate theodolites

日期	2019-05-01	2019-05-02	2019-05-03	2019-05-04	2019-05-05	2019-05-06	2019-05-07	2019-05-08	2019-05-09	2019-05-10
磁偏角/(")	1.32	-1.86	-0.54	-0.36	-1.98	-1.92	-1.20	-0.30	-0.11	-0.48
磁倾角/(")	1.02	-0.24	1.5	-0.84	-1.2	-0.42	0.06	-1.02	0.36	-1.26
日期	2019-05-11	2019-05-12	2019-05-13	2019-05-14	2019-05-15	2019-05-16	2019-05-17	2019-05-18	2019-05-19	2019-05-20
磁偏角/(")	-0.78	-0.36	-2.88	-0.72	-1.68	-1.44	-0.30	-0.48	-2.70	-0.48
磁倾角/(")	-1.78	1.56	1.74	-0.06	0.66	0.3	0	-0.06	1.56	1.14

从图 5、表 3 可以看出，自动磁通门经纬仪与台站人工经纬仪的一致性较好，磁偏角最大差异为 2.88"，磁倾角最大差异为 1.78"。结果表明自动磁通门经纬仪的测量误差均小于地磁台站规定的“误差不大于 6"”的要求（张策，2020），自动磁通门经纬仪的测量结果是可靠的。

2021 年 11 月 8 日至 2022 年 2 月 14 日，在陕西乾陵台进行了为期 3 个月的连续对比观测。陕西乾陵台为中国地震局认定的磁通门经纬仪定型比测基地，具有权威的标准测试设备和测试认证资质。对比观测中，采用的标准设备为 MINGO-010A 型

磁通门经纬仪和 GSM-90F1 型 Overhauser 磁力仪。自动磁通门经纬仪和人工 MINGO-010A 型磁通门经纬仪均放置在绝对观测室观测墩上，观测室内平均温度为 15℃，平均湿度为 45%。Overhauser 磁力仪放置在相对记录室的观测墩上，环境温度为 21℃~23℃ 之间。

自动磁通门经纬仪的观测值为磁偏角  $D$  和磁倾角  $I$ ，需要结合台站 Overhauser 磁力仪记录的磁场总场值  $F$ ，再加上墩差等计算得到基线值，作为自动磁通门经纬仪的综合评价指标。磁通门经纬仪测量磁偏角  $D$  和磁倾角  $I$  以及计算基线值的过程和

方法遵循中国地震局《地震监测专业设备定型测试大纲 (磁通门经纬仪)》(CSDC201901) 和《地震监测专业设备 (磁通门经纬仪) 技术要求》(JSDC202101) 有关要求, 测试结果见图 6、表 4。

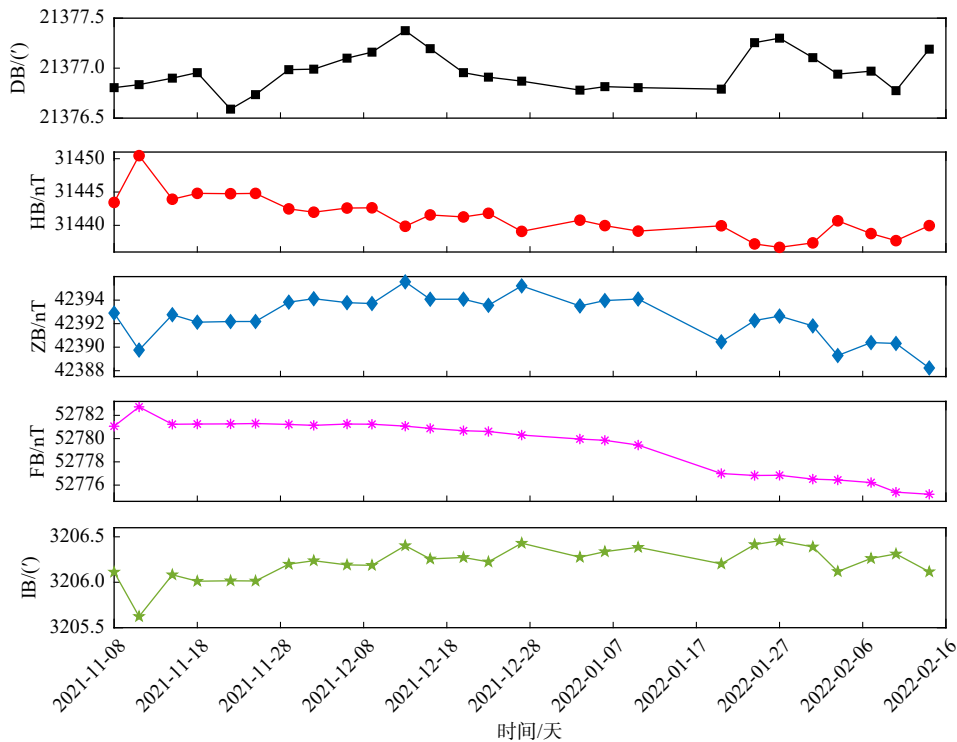


图 6 自动磁通门经纬仪基线值观测结果

Fig. 6 Observation results of baseline values of automatic fluxgate theodolites

表 4 自动磁通门经纬仪技术指标

Table 4 Test results of automatic fluxgate theodolite

序号	检测项	技术指标	备注
1	最大允许误差	$\Delta D \leq \pm 0.20'$ , $\Delta I \leq \pm 0.20'$	符合
2	重复性	$\Delta D \leq \pm 0.10'$ , $\Delta I \leq \pm 0.10'$	符合
3	转向差	$\Delta D \leq 5'$ , $\Delta I \leq 5'$	符合
4	线性度	$\leq 0.30\%$ (满量程)	符合
5	修正系数	1.000±1%	符合
6	测量范围	-20 000 nT~20 000 nT	符合
7	零点漂移	$\leq 3.0$ nT, $\pm 20$ nT内可调节	符合

### 3 结 论

自动磁通门经纬仪是我国自主研发的地磁绝对观测设备, 通过实验测试、台站观测实验以及中国地震局定型测试结果表明, 该设备的性能指标均达到了人工磁通门经纬仪水平. 该设备实现了观测方式的自动化, 观测精度高, 速度快, 克服了人工磁通门经纬仪需要人工操作的不足, 可在偏远地区、条件恶劣地区实现地磁场的绝对测量, 为解决我国区域地磁绝对观测站点布设不均问题提供了有效途径.

### 致谢

该工作得到了自动磁通门经纬仪研制团队张策、范晓勇的支持, 感谢河北涉县台、吉林合隆台、北京白家疃台和陕西乾陵台同志在台站对比观测中的辛勤工作.

### References

Auster H U, Mioara M, Hemshorn A. 2007. Automation of absolute measurement of the geomagnetic field[J]. *Earth Planets and Space*, 59(9): 1007-1014.

Department of Monitoring and Forecasting, CEA. 2002. Seismic Electromagnetic Digital Observation Technology [M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).

- Fan X Y, Zhang T, Zhang C, et al. 2018. Development for the magnetic fluxgate theodolite of domestic automation[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 39(5): 172-177 (in Chinese).
- Gilbert D, Rasson J L. 1998. Effect on DIFlux measuring accuracy due to a magnet located on it[C]//Proceedings of the VIIth Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, Scientific Technical Report STR98/21. GeoForschungs-Zentrum Potsdam, 168-171.
- Gonsette A, Rasson J. 2013. Autodif: Automatic absolute DI measurements[C]// Proceedings of the XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing. Boletin ROA No. 03/13, 16-19.
- Gonsette A, Poncelet A, Marin J-L, et al. 2014. Autodif validation procedure[C]// XVIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instrument, Data Acquisition and Processing. Hyderabad, India.
- Marsal S, Curto J J, Torta J M, et al. 2017. An automatic DI-flux at the Livingston Island geomagnetic observatory, Antarctica: Requirements and lessons learned[J]. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*, 6(2): 269-277.
- Poncelet A, Gonsette A, Rasson J. 2017. Few years' experience with Automatic DIFlux systems: Theory, validation and results[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems Discussions*, 6(2): 353-360. DOI: 10.5194/gi-2017-20.
- Rasson J L, van Loo S, Berrami N. 2009. Automatic DIFlux measurements with AUTODIF[R]// Proceedings of the XIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing. U. S. Geological Survey Open-File Report 2009-1226, 220-224.
- Rasson J L, Gonsette A. 2011. The MarkII Automatic DIFlux[J]. *Data Science Journal*, 10(30): IAGA169-IAGA173.
- Sebastien A V, Rasson J L. 2007. Development of an Automatic Declination-inclination Magnetometer[M]. *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, 177-186.
- Van Loo S A, Rasson J L. 2007. Presentation of the prototype of an automated DIFlux[J]. *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences*, C-99 (398): 77-86.
- Wang C, Chen Z Q, Hu L H, et al. 2021. Development and prospect of China's space-based and ground-based space environment monitoring platforms[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 38(3): 225-239 (in Chinese).
- Zhang C. 2020. Research on key technology of automatic geomagnetic deviation and inclination absolute measuring instrument[D]. Beijing: Institute of Geophysics, CEA (in Chinese)
- Zhang C, Teng Y T, Zhang T, et al. 2020. Multi-parameter error compensation algorithm for automatic fluxgate theodolite[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 41(6): 85-93 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 范晓勇, 张涛, 张策, 等. 2018. 国产自动化磁通门经纬仪研制[J]. *地震地磁观测与研究*, 39(5): 172-177.
- 王赤, 陈志青, 胡连欢, 等. 2021. 我国空间环境天地基监测平台的发展态势和展望[J]. *航天器环境工程*, 38(3): 225-239.
- 张策. 2020. 自动化地磁偏角倾角绝对测量仪关键技术研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 张策, 滕云田, 张涛, 等. 2020. 自动磁通门经纬仪多参量误差补偿算法[J]. *仪器仪表学报*, 41(6): 85-93.
- 中国地震局监测预报司. 2002. 地震电磁数字观测技术 [M]. 北京: 地震出版社.

王喜珍, 冯志生, 居海华, 闫彬, 马新欣, 陈志青. 2024. 子午工程二期感应式磁力仪. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 31-36. doi: 10.19975/j.dqyx.2023-015.

Wang X Z, Feng Z S, Ju H H, Yan B, Ma X X, Chen Z Q. 2024. The induction magnetometer in the Phase II of Chinese Meridian Project. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 31-36 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyx.2023-015.

## 子午工程二期感应式磁力仪

王喜珍<sup>1\*</sup>, 冯志生<sup>2</sup>, 居海华<sup>2</sup>, 闫彬<sup>3</sup>, 马新欣<sup>1</sup>, 陈志青<sup>4</sup>

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 江苏省地震局, 南京 210014

3 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

4 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

### 关键点:

- 感应式磁力仪是我国自主研制的高灵敏度、大动态范围、频带覆盖范围宽的三分量感应磁场监测设备, 可以采集 0.001~30 Hz 频带范围内的微弱信号, 灵敏度可高达 10 pT, 采用 32 位 AD 模数转换, 实现高精度、大动态范围输出。
- 与国内外同类型观测设备相比, 子午工程二期感应式磁力仪的性能指标达到甚至优于同等类型监测设备水平。
- 子午工程在我国大陆地区以及南极配置多台(套)感应式磁力仪开展地磁感应场测量, 对研究地震圈层耦合、空间环境以及地震预测预报等具有重要意义。

**摘要:** 地球的感应磁场是空间电流体系在地球内部感应而成的电流所产生的磁场。通过地球感应磁场的观测, 既可以了解空间电流体系的信息, 也可以了解地球内部电性结构等信息, 是研究空间天气事件和地震圈层耦合机理的重要物理参量。子午工程在我国大陆和南极地区东经 120°、100°和北纬 30°、40°线附近布设呈“#”字型分布的多台(套)感应式磁力仪, 开展固定、长期、连续的地球感应磁场测量。子午工程一期配置有 14 台(套)由乌克兰生产的 LEMI-30 型感应式磁力仪, 自 2009 年开始观测, 至今一直正常运行, 并将与子午工程二期并网融合运行。子午工程二期将布设 13 台(套)感应式磁力仪, 计划于 2023 年投入运行, 与子午工程一期已布设设备共形成 27 台(套)的感应式磁力仪观测网。子午工程二期感应式磁力仪由我国自主研制, 磁芯采用高磁导率的新型合金材料, 通过采用多片叠加技术, 有效聚集磁场, 增强感应输出信号, 提高传感器对微弱信号的拾取能力。研制方出厂测试、中国计量科学院测试以及在高淳地震台较长时间的观测, 结果表明, 子午工程二期采用的感应式磁力仪的频带范围宽, 可达 0.001~30 Hz, 灵敏度高, 分辨率达 10 pT, 长期运行稳定好。

**关键词:** 子午工程; 地磁监测; 感应式磁力仪

doi: 10.19975/j.dqyx.2023-015

中图分类号: P315

文献标识码: A

## The induction magnetometer in the Phase II of Chinese Meridian Project

Wang Xizhen<sup>1\*</sup>, Feng Zhisheng<sup>2</sup>, Ju Haihua<sup>2</sup>, Yan Bin<sup>3</sup>, Ma Xinxin<sup>1</sup>, Chen Zhiqing<sup>4</sup>

1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2 Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China

3 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

4 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** The Earth's induced magnetic field is a result of the electrical current that is generated by the space current system within the Earth's interior. By observing Earth's induced magnetic field, we can acquire information on the space current system and the electrical structure of the Earth's interior, which is an important physical parameter to study the mechanism of space weather events and seismic sphere coupling. The Meridian Project has set

收稿日期: 2023-03-02; 录用日期: 2023-04-26

基金项目: 国家重大科技基础设施项目(子午工程二期)

Supported by the National Major Science and Technology Infrastructure Projects Grand (Phase II of the Chinese Meridian Project)

\*通信作者: 王喜珍(1972-), 男, 副研究员, 主要从事地球物理观测技术研究. E-mail: wangxz@cea-igp.ac.cn



up several induction magnetometers in the shape of a "#" along the longitudes of 120° E and 100° E and latitudes of 30° N and 40° N in China's mainland and Antarctic regions, to carry out fixed, long-term, and continuous measurements of the Earth's induced magnetic field. The first phase of the Meridian Project is equipped with 14 LEMI-30 induction magnetometers produced by Ukraine, which have been in routine operation since 2009 and will be integrated with the grid of the second phase of the Meridian Project. Thirteen induction magnetometers will be installed in the second phase of the Meridian Project, which is scheduled to commence operation in 2023. Together with the equipment already installed in the first phase of the Meridian Project, a network of 27 induction magnetometers will be established. China is independently developing the induction magnetometer of the second phase of the Meridian Project. The magnetic core incorporates a new alloy material with high permeability. The multi-piece superposition technology was adopted to effectively gather the magnetic field, enhance the induction output signal, and improve the sensor's ability to pick up weak signals. The test results show that the frequency range of the induction magnetometer used in the second phase of the Meridian Project is wider, up to 0.001–30 Hz; its sensitivity is high, with a resolution of 10 pT; and its long-term operation is very stable.

**Keywords:** Chinese Meridian Project; geomagnetic monitoring; induction magnetometer

## 0 引言

地磁场由地球内部的磁性岩石以及分布在地球内部和外部的电流体系产生的各种磁场成分叠加而成 (徐文耀, 2009), 通过磁场监测数据, 不仅可以了解地球系统的过程、变化和相互作用, 也可以了解地球、太阳和月球活动及太阳粒子辐射活动, 进而研究空间电流体系的活动与变迁. 地磁台站观测一般包括绝对观测和相对记录, 作为经典的相对地磁记录设备, 磁通门磁力仪可以记录直流磁场 (DC) 信号, 感应式磁力仪可以记录交变感应磁场 (AC) (Shin et al., 2016).

感应式磁力仪的研制原理基于法拉第电磁感应定律, 感应线圈的输出与通过感应线圈的磁通量变化率之间成一定的关系, 由于其制作原理简单, 且容易实现, 是出现较早的磁场观测设备. 随着新型磁性材料的出现、加工工艺的改进以及设计思路的创新, 与早期的感应式磁力仪相比, 其体积大大减小, 灵敏度大幅提高、频带宽和动态范围大幅扩大, 可记录微弱信号, 在地磁观测、地球物理勘探、空间环境监测等领域得到广泛应用 (Tumanski, 2007; 朱万华等, 2013). 感应式磁力仪也是重要的星载磁场观测设备, 法国 DEMETER 卫星、我国张衡一号等多颗卫星上配置了感应式磁力仪. 感应式磁力仪观测数据对研究电磁波动, 认识磁重联、粒子加速和湍流基本等离子体物理过程及其动力学至关重要.

2005 年, 美国在加利福尼亚州建立了感应式磁力仪监测台阵, 用于 ULF、磁场波动以及地震活

动性监测 (Cutler et al., 2008). 该台阵沿圣安德烈斯断层布设了 68 台感应式磁力仪, 测点间距约为 10 km, 同时还在其中的 33 个测点配置了微震仪. 加拿大在北加拿大布设了 CANOPUS 台阵, 用于监测高纬电离层电流和极光活动, 该台阵布设了 28 台磁通门磁力仪、8 台感应式磁力仪以及光度计、电离层监测仪等设备 (Mann et al., 2004). 芬兰在芬兰和克里特岛建立了由 7 台感应式磁力仪组成的地磁脉动观测链, 用于监测地磁脉动 (Hebden et al., 2005).

子午工程 (空间环境地基监测网) 是我国自主建设的规模最大、覆盖范围最广、观测物理参量最多的空间环境监测系统, 子午工程于 2008 年开始建设, 子午工程一期于 2012 年正式投入运行, 已连续运行 10 年之久. 子午工程二期 2019 年开工建设, 计划于 2024 年投入运行. 子午工程将建设 30 多个分布在东经 100°、120° 及北纬 30°、40° 附近的地磁监测站点, 配置质子磁力仪、Overhauser 磁力仪、人工磁通门经纬仪、自动磁通门经纬仪、磁通门磁力仪、感应式磁力仪、大气电场仪、地电场仪以及低频磁场波动接收机等监测设备, 实现对地磁基本场、感应场、地电场、大气电场、ULF/ELF/VLF 波等空间环境物理对象的监测, 将为研究空间环境空间天气事件的传播、演化和影响我国空间环境的路径、揭示我国不同区域上空的空间环境的变化特征和差异, 以及青藏高原和南海等特殊区域空间环境变化的精细过程、揭秘我国特殊地质和地理条件下, 固体地球、低层大气和近地空间环境的耦合过程提供数据基础, 为开展我国地磁场时空变化

特征和区域特征科学研究、磁层中 ULF/VLF 对磁层波动的产生和传播、地球辐射带演化及磁层/电离层耦合研究, 获取磁暴等空间天气事件的形成机理、变化规律和特征, 探索地震电磁异常可能耦合关系提供理论和应用基础. 子午工程一期的 14 个地磁监测台站均配置了乌克兰进口的 LEMI-30 型感应式磁力仪, 子午工程二期新增的 13 个感应式磁力仪由中国科学院空天信息创新研究院研制, 信号为 CAS-10M. 子午工程感应式磁力仪安装站点信息见表 1.

表 1 子午工程二期感应式磁力仪安装站点

Table 1 The installation site of an induction magnetometer in the Phase II of Chinese Meridian Project

序号	台站名称	经度/°E	纬度/°N	高程/m
1	喀什站	75.81	39.51	1309.00
2	且末站	85.45	38.12	1246.13
3	呼图壁站	86.94	44.36	420.00
4	噶尔站	80.11	32.52	4403.00
5	巴塘站	99.11	30.01	2600.00
6	格尔木站	94.87	36.43	2801.00
7	嘉峪关站	98.22	39.81	1720.00
8	丽江古城站	100.17	26.98	3126.00
9	贺兰站	106.07	38.80	1465.00
10	锡林浩特站	116.08	43.90	1020.00
11	大连中山站	121.76	19.58	143.00
12	福建泉州站	118.51	25.02	42.00
13	南极长城站	58.04W	-66.21S	20.00

## 1 感应式磁力仪组成

感应式磁力仪主要由 3 根感应式磁场传感器和数据记录器组成 (图 1), 地磁南北向、东西向、垂直向分别布设一根磁场传感器, 传感器轴方向与磁场方向平行, 三根磁传感器形成正交关系, 监测三个正交方向的低频感应磁场.



图 1 感应式磁力仪组成, 左为感应式磁场传感器, 右为数据记录器

Fig. 1 The induction magnetometer. The induction magnetic field sensor on the left, and the recorder on the right

### 1.1 磁场传感器

磁场传感器基于法拉第电磁感应定律研制, 其

核心是在高性能磁性材料 (磁芯) 上缠绕金属导体线圈, 当外界磁场发生变化时, 线圈的输出电压和通过线圈的磁通量的变化量成正比, 即:

$$V = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = -\mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

其中:  $\Phi$  为通过面积为  $A$ 、匝数为  $n$  的线圈的磁通量. 由 (1) 式可知, 线圈的匝数越多, 面积越大, 传感器的动态范围越大.

由于线圈的匝数越多, 面积越大, 体积会大, 不便于观测. 在实际研制中, 为了使传感器体积尽可能小、重量尽可能轻的前提下有高的灵敏度和大的动态范围, 采用多片叠成技术, 将一定厚度的磁片叠加在一起, 形成多层的、截面积为正方形的磁芯. 多片磁性材料的叠加可以有效聚集磁场, 增强感应输出.

磁性材料选取磁导率高的合金材料, 由于磁芯的有效磁导率与磁芯长径比具有如图 2 关系, 通过优选磁芯材料磁导率和优化磁芯长径比, 可有效提高感应式磁场传感器的性能.

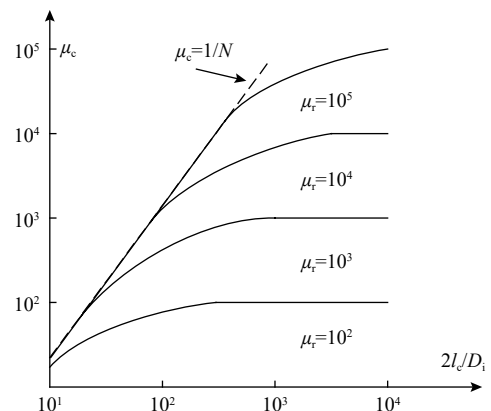


图 2 有效磁导率与初始磁导率和磁芯长径比关系 (修改自 Tumanski, 2007)

Fig. 2 The relationship between effective permeability and initial permeability and the length and diameter ratio of the magnetic core (modified from Tumanski, 2007)

噪声是传感器最重要的技术指标之一. 感应式磁场传感器的噪声主要有磁滞损耗引起的噪声和涡流损耗引起的热噪声. 为了降低磁性材料在磁化过程中因磁滞效应引起损耗, 根据磁滞损耗大小和材料磁滞回线面积大小成正比关系, 设计中利用磁通负反馈作用, 被测磁场和反馈磁场在磁芯材料中相互抵消, 总磁场近似为零, 从而可以克服磁滞损耗带来的噪声.

交变磁场在磁性合金做成的磁芯内产生涡流, 从而产生热噪声. 热噪声可用下式表示:

$$V_t = 2\sqrt{k_B \cdot T \cdot \Delta f \cdot R} \quad (2)$$

其中, 玻尔兹曼因子  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ W}_s\text{K}^{-1}$ , 线圈电阻  $R$  为:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{d^4} (D - D_i) \cdot (D + D_i) \quad (3)$$

在设计中磁芯采用多层高磁导率的合金薄片叠加而成, 可以有效减小涡流损耗导致的热噪声。

由于感应线圈两端的电压信号非常微弱, 需要通过放大电路将电压信号进行放大后再进行采集。由于放大器的  $1/f$  噪声效应, 低频段往往会导致信号完全淹没在噪声中。设计中采用斩波稳零技术, 实现低频信号的低噪声放大, 有效降低  $1/f$  噪声影响。

## 1.2 数据记录器

数据记录器主要实现对磁场传感器线圈输出模拟信号的采集、管理和网络服务功能, 同时也对各模块供电进行管理。

采集部分的模数转换芯片采用高性能、双通道、32 位 ADC 芯片, 满足了对微弱信号到大信号的大动态范围采集需求。由于需要对三个通道的感应磁场进行采集, 同时为了实现数据记录器工作状态的监控, 还需对供电电压和电流进行同步采集, 采集部分还采用了高性能 FPGA 芯片, 实现对各通道数据采集的同步、采集数字信号解码等功能。

管理部分采用集成 ARM 和 DSP 处理器的高性能处理器, CPU 的主频高达 720 MHz, 具有多个串口、USB 口和 GPIO 口, 可以满足对 SD 卡、LED 灯、按键、GPS 信号、网络信号等的应用需求。管理系统采用裁剪的嵌入式 Linux 操作系统, 进行任务调度和对串口、USB、GPIO 口、高速 SPI 口等外设的管理。采用大容量的高速 SD 卡存储采集数据, 满足长时间的数据存储需求。

网络服务部分除了以太网功能外, 数据记录器还通过 USB 口扩展, 实现了与 WIFI 模块的通讯, 提供了无线数据传输功能。用户可以通过 Web 服务器和 FTP 服务器下载和浏览数据。

数据记录器采用了高精度的晶振为采集系统提供时钟源, 实现了高精度的守时, 可以满足在外部授时长时间无效的情况下仍有高的时间准确度。提供了灵活的外部授时方式, 用户可以选择 GPS, 也可以选择北斗。

此外, 为了增加系统供电的稳定性, 数据记录器采用了高性能的、具有隔离功能的稳压电源模块, 可以输出 3.3 V、2.5 V、1.2 V, 为各模块提供高精度的稳定的供电电压和电流。

## 2 感应式磁力仪性能指标

为了更好地验证感应式磁力仪的功能和性能指标, 在安装前进行了严格的测试。测试过程包括在标准平台上的性能指标测试和在野外台站的长期稳定性对比测试。测试传感器采取随机抽取方式, 抽取 2 套共 6 根磁传感器进行测试。

### 2.1 标准平台测试

感应式磁力仪性能指标平台测试委托中国计量科学院开展, 用亥姆霍兹线圈系统产生标准场, 在 0.001~30 Hz 频率范围内, 对感应式磁场传感器动态范围、分辨力、灵敏度、噪声水平等进行了测量, 频率响应特性见图 3。

为了更好地了解感应式磁力仪的性能指标, 将 CAS-10M 与 LEMI-30 性能指标进行对比, 结果见表 2。

从表 2 可以看出, 子午工程二期采用的国产 CAS-10M 型感应式磁力仪与子午工程一期采用的

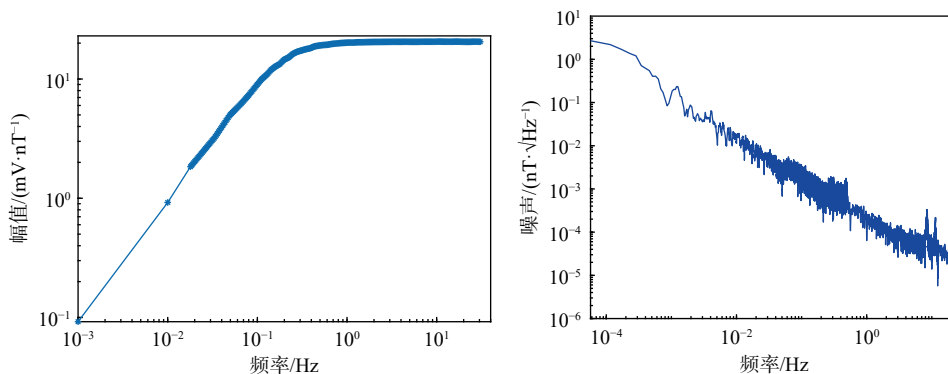


图 3 感应式磁传感器频率响应和噪声

Fig. 3 Frequency response and noise of the induction magnetometer

表 2 CAS-10M 与 LEMI-30 感应式磁力仪技术指标对比

Table 2 Comparison of technical specifications of the CAS-10M and LEMI-30 induction magnetometer

序号	类型	技术指标	
1	型号	CAS-10M	LEMI-30
2	频率响应	0.001~30 Hz	0.001~30 Hz
3	灵敏度	(20±1) mV/nT(1~20 Hz)	20×f* mV/nT(0.001~1 Hz) 20 mV/nT(1~30 Hz)
4	噪声	≤20 pT×Hz <sup>-1/2</sup> @0.01 Hz ≤2 pT×Hz <sup>-1/2</sup> @0.1 Hz ≤0.2 pT×Hz <sup>-1/2</sup> @1 Hz ≤0.04 pT×Hz <sup>-1/2</sup> @10 Hz	≤20 pT×Hz <sup>-1/2</sup> @0.01 Hz ≤2 pT×Hz <sup>-1/2</sup> @0.1 Hz ≤0.2 pT×Hz <sup>-1/2</sup> @1 Hz ≤0.04 pT×Hz <sup>-1/2</sup> @10 Hz
5	分辨率	10 pT	10 pT
6	测量范围	±200 nT	±200 nT
7	采样率	16 Hz、32 Hz、64 Hz、128 Hz可设	16 Hz、32 Hz、64 Hz、128 Hz、256 Hz可设

f\*为接收信号频率

进口 LEMI-30 型感应式磁力仪主要技术指标相当。

### 2.2 台站对比测试

2022 年 12 月 1—15 日, 在江苏省南京市高淳地震台进行了稳定性测试. 高淳地震台位于高淳县城东 20 km, 茅山断裂带南端游子山脚下, 环境温度 0~11℃, 相对湿度≤80%, 背景噪声低, 电磁环境良好. 测试中, 从 1~13 号感应式磁力仪中随机选取 2 套, 抽取的编号为 1 号和 7 号, 1 号设备的 3 个传感器编号分别为 M618、M619、M620, 7 号设备的 3 个传感器编号分别为 M636、M637、M638. 传感器按照同方向、等间距方式放置在高淳地震台绝对观测室内. 测试期间, 设备采样率均设置为 32 Hz, 每小时生成 1 个二进制文件, 采用 GPS 授时, 每通道共采集 210.94 MB 数据. 测试期间 2 套设备均未出现故障和断记情况, 连续率为 100%.

以两套设备的其中一个传感器为例, 给出了原始观测数据对比图 (图 4). 从图 4 可以看出, 传

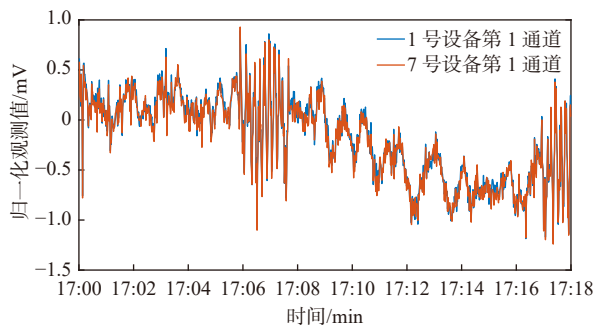


图 4 12 月 10 日 17:00—17:18 两套设备第 1 通道原始观测曲线

Fig. 4 Original observation curve of the first channel of the induction magnetometer at 17:00-17:18 on December 10

感器的记录波形一致性较好。

分别对 2 套感应式磁力仪的 3 个传感器进行同方向每小时数据两两做相关性分析, 并对相关性做统计, 结果见图 5、表 3.

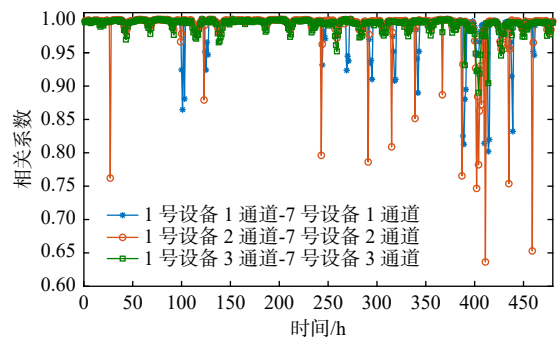


图 5 感应式磁力仪对应通道的相关性

Fig. 5 Correlation of the corresponding two different channels of the search coil magnetometer

表 3 两个传感器间相关性系数统计

Table 3 Correlation coefficient statistics between two different sensors

相关系数	1-1通道/%	2-2通道/%	3-3通道/%
0.99	81.67	81.67	76.88
0.95	93.54	95.83	98.13
0.90	97.71	96.67	99.79
0.85	98.75	97.92	100.00
0.80	100.00	98.13	100.00
0.75	100.00	99.38	100.00
0.70	100.00	99.58	100.00
0.65	100.00	99.79	100.00
0.60	100.00	100.00	100.00

从表 3 可以看出, 相关系数在 0.90 以上的个数占到整个统计数的 99.79%, 在 0.95 以上的个数占到整个统计数的 98.13%, 整体上各传感器间的相关性较好。



根据中国地震局感应式磁力仪《低频地磁场扰动仪长期稳定性野外比测规程》对两套感应式磁力仪测试期间的同方向观测数据做虚实部谱比分析,根据设备噪声水平,分 0.001~0.01 Hz、0.01~0.1 Hz、0.1~1 Hz、1~10 Hz、10~30 Hz 共 5 个频段进行计算,各传感器的虚实部谱比均在 $\pm 7.5\%$ 之内,符合要求。

### 3 结 论

子午工程二期布设 13 台感应式磁力仪,由我国自主研制,采用多片高磁导率的合金磁芯材料叠加技术,有效提高了感应式磁力仪对微弱信号的采集能力。测试结果表明,感应式磁力仪的频带范围可达 0.001~30 Hz,分辨力达 10 pT,传感器的一致性和运行稳定好。

子午工程一期与子午工程二期并网后,将形成由 27 台感应式磁力仪组成的地磁脉动监测网,在监测磁场波动,研究空间天气及地震圈层耦合中必将发挥重要作用。

### 致谢

该工作得到了江苏省地震局地震电磁研究中心、高淳地震台的支持,台站人员在对比观测中的辛勤工作,一并表示感谢。感谢中国科学院空天信息创新研究院研发团队,在设备研发、性能测试中给予大力配合和支持。

### References

- Cutler J, Bortnik J, Dunson C, et al. 2008. CalMagNet- an array of search coil magnetometers monitoring ultra low frequency activity in California[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 8(2): 359-368.
- Hebden S R, Robinson T R, Wright D M, et al. 2005. A quantitative analysis of the diurnal evolution of ionospheric Alfvén resonator magnetic resonance features and calculation of changing IAR parameters[J]. *Annales Geophysicae*, 23(5): 1711-1721.
- Mann I R, Milling D K, Kale A, et al. 2004. The expanded and upgraded CANOPUS magnetometer array: An extensive ground-based magnetometer array in the THEMIS and ILWS era[C]//American Geophysical Union, Spring Meeting, SM31A-02.
- Shin J, Kim K H, Jin H, et al. 2016. Development of ground-based search-coil magnetometer for near-Earth space research[J]. *Journal of Magnetism*, 21(4): 509-515.
- Tumanski S. 2007. Induction coil sensors—A review[J]. *Measurement Science and Technology*, 18(3): R31-R46.
- Xu W Y. 2009. *Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth*[M]. Beijing: China Science and Technology Press (in Chinese)
- Zhu W H, Di Q Y, Liu L S, et al. 2013. Development of search coil magnetometer based on magnetic flux negative feedback structure[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(11): 3683-3689 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 徐文耀. 2009. 地球电磁现象物理学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社.
- 朱万华, 底青云, 刘雷松, 等. 2013. 基于磁通负反馈结构的高灵敏度感应式磁场传感器研制[J]. *地球物理学报*, 56(11): 3683-3689.

陈志青, 王国军, 张锋, 胡连欢, 常首民, 王霄. 2024. 子午工程二期电离层数字测高仪样机测试与数据质量对比分析. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 37-52. doi: 10.19975/j.dqyx.2023-004.

Chen Z Q, Wang G J, Zhang F, Hu L H, Chang S M, Wang X. 2024. Digisonde prototype testing and data quality comparison analysis for Phase II of Chinese Meridian Project. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 37-52 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyx.2023-004.

## 子午工程二期电离层数字测高仪样机 测试与数据质量对比分析

陈志青<sup>1,2</sup>, 王国军<sup>1,2,5</sup>, 张锋<sup>3</sup>, 胡连欢<sup>4</sup>, 常首民<sup>4</sup>, 王霄<sup>1,5</sup>

1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

4 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

5 海南空间天气国家野外科学观测研究站, 儋州 571700

**摘要:** 为确保国产设备的探测质量, 子午工程二期建设的电离层数字测高仪采用与成熟型号 DPS-4D 对比的方式, 在位于海南儋州的空间天气国家野外科学观测研究站开展了样机测试. 对参试设备及参试过程进行了介绍, 对数据质量对比测试结果进行了详细分析. 样机测试包括现场技术指标测试和数据质量对比分析. 数据质量分析从频高图质量、电离层特征参量 (foF2、hmF2、h'F2、自动度量和手动度量)、电离层漂移速度等多个方面进行综合对比, 明确了样机的硬件和数据处理软件的技术状态. 技术指标测试结果表明, 样机的两通道峰值发射功率不超过 686 W; 两发射天线驻波比不超过 2.23; 接收通道灵敏度达到 -125 dBm, 接收动态范围达到 105 dB; 接收带宽 70 kHz, 带外抑制超过 100 dB. 数据质量对比结果表明, 样机自动与手动度量的 foF2 平均偏差 0.02 MHz, hmF2 平均偏差 28.39 km, h'F2 平均偏差 0.39 km; 样机与 DPS-4D 手动度量的 foF2 平均偏差 -0.13 MHz, hmF2 平均偏差 14.7 km, h'F2 平均偏差 -3.21 km. 分析结果表明, 样机在硬件的基础探测能力方面与 DPS-4D 相当, 频高图度量的算法还存在改进空间. 本次样机数据质量对比, 不仅服务于子午工程二期电离层数字测高仪的技术定型, 也为数字测高仪数据质量评估指标的确定提供了参考.

**关键词:** 子午工程; 数字测高仪; 样机; 数据质量

doi: 10.19975/j.dqyx.2023-004

中图分类号: P352

文献标识码: A

## Digisonde prototype testing and data quality comparison analysis for Phase II of Chinese Meridian Project

Chen Zhiqing<sup>1,2</sup>, Wang Guojun<sup>1,2,5</sup>, Zhang Feng<sup>3</sup>, Hu Lianhuan<sup>4</sup>, Chang Shoumin<sup>4</sup>, Wang Xiao<sup>1,5</sup>

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 State Key Laboratory for Space Weather, Beijing 100190, China

3 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

4 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

5 Hainan Space Weather National Field Science Observation and Research Station, Danzhou, 571700, China

**Abstract:** To ensure the detection quality of the domestic model ionospheric digisonde adopted by the Phase II of Chinese Meridian Project, prototype testing including technique testing and a data quality comparison was performed. The test was carried out in the National Space Weather Observation Station in Danzhou, Hainan. After the

收稿日期: 2023-02-08; 录用日期: 2023-06-05

基金项目: 子午工程二期标准规范建设

Supported by the Construction of Standard Specification for Phase II of Chinese Meridian Project

第一作者: 陈志青 (1978-), 男, 副研究员, 主要从事空间环境地基探测技术研究和工程管理. E-mail:

zhiqing@nssc.ac.cn



prototype digisonde testing process was introduced and completed, the data quality evaluation results were analyzed in detail. A thorough comparison demonstrated that the prototype reached the overall standard established by the mature-type DSP-4D in the aspects of quality of ionograms, accuracy of ionospheric parameters ( $h'F_2$ ,  $hmF_2$ ,  $foF_2$ , auto-scaled or manual-scaled), and drift velocity. According to the testing results of technical indices, the peak power of the two transmitting channels is no more than 686 W, and the voltage standing wave ratio is no more than 2.23. The sensitivity of the receiving channel reached  $-125$  dBm, and the dynamic range reached 105 dB. The baseband bandwidth of the digital receiver is 70 kHz, and the suppression of outband interference is no less than 101 dB. The results of the data quality evaluation showed that the average differences between the prototype digisonde parameters of  $Fof_2$ ,  $h'F_2$ , and  $hmF_2$  obtained using auto-scaling and manual scaling are 0.02 MHz, 28.39 km, and 0.39 km, respectively. The average differences between the three parameters of the prototype digisonde and those of the DPS-4D obtained using auto-scaling are  $-0.0$  MHz,  $-2.61$  km, and  $-9.12$  km, respectively. The average differences between the three parameters of the prototype digisonde and those of the DPS-4D obtained using manual scaling are  $-0.13$  MHz, 14.7 km, and 3.21 km, respectively. The prototype testing clarified the status of the technique of the domestic instrument, greatly contributing to its design optimization and finalization. It also established a reference for digisonde data quality assessment.

**Keywords:** Chinese Meridian Project; digisonde; prototype; data quality

## 0 引言

子午工程是我国空间天气领域唯一的国家重大科技基础设施 (Wang, 2010; Wang et al., 2020). 通过一期、二期的建设, 子午工程将建成覆盖我国区域和南北极区的“井”字形地基监测网络, 对太阳表面、行星际、磁层、电离层、中高层大气等多个圈层开展综合性的连续监测. 子午工程一期于 2012 年建成运行, 二期工程于 2019 年开工建设, 预期 2023 年建成.

针对电离层网络化监测的需求, 子午工程二期在分布于全国和极区的 10 个观测站点建设电离层数字测高仪 (Klaus, 1998), 与子午工程一期以及其他项目建设的电离层数字测高仪协同, 以实现对我国区域和南北极电离层电子密度和特征参量的大中尺度的连续监测. 这对研究电离层的区域特征、变化规律, 对我国区域的电离层建模具有重要意义.

目前, 比较成熟的电离层数字测高仪型号代表是美国 Lowell Digisonde International 公司的 DPS-4D (Bodo et al., 2008; Reinisch et al., 2009), 这也是子午工程一期选择的型号. 中国科学院空天信息创新研究院、中国电子科技集团公司第二十二研究所、中南民族大学等国内单位也开展了电离层数字测高仪的研制工作 (蓝加平等, 2019; 王顺等, 2014).

作为国家重大科技基础设施, 带动国内空间环

境地基探测技术的发展是子午工程的重要使命. 子午工程二期建设项目指挥部非常重视观测设备的国产化替代, 布局了电离层数字测高仪的国产化专项行动. 为了确保建成后的设备满足使用要求, 专项行动开展了厂家比测、样机测试等多个环节的活动, 对设备的技术指标、数据质量进行了全面的测试和分析.

在样机测试过程中, 子午工程总体采用 DPS-4D 与国产型号电离层数字测高仪 (中国科学院空天信息创新研究院研制的 CAS-DIS 电离层数字测高仪, 以下称为样机) 同址 (海南儋州站) 运行, 对两台设备的数据进行了多个方面的对比分析. 据我们所知, 在空间环境地基监测领域, 这是首次采用这种方式进行设备的技术定型. 本文详细介绍了样机测试的数据对比分析结果, 对电离层数字测高仪观测的一些基本特征和规律进行总结, 为准确性评估提供参考方法.

## 1 参测设备和测试过程

### 1.1 电离层测高仪

根据无线电波传播理论, 电磁波的频率与环境等离子体频率相等时将发生全反射. 电离层数字测高仪正是利用这一原理, 从地面向上发射不同频率的电波并测量反射虚高 ( $h' = ct/2$ ,  $c$  为光速,  $t$  为回波延迟), 以获取电子密度随高度的分布 (F2 层

峰值高度以下)和多种电离层特征参量信息。

由于地磁场的存在, 进入电离层的电波会分裂成寻常波 (O 波) 和非寻常波 (X 波), 它们具有不同的极化特征, 且在不同的高度上反射 (对应不同的电子密度) 或穿透. 通过对多个频率 ( $f$ ) 的虚高测量, 测高仪记录下来的  $h' - f$  的关系曲线 (电离层描述) 称为电离层频高图, 如图 1 所示. 从电离层频高图中可以度量出 E、F1、F2、Es 等层的临界频率、最小虚高等参数. 还可以从电离层频高图得出电子密度随高度 (真高) 分布的剖面曲线 (Piggott and Rawer, 1972). 通过对回波多普勒频移的测量, 还可获得电离层的漂移速度。

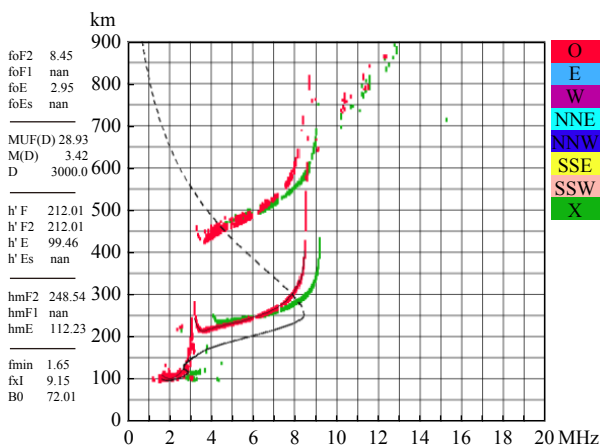


图 1 数字电离层测高仪探测结果——电离层频高图  
Fig. 1 An example ionogram of the digisonde

实际上, 电离层测高仪发射天线的辐射波束宽度很大 (半功率波束宽度可能超过  $60^\circ$ ), 不同方向的回波混叠会导致频高图中的电离层描述变粗甚至模糊. 同时, 频高图还会受到电离层状态、环境干扰、设备性能等多种因素的影响. 如何准确度量频高图获取优质的数据产品是很有挑战的任务. 因此, 尽管电离层垂直探测技术已经发展几十年 (Klaus, 1998), 国内外多个技术团队还在持续对探测技术进行优化, 提高设备对噪声和干扰的抑制水平, 发展新的频高图度量方法和软件. DPS 系列测高仪的度量算法和软件持续更新, 最新版本为 ARTIST5 (Galkin et al., 2008). Ding 等 (2007) 提出采用经验正交函数法 (EOF) 对频高图进行拟合以获取电子密度剖面. Chen 等 (2018) 基于数学形态学以及图论等算法提出一种运算复杂度低、实时操作性强的自动度量方法. Pezzopane 和 Scotto (2007) 将其他方法与 ARTIST4.5 的度量结果进行对比分析, 发现不同方法各有优劣. Pradere 等 (2019) 的研究展示了不同电离层测高仪获取的数

据之间存在不可忽略的差异, 表明开展数据质量分析和控制的重要性. 因此, 对于新型号的设备开展数据交叉对比以验证观测结果的可靠性是非常必要的。

## 1.2 样机及 DPS-4D 的整体技术方案

### 1.2.1 样机总体技术方案

本次测试的样机基于软件无线电设计理念, 自主突破了射频直采全数字接收、O 波与 X 波分离、宽频带谐波抑制、多波束合成、自动度量与反演等多项关键技术, 实现了电离层垂测、斜测、漂移等多种模式的复合探测. 样机由主控与信号处理计算机、接收机、功率放大器、大功率选频滤波器、发射天线、接收天线等组成, 如图 2 所示。

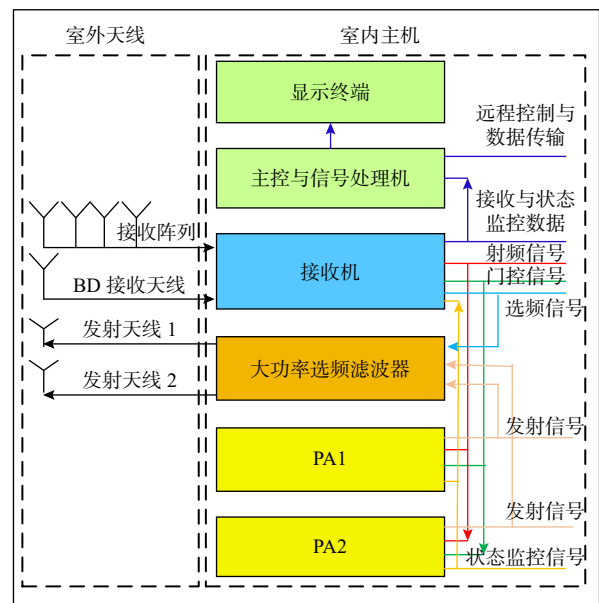


图 2 样机的总体架构框图

Fig. 2 Overall architecture of the prototype digisonde

样机采用 30 m 高的正交 Delta 天线作为发射天线, 4 组磁环天线构成 60 m 的正三角形接收阵列 (具备干涉测量能力, 能够测量回波到达角), 如图 3 所示. 关键的技术方案如下所述。

#### (1) 射频直采数字接收技术

样机接收机共有 8 个接收通道, 每个通道均由带通滤波器、低噪放、可调增益放大器、ADC 组成, 实现接收信号的射频直接采样, 采样频率为 100 MHz; 采样信号经数字下变频为基带信号, 基带采样频率为 150 kHz. 基带信号经数字相移后通过网络推送到主控与数据处理计算机, 对信号进行噪声抑制、脉冲压缩、数字波束合成等处理。

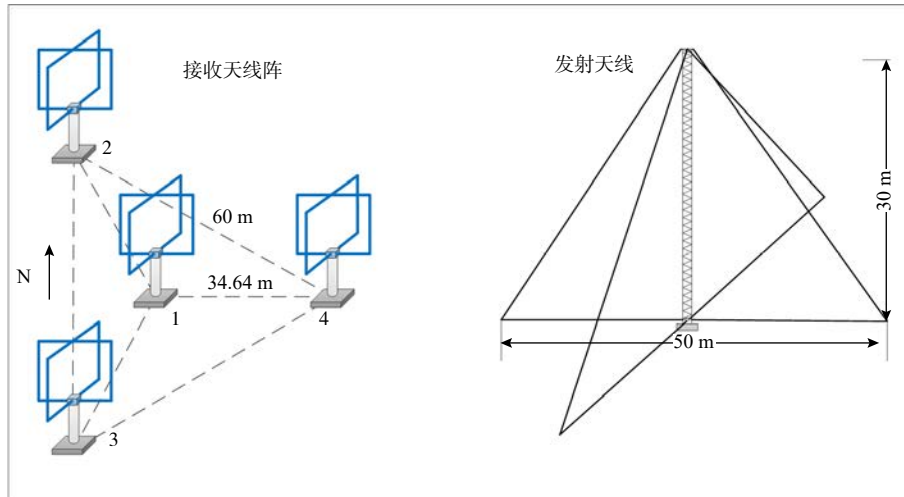


图3 样机的天线布局

Fig. 3 Antenna layout of the prototype digisonde

(2) O波与X波分离技术

样机射频激励源由 DDS、DAC、滤波器等构成, 可在 1~30 MHz 内产生两路相位相差 90° 的编码脉冲信号. 这两路信号经功率放大器放大, 并由大功率选频滤波器滤除谐波后馈入两副正交的 Delta 天线, 向空间辐射圆极化波. 在垂测工作模式下, 样机先发射一次左旋圆极化波, 再发射一次右旋圆极化波. 每个接收天线中包含 2 个正交接收通道, 一个通道的回波分别移相 90° 和 270° 后与另一个通道的回波同相相加, 从而实现 O 波与 X 波的分离.

(3) 宽频带谐波抑制

为抑制信号谐波, 样机采用大功率选频滤波器. 该滤波器采用大功率开关控制多个分段带通滤波器的技术方案, 谐波抑制比达到 50 dB 以上, 带内插损不超过 1.5 dB.

(4) 多波束合成

基于正三角形接收阵列, 通过多通道回波数字移相实现波束合成, 实现空域滤波. 在传统技术基础上, 引入鲁棒型对角线加载数字波束形成算法, 形成七个在探测空域内均匀分布的数字波束, 通过比幅度测向确定目标回波方向, 进一步提高接收信噪比.

(5) 自动度量与反演

自动度量与反演方法基于数学形态学以及图论等算法, 具有运算复杂度低和可实时操作等优点. 其主要处理流程为: 首先对频高图数据进行去噪、分类与数学形态学处理, 再对回波轨迹采用线性插值和最小二乘法拟合, 通过多次迭代使得拟合曲线与原始描述的误差满足预设条件. 然后对回波轨迹

进行进一步计算, 就可得到轨迹参数 (临界频率等), 之后通过数值求解关于虚高  $h'(f)$  和电子密度  $N(h)$  之间关系的积分方程, 得到  $F_2$  层峰高度以下的电子密度剖面.

1.2.2 DPS-4D 及其技术指标

儋州站的 DPS-4D 采用 36 m 高的正交菱形天线作为发射天线, 该天线的天顶向辐射增益高于样机发射天线, 接收天线与样机类似, 为四组磁环天线. 设备的其他各项设计指标与样机基本一致 (详见表 1).

表 1 样机和 DPS-4D 的设计指标

Table 1 Design specifications of the prototype digisonde and DPS-4D

	样机	DPS-4D
工作频率	0.5~30 MHz	0.5~30 MHz
带宽	34 kHz@3 dB	34 kHz@3 dB
脉冲编码	16位互补码	16位互补码
峰值功率(单通道)	400 W	150 W
探测虚高度范围	80~1280 km	80~1200 km
高度分辨率	2.5 km	2.5 km
多普勒频移测量范围	-10~10 Hz	-3~3 Hz
多普勒频移分辨率	0.04 Hz	0.0125 Hz

1.3 对比测试过程

测试地点为位于海南省儋州市的海南空间天气国家野外科学观测研究站 (109.1°E, 19.5°N). 该站在 2005 年建设了 DPS 电离层测高仪, 在子午工程一期中升级为 DPS-4D. 样机布设于同一站点, 与 DPS-4D 的距离约为 200 m. 该观测站位于低纬地区, 电离层扰动较频繁 (王国军等, 2007; Wang et al.,

2015), 有利于在多种电离层状态下开展两台设备的数据对比分析。

测试期间, DPS-4D 以 15 min 时间间隔开展常规观测. 为了避免两台设备同时发射造成的相互干扰, 样机的起始扫频时间在 DPS-4D 起始扫频时间的基础上往后错开 3 min.

测试的时间为 2021 年 6 月 11 日至 23 日. 测试期间, 地磁活动较为平静, Dst 指数最低仅 -37 nT, Kp 指数仅有一次达到 5. 观测结束后, 数据分析小组对两台设备获取的 h'F2、foF2 和 hmF2 等电离层

参量进行了对比分析. 根据分析结果提出设备技术方案的优化要求。

## 2 技术指标测试

样机的现场技术指标测试针对峰值功率、发射天线驻波系数、发射机谐波抑制能力、接收机带外抑制能力、接收灵敏度、高度分辨率等 16 项技术指标. 主要指标项的测试结果如表 2 所示, 均满足指标要求。

表 2 样机主要指标项的测试结果

Table 2 Testing results of the main indices of the prototype digisonde

指标项	技术指标要求	测试结果
工作频率	可在 1~30 MHz 范围内以特定频率步进扫频工作(发射与接收)	起始频率 1 MHz, 终止频率 30 MHz, 步进频率 100 kHz
步进频率	工作频率步进可调, 步进频率 ≤ 50 kHz	工作频率步进可调, 步进频率 ≤ 25 kHz
高度分辨率	以带宽计算的高度分辨率 5 km, 频高图数据高度分辨率 1 km	以带宽计算的高度分辨率 5 km, 频高图数据高度分辨率 1 km
峰值功率	两通道 < 800 W	两通道 686 W @ 1 MHz
发射天线驻波系数	< 2.5	最大值 2.23
发射机谐波抑制能力	1~30 MHz 内 > 50 dB, 35 MHz 以上 > 60 dB	1~30 MHz 内最小 51.3 dB, 35 MHz 以上最小 63 dB
接收机带外抑制能力	全频段接收相对带宽不超过 10%, 带外抑制能力不低于 50 dB	全频段接收相对带宽 7%, 带外抑制能力 101 dB
接收灵敏度与动态范围	接收灵敏度达到 -123 dBm, 动态范围达到 102 dB	灵敏度 -125 dBm, 动态范围 105 dB (含接收天线前置放大器)
探测虚高范围	80 km (雷达盲区) ~ 1280 km (距离模糊极限), 频高图的高度范围应涵盖探测高度范围	80 ~ 1398 km

因电离层数字测高仪将与其他多类无线电监测设备同址安装运行, 为避免设备间的电磁干扰, 样机进行了特别设计, 将 1~30 MHz 的工作频段分成 8 个频段进行跟踪滤波. 测试对测高仪发射机谐波抑制能力提出了很高的要求 (表 2), 并进行了

详细的测试. 图 4 所示为现场测试得到的发射机典型发射信号的频谱. 其中, 左图为样机发射机输出的 10 MHz 信号经 50 dB 大功率衰减器后测量到的信号频谱; 右图为 DPS-4D 发射机输出的 1 MHz 信号经 60 dB 大功率衰减器后测量到的信号频谱。

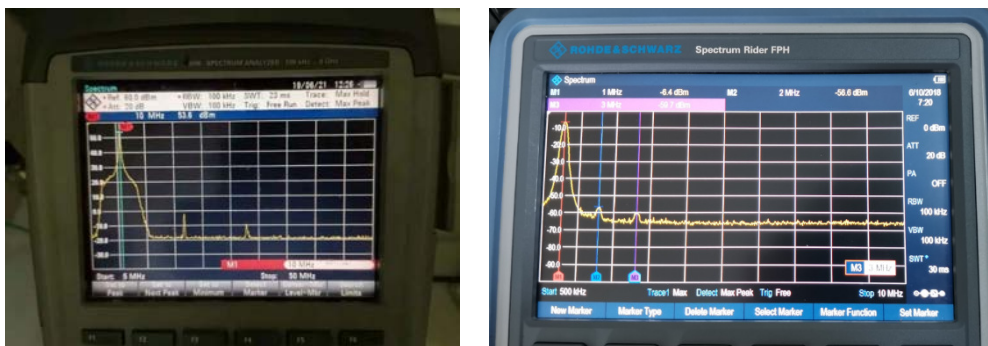


图 4 样机发射频谱 (左) 与 DPS-4D (右) 的对比

Fig. 4 Transmitting spectrum of the prototype digisonde (left) and the model DPS-4D (right)

从图 4 可以测量出样机的带外抑制和谐波抑制, 结果均满足设定的指标要求 (表 2), 不会对同址运行的其他无线电设备造成干扰 (主要是工作在

38 MHz 附近的流星雷达). 但样机的发射频谱与 DPS-4D 对比, 还存在较明显的差别, 主要体现在频谱分布较宽, 主要原因是二者的发射脉冲采用了

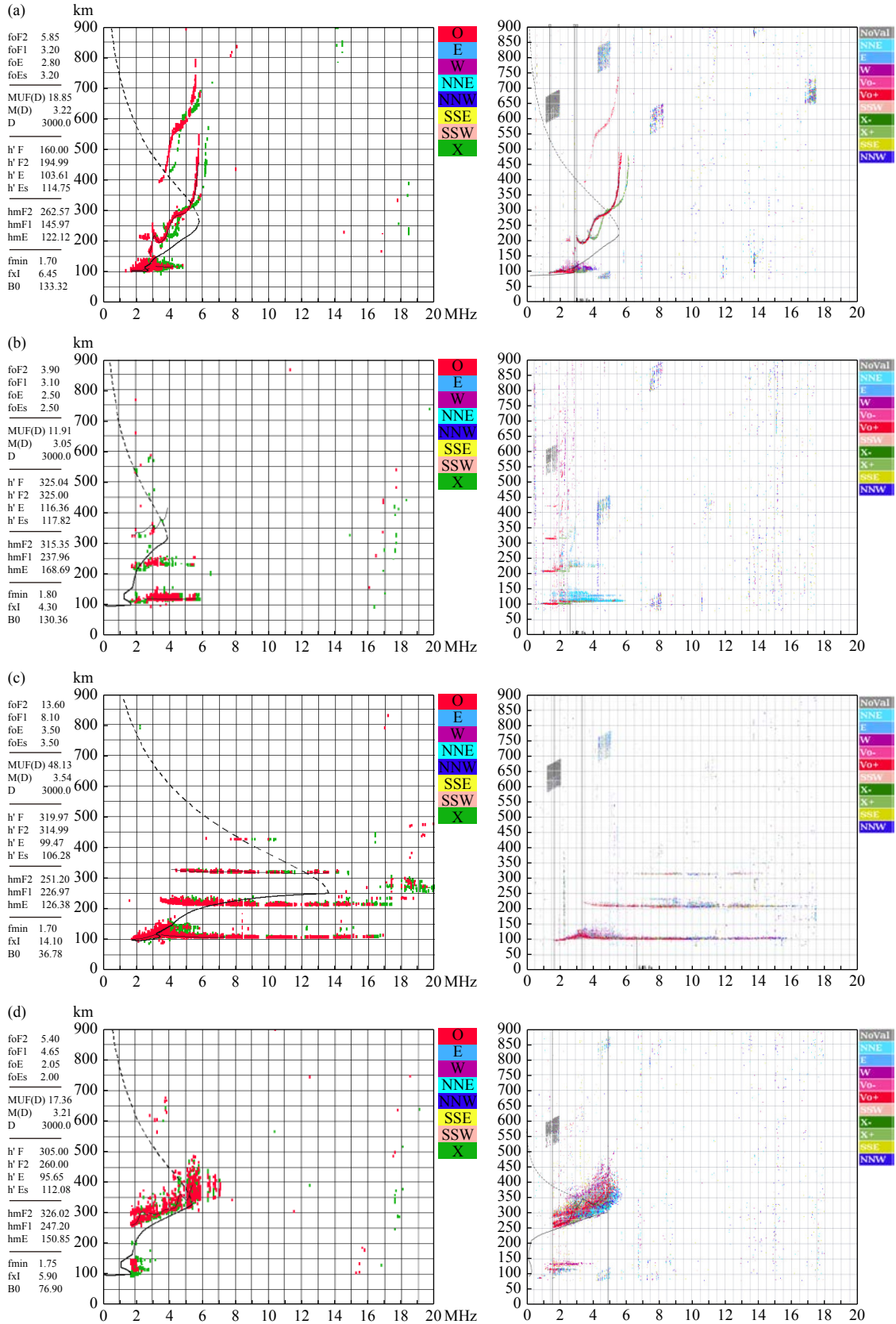


图 5 不同电离层状态下，样机 (左) 和 DPS-4D (右) 的频高图图像对比。(a) 无扰动的白天 (2021 年 6 月 11 日 00:15 UT); (b) 夜间低密度时段 (2021 年 6 月 11 日 21:00 UT); (c) 出现强 Es (2021 年 6 月 12 日 01:30 UT); (d) 出现扩展 F (2021 年 6 月 11 日 17:45 UT)

Fig. 5 Comparison between ionograms captured by the prototype digisonde (left column) and the DPS-4D (right column), under different ionospheric conditions. (a) Daytime without disturbance (2021-06-11 00:15 UT); (b) Nighttime when electron density is low (2021-06-11 21:00 UT); (c) During strong Es (2021-06-12 01:30 UT); (d) During spread F (2021-06-11 17:45 UT)

不同的窗函数, 样机采用矩形窗, DPS-4D 则采用半正弦窗, 降低了发射信号的频谱宽度。

### 3 数据对比分析

#### 3.1 频高图图像质量对比

频高图是后续电离层参数反演的基础, 通过频高图图像的直观检查可以对设备的探测能力、技术状态给出初步的判断。为了体现设备在不同电离层状态下的探测能力, 选取无扰动的白天、夜间、出现强 Es 和扩展 F 等 4 种情况的图像进行比较。由图 5 可见, 两组频高图的相似度很高。与 DPS-4D 类似, 样机可对 4 组接收天线接收信号进行比幅测向, 区分天顶方向和斜向的电离层回波。在比测阶段, 样机在数据后处理过程中未进行比幅测向, 因此频高图中未区分回波的方向。白天, 太阳辐射使得电离层电子密度增大, E 层、F1 层、F2 层特征显著。如图 5a 所示, 样机和 DPS-4D 均捕获到了这些分层结构及 Es 层回波。此时电离层电子密度高, 回波强度大, 两台设备的电离层描述都很清晰, 二次回波显著。图 5b 展示了在夜间电离层电子密度极低的情况下样机和 DPS-4D 获取的频高图。可以看到, 两幅频高图非常相似, 样机频高图描述延伸到了更高的频率。图 5c 显示, 样机探测到强 Es 层, 其临界频率  $foEs$  接近 6 MHz。DPS-4D 探测到相似的 Es 层回波, 但清晰程度不如样机。在出现扩展 F 时, 样机和 DPS-4D 同样获得了显著的距离扩展 F 特征 (图 5d)。

电离层测高仪的二次回波是一次回波经地面的反射再次到达电离层而形成的回波。因测高仪采用测量时延的方法确定回波的高度 (虚高  $h' = ct/2$ ), 二次回波的高度理论上是一次回波的二倍。实际上, 由于设备硬件存在延迟, 必须进行补偿 (数据处理时从回波延迟中扣除硬件延迟) 才能确保这一关系的准确性。否则用一次回波和二次回波分别计算的 F2 层底部高度  $h'F2$  相差可达 10 km 左右。因此, 本次样机测试将一、二次回波高度的匹配性作为一项数据质量检验项目。

选取样机一、二次回波清晰的频高图 (总计样本数 106 个), 人工获取二次回波的高度, 与人工频高图度量结果  $h'F2$  (一次回波) 进行对比。如图 6 所示, 二者具有较好的一致性, 平均偏差为

0.74 km。需要注意的是, 因选取的样本在时间分布上非常不均匀 (大多来源于白天时段), 图 6 并不能反映电离层高度的时间变化。

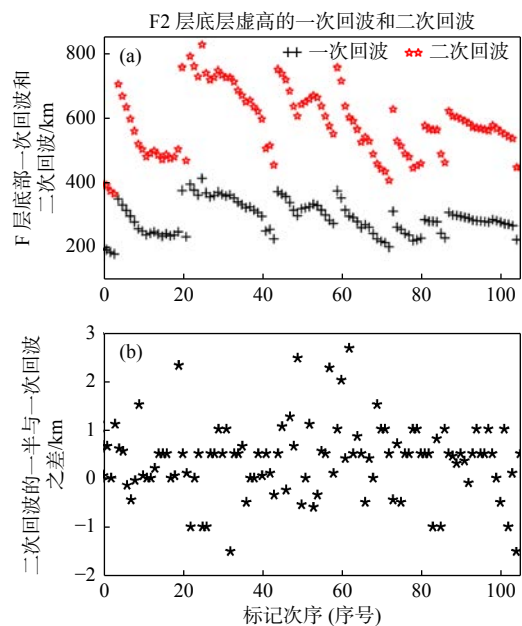


图 6 2021 年 6 月 11—23 日期间样机观测到的 F2 层一次回波和二次回波的底部虚高 (a), 以及分别获取的  $h'F2$  之间的差异 (b)

Fig. 6 Virtual height of the first echo and the secondary echo from the F2 bottomside (a), and the differences between two sets of  $h'F2$ , respectively scaled from the two echoes (b)

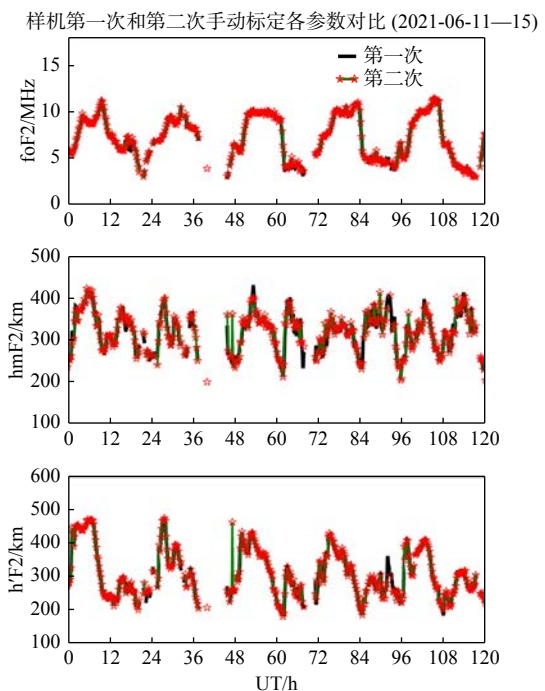


图 7 样机频高图两次手动度量的结果对比

Fig. 7 Difference between two sets of parameters scaled by two operators, adopting ionograms captured by the prototype digisonde



### 3.2 自动度量与手动度量对比

#### 3.2.1 手动度量的可靠性

在自动度量算法和软件问世之前, 研究人员采用手动方式对测高仪获取的频高图进行度量以获取电离层的各种特征参量. 有经验的人员较好地掌握了电离层的特征和变化规律, 能够应对各种异常情况, 所以频高图手动度量的结果是比较可靠的. 自动度量算法和软件需要与手动度量结果对比, 以检验其准确性.

手动度量本身的误差取决于操作人员的经验和频高图本身的质量. 为了检验手动度量的可靠性, 两名数据处理小组成员对样机的频高图 (6月11—15日) 进行了两次独立的度量 (本次测试的手动度量软件均为 DPS-4D 设备配备的 SAO Explorer), 结果如图 7 所示.

计算两次手动度量结果之间的偏差和相关系数. 两次度量的 foF2 最大偏差小于 0.4 MHz, 偏差

的绝对平均值为 0.08 MHz, 相关系数为 0.995; 两次度量的 hmF2 最大偏差小于 14 km, 偏差的绝对平均值为 3.25 km, 相关系数为 0.976; 两次度量的 h'F2 最大偏差小于 8 km, 偏差绝对平均值为 1.3 km, 相关系数为 0.939. 可见, 两次手动度量结果之间的差异很小, 本次测试的手动度量结果是可靠的. 这也为样机和 DPS-4D 之间对比指标的设定提供了参考.

#### 3.2.2 样机自动度量与手动度量对比

在测试期间, 按 15 min 间隔提取样机的频高图, 总数量为 960. 可对比时刻数量为 820 (手动度量或者自动度量结果缺失的时刻忽略不计), 占总频高图数量 (960) 的 85%. 图 8 展示了样机观测参数 foF2、h'F2 和 hmF2 自动度量和手动度量结果对比 (图 8a-8c)、散点对比 (图 8d-8f) 和差异分布 (自动减去手动之差, 图 8g-8i).

从图 8a-8c 可以看出, 在个别时段 foF2、h'F2

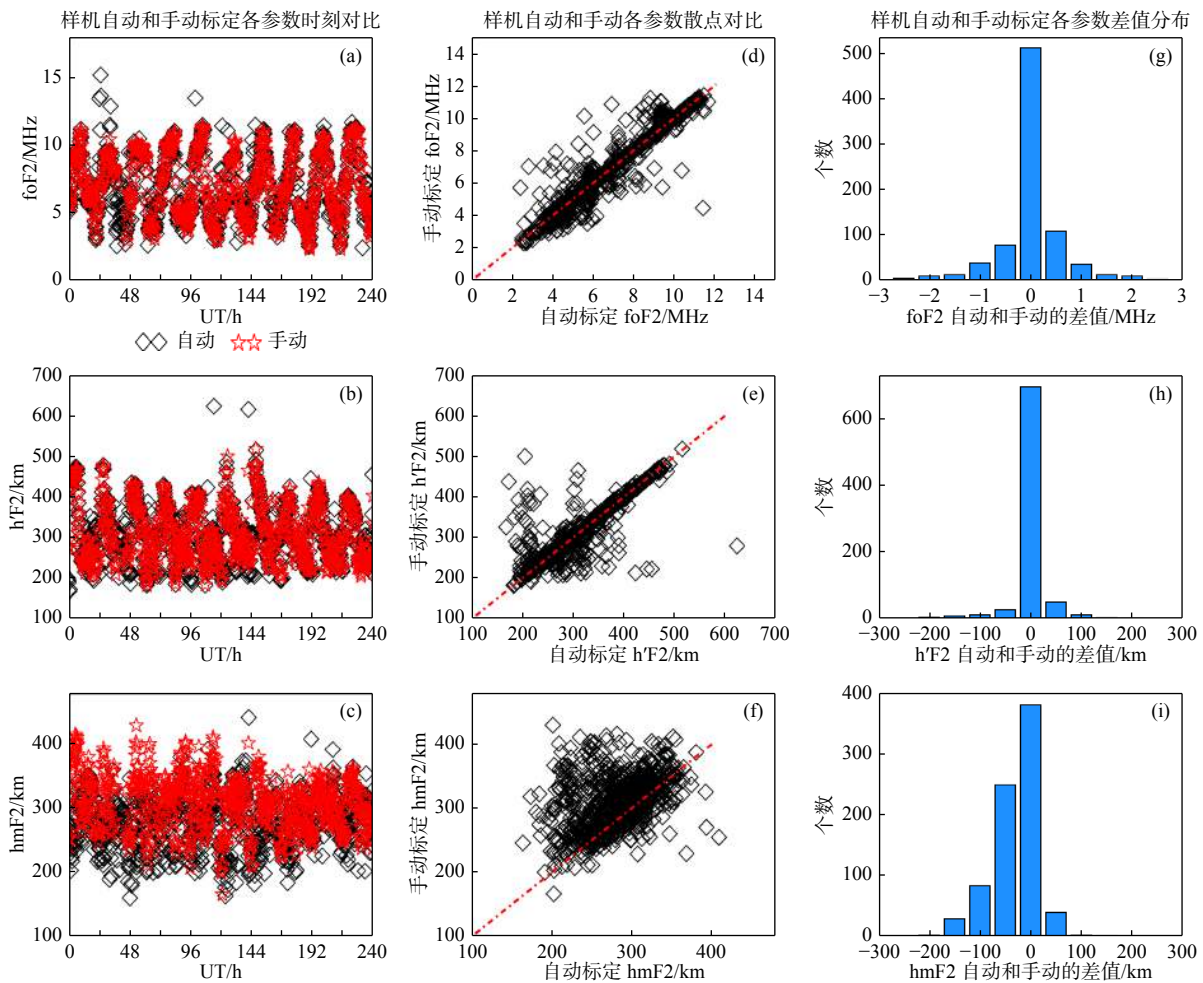


图 8 2021 年 6 月 11—23 日样机观测参数的自动度量与手动度量结果对比 (a-c)、散点对比 (d-f) 和偏差分布 (g-i)  
 Fig. 8 Comparison between auto-scaled and manual-scaled parameters of the prototype digisonde, from 2021-06-11 to 2021-06-23 UT

和 hmF2 自动度量值相对手动度量值出现较大偏差. 大多数时间段, 二者较为一致. 从图 8g 可以看出, foF2 的偏差主要分布在 -0.25~0.25 MHz 之间, 计算表明偏差绝对平均值为 0.02 MHz, 偏差绝对值小于 0.3 MHz 的比例为 66%. 手动度量值和自动度量结果的相关系数为 0.948.

从图 8h 可以看出, h'F2 的偏差主要分布在 -25~25 km 之间, 计算表明其偏差绝对平均值为 0.39 km. 手动度量值和自动度量结果的相关系数为 0.844.

从图 8i 可以看出, hmF2 的偏差也基本分布在 -25~25 km 之间, 但出现了明显的负偏离, 即自动度量的 hmF2 低于手动标度量的 hmF2. 计算表明, 两者的平均偏差为 28.39 km, 相关系数为 0.388.

上述结果表明, 样机自动度量的 foF2、h'F2 与手动标定结果具有良好的相关性, 偏差较小. 而自动度量的 hmF2 与手动度量结果相关性差. 图 8d-8f 的散点分布展示了同样的差异.

### 3.2.3 DPS-4D 自动度量与手动度量对比

同样, 将 DPS-4D 自动度量结果与手动度量结果进行对比. 图 9 给出了对应时段 DPS-4D 观测参数 foF2、h'F2 和 hmF2 自动度量和手动度量结果对比 (图 9a-9c)、散点对比 (图 9d-9f) 和差异分布 (图 9g-9i). 从图 9a-9c 中可以看出, 除个别时刻外, 观测到的 foF2、h'F2 和 hmF2 自动和手动度量基本一致.

从图 9g 可以看出, foF2 的自动度量值偏小, 但有明显的正偏离趋势 (自动度量结果偏高). 计算表明, 其中偏差平均值为 0.46 MHz, 相关系数约为 0.952. 偏差绝对值小于 0.3 MHz 的比例为 60%.

图 9e 给出了 h'F2 自动和手动度量结果散点对比, 可见少量点偏差较大; 从图 9h 可以看出, h'F2 的偏差主要分布在 -25~25 km 之间; 计算表明平均偏差为 7.17 km, 相关系数为 0.744.

从图 9i 可以看出, hmF2 的偏差主要分布在

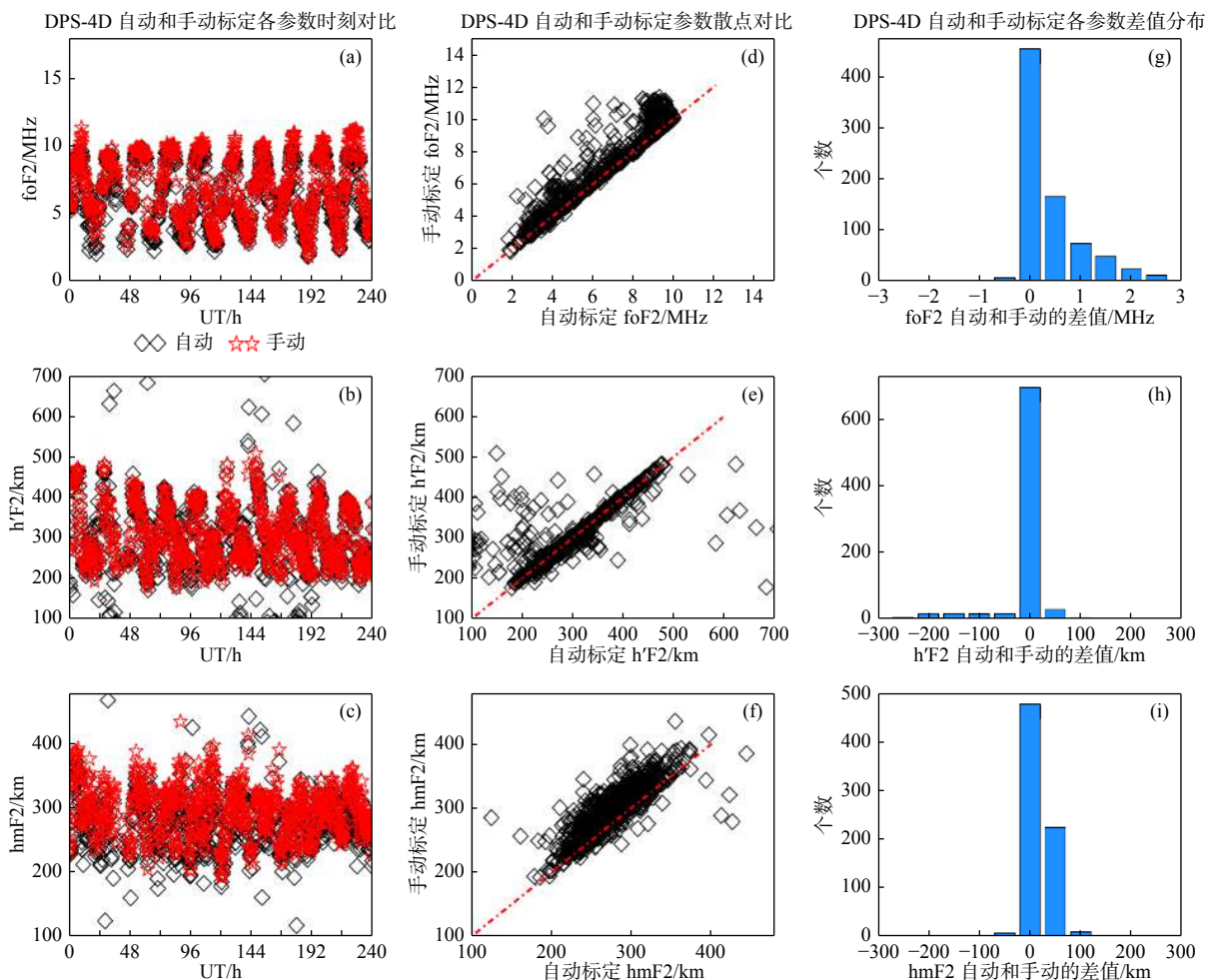


图 9 2021 年 6 月 11—23 日 DPS-4D 观测参数的自动度量和手动度量结果对比 (a-c)、散点对比 (d-f) 和偏差分布 (g-i)

Fig. 9 Comparison between auto-scaled and manual-scaled parameters of the DPS-4D, from 2021-06-11 to 2021-06-23 UT

-25~25 km 之间, 但有较多偏差值出现在 25~75 km 之间 (正偏离, 自动度量结果偏高); 计算表明, 其平均偏差为 17.25 km, 相关系数为 0.746.

### 3.3 两台设备度量结果的对比

#### 3.3.1 自动度量结果对比

图 10 给出了在 2021 年 6 月 11—23 日期间样机和 DPS-4D 观测到的 foF2、h'F2 和 hmF2 自动度量结果对比 (图 10a-10c)、散点对比 (图 10d-10f) 和差异分布 (DPS-4D 的值减去样机的值, 图 10g-10i). 从图 10a-10c 逐一时刻的对比可以看出, 除个别时刻外, 两台设备的自动度量结果较为一致.

从图 10g 可以看出, 两台设备自动度量的 foF2 偏差主要分布在 -0.25~0.25 MHz 之间, 但 0.25~2 MHz 之间的偏差值相对较多. 这说明样机自动度量值相对 DPS-4D 的自动度量值偏大. 计算表明, 偏差平均值为 -0.60 MHz, 两台设备度量结果之间

的相关系数为 0.915.

对 h'F2, 图 10e 给出了自动度量结果的散点对比, 可以看到少量点出现偏差较大的情况; 从图 10h 可以看出, h'F2 的偏差主要分布在 -25~25 km 之间; 计算表明平均偏差为 -9.12 km, 相关系数为 0.629.

对 hmF2, 从图 10i 可以看出, hmF2 的主要偏差都在 -25~25 km 之间; 计算表明, 其平均偏差为 -2.61 km, 相关系数为 0.297.

#### 3.3.2 手动度量结果对比

基于样机和 DPS-4D 获取的频高图, 采用 SAO Explorer 进行手动度量, 获取 foF2、h'F2、hmF2 参数. 图 11 给出了在 2021 年 6 月 11—23 日期间样机和 DPS-4D 观测到的 foF2、h'F2 和 hmF2 手动度量结果对比 (图 11a-11c)、散点对比 (图 11d-11f) 和差异分布 (图 11g-11i). 从图 11a-11c 逐一时刻的对比可以看出, 除个别时刻外, 两种设备手动度

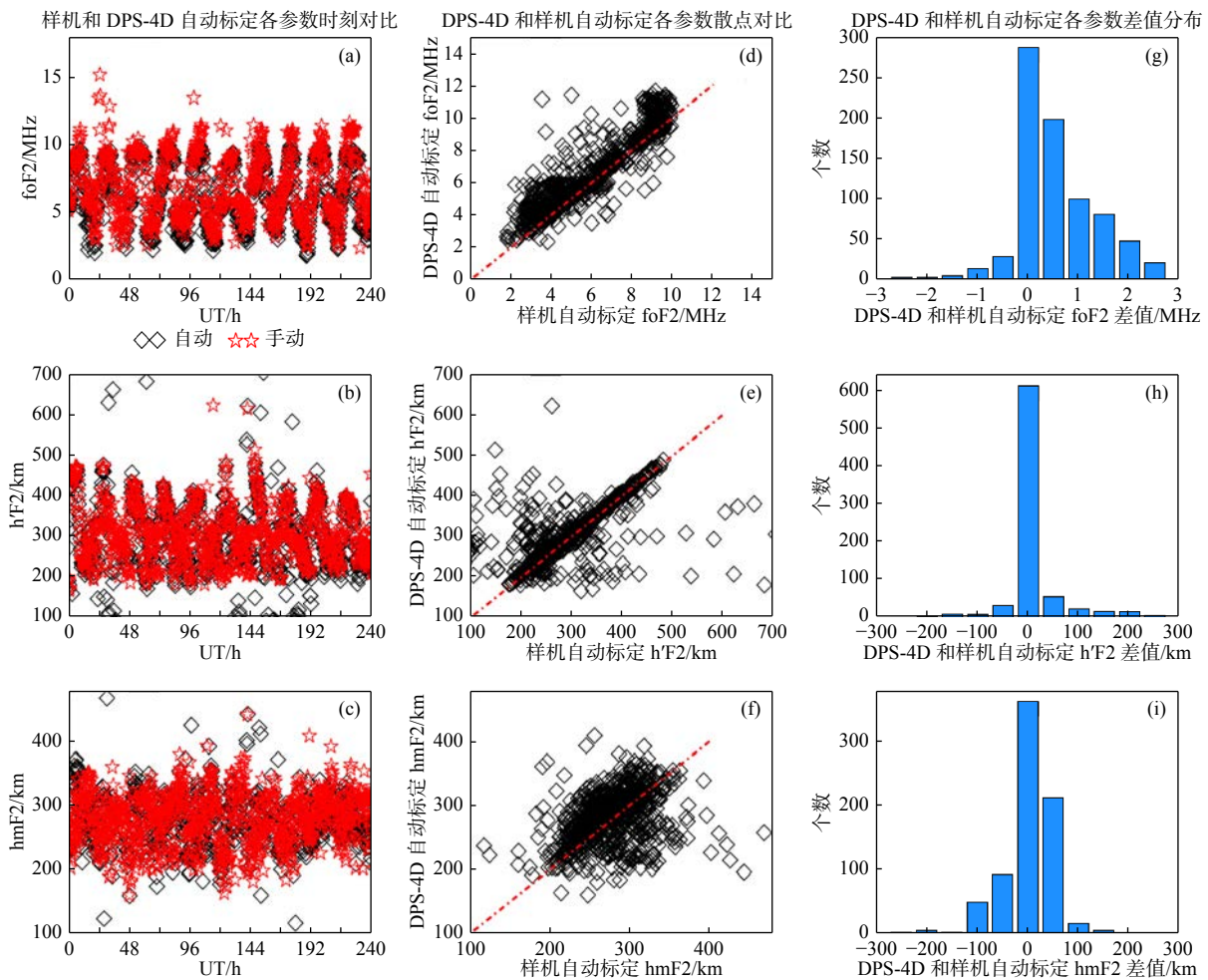


图 10 在 2021 年 6 月 11—23 日期间样机和 DPS-4D 观测到参数的自动度量结果对比 (a-c)、散点对比 (d-f) 和偏差分布 (g-i)

Fig. 10 Comparison between auto-scaled parameters of the prototype digisonde and the DPS-4D, from 2021-06-11 to 2021-06-23 UT

量结果非常一致。

从图 11g 可以看出, 两台设备手动度量 foF2 的偏差主要分布在 -0.25~0.25 MHz 之间, 0.25~1.75 MHz 之间的少量分布表明样机的度量值相对 DPS-4D 有偏低趋势。计算表明, 两种度量结果偏差平均值为 -0.13 MHz, 相关系数为 0.991。

从图 11h 可以看出, h'F2 的主要偏差都在 -25~25 km 之间; 计算表明平均偏差为 -3.21 km, 相关系数为 0.979。

从图 11i 可以看出, hmF2 的偏差主要分布在 -25~25 km 之间, 但在 25~75 km 之间也存在少量分布 (样机相对 DPS-4D 偏低); 计算表明, 其平均偏差为 14.7 km, 相关系数为 0.904。

### 3.3.3 漂移测量对比

具备多个接收天线的电离层测高仪可以采用干涉的方法确定回波到达角, 从而利用斜向回波对电

离层的漂移速度进行测量 (Reinisch et al., 1998)。漂移测量过程一般在扫频垂直探测后进行, 采用实时获取的 foF2、foE (对扫频探测获取的频高图进行自动度量的结果) 附近的频率分别对 F 层和 E 层的漂移速度进行多普勒测量。测试期间, 样机采用了固定的频率 (5 MHz) 开展漂移探测, 导致测量结果与 DPS-4D 偏差很大。研制单位对此进行了改进, 增加了参数传递与频率复用功能。由于漂移测量的准确性主要取决于数据处理算法, 因此采用样机的数据处理软件对 DPS-4D 的漂移探测数据进行处理并与 DPS-4D 自身的漂移数据进行对比。图 12 为各自处理得到的漂移天空图。可见二者具有较好的一致性, 验证了样机漂移数据处理算法的正确性。

2022 年 3 月在海南儋州对样机进行了补充测试。图 13 所示为 2022 年 3 月 27—28 日样机与 DPS-4D 在临近时刻探测得到的漂移速度对比。由图可见三个方向漂移速度具有较为一致的变化规律 (经向

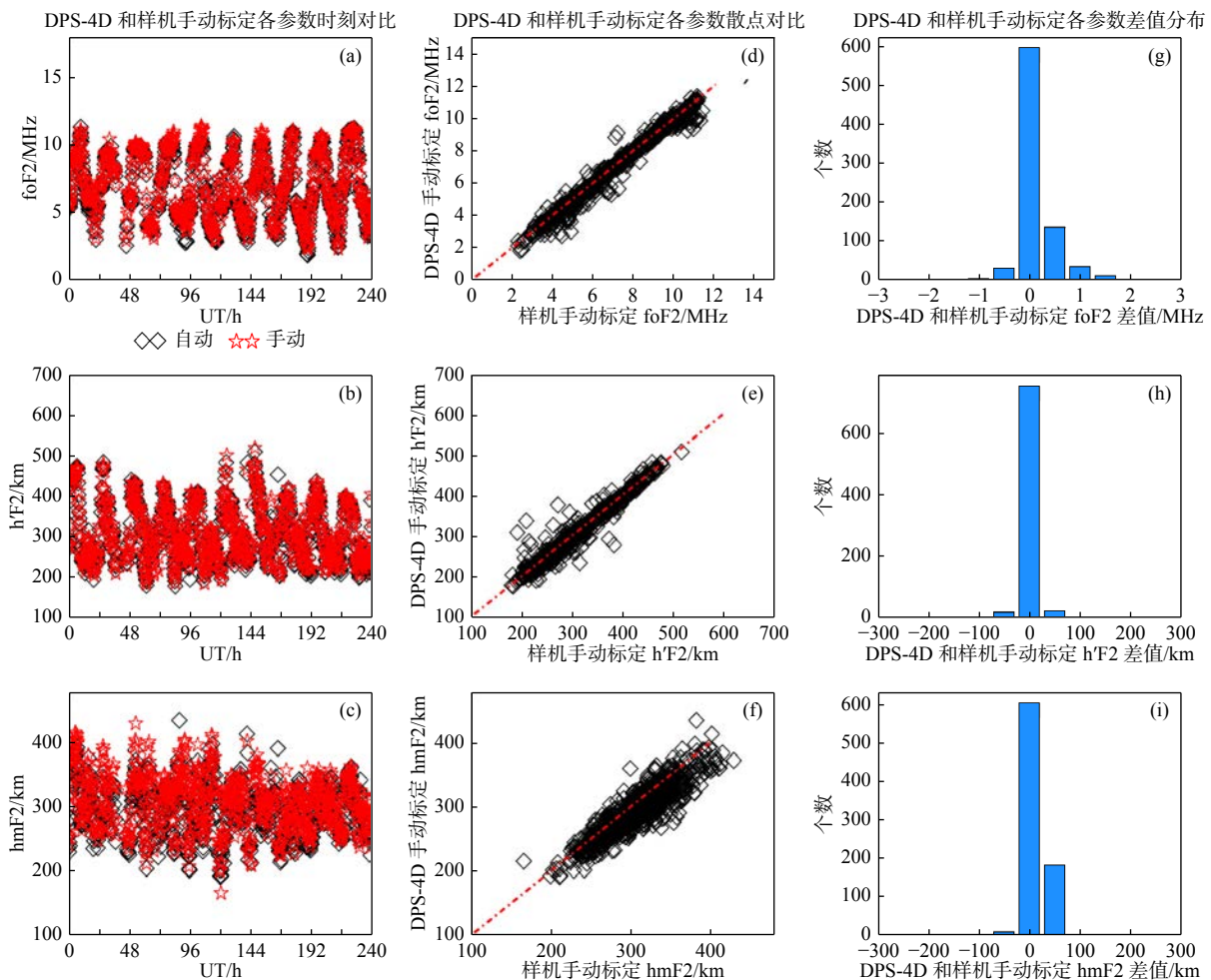


图 11 在 2021 年 6 月 11—23 日期间样机和 DPS-4D 观测到参数的手动度量结果对比 (a-c)、散点对比 (d-f) 和偏差分布 (g-i)

Fig. 11 Comparison between manual-scaled parameters of the prototype digisonde and the DPS-4D, from 2021-06-11 to 2021-06-23 UT

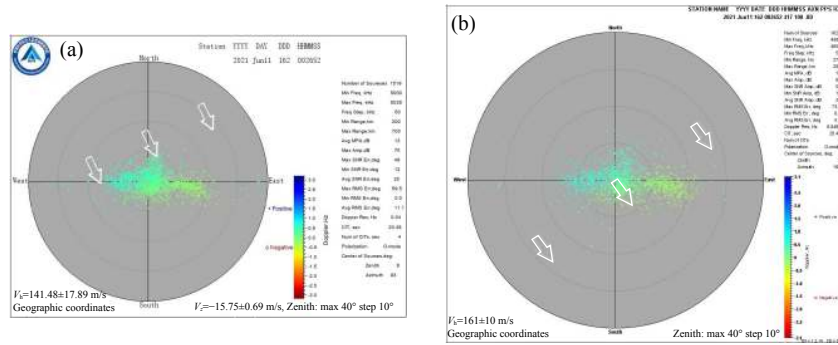


图 12 采用样机软件处理 DPS-4D 探测数据 (a) 与 DPS-4D 自身处理的漂移探测数据 (b) (2021-06-11 00:26:52)  
 Fig. 12 DPS-4D drift sky map produced by prototype digisonde software (a) and DPS-4D software (b)

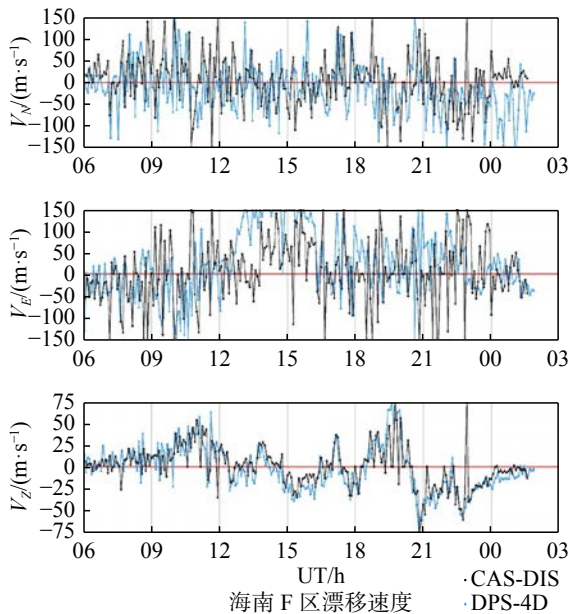


图 13 样机 (黑色) 与 DPS-4D (蓝色) 漂移测量结果对比 (2022-03-27 06:01:52 UT 至 2022-03-28 01:56:52 UT)  
 Fig. 13 Drift measurements from the prototype digisonde (black) and DPS-4D (blue), from 27 March 2022, 06:01:52 UT to 28 March 2022, 01:56:52 UT

漂移速度大致符合白天西向、夜间东向的规律), 表明样机获得了与 DPS-4D 相当的漂移测量能力. 同时, 两组数据也存在较显著的差异: 样机获取的数据存在更多的突跳, 夜间东向漂移的规律在 DPS-4D 获取的速度 ( $V_E$ ) 中表现得更为显著.

图 14 所示为 2022 年 3 月 27 日样机与 DPS-4D 在临近时刻探测得到的漂移天空图. 其中, 图 14a、14b 为两台设备相似度较高的典型探测结果, 图 14c、14d 为两台设备差异较明显的典型探测结果.

需要指出的是, 漂移测量依赖于来自电离层起伏扭曲、不规则体等结构的斜向回波. 相对电离层整体分布形态, 这类结构尺度较小且变化较快. 这

可能导致探测周期错开、位置稍有差异的两台设备探测结果之间出现不一致的情况.

### 4 讨论

为了获得良好的数据质量, 电离层数字测高仪首先需要获取距离准确、信噪比足够的回波信号. 这取决于设备硬件以及信号处理、干扰抑制等随机软件的性能. 通过对比在不同电离层状态下获取的频高图图像, 可见样机与 DPS-4D 的探测能力基本处于同等水平. 基于各自的频高图度量获得的电离层参数基本一致 (图 11), 同样也验证了样机的探测能力. 样机发射天线辐射增益低于 DPS-4D 发射天线, 采用较大的发射功率后, 其等效辐射功率理论上高于 DPS-4D, 这有利于提升接收信噪比. 鉴于节能减排、野外稳定运行以及无线电环境保护等方面对设备低功耗的普遍需求, 国产化测高仪发展过程中还需探索如何进一步提升系统的噪声抑制能力, 在降低发射功率的同时保证探测结果的质量. 在距离的准确性方面, 样机考虑了硬件延迟, 一、二次回波的虚高是匹配的. 实际上, DPS-4D 本身就采用了对一、二次回波虚高的校准来进行硬件延迟的定期标定 (Galkin et al., 2009). 因此, 包含前期选型测试的子午工程二期测高仪测试过程也为设备日常运行期间的标定积累了经验.

另一方面, 电离层参数的准确性极大地依赖于设备所采用的度量算法和度量软件. DPS-4D 的度量软件 ARTIST 经过多年的发展, 已经发布了 5.0 版本. 本次测试中采用的 DPS-4D 所运行的软件为 4.5 版本. 样机自动度量软件具备自主知识产权, 基于数学形态学以及图论等算法开发, 具有运算复杂度低和可实时操作的优点 (Chen et al., 2018).

对于清晰连续的电离层频高图, 各类算法一般

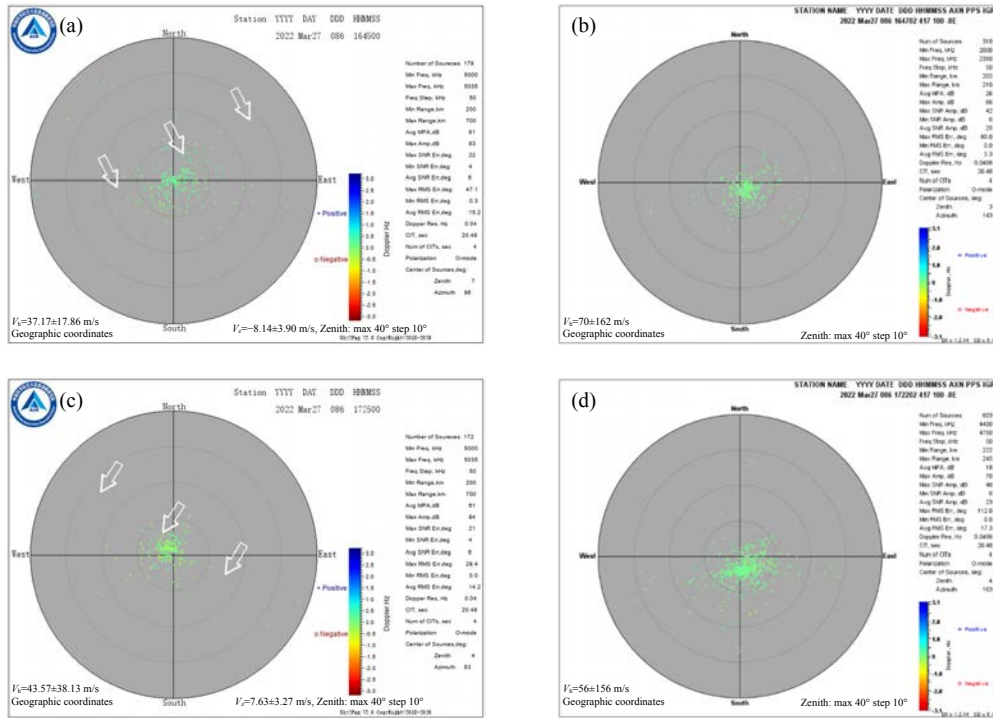


图 14 样机(左)与 DPS-4D(右)漂移天空图对比 (2022-03-27 16:45:00 UT—17:25:00 UT)

Fig. 14 Drift skymap from the prototype digisonde (left) and DPS-4D (right), 27 March 2022, 16:45:00 UT, 17:25:00 UT

都可以给出可靠的度量结果. 但这样的条件往往难以满足. 比如, 高频无线电波段存在的大量干扰以及为了避免干扰其他设施而采取的跳频探测导致电离层频高图出现中断. 在老版本的 ARTIST 软件中, 这类中断常导致 foF2 被错误地定位在中断的位置. ARTIST4.5 较好地解决了这个问题 (Reinisch et al., 2005). 图 15 为本次测试期间获取的这类频高图的典型例子 (在 9.5~10 MHz 之间出现中断), 样机和 DPS-4D 均可以不受中断的影响正确地度量 foF2 参量.

本次测试的数据质量分析主要采用样机与 DPS-4D 参量直接对比的方式, 选取的电离层参量包括

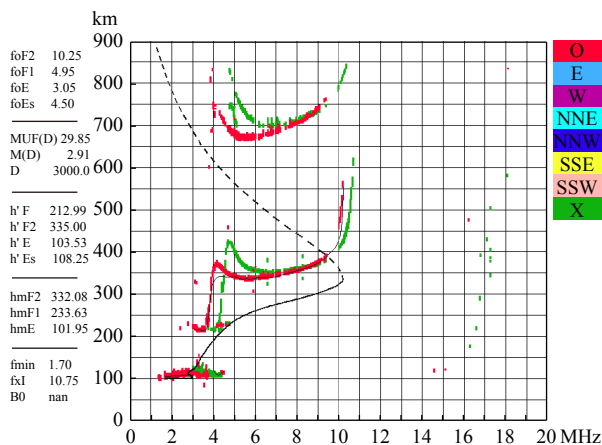


图 15 样机对断续电离图的度量

Fig. 15 An example ionogram with intermittent trace and results scaled by the prototype digisonde

h'F2、hmF2、foF2. 同时也对比分析了同批次频高图两次手动度量的结果, 以验证手动度量的准确性; 对样机和 DPS-4D 各自的自动度量结果也进行了手动验证. 对比分析结果表明, 样机度量算法和软件与 DPS-4D 水平相当, 度量结果可接受. 对比分析结果汇总如表 3 所示, 可以作为制定数据准确性对比指标的参考. 需要注意的是, 指标的具体取值与测试地点有关. 特别是, 不同纬度的电离层扰动程度不同. 本次测试地点在位于低纬度的海南地区, 即使是地磁平静期间, 其电离层扰动也比中纬度区域更强. 因此, 表 3 所示的偏差值在中纬度地区将是较为宽松的要求.

从表 3 可见, foF2 的相关系数均很高, 偏差较小. hmF2 的各项相关系数均低于 foF2, 原因可能是在电子密度峰值高度附近的描述特别陡峭, 微小的 foF2 偏差可导致很大的 hmF2 变化. 样机自动度量 hmF2 和手动度量 hmF2 的相关系数只有 0.388, 说明样机的自动度量准确度还有待提升.

样机对电离层参数度量失准的例子, 总体来说可以归纳为如下两种情形: (1) 自动度量软件对较为清晰的、常规的频高图度量错误; (2) 出现强扩展 F 或 Es 等电离层不规则体导致难以准确度量. 如图 16a-16c, 自动度量软件分别出现对 foF2 的度量错误、F1 层度量缺失、hmF2 度量失败等问题. 这类频高图通过手动度量都可以较准确地给出

表 3 电离层参量度量值对比结果汇总

Table 3 Summary of ionosphere parameters comparison results

	foF2	hmF2	h'F2
两次手动度量对比(样机)	偏差均值: 0.08 MHz 相关系数: 0.995	偏差均值: 3.25 km 相关系数: 0.976	偏差均值: 1.3 km 相关系数: 0.939
自动度量对比手动度量(样机)	偏差均值: 0.02 MHz 相关系数: 0.948	偏差均值: 28.39 km 相关系数: 0.388	偏差均值: 0.39 km 相关系数: 0.844
自动度量对比手动度量(DPS-4D)	偏差均值: 0.46 MHz 相关系数: 0.952	偏差均值: 17.25 km 相关系数: 0.746	偏差均值: 7.17 km 相关系数: 0.744
样机对比DPS-4D(自动度量)	偏差均值: -0.6 MHz 相关系数: 0.915	偏差均值: -2.61 km 相关系数: 0.297	偏差均值: -9.12 km 相关系数: 0.629
样机对比DPS-4D(手动度量)	偏差均值: -0.13 MHz 相关系数: 0.991	偏差均值: 14.7 km 相关系数: 0.904	偏差均值: -3.21 km 相关系数: 0.979

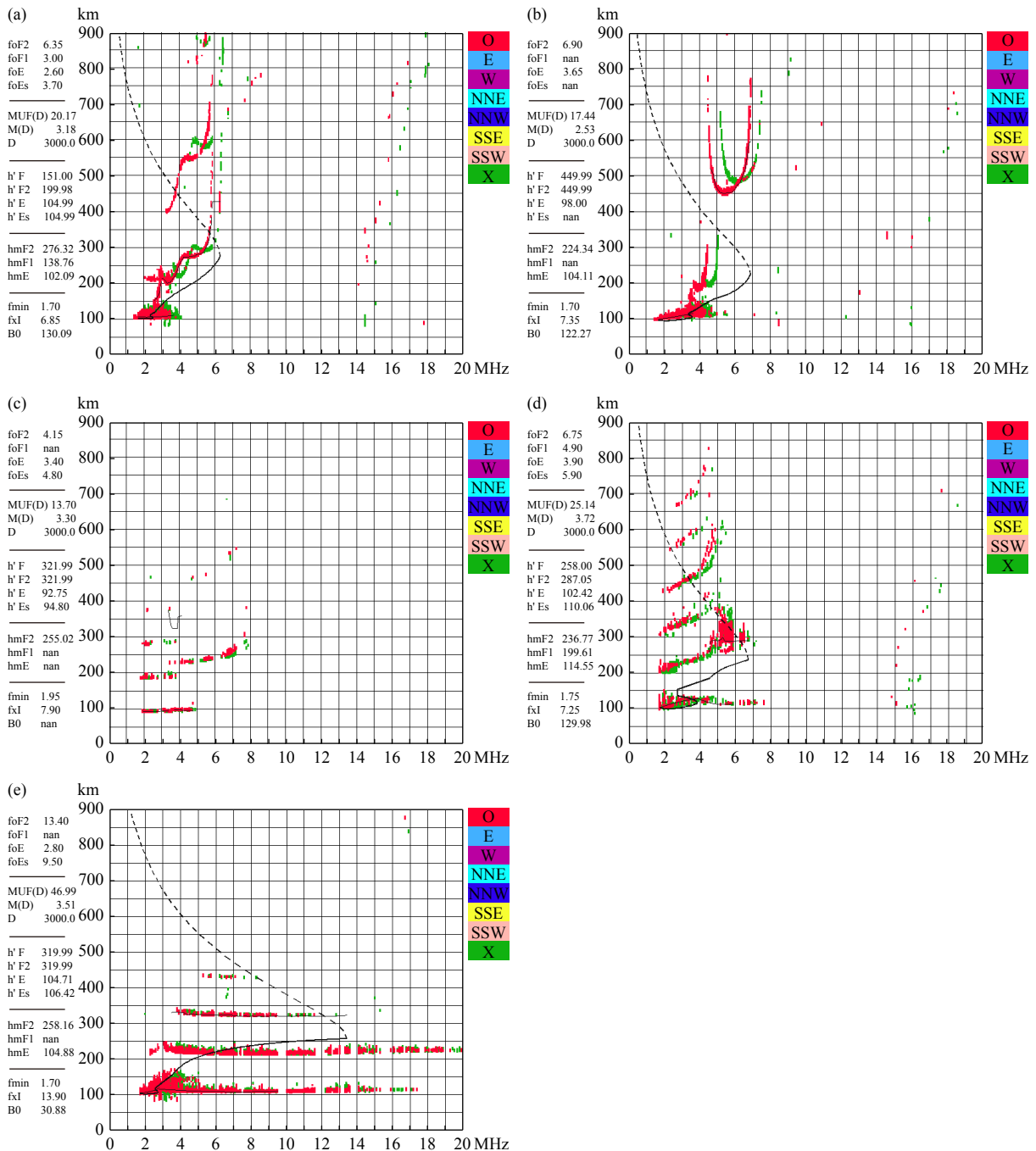


图 16 样机自动度量失准的样例

Fig. 16 Example ionograms that the prototype digisonde failed to correctly scaled

相应的参数. 而图 16d 显示自动度量软件错误地将频率扩展 F (Frequency Spread F) 的最高频率当成了 F2 层临界频率 ( $f_oF_2$ ); 图 16e 显示了强 Es 遮蔽 F 层回波的情形, 这时度量软件是无能为力的. 正如前文所述, 频高图的度量算法还在不断发展, 图 16 所示的例子表明样机的度量算法存在改进空间.

除垂测、漂移探测功能外, 样机还具备斜测探测能力, 图 17 所示为样机在海南儋州进行补充测试时得到的斜测电离层频高图, 接收来自武汉的与样机同型号测高仪的发射信号.

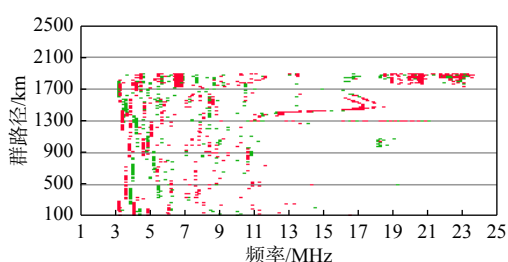


图 17 样机的斜测电离层频高图 (儋州-武汉)

Fig. 17 Ionogram with slant echo between Danzhou and Wuhan

## 5 结 论

子午工程二期采取与成熟型号 DPS-4D 同址运行对比的方式对电离层数字测高仪进行了样机测试. 通过频高图质量对比,  $f_oF_2$ 、 $hmF_2$ 、 $h'F_2$  等三个电离层参数以及漂移速度的对比, 对样机的数据质量进行了评估. 可以得出如下结论:

(1) 样机的各类技术指标均满足要求. 其中发射频谱较 DPS-4D 稍宽, 发射功率更大, 从电磁兼容、节能环保的角度可以继续优化;

(2) 样机获取的频高图图像质量与 DPS-4D 相当, 两台设备手动度量参数基本一致, 检验了样机基础的信号接收处理能力. 由于样机的等效辐射功率更大, 其回波信号更强, 有利于频高图的判读;

(3) 对频高图的自动度量, 样机相比 DPS-4D 还存在不足, 特别是  $hmF_2$  参数的自动度量结果偏离手动度量结果较大. 但两台设备的自动度量结果的可靠性均低于手动度量, 发展更优的自动度量算法依旧是普遍面临的问题;

(4) 经过改进, 样机实现了正确的漂移测量. 其测量结果可以反映电离层漂移速度的昼夜变化.

综上, 样机在硬件和基础的信号处理方面达到了与 DPS-4D 相当的水平, 下一步将在自动度量方面开展进一步的研究工作, 提高自动度量的准确性. 本次样机测试通过设备间的对比, 可以很好地反映设备的数据质量特性, 对于技术方案的选择和优化很有价值.

## 致谢

子午工程二期电离层数字测高仪的国产化过程在工程指挥部的领导下开展, 特此表示感谢; 感谢海南空间天气国家野外科学观测研究站提供样机测试的场地; 感谢中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划 (YSBR-018) 和国家重点实验室专项基金项目.

## References

- Bodo W R, Ivan A G, Grigori M K, et al. 2008. Advancing digisonde technology: The DPS-4D[C]// AIP Conference Proceedings 974, 127.
- Chen Z W, Gong Z Q, Zhang F, et al. 2018. A new ionogram automatic scaling method[J]. *Radio Science*, 53(9): 1149-1164. DOI: 10.1029/2018RS006574.
- Ding Z H, Ning B Q, Wan W X, et al. 2007. Automatic scaling of F2-layer parameters from ionograms based on the empirical orthogonal function (EOF) analysis of ionospheric electron density[J]. *Earth Planets Space*, 59: 51-58.
- Galkin I A, Khmyrov G M, Kozlov A V, et al. 2008. The ARTIST 5[M]// Song P, Foster J, Mendillo M. Radio Sounding and Plasma Physics, 974, 150-159. doi: 10.1063/1.2885024.
- Galkin I A, Reinisch B W, Grigori M K, et al. 2009. Accuracy of virtual height measurement[R]. INAG Technical Memorandum.
- Klaus B. 1998. Evolution of the ionosonde[J]. *Annali Di Geofisica*, 41: 5-6.
- Lan J P, Nig B Q, Zhu Z P, et al. 2019. Development of agile digital ionosonde and its preliminary observation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 39(2): 167-177 (in Chinese).
- Pezzopane M, Scotto C. 2007. Automatic scaling of critical frequency  $f_oF_2$  and MUF(3000)F2: A comparison between Autoscala and ARTIST 4.5 on Rome data[J]. *Radio Science*, 42(4): 1-17. DOI: 10.1029/2006RS003581.
- Piggott W R, Rawer K. 1972. URSI handbook of ionogram interpretation and reduction (Second Edition)[R]. World Data Center A Report UAG23, USA Department of Commerce, 68-73.
- Pradere E A, Weatherhead E C, Dandenault P B, et al. 2019. Critical issues in ionospheric data quality and implications for scientific studies[J]. *Radio Science*, 54(5): 440-454. DOI: 10.1029/2018RS006686.
- Reinisch B W, Scali J L, Haines A M. 1998. Ionospheric drift measurements with ionosondes[J]. *Annali DI Geofisica*, 41(5-6): 695.
- Reinisch B W, Huang X Q, Galkin I A, et al. 2005. Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes[J]. *Journal of Atmosphere Solar-Terrestrial*



- [Physics](#), 67(12): 1054-1062.
- Reinisch B W, Galkin I A, Khmyrov G M, et al. 2009. New Digisonde for research and monitoring applications[J]. [Radio Science](#), 44: RS0A24. DOI: [10.1029/2008RS004115](#).
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. [Space Weather](#), 8: S08001. DOI: [10.1029/2010SW000603](#).
- Wang C, Chen Z Q, Xu Y Y. 2020. Introduction to Chinese Meridian Project-Phase II[J]. [Chinese Journal of Space Science](#), 40(5): 718-722.
- Wang G J, Shi J K, Wang X, et al. 2007. Strong range spread-F characteristics observed in Hainan during intense storm[J]. [Chinese Journal of Space Science](#), 27(5): 379-383 (in Chinese).
- Wang G J, Shi J K, Reinisch R B, et al. 2015. Ionospheric plasma bubbles observed concurrently by multi-instruments over low-latitude station Hainan[J]. [Journal of Geophysical Research: Space Physics](#), 120(3): 2288-2298. DOI: [10.1002/2014JA020245](#).
- Wang S, Chen Z W, Zhang F, et al. 2014. A new design for digital ionosonde[J]. [Chinese Journal of Space Science](#), 34(6): 849-857 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 蓝加平, 宁百齐, 朱正平, 等. 2019. 敏捷数字电离层测高仪系统研制及初步观测[J]. [空间科学学报](#), 39(2): 167-177.
- 王国军, 史建魁, 王霄, 等. 2007. 海南地区强磁暴期间强区域扩展 F 事件研究 [J]. [空间科学学报](#), 27 (5): 379-383
- 王顺, 陈紫微, 张锋, 等. 2014. CAS-DIS 数字电离层测高仪系统研制[J]. [空间科学学报](#), 34(6): 849-857.

郝永强, 代国峰, 张东和, 肖佐. 2024. 子午工程二期电离层高频多普勒监测仪初步观测结果. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 53-65. doi: [10.19975/j.dqyxx.2023-001](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-001).

Hao Y Q, Dai G F, Zhang D H, Xiao Z. 2024. Preliminary results of the ionospheric high-frequency Doppler shift monitor for the Phase II of Chinese Meridian Project. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 53-65 (in Chinese). doi:[10.19975/j.dqyxx.2023-001](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-001).

## 子午工程二期电离层高频多普勒监测仪初步观测结果

郝永强<sup>1</sup>, 代国峰<sup>2</sup>, 张东和<sup>2\*</sup>, 肖佐<sup>2</sup>

1 中山大学大气科学学院 行星环境与宜居性研究实验室, 珠海 519082

2 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

**摘要:** 子午工程二期计划在漠河、北京、武汉、深圳四地分别建设由一个发射站和三个接收站构成的电离层高频多普勒监测台阵. 本文介绍了为此研制的电离层高频多普勒监测仪的进展和试观测期间取得的一些观测结果. 通过与电离层测高仪进行交叉对比, 设备的性能和探测能力得到了验证. 目前该设备已部署 7 个站点进行试观测, 本文报告了该设备探测到的太阳耀斑导致的电离层扰动、电离层行进式扰动、大尺度电场导致的多站同时扰动等多种现象. 未来子午工程二期建成后, 该设备将具备我国上空北至漠河、南至广东的电离层扰动监测能力, 并与其它探测手段融合发挥空间天气综合监测网络的最大效能.

**关键词:** 电离层高频多普勒频移; 电离层扰动; 子午工程

doi: [10.19975/j.dqyxx.2023-001](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-001)

中图分类号: P352

文献标识码: A

## Preliminary results of the ionospheric high-frequency Doppler shift monitor for the Phase II of Chinese Meridian Project

Hao Yongqiang<sup>1</sup>, Dai Guofeng<sup>2</sup>, Zhang Donghe<sup>2\*</sup>, Xiao Zuo<sup>2</sup>

1 Planetary Environmental and Astrobiological Research Laboratory (PEARL), School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2 School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** The Phase II of Chinese Meridian Project plans to construct ionospheric Doppler sounding arrays around Mohe, Beijing, Wuhan, and Shenzhen. Each array consists of one transmitter station and three stations equipped with the ionospheric high-frequency Doppler shift monitor, which is described in this paper in terms of system design and preliminary results from its pilot operation. By comparison with a collocated ionosonde, the performance capability of the sounder is validated. At present, the sounders have been installed at seven stations and have been running continuously for about 1 year. This paper presents observations of various ionospheric disturbances caused by solar flare eruptions, travelling ionosphere disturbances, and probable large-scale electric field variations. Once established, the chain of sounder arrays will continuously monitor ionospheric disturbances over eastern China and contribute to the sophisticated space environment monitoring network of the Chinese Meridian Project.

**Keywords:** ionospheric high-frequency Doppler shift; ionospheric disturbances; Chinese Meridian Project

收稿日期: 2023-01-08; 录用日期: 2023-02-13

基金项目: 子午工程; 国家自然科学基金资助项目 (42074192, 41574144)

Supported by the Chinese Meridian Project and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42074192, 41574144)

第一作者: 郝永强 (1979-), 男, 教授, 主要从事电离层物理和电离层探测研究. E-mail: haoyq@mail.sysu.edu.cn

\*通信作者: 张东和 (1964-), 男, 教授, 主要从事电离层物理和电离层探测研究. E-mail: zhangdh@pku.edu.cn



## 0 引言

电离层高频多普勒探测始于 20 世纪五六十年代, 传统上主要利用持续、稳定的短波标准频率信号开展观测 (Ogawa, 1958; Watts and Davies, 1960), 原理是基于无线电波在电离层中反射面的高度变化会导致接收到电波频率发生偏移, 测量该频移量可以计算电离层反射面垂直运动的多普勒速度, 也就能获知电离层中发生的扰动. 国内从 1980 年代开始, 主要由原中国科学院武汉物理研究所和北京大学分别研制了第一代电离层多普勒探测设备, 对我国中部地区电离层扰动和不规则体、电离层对耀斑的响应、台风导致的电离层扰动和扩展 F 现象等问题开展了大量的研究 (李钧, 1983; 李利斌等, 1987; 宁百齐和李钧, 1996; 万卫星等, 1995, 1996; Wan et al., 1998; 肖赛冠等, 2006a, 2006b, 2012; Xiao et al., 2009, 2012; 肖佐等, 1987, 2002; Xiao et al., 2007; 张东和等, 1999).

在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 (一期)”的支持下, 2010 年新一代电离层高频多普勒监测仪部署在北京的 3 个台站和深圳的 1 个台站 (胡晓彦等, 2021; Wang, 2010). 基于其能灵敏捕捉电离层变化的特点, 其观测数据继续支撑开展了地震和海啸引发的电离层扰动、磁暴产生的大尺度扰动、电离层中的甚低频波动等研究 (Hao et al., 2006, 2012; Liu et al., 2019; Ouyang et al., 2016; Wang et al., 2021; Zhao and Hao, 2015). 在此期间, 国际上的新一代电离层高频多普勒探测能力也迅速发展, 在法国、捷克、日本、南非、阿根廷及我国台湾地区均建立了地区性的监测站网, 多采用 3 站组成一个台阵的方式, 以加强探测电离层扰动传播速度的能力 (Farges et al., 2003; Laštovička and Chum, 2017; Liu et al., 2016).

子午工程二期于 2019 年开工, 项目计划在漠河、北京、武汉、深圳四个地区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 (Liu et al., 2021; Wang et al., 2020). 发射站在 4.5 MHz 附近的频点上发射连续波, 无线电波经电离层反射后, 由接收站完成信号的接收、处理和数据产品的生成. 在过去三年里, 为子午工程二期研制的新型电离层高频多普勒监测仪已完成设计制造和出厂测试等环节, 并已在多站完成部署, 开展了试观测. 本文将介绍该设备试观

测期间取得的一些结果, 以验证设备的探测能力及性能指标的达成情况.

## 1 电离层高频多普勒频移探测原理及系统设计

对于在电离层中传播的高频无线电波, 设电波发射后经过时间  $t$  被反射回地面, 则此时回波信号的相位为 (龙威灵和侯杰昌, 1979):

$$\Phi = \omega_0 t - \int_S \frac{dS}{\lambda} \quad (1)$$

其中  $\omega_0$  为电波角频率,  $\lambda$  为电波在电离层介质中的波长,  $S$  为电波传播路径. 电波的频率则可表示为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt} = f_0 - \frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_S \mu dS \quad (2)$$

其中  $c$  为真空中的光速,  $\mu = \sqrt{1 - \frac{KN}{f^2}}$  为电波传播路径上的相折射指数,  $N$  为电子密度,  $K \approx 80.6$  (采用国际单位制). 式中右侧第二项即为接收到的电波频率相对于发射时的偏移, 令  $P = \int_S \mu dS$ , 称为相路径 (刘选谋等, 1985). 可见频率偏移来自于相路径的时变, 其中包含了  $\mu$  的变化和  $S$  的变化:

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

在多普勒效应中, 多普勒频移通常可对应于探测对象的多普勒速度. 类似地, 如果把相路径  $P$  的变化等效于一种电离层反射面在垂直方向上的多普勒速度  $v$ , 则多普勒频移反映了该速度的大小. 当在地面垂直发射和接收电波时:

$$v = \frac{1}{2} \frac{dP}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{c \Delta f}{f} \quad (4)$$

传统电离层多普勒探测设备通常通过改造短波电台来实现, 并广泛使用短波授时台广播的标准频率信号. 对于 10 MHz 标准频率的信号, 电离层多普勒频移通常在 1 Hz 量级, 由上式可知对应反射面多普勒速度约为 15 m/s. 如要达到 0.1 Hz 的分辨率, 则要求接收系统的参考频率的精度和稳定性要高于  $10^{-8}$ . 随着电子技术的发展, 后来的探测设备采用紧凑的短波接收模块, 并由 GPS 驯服的恒温晶振提供高精度和高稳定度的参考频率信号, 在简化系统架构的同时保证了数据的质量. 近年来, 软件无线电技术 (Software Defined Radio, SDR) 则提供了更加灵活和经济的解决方案, 进一步简化了

设备的硬件设计和实现. 在电离层探测领域, 基于软件无线电架构的探测设备已经进行了一些成功的试验 (陈彦龙和张援农, 2015; 宁百齐和林晨, 2002), 表明该技术具有设计周期短、部署成本低、二次开发灵活等优势.

子午工程二期增设了发射站, 在 4.5 MHz 附近的频率发射连续波信号, 在接收站的电离层高频多普勒监测仪接收该信号并测量其多普勒频移, 频移测量范围为 $\pm 2$  Hz, 频率分辨率 0.1 Hz. 为达到该设

计指标, 要求设备频率准确度为 $\pm 10^{-10}$ , 频率稳定性为  $100 \text{ s}: \leq 5 \times 10^{-10}$ . 新一代设备采用模块化设计, 如图 1 所示, 以通用的软件无线电平台作为射频接收前端, 降低前端设计的复杂度和开发成本, 通过计算机端软件编程实现对数字信号的移频、降采样、滤波等处理, 并通过数据后处理最终得到接收信号的多普勒频移. 在接收新的自主发射信号的同时, 具有兼顾接收传统常用的 5 MHz、10 MHz 短波授时标准频率信号的能力.

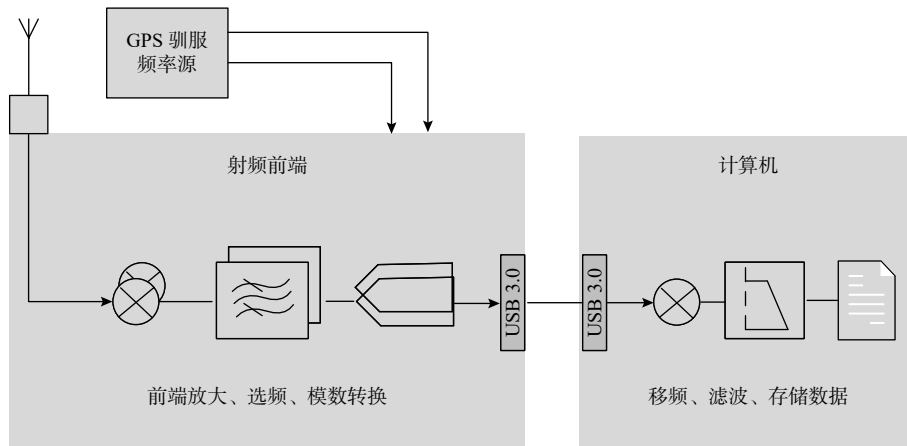


图 1 电离层高频多普勒监测仪系统框图

Fig. 1 System diagram of the high-frequency Doppler shift monitor

目前该设备已部署在表 1 所列的子午工程二期站点并开展试观测. 在试观测阶段, 主要通过两种工作模式对设备进行验证: 一是接收临近的发射站的信号; 二是接收来自陕西蒲城的国家授时中心的 5 MHz 和 10 MHz 标准频率信号, 此时各站接收的信号的电离层反射点可近似认为位于发射站和接收站之间的中点, 其地理位置如图 2 所示.

表 1 进行设备试观测的电离层高频多普勒监测站点经纬度

Table 1 Locations of the Doppler sounding stations

台站名	临时代码	地理经度/(°)	地理纬度/(°)
海淀北大站	BDT	116.31	39.99
昌平北大站	BCT	116.19	40.25
密云溪翁庄站	MDT	116.86	40.45
随州站	SUZ	113.32	31.57
崇阳站	CHY	114.13	29.51
武昌武大站	WHU	114.35	30.54
深圳南山站	SZT	113.97	22.60

## 2 观测数据验证及初步结果

### 2.1 与电离层测高仪数据对比验证

为验证设备观测数据的准确性, 与电离层测高

仪的观测进行了交叉对比. 为此, 在珠海设立发射站发射 4.997 MHz 连续波, 在深圳南山站 (SZT) 接收该信号. 两地直线距离约 50 km, 可近似认为信号垂直向上发射并被电离层反射, 从而可以与位于珠海的电离层测高仪的观测进行对比.

图 3 显示了两种设备在 2022 年 12 月 25 日的一段观测数据. 为方便对比, 将多普勒频移按公式 (4) 转换为电离层等效反射面的垂直多普勒速度, 如图 3b 中的蓝点所示, 可见在 11:00 UT 之后等效反射面发生明显的抬升, 而 11:45 UT 之后, 反射面转为具有向下的运动速度. 同时, 图 3a 中显示了这段时间测高仪观测的不同电离层虚高处的回波强度, 可见在多普勒频移发生变化的这段时间里, 电离层整体发生了显著的抬升和下降. 图中黑色的点是 5 MHz 频率信号反射处的虚高 (经过插值和平滑), 计算其时间变化率 ( $dh/dt$ ) 即为垂直运动的速度, 可以与 4.997 MHz 信号的多普勒观测进行比较, 如图 3b 所示. 两种观测手段均探测到了电离层的垂直运动, 验证了高频多普勒探测数据的真实性, 也可以看到高频多普勒探测具有较高的时间分辨率和频率/速度分辨率的优势. 但两种技术探测到的电离层变化幅度和形态也有所差异, 可能与两种技术不同的探测原理有关.

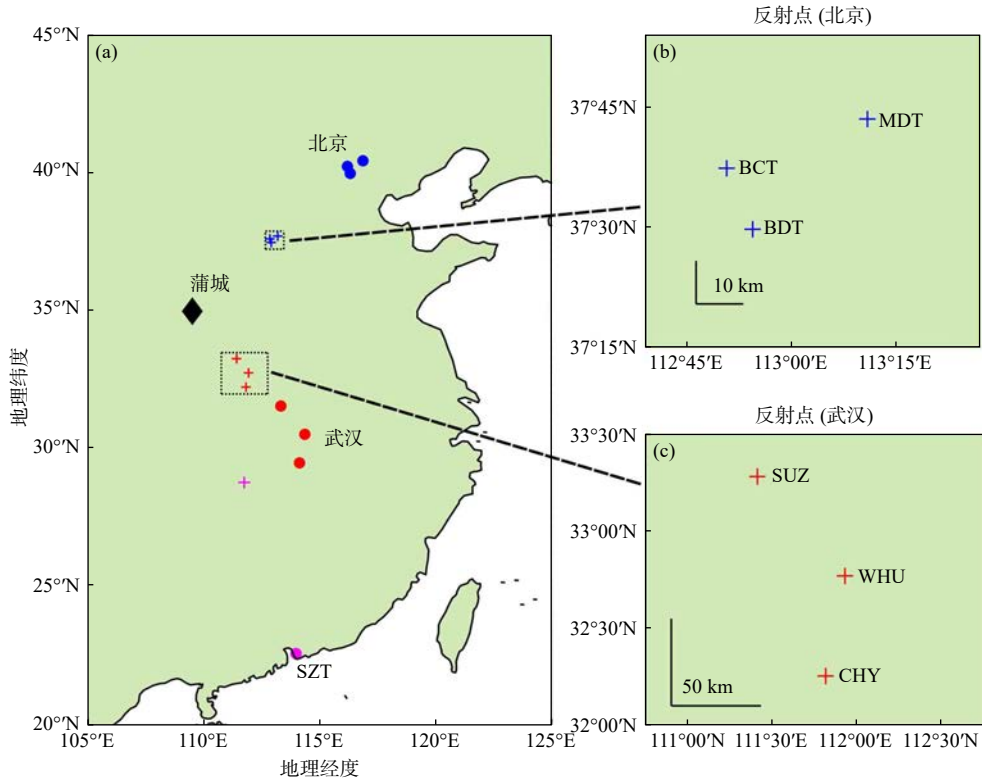


图 2 (a) 国家授时中心蒲城发射站与各高频多普勒接收站及电离层反射点的地理位置. 放大图显示了 (b) 北京和 (c) 武汉各站接收信号的电离层反射点的位置关系

Fig. 2 (a) Locations of the National Time Service Center (NTSC) Pucheng transmitter, the receivers, and the reflection points. Enlarged maps showing the geometry of the reflection points for the receivers around (b) Beijing and (c) Wuhan

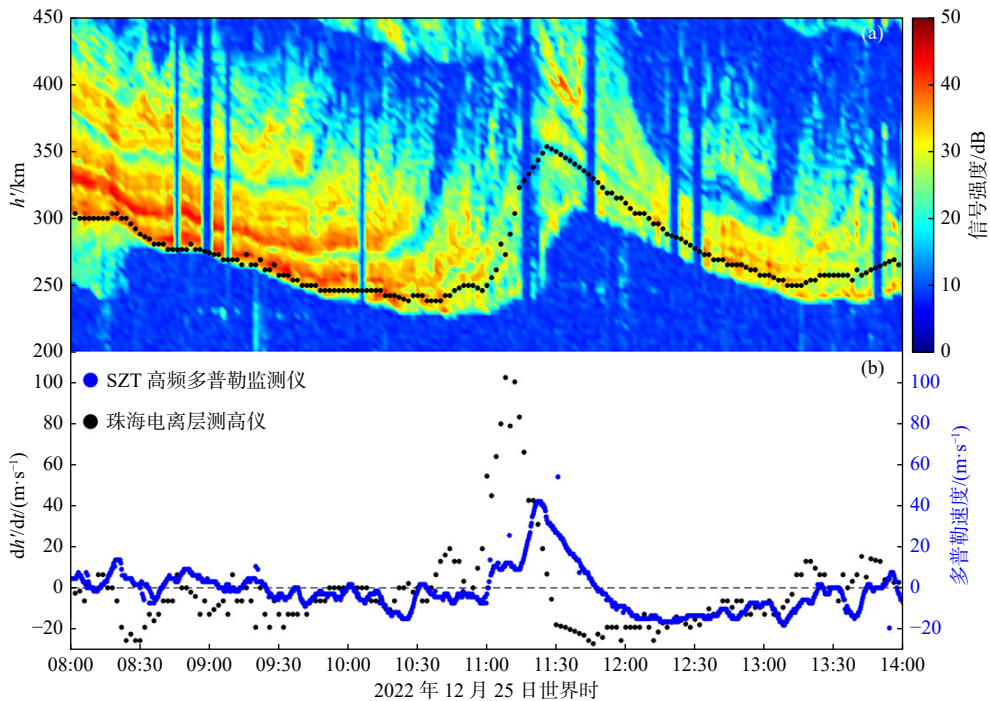


图 3 电离层多普勒频移监测与电离层测高仪观测对比

Fig. 3 Comparison between the ionospheric Doppler sounding and ionosonde observations

### 2.2 对太阳耀斑的电离层响应观测

在太阳耀斑期间, 太阳 X 射线和极紫外辐射的通量大幅增加, 导致电离层的电离度和结构快速

变化. 图 4 展示了一次发生在 2022 年 10 月 11 日的 M3.9 级耀斑, 在北京和武汉周边各站观测到 10 MHz 授时信号频率发生同时的突然变化. 此处显示

正的频移, 表示电离层等效反射面高度下降. 图 4f 中显示了风云 2H 卫星观测的太阳 X 射线通量及其时间变化率, 可见此次耀斑持续时间并不长, 并且多普勒频移的峰值与通量变化率的峰值有很好的对应关系. 在耀斑发生时, 电离层各高度处电子密度

都有显著的增加, 但对于此处所用的远距离 10 MHz 信号来说, 电离层反射点在峰值高度以下, 所以频移的变化主要由低高度电离层的电子密度变化导致, 根据多普勒频移观测可以估算这部分总电子含量的变化 (张东和等, 1999).

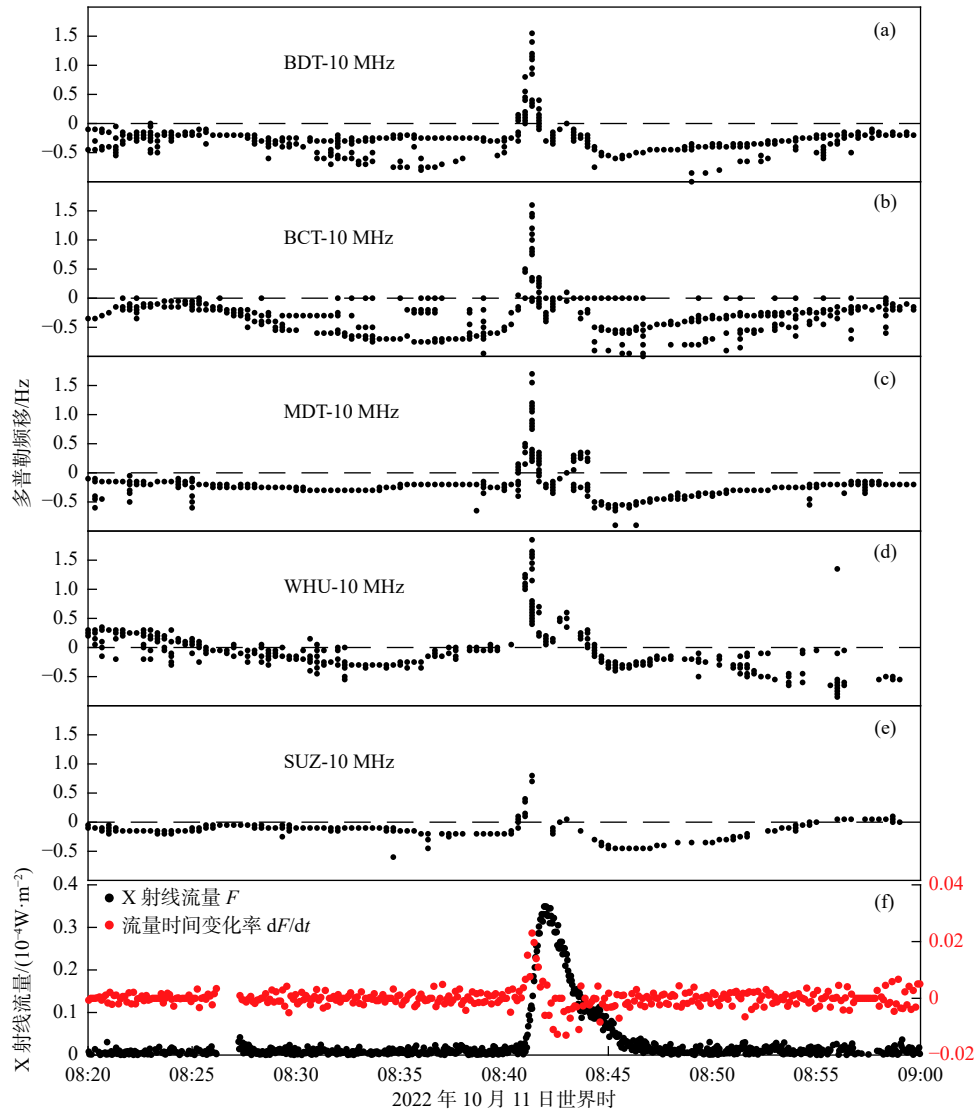


图 4 2022 年 10 月 11 日的 M3.9 级耀斑事件. (a-e) 北京及武汉附近各站电离层多普勒频移观测; (f) FY-2H 卫星观测的太阳 X 射线辐射流量及其时间变化率

Fig. 4 The M3.9 solar flare event on 11 October 2022. (a-e) Doppler frequency shift observed by the receivers around Beijing and Wuhan; (f) Solar X-ray flux recorded by the FY-2H satellite and its rate of change

图 5 显示了 2022 年 4 月 21 日的一次 M9.7 级耀斑事件. GOES-16 卫星观测的太阳 X 射线通量从 01:54 UT 开始上升, 信号迅速发生正的频移, 幅度超过 0.5 Hz. 之后很快信号中断, 导致多普勒频移无法测量, 在 02:05 UT 之后北京和武汉的台站重新接收到信号, 同时多普勒频移逐渐从 -0.5 Hz 恢复到零附近. 这次耀斑强度较大, 持续时间也较长. 信号中断是由于耀斑导致电离层的吸收显著增强, 衰减了电波信号的强度. 这一点从设备记录

的信号强度可以看到, 如图 6 所示, 耀斑期间信号强度迅速下降 30~50 dB, 导致信号中断; 在密云溪翁庄站 (MDT) 信号强度恢复较快, 而在较低纬度的深圳南山站 (SZT) 信号强度则恢复地非常缓慢, 表明耀斑增强的电离层吸收在不同纬度的衰减速度不同.

### 2.3 行进式电离层扰动观测

行进式电离层扰动 (Travelling Ionosphere dis-

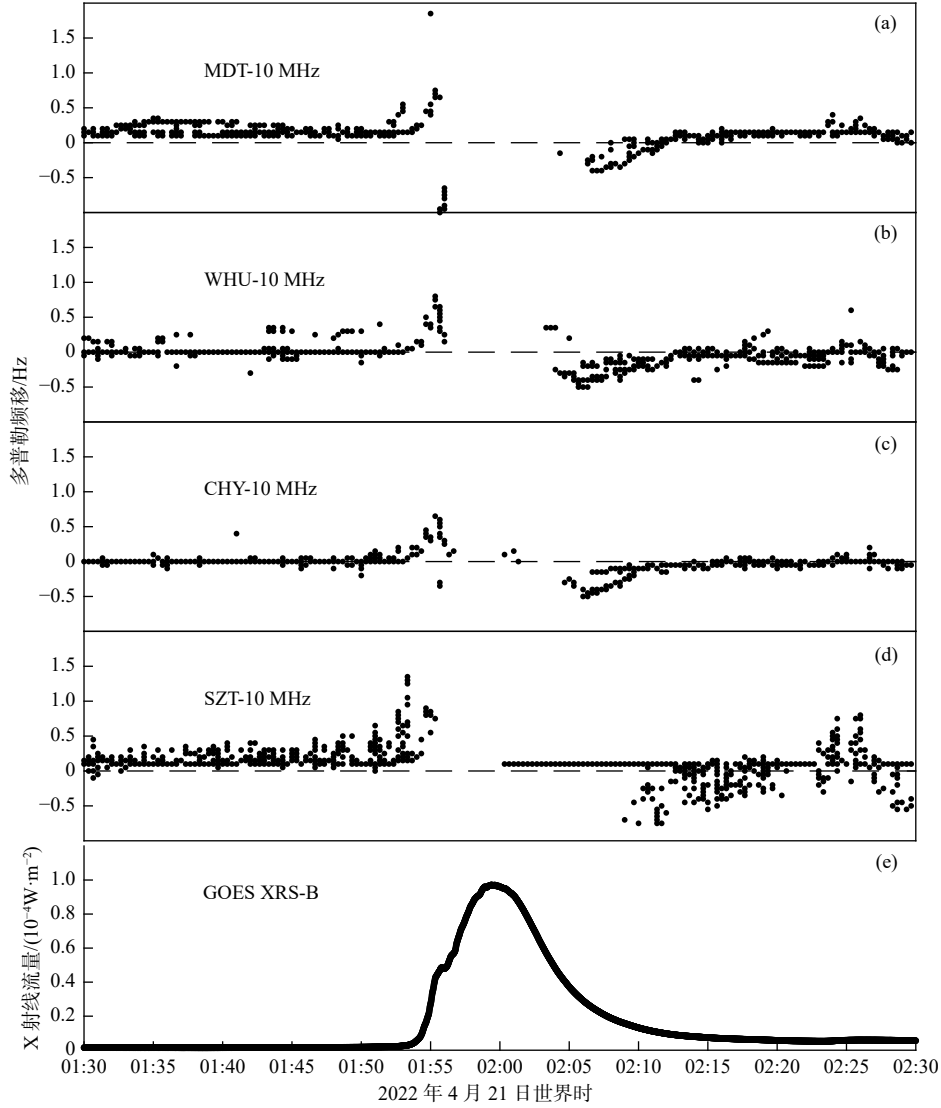


图 5 2022 年 4 月 21 日的 M9.7 级耀斑事件. (a-d) 北京、武汉、深圳附近各站电离层多普勒频移观测. (e) GOES-16 卫星观测的太阳 0.1~0.8 nm X 射线通量

Fig. 5 The M9.7 solar flare event on 22 April 2022. (a-d) Doppler frequency shift observed by the receivers around Beijing, Wuhan, and Shenzhen; (e) Solar X-ray flux recorded by the GOES-16 satellite

turbance, TID) 是另一种高频多普勒观测中常见也是重点关注的现象. 图 7 显示了 2022 年 8 月 24 日北京附近的三个台站 BDT、BCT 和 MDT 的一段观测数据, 可见周期约为 20 min 的两个波包的扰动. 三站观测到的扰动互相之间存在时延, 即有明显的相位差别, BDT 的相位最早, 接着是 MDT, BCT 最晚, 这表明扰动是以有限的速度在电离层中传播.

根据三个台站接收信号的反射点位置 (图 2) 及扰动的时延, 由以下方法反演扰动传播的速度. 假设是水平传播的大尺度扰动, 如果任两个反射点之间的距离远小于扰动的波长, 那么在这两个反射点之间的波场可近似为平面波. 已知三对或更多的反射点的相对位置  $(\delta x_i, \delta y_i)$  及其观测到扰动的时

差  $\delta t_i$ , 就可由最小二乘法拟合扰动传播的相速度 (Chum and Podolská, 2018):

$$J = \sum_{i=1}^N \left( \delta t_i - \frac{\delta x_i}{v_{xp}} - \frac{\delta y_i}{v_{yp}} \right)^2 \quad (5)$$

当  $J$  最小时拟合出扰动在东西和南北方向上的表观相速度  $v_{xp}$  和  $v_{yp}$ , 即可得到等相位面运动的方向, 及垂直于它的相速度大小:

$$v_g = \frac{v_{xp} v_{yp}}{\sqrt{v_{xp}^2 + v_{yp}^2}} \quad (6)$$

对于图 7 所示三个台站的多普勒频移时间序列, 选取 11:50—12:25 时段的数据, 使用交叉相关分析得到 BDT 和 BCT、BDT 和 MDT、BCT 和 MDT 之间的时间延迟分别为 80 s、20 s 和 -60 s. 利用上

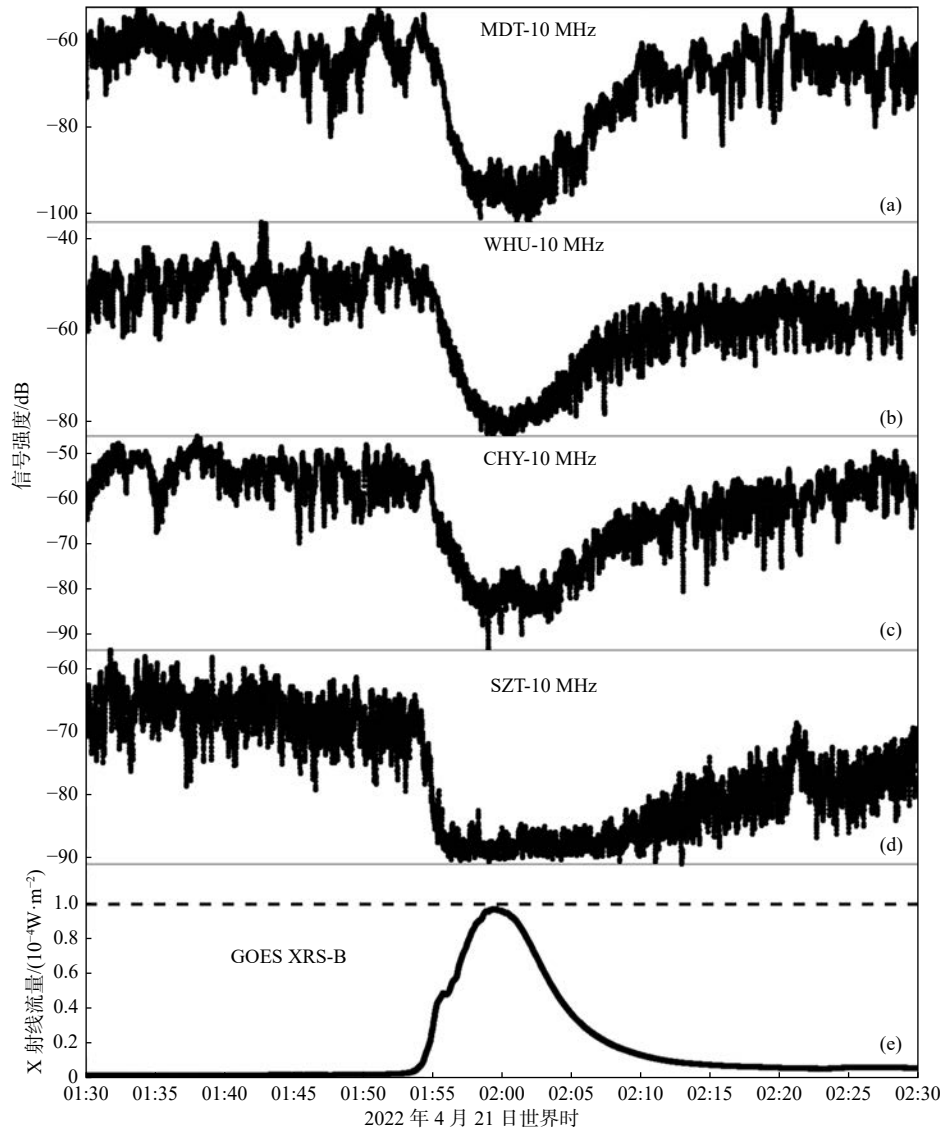


图 6 同图 5, (a-d) 显示各站接收到的信号强度

Fig. 6 Similar to Fig. 5, but showing (a-d) the signal power recorded by the receivers around Beijing, Wuhan, and Shenzhen

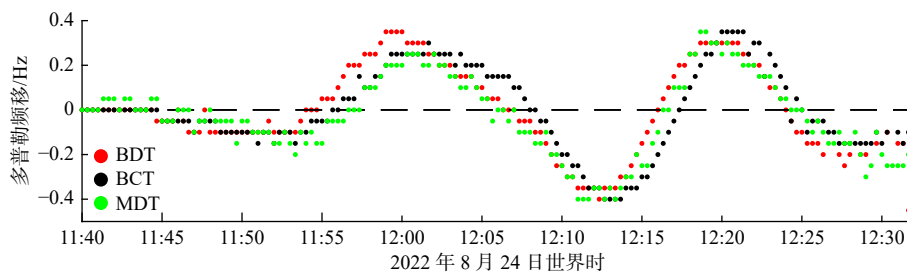


图 7 2022 年 8 月 24 日北京附近三站观测到的一次行进式电离层扰动

Fig. 7 Travelling ionospheric disturbances observed by three stations around Beijing on 24 August 2022

述拟合方法得到结果如图 8, 可知 TID 的传播速度  $v=178 \text{ m/s}$ , 方位角为  $-47^\circ$ , 即从东南向西北方向传播.

### 2.4 多站时间同步的电离层扰动现象观测

与行进式扰动不同的是, 观测中还发现一种时间上完全同步的扰动, 即在各站观测到的扰动不存

在延时. 图 9 所示为一次这种扰动的例子, 在 2022 年 2 月 1 日 22: 20 UT (北京时间 2 月 2 日日出前), 多个台站观测到多普勒频移先突然上升后缓慢下降, 至 22: 25 UT 负的频移达到最大, 之后缓慢恢复到之前的状态. 利用上一节提到的交叉相关性分析来寻找各台站之间的时延, 确认了扰动没有明显的时间延迟. 观测中也可以看到日出时电离层



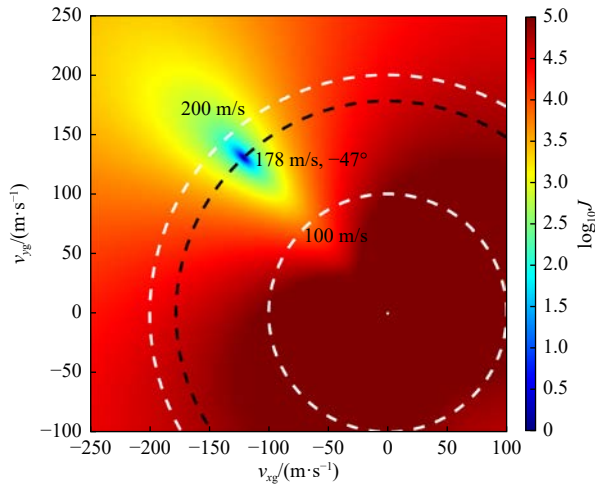


图 8 2022 年 8 月 24 日电离层 TID 扰动的传播速度反演结果

Fig. 8 Calculated velocity for the travelling ionospheric disturbances observed on 24 August 2022

变化导致的显著的多普勒频移 (图中未显示), 约发生在 23: 30 UT (北京时间 7: 30), 所以可以推断上述扰动事件发生在日出之前一小时左右.

图 10 给出了 2022 年 4 月 27 日一次类似的扰动事件. 这次事件开始于 22: 50 UT, 而这一天的日出时间约为 22: 00 UT (北京时间 6 点), 所以, 与上一个事件不同, 该事件发生于日出之后.

### 3 讨论

子午工程二期将于漠河、北京、武汉、深圳四地分别建设一发三收的电离层高频多普勒监测台阵, 目前在其中多站已开展设备试观测和观测数据验证. 深圳南山站接收珠海发射的信号, 在近垂直反射的情况下, 与珠海的电离层测高仪的观测进行了

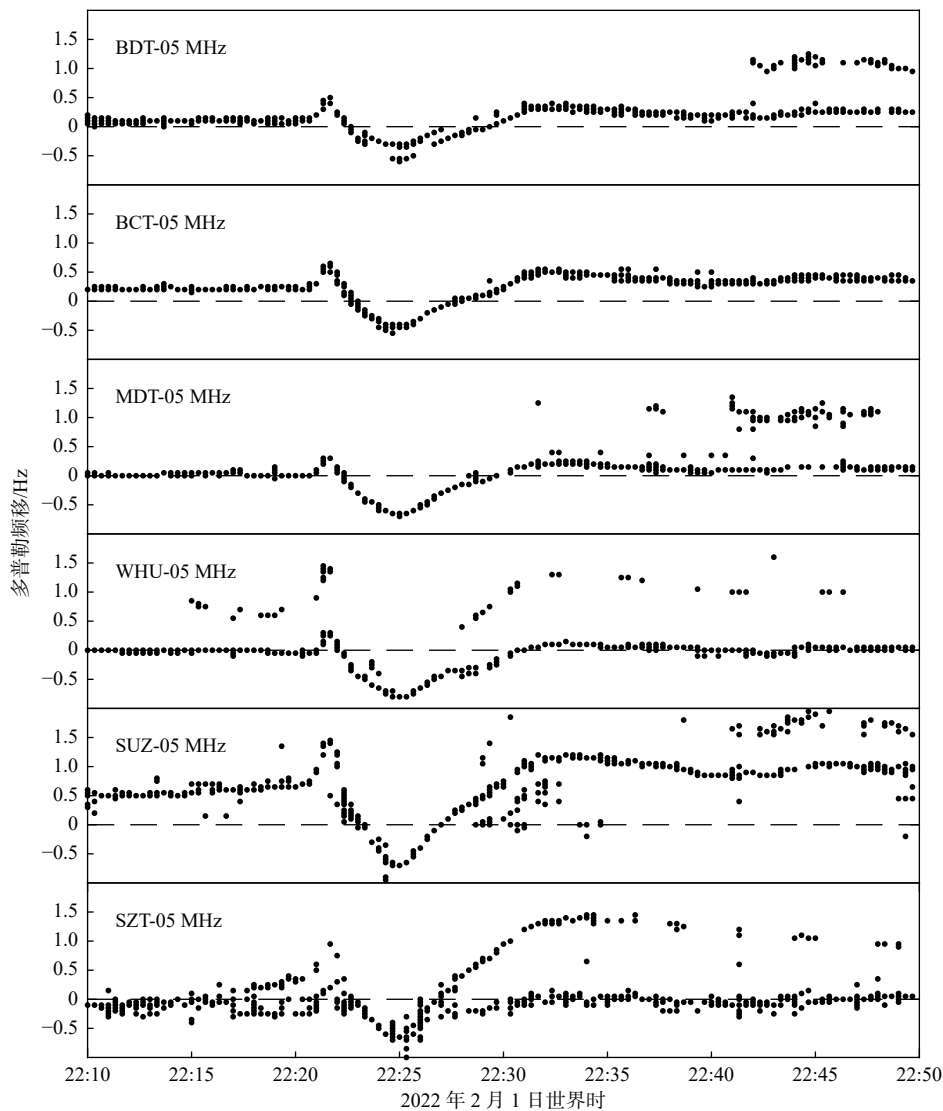


图 9 2022 年 2 月 1 日多站观测到的时间同步的多普勒频移变化

Fig. 9 Concurrent variations of the frequency shift observed at multiple stations on 1st February 2022

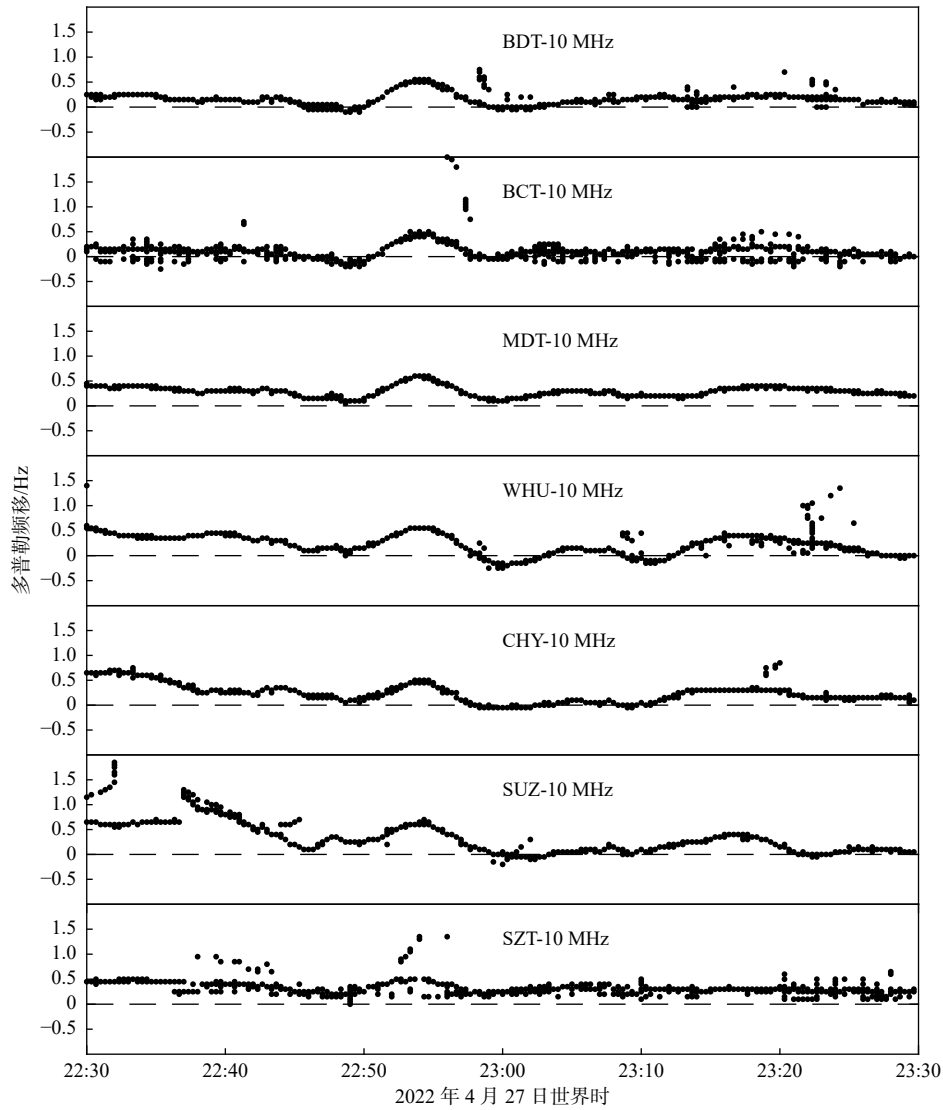


图 10 2022 年 4 月 27 日多台站观测到的时间同步的电离层扰动

Fig. 10 Concurrent variations of the frequency shift observed at multiple stations on 27 April 2022

对比. 由信号的多普勒频移计算的电离层等效多普勒速度, 基本吻合测高仪观测到的虚高的时间变化, 验证了设备的探测能力. 两种手段观测的扰动发生时间和形态也有些许差异, 可根据其探测原理的不同略加分析. 电离层测高仪由脉冲信号的发射和接收的时间差来计算反射点虚高:

$$h' = \frac{1}{2}c\Delta t = c \int_S \frac{dS}{v_g} \quad (7)$$

$v_g$  为电波在电离层介质中的群速度. 在不考虑外磁场的简化情形下,  $v_g = c\mu$ , 其中  $\mu$  为 (2) 式中的相折射指数 (赵九章, 2014). 令  $P' = \int_S \frac{dS}{\mu}$ , 称为群路径, 则测高仪探测的虚高随时间的变化, 或等效的电离层垂直运动速度为:

$$v' = \frac{dh'}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dP'}{dt} \quad (8)$$

比较 (8) 式和 (4) 式, 可知测高仪探测的等效垂直速度为群路径的时间变化率, 而多普勒频移探测得到的等效垂直速度为相路径的时间变化率, 而群路径和相路径分别是群折射指数  $\frac{1}{\mu}$  和相折射指数  $\mu$  沿电波路径  $S$  的积分. 这一积分包括低层中性大气的部分 ( $\mu = 1$ ), 也包括电离层中的部分 ( $\mu < 1$ ), 与电波的频率、路径上电子密度分布都有关系. 当反射高度及电子密度分布发生变化时, 对群路径和相路径的改变是有所不同的, 所以, 在图 3 所示的电离层发生扰动时, 两种方法都能探测到这种变化, 但计算得到的电离层等效运动速度则不完全相同.

两个耀斑事件的观测表明高频多普勒频移可以探测 M 级以上的耀斑导致的电离层变化, 但有时增强的电离层吸收也会导致信号强度大幅下降而使

观测中断. 正午前后电离层吸收本就较强, 而且耀斑产生的额外光电离效应也显著依赖于太阳天顶角 (Le et al., 2013; Zhang et al., 2002, 2011; Zhang and Xiao, 2005), 所以这种情况更易在正午前后发生. 近来也发现有时耀斑导致的电离层总电子含量的增加与太阳天顶角没有直接关系, 这时电离层中的输运过程及电动力学状态的变化可能有重要的贡献 (Le et al., 2019; Zhang et al., 2017), 电离层高频多普勒探测对于电离层动态变化的敏感性可能对这些问题的研究会有所帮助. 在图 4 的耀斑事件中, X 射线辐射通量增长率最大时多普勒频移最大, 而当辐射通量最大时多普勒频移已经回至 0 附近, 这表明辐射通量最大时复合损失已与光电离生成达到平衡. 类似地, 在对两次 M7.9 和 X1.6 级耀斑的电离层多普勒频移观测研究也发现了同样的现象, 并且相比于 X 射线流量, 多普勒频移与极紫外辐射通量对应得更好 (Chum et al., 2018). 图 6 显示了耀斑导致的电离层吸收的恢复时间与纬度有关, 它们之间的关系有待进一步研究.

利用三站构成的台阵来监测电离层扰动的传播方向是子午工程二期中电离层高频多普勒探测的重要科学目标. 图 7 和图 8 给出了对一次 TID 的观测和传播速度的计算结果. 该扰动周期约为 20 min, 由东南向西北传播, 速度约为 178 m/s, 由此估计波长约为 214 km, 属于中尺度 TID. 早期对我国中部地区的扰动统计发现以东北向和东南向两个传播方向为主 (万卫星等, 1995, 1996; Wan et al., 1998), 与青藏高原地形及邻近地区低涡天气事件激发的重力波有关. 后来全球范围内的统计认为, 北半球白天的中尺度 TID 方向倾向于从西北向东南方向传播, 而夜间的中尺度 TID 倾向于从东北向西南方向传播 (Ding et al., 2011; Yadav et al., 2021). 但也有研究注意到西北向传播的中间层重力波及中尺度 TID, 因为这类扰动发生在较低的高度上, 主要由气辉和高频雷达等探测手段所观测到 (Bhat et al., 2021a, 2021b; Kotake et al., 2007; Oinats et al., 2016). 与这些观测一致的是图 7 中的事件发生在夏季的日落前后 (如, Kotake et al., 2007; Zalizovski et al., 2021), 可能与日夜交界处激发的大气重力波以及热层风的方向决定的滤波效应有关. 在我国区域内已分布着十几个气辉成像仪观测站, 并取得了丰富研究成果 (Sun et al., 2016, 2019; Xu et al., 2015, 2021), 未来建成后的高频多普勒监测网与气辉成像仪监测网可以为联合观测研究提供更多的

机会.

观测中还发现一种各站同时发生扰动的现象, 包括北京、武汉、深圳三地的所有观测站, 所对应的电离层反射点相距近 1000 km. 在这么大的空间尺度上同时发生的扰动, 比较常见的就是太阳耀斑的效应, 但本文中报告的两个时间都发生在日出前后, 且太阳辐射通量并没有发生像耀斑爆发时那样的显著变化. 初步分析发现, 扰动发生时伴随着地磁场的对称扰动分量 (SYM-H) 的变化: 在 2 月 1 日的事件发生时, SYM-H 突然增大 20 nT 左右, 而在 4 月 27 日的事件时, SYM-H 有一个迅速的负脉冲变化, 时间尺度约为 10 min, 幅度也超过 20 nT. 如此看来, 这两个事件可能与行星际条件的迅速变化并由此导致的穿透电场有关, 在以往基于电离层高频多普勒观测的研究中, 也曾发现过类似的由快速电场变化导致的电离层扰动 (如, Kikuchi et al., 2021; Pilipenko et al., 2013). 巧合的是本文报告的两个事件都发生在日出前后, 是否与此时的电离层背景状态有关, 以及与其它日出时大尺度电场变化的研究 (如, Aggson et al., 1995; Chen et al., 2021) 是否存在关联, 还是有待回答的问题.

## 4 结 论

本文介绍了子午工程二期电离层高频多普勒监测仪试观测阶段的一些结果. 首先与电离层测高仪观测的对比证明两种探测方式能够同时捕捉同一个扰动, 验证了高频多普勒监测仪的探测能力. 但两种方法区别于分别测量电波的群时延和相位延迟, 这导致对同一个扰动的观测存在些许差异. 进一步对太阳耀斑事件的观测, 证明了多站设备之间的一致性, 并能够观测 M 级以上耀斑导致的电离层扰动. 利用三站构成的局地观测台阵, 计算了 TID 传播速度和方向, 能够实现监测电离层中传播的扰动的设计目标. 同时, 这种以大气波动速度传播的扰动, 在观测数据中也能够与多站观测到的时间同步扰动区分开来, 后者可能与日出前后大尺度的电离层电场扰动有关. 在子午工程二期建成后, 与电离层测高仪、气辉成像仪、多型雷达等构成综合监测网, 电离层高频多普勒监测仪有望在空间天气监测研究中更充分地发挥其作用.

## 致谢

感谢中山大学钟嘉豪及武汉大学杨国斌提供本文所用

电离层测高仪的数据及处理程序. FY-2H 卫星太阳 X 射线流量数据来自国家卫星气象中心, GOES-16 卫星的 X 射线流量数据来自 <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes-r.html>. 感谢中国科学院网信专项“空间科学大数据智能管理与分析挖掘关键技术及应用”提供的数据分析挖掘工具. 感谢国家科技资源共享服务平台——国家空间科学数据中心 (<https://www.nssdc.ac.cn>) 提供数据资源支持.

## References

- Aggson T L, Herrero F A, Johnson J A, et al. 1995. Satellite observations of zonal electric fields near sunrise in the equatorial ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 57(1): 19-24.
- Bhat A H, Ganaie B A, Ramkumar T K, et al. 2021a. Northward propagation of medium scale traveling ionospheric disturbances over Srinagar, J and K India[J]. *Advances in Space Research*, 68(9): 3806-3813.
- Bhat A H, Ganaie B A, Ramkumar T K, et al. 2021b. Rotation, bifurcation and merging of medium-scale traveling ionospheric disturbances over a low-mid latitude transition region[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 226: 105779.
- Chen J, Wang W, Lei J. 2021. Longitudinal variations of equatorial ionospheric electric fields near sunrise[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126: e2020JA028977.
- Chen Y L, Zhang Y N. 1995. Design and testing of an ionospheric Doppler receiver[J]. *Journal of Space Science*, 35(5): 574-580 (in Chinese).
- Chum J, Podolská K. 2018. 3D analysis of GW propagation in the ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 45: 11562-11571.
- Chum J, Urbář J, Laštovička J, et al. 2018. Continuous Doppler sounding of the ionosphere during solar flares[J]. *Earth Planets and Space*, 70: 198.
- Ding F, Wan W, Xu G, et al. 2011. Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by a GPS network in central China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 116: A09327.
- Farges T, Le Pichon A, Blanc E, et al. 2003. Response of the lower atmosphere and the ionosphere to the eclipse of August 11, 1999[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(6): 717-726.
- Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. 2006. Response of the ionosphere to the Great Sumatra earthquake and volcanic eruption of Pinatubo[J]. *Chinese Physics Letters*, 23(7): 1955-1957.
- Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. 2012. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117: A02305.
- Hu X Y, Hao Y Q, Dai G F, et al. 2021. 2020 ionospheric high frequency doppler shift dataset of Peking University Ionosphere Station[J]. *China Scientific Data*, 6(2): 112-118 (in Chinese).
- Kikuchi T, Chum J, Tomizawa I, et al. 2021. Penetration of the electric fields of the geomagnetic sudden commencement over the globe as observed with the HF Doppler sounders and magnetometers[J]. *Earth, Planets and Space*, 73(1): 1-13.
- Kotake N, Otsuka Y, Ogawa T, et al. 2007. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California[J]. *Earth, Planets and Space*, 59(2): 95-102.
- Laštovička J, Chum J. 2017. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder Network[J]. *Advances in Space Research*, 60(8): 1629-1643.
- Le H J, Liu L B, Chen Y D, et al. 2013. Statistical analysis of ionospheric responses to solar flares in the solar cycle 23[J]. *Journal of Geophysical Research*, 118(1): 576-582.
- Le H J, Liu L B, Chen Y D, et al. 2019. Anomaly distribution of ionospheric total electron content responses to some solar flares[J]. *Earth and Planetary Physics*, 3(6): 481-488.
- Li J. 1983. Doppler frequency shifts of a HF radio wave caused by the ionospheric acoustic-gravity waves[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 26(1): 1-8 (in Chinese).
- Li L B, Wu Z H, Ning B Q, et al. 1987. Some technical aspects of a three-station array for observation of the ionospheric disturbances[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 30(6): 560-565 (in Chinese).
- Liu J, Chen C H, Sun Y Y, et al. 2016. The vertical propagation of disturbances triggered by seismic waves of the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake over Taiwan[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(4): 1759-1765.
- Liu J, Zhang D H, Coster A J, et al. 2019. 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*, 37: 673-687.
- Liu W, Blanc M, Wang C, et al. 2021. Scientific challenges and instrumentation for the International Meridian Circle Program[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 64(12): 2090-2097.
- Liu X M, Gu T, Cui R, et al. 1985. Relations between transmission distance and phase/group path for oblique propagation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 4(1): 69-74 (in Chinese).
- Long X L, Hou J C. 1979. On the frequency variation of radio waves reflected from the ionosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 22(4): 387-395 (in Chinese).
- Ning B Q, Li J. 1996. Doppler spectrum of ionospheric irregularities[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 16(1): 36-42 (in Chinese).
- Ning B Q, Lin C. 2002. Application of software radio in ionospheric radio sounding[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 17(3): 286-290 (in Chinese).
- Ogawa T. 1958. Frequency variations in short-wave propagation[J]. *Proceedings of the IRE*, 46(12): 1934-1939.
- Oinats A V, Nishitani N, Ponomarenko P, et al. 2016. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data[J]. *Earth, Planets and Space*, 68(1): 1-13.
- Ouyang X, Liu W, Xiao Z, et al. 2016. Observations of ULF waves on the ground and ionospheric Doppler shifts during storm sudden commencement[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(4): 2976-2983.
- Pilipenko V A, Fedorov E N, Teramoto M, et al. 2013. The mechanism of mid-latitude Pi2 waves in the upper ionosphere as revealed by

- combined Doppler and magnetometer observations[J]. *Annales Geophysicae*, 31: 689-695.
- Sun L, Xu J, Wang W, et al. 2016. A statistical analysis of equatorial plasma bubble structures based on an all-sky airglow imager network in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121: 11495-11517.
- Sun L, Xu J, Xiong C, et al. 2019. Midlatitudinal special airglow structures generated by the interaction between propagating medium-scale traveling ionospheric disturbance and nighttime plasma density enhancement at magnetically quiet time[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(3): 1158-1167.
- Wan W, Yuan H, Ning B Q, et al. 1995. A statistical study for the spatial-temporal scale of ionospheric disturbances in middle China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 15(4): 301-306 (in Chinese).
- Wan W, Yuan H, Liang J. 1996. An analysis method of nonuniform ionospheric disturbances from array observation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 39(1): 17-25 (in Chinese).
- Wan W, Yuan H, Ning B Q, et al. 1998. Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortexes around Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 25(20): 3775-3778.
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. *Space Weather*, 8(8): 1-5.
- Wang C, Chen Z Q, Xu J Y. 2020. Introduction to Chinese Meridian Project-Phase II [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 40(5): 718-722.
- Wang J, Chen G, Yu T, et al. 2021. Middle-scale ionospheric disturbances observed by the oblique-incidence ionosonde detection network in North China after the 2011 Tohoku tsunamigenic earthquake[J]. *Sensors*, 21(3): 1000.
- Watts J M, Davies K. 1960. Rapid frequency analysis of fading radio signals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 65(8): 2295-2301.
- Xiao S G, Hao Y Q, Zhang D H, et al. 2006a. A case study on whole response processes of the ionosphere to typhoons[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(3): 623-628 (in Chinese).
- Xiao S G, Zhang D H, Xiao Z. 2006b. Study on the detectability of Typhoon-generated acoustic-gravity waves[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 27(1): 35-40 (in Chinese).
- Xiao S G, Xiao Z, Shi J K, et al. 2009. Observational facts in revealing a close relation between acoustic-gravity waves and midlatitude spread F[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114: A01303.
- Xiao S G, Shi J K, Zhang D H, et al. 2012. Observational study of daytime ionospheric irregularities associated with typhoon[J]. *Science China Technological Sciences*, 55(5): 1302-1304.
- Xiao S G, Xiao Z, Shi J K, et al. 2012. Application of the HF Doppler observations in studying spread-F[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(7): 2162-2166 (in Chinese).
- Xiao Z, Ho H, Zou J, et al. 1987. DQ-87 data processing system for geophysical observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 30(6): 653-658 (in Chinese).
- Xiao Z, Liu K J, Zhang D H. 2002. Some typical records of ionospheric doppler shift and their significance in the study of ionospheric morphology[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 22(4): 321-329 (in Chinese).
- Xiao Z, Xiao S G, Hao Y Q, et al. 2007. Morphological features of ionospheric response to typhoon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112: A04304.
- Xu J, Li Q, Yue J, et al. 2015. Concentric gravity waves over northern China observed by an airglow imager network and satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120: 11058-11078.
- Xu J, Li Q, Sun L, et al. 2021. The ground-based airglow imager network in China: Recent observational results[C]//Wang W B, Zhang Y L, Paxton L J. *Upper Atmosphere Dynamics and Energetics*, American Geophysical Union, 365-394.
- Yadav V, Rathi R, Gaur G, et al. 2021. Interaction between nighttime MSTID and mid-latitude field-aligned plasma depletion structure over the transition region of geomagnetic low-mid latitude: First results from Hanle, India[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 217: 105589.
- Zalizovski A V, Yampolski Y M, Mishin E, et al. 2021. Multi-position facility for HF Doppler sounding of ionospheric inhomogeneities in Ukraine[J]. *Radio Science*, 56(10): 1-11.
- Zhang D H, Xiao Z, Gao Y F, et al. 1999. The calculation of lower ionospheric TEC enhancement during initial flare burst using HF doppler records[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 19(4): 315-320 (in Chinese).
- Zhang D H, Xiao Z, Chang Q. 2002. The correlation of flare's location on solar disc and the sudden increase of total electron content[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(1): 83-85.
- Zhang D H, Xiao Z. 2005. Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using international GPS service network data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 110(A3): A03307.
- Zhang D H, Mo X H, Cai L, et al. 2011. Impact factor for the ionospheric total electron content response to solar flare irradiation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 116(A4): A04311.
- Zhang R L, Liu L B, Le H J, et al. 2017. Equatorial ionospheric electro-dynamics during solar flares[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(10): 4558-4565.
- Zhao B Q, Hao Y Q. 2015. Ionospheric and geomagnetic disturbances caused by the 2008 Wenchuan earthquake: A revisit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(7): 5758-5777.
- Zhao J Z. 2014. *Physics of the Upper Atmosphere*[M]. Beijing: Peking University Press (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈彦龙, 张援农. 1995. 电离层多普勒接收机的设计与实验[J]. *空间科学学报*, 35(5): 574-580.
- 胡晓彦, 郝永强, 代国峰, 等. 2021. 2020年北京北大站电离层高频多普勒频移数据集[J]. *中国科学数据 (中英文网络版)*, 6(2): 112-118.
- 李钧. 1983. 电离层声重波引起的高频多普勒频移[J]. *地球物理学报*, 26(1): 1-8.
- 李利斌, 吴振华, 宁百齐, 等. 1987. 高频多普勒台阵中的若干技术问题[J]. *地球物理学报*, 30(6): 560-565.
- 刘选谋, 顾涛, 崔荣, 等. 1985. 相路径与群路径同斜向传输距离的关系[J]. *空间科学学报*, 4(1): 69-74.
- 龙威灵, 侯杰昌. 1979. 关于电离层反射电波频率变化的问题[J]. *地*

- 球物理学报, 22(4): 387-395.
- 宁百齐, 李钧. 1996. 电离层不规则结构的多普勒谱特性[J]. 空间科学学报, 16(1): 36-42.
- 宁百齐, 林晨. 2002. 软件无线电在电离层电波探测中的应用[J]. 电波科学学报, 17(3): 286-290.
- 万卫星, 袁洪, 宁百齐, 等. 1995. 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, 15(4): 301-306.
- 万卫星, 袁洪, 梁君. 1996. 非单一电离层扰动场的台阵探测分析[J]. 地球物理学报, 39(1): 17-25.
- 肖赛冠, 郝永强, 张东和, 等. 2006a. 电离层对台风响应的全过程的特例研究[J]. 地球物理学报, 49(3): 623-628.
- 肖赛冠, 张东和, 肖佐. 2006b. 台风激发的声重力波的可探测性研究[J]. 空间科学学报, 27(1): 35-40.
- 肖赛冠, 肖佐, 史建魁, 等. 2012. 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, 55(7): 2162-2166.
- 肖佐, 霍宏暹, 邹积清, 等. 1987. DQ-87 型地球物理数据采集和处理系统[J]. 地球物理学报, 30(6): 653-658.
- 肖佐, 刘凯军, 张东和. 2002. 典型电离层多普勒记录及其讨论[J]. 空间科学学报, 22(4): 321-329.
- 张东和, 萧佐, 高玉芬, 等. 1999. 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, 19(4): 315-320.
- 赵九章. 2014. 高空大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社.

苗建苏, 丁宗华, 代连东, 杨嵩, 吴健. 2024. 曲靖非相干散射雷达观测研究进展与展望. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 66-76. doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-082.

Miao J S, Ding Z H, Dai L D, Yang S, Wu J. 2024. Progress and prospects based on Qujing incoherent scatter radar measurements. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 66-76 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2022-082.

## 曲靖非相干散射雷达观测研究进展与展望

苗建苏<sup>1,2,3</sup>, 丁宗华<sup>1,2,3\*</sup>, 代连东<sup>1,2,3</sup>, 杨嵩<sup>1,2,3</sup>, 吴健<sup>1,2,3</sup>

1 中国电波传播研究所, 青岛 266107

2 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107

3 云南昆明电磁波环境国家野外科学观测研究站, 曲靖 655000

**摘要:** 本文介绍了我国曲靖非相干散射雷达的主要技术方案, 结合实测数据分析表明该雷达具备了电离层电子密度与等离子体温度观测、空间碎片凝视探测与月球二维成像探测等能力, 可用于研究电离层 F 层气候学特征、电子密度暴时变化与异常增强等天气事件、E-F 谷区结构与变化、约 3 cm 以上尺寸空间碎片的分布特征与模型、月球不同区域的散射回波特性等. 下一步将重点开展低电离层与北驼峰结构及演化过程、电离层暴时与扰动特性观测.

**关键词:** 非相干散射雷达; 技术方案; 电离层; 空间碎片; 月球

doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-082

中图分类号: P352

文献标识码: A

## Progress and prospects based on Qujing incoherent scatter radar measurements

Miao Jiansu<sup>1,2,3</sup>, Ding Zonghua<sup>1,2,3\*</sup>, Dai Liandong<sup>1,2,3</sup>, Yang Song<sup>1,2,3</sup>, Wu Jian<sup>1,2,3</sup>

1 China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China

2 Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qingdao 266107, China

3 Yunnan Kunming Electromagnetic Environment National Observation and Research Station, Qujing 655000, China

**Abstract:** Herein, the technical characteristics and programme of Qujing incoherent scatter radar (the first one in China) are described. The measurement ability in the ionosphere, space debris, and the Moon was investigated using the data. The results showed that this radar is of importance useful for the measuring ionospheric climatologic property, analyzing storm-time and abnormal enhancement events analysis, studying E-F valley and its variations, the determining and modeling space debris distribution characteristics and model, and identifying the scatter echo characteristics from the different regions of the Moon. The next work will focus on the measurement of the structure and evolution of the lower ionosphere and the northern ionosphere crest, storm-time variations, and disturbance characteristics property.

**Keywords:** incoherent scatter radar; technical programme; ionosphere; space debris; Moon

## 0 引言

非相干散射雷达利用电离层中等离子体热运动对入射电磁波的微弱散射来遥测电离层物理参数,

具有探测参数多、空间覆盖范围广、时空分辨率高等突出优点, 是目前地面监测电离层最强大的设备, 此外在流星、空间碎片、月球等空间物体探测以及射电信号接收方面也具有重要应用价值. 自美国人

收稿日期: 2022-12-22; 录用日期: 2023-02-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFF0503901)

Supported by the National Key Research and Development Program (Grant No. 2022YFF0503901)

第一作者: 苗建苏 (1966-), 男, 高级工程师. 主要从事电离层探测技术研究. E-mail: miaoqingdao@163.com

\*通信作者: 丁宗华 (1978-), 男, 研究员. 主要从事电离层探测与电波传播研究. E-mail: zhdingmou@163.com



Gordon 于 1958 年首先提出用大功率雷达探测电离层后向散射回波信号的设想 (Gordon, 1958) 以来, 国外以美国和欧洲非相干散射科学联合会 (EISCAT) 为代表先后建设了约 10 套非相干散射雷达 (丁宗华等, 2014a; Evans, 1969), 在全球电离层时空特性与演化过程分析、大气层-电离层-磁层耦合研究、电离层物理机制研究与模式开发等方面取得了一系列研究成果。

随着我国综合国力与科技实力的不断提升, 自主建设非相干散射雷达成为我国电离层与空间天气科学发展的紧迫需求. 建设非相干散射雷达必须考虑费用高昂、技术复杂、难度大等因素, 通过对已建大型雷达进行改造建设非相干散射雷达, 其具有建设费用相对低、周期相对短等优点, 这是我国自主建设非相干散射雷达的重要途径. 在子午工程 (国家十一五重大科学工程) 支持下, 我国利用云南曲靖 (25.6°N, 103.8°E) 原军用 110 雷达, 于 2012 年初改造建成了我国首套非相干散射雷达 (丁宗华等, 2014b; Ding et al., 2018). 该雷达位于我国西南中低纬过渡区, 毗邻青藏高原, 主要面向该地区的电离层多参数探测、时空变化特性分析、大气层与电离层耦合研究、空间环境监测应用等科学与应用目标. 该雷达参照欧洲非相干散射科学联合会 (EISCAT) Svalbard 雷达设计 (Wannberg et al., 1997), 采用了传统的真空电子管发射、抛物面天线机械扫描等技术, 工作频率、发射功率等主要参数与 EISCAT Svalbard、美国 Millstone Hill 雷达相近, 技术性能基本相当. 曲靖非相干散射雷达的建成, 标志着我国掌握了电离层探测大型设备的关键技术, 目前该雷达已在电离层、空间碎片与月球探测方面取得了重要结果 (丁宗华等, 2018, 2020, 2022; 杨嵩等, 2018, 2022). 本文简单介绍了该雷达的技术方案, 接着介绍了主要观测结果与研究进展, 并对下一步观测进行了展望。

## 1 技术方案

### 1.1 技术指标设计考虑

假设入射电磁波在电离层 300 km 高度处散射, 电离层电子密度为  $10^{12} \text{ m}^{-3}$ , 雷达脉冲宽度为 32 us, 天线有效口径面积约 1000  $\text{m}^2$ , 发射峰值功率 2.0 MW, 散射点处雷达波束横向面积 1  $\text{km}^2$ , 则单个距离门内总电子数目为  $5 \times 10^{21}$  个, 总散射截面为

$5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ , 代入雷达方程, 可知到达天线处的电离层散射回波功率约  $1 \times 10^{-15} \text{ W}$ , 是发射峰值功率的  $5 \times 10^{-22}$  倍, 由此可见电离层非相干散射信号的微弱程度 (丁宗华等, 2017). 因此, 非相干散射雷达必须采用大功率发射机、高增益天线、低噪声接收等技术。

曲靖非相干散射雷达是在 110 雷达基础上改造而成, 受当时 110 雷达条件、雷达技术水平、研制时间与经费等所限, 充分利用 110 雷达原有条件、利用成熟的技术成为当时设计技术指标时的主要考虑. (1) 关于工作频率, 由于 110 雷达工作频率为 480 MHz, 设计指标应在该频率附近, 否则天线馈线等性能下降. 大功率速调管是非相干散射雷达的关键部件, 当时国际上 480 MHz 附近成熟的商用速调管频率为 500 MHz, 因此设计时工作频率确定为 500 MHz. (2) 关于发射峰值功率与最大占空比, 国外非相干散射雷达发射峰值功率一般为 1~3 MW, 最大占空比为 5%~25%. 若取 1 MW, 则发射占空比很大, 由此带来散热、冷切等问题, 设计时发射峰值功率和最大占空比分别确定为 2.1 MW 和 5%. (3) 关于抛物面天线口径, 国外非相干散射雷达的口径最小为 32 m, 由于 110 雷达建有 44 m 截球式天线罩, 地上部分为 36.5 m, 若天线口径太大, 降低仰角时天线面将接触地面, 由此导致探测区域受限. 经综合考虑, 设计时天线口径确定为 29 m. (4) 其他指标. 当时国外 500 MHz 非相干散射雷达仅有 EISCAT Svalbard 雷达, 因此其他指标主要参考该雷达。

曲靖非相干散射雷达实际主要技术指标包括:

- (1) 工作频率: 500 MHz.
- (2) 发射峰值功率: 2.1 MW.
- (3) 天线形式: 29 m 口径抛物面天线.
- (4) 天线增益: 41 dB.
- (5) 最大占空比: 5%.
- (6) 系统噪声温度: 约 150 K. 详细技术指标可参见文献 Ding 等 (2018)。

### 1.2 设备组成

曲靖非相干散射雷达将原 110 雷达 25 m 口径天线面扩展到 29 m 以满足天线高增益要求, 改造了馈线与伺服分机, 重新研制了发射、接收、信号处理、数据处理终端、监控、电源、冷却等分机, 该雷达发射、冷切、天线馈线与伺服 (简称天伺馈) 均有独立机房, 其它分机部署在主控机房. 该雷达的设备组成、框图与实物图见参考文献 (Ding et al., 2018). 主要分机介绍如下:



### 1.2.1 天伺馈分机

天伺馈分机主要完成大功率发射信号的对空辐射、空间散射回波信号的收集、天线转动等, 它由馈源喇叭、圆极化器、收发开关、方位与俯仰关节、传输波导、天线监控单元、天线驱动单元、29 m 主反射面、3.5 m 副反射面、天线座和天线罩等部件组成. 其中球形天线罩用于保护天线机械与电气性能, 其直径为 44 m, 采用截球式, 地上部分高 36.5 m, 采用 1581 块有机玻璃钢组成, 是上世纪 70 年代国际上最大的有机玻璃钢蜂窝夹层结构天线罩, 填补了国际空白.

### 1.2.2 发射分机

发射分机主要完成射频信号的激励、调制和放大功能, 采用主振放大式结构, 前级固态放大器将来自激励源的 10 mW 射频相参信号放大至 50~100 W, 提供给大功率速调管作为射频输入.

发射分机包括前级固态放大器、末级速调管放大器、高压电源、高压电容器、固态脉冲调制器、控制与保护装置、冷却装置等部件. 其中三端口环流器将反射能量引导至大功率水负载以便保护速调管输出窗, 定向耦合器用于实时监测发射机输出端与波导内的大功率信号, 波导充气装置用于实时补充波导内的六氟化硫气体以提高波导的耐功率性能.

### 1.2.3 接收分机

接收分机主要完成空间散射回波信号的射频接收与下变频转换, 采用低噪前放与常温中放相结合的方案, 由低噪声前端、射频滤波器、混频器、中频放大器、频率综合器、激励源等部件组成. 空间散射回波信号 (中心频率 500 MHz) 通过馈源进入低噪声前端, 经过低噪放大、混频, 变成频率为 140 MHz 的第一中频信号, 通过数十米长电缆从高频舱进入机房接收机柜. 第一中频信号先进行信道分离 (分为离子通道、等离子体通道. 其中等离子体通道信号非常微弱, 一般难以探测), 然后通过混频器下变频为 30 MHz 的中频信号, 输出至信号处理机.

关于信道分离的说明: 电离层散射信号由离子散射谱与等离子体散射谱两部分组成, 离子散射谱位于中心频率附近, 谱宽为 100 kHz 以内, 等离子体散射谱偏离中心频率约 10 MHz, 谱宽约 1 kHz. 中频接收机由五个通道组成, 其中一个通道为离子

通道, 其中心频率为 140 MHz, 带宽为 137.5~142.5 MHz, 对应离子通道; 其它通道为等离子体通道, 中心频率分别为 130 MHz、135 MHz、145 MHz 与 150 MHz, 通过设置不同的本振频率, 即可实现分离. 由于等离子体散射谱信号非常微弱, 国外很少能探测到, 曲靖非相干散射雷达仅在某电离层实验期间可探测到等离子体散射谱信号, 其等离子体通道很少使用或几乎不用.

### 1.2.4 信号处理分机

信号处理分机主要完成空间散射回波信号 (中频) 的正交采样、下变频、匹配滤波、脉冲压缩、非相干积累、数据存储和结果输出等, 它由 AD 采样、DSP 处理器、数据存储和结果输出显示等部件组成. 信号处理分机最终生成电离层回波功率、自相关函数或功率谱数据, 输出至数据处理终端分机.

### 1.2.5 数据处理分机

数据处理分机通过内部网络接收来自信号处理分机的回波功率、自相关函数或功率谱数据, 经过处理与反演, 输出电离层电子密度、等离子体温度与速度等科学参数, 由数据工作站、数据分析与处理软件组成. 非相干散射回波功率估算电离层电子密度的方法比较成熟 (丁宗华等, 2014b), 但是非相干散射功率谱 (离子散射谱) 反演电离层参数的理论非常复杂, 需在某些假设条件下 (比如电子热运动速度满足麦克斯韦分布、忽略电子与中性粒子碰撞等) 进行近似, 然后进行反演. 反演时一般假设电离层参数初值, 利用非相干散射谱理论, 计算电离层非相干散射功率谱理论值, 与实际测量值进行最小二乘拟合, 在一定条件下 (迭代次数、收敛精度) 反复迭代, 最终反演出电离层电子密度、电子温度、离子温度与等离子体速度四个基本参数.

### 1.2.6 冷却分机

冷却分机主要为发射机提供满足要求的循环冷却水, 它由一次水箱及水泵、二次水箱及水泵、热交换器、室外冷却塔、水处理器、控制箱等组成. 冷却分机采用二次水冷方式, 即一次水箱及水泵将 0~20℃ 冷却水循环输出至发射分机各部件, 二次水箱及水泵通过热交换器对一次水进行冷却, 室外冷却塔对二次水进行冷却, 水处理器对一次水进行电阻率、杂质含量、温度等监测与处理. 当电阻

率、杂质含量等不满足一次冷却水要求时, 自动启动离子交换树脂水处理器进行水处理。

### 1.3 设备关键技术

发射分机是非相干散射雷达的关键部件, 具有电压高、功率大、辐射强等特点, 技术复杂, 造价昂贵。其中高压打火与控制保护是发射分机关键技术。该发射机采用了先进的固态开关技术, 通过 40 个高压 IGBT 模块组成固态串联开关, 一方面为速调管提供高压脉冲, 另一方面为速调管提供高压打火保护 (包括电弧检测、高压静电实时泄放等)。其中固态串联开关具有很低的阻抗和电压降, 可保证速调管阴极高压的稳定; 调制器内电流传感器可快速识别是否存在打火并在 1 us 内切断速调管阴极高压; 固态串联开关与速调管阴极之间的串联电感与二极管组合可使脉冲上升沿与峰值电流达到平衡, 该技术不需要传统的高压脉冲变压器和撬棒, 安全性和可靠性高。

由于发射功率大、接收信号微弱, 如何实现收发快速隔离, 既保护发射时泄露信号不损坏接收机前端, 又保证微弱信号的正常接收是该雷达的另一关键技术。本雷达采用四端口 3 dB 电桥技术, 结合有源滤波器、大功率同轴负载、充气机与水冷机组, 实现收发快速隔离, 其收发隔离度大于 75 dB, 驻波比小于 1.35, 波尖泄漏能量小于 0.5 erg, 收发隔离切换时间小于 20 us, 插损小于 0.2 dB, 耐功率大于 100 kW。滤波器腔体内有放电管与 PIN 管, 用于大功率脉冲的监测与能量泄放; 同轴负载用于吸收泄漏能量; 充气机用于滤波器充气, 保持内部干燥, 防止腔体内部打火; 水冷机组用于同轴负载和滤波器冷却降温, 提高其稳定性。

## 2 电离层观测

由于夜间电离层电子密度低、散射回波弱、信噪比差, 估算或反演的电离层参数数据误差大, 因此曲靖非相干散射雷达主要在白天开展观测。由于曲靖非相干散射雷达利用了原 110 雷达的伺服与部分馈线系统, 整个天馈系统 (含配重) 为数百吨, 快速转动时伺服电机冲击电流较大, 持续 (1 小时及以上) 扫描易导致伺服系统短路、馈线打火等问题, 导致设备故障无法持续观测, 因此曲靖非相干散射雷达天线主要是固定指向, 较少开展大范围扫描观测。

曲靖非相干散射雷达探测电离层电子密度时, 主要采用功率剖面估算法; 探测等离子体温度与速度时, 采用非线性最小二乘拟合反演法。图 1a 为曲靖非相干散射雷达观测的电离层回波功率剖面实例, 横坐标为回波功率, 纵坐标为高度 (单位: km); 图 1b 为电离层回波功率谱, 横坐标为频率 (单位: kHz), 纵坐标为高度 (单位: km), 不同颜色代表归一化功率谱密度。从图 1a 可见电离层 Es 层、谷区、F1 层、F2 层和顶部回波的分布高度与信号相对强弱。从图 1b 可知, 低电离层 (约 120 km) 功率谱为单峰结构, 这是由于低电离层中性分子密度大, 电子、离子与中性分子的碰撞效应显著, 导致它们比较容易达到热平衡, 此时电子温度近似等于离子温度, 功率谱为单峰结构, 从单峰谱宽即可反演电子温度与离子温度; 随着高度增加, 双峰结构逐渐明显, 功率谱谱宽迅速增加, 另外散射信号逐渐增强; 在更高的高度 (F2 层峰值以上), 由于电子密度迅速减小, 散射信号显著降低。

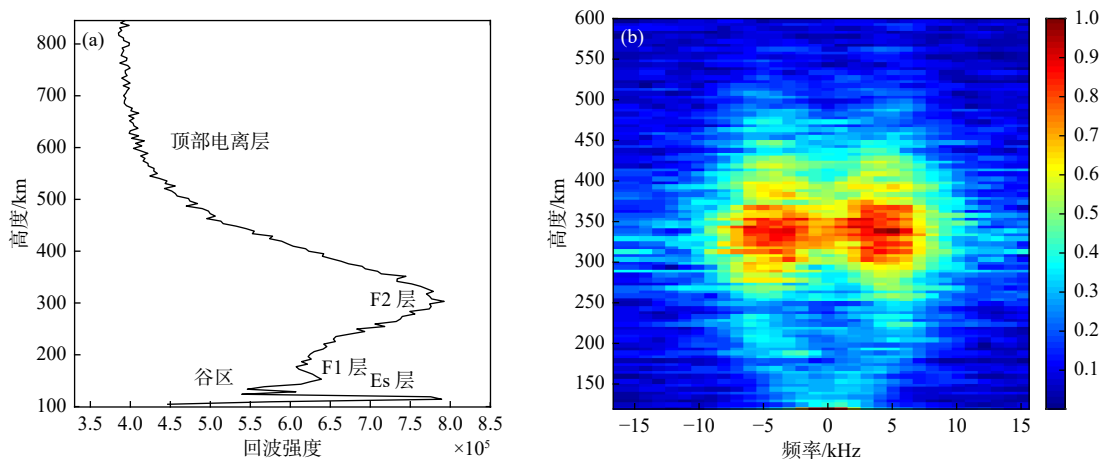


图 1 电离层散射功率剖面 (a) 与功率谱 (b) 示例

Fig. 1 Examples of ionospheric echo profile (a) and power spectra (b)

### 2.1 固定指向时电子密度观测

曲靖非相干散射雷达固定指向观测电子密度时 (仰角一般为  $84^\circ$ ), 采用 13 位巴克码, 脉冲重复周期为 12 ms, 码元宽度 20 或 30 us (对应的距离分辨率为 3 或 4.5 km), 相干积累时间 1~2 min. 图 2 为 2022 年的部分观测结果, 其中电子密度的单位是  $10^{10} \text{ m}^{-3}$ . 图 2a、2b 显示了午后至傍晚的电子密度变化过程, 可见在 13:00~14:00 (地方时, 下同) 电子密度具有白天最大值, 之后最大电子密度高度 (峰值高度) 缓慢下降 (从约 300 km 下降为 260 km), 其中图 2b 显示 11 月 1 日 17:00~

18:00 出现了短时的电子密度增强 (即日落增强现象). 图 2c 显示 11 月 7 日 17:00~18:30 与 20:00~21:30 出现了短时的电子密度增强现象, 期间的峰值高度均具有下降趋势. 图 2d 为 11 月 8 日全天 24 小时的观测, 可见 7:00 前电子密度很低, 之后电子密度和峰值高度逐渐增加, 至 13:00 电子密度与峰值高度均达到最大, 随后逐渐下降, 日落后至清晨的电子密度均具有较小值, 显示了常见的电离层周日变化, 但是未出现 11 月 7 日的日落增强现象, 这说明不同季节、不同日期的电子密度存在明显的逐日变化.

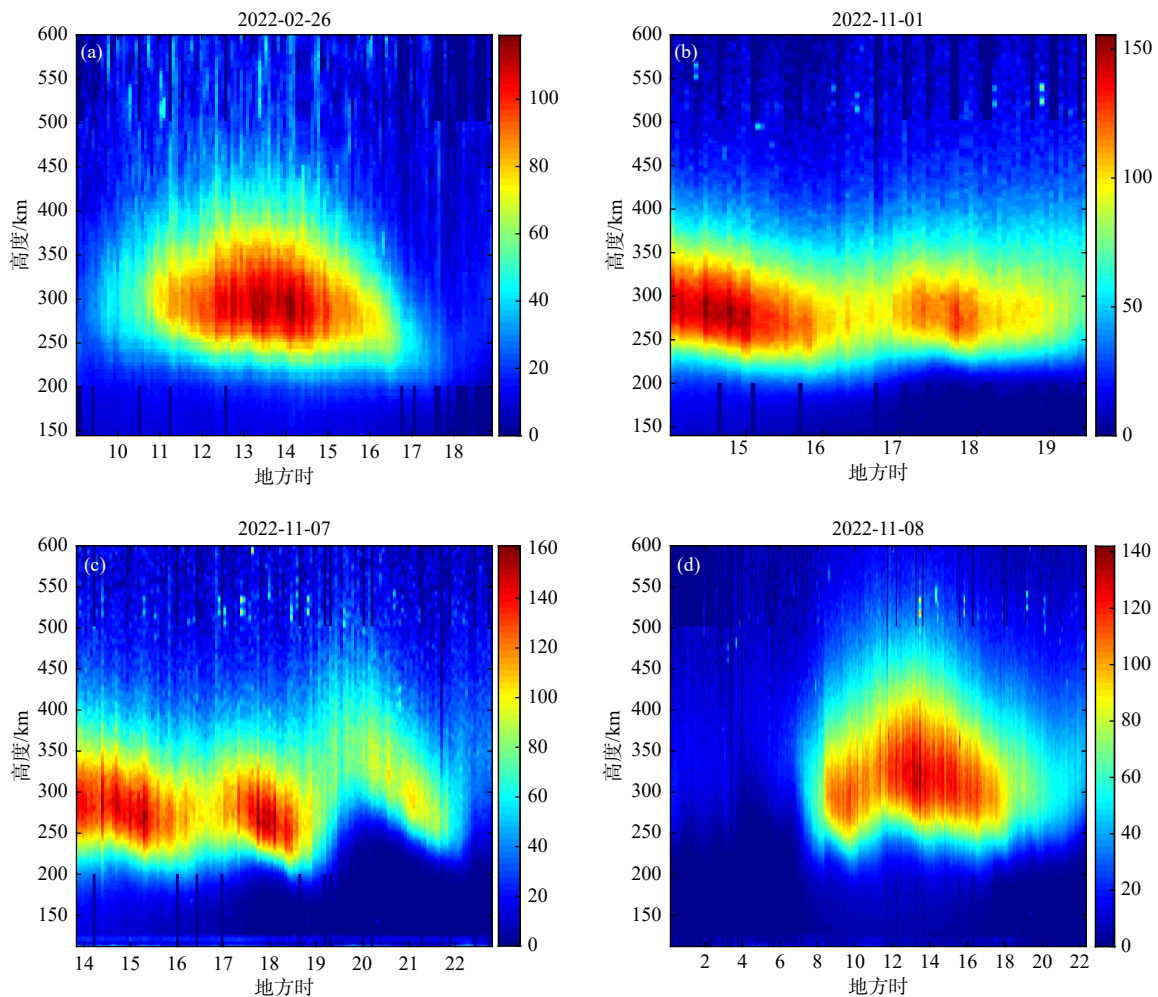


图 2 磁静日电离层电子密度观测. (a) 2 月 26 日; (b) 11 月 1 日; (c) 11 月 7 日; (d) 11 月 8 日

Fig. 2 Examples of electron density under quiet geomagnetic conditions. (a) February 26; (b) November 1; (c) November 7; (d) November 8

Liu 等 (2020a) 利用曲靖非相干散射雷达固定指向观测的电子密度剖面、三亚等站测高仪观测最大电子密度 (NmF2) 与峰值高度 (hmF2) 等数据, 分析了 2015 年 5 月 29 日至 6 月 2 日磁静日期间最大电子密度与峰高的逐日扰动特性, 发现三亚与北京扰动不明显, 在曲靖与邵阳扰动很明显, 三亚地

区 hmF2 上升, 认为可能是赤道电场增强导致了此次扰动事件. Liu 等 (2020b) 利用曲靖非相干散射雷达固定指向观测等数据分析了 2018 年数次日落期间电子密度增强事件, 发现曲靖与三亚的电子密度均增强, 峰高以下增强更显著, 峰高以上不明显, 同时伴随峰值高度下降; NmF2 与 hmF2 的互相关

系数存在 1.5~2.5 小时的延迟, 认为可能是向下的等电子体通量变化引起. 以上工作表明曲靖非相干散射雷达固定指向观测数据在我国中低纬区域电离层特性认知方面具有重要意义.

电离层暴是电离层空间天气研究的重点. 2015 年 4 月 15—17 日发生了一次中等强度地磁扰动, 地磁环电流指数 (Dst) 在 17 日达到 -80 nT, 导致全球电离层发生剧烈变化. 图 3a 为 2015 年 4 月 Dst 指数变化曲线, 图 3b 为 4 月不同日期白天 9:00—17:00 (地方时) 的最大电子密度 (NmF2) 变化曲线 (其中电子密度的单位是  $10^{10} \text{ m}^{-3}$ ), 图中也给出了地磁宁静日 (4 月 5 日) 白天的 NmF2 变化曲线作为对比. 可见相对于地磁宁静日, 4 月 17—19 日、23—25 日均出现正暴效应; 而 4 月 21 日与地磁宁静日相近, 但在日落时低于地磁宁静日水平, 显示了复杂的暴时与逐日变化特性, 此电离层事件还需进一步分析.

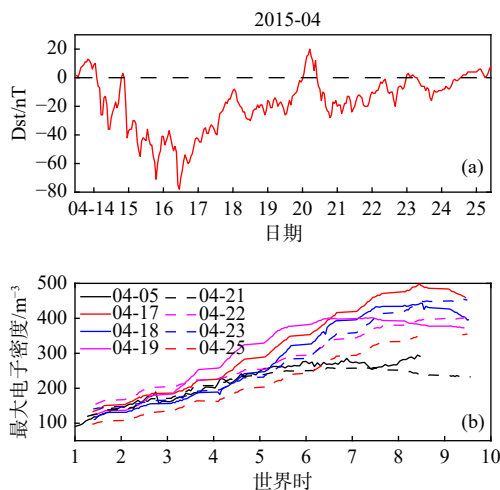


图 3 磁暴期间电离层电子密度观测

Fig. 3 Examples of electron density during the geomagnetic storm event in April 2015

由于探测手段与数据的不足, 目前对电离层 E-F 谷区的认识十分有限. 常规的电离层垂直探测仪无法给出谷区详细信息, 非相干散射雷达成为 E-F 谷区探测的主要地基手段. 图 4 为曲靖非相干散射雷达固定指向观测的 120~240 km (含 E-F 谷区) 电子密度随地方时的变化 (丁宗华等, 2022), 可见不同时刻的电子密度剖面形态不一样, 并且相对正午时刻具有一定的对称性. 在日出时的 E-F 谷区较深较宽, 在 9:00—13:00 期间电子密度增加, 谷区较窄并缓慢变化 (谷底约 140 km, 谷深约 0.73), 谷底位置在 140~144 km 之间变化; 15:00 开始谷区再一次加深.

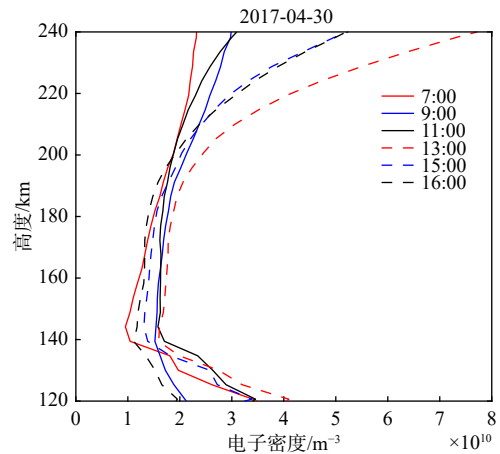


图 4 曲靖地区日间不同地方时的电子密度剖面对比

Fig. 4 Comparison of the daytime electron density profiles at different local times in Qijiang

## 2.2 二维扫描时电子密度观测

扫描探测时, 可固定方位角连续改变仰角, 探测子午链等方向的电离层变化过程; 或者固定仰角, 连续改变方位角, 探测东西纬向的电离层变化过程; 或者同时改变方位、仰角, 探测某一区域的电离层变化过程. 图 5a 为 2014 年 7 月 23 日 16:00 曲靖非相干散射雷达固定方位角 ( $180^\circ$ ) 时, 改变仰角扫描探测的电离层回波, 仰角变化范围为  $30^\circ \sim 84^\circ$ , 仰角步长为  $5^\circ$ , 不同的仰角图中对功率剖面做了归一化处理. 从图可见在北纬  $23^\circ \sim 25^\circ$  地区的电离层 F2 层回波很强, 在  $21^\circ \sim 23^\circ$  之间的 F2 层回波随着纬度降低逐渐减弱, 这表明电离层北驼峰可能移动到广州与曲靖附近地区. 图 5b 为子午链上不同地区 (兰州、重庆、曲靖、广州) 的电离层垂直探测 F2 层临界频率 ( $foF2$ ) 地方时变化, 可见午后曲靖地区的  $foF2$  与低纬广州相似, 但大于中纬其它两地, 这与图 5a 一致 (丁宗华等, 2014b).

## 2.3 固定指向时电子温度等多参数观测

曲靖非相干散射雷达固定指向观测电子密度、电子温度 ( $T_e$ )、离子温度 ( $T_i$ ) 等多参数时 (仰角一般为  $84^\circ$ ), 采用 16 位交替码, 脉冲重复周期为 12 ms, 码元宽度 20 或 30  $\mu\text{s}$  (对应距离分辨率为 3 或 4.5 km), 相干积累时间为 1~2 min. 图 6 为 2017 年 5 月 17 日白天最大电子密度 ( $\text{m}^{-3}$ )、峰值高度 (km)、电子温度 (K)、离子温度 (K) 的变化曲线, 可见  $hmF2$  从 9:00 开始上升, 在 11:00 达到极大值约 300 km, 然后缓慢下降, 在 15:00 达到极小值约 260 km, 在 19:00 开始再次上升.  $NmF2$  从 9:00 开始上升, 至 12:30 达到局部次

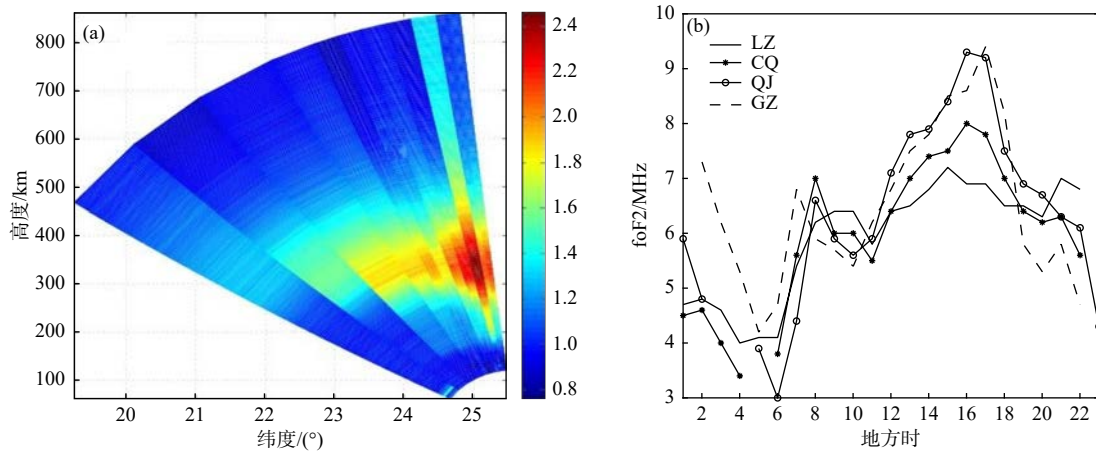


图 5 方位固定、仰角扫描探测的功率剖面 (a) 与子午链不同台站 foF2 变化 (b)

Fig. 5 Examples of the echo profile with the fixed azimuth and scanning elevation (a) and the ionospheric foF2 at different sites along the meridian chain (b)

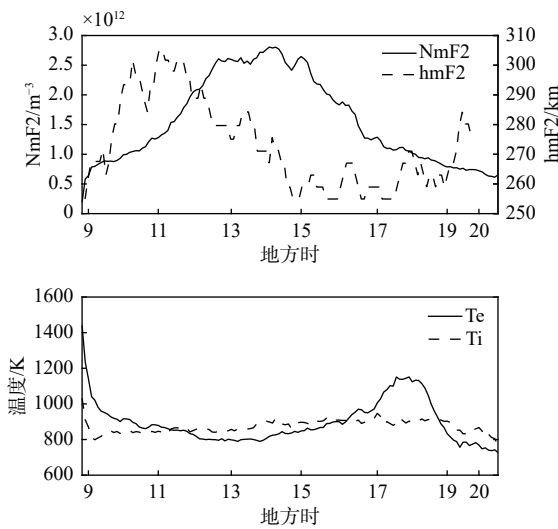


图 6 最大电子密度、峰值高度、电子温度与离子温度的日变化

Fig. 6 Daily variations in NmF2, hmF2, Te and Ti

极大值  $2.5 \times 10^{12}$ , 随后 13:30 缓慢上升至 14:10 达到局部极大值  $2.8 \times 10^{12}$ , 随后持续下降, 在 19:00 达到与上午 9:00 相同数量级  $6 \times 10^{11}$ . 值得注意的是, 11:00—15:00 期间的 hmF2 与 14:00—18:00 期间的 NmF2 存在疑似正相关现象, hmF2 的变化相对 NmF2 超前 3 小时, 在此期间的太阳电磁辐射足够强, 由于电离层高度下移, 电子损失率增加, 电子密度降低. 12:00—15:00 期间出现了 NmF2 的局部起伏变化甚至极小值, 正午时 NmF2 出现局部极小值的现象被称为正午“咬噬”. 260~350 km 之间平均电子温度在 9:00 具有白天最大值约 1400 K, 随后迅速下降, 至 12:00 下降至约 800 K, 从 16:00 开始缓慢上升, 在 17:25—18:25 具有较大值, 其中在 17:50 达到局部极大值约 1200 K, 总体上看相对于约 13:00 具有对称性, 在此期间 260~350

km 之间平均离子温度变化缓慢. 在 9:00—18:00 期间 NmF2 与 260~350 km 之间平均电子温度具有相反的变化趋势, 以上这些变化符合电离层基本规律 (Otsuka et al., 1998).

### 3 空间碎片监测

空间碎片是指空间轨道上运行的无功能的空间物体, 也称空间垃圾. 随着人类空间活动的日益频繁, 空间碎片数目日益增加, 对空间活动与航天器安全的威胁日益严重, 加强空间碎片探测与预警日益成为广泛共识. 国内外虽然已建有多套空间目标 (碎片) 监测雷达, 但总的来看, 空间目标 (碎片) 监测雷达有限导致监测区域覆盖不足、功率有限导致小尺寸空间碎片监测能力不足的问题依然严重.

自 1990 年代就开展了基于非相干散射雷达的空间碎片探测研究 (Markkanen et al., 2005; Sato et al., 1994), 其中 EISCAT 开展了多年的空间碎片监测, 为欧空局空间碎片模型研究与预警服务提供数据支持. 相对于电离层这种分布式软目标而言, 空间碎片为点或体硬目标, 探测方法有所不同, 主要体现在信号处理和数据分析方法. 具体包括: (1) 电离层为散射, 相关时间段需在每个脉冲重复周期内进行自相关分析和谱估计, 再进行相干积累; 而空间碎片一般可视为相干目标, 先对多个 (约 10 个) 脉冲重复周期进行相干积累, 再进行参数估计与特征提取. (2) 由于电离层在时间与空间分布上存在稳定或均匀性, 因此可以积累相对更多的脉冲数 (即更长的积累时间, 一般为分钟量级), 而且不需要快速扫描跟踪探测. (3) 空间碎

片为硬目标, 只分布在某一特定的距离门内, 而电离层等离子体充满了整个空间与雷达波束.

图 7 为空间碎片目标穿越雷达波束期间的回波信噪比强度与距离变化, 横坐标为时间, 可见空间碎片从雷达旁瓣逐渐进入波束中心、最后离开波束的完整过程, 整个过程持续 4 s, 回波信号强度先逐渐增加随后减小、并且伴随着一些随机起伏变化 (可能与空间碎片的姿态变化等不规则运动). 在此期间空间碎片距离缓慢降低, 表明空间碎片逐渐接近雷达波束, 在 4 s 之内变化约 2 km, 即相对雷达的径向速度约  $-0.5$  km/s. 由于空间碎片主要环绕地球进行高速运动 (速度约  $5\sim 10$  km/s), 同时进行不规则运动 (如翻滚、微动等), 我们认为可能是空间碎片运动轨迹与雷达波束夹角很大 (或接近垂直), 导致空间碎片相对雷达的距离变化很缓慢. 从信号强度可计算空间碎片回波信噪比, 代入雷达散射方程可计算空间碎片散射截面, 在各项同向均匀散射导体球模型下可进一步估算其等效直径 (代连东等, 2015); 从距离变化率或多普勒频移可计算其径向速度. 利用信号强度、距离、方位、仰角、速度等信息, 可进一步提取轨道高度、轨道倾角以及运动特征.

图 8 为曲靖非相干散射雷达实测的空间碎片高度分布, 图中同时给出了北极 (EISCAT,  $69.6^{\circ}\text{N}$ ,  $19.2^{\circ}\text{E}$ ) 非相干散射雷达空间碎片探测结果作为对

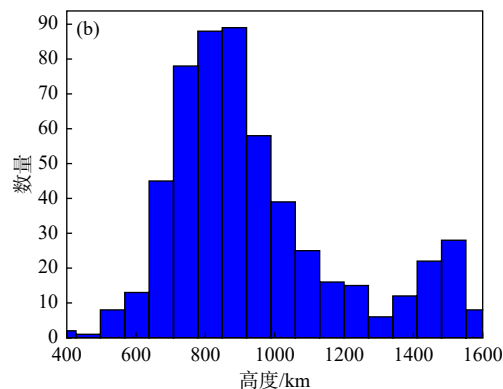
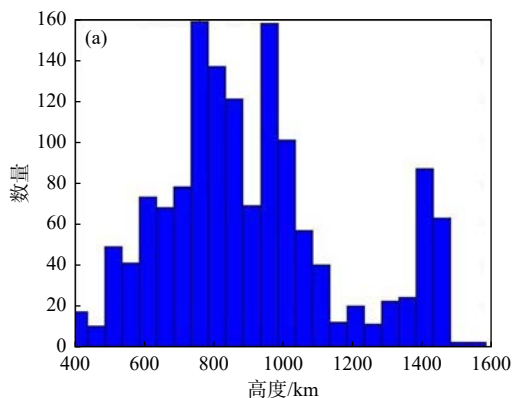


图 8 曲靖 (a) 与 EISCAT (b) 非相干散射雷达实测空间碎片高度变化  
Fig. 8 Space debris height distribution of Qujing (a) and EISCAT ISR (b)

## 4 月球形貌成像探测

月球是距离地球最近的天体, 历来是人类空间与天文探测的首选目标之一. 月球探测具有重要的科技、经济与战略意义. 地基雷达探测月球具有诸多优势, 比如不受太阳光照和地球气象条件限制、

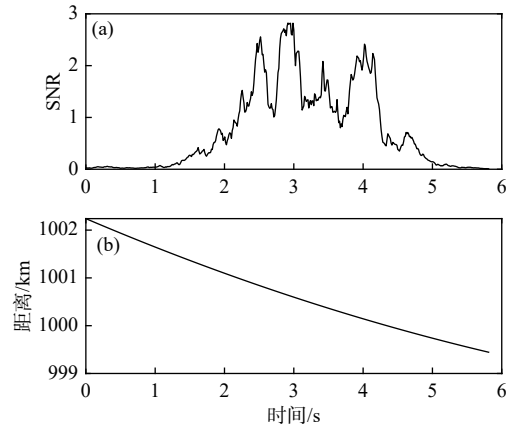


图 7 空间碎片穿越雷达波束期间的回波 (a) 与距离 (b) 变化  
Fig. 7 Variations in the echo amplitude and range of space debris when passing through the beam

比, EISCAT 雷达位于北极区. 可见曲靖非相干散射雷达实测的空间碎片主要分布在  $600\sim 1100$  km、 $1400\sim 1500$  km 两个高度区间, 其中在  $800$  km 和  $1000$  km 出现两个峰值. 图 9 为曲靖上空不同高度的空间碎片等效尺寸与径向速度分布, 可见该雷达目前可探测数  $\text{cm}\sim 100$  cm 尺寸的空间碎片, 在  $300$  km 可探测能力约  $3$  cm, 在  $500\sim 1000$  km 与  $1400$  km 的空间碎片数较多, 在  $1000\sim 1400$  km 区间的空间碎片数较少, 径向速度主要分布在  $-2\sim 2$  km/s 之间, 以上观测结果与 EISCAT 基本一致 (代连东等, 2015; Markkanen et al., 2005).

雷达电磁波可穿透月球表面进行次表层与深层探测、可多站多天线组合进行干涉成像等. 美国在地基雷达探测月球方面处于领先地位. 美国 Goldstone Solar System 雷达 (GSSR)、Arecibo 雷达和 Green-Bank 射电望远镜等在月球方面开展了大量工作, 比如利用 Arecibo  $2.3$  GHz 天文雷达, 对月球极区的太阳阴影区进行探测, 发现了很多小于  $1$  km<sup>2</sup>、

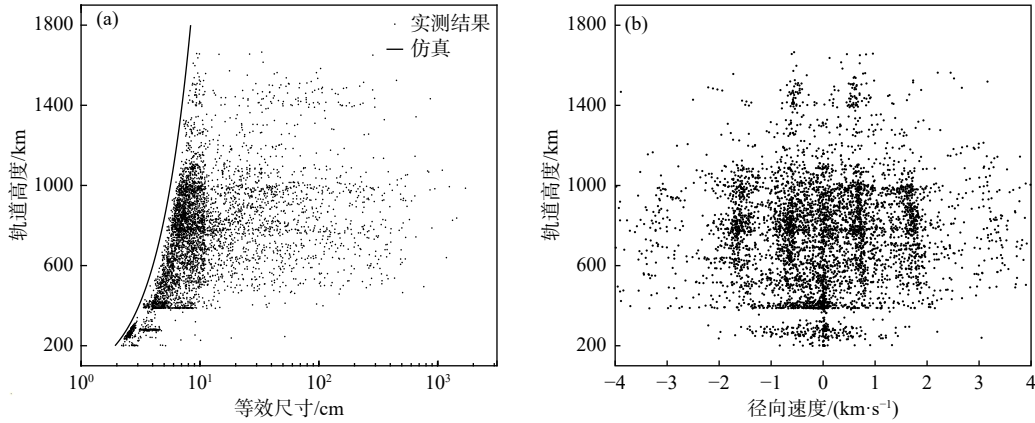


图 9 曲靖上空不同高度的空间碎片等效尺寸 (a) 与径向速度 (b) 分布

Fig. 9 Effective size (a) and radial velocity (b) distribution of space debris with orbital height

后向散射截面与圆极化比较高的疑似冰层, 与日照时光学观测图像基本相符 (Stacy et al., 1997); 利用 EISCAT 930 MHz 非相干散射雷达开展了月球回波成像实验, 距离分辨率为 600 m (Vierinen and Lehtinen, 2009). 我国在地基雷达测月领域处于起步阶段, 近年来曲靖与三亚非相干散射雷达积极开展了月球探测实验并取得了初步结果 (李鸣远等, 2021; 杨嵩等, 2022).

曲靖非相干散射雷达波束指向月球, 发射高功率相位编码脉冲 (采用 13 位巴克码编码方式, 脉冲重复周期为 12 ms, 码元宽度为 30 us), 通过对月球回波进行简单的脉冲压缩与相干处理, 即可得到月球表面不同时延位置的回波功率. 图 10a 为 2020 年 9 月 11 日接收到的月球散射回波功率-时延剖面, 其中“红色”曲线代表曲靖雷达测量结果,

“蓝色”曲线代表 Arecibo 雷达 (68 cm 波长, 天线口径 305 m, 已停止工作) 的测量结果, 横坐标为时间轴, 以雷达下点处 (雷达-月球质心连线在月面上的交点) 为起始时刻, 并以月球边缘回波为终止时刻 (相对起始时刻约为 11.67 ms), 纵坐标代表归一化后的回波功率, 可以直观看出两台设备的测量曲线在幅值和趋势上均十分接近, 这验证了曲靖非相干散射雷达探测回波的准确性 (杨嵩等, 2022). 利用距离-多普勒成像技术, 并通过坐标系转换可得到月球近地球面不同位置的散射回波二维像, 如图 10b 所示, 图中不同灰度表示不同散射信号强度, 主要与月球此处的地形地貌、月壤月岩的成分等有关, 与现有结果基本一致 (Campbell et al., 2007; 李鸣远等, 2021; Vierinen and Lehtinen, 2009).

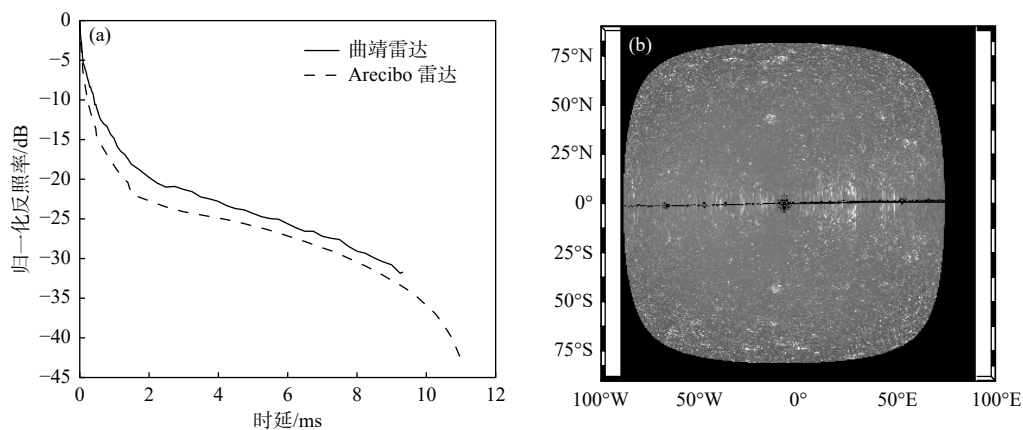


图 10 曲靖非相干散射雷达月球回波-时延变化 (a) 与月球回波二维像 (b)

Fig. 10 Echo-delay variation (a) and two-dimensional image (b) by Qijiang ISR

### 5 结论和展望

本文简单介绍了我国曲靖非相干散射雷达的主要技术方案, 详细给出指标、设备组成与关键技术,

结合观测数据研究了该雷达的电离层电子密度观测、空间碎片凝视探测与月球二维成像探测能力. 研究表明, 曲靖非相干散射雷达可用于研究: (1) 白天电离层 F 层不同高度的电子密度、电子温度、离

子温度等参数的日变化、季节变化等电离层气候学特征。(2) 磁暴事件、日落与夜间异常增强事件期间的电离层 F 层电子密度变化等天气学特征。(3) E-F 谷区电子密度剖面形态及变化特征。(4) 曲靖上空约 3 cm 以上尺寸(尺寸越大, 探测越容易)的空间碎片分布特征。(5) 月球近地球面不同区域的电磁波散射回波特性。

目前曲靖非相干散射雷达虽然已运行 10 年(2012 年 5 月初步建成), 但还存在很多不足。(1) 对低电离层(80~110 km)探测反演还存在很大不足。这是因为 110 km 以下电离层散射回波较弱, 且易受流星余迹、中层顶大气湍流散射等回波干扰; 同时 Es 散射回波虽然较强, 但是 Es 属于薄的电子密度稠密层, 其散射不同于 F 层, Es 层非相干散射回波电离层参数(电子密度等)提取一直未解决。(2) 对 F 层动力学与电动力学过程研究十分薄弱。这是因为非相干散射雷达探测等离子体速度的误差一般都比较, 可高达数十米每秒, 这就导致由等离子体速度推导的热层风、电场等参数误差很大。这对于研究电离层事件期间的 F 层动力学与电动力学过程十分不利。(3) 在大范围探测(含子午面扫描等)方面还十分有限。大范围探测需要进行快速波束扫描, 由于曲靖非相干散射雷达利用了原 110 雷达的伺服与部分馈线系统, 而且整个天馈系统(含配重)为数百吨, 快速转动时伺服电机冲击电流较大, 持续(1 小时及以上)扫描易导致伺服系统短路、馈线打火等, 导致设备故障无法持续观测。(4) 由于维护保养工作量大、运行经费高等原因, 目前持续观测以及夜间观测的数据积累有限, 难以支撑曲靖地区电离层气候学特征的深入研究。

针对目前存在的以上问题, 面向我国中低纬过渡地区电离层结构与演化(E-F 谷区、D 区、顶部电离层、北驼峰区)研究、气候学与天气学特性分析、大气层-电离层耦合等科学研究需求, 以及电离层预报模型、空间碎片统计模型、月球形貌与次表层地质观测等应用需求, 持续开展观测与深入研究, 近期将重点开展电离层 Es 层与暴时及扰动特性多手段综合观测、电离层 E-F 谷区与北驼峰区结构及演化特征观测等, 提升我国中低纬过渡区电离层特性认知与模型研究能力。

## References

Campbell B A, Campbell D B, Margot J L, et al. 2007. Focused 70-cm wavelength radar mapping of the Moon[J]. *IEEE Transactions on*

*Geoscience and Remote Sensing*, 45(12): 4032-4042.

- Dai L D, Ding Z H, Zhao Z W, et al. 2015. The statistical analysis of space debris's parameters based on the incoherent scattering radar[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 35(4): 495-501 (in Chinese).
- Ding Z H, Dai L D, Dong M Y, et al. 2014a. Progress of the incoherent scattering radar: From the traditional radar to the latest EISCAT 3D[J]. *Progress in Geophysics*, 29(5): 2376-2381 (in Chinese).
- Ding Z H, Yu L, Dai L, et al. 2014b. The preliminary measurement and analysis of the power profiles by the Qujing incoherent scatter radar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(11): 3564-3569 (in Chinese).
- Ding Z H, Dai L D, Xu Z W, et al. 2017. The ionospheric electron density measurement based on the scattered echo from the space surveillance radar[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 14(7): 24-28 (in Chinese).
- Ding Z H, Wu J, Xu B, et al. 2018. The Qujing incoherent scatter radar: System description and preliminary measurements[J]. *Earth, Planets and Space*, 70: 87. DOI: 10.1186/s40623-018-0859-8.
- Ding Z H, Yang S, Jiang H, et al. 2018. The data analysis of the space debris observation by the Qujing incoherent scatter radar[J]. *Space Debris Research*, 18(1): 12-19 (in Chinese).
- Ding Z H, Dai L D, Yang S, et al. 2020. Preliminary analysis of the ionospheric electron temperature variations of F layer in daytime using the Qujing incoherent scatter radar measurements[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(4): 1282-1293 (in Chinese).
- Ding Z H, Dai L D, Yang S, et al. 2022. Preliminary analysis of daytime electron density in the ionospheric E-F valley based on the Qujing incoherent scatter radar observations[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 37(3): 357-363 (in Chinese).
- Evans J V. 1969. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar[J]. *Proceedings of the IEEE*, 57(4): 494-530.
- Gordon W E. 1958. Incoherent scatter of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radar[J]. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 46(11): 1824-1829.
- Li M Y, Wang Y H, Yin H L, et al. 2021. A mosaic imaging study of the northern and southern hemispheres of the nearside of the Moon based on the Sanya incoherent scatter radar[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(4): 450-458 (in Chinese).
- Liu L B, Ding Z H, Le H J, et al. 2020a. New features of the enhancements in electron density at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125: e2019JA027539. DOI: 10.19975/j.dqyx.2021-014.
- Liu L B, Ding Z H, Zhang R L, et al. 2020b. A case study of the enhancements in ionospheric electron density and its longitudinal gradient at Chinese low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124: e2019JA027751. DOI: 10.19975/j.dqyx.2021-014.
- Markkanen J, Lehtinen M, Landgraf M. 2005. Real-time space debris monitoring with EISCAT[J]. *Advances in Space Research*, 35(7): 1197-1209.
- Otsuka Y, Kawamura S, Balan N, et al. 1998. Plasma temperature variations in the ionosphere over the middle and upper atmosphere radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103 (A9): 20705-20713.
- Sato T, Ikeda K, Kimura I, et al. 1994. Shape of space debris estimated



- from radar cross section variation[J]. *Journal of Spacecraft and Rocket*, 31(4): 665-670.
- Stacy N J, Campbell D B, Ford P G. 1997. Arecibo radar mapping of the Lunar poles: A search for ice deposits[J]. *Science*, 276: 1527-1531.
- Vierinen J, Lehtinen M. 2009. 32-cm wavelength radar mapping of the Moon[C]//The 2009 European Radar Conference, Rome, Italy, IEEE, 1-4.
- Wannberg G, Wolf I, Vanhainen L G, et al. 1997. The EISCAT Svalbard radar: A case study in modern incoherent scatter radar system design[J]. *Radio Science*, 32(6): 2283-2307.
- Yang S, Ding Z H, Xu Z W, et al. 2018. Statistical analysis of space debris by incoherent scatter radar in Qujing[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 33(6): 648-654 (in Chinese).
- Yang S, Ding Z H, Miao J S, et al. 2022. Preliminary lunar observation by Qujing incoherent scatter radar[J]. *Radar Science and Technology*, 20(1): 15-22 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 代连东, 丁宗华, 赵振维, 等. 2015. 非相干散射雷达的空间碎片参数统计分析[J]. *空间科学学报*, 35(4): 495-501.
- 丁宗华, 代连东, 董明玉, 等. 2014a. 非相干散射雷达进展: 从传统体制到 EISCAT\_3D[J]. *地球物理学进展*, 29(5): 2376-2381.
- 丁宗华, 鱼浪, 代连东, 等. 2014b. 曲靖非相干散射雷达功率剖面的初步观测与分析[J]. *地球物理学报*, 57(11): 3564-3569.
- 丁宗华, 代连东, 许正文, 等. 2017. 基于空间监视雷达散射回波的电离层电子密度探测方法[J]. *装备环境工程*, 14(7): 24-28.
- 丁宗华, 杨嵩, 江海, 等. 2018. 曲靖非相干散射雷达的空间碎片数据分析[J]. *空间碎片研究*, 18(1): 12-19.
- 丁宗华, 代连东, 杨嵩, 等. 2020. 曲靖非相干散射雷达电离层 F 区日间电子温度变化特征初步分析[J]. *地球物理学报*, 63(4): 1282-1293.
- 丁宗华, 代连东, 杨嵩, 等. 2022. 曲靖非相干散射雷达电离层 E-F 谷区电子密度日间变化特征初步分析[J]. *电波科学学报*, 37(3): 357-363.
- 李鸣远, 王永辉, 尹翰林, 等. 2021. 基于三亚非相干散射雷达的月球正面南北半球拼接成像研究[J]. *地球与行星物理论评*, 52(4): 450-458.
- 杨嵩, 丁宗华, 许正文, 等. 2018. 曲靖上空空间碎片姿态、分布和散射特性的统计分析[J]. *电波科学学报*, 33(6): 648-654.
- 杨嵩, 丁宗华, 苗建苏, 等. 2022. 曲靖非相干散射雷达月球探测初步结果[J]. *雷达科学与技术*, 20(1): 15-22.

王铮, 曹光伟, 胡连欢, 谭广远, 尚社平, 胡鹏, 陈志青. 2024. 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. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 77-93. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-008.

Wang Z, Cao G W, Hu L H, Tan G Y, Shang S P, Hu P, Chen Z Q. 2024. 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. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 77-93 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-008.

## 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

王 铮<sup>1,2\*</sup>, 曹光伟<sup>1,3</sup>, 胡连欢<sup>4</sup>, 谭广远<sup>1,3</sup>, 尚社平<sup>1,2</sup>, 胡 鹏<sup>1,3</sup>, 陈志青<sup>1,2</sup>

1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2 太阳活动与空间天气重点实验室, 北京 100190

3 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190

4 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

**摘要:** 子午工程二期电离层 TEC 与闪烁接收机布网采用国产设备. 经过连续 3 天的运行测试, 本文以同台站同天线的国外对比设备 PolARx5 数据为参考, 对样机的数据进行质量评估. 对于科学研究, 数据的连续性和有效性, VTEC、幅度闪烁指数、相位闪烁指数这三项数据的精度是最重要的指标. 本文根据科研场景设计了这些方面的数据比较标准, 评估样机的数据质量, 并对两种设备探测结果特征的原因进行了分析, 为数据准确性的评估提供参考和借鉴.

**关键词:** 子午工程; GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪; 样机测试; 数据质量

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-008

中图分类号: P352

文献标识码: A

## 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

Wang Zheng<sup>1,2\*</sup>, Cao Guangwei<sup>1,3</sup>, Hu Lianhuan<sup>4</sup>, Tan Guangyuan<sup>1,3</sup>, Shang Sheping<sup>1,2</sup>, Hu Peng<sup>1,3</sup>, Chen Zhiqing<sup>1,2</sup>

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, Beijing 100190, China

3 Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China

4 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** The global navigation satellite system (GNSS) ionospheric total electron content (TEC) and scintillation monitors in the Phase II of Chinese Meridian Project network provide domestic measurements. After 3 consecutive days of testing, we used PolARx5 data with the same antenna as a reference to evaluate the quality of the prototype data. For scientific research, the continuity and effectiveness of data, as well as the accuracy of vertical

收稿日期: 2023-02-25; 录用日期: 2023-07-11

基金项目: 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划; 南海上空中高层大气与电离层环境变化特征的基础与应用研究资助项目 (YSBR-018); 中国科学院青年创新促进会基金 (2023000116); 中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”

支持项目: 太阳活动与空间天气实验室基金

Supported by the Stable Support for Youth Team Programs in the Field of Basic Research of Chinese Academy of Sciences, the Basic and Applied Research on the Characteristics of Environmental Changes in the Middle and Upper Atmosphere and Ionosphere over the South China Sea (Grant No. YSBR-018), the Fund of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2023000116), the "Climbing Plan" of National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, and the Fund of Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather

\*通信作者: 王铮, 男, 副研究员, 主要从事电离层物理等方面的研究. E-mail: zwang@swl.ac.cn



TEC, amplitude scintillation index, and phase scintillation index values, are the most important indicators. In this study, we designed data comparison standards for these aspects based on scientific research scenarios, evaluated the data quality of the prototype, and analyzed the reasons for the characteristics of the detection results of the two devices. These findings provide a reference for the evaluation of data accuracy.

**Keywords:** Chinese Meridian Project; GNSS ionospheric TEC and scintillation monitor; prototype testing; data quality

## 0 引言

电离层电子总含量 (total electron content, TEC) 是电离层电子柱含量 (Mannucci et al., 1998); 电离层闪烁包括幅度闪烁和相位闪烁, 是描述电离层对无线电波传播影响程度的参数 (Alfonsi et al., 2013; Kil et al., 2002). TEC 和闪烁指数及其变化不但是电离层形态学研究的重要资料, 也是精密定位、导航和电波科学中电离层修正的重要参数 (Basu et al., 1999; Kintner et al., 2007). 它们是描述电离层形态和结构的重要参量, 有助于研究电离层对电磁波传播的影响.

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 包括 GPS (Global Positioning System)、GLONASS (Global Navigation Satellite System)、北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 等星座系统. 美国 GPS 卫星升空之前, 已有多种以穿透电离层的电波或以电离层反射/散射电波为基础的地面遥测方法, 可以用来测量传播路径的 TEC、电波闪烁以及引起闪烁的电离层密度不均匀体的统计特性 (Aarons, 1982; Yeh and Liu, 1982). GPS 为代表的 GNSS 全球导航定位系统的出现为电离层探测研究提供了新的途径. GPS 卫星发射 1575.42 MHz 和 1227.60 MHz 的双频信标, 由于 GPS 卫星众多且公转速度快, 一台设备通常可以同时接收 4 颗以上的 GPS 卫星信号, 并通过信号载波和相位计算 TEC 和闪烁.

目前国内观测点使用的电离层 TEC 和闪烁监测仪大多采用国外研制的仪器. 美国康奈尔大学空间物理组在 GEC Plessey GPS Builder22 系统基础上, 对软件进行了修改, 开发了 GPS 电离层闪烁监测仪, 国内多个单位利用该设备进行监测, 研究赤道地区 L2 波段电离层闪烁的形态特性. 国内还有一些单位利用美国空军开发的 GPS 电离层闪烁监测仪 (ionospheric scintillation monitor, ISM) 进行电离层闪烁研究. 比利时 Septentrio 研发的 PolaRx5S 电离层闪烁监测仪具备实时输出 TEC 和闪烁指数数

据、跟踪所有可见的 GNSS 卫星、原始数据输出 (代码、载体、导航数据) 等特点 (Pasuluri et al., 2018). 加拿大 Novatel 公司在其一代电离层闪烁监测仪 GSV4004 的基础上研制了支持多卫星系统的 GPStation6 电离层 TEC 与闪烁监测仪, 也得到了较为广泛的应用 (Fenton et al., 1991).

目前国际上广泛使用的成熟产品主要是上文提到的 Septentrio PolaRx5s 和 Novatel. 这几个型号的设备产生的观测数据支撑了大量的科学研究 (Aarons, 1997; Hernández-Pajares, 2004; Liu et al., 2022; 吴云等, 2005), 数据质量得到验证. 过去此类设备主要运用 GPS 卫星信号, 但近年来 BDS 得到了巨大发展, 国际上已经发展出多套 GNSS 系统, 有更多的卫星可用于计算.

子午工程二期 GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪采用公开招标的方式, 在当前主流监测设备中进行择优选择, 当国内设备性能指标和数据产品与国外设备相当时, 将优先选择国内产品. 这对 GNSS 电离层闪烁监测仪国产化有着重要意义.

为了检验设备是否满足工程需求, 在投产前, 需要开展样机测试. 样机的技术指标主要在实验室通过模拟器进行测试. 模拟器测试所检验的内容包括 GNSS 系统接收、通讯接口、载波相位精度、闪烁指数精度、TEC 测量精度、天线指标、数据接收计算机配置、室外环境适应性、室内环境适应性、齐套性等, 并不涉及科学数据能否真实和准确反映电离层空间环境信息.

另一方面, 对于设备探测到的数据, 每台设备由于硬件延迟等客观原因, 即使两台相同型号的设备计算出的电离层 TEC 和闪烁都不可能完全相同; 再加上国际上并无统一标准的算法, 设备采用的算法不同, 不同型号的设备计算的参数有更显著的区别. 如何界定一台设备探测到的电离层参量的准确性, 是一个难以严格解答的问题.

为了进一步评估子午工程 GNSS 设备的样机观测数据的质量, 子午工程二期工程总体组织设备生产方在北京十三陵台站对 2 台样机以及 1 台

Septentrio PolaRx5s 对比机进行了连续 3 天的对比测试. 本文根据科研场景设计了一些比较标准, 展示了数据对比分析的结果, 评估样机的数据质量, 并对两种设备探测结果特征的原因进行了分析, 为数据准确性的评估提供参考和借鉴.

## 1 参测设备和测试过程

### 1.1 子午工程 GNSS 电离层 TEC 和闪烁监测仪组网概况

电离层 TEC 和闪烁监测仪是电离层空间环境背景参量的重要设备之一. 子午工程二期采用支持 GNSS 卫星系统的电离层 TEC 和闪烁监测仪, 安装于如表 1 的 32 个站点, 形成监测网络, 实时获得中国上空的电离层 TEC 和电离层闪烁等信息, 对于认知我国空间环境背景及科学应用具有重要意义.

GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪对 GNSS 接收天线接收的美国 GPS、中国 BDS、欧洲 GALILEO 系统 (Galileo Satellite Navigation System)、俄罗斯 GLONASS、日本 QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) 以及印度 IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) 共 7 个 GNSS 系统的导航信号, 进行下变频、放大、滤波及 AD 采样后, 送至 FPGA 进行相关处理, DSP 和 ARM 对基带捕获跟踪通道进行控制, 并对导航信号的幅度和相位信号进行实时监测和测量, 解算出电离层 TEC、电离层幅度闪烁指数、电离层相位闪烁指数等相关数据. 通过获取大量台站的电离层参量, 科研和应用工作者可以制成电离层参量的水平地图, 反映电离层变化的水平分布和大范围的变化过程. 这对研究电离层的电动力学过程、对我国区域的电离层建模具有重要意义 (Ratovsky et al., 2014; Wilson et al., 1995).

### 1.2 样机的技术特点

由于电离层空间环境研究与应用的强烈需求, 当前 GNSS 电离层监测要求同时监测获得多个卫星系统的信号, 克服 GNSS 信号穿越整个电离层时由于电离层不均匀体引起的信号相位和幅度快速起伏导致的锁相环失锁和码失锁. 因此, 设备的重要要求:

(1) GNSS 全频段接收技术. GNSS 电离层监

表 1 子午工程二期 GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪站点分布

Table 1 Distribution of GNSS ionospheric TEC and scintillation monitor stations in the Phase II of Chinese Meridian Project

编码	站点	经度	纬度
OLEDO	乐东站	109.0°E	18.5°N
ODAZH	儋州站	109.1°E	19.5°N
OHKQS	海口琼山站	110.5°E	19.8°N
ONNQX	南宁青秀站	108.5°E	22.8°N
OSHI	双江站	99.8°E	23.5°N
OBOLU	博罗站	114.5°E	23.5°N
OXMJM	厦门集美站	118.1°E	24.6°N
OGLDC	桂林叠彩站	110.3°E	25.4°N
OKMWH	宾川站	100.6°E	25.6°N
ONCDH	南昌东湖站	115.8°E	28.7°N
OCQSP	重庆沙坪坝站	106.4°E	29.5°N
ONQSN	那曲色尼站	91.2°E	29.6°N
OHZXH	杭州西湖站	120.1°E	30.3°N
OPUJI	蒲江站	103.6°E	30.3°N
OWHHP	武汉黄陂站	114.5°E	31.0°N
OBHKD	包河科大站	117.3°E	31.8°N
OXYWC	咸阳渭城站	108.7°E	34.3°N
OXXMY	新乡牧野站	113.9°E	35.3°N
OGAER	噶尔站	80.1°E	35.5°N
OYUZH	榆中站	104.1°E	36.0°N
OWHWD	威海文登站	121.8°E	37.2°N
OHLAN	贺兰站	106.1°E	38.8°N
OJSHI	伽师站	76.8°E	39.5°N
OJIYG	嘉峪关站	98.2°E	39.8°N
OCSSL	昌平十三陵站	116.2°E	40.3°N
OSIZW	四子王站	111.7°E	41.5°N
OLONJ	龙井站	129.4°E	42.8°N
OKERL	库尔勒站	81.7°E	42.9°N
OGZHL	公主岭站	124.9°E	43.9°N
OMZLB	满洲里北区站	117.5°E	49.6°N
OMOHE	漠河站	122.4°E	53.5°N
OCHCH	南极长城站	58.96°W	62.23°S

测仪接收到卫星数量决定了能够监测到闪烁事件的最大数量, 且通过对不同导航系统电离层 TEC 和闪烁指数进行对比, 更能反映出仪器的工作性能, 因此本设备针对科学需求, 要求对接收天线和射频前端以及对应的基带处理进行 GNSS 全频段设计. 本文的测试需要从数据角度对这种能力进行验证.

(2) 强闪烁稳定捕获/跟踪技术. 由于 GNSS 信号穿越整个电离层, 电离层不规则结构引起信号相位和幅度的快速随机起伏, 这种快速的相位变化

(相位闪烁)会引起 GNSS 信号的多普勒频移,从而可能超出锁相环的带宽,导致相位失锁,同时幅度的削弱将会使得 GPS 载噪比降低到接收机极限以下,导致码失锁,为了保证处理器能提取出准确的幅度、相位等信息,要求 GNSS 电离层监测仪具有较强的抗干扰能力.要实现这一目标,一方面需要在硬件上加强设计;另一方面,也需要优化算法,保证在产生多普勒频移时锁相环正常工作.本文对不同设备的数据对比结果表明了这会明显影响数据质量,提出了需要改进的方向.

### 1.3 测试过程

2022 年 10 月 27 日至 11 月 9 日在研制方实验室利用 GNSS 模拟器进行各种指标详细测试.

2022 年 9 月 14—23 日,子午工程总体对 GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪测试样机 (GISMOR) 在北京昌平的十三陵地磁台 (116.2°E, 40.3°N) 进行测试,样机共两台 (编号为 9 号和 10 号),与对标的进口设备 (Septentrio PolaRx5 接收机) 通过功分器接同一个天线.

本文以 9 月 20—22 日,9 号样机、10 号样机、Septentrio PolaRx5 接收机三台仪器自动获取的电离

层垂直 TEC (Vertical TEC, VTEC)、幅度闪烁指数和相位闪烁指数为主要分析对象.考虑到计算时不同设备硬件延迟数据的准确性,以上比较中允许一定程度的曲线起伏和系统性偏差.比较结果见本文第 3 节.

本文的分析基于两种设备各自内部的自动解算算法.为了保持算法的一致性,本文的第 4 节利用第三方算法,使用 9 号样机、10 号样机、Septentrio PolaRx5 接收机生成的 RINEX 伪距和载波相位文件计算 VTEC,检查两台样机测量同一卫星的 VTEC 曲线一致性,检查 9 号样机与对比设备测量同一卫星的 VTEC 曲线一致性.

## 2 技术指标测试

样机的模拟器测试针对捕获跟踪、主机输出参数、通讯接口、通道数量、相对/绝对 TEC 测量精度 (单位为 TECU)、伪距和载波相位更新频率 (单位为 Hz)、载波相位精度 (单位为周)、幅度闪烁指数精度 (无量纲)、相位闪烁指数精度 (单位为 rad)、时间分辨率 (单位为 s)、恒温晶振等 26 项技术指标.几个涉及科学数据的主要指标项的测试结果如表 2 所示,均满足预设的要求.

表 2 样机主要指标项的测试结果

Table 2 Test results of the main indicators of the prototype

指标项	要求	测试结果
相对TEC测量精度	相对TEC测量精度: $\leq 0.02$ TECU;	0.016 TECU
绝对TEC测量精度	绝对TEC测量精度: $\leq 3$ TECU;	1.80 TECU
伪距和载波相位更新频率	伪距和载波相位更新频率(时间分辨率): 1 Hz、5 Hz、10 Hz可选;	伪距和载波相位更新频率(时间分辨率): 1 Hz、5 Hz、10 Hz可选;
载波相位精度	载波相位精度: 优于0.5%周;	优于0.48%周
幅度闪烁指数精度	幅度闪烁指数精度: 优于0.08;	优于0.0058
相位闪烁指数精度	相位闪烁指数精度: 优于0.04 rad;	优于0.0077 rad
TEC数据时间分辨率	TEC数据时间分辨率1 s;	1 s

## 3 数据质量对比分析指标设计

GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪每分钟生成有效观测结果,每 5 min 输出闪烁和 STEC 数据文件,每天输出 VTEC 数据文件.对于科学研究,数据的连续性和有效性,VTEC、幅度闪烁指数、相位闪烁指数这 3 项数据的精度是最重要的指标.

(1) 对于数据的连续性和有效性,不仅应考察每 5 min 和每天的数据是否齐全,更应该考察每分钟是否有有效观测和丢包,连续 3 天丢包率

$< 0.1\%$ .

在此基础上,两台接收机追踪到的卫星数越多、追踪卫星的时长越长,越有可能获得好的观测数据.追踪时间可以基于闪烁数据的记录给出.由于多路径效应等影响,卫星相对于接收机的仰角较大时误差变大,因此设计考察在卫星仰角高于  $10^\circ$  的情况下,设备跟踪卫星个数以及总跟踪时间.

对各个 GNSS 星座,追踪卫星数可以直接比较数字,并使用样机追踪时长/PolaRx 追踪时长作为直观比较的参数.两台同批次样机应保持一致性,

因此各星座跟踪卫星个数应该一致,全卫星总跟踪时间差距也应该很小。

(2) 样机和 PolaRx5 针对各自的硬件设计,内置了不同的 VTEC 算法,在追踪到卫星信号后各自解算 VTEC。

直接考察同一天线的 9 号样机与对比设备,对同颗卫星 VTEC 解算的 VTEC 自动输出结果,不做滑动平均,发现样机自动输出的曲线更为平滑,离散程度更低,随机误差等偏差较小,这是由于样机输出数据时在设备端已经进行了平滑处理。

为了定量表征两种设备的两条曲线的趋势一致性,对该结果取同步轨道卫星  $10^\circ$  仰角、非同步轨道卫星  $30^\circ$  仰角以上(因样机追踪卫星时间短、VTEC 曲线短),进行了 13 min 滑动平均,然后计算相关系数。

13 min 的滑动窗口是:数据结果为每分钟 1 个点,前后各取每小时的 10% 也就是 6 个点,加上数据点本身,共 13 min。选择该滑动窗口的原因:曲线起伏主要是随机噪声,多数情况为 3 个点一个尖峰,前后各包含约 2 次起伏。

(3) 粗略考察几台设备观测到的闪烁指数,在 3 天测试期间没有出现明显的闪烁事件(连续长时间较大的幅度和相位指数)。由于中纬度的北京地区是电离层闪烁发生率较低的区域,这是合理的。

实际科研工作中,由于闪烁指数是对信号信噪比的计算,反映的是空间等离子体不规则体形状微小的起伏,通常选择一定时间段的闪烁指数升高的比例来表征闪烁事件(通常以  $S4 \geq 0.2$  作为弱闪烁的判断依据)。通常设备观测到的幅度闪烁指数随时间变化的曲线是中间(高卫星仰角)低、两边高(低卫星仰角),但该指数在低仰角时的升高属于多路径效应等引起的自然现象,属于设备随机噪声,曲线的相似度不具备直接比较的意义。通常研究者会选择仰角较大的数据进行研究,常见的仰角阈值有大于  $75^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $25^\circ$  等。

为考察设备受低仰角多径干扰的影响,并考察设备在高仰角的工作条件下受随机噪声较大、干扰到科研和工程的几率,从而综合考察数据质量,设计统计幅度闪烁指数受干扰影响对比:①出现多径时起始仰角:非同步轨道卫星低仰角时幅度闪烁  $S4 \geq 0.2$  的边界,该角度为卫星仰角较小时  $S4$  指数取 0.20~0.21 时所有仰角的平均值;该角度越大,说明设备越容易受噪声干扰,特别是该角度不应明

显大于  $25^\circ$ , 否则会显著干扰到电离层观测与科研;② $60^\circ$  仰角以上受干扰次数:非同步轨道卫星仰角大于  $60^\circ$  时,  $S4 \geq 0.2$  的次数;。

相位闪烁指数可以选择相似的比较方法,不过是以 0.1 为相位闪烁指数的阈值。

## 4 数据质量对比分析结果

### 4.1 数据连续性和有效性

考察数据原始文件,3 天连续运行,每分钟一个有效数据,对比设备(红色星号)没有发生丢包,共 259200 条数据,故 RINEX 数据序列号从 1 编号到 259200。

9 号样机在 3 天中序列号从 1 编号到 259196,共丢 4 个包。9 号机和 10 号机一致。

经过测试,数据的丢包率为 0.00154%,丢包率  $< 0.1\%$ ,连续性很好。

继续考察样机追踪的卫星总数、总跟踪时间,首先检查同批次两台样机的一致性。在 7 个卫星星座中,两台样机各星座跟踪卫星数(颗)和卫星编号都相同,对每个卫星的追踪时间大多数几乎一致,只有 SBAS 08 星差得较多,可能是因为仪器载噪比。全卫星总跟踪时间分别为 9 号机 229288 min、10 号机 227170 min,差距为 0.92%,小于 5%,一致性很好。

样机和对比设备在仰角  $10^\circ$  以上追踪的卫星总数、总跟踪时间如图 1 和表 3 所示(仅展示 BDS,其余 6 个系统图略)。

样机追踪的各个星座的卫星数和时长与 PolaRx 相似。具体来看,BDS 样机追踪的卫星数比 PolaRx 要多 12 颗,故追踪时间长很多,但每颗卫星追踪时长略少于 PolaRx,例如样机对 05 星的追踪时长明显少于 PolaRx;IRNSS 系统样机追踪到 2 颗卫星,但 PolaRx 未能追踪到;对 SBAS 系统两台设备跟踪到的卫星号存在明显的差异,经过检查卫星号的识别并没有错误;对于其余 4 个系统,样机追踪的各个星座的卫星数与 PolaRx 几乎相同,但每颗卫星追踪时长略少于 PolaRx。由于 SBAS 是利用同步轨道卫星增强的体系,可能是两种设备跟踪了不同星座的卫星。

### 4.2 VTEC 自动输出结果对比 PolaRx5

样机和 PolaRx5 的 VTEC 比较如表 4 所示。

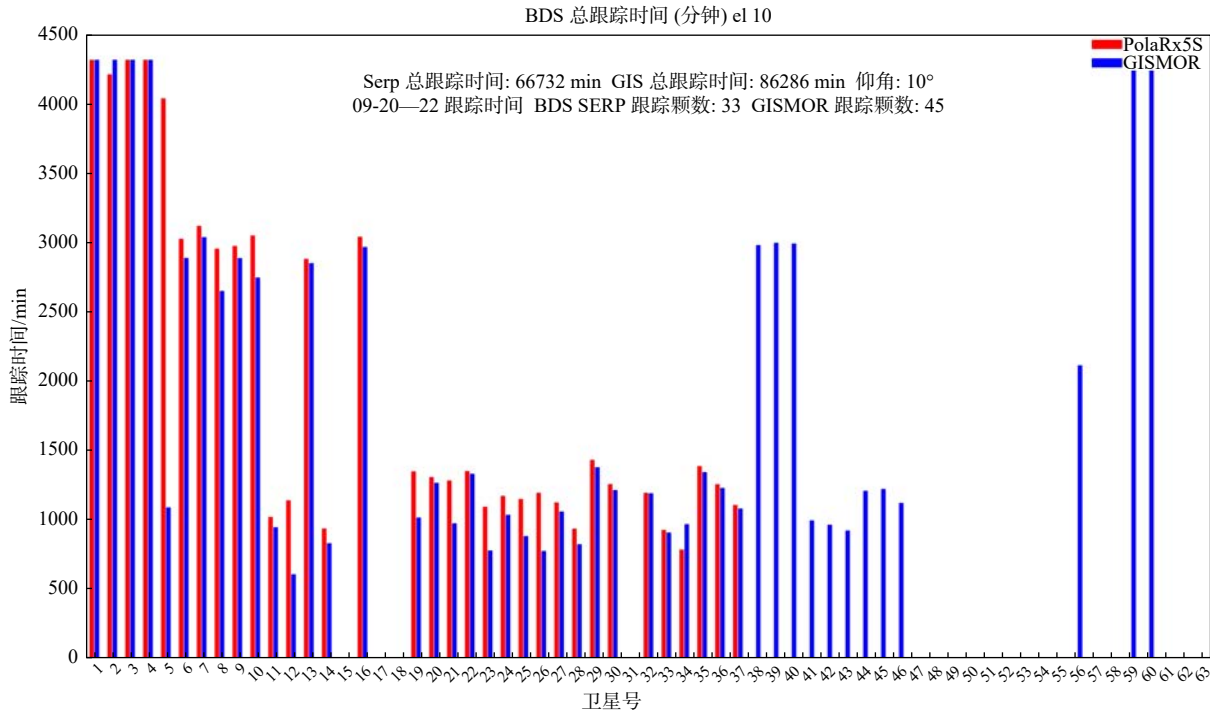


图 1 样机 9 号机 (蓝色) 对于 BDS 卫星总跟踪时间与对比设备 (红色) 的比较情况

Fig. 1 Comparison of the total tracking time of BDS satellite between the prototype 9 (blue) and the comparison device (red)

表 3 样机和 PolaRx 对比机追踪卫星的数量和时长

Table 3 Number and duration of tracking satellites for the prototype and PolaRx

系统	样机	PolaRx	样机追踪时长/ PolaRx追踪时长
BDS	45颗 86286 min	33颗 66732 min	129.3%
GPS	31颗 34851 min	31颗 35567 min	98.0%
Galileo	24颗 27817 min	23颗 27961 min	99.5%
GLONASS	22颗 25510 min	22颗 26346 min	96.8%
IRNSS	2颗 6634 min	0颗 0 min	-
QZSS	4颗 14281 min	4颗 14466 min	98.7%
SBAS	8颗 33909 min	9颗 38657 min	87.7%

图 2 展现了基于包含同步轨道和非同步轨道的 BDS 数据计算的 VTEC 对比 (图 2a) 和各个星座中差别十分明显的 GLONASS 数据计算的 VTEC 对比 (图 2b), 作为例子.

以图 2a 为例, BDS、GPS、Galileo、QZSS 这 4 个系统, 样机和 PolaRx 的 VTEC 曲线取值和变化趋势符合得很好, 表 4 中的相关系数几乎大多数在 0.95 以上. 另一方面, 样机和 PolaRx 的 GLONASS 卫星信号计算出的 VTEC 曲线趋势截然

不同, 可能的原因我们将在第 4 节讨论部分进行分析.

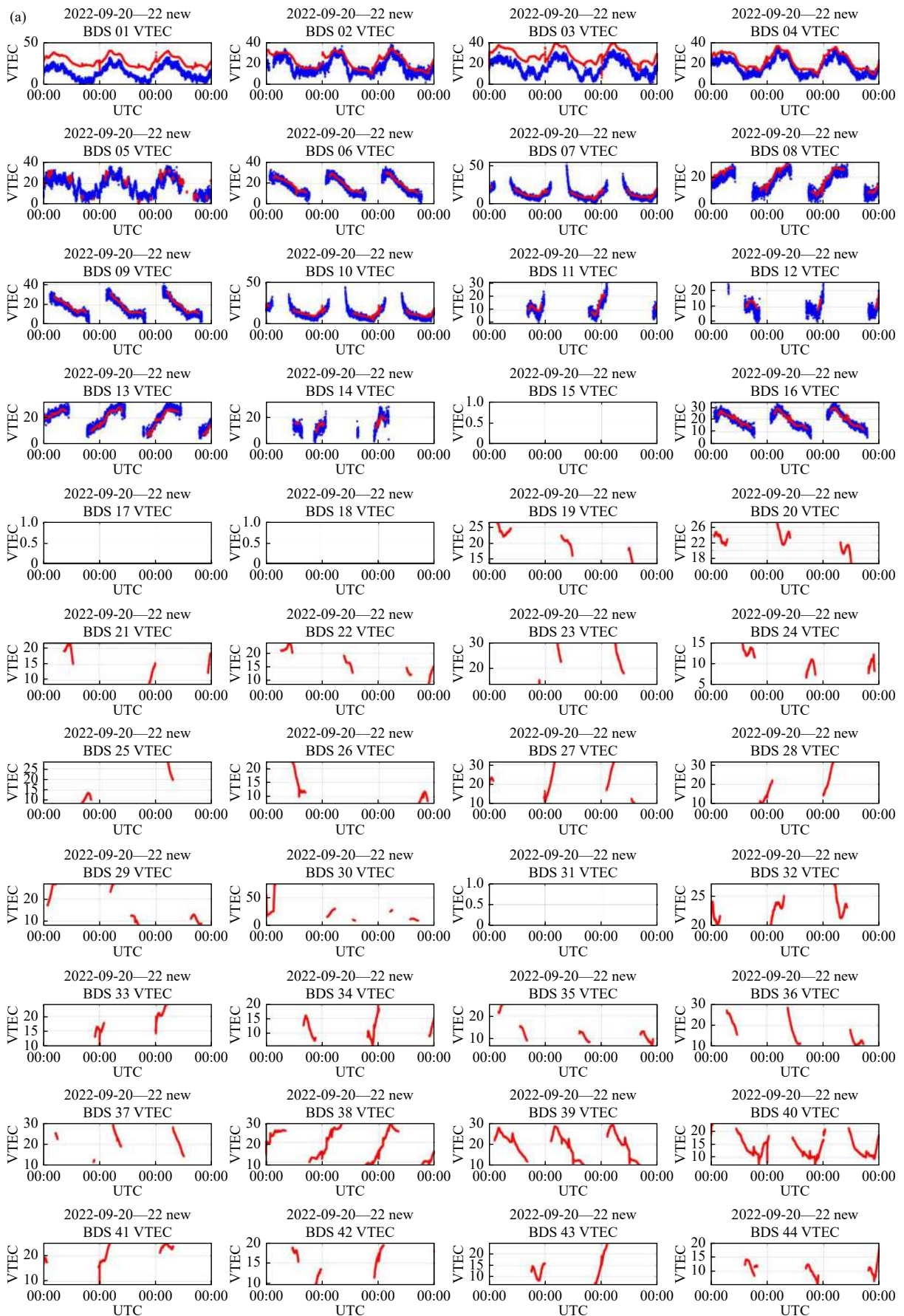
可以看到, 对于大多数的卫星, 样机与对比设备计算出的 VTEC 曲线的相关性都很好, 我们以相关系数 0.85 作为评判标准, 认为大多数的卫星对应的样机自动解算的 VTEC 与 PolaRx 接近. 其他卫星因为各种因素存在不可避免的差别, 差别也并不大.

本次测试使用了同批次生产的 9 号和 10 号两台样机, 接同一个天线, 故而它们的数据可以用来验证样机本身的一致性. 经过比较, 9 号和 10 号两台样机追踪到相同的 78 颗卫星, 其中仅有 74.36% 的卫星满足相关系数  $\geq 0.85$ , 虽然也满足大部分, 但效果反而不如样机和 PolaRx 对比机之间. 可能的原因将在第 5 节讨论.

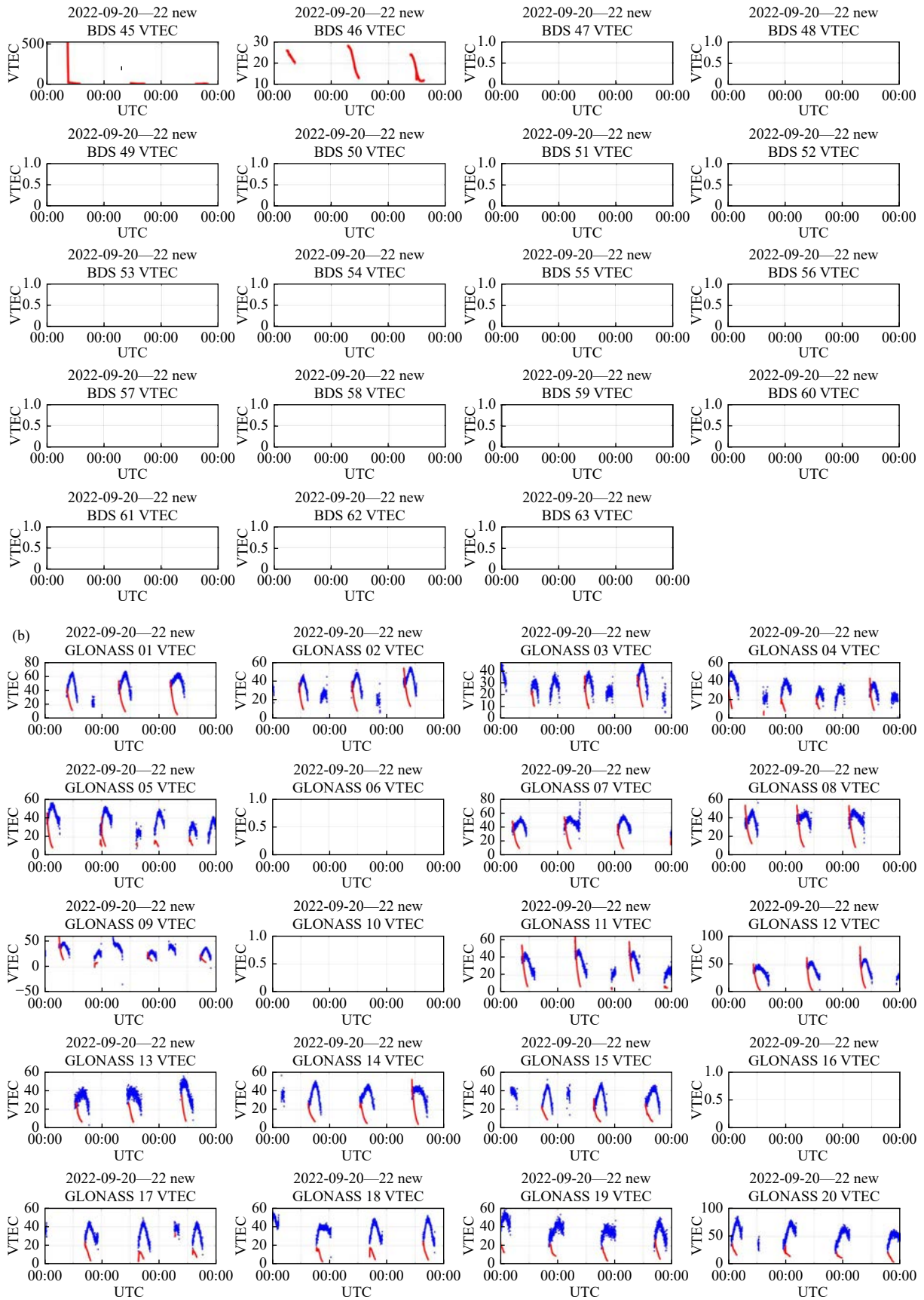
### 4.3 幅度闪烁指数自动输出结果对比 PolaRx5

图 3 对比了样机和 PolaRx5 对比机以 BDS 信号计算出的幅度闪烁指数, 其中 01~05 星同步轨道卫星因为仰角没有变化, 闪烁指数几乎没有变化, 其他非同步轨道卫星展现了本文之前提到的中间低、两边高的变化趋势.

相对而言样机的 S4 闪烁指数略大于 PolaRx, 但两台机器的结果均属于仪器随机噪声, 并未观测到闪烁事件. 表 5 比较了本文设计的参数.







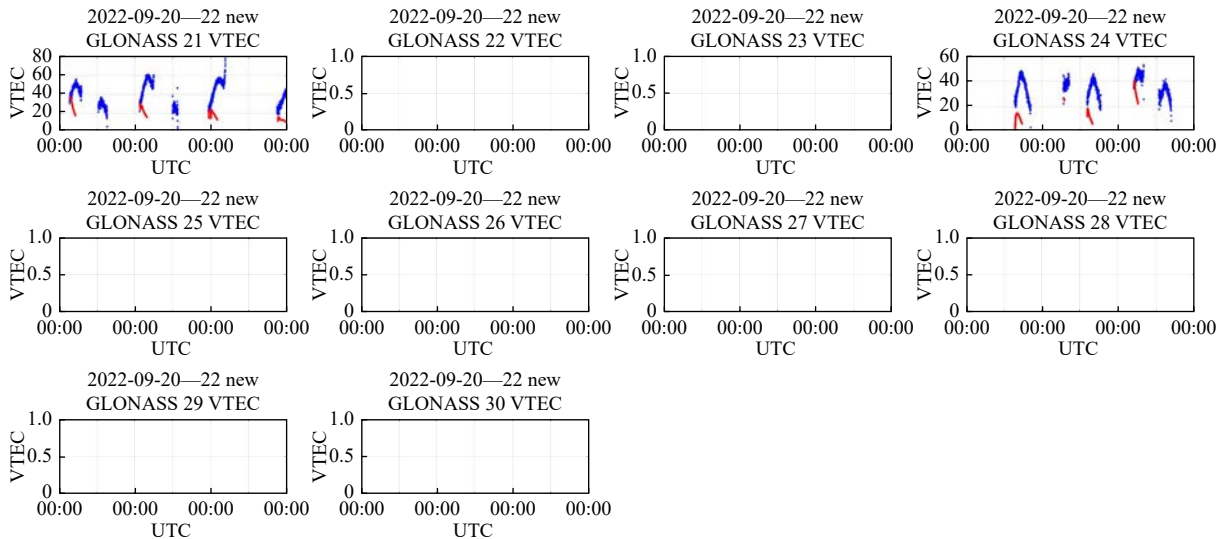


图 2 9 号样机与对比设备的 VTEC 进行了 13 min 滑动平均并计算相关系数. (a) BDS; (b) GLONASS. VTEC 单位: TECU  
 Fig. 2 Thirteen-minute moving average and correlation coefficient calculation were performed on the vertical TEC (VTEC) of the prototype 9 and the comparison device. (a) BDS; (b) GLONASS

表 4 除 GLONASS 系统外, 样机和对比设备的 VTEC 平滑曲线的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of the VTEC smooth curve of the prototype and the comparison device, except for the GLONASS system

卫星号	相关系数	卫星号	相关系数	卫星号	相关系数	卫星号	相关系数
BDS 01	0.94	BDS 02	0.87	BDS 03	0.92	BDS 04	0.96
BDS 05	0.87	BDS 06	0.99	BDS 07	0.96	BDS 08	0.99
BDS 09	0.99	BDS 10	0.97	BDS 11	0.93	BDS 12	0.88
BDS 13	0.99	BDS 14	0.86	BDS 16	0.98	Galileo 02	0.98
Galileo 03	0.99	Galileo 04	0.97	Galileo 05	0.96	Galileo 07	0.97
Galileo 08	0.99	Galileo 09	0.97	Galileo 11	0.96	Galileo 12	0.98
Galileo 13	1	Galileo 15	1	Galileo 19	0.99	Galileo 21	0.99
Galileo 24	0.95	Galileo 25	0.97	Galileo 26	0.98	Galileo 27	0.98
Galileo 30	0.95	Galileo 31	0.98	Galileo 33	0.99	Galileo 34	0.99
Galileo 36	1	GPS 01	0.95	GPS 02	0.96	GPS 03	0.94
GPS 04	0.71	GPS 05	0.97	GPS 06	0.98	GPS 07	0.90
GPS 08	0.96	GPS 09	0.97	GPS 10	0.91	GPS 11	0.98
GPS 12	0.97	GPS 13	0.54	GPS 14	0.72	GPS 15	0.95
GPS 16	0.86	GPS 17	0.97	GPS 18	0.93	GPS 19	0.96
GPS 20	0.83	GPS 21	0.86	GPS 22	0.82	GPS 23	0.89
GPS 24	0.97	GPS 25	0.93	GPS 26	0.99	GPS 27	0.95
GPS 29	0.98	GPS 30	0.92	GPS 31	0.98	GPS 32	0.74
QZSS 02	0.97	QZSS 03	0.98	QZSS 04	0.98	QZSS	0.86

相关系数 $\geq 0.85$ , 共66颗

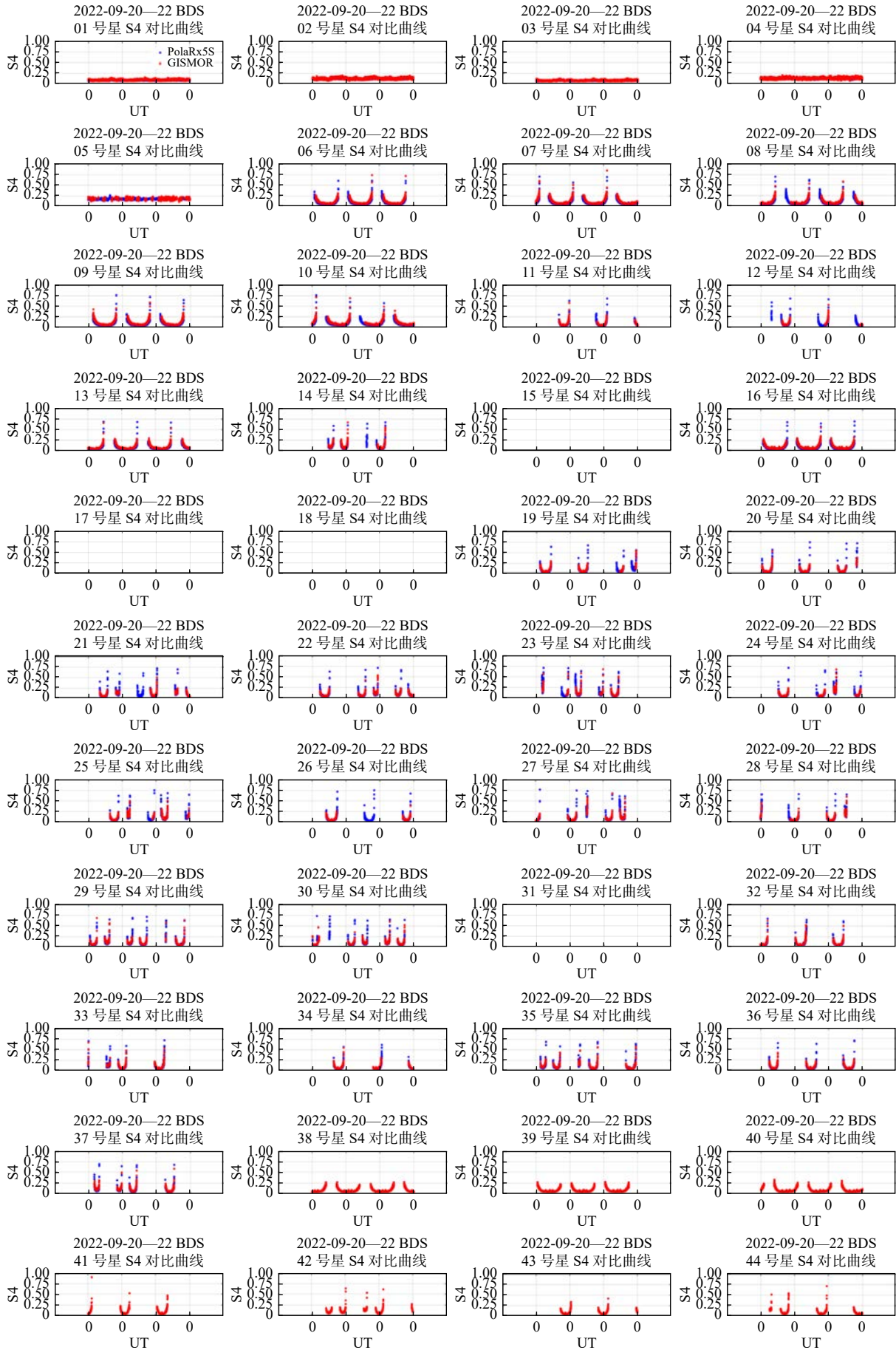
总共72颗卫星, 其中91.67%的卫星满足相关系数 $\geq 0.85$

从表 5 可以看出, IRNSS 系统由于 PolaRx 的仰角问题不进行比较, 对于其他系统:

(1) 样机出现多径时起始仰角比 PolaRx 略大 (Galileo 系统比 PolaRx 更小), 样机起始仰角减去 PolaRx 均小于  $10^\circ$ ; 并且, 所有起始仰角均小于  $25^\circ$ , 而科研人员大多选择  $25^\circ$  为最低仰角, 对

日常使用没有明显影响. 其中, 研究闪烁时最常用的 BDS、GPS、Galileo 系统, 仰角的差别很小.

(2) 仰角大于  $60^\circ$  时, 3 天内仅有 GLONASS 系统样机出现 2 个数据点  $S4 \geq 0.2$ , 其余情况下样机和 PolaRx 均为 0 个数据点, 概率均很低; 因此, 仰角大于  $60^\circ$  时  $S4 \geq 0.2$  的发生次数, 满足样机 $\leq$



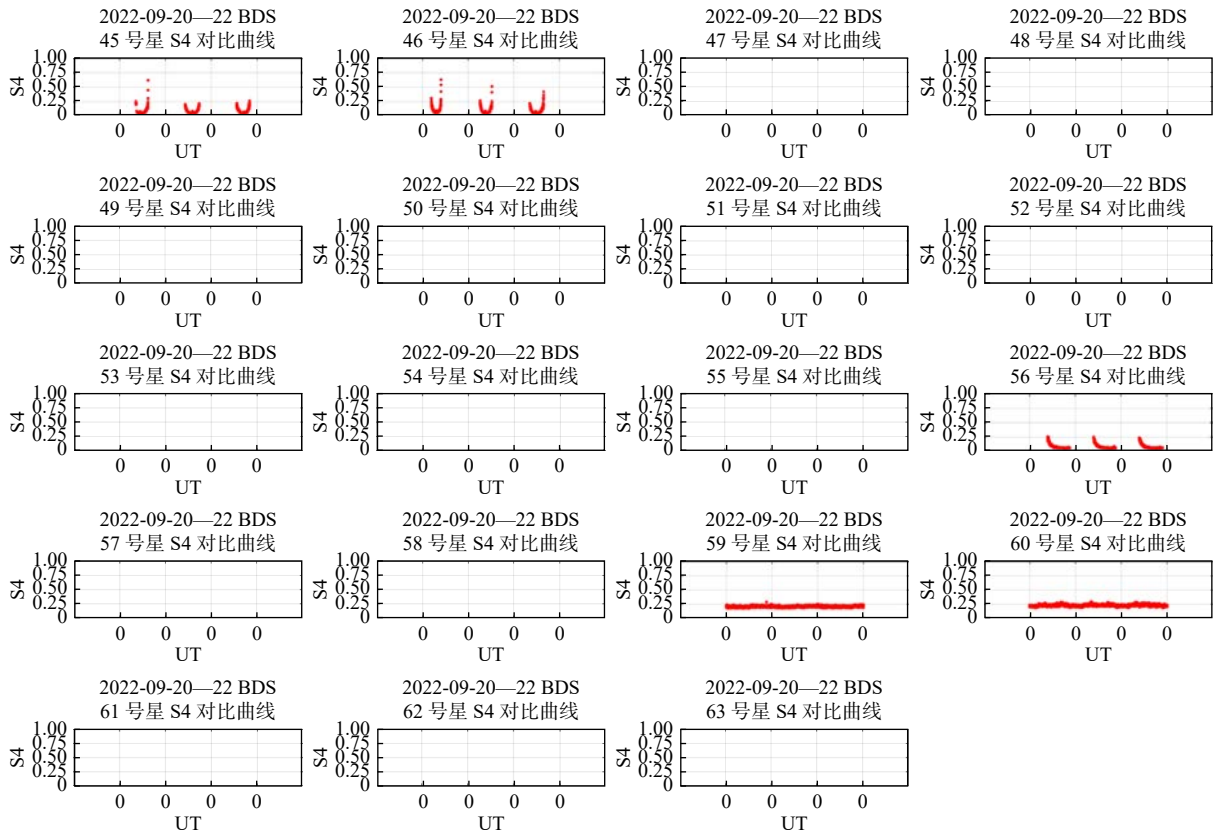


图 3 样机和 PolaRx5 对比机根据 BDS 信号计算的幅度闪烁指数

Fig. 3 Amplitude scintillation index calculated based on the BDS signal between the prototype and PolaRx5

表 5 样机与对比设备幅度闪烁指数受干扰影响对比

Table 5 Comparison of the amplitude scintillation index of the prototype and the comparison device affected by interference

系统	出现多径时起始仰角			60°仰角以上受干扰次数	
	PolaRx	样机	样机- PolaRx	PolaRx	样机
BDS	13.500000	19.259649	5.759649	0	0
GPS	14.226257	16.457196	2.230939	0	0
Galileo	15.011494	13.582382	-1.429112	0	0
GLONASS	15.819876	22.953765	7.133889	0	2
IRNSS	不支持	11.187296	不支持	不支持	0
QZSS	11.810526	17.897680	6.087154	0	0
SBAS	15.519266	14.006055	-1.513211	0	0

PolaRx+30 个数据点。

综上, 样机输出幅度闪烁指数的性能与 PolaRx 接近. 两台样机采用的是同一套内部算法, 对它们自动输出的 VTEC 取值和趋势较为相符, 进行 13 min 滑动平均后计算相关系数。

对于两台样机, 幅度闪烁出现多径时起始仰角差距最大的 BDS 系统样机相差 0.92°, 仰角大于 60°时受干扰均为 2 个数据点, 相差为 0; 所以同批次样机的一致性很好。

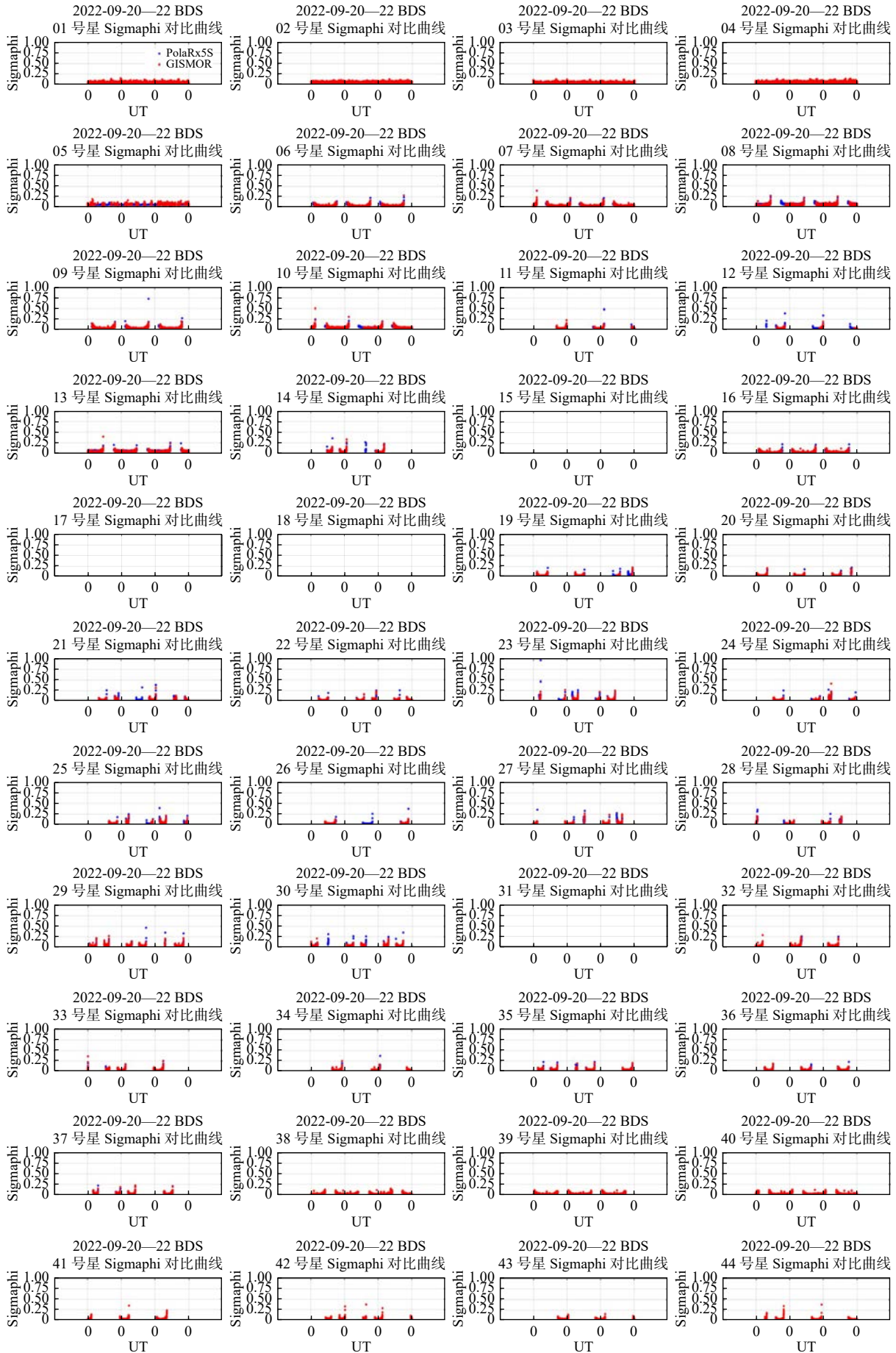
#### 4.4 相位闪烁指数自动输出结果对比 PolaRx5

对于样机与 PolaRx 对比机, 无论同步还是非

同步轨道卫星, 两台设备监测相位闪烁与幅度闪烁结果的特征相似, 均未观测到闪烁现象, 变化趋势一致 (图 4)。表 6 比较了本文设计的参数。

从表 6 可以看出, IRNSS 系统由于仰角问题不进行比较, 对于其他系统:

(1) 样机出现多径时起始仰角与 PolaRx 略大各有优劣, 样机起始仰角减去 PolaRx 均小于 10°, 甚至好于 PolaRx 15°; 并且, 样机大多数起始仰角小于 25°, 仅有 IRNSS 系统和 SBAS 的起始仰角约为 25°, 对日常使用影响较小, 但 PolaRx IRNSS 系统不支持仰角输出, GLONASS 系统起始仰角高达 37.8°, 样机的表现更好。



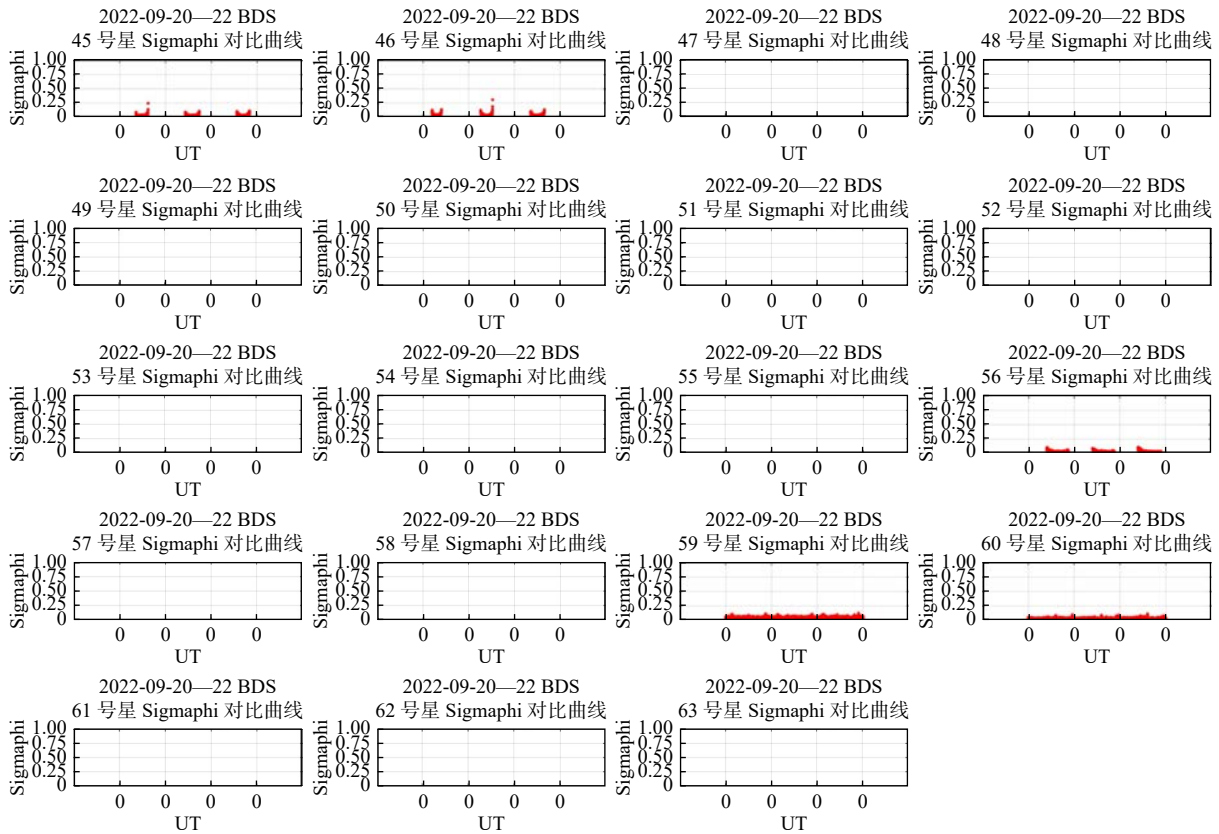


图 4 样机和 PolaRx5 对比机根据 BDS 信号计算的相位闪烁指数, 图中 Sigmaphi 为  $\sigma\phi$

Fig. 4 Phase scintillation index calculated from BDS signal of the prototype and PolaRx5

表 6 样机与对比设备相位闪烁指数受干扰影响对比

Table 6 Comparison of the phase scintillation index between the prototype and the comparison device affected by interference

系统	出现多径时起始仰角			60°仰角以上受干扰次数	
	PolaRx	样机	样机- PolaRx	PolaRx	样机
BDS	12.535032	18.866106	6.331074	0	16
GPS	20.254902	15.916019	-4.338883	20	0
Galileo	12.940828	20.283860	7.343032	0	1
GLONASS	37.820593	22.012177	-15.808416	1658	12
IRNSS	不支持	25.091955	不支持	不支持	0
QZSS	9.379310	17.218177	7.838867	0	0
SBAS	20.000000	25.014018	5.014018	0	0

(2) 仰角大于 60°时, 3 天内样机出现相位闪烁指数  $\sigma\phi \geq 0.1$  的次数均小于 20 个数据点, 概率较低, 但 PolaRx 的 GPS 系统出现 20 个数据点, GLONASS 系统出现 1658 个数据点, 总体来看 GLONASS 系统 PolaRx 的随机噪声较大, 其余系统样机与 PolaRx 受干扰的表现相似; 因此, 仰角大于 60°时  $\sigma\phi \geq 0.1$  发生的数据点个数, 同样满足样机  $\leq$  PolaRx+30 个数据点。

因此, 样机输出相位闪烁指数的性能与 PolaRx 接近。

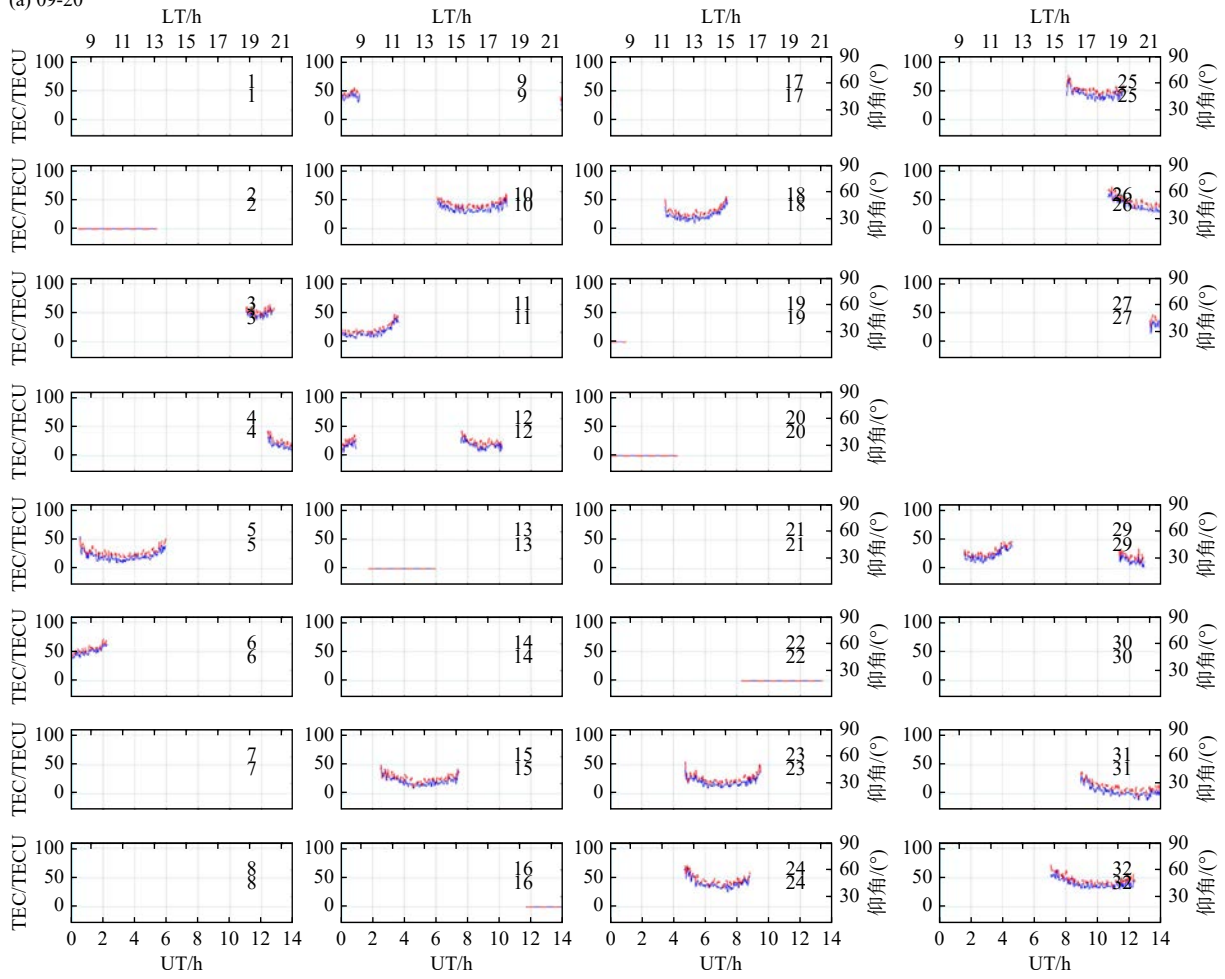
对于两台样机, 相位闪烁出现多径时起始仰角

差距最大的 BDS 系统样机相差 1.69°, 仰角大于 60°时受干扰次数最多为 19 个数据点, 相差最大为 6 个点; 所以同批次样机的一致性也比较好。

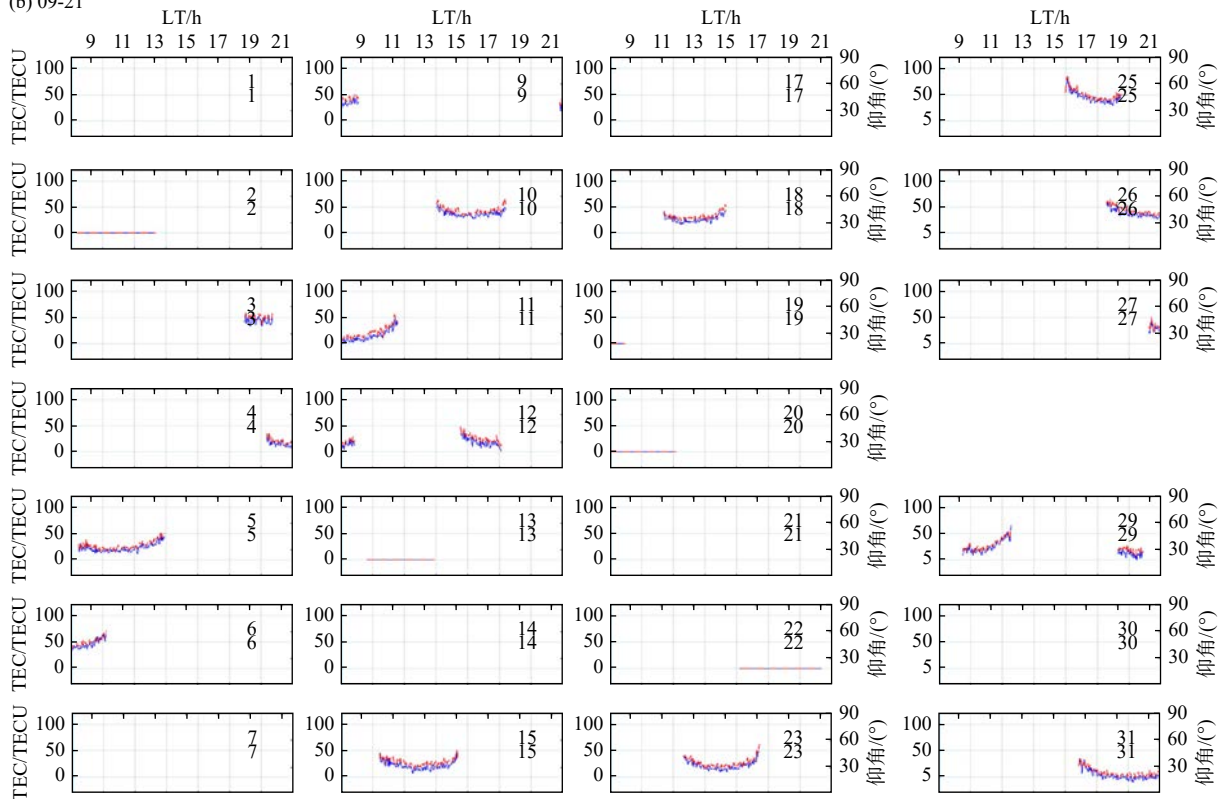
## 5 讨论

通过卫星追踪数和追踪时长的比较, 可以看出样机相比较于对比设备的优点: 能够追踪到更多的卫星, 以上系统的对比中几乎每个 GNSS 系统样机都追踪到多 1~2 颗卫星, 特别是 IRNSS 系统卫星较少, 样机追踪到 2 颗, 但 PolaRx 未能追踪到。这

(a) 09-20



(b) 09-21



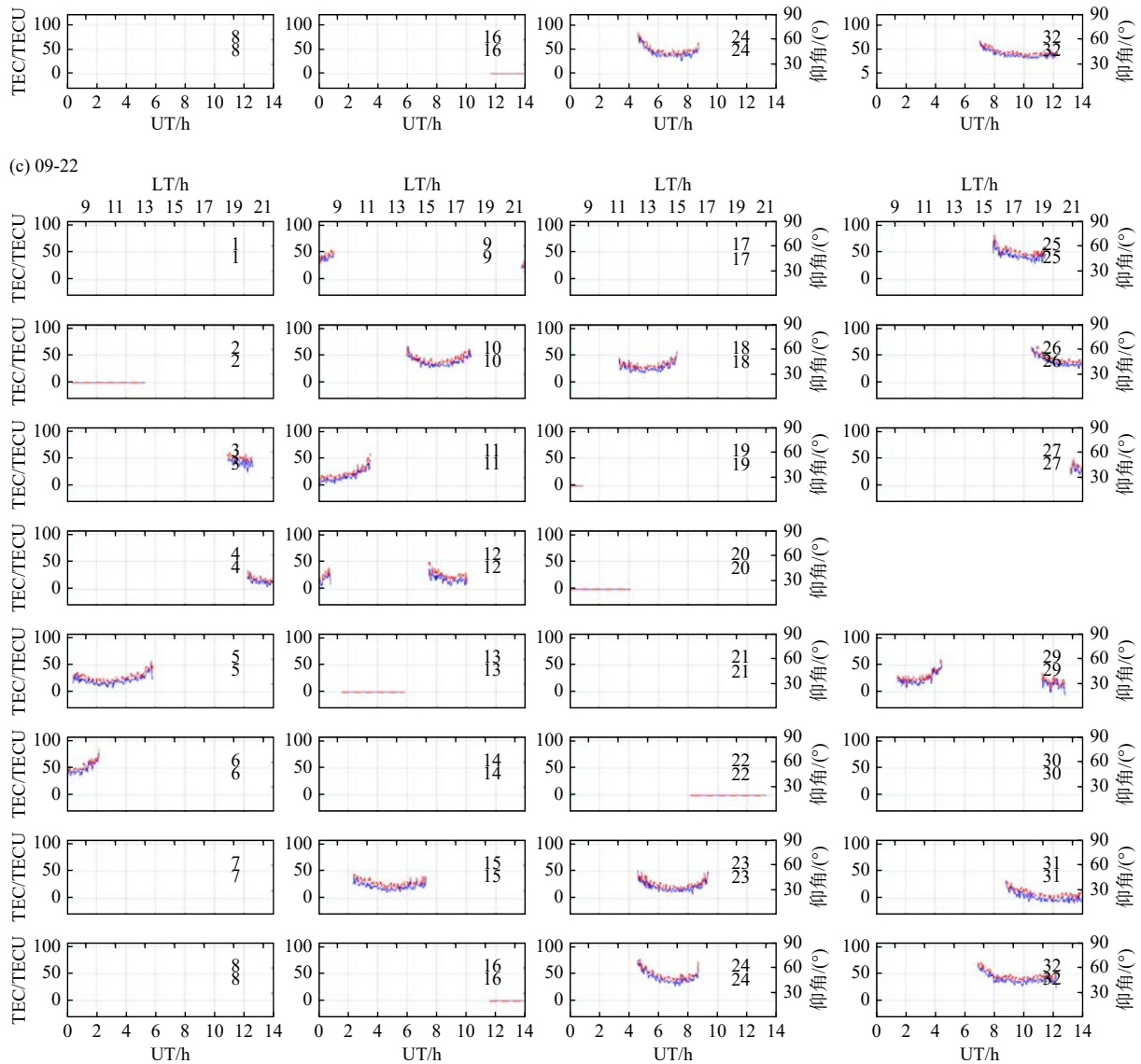


图 5 第三方算法利用 C 码对 9 月 20—22 日样机 9 号机 (蓝线) 和 PolaRx (红线) 的 Rinex 数据文件计算 VTEC 进行对比, LT: 地方时, UT: 世界时

Fig. 5 The third-party algorithm uses C code to calculate VTEC for the Rinex data files of the prototype 9 (blue line) and PolaRx (red line) from September 20 to 22

可能是因为样机的信道分配设计更合理。

样机相比较于对比设备的不足: (1) 对于大多数卫星, 样机的追踪时长略微短于对比设备, 可能的原因是对比设备处理信号噪声能力更强, 载噪比放得比较宽, 样机对于信号较弱的情况追踪略弱;

(2) BDS 05 星作为同步轨道卫星, 样机的追踪时长明显短很多. 05 星位于印度洋上方, 相比于 01~04 的其他几颗同步轨道卫星, 05 星距离北京较远, 信号受到干扰多, 载噪比已经较差, 故多次失锁, 但对比设备依然能够跟踪, 故生成了断断续续的数据。

经过比较, 闪烁指数无论两台样机之间, 还是样机与 PolaRx5 对比机之间, 一致性都很好. 但对于电离层 TEC 参数, 如 4.2 节所述, 两台样机之间

一致性检验的效果反而不如 9 号样机与 PolaRx5 的一致性, 原因可能是 9 号样机 Rinex 数据经过了 P 码的修改, 利用 P 码进行计算, 而 10 号机没有. 如果两台样机都只用 C 码进行计算, 考察在一段时间中跟踪的 34 颗卫星, 有 31 颗卫星 (91.2%) 满足相关系数  $\geq 0.95$ , 标准误差  $RMSE \leq 3$  TECU, 其余卫星相关系数最低 0.88, 一致性也很好. 对于正式出厂的设备, 应以 9 号样机的做法为准。

尽管如此, 关于不同设备之间, 计算同一颗卫星的结果呈现系统偏差, 主要与硬件延迟有关. 绝对 TEC 是通过两个频点的 GNSS 观测值做差得到的相对 TEC 通过校正 GNSS 卫星端频间硬件延迟和接收机端频间硬件延迟得到的. 其中 GNSS 卫星端频间硬件延迟是采用的 IGS 公布的数据, 接收机



端频间硬件延迟通过电离层区域建模计算得到, 并且一个解算时段所有同一类型 GNSS 卫星 (比如 BDS 或 GPS 等) 硬件延迟值采用一个值. 大部分 GNSS 绝对 TEC 一致, 个别 GNSS 卫星绝对 TEC 值过大, 可能是采用的 GNSS 卫星端硬件延迟个别星存在偏差造成的. 因此, 两台样机即使都只用 C 码计算, 数据也并非完全一致.

由于设备硬件的差别, 不同类型的设备采用了适合自己硬件的 VTEC 内部算法, 并不强求算法完全一致. 但为了进一步考察数据质量, 本文继续使用了两种第三方算法, 也即是用完全相同的算法处理样机与 PolaRx 的 Rinex 原始数据文件.

当只使用 C 码时, 第一种算法结果如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 当采用同一套精细算法后, 3 天之内多数卫星两台设备原始数据文件计算的 VTEC 在趋势和取值上都一致性较好. 其中也出现了一些可能因为硬件延迟而产生的系统偏差. 由于都使用了 C 码, 两条曲线的起伏都较大, 图中使用了 13 min 滑动平均, 尽管如此, 样机 9 号机的曲线 (蓝线) 仍然不如 PolaRx 的曲线 (红线) 平

滑. 然而, 改进 9 号机 Rinex 数据加入 P 码后, 当采用同一套精细算法时, 3 天之内多数卫星两台设备原始数据文件计算的 VTEC 在趋势上一致性较好, 但 9 号机的曲线明显起伏更大、更加不平滑, 且因硬件延迟而产生的系统偏差更明显.

利用第 2 种第三方算法, 对 9 月 21 日样机 9 号机和 PolaRx 的 Rinex 数据文件, 计算 BDS 同步轨道卫星的 VTEC 并进行对比, 可以看出它们的取值和变化趋势都很接近, 但在拼接时样机效果略差于对比设备. 由表 7 可以看到各个卫星 VTEC 曲线, 9 号机和 PolaRx 的相关系数都很高.

表 7 样机 9 号机与 PolaRx 对同颗同步卫星 VTEC 的相关性

Table 7 Correlation of VTEC between the prototype 9 and PolaRx on the same synchronous satellite

BDS卫星号	VTEC相关系数
01	0.98
02	0.96
03	0.96
04	0.98

图 6 将设备探测所有卫星计算的 VTEC 进行了比较.

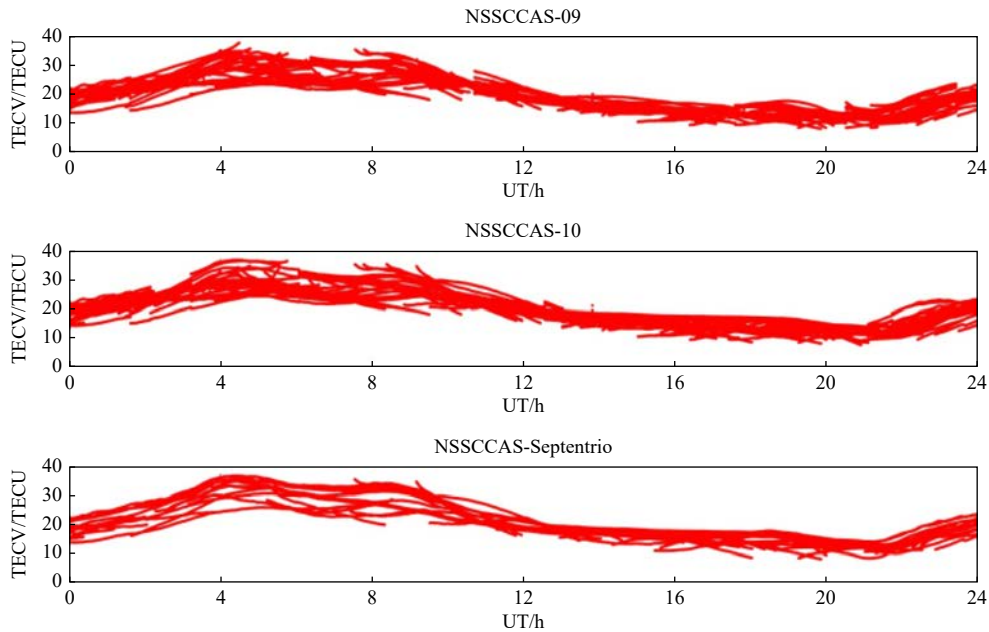


图 6 利用第三方算法对 9 月 21 日两台样机和 PolaRx 的 Rinex 数据文件, 计算所有卫星的 VTEC 进行对比

Fig. 6 Calculating the VTEC of all satellites using third-party algorithms for the Rinex data files of two prototypes and PolaRx on September 21

整体看, 样机 VTEC 在一天中的变化趋势和取值范围与 PolaRx 是相似的.

值得一提的是, 当采用相同算法时, 样机和 PolaRx 对 GLONASS 卫星信号解算出的 VTEC, 24 颗卫星有 23 颗的曲线相关系数在 0.95 以上, 一

致性非常好, 说明样机在硬件上没有重大问题, 而在算法上到底问题出在哪里还需要借助其他设备进一步分析.

因此, 以上分析支持了本文设计的参数关于样机和 PolaRx 内置算法计算 VTEC 数据质量上整体

一致的分析,即:样机与 PolaRx 监测电离层 TEC 的能力相当。

## 6 结 论

对子午工程二期 GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪样机进行技术指标测试,并与成熟型号 PolaRx5 进行数据对比分析,可以得出结论:

(1) 样机的各项技术指标达到了预定的要求,与 PolaRx5 相当,验证了样机技术方案的可行性。

(2) GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪样机的数据处理算法可行,计算出的 VTEC、幅度和相位指数,各方面与 PolaRx5 的算法计算出的结果符合较好,验证了样机数据处理方法的正确性。

(3) 对比分析表明,样机具备如下相对优势:①样机能够追踪明显更多的卫星,总追踪时间更长,特别是 BDS 三期较新的卫星,以及 IRNSS 系统能提供仰角等更多信息;②样机自动输出的 TEC 数据已经进行了平滑,数据点离散程度更低,在用户快速判断电离层状态时取值更准确,趋势更连续;③对 GLONASS 系统,相位闪烁受多径效应影响的起始仰角小得多,仰角  $60^\circ$  时大于 0.1 的数据点少得多,综合来看样机受干扰更小。

综上,样机在硬件和数据处理软件方面均达到了与 PolaRx5 相当的水平。采用两台设备直接对比的方式,可以很好地揭示设备的数据质量特性,样机输出的数据直接应用于科研与 PolaRx5 也水平相当。本文的分析是根据科研场景设计的比较标准,从一些方面展示和评估数据质量,并对其特征的原因进行了分析,为数据准确性的评估提供参考和借鉴,有助于科研工作者选择实验和优化的方案。未来可采用更长时间的观测结果设计其他分析实验,进一步检验国产 GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪的性能和观测质量。

## 致谢

子午工程二期 GNSS 电离层 TEC 与闪烁监测仪的国产化过程在工程指挥部的领导下开展,特此表示感谢。

## References

Aarons J. 1997. 50 years of radio-scintillation observations[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 39(6): 7-12.

- Aarons J. 1982. Global Morphology of ionospheric scintillations[J]. *Proceeding of IEEE*, 70(4): 360-378.
- Alfonsi L, Spogli L, Pezzopane M, et al. 2013. Comparative analysis of spread-F signature and GPS scintillation occurrences at Tucumán, Argentina[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118: 4483-4502. DOI: 10.1002/jgra.50378.
- Basu S, Groves K M, Quinn J M, Doherty P. 1999. A comparison of TEC fluctuations and scintillations at Ascension Island[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 61(11): 1219-1226.
- Fenton P, Ford T, Dierendonck A J V. 1991. NovAtel's GPS receiver: the high performance OEM sensor of the future[C]// *Proceedings of the 4th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1991)*, 49-58.
- Hernández-Pajares M. 2004. IGS ionosphere WG status report: Performance of IGS ionosphere TEC maps position paper[R]. Research Group of Astronomy and Geomatics, Technical University of Catalonia (gAGE/UPC) Barcelona, Spain.
- Kil H, Kintner P M, De Paula E R, Kantor I J. 2002. Latitudinal variation of scintillation activity and zonal plasma drifts in South America[J]. *Radio Science*, 37(1): 1006-1012. DOI: 10.1029/2001RS002468.
- Kintner P M, Ledvina B M, Paula E R. 2007. GPS and ionospheric scintillations[J]. *Space Weather*, 5: S09003. DOI: 10.1029/2006SW000260.
- Liu L B, Lei J H, Liu J. 2022. Ionospheric investigations conducted by Chinese mainland scientists in 2020–2021[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 42(4): 653-683.
- Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, et al. 1998. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements[J]. *Radio Science*, 33(3): 565-582. DOI: 10.1029/97RS02707.
- Pasuluri B, Swamy K C T, Ramamurthy N. 2018. Analysis of multi frequency, multi GNSS real time signal observations acquired by septentrio PolaRX5 receiver station[J]. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6S): 318-322.
- Ratovsky K G, Shi J K, Oinats A V, Romanova E B. 2014. Comparative study of high-latitude, mid-latitude and low-latitude ionosphere on basis of local empirical models[J]. *Advances in Space Research*, 54: 509-516.
- Wilson B D, Mannucci A J, Edwards C D. 1995. Subdaily northern-hemisphere maps using an extensive network of GPS receivers[J]. *Radio Science*, 30: 639-648.
- Wu Y, Qiao X J, Zhou Y Y. 2005. Preseismic ionospheric TEC anomaly detected by ground-based GPS[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25(2): 36-40 (in Chinese).
- Yeh K C, Liu C H. 1982. Radio wave scintillations in the ionosphere[J]. *Proceeding of IEEE*, 70(4): 324-360.

## 附中文参考文献

吴云, 乔学军, 周义炎. 2005. 利用地基 GPS 探测震前电离层 TEC 异常[J]. *大地测量与地球动力学*, 25(2): 36-40.

Xiong C, Rang X Y, Huang Y Y, Jiang G Y, Hu K, Luo W H. 2024. Latitudinal four-peak structure of the nighttime F region ionosphere: Possible contribution of the neutral wind. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 55(1): 94-108. doi:10.19975/j.dqyxx.2023-009.

## Latitudinal four-peak structure of the nighttime F region ionosphere: Possible contribution of the neutral wind

Xiong Chao<sup>1,2\*</sup>, Rang Xinyi<sup>2</sup>, Huang Yuyang<sup>2</sup>, Jiang Guoying<sup>3</sup>, Hu Kun<sup>2</sup>, Luo Weihua<sup>4</sup>

1 Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan 430079, China

2 Department of Space Physics, Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China

3 State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China

4 College of Electronic Information and Engineer, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China

**Abstract:** In this study, we provide a detailed analysis of the latitudinal four-peak structure of the F region electron density observed by the Swarm B satellite during the night of January 31, 2017. Consisting of three satellites flying at different local times, Swarm provides an opportunity to investigate the temporal evolution of the nighttime latitudinal four-peak structure. For this event, Swarm A/C did not observe the two crests of equatorial ionization anomaly (EIA) at 17:55/18:01 LT, but Swarm B, which flew over the same longitudinal sector approximately 4.5 h later, observed a clear latitudinal four-peak structure. This provides direct evidence that the two inner peaks of the latitudinal four-peak structure are not remnants of the EIA crests from sunset. In addition, simultaneous measurements of the vertical plasma drift from the incoherent scatter radar at Jicamarca and neutral wind from the ground-based Fabry–Perot interferometer (FPI) at Arecibo were compared to reveal the possible driving mechanisms. The observed F region vertical plasma drift was generally downward from sunset throughout the local night of January 31, 2017, which reveals that an enhanced upward plasma drift is not necessary to cause the nighttime latitudinal four-peak structure. The neutral wind measurements from the FPI located at Arecibo showed enhanced eastward and southward components during the night when the latitudinal four-peak structure was observed by Swarm B, both with a difference of approximately 100 m/s compared with the other two days. This suggests that the neutral winds play an important role in the nighttime latitudinal four-peak structure. Further simulations using the SAMI2 (another model of the ionosphere) model support these observations. In general, eastward and equatorward winds from both hemispheres at night provided favorable conditions for the latitudinal four-peak structure. However, when the equatorward wind is too large, a strong hemispheric asymmetry of the background  $N_e$  can occur, which prevents the development of the latitudinal four-peak structure at night.

**Keywords:** nighttime ionosphere; equatorial ionization anomaly; latitudinal four-peak structure; Swarm satellites; neutral wind

## 0 Introduction

A well-known phenomenon in the low-latitude ionospheric F region during daytime is the equatorial

ionization anomaly (EIA), which is characterized by an electron density ( $N_e$ ) trough above the magnetic equator and double crests of enhanced  $N_e$  at approximately 15° north and south of the magnetic equator (e.g., Appleton, 1946; Liang, 1947; Namba and Maeda,

Received February 26, 2023; Accepted May 17, 2023

This research was supported by the Special Fund of the Hubei LuoJia Laboratory (Grant No. 220100011), and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFF0503700). Xiong Chao is supported by the Dragon-5 Cooperation 2020-2024 (Project No. 59236), and the International Space Science Institute (ISSI) in Bern and Beijing through ISSI International Team Project #511 (Multi-Scale Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere Interaction).

\*Corresponding author. Xiong C, email: xiongchao@whu.edu.cn



1939). The daytime EIA is driven by the equatorial plasma fountain effect. In the equatorial region, the magnetic field lines are primarily horizontal, pointing northward, and the daytime eastward electric field drives the plasma upward via  $E \times B$  drift. Owing to gravitational and pressure-gradient forces, the up-lifted plasma diffuses poleward and sediments downward along the geomagnetic field lines into both hemispheres, forming two density crests alongside the magnetic equator (Duncan, 1960). The two EIA crests typically appear at approximately 09:00 local time (LT) and move poleward at a speed of approximately  $1^\circ$  of latitude per hour for the next few hours (Yeh et al., 2001). The EIA intensity, represented by the crest-to-trough ratio (CTR) of the EIA, gradually increases from morning to noon, then slightly decreases in the afternoon, and finally reaches its maximum value between 18:00 and 20:00 LT; this maximum is almost twice the daytime level (e.g., Liu et al., 2007; Xiong et al., 2013). The rapidly increasing CTR value after sunset is primarily related to the prereversal enhancement (PRE), which is defined as a sharp increase in plasma vertical drift after sunset via enhancement of the eastward electric field in the ionospheric F region. The F region dynamo, driven by the F region neutral wind in combination with the conductivity contrast across the day-night terminator, is accepted to cause the PRE (e.g., Eccles et al., 2015; Kelley, 2009).

Previous studies related to the EIA have focused mainly on its morphology during the daytime and shortly after sunset, while its appearance and related mechanism around midnight have not been well addressed. Woodman (1970) used radar observations to report the post-midnight EIA features during magnetically disturbed periods. Wang et al. (2008) suggested that disturbed electric fields during storm or substorm periods can produce upward plasma drift, forming the EIA during late-night hours. In addition, McDonald et al. (2008) found that during geomagnetically quiet periods, the enhanced EIA during PRE hours can sometimes last until post-midnight hours. However, Yizengaw et al. (2009) argued that the two peaks of the EIA during post-midnight hours in quiet

periods are not the remains of the EIA from sunset hours; instead, they are caused by reversed vertical upward drifts related to the F region wind dynamo during post-midnight hours. Therefore, the generation of the post-midnight EIA, especially during magnetically quiet periods, remains an open issue.

Using occultation measurements from the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC) satellites, Zhong et al. (2019) showed that the nighttime electron densities at  $\pm 40^\circ$  magnetic latitude (Mlat) are generally greater during equinoxes, forming two bands at all longitudes; during solstices the middle latitude band in the winter hemisphere is much more prominent. This nighttime ionospheric band structure at middle latitudes should represent the same phenomena as previously reported for nighttime enhancements of the F2 electron density peak, NmF2 (e.g., Arendt and Soicher, 1964; Balan and Rao, 1987; Jakowski and Förster, 1995). These enhancements are also more often observed in the winter hemisphere and are suggested to be caused by the enhanced equatorward meridional wind and downward diffusion from the plasmasphere at night (Mikhailov et al., 2000; Zhong et al., 2019).

Compared to ground-based and COSMIC observations, in situ  $N_e$  measurements from low Earth orbiting (LEO) satellites flying in near-circular and polar orbits, e.g., the Swarm satellites, provide a good opportunity to investigate the latitudinal distribution of the ionosphere. With an orbital velocity of approximately 7.5 km/s, the Swarm satellites travel along almost the same magnetic meridian, with less than 30 min from one hemisphere to the other at low and middle latitudes. Within such a period, large-scale ionospheric structures such as the EIA are not expected to change significantly. Xiong et al. (2019) reported that the two  $N_e$  peaks at low latitudes could still be observed by Swarm during post-midnight hours, and two additional peaks were sometimes also observed at northern and southern middle latitudes, forming a latitudinal four-peak structure in the nightside ionosphere. On average, such latitudinal four-peak structures have very low occurrence rates, accounting for only 4% of

the Swarm orbits. Based on the slowly increasing LT separation between the Swarm A/C and Swarm B orbits, the temporal evolution of the latitudinal four-peak structure was also investigated by Xiong et al. (2019). They found that the four-peak structure can persist for several hours from pre-midnight to sunrise, during which the two low-latitude peaks move slowly poleward but do not shrink toward the magnetic equator owing to downward plasma motion at night, as expected for EIA crests. Although Xiong et al. (2019) suggested that the enhanced meridional wind after midnight is a possible driver for the latitudinal four-peak structure of the F region electron density, however, they did not provide direct wind observations.

In this study, we analyzed simultaneous  $N_e$  measurements from Swarm, vertical plasma drift data from the incoherent scatter radar (ISR) at Jicamarca, and neutral wind measurements from a ground-based Fabry–Perot interferometer (FPI) for one event. In addition, simulations using the SAMI2 (another model of the ionosphere) model were performed to assess the neutral wind contribution to the latitudinal four-peak structure. This paper follows the traditional structure. First, we introduce the dataset and then provide observations of the examples and model simulations. Finally, we provide relevant discussion by considering previous studies.

## 1 Dataset and approaches

### 1.1 Swarm satellite and in situ plasma density measurements

The Swarm mission, consisting of three identical satellites, was launched into a near-polar circular orbit on November 22, 2013. During the first mission phase, starting on April 17, 2014, Swarm A and C flew side-by-side, separated by  $1.4^\circ$  in longitude, at an altitude of approximately 460 km and an inclination of  $87.3^\circ$ . The orbit of Swarm B is approximately 50 km higher than that of Swarm A/C, with an inclination of  $88^\circ$ . Owing to precession of the orbits, Swarm A/C require approximately 133 days to cover the 24-hour LT, while Swarm B requires approximately 141 days. The differ-

ence in their orbital inclination causes a slowly increasing difference in longitude between the two orbital planes amounting to approximately  $2^\circ$  per month. Further, it should be noted that the second mission phase of Swarm started in October 2019, during which the separation between Swarm A and C was slowly reduced (e.g., Xiong and Lühr, 2023).

The in situ plasma density used in this study was obtained by the onboard Langmuir probe (LP) of Swarm with a time resolution of 2 Hz. It should be noted that in the latest Swarm plasma density data product (version 05), the algorithm to estimate density was changed to use a weaker ion current instead of the delayed and saturated electron currents, as the ion current and admittance from the Swarm LP were found to be more reliable. Therefore, the most recent plasma density data from Swarm is  $N_i$  rather than  $N_e$ . However, because of the electric neutrality of plasma at Swarm altitudes,  $N_e$  is assumed to be equal to  $N_i$  (e.g., Buchert, 2018). Therefore, we still labeled the Swarm  $N_i$  measurements as  $N_e$  in this study. The reliability of the Swarm  $N_i$  data was evaluated by comparison with ground-based  $N_e$  measurements from the ISR at Jicamarca (Xiong et al., 2022).

### 1.2 Vertical plasma drifts from the ISR at Jicamarca

The vertical plasma drift data used in this study were measured by the ISR at Jicamarca (geographic:  $11.95^\circ$  S,  $-76.87^\circ$  E; Mlat:  $0.39^\circ$  S), which has been in operation since the 1960s. The primary operational mode of the Jicamarca ISR is the east-west drift experiment, which aims to estimate the  $E \times B$  plasma drift perpendicular to the magnetic field based on a pair of measured line-of-sight drift velocities. A detailed description of the F region drift measurements by the Jicamarca radar is provided elsewhere (Kudeki et al., 1999). The  $E \times B$  records were obtained at a 5 min cadence, covering an altitude range of 45–900 km at steps of 15 km.

### 1.3 Neutral wind from the FPI at Arecibo

A redline FPI system at the Arecibo Observatory (geographic:  $18.35^\circ$  N,  $-66.75^\circ$  E; Mlat:  $27.1^\circ$  N)

began to monitor the thermospheric 630.0 nm emission of OI at an altitude of  $\sim 250$  km in May 2012. The standard operating mode records measurements in four cardinal directions (North, South, East, and West) at an elevation angle of  $45^\circ$ , with a fifth measurement in the zenith. For each direction, the exposure time is 4 min. Further details regarding the system operation and data processing of the Arecibo FPI are given by Kerr (2013).

#### 1.4 SAMI2 model

SAMI2 is a low- to mid-latitude ionospheric model developed at the Naval Research Laboratory (NRL) that simulates the dynamic plasma and chemical evolution of seven ion species ( $H^+$ ,  $He^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$ ,  $N_2^+$ ,  $NO^+$  and  $O_2^+$ ) at altitudes of 85–20 000 km (Huba et al., 2000). To investigate the possible contributions to the latitudinal four-peak structure observed by Swarm, we used the Fejer model (Scherliess and Fejer, 1999), Mass Spectrometer Incoherent Scatter model (MSISE00) (Picone et al., 2002), and horizontal wind model (Hedin et al., 1996) as inputs for the SAMI2

model.

## 2 Observations

### 2.1 Examples of the latitudinal four-peak structure observed by Swarm B

In this study, we focused on one latitudinal four-peak event observed by the Swarm B satellite on the night of January 31, 2017. Fig. 1a shows the orbit of Swarm B (green) over  $-70^\circ$  E at approximately 03:03 coordinated universal time (UTC). The black star represents the location of the ISR at Jicamarca, the black triangle represents the position of the FPI at Arecibo, and the black dashed-dotted line represents the geomagnetic equator. Two consecutive orbits of Swarm A (red) and C (blue) passing  $-60^\circ$  E and  $-84^\circ$  E are also presented. The orbits of Swarm A and C were less than  $15^\circ$  in longitude from the orbit of Swarm B, but occurred 3.5–5.0 h earlier. Assuming that the latitudinal four-peak structure has a longitudinal extension of greater than  $15^\circ$ , observations from the three Swarm

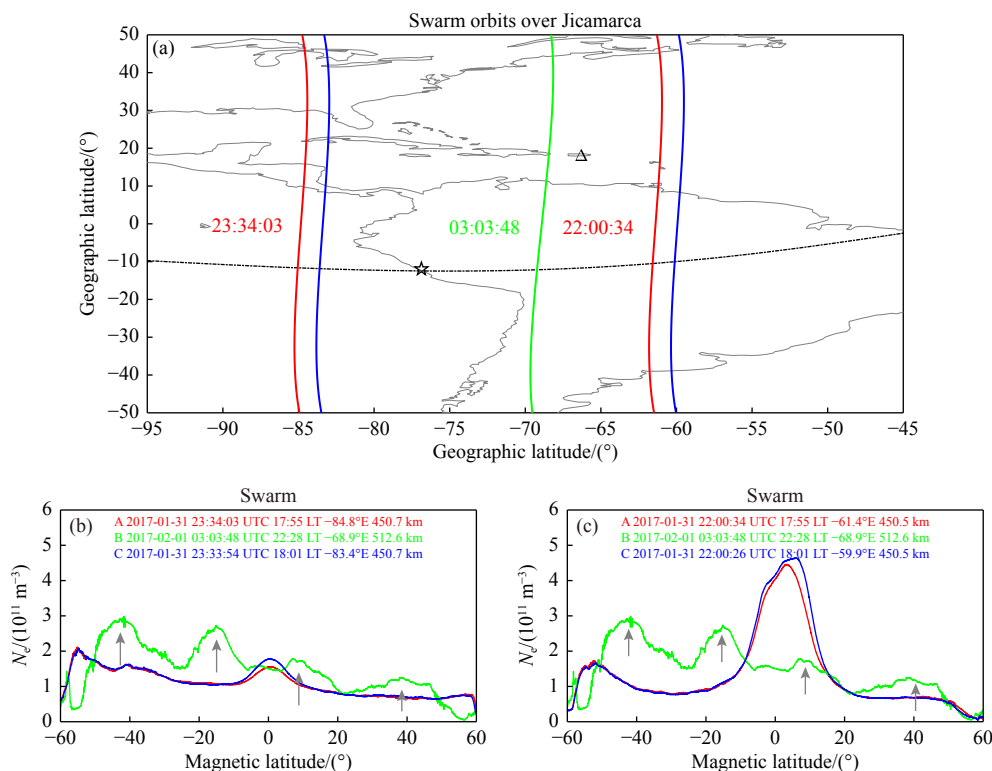


Fig. 1 (a) Two consecutive orbits of Swarm A (red) and C (blue) on January 31, 2017, as well as one orbit of Swarm B (green) on February 1, 2017. (b) Electron density profiles from the orbits of Swarm A/C on the west side of the Swarm B orbit. (c) Same as (b) but for the orbits of Swarm A/C on the east side of Swarm B

satellites can reflect the time evolution of the four-peak structure. The  $N_e$  profiles over Mlat from Swarm B are presented repeatedly in Fig. 1b and 1c, and the corresponding observations from the two consecutive orbits of Swarm A/C are presented in different colors. Four clear peaks, indicated by the gray arrows located at  $-42^\circ$ ,  $-17^\circ$ ,  $8^\circ$ , and  $41^\circ$  Mlat, were observed by Swarm B at approximately 22:28 LT. However, the  $N_e$  profiles from Swarm A/C observed around sunset hours close to the same longitudinal region do not exhibit such a latitudinal four-peak structure. The  $N_e$  profiles of Swarm A and C are very similar, and the slight difference is attributed to the 6 min LT difference between their orbits (Xiong et al., 2016). Although the two orbits of Swarm A/C cover almost the same local time, the  $N_e$  from the east-side orbit is much stronger in the equatorial region, indicating a stronger EIA around sunset on the east side.

It should be noted that the  $N_e$  profiles from Swarm A/C were observed between 23:24 and 22:00 UTC on January 31, while the  $N_e$  profile from Swarm B was observed around 03:03 UTC on February 1; both dates correspond to the local night of January 31 in the American sector. Therefore, in the reset, we sim-

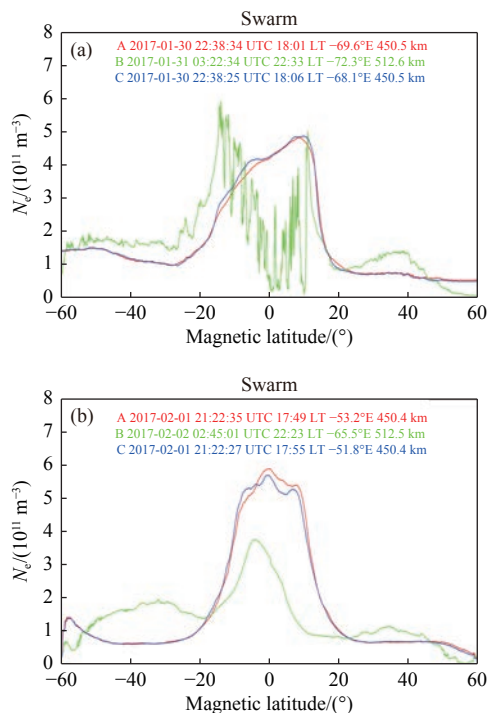


Fig. 2 Closest orbits of Swarm A/B/C on one day (a) before and (b) after January 31, 2017 around the longitude sector of Jicamarca

ply refer to the data of the local night, although it may span two days from the perspective of UTC.

For comparison, Fig. 2 presents the  $N_e$  profiles of the three Swarm satellites over the same longitudinal region, but one night before and one night after the event shown in Fig. 1. The Swarm B orbits were approximately 4.5 h later than those of Swarm A/C. In contrast, the latitudinal four-peak structure was missing on both nights, indicating that this structure is quite dynamic from day to day. On the previous night, the  $N_e$  observed by Swarm B at equatorial and low latitudes showed very violent fluctuations, representing typical nighttime equatorial plasma bubbles (EPBs) or equatorial plasma depletions (EPDs) that have been frequently observed in in situ satellite measurements (e.g., Burke et al., 2004; Wan et al., 2018; Xiong et al., 2010). Similar to Fig. 1c, the  $N_e$  profiles from Swarm A/C during the later night clearly show one peak located at the magnetic equator, which is attributed to the EIA around sunset.

## 2.2 Possible influences of the vertical plasma drift and neutral winds

Before discussing the possible causes of the latitudinal four-peak structure observed by Swarm, we should explore the prevailing geomagnetic conditions. Fig. 3 shows the  $B_z$  component of the interplanetary magnetic field (IMF) and SYM-H indices during the three days considered: January 30 to February 1, 2017, with the different days indicated by different colors. The  $B_z$  of the IMF generally varies within  $\pm 10$  nT, whereas the SYM-H varies beyond  $-50$  nT. Therefore, only minor influences of high-latitude processes are expected. The relatively minor variations in  $B_z$  and SYM-H on the night of January 31 suggest that the

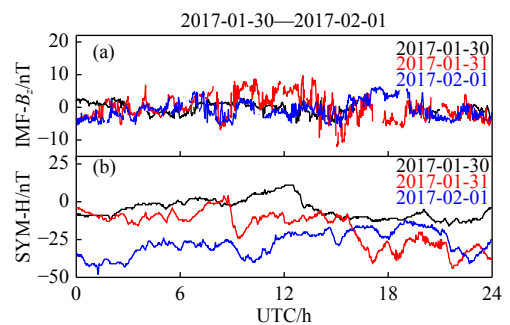


Fig. 3 Variations in the  $B_z$  of IMF and SYM-H indices on the three considered days

nighttime latitudinal four-peak structure was not driven by geomagnetic disturbances.

As shown in Fig. 3, the IMF  $B_z$  component and SYM-H index did not show prominent variations on January 31, 2017; therefore, forces from high latitudes, e.g., the disturbance wind caused by enhanced Joule heating at auroral latitudes, should have less influence on the enhanced zonal and southward neutral winds at Arecibo. One possible contribution of the upper atmospheric neutral wind could be the forces from the lower atmosphere (e.g., Hodges, 1967), as internal gravity waves are capable of producing localized instabilities and may be a dominant source of turbulence in the upper atmosphere.

Previous studies have shown that the vertical plasma drift,  $V_z$ , plays an important role in affecting the distribution of the F region electron density. Therefore, we aimed to determine whether the latitudinal four-peak structure is related to  $V_z$  above the magnetic equator. Fig. 4 shows the vertical plasma drift velocity,  $V_z$ , measured by the IRS at Jicamarca over the three considered days. As  $V_z$  shows a very small gradient at the F region altitude (Fejer et al., 2014), the average  $V_z$  over an altitude range of 300–500 km is shown here. From sunset to pre-midnight hours, we observe that the upward  $V_z$  was lower on the local night of January 31 than the on the other two nights. This result reveals that an enhanced upward plasma drift is not necessary for the nighttime latitudinal four-peak structure to occur. Interestingly, on the local night of January 30,  $V_z$  from sunset to the pre-midnight hours was relatively large (maximum value of approximately 40 m/s), providing preferable conditions for the occur-

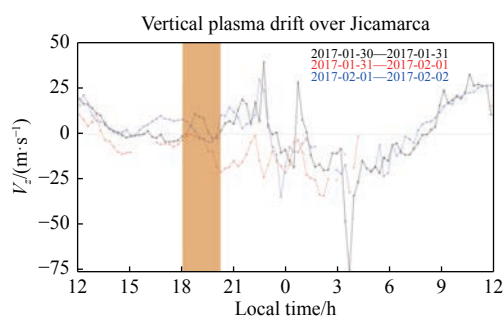


Fig. 4 Plasma vertical drift from the Jicamarca ISR on the three days;  $V_z$  has been averaged over the altitude range of 300–500 km to focus on the F region

rence of EPBs (e.g., Stolle et al., 2008), as observed by the Swarm B satellite on that night.

Next, we further analyzed the neutral wind observations during the three nights measured by the FPI at Arecibo, which is located within the same longitudinal sector as the Swarm orbits. It is expected that the wind data from the Arecibo FPI will accurately reflect the variation in wind along the orbits of Swarm. In Fig. 5, the red asterisks and blue squares represent the meridional and zonal winds, respectively, during the three nights. The zonal wind was generally eastward during all three nights, which is consistent with the known diurnal variation of the F region zonal wind from satellites (Emmert et al., 2004; Xiong et al., 2015). Around 22:30 LT on the local night of January 31, the zonal wind reached approximately 200 m/s, which was approximately 100 m/s larger than the values on the other two nights. The meridional wind generally blew equatorward (southward) on all three nights. One obvious feature is that the meridional wind showed a much more intense southward wind between 21:30 and 23:00 LT on the local night of January 31 compared with the values on the other two nights. The enhanced eastward zonal wind and southward meridional wind appeared at the time when the latitudinal four-peak structure was observed by Swarm B on the local night of January 31,

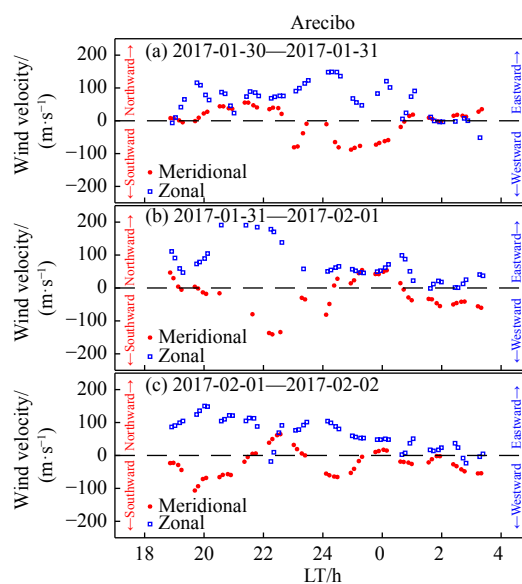


Fig. 5 Neutral winds from ground FPIs located at Arecibo ( $18.35^\circ$  N,  $-66.75^\circ$  E, Mlat:  $27.1^\circ$ ) on three consecutive nights. The middle panel represents the night during which the four-peak structure was observed by Swarm B



suggesting that neutral winds could play an important role in causing the nighttime latitudinal four-peak structure.

### 3 Discussion

In this study, we focused on the latitudinal four-peak structure of the F region electron density observed by the Swarm B satellite during the night of January 31, 2017. Simultaneous vertical plasma drift and neutral wind measurements from ground-based ISR and FPI were also analyzed to determine the possible causes of the nighttime latitudinal four-peak structure. As indicated above, the vertical plasma drift on the night of January 31 did not show  $y$  apparent difference from that on the other two nights, while both the eastward and equatorward winds were enhanced, indicating that the neutral winds rather than the vertical plasma drift play an important role in causing the nighttime latitudinal four-peak structure.

In general, this study addresses two main questions.

#### 3.1 What type of wind configuration is needed to cause the latitudinal four-peak structure?

Xiong et al. (2019) discussed the possible influence of neutral wind on the latitudinal four-peak structure. Assuming a simple configuration of the dipole magnetic field and a declination of  $0^\circ$ , they found that the neutral wind was most effective at an inclination of

$\pm 45^\circ$  occurring at  $\pm 26.6^\circ$  Mlat, which is close to the inner two peaks at low latitudes of approximately  $\pm 20^\circ$  Mlat. The wind measurements in our study provide direct evidence to support the conclusions of Xiong et al. (2019). However, owing to limited space coverage, we only obtained the wind variation from one station in the Northern Hemisphere. More detailed wind distributions along the Swarm orbit in both hemispheres would be helpful to better evaluate the wind influence. Therefore, in the analysis below, we consider the simulation results from the SAMI2 model for further discussion.

Fig. 6 shows the altitude versus Mlat distributions of the simulated  $N_e$  from 11:00 UTC on January 31 to 10:00 UTC on February 1, 2017. The selected longitude is  $-75^\circ$  (LT = UTC-5); therefore, our simulations correspond to the 24 hours of January 31, 2017. From 15:00 UTC (10:00 LT), the two crests of the EIA at low latitudes are clearly observed in the F region altitude. Until 22:00 UTC (17:00 LT), an additional peak in the Southern Hemisphere begins to show signs of growth. This trend appears to have been caused by splitting of the crest (at  $-15^\circ$  Mlat). In addition to the two latitude peaks, two extra peaks at  $-40^\circ$  and  $30^\circ$  Mlat are also observed from 02:00 UTC (21:00 LT), forming a four-peak structure, which is consistent with the  $N_e$  profile observed by Swarm B at 03:03 UTC. In addition, an obvious difference in the  $N_e$  intensity between the two hemispheres is found. Over the next few hours, the latitudinal four-peak structure becomes

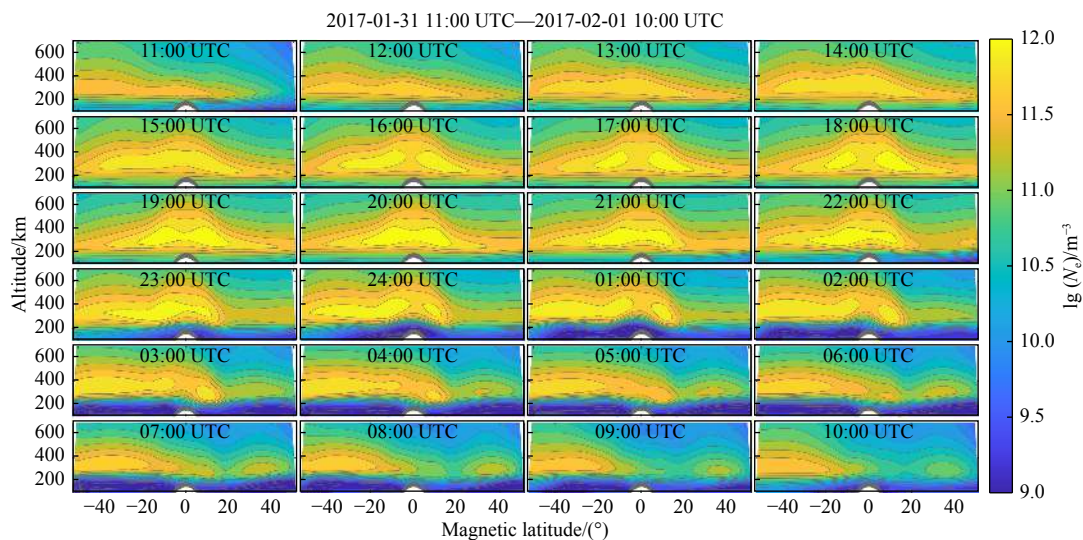


Fig. 6 Evolution of  $N_e$  from the SAMI2 model simulation in the altitude versus Mlat frame

increasingly apparent. However, at the same time, the intensities of the two inner peaks decrease. From sunrise, the  $N_e$  at equator and low latitudes starts to increase, and the peaks at the middle latitudes decrease.

Fig. 7 shows the altitude versus Mlat distribution of the zonal wind for each hour; the positive/negative values correspond to eastward/westward directions. Here, we focus mainly on the F region zonal wind, which generally flows westward in the daytime and eastward at night for the considered longitudinal sector. However, a clear difference in the two hemispheres is found for the diurnal variation in the zonal wind. For example, from 11:00 UTC (06:00 LT), a clear westward zonal wind is first observed in the southern middle latitudes, with an intensity of approxi-

mately 120 m/s at  $-40^\circ$  Mlat, and the maximum westward wind then gradually moves to lower altitudes. From 19:00 UTC (14:00 LT), the westward wind at the middle latitudes in the Southern Hemisphere begins to decrease and then turn eastward, and the widespread westward wind gradually emerges in the Northern Hemisphere. From 23:00 UTC (18:00 LT), an eastward wind appears in both hemispheres and gradually increases during the next few hours, while the eastward wind at the southern middle latitudes gradually decreases. At 05:00 UTC (00:00 LT), the zonal wind at the southern middle latitudes turns westward again, and the eastward zonal wind in the northern hemisphere starts to decrease and is confined to  $-10^\circ$ – $30^\circ$  Mlat, but it continues to flow eastward until sunrise (10:00 UTC, 05:00 LT).

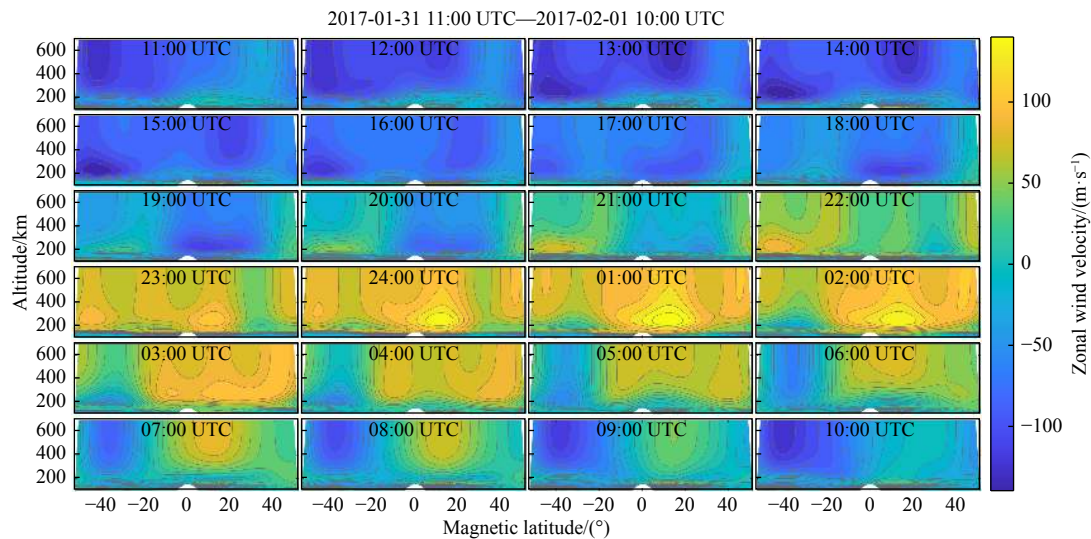


Fig. 7 Evolution of the zonal wind from the SAMI2 model simulation in the altitude versus Mlat frame

Similarly, Fig. 8 shows the evolution of the meridional wind, where the positive/negative values correspond to northward/southward, respectively. Most of the time, the meridional wind flows northward in both hemispheres. However, there are clear changes after 02:00 UTC (21:00 LT). In the Southern Hemisphere, the northward wind increases, while the southward meridional wind in the Northern Hemisphere strengthens, which agrees with the meridional wind variations observed by the FPI at Arecibo. From 05:00 UTC (00:00 LT) to 10:00 UTC (05:00 LT), the maximum northward wind in the Southern Hemisphere is

maintained at approximately 145 m/s.

To better compare with the in situ  $N_e$  from the Swarm B satellite, Fig. 9 shows the Mlat profiles of the simulated  $N_e$  for each hourly bin. The selected altitude is 400 km, which is close to the Swarm orbital height, and the longitude is  $-75^\circ$  E. The  $N_e$  at equatorial latitudes starts to increase and exhibits a single crest above the equator from 13:00 UTC (08:00 LT). With development of the EIA, two crests are first observed from 15:00 UTC (10:00 LT), reaches the maximum intensity at 18:00 UTC (13:00 LT), and then start to decrease during the afternoon hours. The simulated

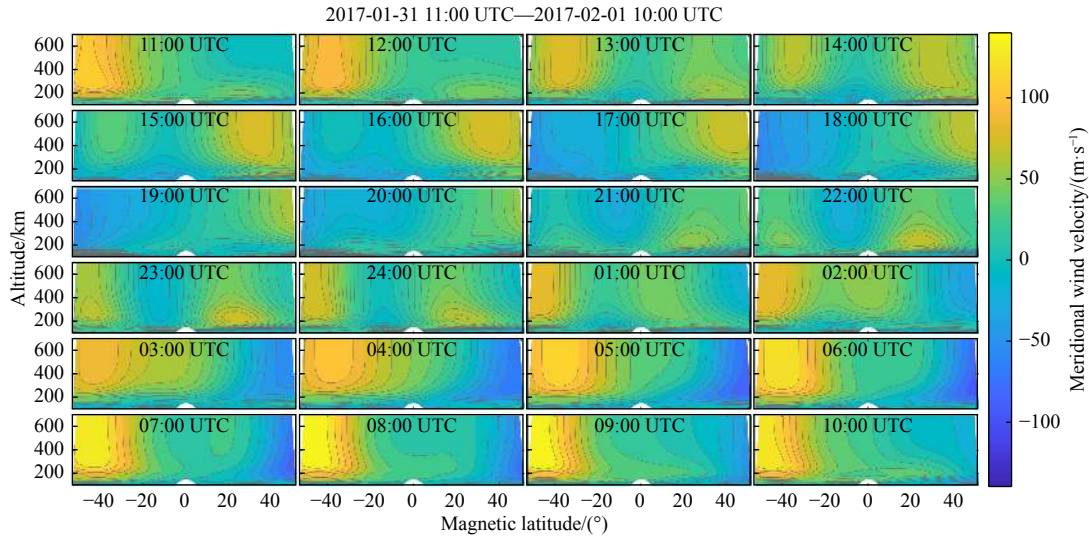


Fig. 8 Evolution of the meridional wind from the SAMI2 model simulation in the altitude versus Mlat frame

evolution of the EIA agrees well with previous satellite observations (e.g., Xiong et al., 2013). Around sunset at 23:00 UTC (18:00 LT), the northern crest (in the winter hemisphere) almost vanishes. However, one hour later, the decayed northern crest starts to increase again, while the southern crest (in the summer hemisphere) slowly decreases. Meanwhile (at 24:00 UTC, 19:00 LT), one additional peak starts to appear at  $-35^\circ$  Mlat, and the peak at approximately  $35^\circ$  Mlat starts to become visible (though with very weak intensity

owing to the lower background  $N_e$  values in the Northern Hemisphere) two hours later (02:00 UTC, 21:00 LT), forming the latitudinal four-peak structure of the F region  $N_e$  in the low and middle latitudes. The four peaks then persist throughout the night until sunrise, although with a rather weak intensity. The simulated evolution of the latitudinal four-peak structure is consistent with an earlier report by Xiong et al. (2019), which stated that these four peaks can last for several hours at night.

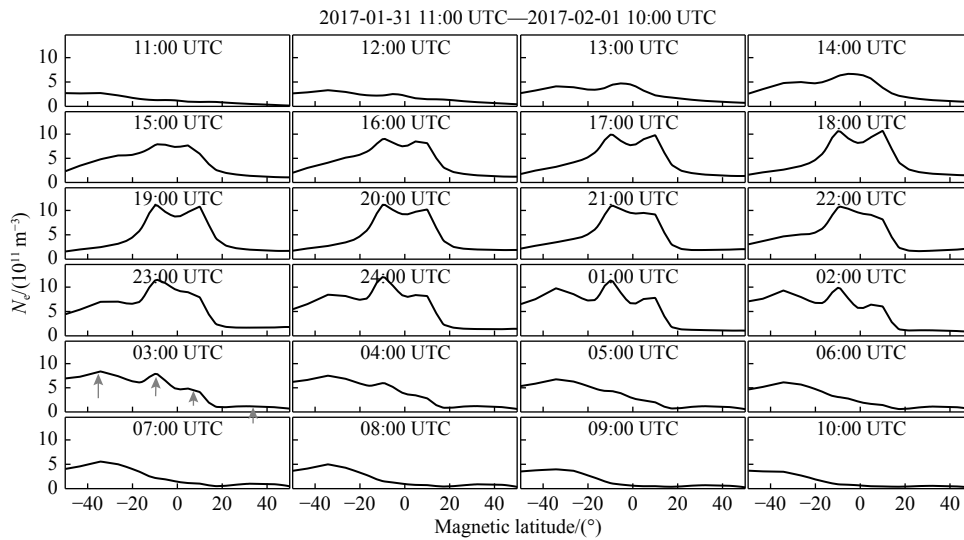


Fig. 9 Mlat profiles of  $N_e$  at 400 km from the SAMI2 model simulations

As seen from both the SAMI2 simulation and Swarm B observations, the background  $N_e$  exhibits prominent hemispheric asymmetry, with much stronger  $N_e$  values in the Southern Hemisphere. Previous studies have revealed that the neutral wind, especially the summer-to-winter (trans-equatorial) neutral

wind, push plasma along the magnetic field line, which causes the trans-equatorial movement of ionospheric plasma and results in inter-hemispheric asymmetry of both the magnitude and location (Mlat) of the EIA crests (e.g., Lin et al., 2007; Xiong et al., 2013). In addition, ion production and loss are important factors

in the production of EIA asymmetry through photochemical processes (Dang et al., 2016).

As previously discussed in the ISR measurements, the vertical plasma drift plays no significant role in causing the latitudinal four-peak structure; therefore, the SAMI2 simulated vertical plasma drifts are not shown here. One interesting feature is that the decayed EIA northern crest around sunset starts to increase again from 19:00 LT. By analyzing the distribution of zonal and meridional winds at that time, we found that the eastward zonal wind increases drastically in the northern low and middle latitudes one hour before and continues to flow eastward for the remaining few hours. The meridional wind does not show a clear variation at this time or before, but the northward wind in the northern low latitudes decays dra-

cally from 20:00 LT.

As a further test, we modified the zonal and meridional winds in the Horizontal Wind Model (HWM) to determine whether they influence the latitudinal distribution of  $N_e$ . Similar to Fig. 9, the selected altitude is 400 km, longitude is  $-75^\circ$  E, and time is 22:00 LT (03:00 UTC). A scaling factor  $k$ , with values of 0.5, 1, 2, and 4, was applied to the winds, and the corresponding  $N_e$  profiles are shown in Fig. 10. The zonal wind appears to have a minor influence on the latitudinal profiles of the four-peak structure. At 22:00 LT, the zonal wind between  $-20^\circ$  and  $50^\circ$  Mlat is directed eastward, while between  $-20^\circ$  and  $-50^\circ$  Mlat it flows mainly westward. With increasing intensity ( $k = 4$ ), only the peak at the southern middle latitudes moves equatorward by a few degrees.

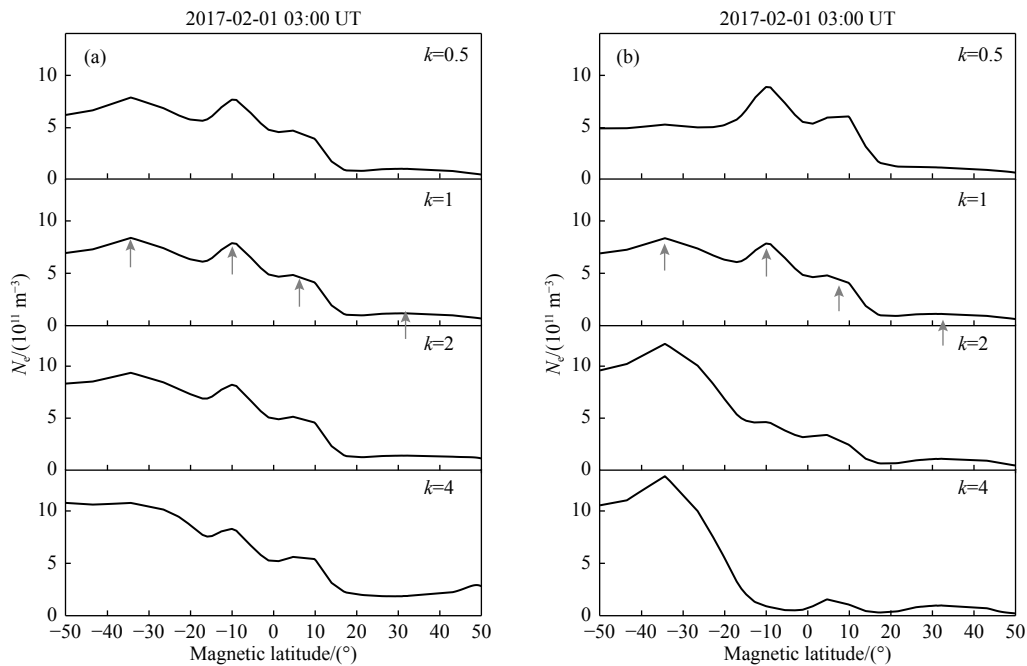


Fig. 10 Mlat profiles of  $N_e$  at 400 km from the SAMI2 model simulations with modified (a) zonal wind and (b) meridional wind

Compared to the zonal wind, the meridional wind has a larger influence on the latitudinal distribution of the four-peak structure. At 22:00 LT, the meridional wind between  $20^\circ$  and  $-50^\circ$  Mlat is directed mainly northward with stronger intensity at southward latitudes, while between  $20^\circ$  and  $50^\circ$  Mlat, it is mainly directed southward. The simulated equatorward wind in both hemispheres represents the typical F region wind at night. With such a configuration, the merid-

ional wind from the middle latitudes pushes plasma along the magnetic field line to higher altitudes, where the ion-neutral collision frequency is lower; thus, the plasma can exist for a longer time. Together with the downward-diffused plasma flux from the plasmasphere to the ionosphere at night, it is possible to cause the accumulation of plasma at middle latitudes, forming an enhanced plasma density band at  $\pm 40^\circ$  Mlat (e.g., Zhong et al., 2019). As shown in Fig. 10b, when

the meridional wind is reduced to half its value, the two  $N_e$  peaks at middle latitudes disappear, confirming that the meridional wind plays an important role in the formation of nighttime mid-latitude peaks. However, when the meridional wind is enhanced by a factor of 2 or 4, the  $N_e$  in the southern middle latitudes reaches as high as  $13.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ , while the  $N_e$  in the equatorial and Northern Hemispheres is only about  $1.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ . Such strong hemispheric asymmetry in the background  $N_e$  makes the latitudinal four-peak structure invisible. This result also suggests that an excessively strong meridional wind is not favorable for the appearance of a latitudinal four-peak structure at night.

The SAMI2 simulations agree well with the in situ  $N_e$  measurements from Swarm, vertical plasma drift data from the ISR, and neutral wind measurements from the FPI. Compared to the observations, the model provides a detailed time evolution of the latitudinal four-peak structures, as well as relevant quantities. However, it should be noted that the simulation results from SAMI2 for the three days considered are very similar, whereas the observed  $N_e$ , plasma drift, and neutral winds exhibit distinctive differences. From this perspective, the SAMI2 model is not sufficiently precise to reflect the day-to-day variability of the ionosphere.

At the topside ionospheric altitude, the neutral wind can push plasma along the magnetic field line. For example, owing to the inclination of the magnetic field line at mid-latitudes, the enhanced equatorward wind pushes plasma along the field line to higher altitudes. Because neutral-ion collisions are less frequent at higher altitudes, the plasma at higher altitudes can survive longer. Therefore, the equatorward wind is expected to enhance the plasma density in the topside ionosphere.

The HWM or SAMI2 models only provide the horizontal wind. However, it is more appropriate to convert the horizontal wind into magnetic field-aligned ( $W_{\text{par}}$ ) or vertical ( $W_{\text{per}}$ ) components when discussing its influence on the plasma density in the topside ionosphere. The magnetic field-aligned component can be expressed as follows:

$$W_{\text{par}} = (V \cdot \cos D + U \cdot \sin D) \cdot \cos I \quad (1)$$

Similarly, the vertical component can be expressed as follows (e.g., Liu et al., 2010):

$$W_{\text{per}} = (V \cdot \cos D + U \cdot \sin D) \cdot \cos I \cdot \sin I \quad (2)$$

where  $U$  and  $V$  are the zonal and meridional wind components, respectively; and  $D$  and  $I$  are the magnetic declination and inclination angles, respectively. Taking the values of  $U$  and  $V$  from the HWM model (included in the SAMI2 simulation) and  $D$  and  $I$  from the IGRF model, the latitudinal profile of  $W_{\text{par}}$  at an altitude of 400 km is obtained, as shown in Fig. 11. No clear latitudinal four-peak structure is seen in the  $W_{\text{par}}$  or  $W_{\text{per}}$  profiles. The results also reveal that the detailed mechanism or contribution of the neutral wind to the latitudinal four-peak structure is more complex, requiring further investigation using model simulations.

### 3.2 Are the inner two peaks of the four-peak structure the remnants of EIA crests from sunset hours?

From the  $N_e$  evolution from the SAMI2 model simulations, as shown in Fig. 6, it appears that the inner two peaks of the latitudinal four-peak structure at night are remnants of the EIA crests from sunset. However, as shown in Fig. 1, the  $N_e$  from two consecutive orbits of Swarm A/C (on both the east and west sides with respect to the Swarm B orbits) do not show two crests of the EIA around sunset. However, the  $N_e$  from Swarm B, which passed between the two orbits of Swarm A/C and approximately 4.5 h later, shows a clear four-peak structure. This provides evidence that the two inner peaks are not remnants of the EIA crests from sunset, which seems to contradict the model simulations.

The continuous vertical plasma drift measurements during the three days considered also provide an opportunity to answer this question. The intensity of the EIA from sunset to midnight is strongly related to the vertical plasma drift during the PRE. Around sunset (indicated by the yellow shadow in Fig. 4),  $V_z$  is generally downward on the local night of January 31, which indicates that the EIA should be quite weak around sunset at this longitude. The relatively weaker

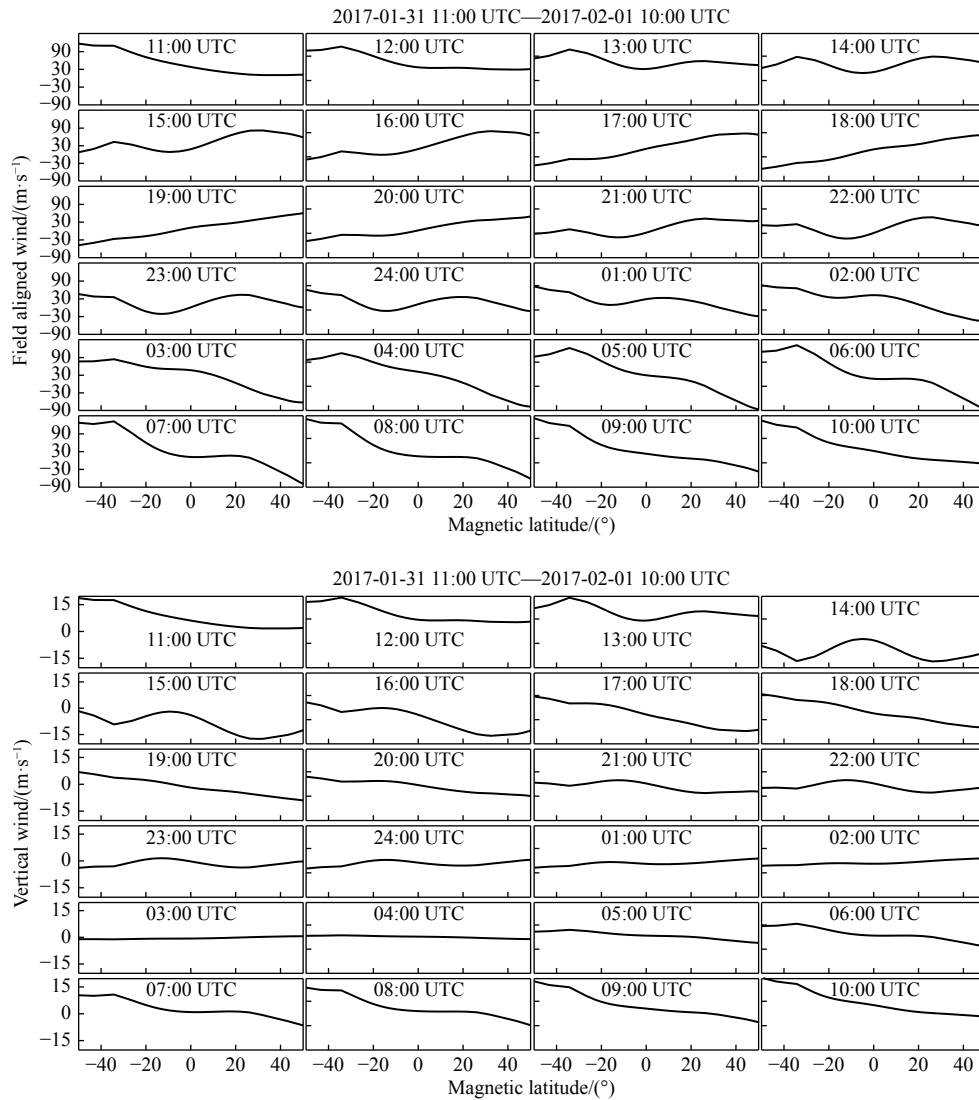


Fig. 11 Latitudinal profile of (top)  $W_{\text{par}}$  and (bottom)  $W_{\text{per}}$  at an altitude of 400 km for different UTC, calculated according to Equations (1) and (2)

EIA on this day is further supported by the fact that the maximum  $N_e$  at low latitudes measured by Swarm A/C is the lowest of the three days. Therefore, no strong EIA of the two crests is expected to form after sunset on January 31, and the two inner peaks of the latitudinal four-peak structure observed by Swarm B are caused by other drivers, such as the neutral winds.

In this study, we conducted an event analysis of the nighttime latitudinal four-peak structure at low and middle latitudes. However, owing to the limited number of ground-based stations, we provided neutral wind observations from only one FPI located at Arecibo. To better resolve the wind contributions from neutral winds, FPIs located at different latitudes but along the same longitude would be helpful. From this perspec-

tive, the Chinese Meridional Project provides an excellent opportunity to investigate the latitudinal structure of the ionosphere, and further studies are encouraged in the future.

#### 4 Summary

In this study, we provide a detailed analysis of the latitudinal four-peak structure of the F region electron density observed by the Swarm B satellite during the night of January 31, 2017. Simultaneous vertical plasma drift and neutral wind measurements from the ground-based ISR and FPI were also compared. The main findings are summarized below.

- (1) For this event, the two consecutive orbits from

Swarm A/C, on the east and west sides with respect to the Swarm B orbit, do not show two crests of the EIA around sunset. In contrast, the  $N_e$  from Swarm B, in which passed between the two orbits of Swarm A/C and approximately 4.5 h later, shows a clear four-peak structure. This provides strong evidence that the two inner peaks of the latitudinal four-peak structure are not remnants of the EIA crests from sunset.

(2) The F region vertical plasma drift measured by the ISR at Jicamarca is generally downward from sunset throughout the local night of January 31, 2017, which reveals that an enhanced upward plasma drift is not necessary to cause the nighttime latitudinal four-peak structure.

(3) The neutral wind measurements from the FPI located at Arecibo show enhanced eastward and southward components during the night, when the latitudinal four-peak structure was observed by Swarm B, both with a difference of approximately 100 m/s compared to the other two days. This suggests that the neutral winds play an important role in the nighttime latitudinal four-peak structure.

(4) Simulations using the SAMI2 model support these observations. In general, eastward and equatorward winds from both hemispheres at night provide favorable conditions for the latitudinal four-peak structure. However, when the equatorward wind is too large, strong hemispheric asymmetry of the background  $N_e$  can occur, which prevents the development of a latitudinal four-peak structure at night.

### Acknowledgement

The Swarm data were provided by the ESA at <https://earth.esa.int/web/guest/swarm/data-access>. The IMF components and SYM-H index are available from the OMNI Web database at <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>. The vertical drift data from the ISR at Jicamarca and the neutral wind data from the FPI at Millstone Hill can be downloaded from the Madrigal database at <http://madrigal.haystack.mit.edu/madrigal/>.

### References

- Appleton E V. 1946. Two anomalies in the ionosphere[J]. *Nature*, 157(3995): 691. DOI: 10.1038/157691a0.
- Arendt P R, Soicher H. 1964. Downward electron flux at 1, 000 km altitude from electron content measurement at mid-latitudes[J]. *Nature*, 204(4962): 983-984. DOI: 10.1038/204983a0.
- Balan N, Rao P B. 1987. Latitudinal variations of nighttime enhancements in total electron content[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 92(A4): 3436-3440. DOI: 10.1029/JA092iA04p03436.
- Buchert S. 2018. Langmuir probe level 1b algorithm[BD/OL]. Retrieved from <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/swarm-level-1b-plasma-processor-algorithm.pdf/bae64759-b901-d961-4d18-0a5b317f8c12>.
- Burke W J, Huang C Y, Gentile L C, Bauer L. 2004. Seasonal-longitudinal variability of equatorial plasma bubbles[J]. *Annales Geophysicae*, 22(9): 3089-3098. DOI: 10.5194/angeo-22-3089-2004.
- Dang T, Luan X, Lei J, et al. 2016. A numerical study of the interhemispheric asymmetry of the equatorial ionization anomaly in solstice at solar minimum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(9): 9099-9110. DOI: 10.1002/2016JA023012.
- Drob D P, Emmert J T, Crowley G, et al. 2008. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A12): A12304. DOI: 10.1029/2008JA013668.
- Duncan R A. 1960. The equatorial F-region of the ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 18(2): 89-100. DOI: 10.1016/0021-9169(60)90081-7.
- Eccles J V, St Maurice J P, Schunk R W. 2015. Mechanisms underlying the prereversal enhancement of the vertical plasma drift in the low-latitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(6): 4950-4970. DOI: 10.1002/2014JA020664.
- Emmert J T, Fejer B G, Shepherd G G, et al. 2004. Average nighttime F region disturbance neutral winds measured by UARS WINDII: Initial results[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(22): L22807. DOI: 10.1029/2004GL021611.
- Fejer B G, Hui D, Chau J L, Kudeki E. 2014. Altitudinal dependence of evening equatorial F region vertical plasma drifts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(7): 5877-5890. DOI: 10.1002/2014JA019949.
- Hedin A E, Fleming E L, Manson A H, et al. 1996. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58(13): 1421-1447. DOI: 10.1016/0021-9169(95)00122-0.
- Hodges R R. 1967. Generation of turbulence in the upper atmosphere by internal gravity waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 72(13): 3455-3458. DOI: 10.1029/JZ072i013p03455.
- Huba J D, Joyce G, Fedder J A. 2000. Sami2 is another model of the ionosphere (SAMI2): A new low-latitude ionosphere model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A10): 23035-23053. DOI: 10.1029/2000JA000035.
- Jakowski N, Förster M. 1995. About the nature of the night-time winter anomaly effect (NWA) in the F-region of the ionosphere[J]. *Planetary and Space Science*, 43(5): 603-612. DOI: 10.1016/0032-0633(94)00115-8.
- Kelley M C. 2009. *The Earth's Ionosphere[M]/Electrodynamics and Plasma Physics (2nd ed. )*. New York: Elsevier.
- Kerr R B. 2013. Data from the CEDAR Madrigal database[BD/OL].

- Available from [https://w3id.org/cedar?experiment\\_list=experiments/2013/aif/04jan13&file\\_list=aif130104g00004.hdf5](https://w3id.org/cedar?experiment_list=experiments/2013/aif/04jan13&file_list=aif130104g00004.hdf5).
- Kudeki E, Bhattacharyya S, Woodman R F. 1999. A new approach in incoherent scatter F region  $E \times B$  drift measurements at Jicamarca[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104(A12): 28145-28162. DOI: [10.1029/1998JA900110](https://doi.org/10.1029/1998JA900110).
- Liang P H. 1947. F2 ionization and geomagnetic latitudes[J]. *Nature*, 160(4071): 642-643.
- Lin C H, Liu J Y, Fang T W, et al. 2007. Motions of the equatorial ionization anomaly crests imaged by FORMOSAT-3/COSMIC[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(19): L19101. DOI: [10.1029/2007GL030741](https://doi.org/10.1029/2007GL030741).
- Liu H, Stolle C, Förster M, Watanabe S. 2007. Solar activity dependence of the electron density in the equatorial anomaly regions observed by CHAMP[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A11): A11311. DOI: [10.1029/2007JA012616](https://doi.org/10.1029/2007JA012616).
- Liu H, Thampi S V, Yamamoto M. 2010. Phase reversal of the diurnal cycle in the midlatitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A1): A01305. DOI: [10.1029/2009JA014689](https://doi.org/10.1029/2009JA014689).
- McDonald S E, Dymond K F, Summers M E. 2008. Hemispheric asymmetries in the longitudinal structure of the low-latitude nighttime ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A8): A08308. DOI: [10.1029/2007JA012876](https://doi.org/10.1029/2007JA012876).
- Mikhailov A V, Förster M, Leschinskaya T Y. 2000. On the mechanism of the post-midnight winter NmF2 enhancements: Dependence on solar activity[J]. *Annales Geophysicae*, 18(11): 1422-1434. DOI: [10.1007/s00585-000-1422-y](https://doi.org/10.1007/s00585-000-1422-y).
- Namba S, Maeda K I. 1939. *Radio Wave Propagation*[M]. Corona, Tokyo, 86.
- Picone J M, Hedin A E, Drob D P, Aikin A C. 2002. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A12): 1468. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).
- Scherliess L, Fejer B G. 1999. Radar and satellite global equatorial F region vertical drift model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104(A4): 6829-6842. DOI: [10.1029/1999JA900025](https://doi.org/10.1029/1999JA900025).
- Stolle C, Lühr H, Fejer B G. 2008. Relation between the occurrence rate of ESF and the equatorial vertical plasma drift velocity at sunset derived from global observations[J]. *Annales Geophysicae*, 26(12): 3979-3988. DOI: [10.5194/angeo-26-3979-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-3979-2008).
- Wan X, Xiong C, Rodríguez-Zuluaga J, et al. 2018. Climatology of occurrence rate and amplitudes of local time distinguished equatorial plasma depletions observed by Swarm satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(4): 3014-3026. DOI: [10.1002/2017JA025072](https://doi.org/10.1002/2017JA025072).
- Wang W, Lei J, Burns A G, et al. 2008. Ionospheric electric field variations during a geomagnetic storm simulated by a coupled magnetosphere ionosphere thermosphere (CMIT) model[J]. *Geophysical Research Letters*, 35(18): L18105. DOI: [10.1029/2008GL035155](https://doi.org/10.1029/2008GL035155).
- Woodman R F. 1970. Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator[J]. *Journal of Geophysical Research*, 75(31): 6249-6259. DOI: [10.1029/JA075i031p06249](https://doi.org/10.1029/JA075i031p06249).
- Xiong C, Park J, Lühr H, et al. 2010. Comparing plasma bubble occurrence rates at CHAMP and GRACE altitudes during high and low solar activity[J]. *Annales Geophysicae*, 28(9): 1647-1658. DOI: [10.5194/angeo-28-1647-2010](https://doi.org/10.5194/angeo-28-1647-2010).
- Xiong C, Lühr H, Ma S Y. 2013. The magnitude and inter-hemispheric asymmetry of equatorial ionization anomaly-based on CHAMP and GRACE observations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, (105-106): 160-169. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.09.010).
- Xiong C, Zhou Y-L, Lühr H, Ma S-Y. 2015. Tidal signatures of the thermospheric mass density and zonal wind at midlatitude: CHAMP and GRACE observations[J]. *Annales Geophysicae*, 33(2): 185-196. DOI: [10.5194/angeo-33-185-2015](https://doi.org/10.5194/angeo-33-185-2015).
- Xiong C, Zhou Y-L, Lühr H, Ma S-Y. 2016. Diurnal evolution of the F region electron density local time gradient at low and middle latitudes resolved by the Swarm constellation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(9): 9075-9089. DOI: [10.1002/2016JA023034](https://doi.org/10.1002/2016JA023034).
- Xiong C, Lühr H, Sun L, et al. 2019. Long-lasting latitudinal four-peak structure in the nighttime ionosphere observed by the Swarm constellation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(11): 9335-9347. DOI: [10.1029/2019JA027096](https://doi.org/10.1029/2019JA027096).
- Xiong C, Jiang H, Yan R, et al. 2022. Solar flux influence on the in-situ plasma density at topside ionosphere measured by Swarm satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(5): e2022JA030275. DOI: [10.1029/2022JA030275](https://doi.org/10.1029/2022JA030275).
- Xiong C, Lühr H. 2023. Field-aligned scale length of depleted structures associated with post-sunset equatorial plasma bubbles[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 13: 3. DOI: [10.1051/swsc/2023002](https://doi.org/10.1051/swsc/2023002).
- Yeh K C, Franke S J, Andreeva E S, Kunitsyn V E. 2001. An investigation of motions of the equatorial anomaly crest[J]. *Geophysical Research Letters*, 28(24): 4517-4520. DOI: [10.1029/2001GL013897](https://doi.org/10.1029/2001GL013897).
- Yizengaw E, Moldwin M B, Sahai Y, de Jesus R. 2009. Strong postmidnight equatorial ionospheric anomaly observations during magnetically quiet periods[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A12): A12308. DOI: [10.1029/2009JA014603](https://doi.org/10.1029/2009JA014603).
- Zhong J, Lei J, Yue X, et al. 2019. Middle-latitude band structure observed in the nighttime ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(7): 5857-5873. DOI: [10.1029/2018JA026059](https://doi.org/10.1029/2018JA026059).



# 中性风对夜侧电离层纬向四峰结构的影响

熊超<sup>1,2\*</sup>, 让心怡<sup>2</sup>, 黄宇阳<sup>2</sup>, 姜国英<sup>3</sup>, 胡坤<sup>2</sup>, 罗伟华<sup>4</sup>

1 湖北珞珈实验室, 武汉 430079

2 武汉大学 电子信息学院 空间物理系, 武汉 430072

3 中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100084

4 中南民族大学 电子信息工程学院, 武汉 430074

**摘要:** 欧空局 Swarm 星座包含三颗飞行在不同地方时的卫星, 其为研究夜侧电离层纬向四峰结构随时间的演化提供了很好的机会. 在 2017 年 1 月 31 日夜间, Swarm A 和 C 两颗并排飞行的卫星在黄昏前后 (17:55/18:01 地方时) 的美洲扇区并没有观测到赤道电离异常的两个峰, 而 Swarm B 卫星在约 4.5 小时后飞行于大致相同的经度扇区, 并观测到夜侧电离层呈现出明显的纬向四峰结构. 该观测证明了纬向四峰结构中靠近低纬的两个内峰不是黄昏前后赤道电离异常峰的残余. 在该事件中, 位于秘鲁的 Jicamarca 非相干散射雷达从黄昏至午夜观测到向下的等离子体垂直漂移速度, 表明向上的等离子体漂移速度并不是引起夜间纬向四峰结构的必要条件; 而位于 Arecibo 的法布里-珀罗干涉仪观测到中性风显示出东向和南向分量的增强, 表明中性风对夜侧纬向四峰结构的形成有着重要作用. SAMI2 模型的模拟结果与卫星、非相干散射雷达及法布里-珀罗干涉仪的观测一致. 模拟结果显示夜侧东向与赤道向风为纬向四峰结构的形成提供了有利条件; 但当赤道向风过大时, 会导致背景电子密度出现显著半球不对称性, 从而阻碍夜侧纬向四峰结构的发展.

**关键词:** 夜侧电离层; 赤道电离异常; 纬向四峰结构; Swarm 卫星; 中性风

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-009

中图分类号: P352

文献标识码: A

马铮, 龚韵, 张绍东. 2024. 平流层爆发性增温期间中高层大气行星波研究进展. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 109-119. doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-076.

Ma Z, Gong Y, Zhang S D. 2024. Recent research progress on planetary waves in the middle and upper atmosphere during sudden stratospheric warmings. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 109-119 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2022-076.

## 平流层爆发性增温期间中高层大气行星波研究进展

马 铮<sup>1</sup>, 龚 韵<sup>1\*</sup>, 张绍东<sup>1,2</sup>

1 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072

2 贵州师范大学, 贵阳 550001

**摘要:** 极区平流层爆发性增温 (SSW) 是冬季半球最剧烈的大气扰动现象之一. SSW 期间温度和风场的剧烈变化被认为是冬季半球中高层大气波动能量异常增强的主要原因. 流星雷达是能够稳定连续探测中间层和低热层风场的重要地基探测设备. 主要依托国家重大科技基础设施建设项目: “子午工程”, 我国已建设了多个流星雷达观测台站, 对中间层和低热层风场进行了长期稳定连续的监测, 为揭示 SSW 期间中间层和低热层波动异常变化的物理机制提供了重要的观测资料. 本文简述了近年来以我国 “子午工程” 流星雷达监测数据为核心, SSW 期间中高层大气行星波的研究进展和成果; 深入讨论了冬季半球中高层大气行星波发生异常变化的主要激发机制. 随着 “子午工程” 二期十个流星雷达台站即将建成, 本文对利用 “子午工程” 流星雷达监测台网进一步研究 SSW 期间中高层大气波动的变化特性进行了展望.

**关键词:** 平流层爆发性增温; 子午工程; 流星雷达; 大气行星波

doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-076

中图分类号: P351

文献标识码: A

## Recent research progress on planetary waves in the middle and upper atmosphere during sudden stratospheric warmings

Ma Zheng<sup>1</sup>, Gong Yun<sup>1\*</sup>, Zhang Shaodong<sup>1,2</sup>

1 School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

**Abstract:** Sudden stratospheric warming (SSW) is a violent atmospheric disturbance in the polar region of the winter hemisphere. The drastic changes in temperature and wind during SSWs are considered to be the main reasons for the abnormal increase in the energy of atmospheric waves in the upper and middle atmosphere in the winter hemisphere. Meteor radar is an important ground-based detection equipment that can stably and continuously detect neutral wind in the mesosphere and lower thermosphere (MLT) region. Based on one of the National Major Science Infrastructure Projects, the "Meridian Project", China has built several meteor radar observation stations to conduct long-term stable and continuous monitoring of the neutral wind in the MLT region, which provides important observation data for revealing the physical mechanism of abnormal changes in atmospheric waves during SSWs. Here, we briefly review the research progress on planetary waves in the middle and upper atmosphere during SSWs in recent years, especially the scientific findings based on the meteor radars in the Chinese "Meridian Project". The trigger mechanisms of the enhanced planetary waves during SSWs are discussed. With the completion of ten meteor radars in the second phase of the "Meridian Project", this paper prospects the use of its meteor

收稿日期: 2022-12-07; 录用日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42104145, 41574142, 42127805)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42104145, 41574142, 42127805)

第一作者: 马铮 (1990-), 男, 博士后, 主要从事中高层大气动力学研究. E-mail: mazheng@whu.edu.cn

\*通信作者: 龚韵 (1983-), 男, 教授, 主要从事中高层大气和电离层研究. E-mail: yun.gong@whu.edu.cn



radar monitoring network to further study the characteristics of atmospheric waves in the middle and upper atmosphere during SSWs.

**Keywords:** sudden stratospheric warming; Chinese Meridian Project; meteor radar; atmospheric planetary waves

## 0 引言

平流层爆发性增温 (sudden stratospheric warming, SSW) 是常发生于冬季半球极区的特殊天气事件, 其特征为极区平流层温度在短短几天内大幅度上升并伴随中高纬地区的纬向平均纬向风急剧减弱或反转 (Baldwin et al., 2021; Butler et al., 2017). 如图 1 所示, 2018 年 12 月至 2019 年 1 月期间, 北半球发生了一次较为典型的 SSW 事件, 极区平流层 (10 hPa 高度上 90°N) 的日平均温度 (红色) 在一周时间内升温超过 60 K, 远高于近四十余年的气候学均值 (蓝色). SSW 的发生主要是由于冬季突然增强的行星波与大气背景平均流发生相互作用后破坏了原有极区平流层极涡的状态. 极区平流层极涡状态的改变 (发生位移或分裂) 使得冬季半球中高层大气的温度和风场发生剧烈变化, 改变了大气环流状态并进一步激发大尺度的扰动, 从而影响整个冬季半球不同圈层的大气状态 (Charlton and Polvani, 2007; Harvey et al., 2002; Manney et al., 2022). 在对流层, SSW 主要通过极涡位置的变化影响对流层天气, 造成中纬度部分地区出现较为寒冷的极端天气 (King et al., 2019; Waugh et al., 2017); 而在中间层, SSW 主要通过改变背景风场和温度场在中低纬度甚至夏季半球激发行星尺度的波动 (Laskar et al., 2019; Liu et al., 2004; Stray et

al., 2015); 近年来也有不少研究在 SSW 发生后的热层和电离层捕捉到潮汐波动异常增强的信号 (Gong et al., 2013, 2018a; Jin et al., 2012; Xiong et al., 2013; Zhang et al., 2020). 因此, 深入研究 SSW 期间中高层大气波动的激发和传播过程, 对理解冬季半球大气能量的跨纬度、跨圈层耦合机制有着重要意义.

流星雷达是一种利用流星尾迹 (流星进入地球烧蚀产生的等离子体柱) 的后向散射回波反演中间层和低热层 (mesosphere and lower thermosphere, MLT) 中性风场的地基无线电设备. 近年来, 因其能够长期稳定连续地提供高时空分辨率的风场信息, 被广泛地建设于全世界各地 (Chau et al., 2021; Poblet et al., 2022; Stober et al., 2018; Yi et al., 2018, 2019; Yu Y et al., 2017). 流星雷达一般提供高度范围为 80~100 km、时间分辨率为 1 小时、高度分辨率为 2 km 的风场数据. 其全天候 (24 小时) 的连续观测使得研究者们可以连续捕捉 MLT 区域大气波动的变化. 流星雷达的广泛部署给中高层大气波动研究提供了宝贵的数据资料. 同时, 在不同纬度上布设的多台流星雷达的联合观测, 也为揭示跨纬度、跨圈层的大气波动耦合过程提供了可能 (Wan and Xu, 2014). 国家重大科技基础设施建设项目——“子午工程”, 已在我国黑龙江漠河和湖北武汉建设了两台流星雷达 (Dou et al., 2010; Gong et al., 2022; He et al., 2018, 2021a; He and Chau, 2019; Liu et al., 2017a, 2017b; Xie et al., 2019). 同时, 中国科学院地质与地球物理研究所在北京和海南三亚/乐东建设了另外两部流星雷达 (He et al., 2021b; Huang et al., 2019; Li G et al., 2012, 2018, 2022; Ma et al., 2021; Wang et al., 2019; Yao et al., 2015; Yu T et al., 2016, 2017), 与“子午工程”一期所建设的流星雷达共同组成了沿东经 120°子午线分布的流星雷达链, 如图 2 所示 (Cheng et al., 2022; Gu et al., 2020; Li Y et al., 2022; Ma et al., 2018; Wang et al., 2020; Yu et al., 2013, 2015; Zhou et al., 2018, 2022a). 这些流星雷达自建设至今已提供了长达十年以上的风场数据, 以及进一步反演所得的温度场、流星通量和大气密度等宝

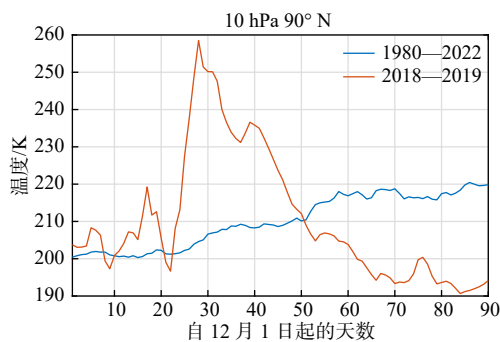


图 1 2018/2019 年冬季一次典型的 SSW 期间 10 hPa 高度上 90°N 的温度变化, 蓝线为 1980 年以来的气候学均值, 红线为 2018—2019 年冬季的温度值

Fig. 1 The climatological temperature evolutions at 90°N and 10 hPa since 1980 (blue) and during the winter of 2018-2019 (red)

贵数据 (Liu et al., 2017a, 2017b; Ma et al., 2018; Tang et al., 2021a, 2021b; Yi et al., 2018, 2019, 2021; Younger et al., 2015; Zhou et al., 2022), 为研究我国上空中间层和低热层的大气变化规律提供了丰富的观测资料。

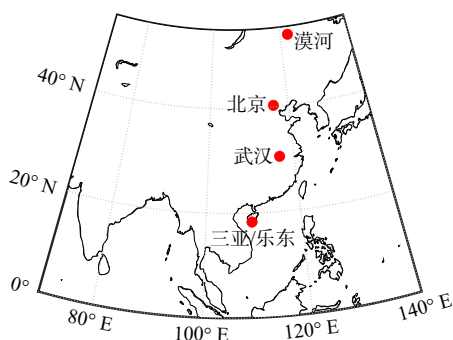


图 2 “子午工程”和中国科学院地质与地球物理研究所联合建设的流星雷达站点布局

Fig. 2 The meteor radar sites established by the Chinese Meridian Project and Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (IGGCAS)

近年来, 利用流星雷达链的观测数据, 研究人员从多个方面对 SSW 期间的中高层大气波动异常增强现象进行了报道, 这些异常增强的中高层大气波动不仅包含了周期以天为单位的行星波 (Gong et al., 2018b; Huang et al., 2022; Luo et al., 2021; Yu et al., 2019, 2022), 还包含了周期以小时为单位的潮汐波 (Chen et al., 2020; Gong et al., 2021; Li et al., 2020; Luo et al., 2022; Tang et al., 2020). 相关研究基本掌握了中高层大气波动在 SSW 期间的活动规律, 并逐步揭示了这些波动潜在的多种激发机制. 本文综述了近年来 SSW 期间中高层大气行星波的研究进展, 主要是基于“子午工程”流星雷达观测数据的科学发现, 并结合基于卫星和再分析数据等其他资料的相关研究, 深入讨论了 SSW 期间中高层大气行星波的激发与传播机制. 随着“子午工程”二期十个流星雷达台站即将建成, 本文还对利用“子午工程”流星雷达监测网深入研究 SSW 期间大气波动的变化特性进行了展望. 本文主要围绕 SSW 期间中高层大气行星波的增强现象和激发机制这两大问题进行综述, 并对其中的热点和关键问题展开讨论.

## 1 现象

大气行星波是一种行星尺度的波动, 按照其传播特性可以分为静态行星波 (stationary planetary

wave) 和传播行星波 (traveling planetary wave). 静态行星波主要受海陆分布等地形差异所影响, 其相位较为固定; 而传播行星波则具有传播性质, 一般沿纬圈向东或向西周期性传播, 其相位在不同时刻是变化的. 需要指出的是, SSW 期间静态行星波和传播行星波均有较为明显的变化, 在讨论相关问题时应予以明确区分.

现有理论认为, SSW 的产生主要是由于对流层和平流层增强的静态行星波, 破坏了冬季平流层极涡的稳定状态. 这些增强的静态行星波以波数 1 和波数 2 为主, 一般认为波数为 1 的行星波增强主要对应极涡位移型 SSW, 而波数为 2 的行星波增强主要对应极涡分裂型 SSW. 然而近年来 SSW 期间的极涡演化越来越复杂, 同一次 SSW 事件期间可能同时存在极涡位移和极涡分裂两种状态. 基于波数和极涡类型潜在的对应关系, Choi 等 (2019) 提出了一种基于主导波数推演极涡状态的定义方式, 他们将 SSW 主增温事件的风反转日作为中间日, 观察其前 10 天和后 10 天的静态行星波变化, 分别定义为增温前 (pre-warming) 和增温后 (post-warming) 两个阶段. 在增温前或增温后的阶段内, 若波数为 2 的静态行星波振幅在某一天大于波数为 1 的静态行星波振幅, 则该阶段定义为极涡分裂型, 否则定义为极涡位移型. 根据这种定义方法, Choi 等 (2019) 定义了位移转分裂型的 SSW 类型, 如发生在 2013 年 1 月北半球的 SSW 事件.

Ma 等 (2020a) 利用该方法进一步分析了发生于 2018 年 2 月和 2019 年 1 月的两次 SSW 主增温事件, 他们发现 2018 年 2 月的 SSW 属于分裂转位移型 SSW, 而 2019 年 1 月的 SSW 属于位移转分裂型. 近年来, 这些极涡转换型 SSW 的不断发生给 SSW 期间的行星波研究带来了新的问题, 即 SSW 期间的主导波数与极涡是如何演化的. 事实上, 前人所认为的静态行星波波数与极涡类型并非具有一一对应关系, 例如 2007 年 SSW 发生前由静态行星波 2 波主导, 但极涡并没有分裂, 而 2019 年 1 月 SSW 发生后由静态行星波 1 波主导, 但极涡具备分裂状态. 在一些个例研究中, 研究者还使用了其它波数的静态行星波 (例如静态行星波 3 波) 来解释极涡的状态改变, 但这些理论暂时还不具备普适性. 因此, 针对极涡转换型 SSW, 未来可能需要更为完善的定义来准确描述极涡状态. 有趣的是, Ma 等 (2020a) 发现这些极涡转换型 SSW 发生期间极涡的演化过程均发生于大西洋区域 (Atlantic

region)。如图 3 所示, 蓝色的极涡在  $0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$  范围内发生分裂, 未来一段时间对于 SSW 期间极涡演化的物理机制仍将是相关方向的研究热点。

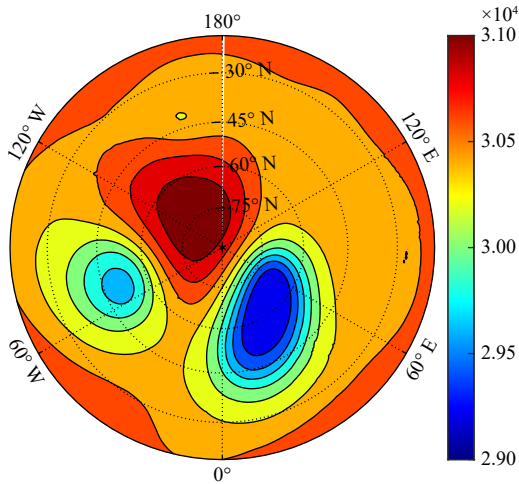


图 3 2019 年 1 月 5 日 (2018/2019 SSW 发生后) 北半球 10 hPa 位势高度分布 (单位: m)。平流层极涡 (蓝色) 在大西洋区域 ( $0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$ ) 发生分裂 (修改自 Ma et al., 2020a)

Fig. 3 Distribution of geopotential height (unit: m) at 10 hPa in the Northern Hemisphere on January 5, 2019 (after the 2018/2019 SSW). The polar vortices (indicated by blue regions) are splitting over the Atlantic region ( $0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$ ) (modified from Ma et al., 2020a)

SSW 期间复杂的极涡变化不仅与静态行星波的变化有关, 也影响了传播行星波的变化。在平流层, Gong Y 等 (2019) 利用 Aura/MLS 卫星提供的温度数据发现, 准 16 天波增强是 SSW 期间中高层大气中的常规响应, 其活动对 SSW 期间的极涡演化也存在一定的推动作用, 即准 16 天波的波数与极涡类型也具备类似静态行星波的对应关系。而 SSW 期间更为明显的传播行星波的活动, 则主要被流星雷达等地基无线电设备在 MLT 区域所观测到。基于我国“子午工程”一期和中国科学院地质与地球物理研究所建设的流星雷达链, Ma 等 (2017) 率先观测到中纬度漠河、北京、武汉和低纬度三亚四个站点在 2013 年 SSW 发生后同时增强的准 2 天波活动。这些准 2 天波在纬向风和经向风中均有较强的振幅, 但在中纬度和低纬度的特征差异较大, 低纬度的准 2 天波增强可能有更复杂的激发过程。Gong 等 (2018a) 统计了中纬度三个站点的准 5 天波活动特征, 同时也在 2013 年 SSW 发生后发现了多个站点上空均有准 5 天波的活动迹象。有趣的是, 不同纬度的准 5 天波的波数存在差异, 包括西向传播的波 1 和波 2 两种波数, 这可能与 2013 年复杂的极涡演化过程有关。Ma 等 (2020b)

基于漠河站流星雷达的观测结果报道了 2019 年 1 月北半球 SSW 期间一次异常增强的准 4 天波, 如图 4 所示, 特别是异常增强的准 4 天波是西向传播的且波数为 2。随后, Yamazaki 等 (2021) 利用 Aura/MLS 卫星的位势高度数据进一步统计了西向传播波数为 2 的准 4 天波活动, 发现它在几次 SSW 主增温事件期间均有较强的振幅。

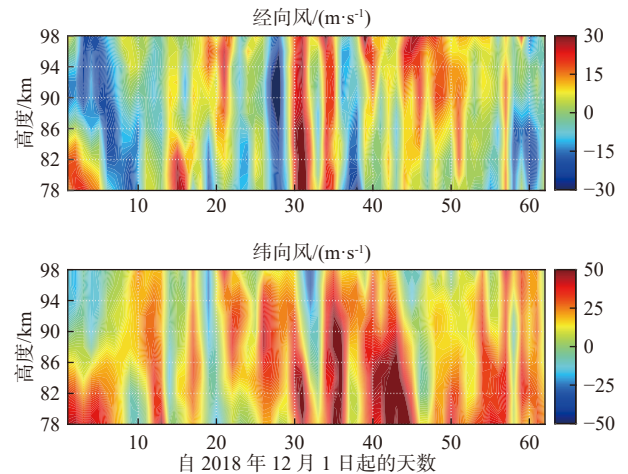


图 4 2018/2019 年冬季漠河站流星雷达观测的日平均经向风和纬向风 (单位: m/s, 北向/东向为正), 在 SSW 发生期间 (第 30 天附近) 有明显的周期性波动 (准 4 天波) 被观测到 (修改自 Ma et al., 2020b)

Fig. 4 Daily mean meridional (positive northward) and zonal winds (positive eastward) observed during the 2018/2019 SSW by the meteor radar at Mohe. The quasi-4-day oscillation during the SSW (around day 30) is evident in the meteor wind (modified from Ma et al., 2020b)

除了准 2 天和准 5 天波, 准 10 天波也在 SSW 期间被捕捉到。Yu 等 (2019) 利用“子午工程”流星雷达链和“子午工程”MST 雷达报道了准 10 天波对 2015 年最后增温事件 (stratospheric final warming, SFW) 的响应。SFW 事件与 SSW 事件类似, 不同的是 SFW 发生在春季且发生后中高纬度风场一般不再反转回较强的东向风。Yamazaki 和 Matthias (2019) 利用 Aura/MLS 证实, 准 10 天波的增强确实与三月发生的 SFW 事件有密切联系。特别是在 2005 年、2015 年和 2016 年三次 SFW 事件期间, 北半球中纬度均有准 10 天波动的增强。Luo 等 (2021) 基于“子午工程”流星雷达链报道了 2018 年 2 月 SSW 期间准 10 天波在不同纬度的响应结果, 区别于对 SFW 事件的响应, 这是准 10 天波活动对冬季 SSW 响应的首次报道。Yin 等 (2023) 利用“子午工程”流星雷达链报道了 2020 年 3 月 SSW 期间准 10 天波的响应, 如图 5 所示。他们的

研究表明准 10 天波的活动不仅可以对冬季 SSW 主增温和春季的 SFW 事件产生响应 (二者均具备平流层纬向平均纬向风的反转条件), 也可以在春季的 SSW 次增温事件 (平流层纬向平均纬向风没有反转) 后增强.

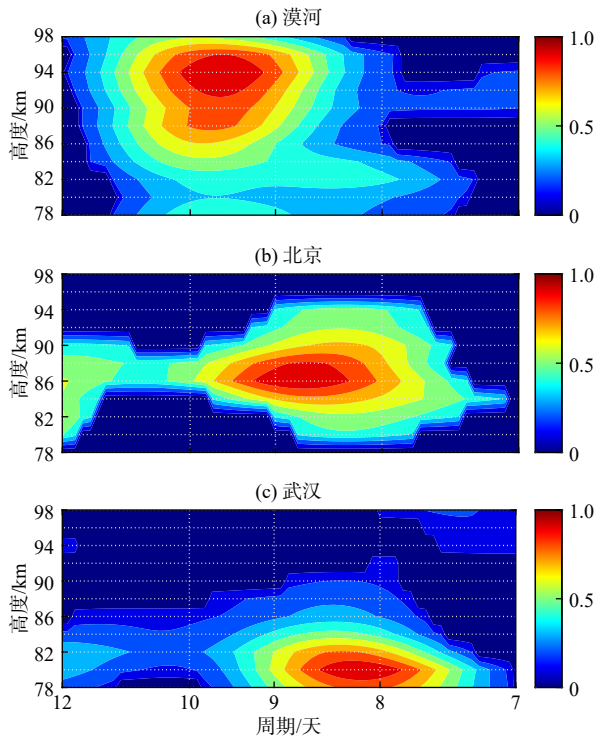


图 5 2020 年 3 月 SSW 发生后漠河、北京及武汉站流星雷达纬向风的归一化 LS 周期谱图, 三台流星雷达均观测到了明显的准 10 天周期性波动 (修改自 Yin et al., 2023)

Fig. 5 Normalized LS periodogram of the zonal winds observed by meteor radars at Mohe, Beijing, and Wuhan after the March 2020 SSW. Quasi-10-day waves were captured at all three stations (modified from Yin et al., 2023)

利用“子午工程”的流星雷达链观测数据, Gong 等 (2020) 揭示了中纬度 MLT 区域准 16 天波的长期变化规律, 发现其具备明显的年振荡特征. 这与卫星以及再分析数据中准 16 天波所展现的气候学特征类似 (Fan et al., 2022; Gong Y et al., 2019; Tang et al., 2021). 但事实上在很多年中, 准 16 天波的增强时间均与 SSW 的发生时间重合, “子午工程”流星雷达也在一些年份的 SSW 期间观测到了较强的准 16 天波活动 (Huang et al., 2022; Yu et al., 2019), 这表明准 16 天波的气候学活动很可能与 SSW 的发生存在密切关系. 类似的对应关系在准 5 天和准 10 天波的气候学变化中也存在, 这些波动在冬季的常规增强也可能主要受到 SSW 的调制或影响. 然而, 现有观测结果发现, 不同的

SSW 期间传播行星波的增强并不具备统一的规律, 特别是在周期和波数上的差异较大, 这意味着这些传播行星波的增强可能存在不同的激发机制或受到局地大气不同背景状态等其他因素的影响.

## 2 机制

近年来基于“子午工程”流星雷达的观测数据, 并结合卫星和再分析资料, 研究者们不断增加了对 SSW 期间传播行星波增强机制的认识. 目前, MLT 区域的传播行星波在 SSW 期间的激发机制主要有以下三种:

### (1) 局地不稳定性激发并上传

基于“子午工程”漠河站流星雷达的观测数据, Ma 等 (2020b) 发现 2019 年 1 月 SSW 期间有准 4 天波的异常增强. 通过进一步研究发现, 流星雷达观测到的准 4 天波实际上是源于中间层较低高度上准 4 天波的增强并向上传播到了 MLT 区域. 如图 6 所示, 再分析数据和流星雷达数据中准 4 天波振幅和相位的拟合结果反映了波动在中间层激发并上传的特征. Ma 等 (2020b) 进一步推测, SSW 期间剧烈的温度和风场变化导致的局地大气不稳定性是中间层较低高度上准 4 天波增强的主要原因. Yu 等 (2022) 利用“子午工程”流星雷达并结合探空气球数据报道了东向传播的准 6 天波在 2016 年两次 SSW 期间的增强. 他们认为较低高度上的大气局地不稳定性是 SSW 期间东向准 6 天波增强的主要机制. 实际上, 现有研究认为能够激发行星波的大气局地不稳定性主要来源于 SSW 期间温度和风场的剧烈变化, 但目前的研究尚不能具体地解释这种变化与中高层大气行星波激发之间的一一对应关系.

### (2) 跨纬度、跨半球的传播

在较低纬度上, 局地的不稳定性并不能很好地解释 SSW 期间观测到的传播行星波的增强. 这是因为局地大气不稳定性要求局地的温度和风场有较为剧烈的变化, 而 SSW 期间这种现象在较高纬度比较常见, 在较低纬度却并不多见. Luo 等 (2021) 认为 2018 年 SSW 期间“子午工程”流星雷达链观测到的准 10 天波增强的机制是行星波能量在经向环流 (南向) 的作用下由极区向低纬传播. Yin 等 (2023) 利用“子午工程”多台流星雷达的观测结果并结合卫星数据, 发现 SSW 期间较低纬度上的准 10 天波增强的主要机制是行星波能量赤道向的传播. 行星波能量跨纬度的传播甚至可以演化成跨半球的传播, 如图 7 所示, 在 2019 年 9 月南半球

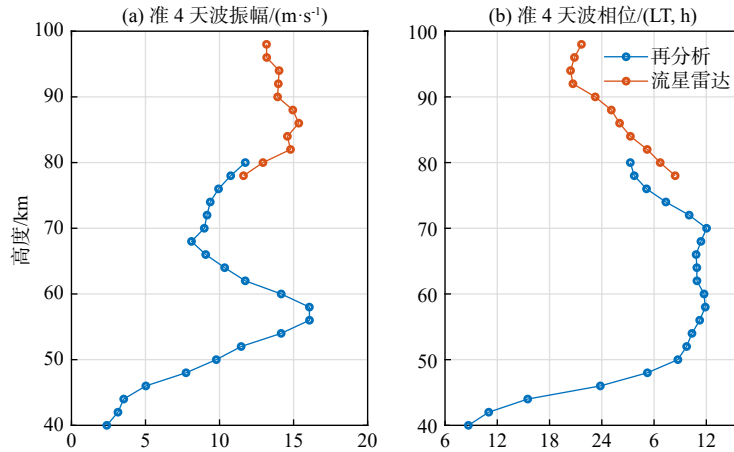


图 6 2018/2019 年冬季 SSW 期间漠河站上空经向风中准 4 天波的振幅 (a) 和相位 (b), 蓝色线为 MERRA2 再分析数据拟合结果, 红色线为流星雷达观测数据拟合结果 (修改自 Ma et al., 2020b)

Fig. 6 The amplitude (a) and phase (b) variations of the quasi-4-day wave in the meridional winds during the 2018/2019 SSW over Mohe. Fitting results derived from MERRA2 reanalysis data and meteor radar winds are presented with blue and red lines, respectively (modified from Ma et al., 2020b)

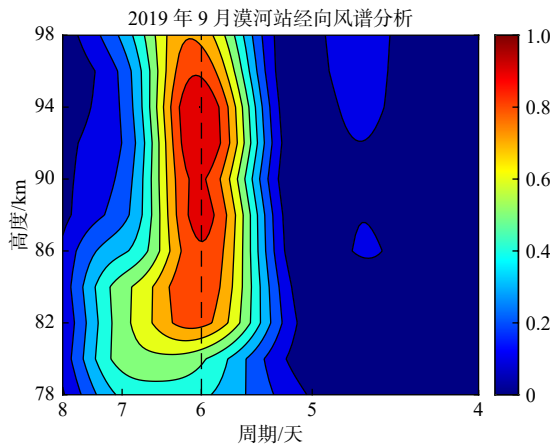


图 7 2019 年 9 月南半球 SSW 期间漠河站流星雷达经向风观测数据的归一化 LS 谱分析结果, 这次观测到的 6 天波振幅远大于其季节性变化, 这是一次对 SSW 事件的跨半球响应

Fig. 7 Normalized LS periodogram of the meridional winds over Mohe during the Antarctic SSW in September 2019. The amplitude of the observed quasi-6-day wave is significantly larger than the climatological level, which is an interhemispheric response to the SSW

SSW 发生期间北半球中纬的漠河站流星雷达经向风中也观测到了远超季节性的准 6 天波动, Ma 等 (2022a) 利用卫星观测数据和再分析资料证实了这次全球范围内的准 6 天波的异常增强是行星波能量跨半球传播的结果, 他们的研究结果同时表明, 无论是由 SSW 所激发的行星波还是由季节性增强导致的行星波活动, 均可在经向环流的作用下产生跨纬度、跨半球的传播。

### (3) 波波非线性相互作用

除了局地不稳定性及跨纬度传播两种激发机制,

近年来一些研究也将 SSW 期间中间层异常增强的传播行星波归结为特定周期的传播行星波与静态行星波非线性相互作用的结果. 这些研究认为 SSW 期间增强的传播行星波的频率与波数满足波与波相互作用的理论关系. 例如, He 和 Forbes (2022) 利用我国漠河站流星雷达和德国朱利叶斯鲁站流星雷达, 首次观测到了 2019 年北半球 SSW 期间罗斯比波的二次谐波产生现象. Xiong 等 (2018) 基于海南流星雷达和卫星的观测数据报道了 2017 年 1 月 SSW 期间西向传播波数为 1 的准 2 天波的产生机制: 由静态行星波波 2 与西向传播波数为 3 的准两天波的相互作用所产生. 类似地, Wang 等 (2021) 发现 2019 年南半球 SSW 发生期间西向波数为 1 的准 10 天波的增强可能是东向波数为 1 的准 10 天波与静态行星波相互作用的结果. 类似的激发机制也常被用于解释 SSW 期间中间层和热层的潮汐波异常增强现象 (Gong et al., 2018b, 2021; He et al., 2020a, 2020b).

实际上, 大气背景风场状态是影响行星波传播的重要因素之一. SSW 期间背景风场的变化也会改变行星波的传播条件, 进而可以调制 SSW 期间传播行星波的状态. 例如, Luo 等 (2021) 认为 SSW 期间局地背景风场的变化能够调制准 10 天波的上传, 进而导致观测到的准 10 天波活动展现出明显的纬度差异. Ma 等 (2022b) 基于 2020 年强极涡事件期间“子午工程”漠河站的观测数据, 率先揭示了平流层极涡强度对 SSW 期间 MLT 区域准 10 天波活动的调制作用. 他们发现冬季或春季 SSW 发生

后漠河站 MLT 区域的纬向风中总有准 10 天波活动的增强, 但 2020 年 2 月的 SSW 次增温事件发生后漠河站纬向风中的准 10 天波振幅很弱. 通过深入分析发现 2020 年冬季的强极涡对 2020 年 2 月 SSW 发生后漠河站较低高度上准 10 天波的激发和上传产生了抑制作用. Qin 等 (2022) 发现, SSW 期间的行星波能否发生跨半球传播也受到赤道地区的风场调制, 在准两年振荡东向相位年间, 北半球春季的准 10 天波更容易传播至南半球. 这些研究均表明 SSW 期间中高层大气背景风场的改变不仅可以影响行星波的激发, 还能进一步调制行星波的传播. 这种传播条件的改变可能也是 SSW 期间行星波活动特征存在差异的原因之一. 除了上述激发机制和调制因素外, 行星波本身的季节性活动规律也是 SSW 期间中高层大气行星波机制研究中所必须考虑的因素. 例如, 北半球准 2 天波在 1 月下旬的季节性增强可能与 SSW 的发生关联不大, 而一些远超季节性的行星波增强现象虽然证实了 SSW 的贡献确实存在, 但也要注意其中行星波本身的季节性变化也存在不可忽略的贡献.

特别需要指出的是, 现有流星雷达所观测到 SSW 期间增强的行星波是由静态行星波和传播行星波两种波动叠加作用后的结果, 当同一纬圈上的监测台站数量不足时, 则无法区分和量化两种行星波的贡献. 因此, 利用流星雷达得到行星波随时间和高度的变化后, 还需要结合卫星或再分析数据来进一步分析其对应的波数. SSW 期间静态行星波的增强是一种常态现象, 但是 Wu 等 (1995) 提出的用于卫星或再分析数据提取传播行星波的方法——最小二乘拟合法并未考虑到静态行星波的剧烈变化给传播行星波的拟合带来的影响, 这可能会导致利用最小二乘拟合法从卫星或再分析资料中所提取的传播行星波被污染. Ma 等 (2022c) 对该问题进行了详细的仿真论证, 并提出了一种新的拟合方法. 他们通过抑制静态行星波在 SSW 期间的剧烈变化来改进传统的最小二乘拟合法, 从而得到更接近真实情况的行星波振幅和波数, 如图 8 所示. Ma 等 (2022c) 所提出的新的拟合方法发现: 由于未考虑 SSW 期间静态行星波的剧烈变化, 以前报道的 SSW 期间西向传播的行星波振幅可能被过高估计, 而东向传播的行星波振幅可能被低估. 有效消除静态行星波的影响, 将有助于进一步分析传播行星波波数与极涡类型之间的内在联系, 从而更好地理解 SSW 期间中高层大气行星波的活动规律.

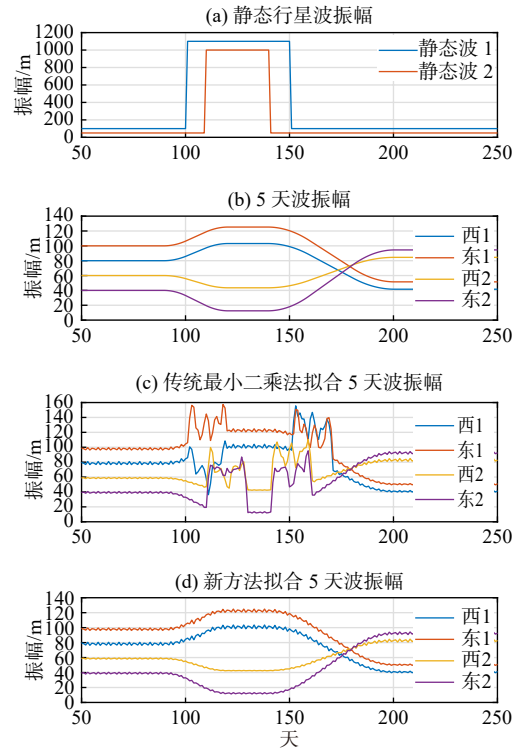


图 8 准 5 天波拟合的新方法仿真结果. 仿真所使用的输入数据由 6 个分量合成: 分别包括: (a) 静态行星波 1 和波 2 的变化以及 (b) 中东西向纬向波数为 1 和纬向波数为 2 的准 5 天振荡的变化. (c) 和 (d) 分别展示了基于传统最小二乘拟合法和新的拟合方法所提取的准 5 天振荡振幅的变化 (修改自 Ma et al., 2022c)

Fig. 8 Simulations of the new fitting method based on synthetic data, including (a) stationary planetary waves 1 and 2 and (b) westward and eastward Q5DOs with zonal wavenumbers of 1 and 2. (c) and (d) Daily amplitudes of the fitted Q5DOs obtained from the original least-square and new fitting methods (modified from Ma et al., 2022c)

### 3 展 望

随着国家重大科技基础设施建设项目“子午工程”二期十台流星雷达的建成, 如图 9 所示, 以及国内外多个流星雷达设备监测台站的持续部署, 流星雷达组网观测将成为追踪中高层大气波动产生、传播以及耗散全过程的有效手段, SSW 期间中高层大气波动异常变化的物理机制可以从以下两个方面进行深入的研究:

(1) 深入揭示和完善 SSW 期间中高层大气行星波的激发机理

虽然现有研究在一定程度上对 SSW 期间中高层大气行星波的异常变化给出了合理解释, 但对 SSW 期间中高层大气行星波激发机制的研究还不够深入. 例如, 未来需要更多的观测资料并结合数



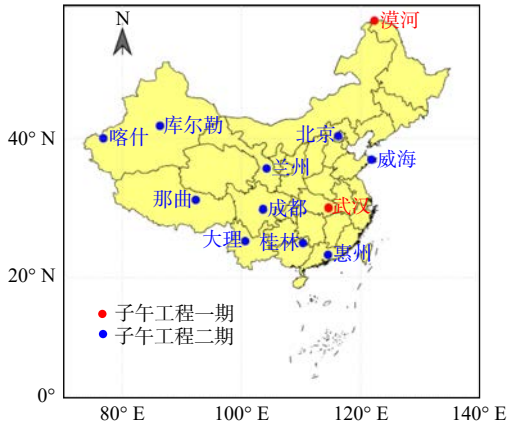


图9 “子午工程”流星雷达监测网

Fig. 9 The meteor radar network of the Chinese Meridian Project

值模式来厘清不同波模的行星波在 SSW 期间的激发机制. 此外, 跨圈层、跨纬度的耦合过程还不清晰, 未来需要深入探究对流层波动、平流层极涡、低纬度地区的大尺度波动 (如准两年振荡、厄尔尼诺南方涛动) 等因素对 SSW 以及中高层大气行星波的调制作用. 鉴于现有静态行星波的拟合办法忽略了传播行星波的贡献 (拟合所得结果实际上是两种行星波的叠加效应), 未来关于静态行星波与传播行星波相互作用的理论机制还需要进一步完善.

(2) 推进潮汐波和重力波等其他波动在 SSW 期间的变化过程研究

除了周期以天为单位的行星波, 流星雷达观测数据还可以用于研究周期以小时为单位变化的重力波以及部分以分钟为单位变化的重力波. “子午工程”流星雷达也观测到一些太阳潮汐波在 SSW 期间的异常变化 (Gong et al., 2021; Li et al., 2020), 此外, 由月亮引起的太阳潮汐波在 SSW 期间的变化也被“子午工程”流星雷达链捕捉到 (Luo et al., 2022). 近年来, SSW 期间潮汐波的变化在热层和电离层的观测证据也被陆续报道 (Zhang et al., 2020; 张雯敏等, 2022). 目前的研究认为波波非线性相互作用是 SSW 期间高阶潮汐波 (如 6 小时潮汐波) 的主要激发方式 (Gong et al., 2018b; He et al., 2020a, 2020b). 流星雷达台站的广泛部署, 将为 MLT 区域中潮汐波的传播和演化过程提供更为丰富的观测资料, 并有助于揭示 SSW 期间电离层中潮汐波的激发过程. 同时, 随着流星雷达台站更加密集的布设以及多基站流星雷达的部署, 研究者们可以获得更多的高时空分辨率的二维风场信息, 这有助于追踪大气重力波在 SSW 期间的活动规律 (Gong S H et al., 2019; Jia et al., 2018; Wu et al.,

2022; Zhou et al., 2022b). 由于潮汐波和重力波也可能与 SSW 期间的行星波发生相互作用, 因此对于 SSW 期间潮汐波和重力波的进一步研究也将有助于完整地揭示 SSW 期间中高层大气波动的变化特征.

## 致谢

感谢国家“子午工程”和中国科学院地质与地球物理研究所提供的流星雷达观测数据, 同时感谢美国国家航空航天局提供的再分析数据.

## References

- Baldwin M P, Ayarzagüena B, Birner T, et al. 2021. Sudden stratospheric warmings[J]. *Review of Geophysics*, 58: e2020RG000708.
- Butler A H, Sjoberg J P, Seidel D J, et al. 2017. A sudden stratospheric warming compendium[J]. *Earth System Science Data*, 9: 63-76.
- Charlton A J, Polvani L M. 2007. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks[J]. *Journal of Climate*, 20: 449-469.
- Chau J L, Urco J M, Vierinen J, et al. 2021. Multistatic specular meteor radar network in Peru: System description and initial results[J]. *Earth and Space Science*, 8: e2020EA001293.
- Chen G, Li Y, Zhang S, et al. 2020. Multi-Instrument observations of the atmospheric and ionospheric response to the 2013 sudden stratospheric warming over eastern Asia region[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(2): 1232-1243.
- Cheng H, Huang K, Liu A Z, et al. 2022. Wavenumbers 3 and 4 quasi-2-day wave activities observed by multiple meteor radars in the two hemispheres during austral summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127: e2022JA030501.
- Choi H, Kim B M, Choi W. 2019. Type classification of sudden stratospheric warming based on pre- and postwarming periods[J]. *Journal of Climate*, 32: 2349-2367.
- Dou X K, Xue X H, Li T, et al. 2010. Possible relations between meteors, enhanced electron density layers, and sporadic sodium layers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 115: A06311.
- Fan Y, Huang C M, Zhang S D, et al. 2022. Long-term study of quasi-16-day waves based on ERA5 reanalysis data and EOS MLS observations from 2005 to 2020[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127: e2021JA030030.
- Gong S H, Yang G T, Xu J Y, et al. 2019. Gravity wave propagation from the stratosphere into the mesosphere studied with lidar, meteor radar, and TIMED/SABER[J]. *Atmosphere*, 10: 81.
- Gong Y, Zhou Q, Zhang S. 2013. Atmospheric tides in the low-latitude E and F regions and their responses to a sudden stratospheric warming event in January 2010[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118: 7913-7927.
- Gong Y, Ma Z, Lv X, et al. 2018a. A study on the quarterdiurnal tide in the thermosphere at Arecibo during the February 2016 sudden stratospheric warming event[J]. *Geophysical Research Letters*, 45: 13142-13149.

- Gong Y, Li C, Ma Z, et al. 2018b. Study of the quasi-5-day wave in the MLT region by a meteor radar chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123: 9474-9487.
- Gong Y, Wang H, Ma Z, et al. 2019. A statistical analysis of the propagating quasi 16-day waves at high latitudes and their response to sudden stratospheric warmings from 2005 to 2018[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124: 12617-12630.
- Gong Y, Ma Z, Li C, et al. 2020. Characteristics of the quasi-16-day wave in the mesosphere and lower thermosphere region as revealed by meteor radar, Aura satellite, and MERRA2 reanalysis data from 2008 to 2017[J]. *Earth and Planetary Physics*, 4(3): 274-284.
- Gong Y, Xue J, Ma Z, et al. 2021. Strong quarterdiurnal tides in the mesosphere and lower thermosphere during the 2019 Arctic sudden stratospheric warming over Mohe, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126: e2020JA029066.
- Gong Y, Xue J, Ma Z, et al. 2022. Observations of a strong intraseasonal oscillation in the MLT region during the 2015/2016 winter over Mohe, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127: e2021JA030076.
- Gu S Y, Qi J, Zhou C, et al. 2020. Tidal variations in the ionosphere and mesosphere over eastern China during 2014[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125: e2019JA027526.
- Harvey V L, Pierce R B, Hitchman M H. 2002. A climatology of stratospheric polar vortices and anticyclones[J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(D20): 4442.
- He M, Chau J L, Stober G, et al. 2018. Relations between semidiurnal tidal variants through diagnosing the zonal wavenumber using a phase differencing technique based on two ground-based detectors[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123: 4015-4026.
- He M, Chau J L. 2019. Mesospheric semidiurnal tides and near-12 h waves through jointly analyzing observations of five specular meteor radars from three longitudinal sectors at boreal midlatitudes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19: 5993-6006.
- He M, Forbes J M, Chau J L, et al. 2020a. High-order solar migrating tides quench at SSW onsets[J]. *Geophysical Research Letters*, 47: e2019GL086778.
- He M, Chau J L, Forbes J M, et al. 2020b. Quasi-10-day wave and semidiurnal tide nonlinear interactions during the Southern Hemispheric SSW 2019 observed in the Northern Hemispheric mesosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 47: e2020GL091453.
- He M, Forbes J M, Li G, et al. 2021a. Mesospheric Q2DW interactions with four migrating tides at 53°N latitude: Zonal wavenumber identification through dual-station approaches[J]. *Geophysical Research Letters*, 48: e2020GL092237.
- He M, Chau J L, Forbes J M, et al. 2021b. Quasi-2-day wave in low-latitude atmospheric winds as viewed from the ground and space during January-March, 2020[J]. *Geophysical Research Letters*, 48: e2021GL093466.
- He M, Forbes J M. 2022. Rossby wave second harmonic generation observed in the middle atmosphere[J]. *Nature Communications*, 13: 7544.
- Huang K M, Xi Y, Wang R, et al. 2019. Signature of a quasi 30-day oscillation at midlatitude based on wind observations from MST radar and meteor radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124: 11266-11280.
- Huang X S, Huang K M, Zhang S D, et al. 2022. Extraordinary quasi-16-day wave activity from October 2013 to January 2014 with radar observations at mid-latitudes and MERRA2 reanalysis data[J]. *Earth, Planets and Space*, 74: 98.
- Jia M, Xue X, Gu S, et al. 2018. Multiyear observations of gravity wave momentum fluxes in the midlatitude mesosphere and lower thermosphere region by meteor radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123: 5684-5703.
- Jin H, Miyoshi Y, Pancheva D, et al. 2012. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117: A10323.
- King A D, Butler A H, Jucker M, et al. 2019. Observed relationships between sudden stratospheric warmings and European climate extremes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(24): 13943-13961.
- Laskar F I, McCormack J P, Chau J L, et al. 2019. Interhemispheric meridional circulation during sudden stratospheric warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124: 7112-7122.
- Li G, Ning B, Hu L, et al. 2012. A comparison of lower thermospheric winds derived from range spread and specular meteor trail echoes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117: A03310.
- Li G Z, Ning B Q, Li A, et al. 2018. First results of optical meteor and meteor trail irregularity from simultaneous Sanya radar and video observations[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2: 15-21.
- Li G, Xie H, Wang Y, et al. 2022. Design of meteor and ionospheric irregularity observation system and first results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127: e2022JA030380.
- Li N, Luan X, Lei J, et al. 2020. Variations of mesospheric neutral winds and tides observed by a meteor radar chain over China during the 2013 sudden stratospheric warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125: e2019JA027443.
- Li Y, Li G, Hu L, et al. 2022. Observations of the October Draconid outburst at different latitudes along 120°E[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516: 5538-5543.
- Liu H L, Talaat E R, Roble R G, et al. 2004. The 6.5-day wave and its seasonal variability in the middle and upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 109: D21112.
- Liu L, Liu H, Chen Y, et al. 2017a. Variations of the meteor echo heights at Beijing and Mohe, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122: 1117-1127.
- Liu L, Liu H, Le H, et al. 2017b. Mesospheric temperatures estimated from the meteor radar observations at Mohe, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122: 2249-2259.
- Luo J, Gong Y, Ma Z, et al. 2021. Study of the quasi 10-day waves in the MLT region during the 2018 February SSW by a meteor radar chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126: e2020JA028367.
- Luo J, Gong Y, Ma Z, et al. 2022. Long-term variation of lunar semidi-

- urnal tides in the MLT region revealed by a meteor radar chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127: e2022JA030616.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S, et al. 2017. Responses of quasi 2 day waves in the MLT region to the 2013 SSW revealed by a meteor radar chain[J]. *Geophysical Research Letters*, 44: 9142-9150.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S, et al. 2018. Study of mean wind variations and gravity wave forcing via a meteor radar chain and comparison with HWM-07 results[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123: 9488-9501.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S D, et al. 2020a. Comparison of stratospheric evolution during the major sudden stratospheric warming events in 2018 and 2019[J]. *Earth and Planetary Physics*, 4(5): 493-503.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S, et al. 2020b. Study of a quasi 4-day oscillation during the 2018/2019 SSW over Mohe, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125: e2019JA027687.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S, et al. 2021. Study of a quasi-27-day wave in the MLT region during recurrent geomagnetic storms in autumn 2018[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126: e2020JA028865.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S, et al. 2022a. Understanding the excitation of quasi-6-day waves in both hemispheres during the September 2019 Antarctic SSW[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127: e2021JD035984.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S, et al. 2022b. First observational evidence for the role of polar vortex strength in modulating the activity of planetary waves in the MLT region[J]. *Geophysical Research Letters*, 49: e2021GL096548.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S, et al. 2022c. A new methodology for measuring traveling quasi-5-day oscillations during sudden stratospheric warming events based on satellite observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22: 13725-13737.
- Manney G L, Butler A H, Lawrence Z D, et al. 2022. What's in a name? On the use and significance of the term "polar vortex"[J]. *Geophysical Research Letters*, 49: e2021GL097617.
- Poblet F L, Chau J L, Conte J F, et al. 2022. Horizontal wavenumber spectra of vertical vorticity and horizontal divergence of meso-scale dynamics in the mesosphere and lower thermosphere using multistatic specular meteor radar observations[J]. *Earth and Space Science*, 9: e2021EA002201.
- Qin Y, Gu S Y, Dou X, et al. 2022. Southern hemisphere response to the secondary planetary waves generated during the arctic sudden stratospheric final warmings: Influence of the quasi-biennial oscillation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127: e2022JD037730.
- Stober G, Chau J L, Vierinen J, et al. 2018. Retrieving horizontally resolved wind fields using multi-static meteor radar observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11: 4891-4907.
- Stray N H, Orsolini Y J, Espy P J, et al. 2015. Observations of planetary waves in the mesosphere-lower thermosphere during stratospheric warming events[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15: 4997-5005.
- Tang Q, Zhou C, Liu Y, et al. 2020. Response of sporadic E layer to sudden stratospheric warming events observed at low and middle latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125: e2019JA027283.
- Tang Q, Zhou Y, Du Z, et al. 2021a. A comparison of meteor radar observation over China region with Horizontal Wind Model (HWM14)[J]. *Atmosphere*, 12: 98.
- Tang Q, Zhou C, Liu H, et al. 2021b. The possible role of turbopause on sporadic-E layer formation at middle and low latitudes[J]. *Space Weather*, 19: e2021SW002883.
- Tang W T, Zhang S D, Huang C M, et al. 2021. Latitudinal- and height-dependent long-term climatology of propagating quasi-16-day waves in the troposphere and stratosphere[J]. *Earth, Planets and Space*, 73: 210.
- Wan W X, Xu J Y. 2014. Recent investigation on the coupling between the ionosphere and upper atmosphere[J]. *Science China Earth Sciences*, 57(9): 1995-2012.
- Wang J C, Palo S E, Forbes J M, et al. 2021. Unusual quasi 10-day planetary wave activity and the ionospheric response during the 2019 southern hemisphere sudden stratospheric warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(6): e2021JA029286.
- Wang J Y, Yi W, Chen T D, et al. 2020. Quasi-6-day waves in the mesosphere and lower thermosphere region and their possible coupling with the QBO and solar 27-day rotation[J]. *Earth and Planetary Physics*, 4(3): 285-295.
- Wang Y, Li G, Ning B, et al. 2019. All-sky interferometric meteor radar observations of zonal structure and drifts of low-latitude ionospheric E region irregularities[J]. *Earth and Space Science*, 6: 2653-5662.
- Waugh D W, Sobel A, Polvani L M. 2017. What is the polar vortex and how does it influence weather?[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98: 37-44.
- Wu D L, Hays P B, Skinner W R. 1995. A least squares method for spectral-analysis of space-time series[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52: 3501-3511.
- Wu Y Y, Tang Q, Chen Z, et al. 2022. Diurnal and seasonal variation of high-frequency gravity waves at Mohe and Wuhan[J]. *Atmosphere*, 13: 1069.
- Xie H Y, Li G Z, Ning B Q, et al. 2019. The possibility of using all-sky meteor radar to observe ionospheric E-region field-aligned irregularities[J]. *Science China: Technological Sciences*, 62(8): 1431-1437.
- Xiong J, Wan W, Ding F, et al. 2013. Coupling between mesosphere and ionosphere over Beijing through semidiurnal tides during the 2009 sudden stratospheric warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118: 2511-2521.
- Xiong J, Wan W, Ding F, et al. 2018. Two day wave traveling westward with wave number 1 during the sudden stratospheric warming in January 2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123: 3005-3013.
- Yamazaki Y, Matthias V. 2019. Large-amplitude quasi-10-day waves in the middle atmosphere during final warmings[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(17-18): 9874-9892.
- Yamazaki Y, Matthias V, Miyoshi Y. 2021. Quasi-4-day wave: Atmospheric manifestation of the first symmetric Rossby normal mode

- of zonal wavenumber 2[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126: e2021JD034855.
- Yao X, Yu T, Zhao B, et al. 2015. Climatological modeling of horizontal winds in the mesosphere and lower thermosphere over a mid-latitude station in China[J]. *Advances in Space Research*, 56: 1354-1365.
- Yi W, Reid I M, Xue X, et al. 2018. High- and middle-latitude neutral mesospheric density response to geomagnetic storms[J]. *Geophysical Research Letters*, 45: 436-444.
- Yi W, Xue X, Reid I M, et al. 2019. Climatology of the mesopause relative density using a global distribution of meteor radars[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19: 7567-7581.
- Yi W, Xue X, Reid I M, et al. 2021. Climatology of interhemispheric mesopause temperatures using the high-latitude and middle-latitude meteor radars[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126: e2020JD034301.
- Yin S, Ma Z, Gong Y, et al. 2023. Response of quasi-10-day waves in the MLT region to the sudden stratospheric warming in March 2020[J]. *Advances in Space Research*, 71: 298-305.
- Younger J P, Reid I M, Li G, et al. 2015. Observations of the new Camelopardalids meteor shower using a 38.9 MHz radar at Mohe, China[J]. *Icarus*, 253: 25-30.
- Yu F R, Huang K M, Zhang S D, et al. 2019. Quasi 10- and 16-day wave activities observed through meteor radar and MST radar during stratospheric final warming in 2015 spring[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124: 6040-6056.
- Yu F R, Huang K M, Zhang S D, et al. 2022. Observations of eastward propagating quasi 6-day waves from the troposphere to the lower thermosphere during SSWs in early 2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127: e2021JD036017.
- Yu T, Xia C, Zuo X, et al. 2016. A comparison of mesospheric and low-thermospheric winds measured by Fabry-Perot interferometer and meteor radar over central China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121: 10037-10051.
- Yu T, Zuo X, Xia C, et al. 2017. Peak height of OH airglow derived from simultaneous observations a Fabry-Perot interferometer and a meteor radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122: 4628-4637.
- Yu Y, Wan W, Ning B, et al. 2013. Tidal wind mapping from observations of a meteor radar chain in December 2011[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118: 2321-2332.
- Yu Y, Wan W, Ren Z, et al. 2015. Seasonal variations of MLT tides revealed by a meteor radar chain based on Hough mode decomposition[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120: 7030-7048.
- Yu Y, Wan W, Reid I M, et al. 2017. Global tidal mapping from observations of a radar campaign[J]. *Advances in Space Research*, 60: 130-143.
- Zhang R L, Liu L, Liu H, et al. 2020. Interhemispheric transport of the ionospheric F region plasma during the 2009 sudden stratosphere warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 47: e2020GL087078.
- Zhang W M, Ma Z, Gong Y, et al. 2022. Response of ionospheric terdiurnal tides to the 2018 SSW over Beijing[J]. *Chineses Journal of Geophysics*, 65(6): 1921-1930 (in Chinese).
- Zhou B Z, Xue X H, Yi W, et al. 2022. A comparison of MLT wind between meteor radar chain data and SD-WACCM results[J]. *Earth and Planetary Physics*, 6(5): 451-464.
- Zhou X, Wan W, Yu Y, et al. 2018. New approach to estimate tidal climatology from ground and space-based observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123: 5087-5101.
- Zhou X, Yue X, Yu Y, et al. 2022a. Day-to-day variability of the MLT DE3 using joint analysis on observations from TIDI-TIMED and a meteor radar meridian chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127: e2021JD035794.
- Zhou X, Yue X, Liu L, et al. 2022b. Decadal continuous meteor-radar estimation of the mesopause gravity wave momentum fluxes over Mohe: Capability evaluation and interannual variation[J]. *Remote Sensing*, 14: 5729.

## 附中文参考文献

- 张雯敏, 马铮, 龚韵, 等. 2022. 北京上空电离层 8 小时潮汐波对 2018 年 SSW 的响应研究[J]. *地球物理学报*, 65(6): 1921-1930.

陈志青, 刘子谦, 冯健, 胡连欢, 燕春晓, 袁韦, 吴学森, 郑兵, 周小俊. 2024. 子午工程二期流星雷达样机测试及数据对比分析. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 120-130. doi: [10.19975/j.dqyxx.2023-006](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-006).

Chen Z Q, Liu Z Q, Feng J, Hu L H, Yan C X, Yuan W, Wu X S, Zheng B, Zhou X J. 2024. Meteor radar prototype testing and data quality comparison analysis for Phase II of Chinese Meridian Project. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 120-130 (in Chinese). doi:[10.19975/j.dqyxx.2023-006](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-006).

## 子午工程二期流星雷达样机测试及数据对比分析

陈志青<sup>1,2</sup>, 刘子谦<sup>1,2\*</sup>, 冯健<sup>3</sup>, 胡连欢<sup>4</sup>, 燕春晓<sup>1,2</sup>,  
袁韦<sup>1,2</sup>, 吴学森<sup>3</sup>, 郑兵<sup>1,5</sup>, 周小俊<sup>1,5</sup>

1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3 中国电子科技集团公司第二十二研究所, 青岛 266107

4 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

5 海南空间天气国家野外科学观测研究站, 儋州 571700

**摘要:** 子午工程二期将在分布于全国的 10 个观测站点建设流星雷达. 为了带动国内空间环境地基观测技术的发展, 工程建设项目指挥部布局了流星雷达的国产化专项行动. 为了确保建成后的设备满足使用要求, 工程总体组织了设备样机测试, 包括设备的技术指标测试和数据质量评估. 技术指标测试表明其满足要求. 在获得数据之后, 以 EMDR 流星雷达数据为参考, 对样机的数据进行质量评估. 主要对比参数包括有效流星计数、流星数时空分布、扩散系数高度分布、风场随高度的分布和随时间的变化等. 本文主要展示了数据质量评估的结果, 揭示了流星雷达观测的一些基本特征和规律, 为数据准确性的评估提供参考和借鉴.

**关键词:** 子午工程; 流星雷达; 样机测试; 数据质量

doi: [10.19975/j.dqyxx.2023-006](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-006)

中图分类号: P352

文献标识码: A

## Meteor radar prototype testing and data quality comparison analysis for Phase II of Chinese Meridian Project

Chen Zhiqing<sup>1,2</sup>, Liu Zi-Qian<sup>1,2\*</sup>, Feng Jian<sup>3</sup>, Hu Lianhuan<sup>4</sup>, Yan Chunxiao<sup>1,2</sup>,  
Yuan Wei<sup>1,2</sup>, Wu Xuesen<sup>3</sup>, Zheng Bing<sup>1,5</sup>, Zhou Xiaojun<sup>1,5</sup>

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 State Key Laboratory of Space Weather, Beijing 100190, China

3 China Electronics Technology Group Corporation 22th Research Institute, Qingdao 266107, China

4 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

5 Hainan National Space Weather Observation and Research Station, Danzhou 571700, China

**Abstract:** The Phase II of Chinese Meridian Project will deploy 10 meteor radar systems in China. To promote the advancement of domestic ground-based observation technologies, the project managing headquarters are engaged in a special campaign for the localization of meteor radar production. To ensure that the domestically manufactured product meets the requirements, prototype testing was carried out, including a technique indicator test and

收稿日期: 2023-02-18; 录用日期: 2023-04-20

基金项目: 子午工程二期标准规范建设

Supported by the Construction of Standard Specification for Phase II of Chinese Meridian Project

第一作者: 陈志青 (1978-), 男, 副研究员, 主要从事空间环境地基探测技术研究和工程管理. E-mail:

zhiqing@nssc.ac.cn

\*通信作者: 刘子谦 (1984-), 男, 高级工程师, 主要从事磁层物理和空间天气的研究. E-mail: liuziqian@nssc.ac.cn



data quality evaluation. According to the results of the field technique indicator test, the prototype fully met the requirements. Further, the data quality was evaluated using the EMDR meteor radar data as a reference. The main comparison parameters included valid meteor count, space-time distribution of meteor number, height distribution of diffusion coefficient, and distribution of wind field at varying height and time. This study mainly explains data quality evaluation results, revealing some basic characteristics and laws of meteor radar observation, in an attempt to testify the capability of the prototype and provide a reference for future meteor radar data quality evaluation.

**Keywords:** Chinese Meridian Project; meteor radar; prototype testing; data quality

## 0 引言

科学观测数据必须具备良好的质量, 特别是准确性, 才能有效地支撑科学研究和业务应用. 高质量的观测数据往往能展现更多的时空细节和特征, 更接近观测对象的实际状态. 在观测设备的研制过程中所采取的各种定标、标定方法都是为了确保观测数据的准确性. 然而, 对于依赖于遥感的空间环境地基观测, 因不能在实验室中模拟观测对象, 一般难以对观测设备进行全面的标定.

流星雷达采用遥感的方式, 对中高层大气中的风场等参量进行观测 (Roper, 1975; Valentic et al., 1996). 对流星雷达的实验室或者现场标定仅限于针对收发信号的幅度、相位, 并不能对风场、扩散系数等物理参量进行标定, 也难以对数据的准确性进行评价. 这类观测设备的某个新型号往往需要经历比较长时间的实际应用, 数据的准确性才会得到普遍认可.

空间环境地基综合监测网 (子午工程二期) (Wang, 2010; Wang et al., 2020) 将在分布于全国的 10 个观测站点建设流星雷达 (表 1 所示), 以

表 1 子午工程流星雷达站点分布

Table 1 Distribution of meteor radar stations in the Meridian Project

站点	经度	纬度	备注
蒲江站	103.62°E	30.31°N	二期站点
昌平十三陵站	116.18°E	40.29°N	二期站点
桂林叠彩站	110.34°E	25.34°N	二期站点
博罗站	114.48°E	23.49°N	二期站点
威海文登站	121.79°E	37.18°N	二期站点
宾川站	100.61°E	25.63°N	二期站点
那曲色尼站	92.25°E	31.62°N	二期站点
榆中站	104.22°E	35.98°N	二期站点
伽师站	76.78°E	39.56°N	二期站点
库尔勒站	86.32°E	41.62°N	二期站点
漠河站	122.34°E	53.48°N	一期站点, 进口设备
黄陂站	114.45°E	31.01°N	一期站点, 进口设备

实现对我国区域中高层大气风场的大中尺度的连续监测. 这对研究中间层和热层中的动力学过程, 对我国区域的中高层大气建模具有重要意义.

作为我国在空间天气领域唯一的国家重大科技基础设施, 带动国内空间环境地基观测技术的发展是子午工程的重要使命. 工程建设项目指挥部非常重视观测设备的国产替代, 布局了流星雷达的国产化专项行动. 为了确保建成后的设备满足使用要求, 工程总体组织了多厂家比测、样机测试等多个环节, 对设备的技术指标、数据质量进行了全面的测试和分析.

在样机测试过程中, 子午工程指挥部采用现有成熟型号 (澳大利亚 EMDR) (Rao et al., 2014) 与国产流星雷达样机 (以下称为样机) 同区域运行, 对两台设备的数据进行了多个方面的对比分析. 本文展示了数据对比分析的结果, 揭示了流星雷达观测的一些基本特征和规律, 为数据准确性的评估提供参考和借鉴.

## 1 设备简介和测试条件

### 1.1 流星雷达与发展基础

运行在星际空间的流星体在接近地球时被地球引力吸引, 以很高的速度 (约 11~72 km/s 之间) 穿越地球大气层 (刘学富, 2004). 与大气摩擦产生的热将流星体烧蚀, 形成沿运动路径分布的等离子体柱, 也就是流星余迹. 假定流星余迹随大气运动, 利用流星余迹对无线电波的散射即可对大气风场等参数进行测量. 大气风场测量流星雷达, 多采用全天空宽波束发射、多个接收天线干涉测量的方法测量流星的位置、多普勒速度, 进而反演大气风场等参量 (Younger, 2011).

1930 年代起国外就开展了流星的无线电探测研究 (Skellert, 1931), 流星雷达技术发展较为成熟. 在国内, 杨克俊 (1989) 于上世纪 80 年代提出

利用淘汰的短波信号发射机建设流星雷达, 并设计了雷达的关键参数. 2000 年后, 多家单位引进了澳大利亚生产的流星雷达. 同时, 武汉大学、中国电子科技集团公司第二十二研究所开展了国产流星雷达研制 (潘凌云, 2017) 和观测试验.

目前比较成熟的流星雷达型号有澳大利亚生产的 EMDR 和 SKiYMET (Hocking et al., 2001). 子午工程一期引进 EMDR 流星雷达, 安装于湖北黄陂、黑龙江漠河 2 个观测站点. EMDR 流星雷达采用正交八木天线向天空发射圆极化电波, 5 个接收天线可按 L 型、T 型或十字形配置接收阵列. 黄陂和漠河的 EMDR 流星雷达分别在 2010 年和 2012 年建成开始稳定运行至今, 观测数据支撑了大量的科学研究, 例如中高层大气的研究 (Yi et al., 2021)、中层顶-低热层流星雨及大气动力学变化性的研究 (Zhou et al., 2022a, 2022b)、低层大气调制中高层大气波动的研究 (Gong et al., 2022; Luo et al., 2022; Ma et al., 2022) 等, 数据质量已经得到了充分的验证.

### 1.2 样机与对标设备简介

本次测试的样机由中国电子科技集团公司第二十二研究所生产. 样机采用了单站全天空干涉测量技术体制, 其基本组成包括发射分系统、天线分系统、接收分系统、信号处理分系统. 发射分系统采用集中式固态发射机体制, 通过先合成功率再分路的方式实现了发射两路正交信号的一致性; 天线分系统中发射天线采用二单元交叉折合偶极子天线, 发射圆极化波, 接收天线为五根二单元交叉偶极子天线组成; 接收分系统采用多通道全数字接收机, 由激励源、接收通道与控制器组成, 主要负责产生雷达发射的激励信号, 并通过天线分系统接收散射回波; 信号处理分系统主要负责对接受分系统接收的回波完成信号数字化, 回波信号脉冲压缩与相干积累、流星信号提取与分析, 并控制与监控发射分系统. 样机还具备实时监控雷达的运行工作状态、雷达无人值守自动观测、远程控制、雷达数据存储与管理、雷达数据产品综合显示等功能 (图 1).

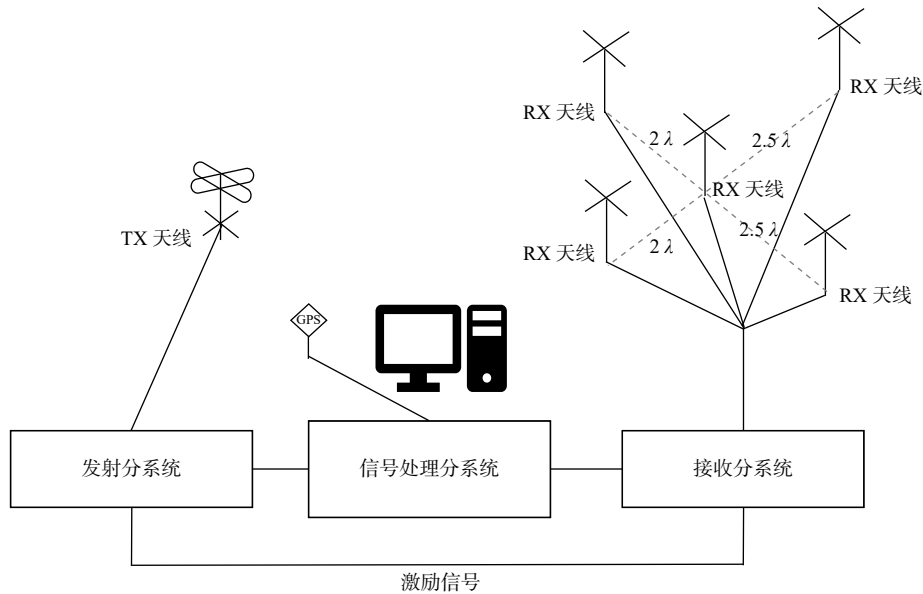


图 1 流星雷达样机系统组成示意图

Fig. 1 Composition diagram of the meteor radar prototype system

本次测试采用的对标设备为子午工程一期安装于湖北黄陂的 EMDR 流星雷达. 该设备与样机的总体方案和各项设计指标基本一致, 同样采用“十”字形接收天线布局. 两台设备的具体指标如表 2 所示.

### 1.3 测试条件

为了使得两台设备的观测结果具有可比性, 样

表 2 EMDR 流星雷达和样机的主要设计指标

Table 2 Main design indexes of EMDR meteor radar and the prototype

	EMDR	样机
工作频率	38.9 MHz	39.0 MHz
峰值功率	20 kW	24 kW
波束宽度 (3 dB)	70°	70°
接收机带宽	75 kHz	75 kHz
接收机灵敏度	-100 dBm	-100 dBm

机的测试场地应尽量靠近黄陂站 (31.01°N, 114.45°E), 考虑到场地面积、电磁环境等条件最终定在位于武汉市蔡甸区的易瓦特科技园内 (30.44°N, 114.06°E)。该场地与黄陂站相距约 70

km。采用 HWM14 模式 (Drob et al., 2015) 对风场进行模拟, 结果如图 2 所示。两地最大的差异为 1.68 m/s, 平均差异百分比为 3.12%, 可见其差异非常小, 不影响两台设备之间的对比分析。

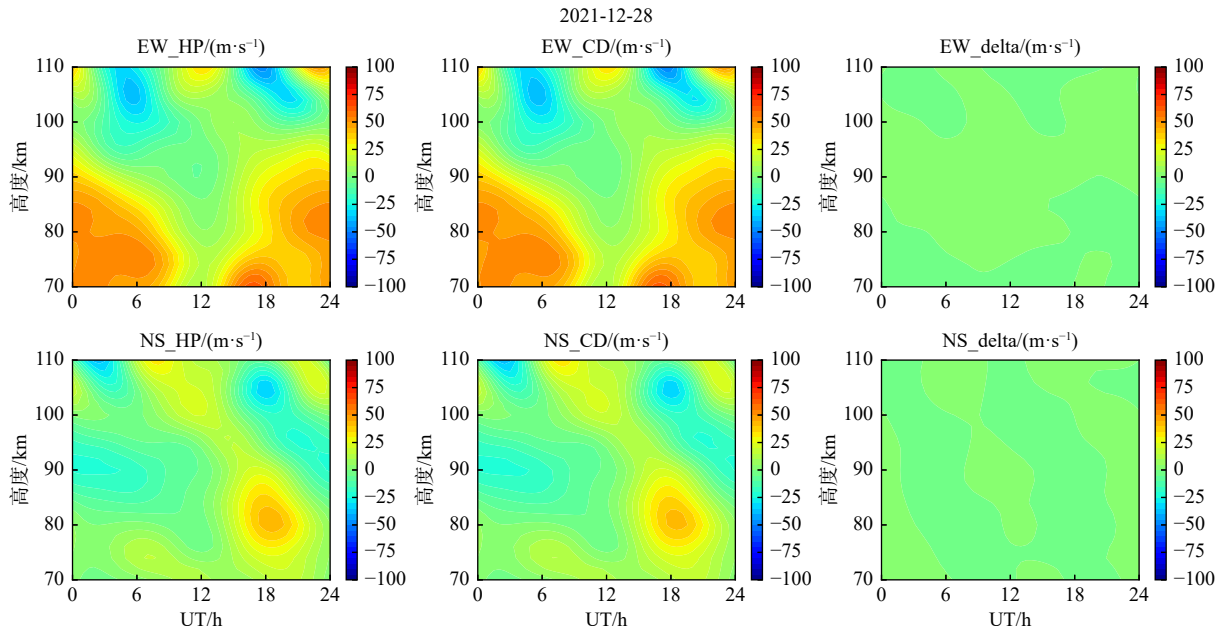


图 2 黄陂站和样机测试地点的风场模拟结果 (左: 黄陂, 中: 样机测试地点, 右: 二者之差)。EW: 风场东西分量; NS: 风场南北分量; HP: 黄陂; CD: 蔡甸; delta: 两者之差

Fig. 2 Wind field simulation results from the Huangpi station and prototype test site (left: Huangpi, middle: prototype test site, right: the difference between the two)

子午工程指挥部首先于 2021 年 12 月 23 日 (除特别说明, 本文和相关数据均采用世界时) 组织了样机的技术指标测试, 测试结果见第 2 节。然后, 2021 年 12 月 25 日至 2022 年 1 月 3 日, 样机连续观测 10 天 (测试期间停电 3 次: 12 月 25 日 6:28—7:50、12 月 31 日 9:00 至 1 月 1 日 9:00、1 月 2 日 18:00—24:00), 黄陂站 EMDR 流星雷达同时观测。两台设备采取基本相同的工作参数 (距离门: 2 km; 脉冲重复频率: 430 Hz; 脉冲波形: 高斯调制; 脉冲宽度: 16 km; 编码方式: 4 位互补码; 积累次数: 4 次; 风场高度范围: 70~110 km; 风场时间分辨: 1 小时)。

获得数据之后, 遵照事先制定的测试大纲, 总体技术组以 EMDR 流星雷达数据为参考, 对样机的数据进行质量评估。主要对比参数包括有效流星计数、流星数时空分布、扩散系数高度分布、风场随高度的分布和随时间的变化等。详细的对比结果见第 3 节。

## 2 技术指标测试结果

样机的现场技术指标测试针对工作频率 (频

谱)、峰值功率、驻波系数、幅度和相位一致性、接收灵敏度和动态范围、高度分辨率等 21 项技术指标。其中主要指标项 (共 7 项) 的测试结果如表 3 所示, 均满足预设的要求。

表 3 样机主要指标项的测试结果  
Table 3 Test results of the main prototype indicators

指标项	测试结果
工作频率(发射)	39 MHz, 带宽0.6 MHz
峰值功率	28.2 kW
接收机灵敏度	-117.9 dBm
接收机动态范围	75.9 dB
接收通道相位一致性	0.068°(补偿后)
接收通道幅度一致性	0.003 dB(补偿后)
发射驻波比	通道1:1.07; 通道2:1.13

因为流星雷达将与其他多类无线电监测设备同址安装运行, 为避免设备间的电磁干扰, 本次测试对发射机谐波抑制能力提出了很高的要求并进行了详细的测试。图 3 为采用频谱仪接发射端口以及样机正常工作期间采用手持式频谱仪测到的发射频谱。从图 3 (左) 可见, 离工作频率 1 MHz 处相对峰值的抑制比约为 55.79 dB, 离工作频率 4 MHz



处的抑制比约为 68.8 dB. 谐波被抑制, 在频谱中难以观察到, 对应 2 倍频和 3 倍频处的抑制比分别为 68.2 dB 和 68.36 dB. 可见样机的发射频谱表现良好. 在本文成稿之时, 基于本样机定型生产的流星雷达已经在子午工程二期的文登站与电离层数字测高仪开展试运行. 期间未出现设备间互相干扰的问题, 进一步验证了设备的电磁兼容性.

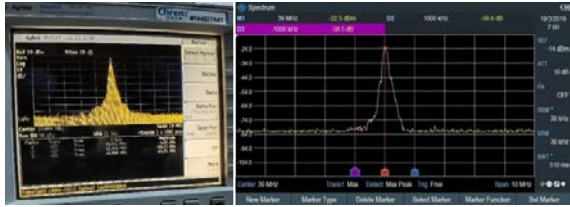


图 3 发射机馈线端口处的频谱 (左) 及设备正常工作时的辐射频谱 (右)

Fig. 3 Spectrum generated at the transmitter feeder port (left), and the radiation spectrum for the equipment under normal use (right)

### 3 观测数据对比分析

#### 3.1 有效流星计数

流星雷达探测的目标是欠密度流星的回波. 为了避免风场计算中引入其他非流星目标带来的影响, 需要对流星挑选进行严格筛选. 国际上的流星研究经过了长时间的经验积累, 总结了经典的流星筛选准则 (Holdsworth et al., 2004). 同时还需要注意的是过密度流星的去除. 过密度流星回波有很长的持续时间, 流星余迹可能会被风场扭曲, 从而产生多个反射点, 会导致后向散射回波的混叠和镜面反射点的远离. 无论哪种情况发生, 过密度流星回波的相位都不能反应有效的风速. 因此具有过密度特征的流星需要额外被剔除.

图 4 给出了样机和 EMDR 观测到的有效流星数量的日际变化. EMDR 的有效流星数量在测试的第 2 天出现一个局部峰值 (13635 颗), 其他时段都比较平稳, 日平均数量为 13460 颗. 样机同样观测到第 2 天的峰值, 受第 1、7、8、9 天停电的影响, 日际变化难以体现. 其中不受停电影响的第 2、3、4、5、6、10 天的日平均有效流星数为 15386 颗. 总的来说, 样机探测到的有效流星多于 EMDR.

#### 3.2 有效流星数的时间变化

图 5 给出了样机和 EMDR 观测到的有效流星

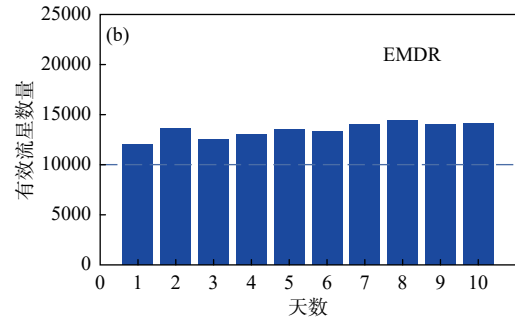
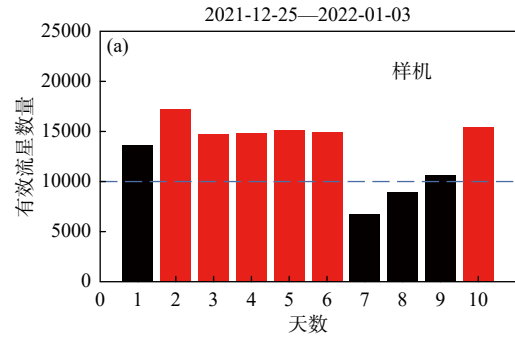


图 4 样机 (a) 和 EMDR (b) 观测到的每日有效流星数量

Fig. 4 Meteor numbers per day observed by the prototype (a) and EMDR (b)

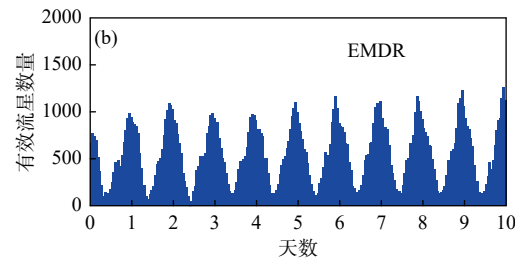
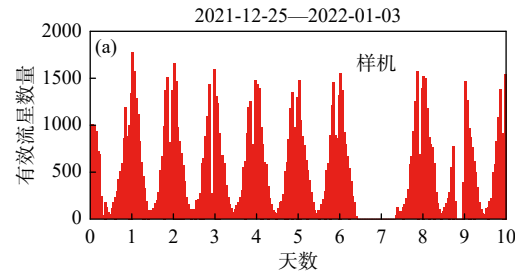


图 5 样机 (a) 和 EMDR (b) 观测到的有效流星数量时间分布

Fig. 5 Time distribution of the meteor numbers observed by the prototype (a) and EMDR (b)

数量的时间分布. EMDR 的有效流星数量在每天的 10:00 UT 最少 (日平均数量 116 颗), 22:00 UT 最多 (日平均数量 1106 颗), 分别对应北京时间 18 点和 6 点, 即日落前后最少, 日出前后最多. 样机观测到的有效流星数量在每天的 10:00 UT 最少 (日平均数量 62 颗), 24:00 UT 最多 (日平均数量 1488 颗). 总体来说, 样机的有效流星数量时间分布和 EMDR 基本一致, 相关系数为 0.848. 但样机

观测的有效流星数量在 21:00—23:00 UT (北京时间 5—7 点) 出现明显少于前后相邻时段的情况. 另外, 在每天流星数最少的时候 (10:00 UT 前后), 样机探测到的流星数少于 EMDR.

### 3.3 有效流星的方位角分布

图 6 以 2021 年 12 月 26 日为例, 给出了样机和 EMDR 观测到的有效流星全天空分布和数量的

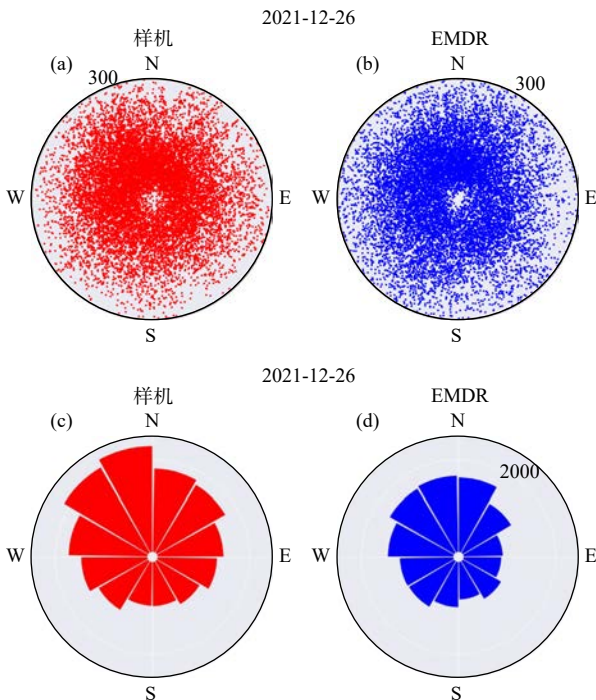


图 6 2021 年 12 月 26 日, 样机和 EMDR 观测到的有效流星全天空分布 (a, b) 和数量的方位分布 (c, d)  
Fig. 6 Sky scatter distribution of meteors (a, b) and the azimuth distribution of meteor numbers (c, d), observed by the prototype and EMDR on December 26, 2021

方位分布 (采用地理坐标). EMDR 观测的流星主要集中在设备的西北方 (4472 颗), 东南方最少 (2489 颗). 样机观测的流星同样集中在西北方 (5841 颗), 东南方最少 (3190 颗), 与 EMDR 基本一致, 相关系数为 0.842. 需要指出的是, 雷达常用的方位角定义为从正北沿顺时针方向旋转, 而样机数据中的方位角定义为从正北沿逆时针方向旋转.

### 3.4 有效流星的高度分布

图 7 以 2021 年 12 月 26 日为例, 给出了样机和 EMDR 观测到的有效流星数量的高度分布. EMDR 的流星主要集中在 80~100 km 高度范围, 88 km 高度流星数量最多 (1843 颗). 样机的流星数量在 92 km 高度最多 (2597 颗), 峰值高度比 EMDR 高 4 km. 观察测试期间所有日期的流星高度分布图 (本文未展示), 发现在 2021 年 12 月 26 日和 28 日, 样机峰值高度比 EMDR 高 4 km, 在其他日期, 样机峰值高度比 EMDR 高 2 km. EMDR 的峰值高度主要在 88~90 km, 而样机的峰值高度主要在 90~92 km. 总体来说, 样机和 EMDR 探测的有效流星高度分布基本一致, 均呈高斯分布 (峰值以上相对更陡峭一些), 相关系数为 0.956.

### 3.5 扩散系数的高度分布

图 8 以 2021 年 12 月 26 日为例, 给出了样机和 EMDR 观测到的扩散系数 (取自然对数) 高度分布结果. 因为有效流星主要集中在高度范围 80~100 km, 且目前扩散系数的应用主要在流星数量峰

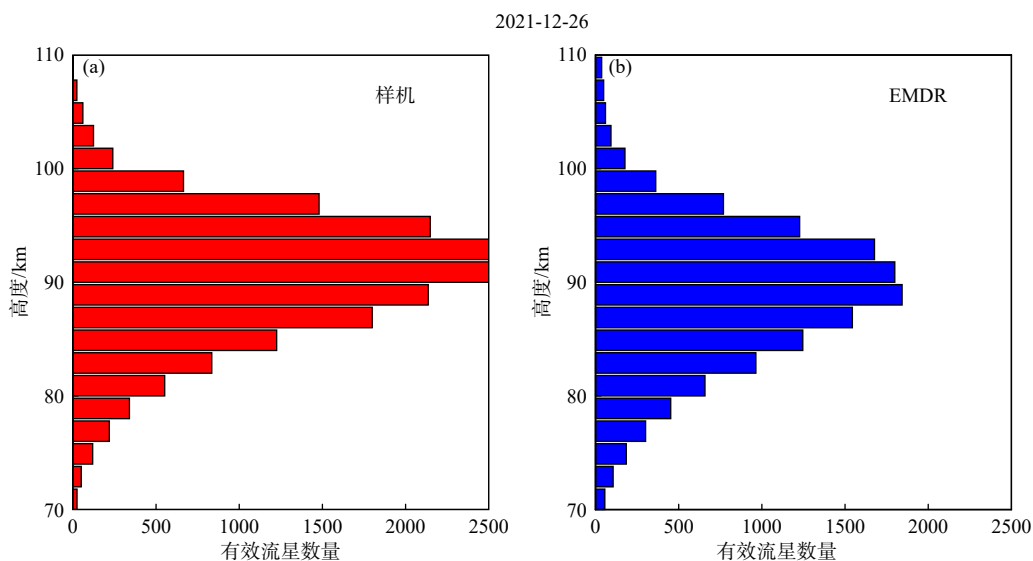


图 7 2021 年 12 月 26 日, 样机 (a) 和 EMDR (b) 观测到的有效流星数量高度分布  
Fig. 7 Height distribution of meteor numbers observed by the prototype (a) and EMDR (b) on December 26, 2021

值高度附近, 所以重点分析样机和 EMDR 在这个高度范围内的观测结果. 样机和 EMDR 的扩散系数随高度增加而线性增大, EMDR 的变化率为 0.072 (拟合直线的斜率), 样机的变化率为 0.081, 相对偏差为 12.1%. 相对偏差的计算方法如下:

$$\text{偏差} = \frac{|\text{变化率}_{\text{样机}} - \text{变化率}_{\text{EMDR}}|}{\text{变化率}_{\text{EMDR}}}$$

### 3.6 风场数据的偏差

图 9 给出了样机的纬向风/经向风和 EMDR 的纬向风/经向风的偏差, 横坐标为偏差, 纵坐标为

数据频次. 可以看出样机和 EMDR 的偏差主要集中在 ±10 m/s 范围内, 成正态分布. 其中纬向风的偏差的均值为 -0.431 m/s, 标准差为 11.051 m/s, 经向风的偏差的均值为 0.261 m/s, 标准差为 12.150 m/s.

### 3.7 风场数据的相关性

图 10 以散点图的形式给出了样机的纬向风/经向风随 EMDR 的纬向风/经向风的分布, 横坐标为 EMDR 的观测结果, 纵坐标为样机的观测结果. 可以看到, 大部分散点集中于 45°斜线附近, 说明样机解算的风场与 EMDR 符合较好. 具体计算结果为: 纬向风拟合斜率为 0.982, 相关系数为 0.933; 经向

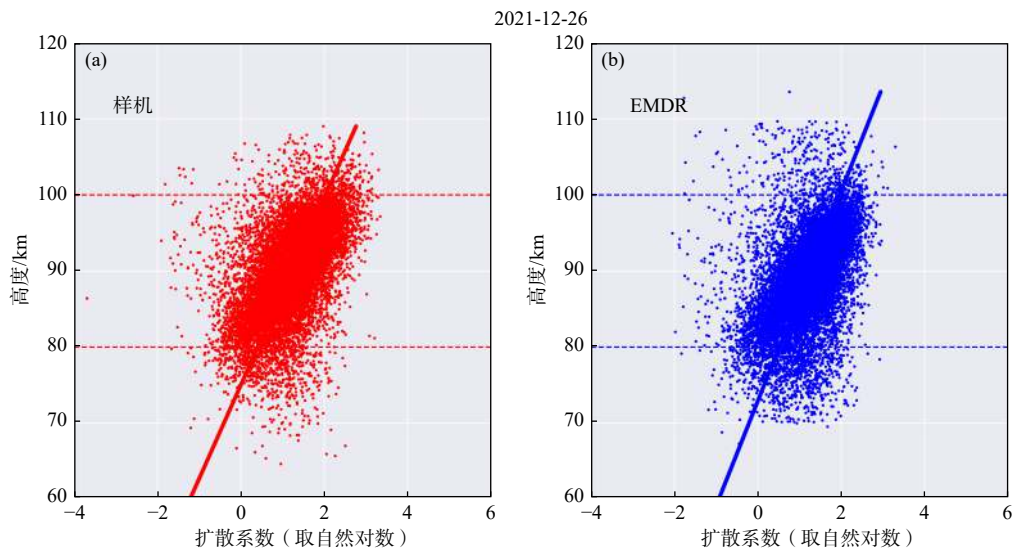


图 8 2021 年 12 月 26 日, 样机 (a) 和 EMDR (b) 解算的扩散系数的高度分布

Fig. 8 Height distribution of diffusion coefficients calculated by the prototype (a) and EMDR (b) on December 26, 2021

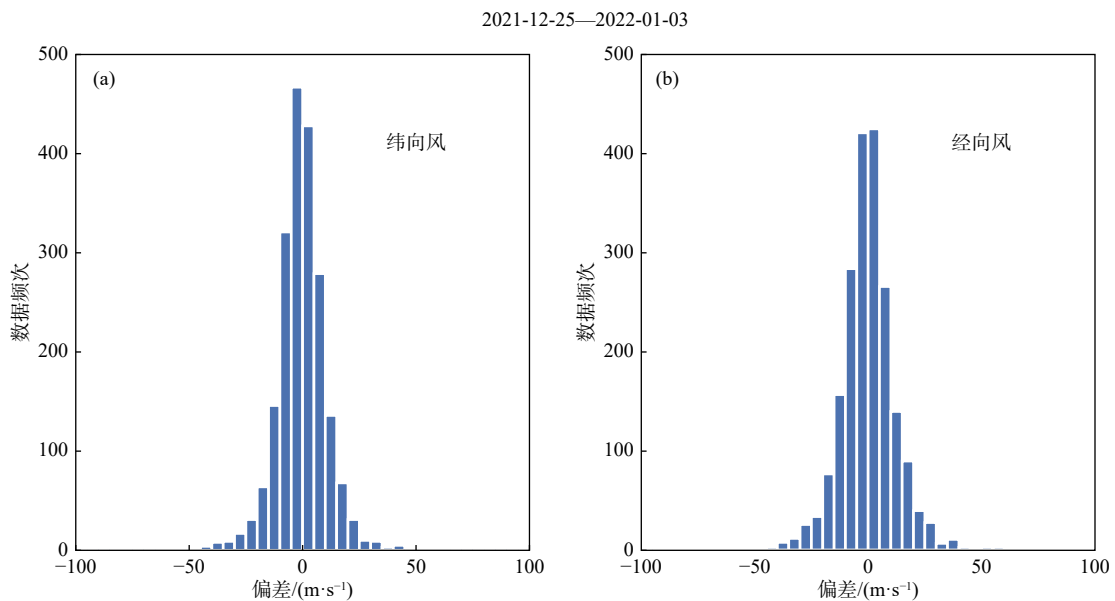


图 9 样机观测到的纬向风 (a) 和经向风 (b) 与 EMDR 的纬向风和经向风的偏差 (样机减 EMDR).

Fig. 9 Absolute deviation between the zonal (a) and meridional wind (b) observed by the prototype and the zonal and meridional wind observed by EMDR (the prototype minus EMDR)

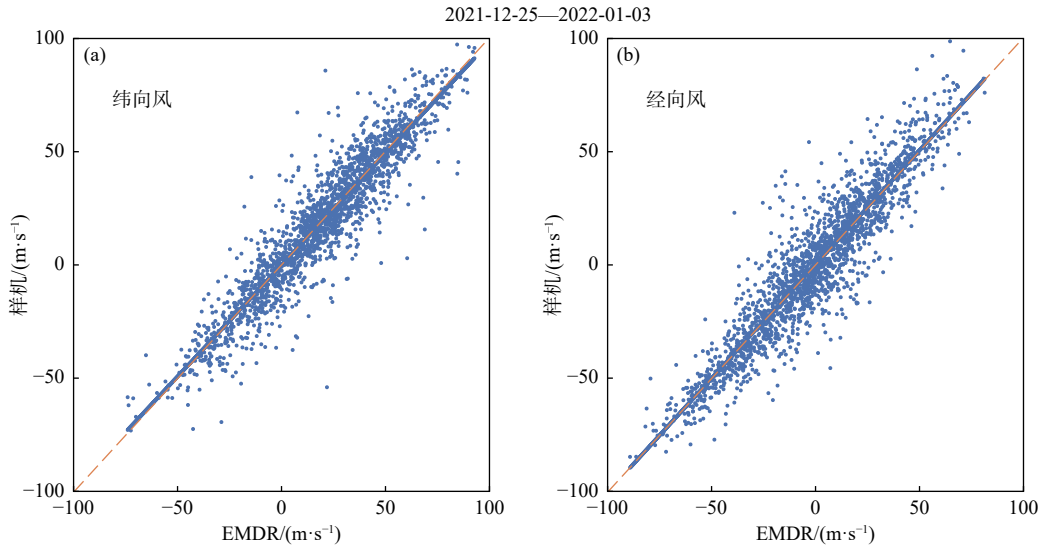


图 10 样机观测到的纬向风 (a) 和经向风 (b) 与 EMDR 的纬向风和经向风的相关性

Fig. 10 Correlation between the zonal (a) and meridional wind (b) observed by the prototype and the zonal wind and meridional wind observed by EMDR

风拟合斜率为 1.006, 相关系数为 0.929. 变化率和相关系数都很接近于 1, 说明了样机观测结果和 EMDR 的一致性.

图 11 以 2021 年 12 月 26 日为例, 展示了样机的纬向风、经向风及其与 EMDR 的对比情况. 可以

看出, 样机观测的风场时空分布和 EMDR 整体上很相似. 绝大部分数据点的差异都在 10 m/s 以下, 低于由数据处理软件给出的拟合误差. 样机给出的有效数据点相对较多, 高度覆盖范围更大, 但在低于 80 km 和高于 100 km 的区域两者的差异明显增大.

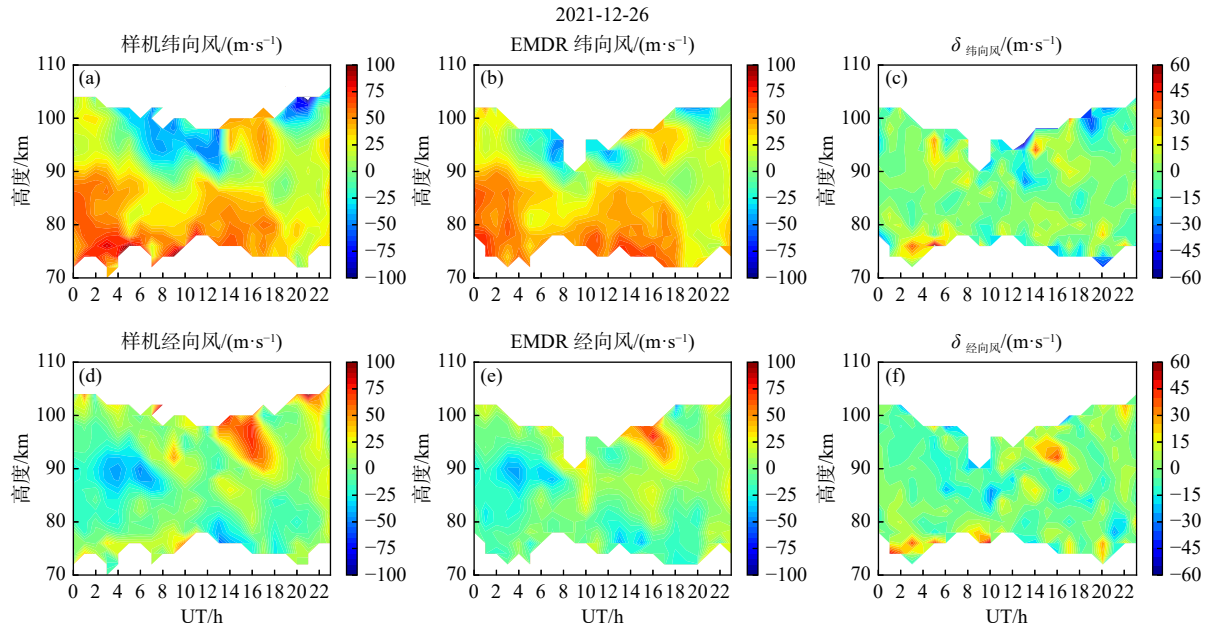


图 11 2021 年 12 月 26 日, 样机和 EMDR 观测到的纬向风 (a, b) 和经向风 (d, e), 以及二者之间的差 (c, f, 样机减 EMDR)

Fig. 11 Zonal (a, b) and meridional wind (d, e) observed by the prototype and EMDR, and the difference between them (c, f; the prototype minus EMDR) on December 26, 2021

### 4 讨论

流星雷达探测到的绝大部分为偶发流星 (相对于流星雨). 这类流星在地球公转轨道附近的分布

大致呈各向同性. 但由于地球的自转、公转, 流星体相对地球的速度产生时空变化 (Jones and Brown, 1994). 流星体在晨侧迎面朝向地球运行, 而在昏侧则是追赶地球, 所以早晨时段 (22:00 UT 前后)

探测到的流星数最多, 黄昏时 (10:00 UT 前后) 探测到的最少, 这就造成了图 5 所示的流星数随时间的变化. 这也是流星速度大多在 11~72 km/s 之间的重要原因.

图 5 中样机的有效流星数量在固定的时间 (21:00—23:00 UT) 急剧减少, 因出现的时间固定, 我们推测其原因是测试场地的电力供应或者电磁背景噪声随着人为活动出现规律性的变动. 为了排除这类影响, 采用同一台接收机在合肥进行补充测试. 合肥的测试结果 (本文未展示) 未出现该现象, 说明设备没有问题.

流星余迹沿流星体的运动轨迹呈细长型, 直径为几米, 而长度则可达几十千米 (陈金松, 2005). 能被后向散射雷达探测到的流星余迹需要满足与电磁波正交的条件 (波束与流星余迹呈 90° 夹角), 有效散射区域约为正交点附近几个菲涅尔区的范围 (Cervera et al., 2004). 基于流星数量在早晨最多的前提, 每日的流星方位角分布重点关注早晨的情况. 如图 12 所示, 对于北半球的宽波束全天空流星雷达, 在设备的北侧更容易满足流星余迹垂直电磁波的条件. 因此流星雷达探测的流星方位角分布往往呈现出北方占优的规律. 同时, 设备西侧区域朝向流星运动, 而东侧区域背向流星运动, 所以西方探测到的流星数多于东方. 综合来说, 流星数量方位分布的最大值出现在西北方向. 因此, 图 6 展示的流星数方位分布符合一般规律. 在测试期间, 数据分析小组也检查了漠河 (53.5°N)、北京 (40.3°N) 以及澳大利亚 Davis 观测站 (68.6°S) 的流星方位角分布 (本文未展示), 均符合上述的方位角分布规律.

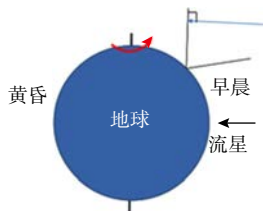


图 12 地球公转和自转共同决定流星数分布

Fig. 12 Earth's revolution and rotation jointly determine the distribution of meteor numbers

流星余迹随高度的分布受到大气密度、流星体进入大气层的角度以及流星雷达所采用的频率等因素的影响, 一般在 90 km 左右出现最大值. 根据图 7 所示的高度分布, 样机和 EMDR 观测到的流星数量都是在 90 km 左右最多, 但是峰值高度相差约 2 km.

流星雷达基于电波传播时间确定目标的距离和高度, 对雷达系统中的传播延迟 (硬件延迟) 考虑不足会导致测到的目标距离偏大, 引起流星高度分布的偏差. 在样机的研制过程中, 设备采用连续采样 (从 0 距离开始) 的方式对硬件延迟进行测量. 图 13 展示了回波幅度距离分布, 幅度峰值位置 (21 km 左右) 就是硬件延迟造成的高度偏差, 该偏差在数据处理过程中扣除. 因为对幅度峰值位置的判定可能存在误差, 同时不清楚 EMDR 对硬件延迟的处理方式, 所以暂时无法判断样机峰值高度和 EMDR 相差约 2 km 的原因, 需要在后续的数据标定过程中进一步查实.

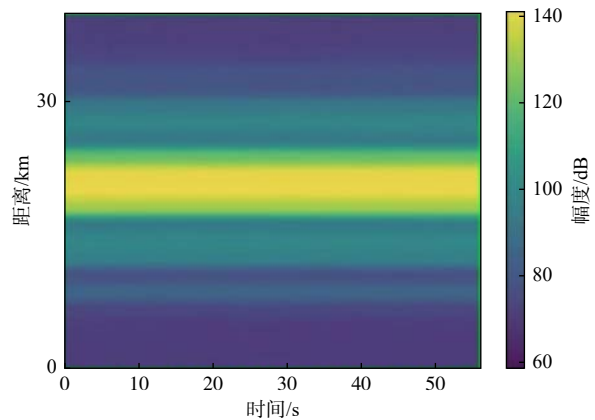


图 13 样机回波幅度距离分布

Fig. 13 Distance distribution of the prototype echo amplitude

除时间、方位角和高度的变化外, 流星数量还呈现出因为地球自转轴与公转“迎风面”夹角变化以及流星沿地球公转轨道不均匀分布 (特别是流星雨) 导致的季节变化 (Younger et al., 2009). 上述分析表明, 利用此类变化规则对流星雷达的工作状态的数据质量做出评估是十分有利的. 研究表明可以基于流星的方位角分布、高度分布对多个接收通道之间的相位一致性进行标定 (沈金成等, 2012). 样机即采用了这类标定方法, 据我们所知 EMDR 也采用了类似的方法.

只有欠密流星的回波才能用来计算风场, 所以对回波事件进行准确分类, 才能正确筛选欠密 (有效) 流星, 这是后续计算风场的关键. 参照 EMDR 对回波的分类标准 (Holdsworth et al., 2004), 有效流星的错误码标注为 0, 其余错误码不为 0 的都是无效事件.

需要强调的是, 本文分析的流星数据和风场数据为优化后的结果. 图 14 分别给出了优化前 (图 14a、14c) 和优化后 (图 14b、14d) 的错误码数据频次 (未给出错误码为 0 的事件). 由

图 14a、14c 可以看出在优化前, 样机对错误码的归类 and EMDR 存在较大差异, 导致流星数据和风场数据和 EMDR 有较大偏差 (本文未展示). 通过优化事件挑选算法之后, 缩小了样机错误码分布与 EMDR 之间的差异, 流星数据、风场数据的一

致性都有所提高. 优化后, 样机探测到的回波事件总数为 513 013 个, 其中有效流星事件为 134 256 个, 选取比例 25%; 而 EMDR 探测到的回波事件总数为 277 262 个, 其中有效流星数为 134 602 颗, 选取比例为 48%.

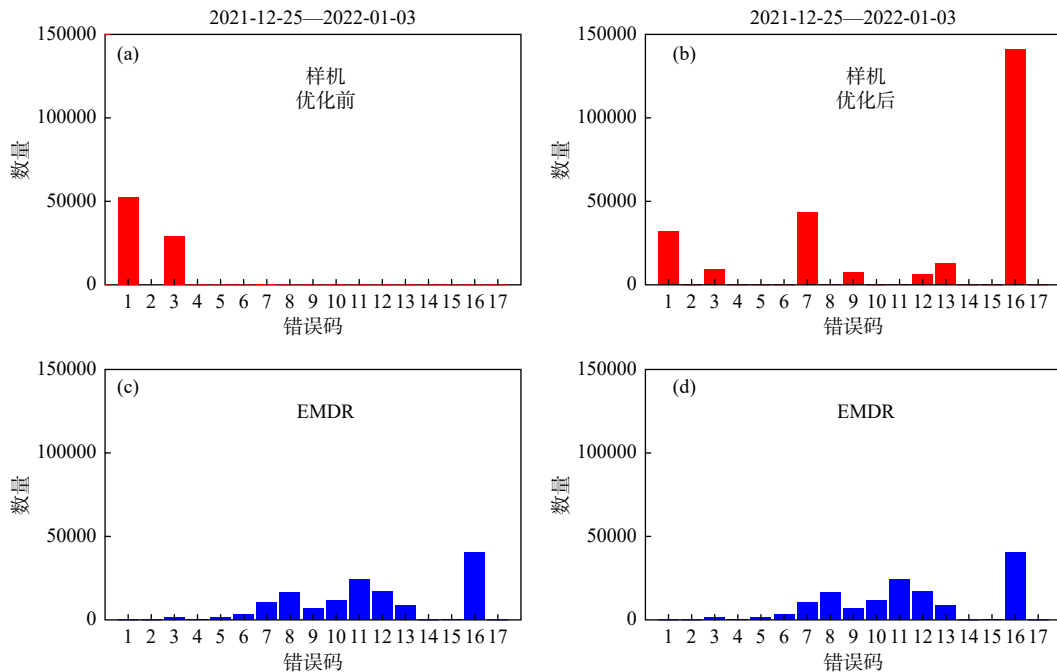


图 14 样机和 EMDR 的优化前的回波事件分类结果 (a, c) 和优化后的结果 (b, d)

Fig. 14 Pre-optimization echo event classification results of the prototype and EMDR (a, c) and post-optimization results (b, d)

将雷达观测的风场与模式计算的风场 (图 2) 进行对比, 可见观测和模拟都展现了 80 km 高度附近的日潮和 100 km 高度附近的半日潮结构, 75 km 以下模拟的风场日潮特征明显, 但因在该高度上有效数据较少, 难以判断雷达是否观测到该特征. 总的来说, 观测的风场相比模拟的风场更强、结构更复杂, 二者的存在较大差异. 已有研究表明 HWM14 模式往往与观测偏差较大 (Jiang et al., 2018), 因此我们认为上述差异并不能否定两台流星雷达观测的可靠性.

除第 3 节所述的样机和 EMDR 流星雷达观测数据之间的对比外, 此次样机测试发现的其他问题, 如上位机和下位机通讯丢数问题、软件友好易用问题、天线安装坐标系和精度问题等, 都已得到解决, 这为子午工程二期流星雷达的技术方案定型奠定了很好的基础.

## 5 结 论

对子午工程二期流星雷达样机进行现场技术指

标测试, 并与成熟型号 EMDR 进行数据对比分析, 可以得出结论:

(1) 样机的各项技术指标达到了预定的要求, 与 EMDR 相当, 验证了样机技术方案的可行性. 样机的发射频谱表现良好, 可避免对其他同址运行的无线电观测设备的干扰.

(2) 流星雷达数据质量的关键是数据处理算法, 特别是有效流星的挑选会影响到有效流星的高度分布、时间分布等, 进而影响风场的准确性. 样机在有效流星计数、有效流星时空分布、扩散系数高度分布、风场时空变化等各方面与 EMDR 符合较好, 验证了样机数据处理方法的正确性.

(3) 流星雷达风场探测最有效的高度区间为 80~100 km, 在此区间样机和 EMDR 的数据符合得非常好, 超出该范围差异显著增大.

综合来说, 样机在硬件和数据处理软件方面均达到了与 EMDR 相当的水平. 同时, 利用流星时空分布固有的客观规律对流星雷达的性能、状态以及观测数据的可靠性进行验证是非常有效的方法. 特别是采用两台设备直接对比的方式, 可以很好地揭

示设备的数据质量特性, 对于技术方案的选择和优化起到了关键的作用. 下一步将在样机定型和正式生产安装后, 采用更长时间的观测结果进一步检验国产流星雷达的性能和观测质量.

## 致谢

子午工程二期流星雷达的国产化过程在工程指挥部的领导下开展, 特此表示感谢.

## References

- Cervera M A, Holdsworth D A, Reid I M, Tsutsumi M. 2004. Meteor radar response function: Application to the interpretation of meteor backscatter at medium frequency[J]. *Journal of Geophysical Research*, 109: A11309. DOI: [10.1029/2004JA010450](https://doi.org/10.1029/2004JA010450).
- Chen J S. 2005. Research on the application of Wuhan meteor radar in space environment detection[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics of Chinese Academy of Sciences (in Chinese).
- Drob D P, Emmert J T, Meriwether J W, et al. 2015. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere[J]. *Earth and Space Science*, 2(7): 301-319. DOI: [10.1002/2014EA000089](https://doi.org/10.1002/2014EA000089).
- Gong Y, Xue J, Ma Z, et al. 2022. Observations of a strong intraseasonal oscillation in the MLT region during the 2015/2016 winter over Mohe, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127: e2021JA030076.
- Hocking W K, Fuller B, Vandeppeer B. 2001. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63(2-3): 155-169.
- Holdsworth D A, Reid I M, Cervera M A. 2004. Buckland Park all-sky interferometric meteor radar[J]. *Radio Science*, 39: RS5009. DOI: [10.1029/2003RS003014](https://doi.org/10.1029/2003RS003014).
- Jiang G, Xu J, Wang W, Y, et al. 2018. A comparison of quiet time thermospheric winds between FPI observations and model calculations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(9): 7789-7805. DOI: [10.1029/2018JA025424](https://doi.org/10.1029/2018JA025424).
- Jones J, Brown P. 1994. The radiant distribution of sporadic meteors[J]. *Planetary & Space Science*, 42(2): 123-126.
- Liu X F. 2004. Basic Astronomy[M]. Beijing: Higher Education Press, 148-155 (in Chinese).
- Luo J, Gong Y, Ma Z, et al. 2022. Long-term variation of lunar semidiurnal tides in the MLT region revealed by a meteor radar chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127: e2022JA030616.
- Ma Z, Gong Y, Zhang S, et al. 2022. First observational evidence for the role of polar vortex strength in modulating the activity of planetary waves in the MLT region[J]. *Geophysical Research Letters*, 49: e2021GL096548.
- Pan L Y. 2017. Design and implementation of broadband meteor radar hardware system[D]. Wuhan: Wuhan University (in Chinese).
- Rao S V B, Eswaraiiah S, Venkat Ratnam M, et al. 2014. Advanced meteor radar installed at Tirupati: System details and comparison with different radars[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(21): 11893-11904. DOI: [10.1002/2014JD021781](https://doi.org/10.1002/2014JD021781).
- Roper R G. 1975. The measurement of meteor winds over atlanta[J]. *Radio Science*, 10(3): 363-369.
- Shen J C, Ning B Q, Wan W X, Hu L H. 2012. Research on phase difference monitoring and analysis method of all-sky meteor radar[J]. *Journal of Space Science*, 32(1): 75-84 (in Chinese).
- Skellett A M. 1931. The effect of meteors on radio transmission through the Kennelly-Heaviside layer[J]. *Physical Review*, 37: 1668.
- Valentic A, Avery P, Cervera A, et al. 1996. A comparison of meteor radar systems at Buckland park[J]. *Radio Science*, 31(6): 1313-1329.
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. *Space Weather*, 8: S08001. DOI: [10.1029/2010SW000603](https://doi.org/10.1029/2010SW000603).
- Wang C, Chen Z Q, Xu J Y. 2020. Introduction to Chinese Meridian Project-Phase II[J]. *Journal of Space Science*, 40(5): 718-722.
- Yang K J. 1989. Characteristics of meteor and preliminary design of meteor radar[J]. *Journal of Shanxi Observatory*, 12(1-2): 21-33 (in Chinese).
- Yi W, Xue X, Reid I M, et al. 2021. Climatology of interhemispheric mesopause temperatures using the high-latitude and middle-latitude meteor radars[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126: e2020JD034301.
- Younger P T, Astin I, Sandford D J, Mitchell N J. 2009. The sporadic radiant and distribution of meteors in the atmosphere as observed by VHF radar at Arctic, Antarctic and equatorial latitudes[J]. *Annals of Geophysics*, 27: 2831-2841. DOI: [10.5194/angeo-27-2831-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-2831-2009).
- Younger J P. 2011. Theory and application of VHF meteor radar observation [D]. Adelaide: The university of Adelaide.
- Zhou X, Yue X, Liu L, et al. 2022a. Decadal continuous meteor-radar estimation of the mesopause gravity wave momentum fluxes over Mohe: Capability evaluation and interannual variation[J]. *Remote Sensing*, 14: 5729.
- Zhou X, Yue X, Yu Y, Hu L. 2022b. Day-to-day variability of the MLT DE3 using joint analysis on observations from TIDI-TIMED and a meteor radar meridian chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127: e2021JD035794.

## 附中文参考文献

- 陈金松. 2005. 武汉流星雷达在空间环境探测中的应用研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所.
- 刘学富. 2004. 基础天文学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 148-155.
- 潘凌云. 2017. 宽带流星雷达硬件系统设计与实现 [D]. 武汉: 武汉大学.
- 沈金成, 宁百齐, 万卫星, 胡连欢. 2012. 全天空流星雷达相位差监测分析方法研究[J]. *空间科学学报*, 32(1): 75-84.
- 杨克俊. 1989. 流星的特性与流星雷达初步设计[J]. *陕西天文台台刊*, 12(1-2): 21-33.

陈峰磊, 荀宇畅, 王泽龙, 杜丽芳, 郑浩然, 陈志青, 程学武, 王积勤, 吴方, 杨国韬. 2024. 子午工程二期漠河大气风温金属成分激光雷达钙原子初步观测结果. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 131-137. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-012.

Chen F L, Xun Y C, Wang Z L, Du L F, Zheng H R, Chen Z Q, Cheng X W, Wang J Q, Wu F, Yang G T. 2024. Preliminary results of Calcium atom analysis by the wind-temperature-metal-constituents LiDAR at Mohe middle-upper atmosphere for the Phase II of Chinese Meridian Project. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 131-137 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-012.

## 子午工程二期漠河大气风温金属成分 激光雷达钙原子初步观测结果

陈峰磊<sup>1,2</sup>, 荀宇畅<sup>1,2\*</sup>, 王泽龙<sup>3,2</sup>, 杜丽芳<sup>2</sup>, 郑浩然<sup>2</sup>, 陈志青<sup>2</sup>,  
程学武<sup>4</sup>, 王积勤<sup>4</sup>, 吴方<sup>2</sup>, 杨国韬<sup>2\*</sup>

1 太原理工大学 物理与光电工程学院, 太原 030024

2 中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3 江苏科技大学 理学院, 镇江 212100

4 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071

**摘要:** 子午工程二期漠河 (122°E, 53°N) 大气风温金属成分激光雷达利用高空大气金属层共振荧光散射机制探测 80~120 km 区域的金属层成分, 并将这些金属成分作为示踪物去研究中高层大气的各种复杂的化学和动力学过程. 子午工程二期漠河钙原子激光雷达采用的时间分辨率为 1.1 min, 空间分辨率为 30 m. 在这种高时空分辨率下, 仍然得到了高信噪比信号. 通过对 2023 年 1 月钙原子数密度随时间和高度的演化过程进行分析, 发现背景层钙原子峰值密度达到了  $33.55 \text{ cm}^{-3}$  左右, 并且其突发层钙原子峰值密度可以达到约  $53.64 \text{ cm}^{-3}$ ; 在与延庆 (116.0°E, 40.5°N) 钙原子数密度的比较研究中, 我们发现延庆的钙原子数密度小于漠河的钙原子数密度; 在与国外台站钙原子观测的比较研究中, 我们发现漠河钙原子数密度和德国 Kuhlungsborn (54°N, 12°E) 台站的钙原子数密度接近, 比法国的 Observatoire de Haute Provence (44°N, 6°E) 台站的钙原子数密度大. 在 2023 年 1 月 12 日至 14 日, 我们观测到了钙流星尾迹, 并且流星尾迹往往出现在金属层峰值的附近.

**关键词:** 激光雷达; 钙原子数密度; 流星尾迹

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-012

中图分类号: P356

文献标识码: A

## Preliminary results of Calcium atom analysis by the wind-temperature-metal-constituents LiDAR at Mohe middle-upper atmosphere for the Phase II of Chinese Meridian Project

Chen Fenglei<sup>1,2</sup>, Xun Yuchang<sup>1,2\*</sup>, Wang Zelong<sup>3,2</sup>, Du Lifang<sup>2</sup>, Zheng Haoran<sup>2</sup>, Chen Zhiqing<sup>2</sup>,  
Cheng Xuewu<sup>4</sup>, Wang Jiqin<sup>4</sup>, Wu Fang<sup>2</sup>, Yang Guotao<sup>2\*</sup>

1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2 State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 School of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China

4 State Key Laboratory of Spectrum and Atomic and Molecular Physics, Institute of Precision Measurement Science and Technology Innovation, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

收稿日期: 2023-02-28; 录用日期: 2023-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42004134, 41627804); 空间天气学国家重点实验室开放课题

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42004134, 41627804), and the Funded by State Key Laboratory of Space Weather

第一作者: 陈峰磊 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事中高层大气物理研究. E-mail: 863830001@qq.com

\*通信作者: 荀宇畅 (1991-), 女, 讲师, 主要从事中高层大气物理研究

杨国韬 (1975-), 男, 研究员, 主要从事激光雷达探测和中高层大气物理研究





**Abstract:** The Phase II of Chinese Meridian Project atmosphere wind-temperature-metal-constituents LiDAR at Mohe (122°E, 53°N) station uses a resonance fluorescence scattering mechanism to detect the metal layer composition in the upper atmosphere at 80-120 km, and subsequently uses these metal components as tracers to study various complex chemical and kinetic processes in the middle and upper atmosphere. The time resolution of this LiDAR is 1.1 min and the spatial resolution is 30 m. With high spatial and temporal resolution, we obtained a high signal to noise ratio for Ca number density. Further, we analyzed the evolution of Ca number density with time and height in January 2023. We observed that the peak value of background and sporadic Ca number densities reached approximately  $33.55 \text{ cm}^{-3}$  and  $53.64 \text{ cm}^{-3}$ , respectively. In comparison with that in Yanqing (116.0°E, 40.5°N) station, the Ca number density in Mohe station was higher. Moreover, while examining the Ca observation studies conducted at foreign stations, we found that the Ca number density in Mohe was close to that of Kuhlungsborn station (54°N, 12°E; Germany) and was higher than that of Observatoire de Haute Provence station (44°N, 6°E; France). Additionally, during January 12–14, 2023, we observed calcium meteor trails, consistently appearing near the peak of the metal layer spectrum.

**Keywords:** LiDAR; Ca count density; meteor trail

## 0 引言

地球大气 75~110 km 高度区域被称作中间层顶/低热层区域 (mesosphere and lower thermosphere, MLT), 这一区域是大气和空间的分界, 在这一区域之上有太阳电磁辐射、太阳风等高能注入, 在这一区域之下有近似相等的能量以重力波、潮汐波、行星波的形式向上传输. 由于电离层和中高层大气空间范围的交叉, 带电成分与中性大气共同经历着复杂的化学、热力学和动力学过程, 进行成分、动量和能量的输运与反馈. 深入理解大气-电离层耦合机制对于更好地解释观测到的大气现象、理解地球气候系统、发展预报能力、完善日地系统空间天气耦合链至关重要 (Wan and Xu, 2014; Yiğit and Medvedev, 2015; Yiğit et al., 2016). 由于其他金属离子的共振波长在极紫外范围, 会被平流层中的臭氧吸收, 钙成为目前唯一可以通过地基设备实现原子离子同时探测的元素, 对突发钙原子层、钙离子层的演化规律追踪、比较, 结合风场、磁场、温度数据研究突发钙层的形成机制, 可以有针对性地研究大气中性成分和电离成分的耦合过程. 法国的 Observatoire de Haute Provence (44°N, 6°E)、美国的 Urbana Atmospheric Observatory (40.2°N, 88.2°W)、德国 Juliusru (54.5°N, 13.4°E)、美国 Arecibo (18.3°N, 66.7°W)、中国武汉 (30.5°N, 114.3°E) 曾分别在 1985 年、1993 年、1996 年 [2000 年搬迁至 Kuhlungsborn (54°N, 12°E)], 2003 年、2013 年开展过 Ca、Ca<sup>+</sup>的同时观测 (Alpers et al., 1996; Gardner et al., 1993; Gerding et

al., 2000; Granier et al., 1985; Tepley et al., 2003; Yi et al., 2013), 但并未积累长期、连续的观测数据.

子午工程一期在北京延庆 (116.0°E, 40.5°N) 已搭建钙原子与钙离子同时观测激光雷达, 从 2019 年 1 月起开展持续观测, 并首次观测到了与拓展 F 相关的高达 300 km 的钙离子层 (Jiao et al., 2022). 为了研究不同纬度钙原子、离子日变化、年变化的差异以及空间天气事件对不同纬度金属原子、离子的电动力学、化学过程的不同影响, 子午工程二期在中国纬度最高的漠河 (122°E, 53°N) 建设集钠原子、钾原子、铁原子、镍原子、钙原子和钙离子观测一体的中高层大气风温金属成分激光雷达. 目前, 设备的钙原子观测部分已调试成功并开展试观测, 自 2023 年 1 月 9 日起持续积累数据, 本文将介绍钙原子系统结构和原始数据, 以验证设备的探测能力; 反演后的钙原子数密度和延庆钙原子数密度、德国 Kuhlungsborn (54°N, 12°E) 台站的钙原子数密度比较, 初步得到钙原子数密度的纬度差异, 并且报道了首次通过钙原子激光雷达探测到的流星尾迹.

## 1 漠河钙原子观测激光雷达的系统结构及原始数据

### 1.1 漠河钙原子观测激光雷达的系统结构

2018—2019 年, 延庆钙原子/离子激光雷达使用染料激光器获得 423 nm/393 nm 波长, 由于有机染料寿命短、更换频繁, 维护难度大, 后期更新为

固态激光器, 单脉冲能量显著增大, 信噪比显著提升. 因此子午工程二期漠河钙原子观测激光雷达采用的是基于固体激光和频技术的全固态钙原子观测激光雷达, 其结构牢固、能量持续性强、寿命长, 整套系统稳定性得到了大幅提升, 更适合长期连续

观测, 为高空大气中性成分与电离成分的耦合研究提供连续数据. 漠河钙原子观测激光雷达主要由五部分组成, 分别是激光发射单元、脉冲和频单元、信号接收单元、数据采集单元以及系统控制单元, 如图 1 所示.

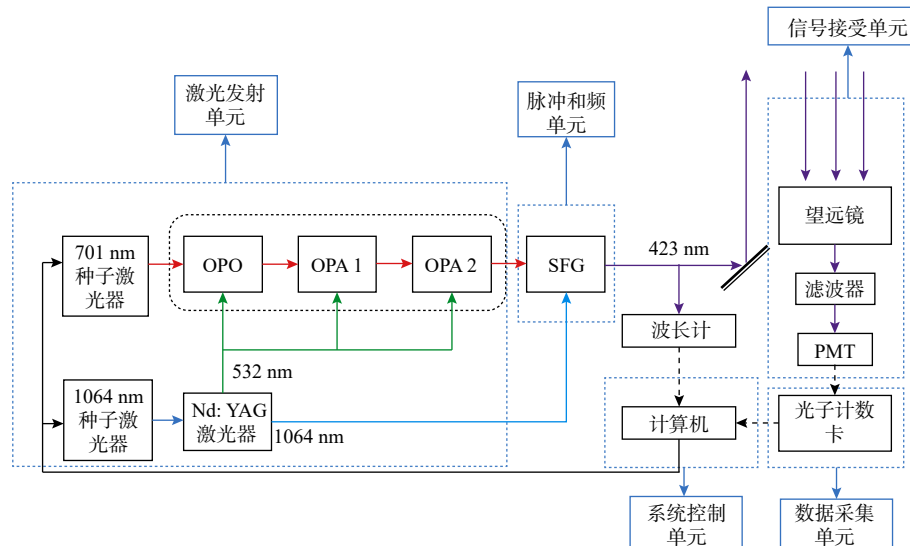


图 1 子午工程二期漠河中高层大气风温金属成分激光雷达钙原子观测系统组成图

Fig. 1 Composition diagram of the Calcium atom observation system in the Mohe middle-upper atmosphere wind-temperature-metal-constituents LiDAR for the Phase II of Chinese Meridian Project

激光发射单元主要是由种子激光器、掺钕钇铝石榴石 (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet, Nd:YAG) 激光器、倍频晶体、光学参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO)、光学参量放大器 (optical parametric amplification, OPA) 等设备组成. 701 nm 连续光种子激光器发射激光进入光学参量振荡器 (OPO), 再经过两个光学参量放大器 (OPA) 得到 701 nm 的激光 (红色), 并进入激光和频发生器 (sum frequency generation, SFG), 1064 nm 连续光种子激光器发射激光进入掺钕钇铝石榴石 (Nd:YAG) 激光器, 并经过倍频晶体产生三束 532 nm 的激光 (绿色) 分别为 OPO、OPA1、OPA2 提供能量, 使 701 nm 激光的能量逐渐增大, 而剩余的 1064 nm 的激光 (白色) 进入激光和频发生器 (SFG).

脉冲和频单元的核心设备是激光和频发生器 (SFG). 进入激光和频发生器 (SFG) 的 701 nm 和 1064 nm 的激光通过非线性光学的机制得到 423 nm 的激光 (紫色), 然后经过扩束镜调整好激光的发散角和准直度, 再由全反镜反射, 沿垂直方向入射到地球大气中.

信号接收单元主要由望远镜、滤波器、光电倍

增管 (photomultiplier tube, PMT) 等设备组成. 通过望远镜接收到全波段的光, 再通过滤波器抑制掉其他波长的光, 保留所需波长的光信号, 之后使用高量子效率的光电倍增管 (PMT) 将光信号转换为电信号.

数据采集单元采用的是光子计数卡. 光子计数卡具有探测灵敏度高的优点, 基于光的粒子性探测, 将光电倍增管传递过来的各光电子脉冲逐一地记录下来, 用一定时间内的光子计数值来表征信号的大小, 并将其以数字信号的形式储存到工控机中.

系统控制单元通过计算机控制整个激光雷达系统的时序和延时, 将激光发射单元、脉冲和频单元、信号接收单元和数据采集单元有机地结合起来, 使其彼此协调工作, 成为一个整体. 分出一小部分的 423 nm 的激光进入波长计里面, 计算机通过监测波长计来确定 423 nm 的激光其频率是否过大或过小, 再通过控制两个种子激光器, 让 423 nm 的激光始终维持在 423 nm. 如表 1 所示为延庆与漠河钙原子观测激光雷达参数的对比, 从表格中我们可以明显看到, 延庆 OPO 固态激光雷达的单脉冲能量大于延庆染料激光雷达的单脉冲能量, 漠河 OPO 固态激光雷达的单脉冲能量又得到进一步提升, 并

表 1 延庆与漠河钙原子观测激光雷达参数

Table 1 Calcium atom observation of LiDAR parameters in Yanqing and Mohe

Ca	延庆染料	延庆OPO	漠河OPO
经纬度	(116.0°E, 40.5°N)	(116.0°E, 40.5°N)	(122°E, 53°N)
脉冲能量/mJ	9	28~33	90
重复频率/Hz	30	15	15
望远镜直径/m	1.23	1.23	1.5
时间分辨率/min	0.55	1.1	1.1
空间分辨率/m	96	96	30
探测高度范围/km	393.408	1179.648	125.798

且漠河 OPO 固态激光雷达的望远镜直径大于延庆激光雷达的望远镜直径, 增强了激光雷达的探测能力, 从而得到有更高信噪比的数据.

## 1.2 漠河钙原子观测激光雷达的原始数据

在对漠河钙原子数据进行反演计算之前, 首先要观察原始光子数廓线图, 对观测数据进行一次筛选, 剔除掉噪声过大、波长不稳定、无明显信号等不可用的数据. 图 2 给出了 2023 年 1 月 12 日 22:48 观测到的激光雷达原始光子数廓线图, 其空间分辨率为 30 m, 时间分辨率为 1.1 min.

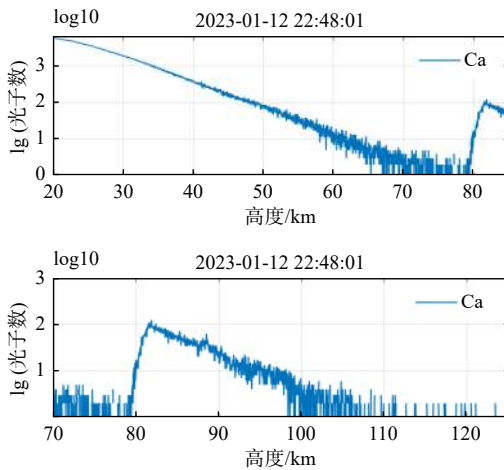


图 2 2023 年 1 月 12 日 22:48 观测到的激光雷达原始光子数廓线图

Fig. 2 The LiDAR original photon number profile observed at 22:48 on January 12, 2023

从激光雷达原始光子数廓线图可以看出, 从 20~80 km 的区域, 随着高度的升高, 光子数在减小, 这是因为在这个区域内, 望远镜接收到的光子主要是来自大气气溶胶的米散射和大气分子的瑞利散射, 而随着高度的升高, 大气气溶胶和大气分子的密度都在降低, 从而导致了光子数的减小; 在 80~100 km 的区域内, 由于钙原子的存在, 激光

与钙原子的共振荧光散射截面远大于激光与大气分子的瑞利散射截面, 因此望远镜捕捉到了大量钙原子与激光相互作用之后产生的荧光光子, 故此区域内的光子数迅速增加; 除热层金属层等特殊现象外, 110 km 以上的光子数则主要为背景噪声.

## 2 钙原子数密度的分析研究

### 2.1 漠河钙原子数密度的演化分析

图 3 所示为 2023 年 1 月 12 日观测到的夜间漠河钙原子数密度随时间、高度的演化, 为了方便与延庆钙原子数密度作比较, 我们对漠河钙原子激光雷达原始光子数在高度上做了 3 点合并, 使其空间分辨率为 90 m, 时间分辨率为 1.1 min. 图中的空白部分是由于在这段时间内激光雷达数据的缺失, 而从图像中可以明显看出钙原子层主要分布在 79~105 km, 峰值高度出现在 81.6 km 附近, 峰值密度达到  $33.55 \text{ cm}^{-3}$ . 自开机至 23:40, 在 79~94 km 出现了突发钙原子层, 在这段时间里, 钙原子数密度明显比其他时间的要大, 大概是其他钙原子层的 2~3 倍, 峰值高度出现在 81.1 km, 峰值密度达到  $53.64 \text{ cm}^{-3}$ . 在 1:25 LT、3:04 LT、4:46 LT 等时刻附近, 出现了短暂的密度激增现象, 其中在 1:25 LT 时刻附近, 峰值高度出现在 87.1 km 附近, 峰值密度达到  $52.57 \text{ cm}^{-3}$ , 在 3:04 LT 时刻附近, 峰值高度出现在 80.4 km 附近, 峰值密度达到  $52.8 \text{ cm}^{-3}$ , 在 4:46 LT 时刻附近, 峰值高度出现在 86.7 km 附近, 峰值密度达到  $52 \text{ cm}^{-3}$ , 钙原子数密度明显比附近其他钙原子层大, 在图 3 中用红色椭圆框进行了标记.

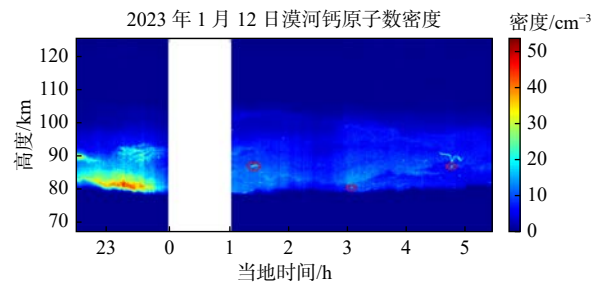


图 3 2023 年 1 月 12 日观测到的夜间漠河钙原子数密度 (其中 LT0 点之前属于 1 月 12 日, LT0 点之后属于 1 月 13 日)

Fig. 3 Mohe Calcium atomic density observed at night on January 12, 2023 (Before LT0 = January 12, after LT0 = January 13)

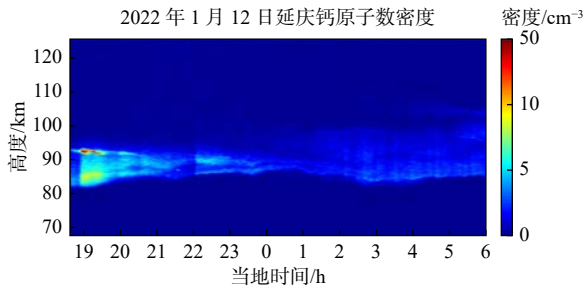


图 4 2022 年 1 月 12 日观测到的夜间延庆地区钙原子数密度 (其中 LT0 点之前属于 1 月 12 日, LT0 点之后属于 1 月 13 日)

Fig. 4 Calcium atomic density observed at night in Yanqing area on January 12, 2022 (Before LT0 = January 12, after LT0 = January 13)

### 2.2 漠河钙原子数密度和延庆钙原子数密度比较

图 4 所示为同样在冬季 (2022 年 1 月 12 日) 观测到的夜间延庆地区钙原子数密度随时间高度的演化, 其空间分辨率为 96 m, 时间分辨率为 1.1 min. 从图中可以看出背景钙原子层主要分布在

80~100 km, 峰值密度出现在 83.7 km 附近, 大约是  $4.4 \text{ cm}^{-3}$ . 从开机到 0 点, 在 82~93 km 出现了突发钙原子层, 其峰值高度出现在 92.4 km 附近, 峰值密度可以达到  $15.06 \text{ cm}^{-3}$ , 这与图 3 的漠河钙原子数密度图像具有相似的特征, 但是能够明显看出延庆地区的钙原子数密度小于漠河地区的钙原子数密度.

### 2.3 漠河钙原子数密度和其他台站的钙原子数密度比较

除了漠河和延庆地区以外, 主要有以下台站开展过钙原子观测, 包括德国 Kuhlungsborn 和法国的 Observatoire de Haute Provence, 表 2 罗列了这些台站钙原子观测研究的主要结论. 漠河钙原子数密度和德国 Kuhlungsborn 的钙原子数密度接近, 比法国的 Observatoire de Haute Provence 台站的钙原子数密度大.

表 2 其他台站的钙原子观测研究

Table 2 Calcium atom observations at other stations

文献	地理位置	观测时间	主要结论
Granier et al., 1989	法国 Observatoire de Haute Provence (44°N, 6°E)	1983—1984年 14个夜晚	钙原子峰值密度的均值约为 $22 \text{ cm}^{-3}$
Gerding et al., 2000	德国 Kühlungsborn (54°N, 12°E)	1996-12—1998-12 Ca: 112个夜晚	钙原子层季节变化特征: 夏季密度最大, 秋冬次大. 钙原子的峰值密度约为 $40 \text{ cm}^{-3}$
Gerding et al., 2001	德国 Kühlungsborn (54°N, 12°E)	1997-03-04—1997-08-02 Ca: 7个夜晚	钙原子平均密度约为 $17 \text{ cm}^{-3}$

## 3 钙流星尾迹的激光雷达观测研究

每天大约有 100 吨的流星体物质从外太空注入地球大气, 在和大气摩擦的过程中加热蒸发, 在 80~105 km 的中层顶区域形成 Na、Li、Ca、K、Fe 等元素的金属层 (Plane, 1991; Plane et al., 2015). 多年来, 人们已经提出了多种突发层形成机制, 但是尚未有一种机制能完全解释观测到的所有突发层现象. 曾令旗等 (2011) 分别从 260 小时的铁光子计数剖面 and 320 小时的钠光子计数剖面里筛选出了 155 个铁尾迹和 136 个钠尾迹, 铁、钠流星尾迹的出现率分别为每小时 0.6 和每小时 0.42, 分别给出了铁、钠尾迹的高度分布, 发现多数尾迹, 特别是峰值密度大的尾迹, 倾向于出现在常规金属层的峰值附近, 而相对较弱的尾迹倾向于出现在常

规金属层的顶部和底部.

在对 2023 年 1 月 9 日至 1 月 14 日共计 1252 个钙原子数密度廓线的分析中, 我们发现了 43 个钙流星尾迹, 其中 1 月 12 日至 13 日共有 36 例, 1 月 13 至 14 日共有 7 例, 其特点是钙原子数密度突然增大且覆盖的高度范围小于 500 m, 并且同一个钙流星尾迹只在一个密度剖面上可见, 其中在 2023 年 1 月 13 日 22:13 LT 时刻在 88.7 km 处的钙原子数密度最大, 达到了  $133.24 \text{ cm}^{-3}$ , 如图 5 所示. 除此之外, 还发现在 2023 年 1 月 13 日 19:40 LT 时刻, 钙流星尾迹出现在了 95.8 km 处, 是这 43 个钙流星尾迹所出现的最高的高度, 如图 6 所示. 从这些钙流星尾迹的数据研究发现, 钙流星尾迹往往出现在金属层的峰值附近, 并且在 2023 年 1 月 13 日 1:25 LT、3:04 LT、4:46 LT 均出现了钙流星尾迹, 其中 1:25 LT 的钙流星尾迹出现在 87.1

km 附近, 钙原子数密度为  $52.57 \text{ cm}^{-3}$  左右, 3:04 LT 的钙流星尾迹出现在 80.4 km 附近, 钙原子数密度为  $52.8 \text{ cm}^{-3}$  左右, 4:46 LT 的钙流星尾迹出现在 86.7 km 附近, 钙原子数密度为  $52 \text{ cm}^{-3}$  左右, 而在 2.1 节中我们提到了在 1:25 LT、3:04 LT、4:46 LT 等时刻附近, 出现了短暂的密度激增现象, 并且与钙流星尾迹出现的高度和时间相同, 这表明钙流星尾迹可能是引起图 3 后半夜钙原子数密度激增的原因.

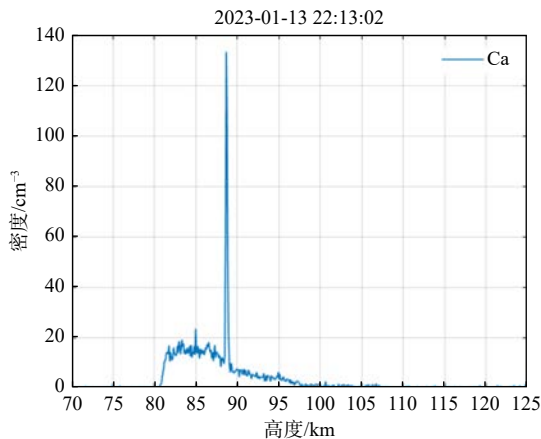


图 5 2023 年 1 月 13 日 22:13 的钙原子数密度廓线

Fig. 5 Calcium atomic density profile at 22:13 on January 13, 2023

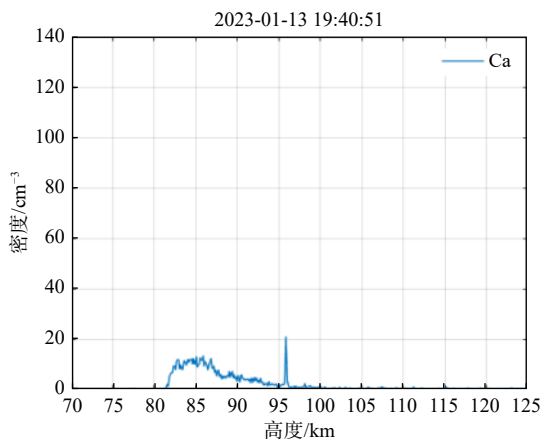


图 6 2023 年 1 月 13 日 19:40 的钙原子数密度廓线

Fig. 6 Calcium atomic density profile at 19:40 on January 13, 2023

## 4 讨论与结论

本文介绍了子午工程二期漠河钙原子激光雷达探测的结果, 漠河钙原子探测激光雷达采用的空间分辨率为 30 m, 时间分辨率为 1.1 min, 在这种高时空分辨率的情况下, 得到了高信噪比原始光子数, 漠河 2023 年 1 月 12 日夜间的背景钙原子峰值密度

达到了  $33.55 \text{ cm}^{-3}$  左右, 而且这一天的突发钙原子峰值密度达到大约  $53.64 \text{ cm}^{-3}$ , 与漠河纬度相似的德国 Kuhlungsborn ( $54^\circ\text{N}$ ,  $12^\circ\text{E}$ ) 观测得到的钙原子峰值密度与其比较接近 (大约为  $40 \text{ cm}^{-3}$ , Gerding et al., 2000). 与漠河同一天但是不同年份的延庆的背景钙原子峰值密度为  $4.4 \text{ cm}^{-3}$  左右, 其在这一天的突发钙原子峰值密度大约为  $15.06 \text{ cm}^{-3}$ , 而漠河与延庆钙原子数密度大小的不同, 与龚少华等 (2013) 提出的随着纬度的升高, 钠层平均密度逐渐升高相对应, 而这还需要长期、深入地观测, 积累更多的观测数据进行日变化、季节变化、年变化的研究. 在对漠河数据处理的过程中, 我们还发现了流星尾迹, 对于流星尾迹的观测, 可以对未来突发金属层的机制进行深入研究, 也为以金属原子作为示踪物研究中高层大气的结构和变化特征提供理论基础, 对于理解发生在这个区域中的基本物理、化学过程具有重要意义, 对于研究宇宙起源与演化也将有更为深远的影响. 目前, 漠河钙激光雷达对于离子的探测仍然处于建设阶段, 这将在之后的研究中进行讨论.

## 致谢

本文使用国家重大科技基础设施子午工程科学数据, 在此表达由衷的感谢. 感谢评审专家在百忙之中提出的宝贵建议以及编辑给予的帮助.

## References

- Alpers M, Höffner J, Zahn U V. 1996. Upper atmosphere Ca and Ca+ at mid-latitudes: First simultaneous and common-volume lidar observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 23(5): 567-570.
- Gardner C S, Kane T J, Senft D C, et al. 1993. Simultaneous observations of sporadic E, Na, Fe, and Ca+ layers at Urbana, Illinois: Three case studies[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D9): 16865-16873.
- Gerding M, Alpers M, Zahn V, et al. 2000. Atmospheric Ca and Ca+ layers: Midlatitude observations and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(A12): 27131-2714.
- Gerding M, Alpers M, Höffner J, Zahn V. 2001. Sporadic Ca and Ca+ layers at mid-latitudes: Simultaneous observations and implications for their formation[J]. *Annales Geophysicae*, 19: 47-58.
- Gong S H, Yang G T, Xu J Y, et al. 2013. Study on night and seasonal variation characteristics of Na layer in different latitude background in China using Lidar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(8): 2511-2521 (in Chinese).
- Granier G, Jégou J P, Mégie G. 1985. Resonant lidar detection of Ca and Ca+ in the upper atmosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 12(10): 655-658.
- Granier C, Jégou J P, Mégie G. 1989. Atomic and ionic calcium in the

- Earth's upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94(D7): 9917-9924.
- Jiao J, Chu X, Jin H, et al. 2022. First Lidar profiling of meteoric Ca<sup>+</sup> ion transport from ~80 to 300 km in the midlatitude nighttime ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(18): e2022GL100537.
- Plane J. 1991. The chemistry of meteoric metals in the Earth's upper atmosphere[J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 10(1): 55-106.
- Plane J, Feng W, Dawkins E. 2015. The mesosphere and metals: Chemistry and changes[J]. *Chemical Reviews*, 115(10): 4497.
- Tepley C A, Raizada S, Zhou Q H, Friedman J S. 2003. First simultaneous observations of Ca<sup>+</sup>, K, and electron density using lidar and incoherent scatter radar at Arecibo[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(30): 91-94.
- Wan W X, Xu J Y. 2014. Recent investigation on the coupling between the ionosphere and upper atmosphere[J]. *Science China Earth Sciences*, 57(9): 1995-2012.
- Yi F, Zhang S, Yu C, et al. 2013. Simultaneous and common-volume three-lidar observations of sporadic metal layers in the mesopause region[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 102: 172-184.
- Yiğit E, Medvedev A S. 2015. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere[J]. *Advances in Space Research*, 55(4): 983-1003.
- Yiğit E, Koucká K P, Georgieva K, Ward W. 2016. A review of vertical coupling in the atmosphere-ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 141: 1-12.
- Zeng L Q. 2011. Study on the observation of iron and sodium meteor wakes by Lidar and the observation technology of sodium layer in the whole sky[D]. Wuhan: Wuhan University (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 龚少华, 杨国韬, 徐寄遥, 等. 2013. 中国不同纬度背景 Na 层夜间和季节变化特征的激光雷达研究[J]. *地球物理学报*, 56(8): 2511-2521.
- 曾令旗. 2011. 铁、钠流星尾迹的激光雷达观测研究及钠层全天时观测技术 [D]. 武汉: 武汉大学.

李磊, 陈涛, 王诗涵, 提烁, 蔡春林, 李文, 罗静. 2024. 子午工程二期大气电场仪及其初步观测. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 138-143. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-005.

Li L, Chen T, Wang S H, Ti S, Cai C L, Li W, Luo J. 2024. Chinese Meridian Project near-surface atmospheric electric field observations. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 138-143 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-005.

## 子午工程二期大气电场仪及其初步观测

李磊<sup>1,2</sup>, 陈涛<sup>1\*</sup>, 王诗涵<sup>1,2</sup>, 提烁<sup>1</sup>, 蔡春林<sup>1</sup>, 李文<sup>1</sup>, 罗静<sup>1</sup>

1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 大气电场是大气科学和空间物理学中共同的一个重要电学参量, 大气电场的变化代表着全球大气电路和近地面大气电荷分布状态, 其变化同时受到气象活动、地质活动和太阳活动影响. 大气电场的平均日变化特点代表着平静时期该地区近地面大气电场的平均值, 这对于研究不同纬度地区近地面大气电场由于地质活动或太阳活动引起的扰动具有重要意义. 为实现对日地空间环境全圈层、多要素综合的立体式探测, 子午工程在两极、中国多个地区建成了多个大气电场观测台站, 本文主要介绍子午工程中的大气电场观测, 包括场磨式大气电场仪及其数据格式, 展示了子午工程建设的西藏噶尔站 2021 年 11 月至 2022 年 10 月一年期间的晴天大气电场平均日变化, 并对其进行了分析以及与“卡耐基曲线”的比较.

**关键词:** 子午工程; 大气电场; 地基观测

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-005

中图分类号: P353

文献标识码: A

## Chinese Meridian Project near-surface atmospheric electric field observations

Li Lei<sup>1,2</sup>, Chen Tao<sup>1\*</sup>, Wang Shihan<sup>1,2</sup>, Ti Shuo<sup>1</sup>, Cai Chunlin<sup>1</sup>, Li Wen<sup>1</sup>, Luo Jing<sup>1</sup>

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The near-surface atmospheric electric field is an important parameter in disciplines such as space physics and atmospheric science. Variations in the atmospheric electric field represent the state of the global atmospheric circuit and charge distribution in the near-surface atmosphere, which is affected jointly by meteorological activities (including precipitation, wind speed, relative humidity, and lightning), geological activities (earthquakes, landslides, mudslides, etc.), and solar activities (including solar flares, geomagnetic activities, coronal mass ejections, and high-energy proton events). The atmospheric electric field's near-surface average value in a specific region during the calm period is represented by its average daily variation characteristics. This average value is important to study the fluctuations in the near-surface atmospheric electric field at different latitudes, which are caused by geological or solar activities. To realize the three-dimensional detection of the whole circle and multiple elements of the solar-terrestrial space environment, several atmospheric electric field observation stations were built under the Meridian Project at the poles and several regions in China. The present study introduces observations made at seven such stations. It mainly included observations by the field-mill-type atmospheric electric field instru-

收稿日期: 2023-02-08; 录用日期: 2023-04-03

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA17010301, XDA15052500, XDA15350201); 国家自然科学基金资助项目 (41874175, 41931073)

Supported by the Strategic Pioneer Program on Space Science, Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. XDA17010301, XDA15052500, XDA15350201), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41874175, 41931073)

第一作者: 李磊 (1997-), 男, 博士研究生, 主要从事近地面大气电场的研究. E-mail: lilei@swl.ac.cn

\*通信作者: 陈涛 (1961-), 男, 研究员, 主要从事大气电场、电离层电场、辐射带电场的探测以及空间等离子体波与带电粒子的相互作用、空间天气与全球变化关系等研究. E-mail: tchen@nssc.ac.cn



ment, the data format, and information on clear days during November 2021-October 2022 at the Tibet Gar Station. The average daily variation in the atmospheric electric field during this one-year period was analyzed. Finally, the comparison of the average daily atmospheric electric field curve with the standard "Carnegie curve" was discussed.

**Keywords:** Chinese Meridian Project; atmospheric electric field; ground-based observation

## 0 引言

大气电场 (atmospheric electric field) 是描述近地面空间环境静电特性的物理参数, 反映近地表大气环境中静电荷分布. 大气电场的变化不仅受局部气象条件的影响, 而且也会被地质条件、太阳活动、自然灾害等影响 (Gurmani et al., 2018; 黄钰等, 2018; 言穆弘和肖庆复, 1990; 张华明等, 2013; 张义军和孟青, 1998; 周筠珺等, 2000). 实时探测大气电场的时空变化特性, 不仅能够用于大气电学相关领域的科学研究, 而且能够用来预警雷暴活动 (卢炳源, 2012; 马启明, 2014; 吴明江等, 2010), 还能够研究太阳活动期间近地面大气电场的变化 (Anisimov et al., 2021; Smirnov, 2014; Tacza et al., 2018). 由于大气电场的变化与气象条件密切相关, 因此可被分为两类: 正常大气电场和扰动天气大气电场 (包括雨、雪、多风、尘土飞扬等). 在晴天天气条件下, 在全球大气电回路中, 地球表面是带有负电荷的良导体, 而电离层是部分电离、带有正电荷的大气区域. 因此, 在地球表面和电离层之间, 存在一个从电离层垂直指向地面的电场, 称为晴天大气电场, 这个方向 (垂直向下) 也被定义为大气电场的正方向 (孙景群, 1987), 本文介绍的大气电场就是垂直方向上的大气电场.

全球电离层与地球表面之间电势差的日变化导致电流密度变化, 从而影响任何位置观测到的大气电场. 在海洋上对流没有日变化的情况下, 大气电场的日变化与电离层电势的日变化相同, 最大值大约出现在 20 UT (世界时), 最小值大约在 4 UT, 即“卡耐基曲线” (Carnegie Curve, Harrison, 2013). 晴天大气电场的日变化可以与“卡耐基曲线”比较, 进而分析局部地质、空间天气等因素对大气电场信号的调制作用. Afreen 等 (2022) 研究了 Gulmarg 站 (34°05'N, 74°42'E) 2019 年 6 月至 2020 年 5 月期间的大气电场数据, 筛选平均后, 他们得到了该地区近地面晴天大气电场的基准曲线, 并与其他地区的气象参数、氡浓度和电场基准曲线进行了比较. 类似地, 张祎等 (2015) 也对欧亚大

陆 9 个观测点的晴天大气电场进行了分析, 结果显示, 晴天大气电场的日变化主要分为单峰和双峰两类. 此外, 冬季恶劣天气的大气电场强度明显高于夏季. 吴亭等 (2009) 利用 2004 年 8 月至 2005 年 11 月北京大学物理楼屋顶的数据, 讨论分析了不同天气条件下近地表大气电场的特征. 他们得出的结论是, 在晴天条件下, 北京地区的近地面大气电场日变化曲线显示出“双峰双谷”的特征, 双谷出现在 5 LT 和 12 LT, 峰值出现在 7 LT 和 23 LT.

为了对地球表面 20~30 km 以上到几百千米的中高层大气、电离层和磁层实现连续监测, 并且实现对日地空间环境全圈层、多要素综合的立体式探测, 我国在东经 120°子午线附近建成一个运用地磁 (电)、无线电、光学和探空火箭等多种手段, 连续监测电离层、磁层和行星际空间中的有关物理参数, 被命名为“子午工程” (Wang, 2010; Wang et al., 2020). 大气电场探测作为子午工程中的一部分, 计划在北极黄河站、南极中山站、西藏噶尔站等多个台站实时连续大气电场长期观测, 目前已建成的 7 个大气电场观测台站如图 1 所示, 包括: 南极中山站 (76.4°E, 69.4°S)、肇庆站 (112.4°E, 23.0°N)、郟县站 (103.7°E, 30.9°N)、应城站 (114.5°E, 35.0°N)、阿里地区噶尔站 (80.1°E, 32.5°N)、农安站 (124.9°E, 44.1°N)、漠河站 (122.4°E, 53.5°N).

本文主要介绍子午工程二期所使用的场磨式大气电场仪, 并展示西藏噶尔站 2021 年 11 月至 2022 年 10 月一年期间的晴天大气电场平均日变化, 与“卡耐基曲线”进行了比较.

## 1 大气电场仪

对近地面大气电场的探测方法多种多样 (李中富, 2018; 罗福山等, 2004), 目前使用最广泛的方法是磨式电场仪 (EFM), 它能够完全暴露在环境电场中. 磨式大气电场仪通常由一个或多个电极组成, 交替屏蔽或暴露在环境电场中. 子午工程中用于大气电场探测的电场仪是场磨式大气电场仪 (EFM 100), 其基本原理是导体表面感应电荷测



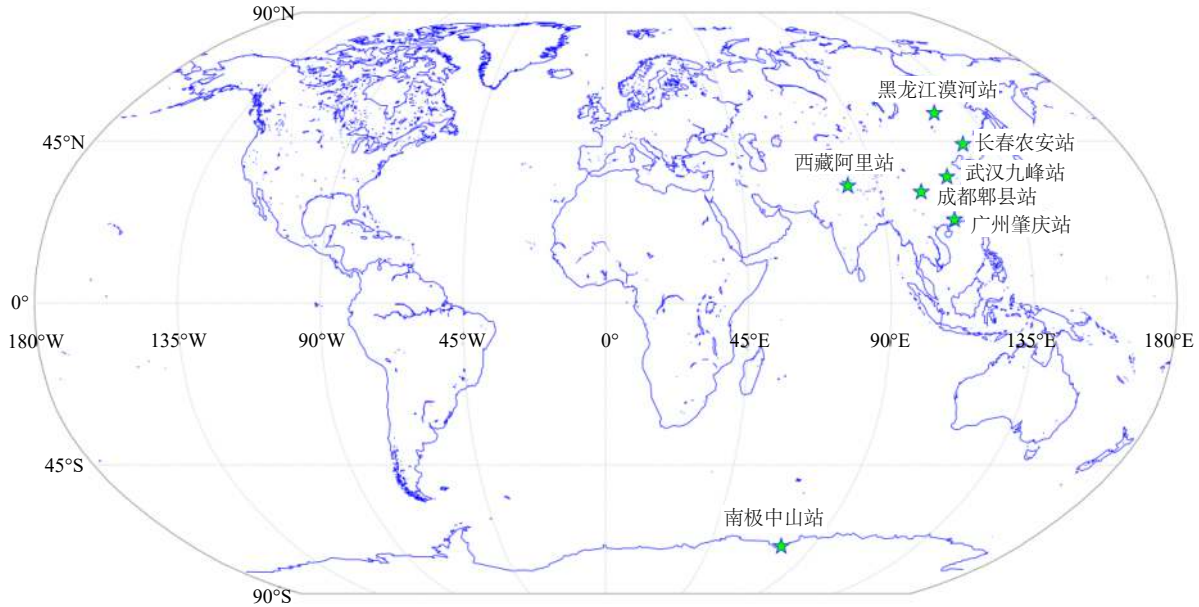


图 1 子午工程已建成大气电场观测站分布地图

Fig. 1 Map of the completed Chinese Meridian Project atmospheric electric field observation stations

量法, 即利用导体在电场中产生的感应电荷来测量大气电场. 这是基于旋转一个固定的速度, 这样相同形状的定子定期暴露在环境电场. 然后, 测量在定子上产生的感应电流, 可以将其转换为大气电场值.

子午工程中使用的场磨式大气电场仪示意图如图 2 所示, 其中包含了大气电场探头示意图, 两组相同形状的扇形叶片就是感应片 (定子) 与转子, 当环境电场作用在感应片 (定子) 上的时候, 在感应片上会感应出电荷. 当定子与转子完全重合时, 感应片上的电荷为零, 当转子不停地旋转, 感应片

就会持续输出交流信号, 这一交流信号的幅值和电场强度呈线性比例关系. 感应片直接输出得到的是交流电流信号, 经过前置放大电路的 I-V (电流-电压) 转换以后得到了一个交流电压信号. 感应信号是一个正弦变化的波形, 测量仪器可通过测量电流的大小进而推得电场的大小. EFM 100 的测量范围为  $\pm 50$  kV/m, 测量精度为  $< 5\%$ , 数据时间间隔为 1 s, 线性度  $< 1\%$ .

如图 2 所示, EFM 100 的高度为 1.5 m, 外壳是绝缘和接地的, 仪器采用 GPS 卫星授时. 由上到下依次为: 大气电场探头 (实时探测垂直方向上的大气电场强度)、数传天线 (数据发送)、太阳能电池板 (供电)、电子学箱 (综合处理及外在防护作用)、支撑杆及底座. 其中电子学箱内包括开关、蓄电池、核心电路板 (处理、整理数据)、电路保护模块 (在极端情况下保护电路)、4G DTU 通讯模块 (对处理好的数据进行实时传输). 打开开关, 太阳能板将太阳能转化为电能, 并储存在蓄电池中, 由蓄电池给电路提供 12 V 的直流电源, 大气电场探头中的内部转子开始旋转, 实时探测大气电场数值, 经过电子学箱内核心电路的处理、整合后, 由 4G 通讯模块和数传天线将数据上传到服务器, 电脑可以利用软件获取实时数据.

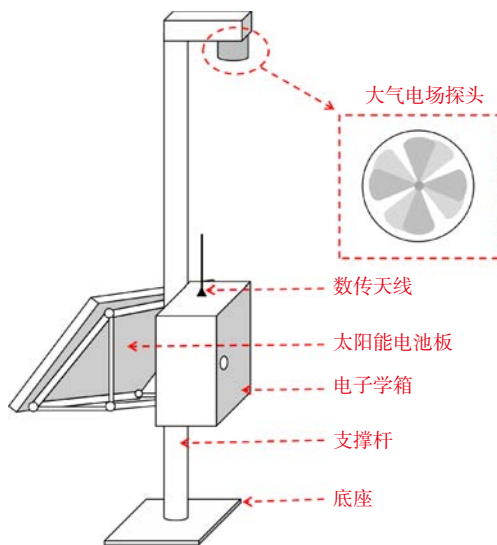


图 2 场磨式大气电场仪 EFM 100 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the EFM 100 (atmospheric electric field meter)

为确保大气电场仪探测的有效性和可靠性, 对大气电场探头的标定十分重要, 本文中介绍的 EFM 100 定标结果在 Li 等 (2022) 中给出. 标定系统由电场屏蔽罩、直流可调电源、接收数据电脑、

RS485 通讯模块组成. 电场屏蔽罩的内部包含上、下两个电极, 用于产生恒稳直流电场, 直流可调电源用以产生周期性变化直流电压. RS485 通讯模块用于电场数据通讯传输. 将电场屏蔽罩的上、下两个电极分别接直流电源的正、负极, 以产生恒稳直流电场, 将电场探头通电, 然后将 RS485 通讯模块分别与电场探头和电脑连接好, 检查电脑是否正常接收数据. 最后调节加在两个电极的电源电压参数, 利用公式  $E=U/d$  ( $E$  为理想电场值,  $U$  为直流电压,  $d$  是上、下两电极之间的距离) 计算得理想电场数值, 可以与实验结果相比较.

这些仪器在用于长期测量实验之前已经经过校准, 但在长期观测实验中仍存在许多不可避免的误差. 首先, 定子和转子旋转产生的感应电流较弱, 很容易受到环境因素的干扰. 其次, 由于电路器件的限制, EFM 100 的测量精度、线性度、分辨力和

稳定性都有限, 电源电压输出不稳定也可能会导致转子转速的不稳定. 最后, 由于长期测量的持续时间, 许多带电的冰或尘埃颗粒将停留在仪表的定子和转子上, 从而导致测量的电场值出现误差.

## 2 数据样本描述

数据文件由数据项组成, 数据项按照时间先后顺序由各个时刻的观测值连续分行排列组成, 每个时刻观测值包含观测时间、电场值两个变量, 观测值采用七位空格为分隔符, 浮点类型, 有效数据保留 3 位小数, 格式说明如表 1 所示. 表 2 给出了西藏噶尔站 2021 年 11 月 1 日的大气电场测量数据样例, 数据采样的时间精度为 1 s, 即每秒一个数据, 一天共测量 86400 个数据, 第一列为时间 (hh:mm:ss), 第二列为测量的电场值 (kV/m).

表 1 大气电场数据格式说明

Table 1 Description of the atmospheric electric field data formats

行号	数据项中文名	数据项英文名	数值范围	物理单位	记录格式
01	时	Hour	0~23	h	I2
02	冒号	Colon	/	/	A1
03	分	Minute	0~59	min	I2
04	冒号	Colon	/	/	A1
05	秒	Second	0~59	s	I2
06	电场	Electric Field	-50~50	kV/m	以7个空格为分隔符

表 2 西藏噶尔站 2021 年 11 月 1 日大气电场数据示例

Table 2 Example of atmospheric electric field data obtained from the Tibet Gar Station on November 1, 2021

时间	电场	时间	电场	时间	电场
00:00:01	0.49	11:59:59	0.51	18:00:03	0.495
00:00:02	0.488	12:00:00	0.51	...	...
00:00:03	0.488	12:00:01	0.507	23:59:56	0.45
00:00:04	0.488	...	...	23:59:57	0.45
00:00:05	0.488	18:00:01	0.505	23:59:58	0.45
...	...	18:00:02	0.502	23:59:59	0.447

大气电场数据可与电磁脉冲数据 (当地的实时电磁脉冲强度值, 对应雷电活动发生的时间和具体强度) 相结合, 当出现大的脉冲波动时, 可以对电磁脉冲信号进行监测和定位, 利用电磁脉冲数据对雷电期间的时间段进行标注 (陈奇东等, 2020), 然后与该时间段的大气电场数据进行标注和比对.

## 3 西藏噶尔站电场观测

西藏阿里地区位于青藏高原北部, 是近地面观

测理想的实验场地. 子午工程科研团队于 2021 年 10 月 10 日在西藏阿里地区噶尔县狮泉河镇阿里地震台 (80.1°E, 32.5°N, 海拔 4259 m) 的主楼楼顶上安装了一台 EFM 100 场磨式大气电场仪, 试运行 20 天 (2021 年 10 月 30 日试运行结束). 基于 Harrison 和 Nicoll (2018) 对于大气电测量中的晴天标准, 本文中采取的晴天筛选标准为: (1) 最大相对湿度低于 95%; (2) 平均风速低于 8 m/s; (3) 降水量始终为 0 mm; (4) 大气电场分钟均值在 0~1000 V/m 范围内. 通过对西藏噶尔站 2021

年 11 月至 2022 年 10 月期间大气电场的数据分析, 最终筛选出 153 个晴天, 将它们计算日变化平均, 得到大气电场的日变化曲线如图 3a 所示. 蓝色曲线表示晴天大气电场的分钟变化曲线, 灰色部分表示对应时刻大气电场变化的四分位. 由图 3a 可以看出, 西藏噶尔站的晴天大气电场日变化呈现单峰单谷的变化规律, 其峰谷值分别出现在 8 LT 和 11 LT, 这与该地区远离污染、远离气溶胶源的特点有关. 0~8 LT, 随着温度的升高和日出, 近地表的气溶胶浓度被输送到高空, 大气电场缓慢下降. 8~11 LT, 由于随着太阳加热地面, 带电的气溶胶层上升到山顶, 在“交换层”效应作用下 (Yaniv et al., 2017), 大气电场显著增大. 11~24 LT, 由于热对流和湍流的垂直输送, 近地表气溶胶浓度出现下降, 晚上趋于稳定, 大气电场与气溶胶浓度变化一致. 西藏噶尔站的总大气电场平均值为 0.263 kV/m, 这超出了平原地区的晴天大气电场正常范围, 这是由于高海拔地区的等势线被压缩所导致 (孙景群, 1987).

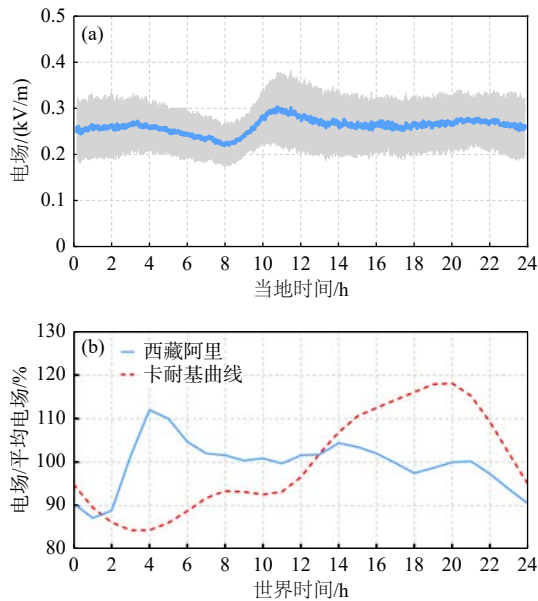


图 3 西藏噶尔站晴天大气电场平均日变化曲线

Fig. 3 Average daily variation in the fair atmospheric electric field at Tibet Gar Station

将晴天大气电场平均值 (晴天大气电场平均日变化得到的所有数值的总平均值) 作为 100%, 晴天大气电场的逐小时平均日变化与该平均值的比值如图 3b 所示, 红色虚线为标准的“卡耐基曲线” (Harrison, 2013). 通过对比发现, 两条曲线变化幅度接近, 西藏噶尔站的晴天大气电场日变化曲线变化幅度与标准曲线接近, 这是因为西藏噶尔站远

离污染源. 但它们之间的峰谷值对应时间差异大, 其原因主要是: (1) 西藏噶尔站存在日出日落效应, 而“卡耐基曲线”是在海洋上观测得到的全球平均变化, 由于气溶胶和电极效应 (Mkrtchyan et al., 2020), 导致两者的电场变化不同; (2) 与“卡耐基曲线”在海洋上观测不同, 西藏噶尔站是在陆地地面观测, 地下氡元素等放射性物质会影响大气电场变化.

## 4 结 论

本文主要介绍了子午工程中的大气电场观测, 包括场磨式大气电场仪、数据格式、西藏噶尔站为例得到的晴天大气电场日变化曲线. 之后, 研究人员将更深入研究太阳事件 (包括太阳耀斑、日冕物质抛射、太阳质子事件) 如何影响不同纬度、不同地区的大气静电场特性, 以及太阳风如何通过磁层、电离层相互作用来影响大气电场的物理机制.

子午工程的建成开启了我我国空间环境地基探测的新阶段, 其产出的科学数据支持了大量高水平的科学研究. 目前正在建设子午工程二期, 增加了对太阳的直接观测, 未来对空间环境的探测将更加立体、更加全面.

## 数据与来源

西藏阿里台的 2021 年 11 月至 2022 年 10 月期间大气电场数据可从数据集 (doi: [10.57760/sciencedb.07234](https://doi.org/10.57760/sciencedb.07234)) 下载.

## 致谢

感谢西藏阿里地震台提供场地和安装帮助, 感谢子午工程的支持.

## References

- Afreen S, Victor J, Nazir S, et al. 2022. Fair-weather atmospheric electric field measurements at Gulmarg, India[J]. *Journal of Earth System Science*, 131(1): 1-19. DOI: [10.1007/s12040-021-01745-5](https://doi.org/10.1007/s12040-021-01745-5).
- Anisimov S V, Shikhova N M, Kleimenova N G. 2021. Response of a magnetospheric storm in the atmospheric electric field of the mid-latitudes[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 61(2): 180-190.
- Chen Q D, Liu R, Liu Y, et al. 2020. LF/VLF electromagnetic pulse measurement system[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 35(5): 791-798 (in Chinese).
- Gurmani S F, Ahmad N, Tacza J, et al. 2018. First seasonal and annual variations of atmospheric electric field at a subtropical station in Islamabad, Pakistan[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 179: 441-449.

- Harrison R G. 2013. The Carnegie Curve[J]. *Surveys in Geophysics*, 34(2): 209-232. DOI: 10.1007/s10712-012-9210-2.
- Harrison R G, Nicol K A. 2018. Fair weather criteria for atmospheric electricity measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 179: 239-250.
- Huang Y, Wu A K, Zhang S X. 2018. Influence of environmental features on the atmospheric electric field and correction[J]. *Electronic Measurement Technology*, 41(1): 35-38 (in Chinese).
- Li L, Chen T, Ti S, et al. 2022. Fair-weather near-surface atmospheric electric field measurements at the Zhongshan Chinese Station in Antarctica[J]. *Applied Sciences*, 12(18): 9248.
- Li Z F. 2018. Design of digital atmospheric electric field instrument based on FPGA[J]. *Technology and Innovation*, 22: 136-137 (in Chinese).
- Lu B Y. 2012. The research on the application of the data of atmospheric electric field in lightning warning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology (in Chinese).
- Luo F S, He Y H, Zhang J, et al. 2004. The new inverted electric field mill[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 24(6): 470-474 (in Chinese).
- Ma Q M. 2014. Principle and Technology of Lightning Monitoring[M]. Beijing: Science Press, 3-5 (in Chinese).
- Mkrtychyan H, Karapetyan G, Aslanyan D. 2020. Atmospheric electric field variations during fair weather and thunderstorms at different altitudes[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 211: 105452.
- Smirnov S. 2014. Reaction of electric and meteorological states of the near-ground atmosphere during a geomagnetic storm on 5 April 2010[J]. *Earth, Planets and Space*, 66(1): 1-8.
- Sun J Q. 1987. Basics of Atmospheric Electricity [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Tacza J, Raulin J P, Mendonca R R, et al. 2018. Solar effects on the atmospheric electric field during 2010-2015 at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(21): 11970-11979.
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. *Space Weather*, 8: S08001. DOI: 10.1029/2010SW000603.
- Wang C, Chen Z Q, Xu J Y. 2020. Introduction to Chinese Meridian Project-Phase II[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 40(5): 718-722. DOI: 10.11728/cjss2020.05.718.
- Wu M J, Du L P, Chen Y B, et al. 2010. Research on the characteristics of atmospheric electric field and lightning early warning technology[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 27(1): 10-14 (in Chinese).
- Wu T, Lü W T, Liu X Y, et al. 2009. Characteristics of near-ground atmospheric electric fields under different weather conditions in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 20(4): 394-401 (in Chinese).
- Yan M H, Xiao Q F. 1990. Analysis of the characteristics of the atmospheric electric field in the western Pacific Ocean from September to November in 1988[J]. *Plateau Weather*, 9(4): 395-404 (in Chinese).
- Yaniv R, Yair Y, Price C, et al. 2017. Ground-based measurements of the vertical E-field in mountainous regions and the "Austausch" effect[J]. *Atmospheric Research*, 189: 127-133.
- Zhang H M, Zhang Y J, Yang S G, et al. 2013. Atmospheric electric field and its relationship with air pollutants in Taiyuan area[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 36(9): 66-69 (in Chinese).
- Zhang Y, Zhang W B, Wang Z H, et al. 2015. Analysis of fair-weather atmospheric electric field over Eurasian Continent[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 38(5): 703-709 (in Chinese).
- Zhang Y J, Meng Q. 1998. Atmospheric electricity characteristics in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Plateau Weather*, 17(2): 135-141 (in Chinese).
- Zhou Y J, Chen C P, Liu L P, et al. 2000. Atmospheric electric field in hail weather system in Naqu area of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Plateau Weather*, 19(3): 339-347 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈奇东, 刘睿, 刘杨, 等. 2020. 低频/甚低频电磁脉冲测量系统研究[J]. *电波科学学报*, 35(5): 791-798.
- 黄钰, 吴安坤, 张淑霞. 2018. 场地环境对大气电场测量的影响及修正[J]. *电子测量技术*, 41(1): 35-38.
- 李中富. 2018. 基于FPGA数字式大气电场仪的设计[J]. *科技与创新*, 22: 136-137.
- 卢炳源. 2012. 大气电场数据在雷电预警中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学.
- 罗福山, 何渝晖, 张健, 等. 2004. 新型倒装式旋转电场仪[J]. *空间科学学报*, 24(6): 470-474.
- 马启明. 2014. 雷电监测原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 3-5.
- 孙景群. 1987. 大气电学基础[M]. 北京: 气象出版社.
- 吴明江, 杜莉萍, 陈勇斌, 等. 2010. 大气电场的特征及雷电预警技术研究[J]. *气象水文海洋仪器*, 27(1): 10-14.
- 吴亭, 吕伟涛, 刘晓阳, 等. 2009. 北京地区不同天气条件下近地面大气电场特征[J]. *应用气象学报*, 20(4): 394-401.
- 言穆弘, 肖庆复. 1990. 1988年9—11月西太平洋海区大气电场特征分析[J]. *高原气象*, 9(4): 395-404.
- 张华明, 张义军, 杨世刚, 等. 2013. 太原地区大气电场及其与大气污染物关系[J]. *环境科学与技术*, 36(9): 66-69.
- 张祎, 张卫斌, 王振会, 等. 2015. 欧亚大陆晴天大气电场变化特征统计分析[J]. *大气科学学报*, 38(5): 703-709.
- 张义军, 孟青. 1998. 青藏高原东部地区的大气电特征[J]. *高原气象*, 17(2): 135-141.
- 周筠筠, 陈成品, 刘黎平, 等. 2000. 青藏高原那曲地区冰雹天气系统中的大气电场[J]. *高原气象*, 19(3): 339-347.

吴叩天, 徐小航, 姜俊南, 沈敖. 2024. 探索空间奥秘, 开启科研之旅——2022 年空间科学与技术专业实践教育后记. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(1): 144-152. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-019.

Wu K T, Xu X H, Jiang J N, Shen A. 2024. A summary report on the Space Physics practical education in 2022. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(1): 144-152 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-019.

## 探索空间奥秘, 开启科研之旅 ——2022 年空间科学与技术专业实践教育后记

吴叩天\*, 徐小航, 姜俊南, 沈敖

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

**摘要:** 空间科学与技术专业实践教育对于本科生空间物理学习具有重要意义. 近年来, 中国科学技术大学地球和空间科学学院空间科学与技术专业基于国家大型空间环境地基综合监测系统——子午工程的链条观测优势, 开展全方位、多角度的本科生暑期专业实践教育. 在实践教育中, 老师们生动详实地为同学们讲解实习的各项内容, 带领同学们学习观测数据的处理与分析, 并且参观子午工程台站; 同学们使用多种观测设备, 学习了光学、无线电和磁场等不同探测技术, 了解了不同探测仪器的探测原理, 掌握了科研软件的使用方法, 并可视化分析空间天气事件期间近地空间环境的变化特征. 最后, 同学们还进行了实践教育总结汇报. 通过参加空间科学与技术专业实践教育, 同学们真正接触科研工作, 成功地克服了初次尝试科研时的“忐忑不安”, 不仅提升了自主学习、小组分工合作等实践能力和科学素养, 而且开阔了眼界, 为更深入地了解空间物理学打下基础.

**关键词:** 实践教育; 空间物理; 子午工程

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-019

中图分类号: P35

文献标识码: B

### A summary report on the Space Physics practical education in 2022

Wu Koutian\*, Xu Xiaohang, Jiang Junnan, Shen Ao

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract:** Hands-on education is of great importance for undergraduate students studying Space Physics. In recent years, the School of Earth and Space Sciences at the University of Science and Technology of China has conducted extensive undergraduate summer professional practical education based on the advantages of the Chinese Meridian Project's chain observation. Teachers guide students in learning about the processing and analysis of observation data, take them to the Chinese Meridian Project sites, and thoroughly explain to them the numerous facets of practical education. Students learn many detecting technologies, including optical, radio, and magnetic fields, as well as the concepts of various instruments used for detection, as well as how to use scientific data and research tools and visualize the change characteristics of the near-Earth space environment during space weather events through data analysis. Finally, the students conducted a summary report of their practical education. Through participating in space physics practical education, students truly engage in scientific research, successfully overcoming the "anxiety" of initial attempts at scientific research. This not only improves their practical abilities and scientific literacy such as independent learning and teamwork but also broadens their horizons and establishes a foundation for further understanding of Space Physics.

收稿日期: 2023-04-03; 录用日期: 2023-04-11

\*通信作者: 吴叩天 (2003-), 主要从事空间物理学研究. E-mail: wukoutian@mail.ustc.edu.cn



**Keywords:** practical education; Space Physics; Chinese Meridian Project

## 0 引言

“那些日子, 我记忆犹新: 我们在漠河野外观测站经历了 9 天的实践教育. 这里是中国的北极村, 北望俄罗斯, 南靠大陆. 漠河不仅是空间天气的重要门户, 更是中国空间科学研究的理想场所. 我们与中国科学院地质与地球物理研究所的研究生们一起, 监测和研究来自地球北极地区空间环境的扰动和传播, 收获颇丰”. 一位曾参加 2019 年在漠河举办的空间科学与技术专业 (后文简称“空间物理专

业”) 实践教育的学姐告诉我们. 而另一位曾参加 2021 年在北京举办的空间物理专业实践教育的学长则这样对我们说道: “北京, 这座承载着政治文化与科技前沿的城市, 让我们心潮澎湃. 在这里, 我们参观了中国科学院地质与地球物理研究所, 感受到了大科学工程‘子午工程’的震撼; 参观了中国科学院空间科学中心, 了解了我们国家第一颗人造卫星的故事; 我们还参观了中国气象局, 气象局的工作人员为我国的空间天气预报事业做出了重要贡献. 在老师带领下, 我们在这 7 天的空间物理专业实践教育中收获了宝贵的经验和知识.”



图 1 漠河与北京实践教育剪影

Fig. 1 Snapshots from Space Physics education at Mohe and Beijing

在中国科学技术大学地球和空间科学学院空间物理专业, 暑期专业实践教育是一门重要的课程. 我们在安徽蒙城地球物理国家野外观测研究站、黑龙江漠河地球物理国家野外观测研究站、北京空间环境国家野外观测研究站等教学实习基地, 以国家大型空间环境地基综合监测系统——子午工程为基础, 进行全方位、多角度的专业实践教育 (如图 1 所示). 作为中国空间科学领域的国家重大科技基础设施, 子午工程一期于 2012 年建成运行, 实现了中国地基空间环境监测的跨越式发展, 其地理范围从漠河经过北京、武汉, 南至海南, 并延伸至南

极的中山站, 东起上海, 西至拉萨. 该项目主要通过在中国东经  $120^{\circ}$  和北纬  $30^{\circ}$  建设两条地基观测链, 以链为主、链网结合, 系统运用无线电、地磁、光学和探空火箭等多种探测手段, 连续监测从大气层、电离层和磁层, 乃至十几个地球半径以外的行星际空间环境中的有关物理参数 (刘立波和万卫星, 2014; 王赤等, 2009; Wang, 2010). 子午工程二期于 2019 年开始建设, 在一期 15 个观测台站基础上新增 16 个台站, 进一步拓展成为覆盖全国范围的空间环境监测网, 实现全链条监测从太阳表面到地球大气 (Wang et al., 2020; 王赤等, 2021). 通过对

多种探测设备的实地学习, 同学们了解了空间物理探测基本原理, 开展探测数据处理与分析, 认识空间天气事件的传播和演化过程。

由于疫情原因, 2022 年空间物理专业实践教学于 7 月 14 日至 7 月 19 日在本专业实验室举行。我们对于专业实践教学充满期待, 因为它是我们真正接触实践的机会。我们希望通过本次实践教学, 能够学到更多科研技能和经验, 提高自己的专业素养和实践能力, 同时也增强自己的能力和素质。然而, 我们也对实践中可能遇到的挑战感到忐忑不安, 例如如何解决技术困难和应对综合性的实践教学任务等。但我们相信, 通过与老师和同学的交流合作, 我们一定能够克服这些挑战, 将所学的理论知识与实际应用相结合。

尽管实践教学时间不长, 但实践教育内容非常丰富。老师们带领我们学习太阳活动观测数据的处理与分析, 让我们更清晰地了解数据处理。通过形象生动的“量体裁衣”比喻, 带领我们领略了空间指数和地磁指数分析的魅力; 在地空楼 16 层的天台, 我们亲手记录激光雷达观测数据; 共同观测流星雨, 学习分析流星雷达数据; 参观 KSPEX 实验室, 聆听各种等离子体仪器的介绍和使用, 并处理实验室模拟电离层空洞的数据; 老师们手把手教我们如何使用 SAO-Explorer (Huang and Reinisch, 1996) 进行电离层测高仪数据分析; 学习 GNSS 数据的处理; 老师们还带领我们了解“天问一号”火星磁强计的全貌, 并示范进行磁场探测实验。通过老师们生动详实的讲解和自己实地收集与处理数据, 我们仿佛置身于科学的海洋中, 收获颇丰。

## 1 基于子午工程数据的空间天气事件分析

2022 年 2 月 4 日, 38 颗星链卫星被地磁风暴摧毁, 给金融、航空航天和公众带来了重大影响。由太阳风驱动的模式模拟表明, 2 月 3—4 日的地磁风暴在卫星附近造成了密度增加, 引起的卫星轨道衰减是这次星链卫星坠毁事件的罪魁祸首 (Dang et al., 2022)。因此, 我们对太阳爆发现象充满了好奇, 利用观测设备对该事件期间日地空间全链条响应进行分析, 可以更加直观地观察和记录地磁暴的变化过程, 进而深入了解其规律和特点。实践教学期间, 我们针对 2022 年 2 月地磁暴事件, 分析了太阳观测、地磁观测、电离层测高仪、

GNSS-TEC 和流星雷达等数据, 开展了太阳爆发影响地球近地空间环境的空间天气因果链分析。我们学习了地磁指数, 还通过使用地磁观测数据, 了解了通过观测数据得出地磁扰动程度的简捷方法。利用 SAO-Explorer 软件处理电离层测高仪探测数据, 得到了包括 hmF2、foF2 和 TEC 等电离层参数数据。通过编程处理原始 RINEX 文件, 计算伪距 TEC 和相位 TEC, 得到斜向 TEC 基本形态; 去除野点和周跳现象, 进行硬件偏差估算, 最后获得电离层 TEC 变化 (如图 2 所示)。使用漠河、北京、蒙城、武汉四个观测站的流星雷达观测数据, 反演出了高层大气风场速度。基于上述多种观测信息, 我们得以认识太阳爆发活动对地球不同圈层的影响过程。

### 1.1 太阳观测、地磁探测与空间科学指数

老师首先向我们介绍了有关太阳观测的知识, 让我们更深入地了解了太阳的结构和相关的物理过程。我们对太阳的壮阔美丽深深着迷, 认识太阳不仅有助于我们更好地预测太阳活动对地球的影响, 还可以为解决核聚变问题提供有用信息。图 3 展示了太阳爆发事件时 SDO 卫星于 2022 年 1 月 31 日 23:50 观测的不同波段日面成像。

在学习地磁指数时, 我们了解了如何利用台站观测数据获得地磁扰动强度信息, 这些指数如同从沙石中淘出的黄金, 在空间天气研究中起到重要作用。老师还向我们介绍了空间科学研究中使用的量化指数。例如通过观察极光、环电流和地磁扰动等现象来了解磁暴, 因此科学家们设计了极光电急流指数 (AU、AL、AE)、中纬地磁扰动指数 (Ap、Kp) 和环电流指数 (Dst、SYM-H) 等指数来描述地球空间环境变化和磁暴强度。此外, 还可以通过地面台站测量的 10.7 cm 太阳辐射获得 F10.7 指数, 描述影响近地空间环境的太阳短波辐射强度。在老师们的指导下, 我们掌握了这些指数的特点, 并使用软件将磁暴事件中的多个指数绘制成图表。图 4 展示了 2022 年 2 月 1—8 日期间 Kp、Ap、Dst 和 F10.7 指数随时间的变化情况。从这些指数中我们可以清晰看到, 2 月 3—4 日期间连续发生了两次地磁暴事件。

我们了解到, 地磁指数是通过不同纬度的地球磁场变化情况得到的。因此, 我们利用子午工程布设在北京、乐东和漠河等台站的地磁探测数据, 进一步绘制了地磁场水平 (H) 分量随时间的变化,

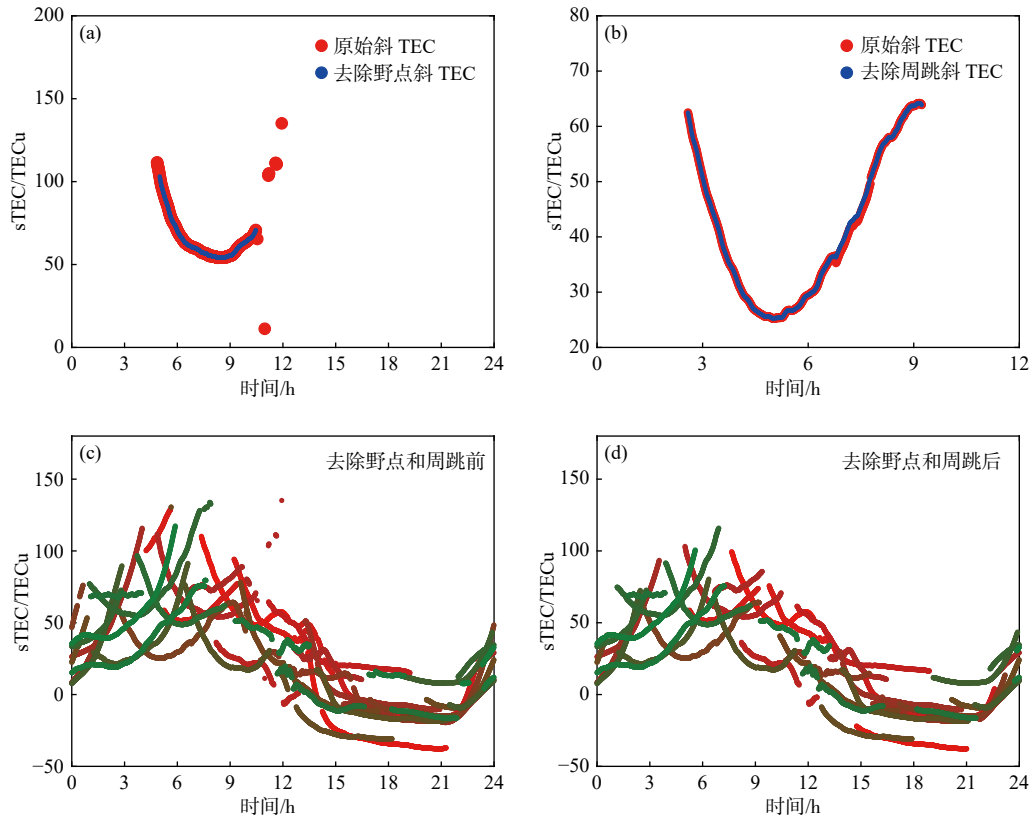


图 2 通过 GNSS 信号获取电离层斜向 TEC 的处理流程是: 基于原始 RINEX 文件计算伪距 TEC 和相位 TEC, 得到斜向 TEC 的基本形态, 再通过去除野点和周跳, 获得电离层斜向 TEC 变化。(a, b) 表示一个弧段去除野点和周跳前后斜向 TEC 结果; (c, d) 表示 PIMO 站 (14.6°N, 121.1°E) 在 2022 年 2 月 1 日观测的去除野点和周跳前后的斜向 TEC 变化

Fig. 2 The processing flow for obtaining slant TEC from GNSS signals is as follows: Based on the original RINEX file, the pseudo-range TEC and phase TEC is used to obtain slant TEC. (a, b) Show one arc before or after outliers and cycle slips are removed. (c, d) Show the changes in slant TEC observed by the PIMO station (14.6°N, 121.1°E) on the whole day, February 1, 2022 before and after eliminating outliers and cycle slips

如图 5 所示. 可以看到, 地磁场水平分量的变化与 Dst 和  $A_p$  等指数有很好的 consistency. 通过对地磁观测数据的分析, 我们对空间科学研究中的指数有了更深入的认识.

### 1.2 测高仪与 GNSS 观测电离层

老师为我们讲解了电离层测高仪的原理和使用方法, 以及相关电离层数据的处理. 图 6 展示了处理漠河站电离层测高仪数据得到的电离层变化信息. 通过利用电离层折射率与电磁波频率的关系, 电离层测高仪从地面发射无线电波, 通过接收信号的时间延迟获得电离层高度分布信息. 然后, 老师指导我们下载 SAO-Explorer 软件并使用该软件处理和展示电离层频高图数据. 通过对频高图标定, 得到了电离层参数和电子密度剖面数据. 其中  $hmF2$  为 F2 层峰值电子密度对应的高度,  $foF2$  为电离层 F2 层的临界频率, TEC 为电离层总电子含量. 从漠河站的测量结果可以看出, 电离层 F2 层峰

值电子密度在白昼远大于夜间, 这是因为白昼的太阳辐射将中性气体电离, 电子密度增加, 而夜间电子与离子重新复合, 密度回落. 不过, 电子密度在夜间也同样有少量增加, 说明即使没有太阳辐射, 地球夜侧的电子密度依然存在并通过运输和化学过程发生变化.

实际上, 从电离层测高仪计算得到的 TEC 数据不能非常准确反映顶部的电离层信息. 因此, 需要通过全球卫星导航系统 (GNSS) 信号, 获得整体的电离层变化信息.

利用 GNSS 测量电离层的原理是利用电磁波在不同介质中传播速度存在差异, 但是处理过程却较为复杂. GNSS 探测利用全球卫星导航系统与地面基站间的电磁波通讯, 来得到电磁波沿路径传播的时间, 并通过电离层折射率公式计算相应路径的总电子含量, 最终得到电离层 TEC. 图 7 展示了我们通过北斗地球同步轨道卫星 (C03) 信号获得的电离层 TEC 随时间的变化. 听完老师讲解后, 我们对



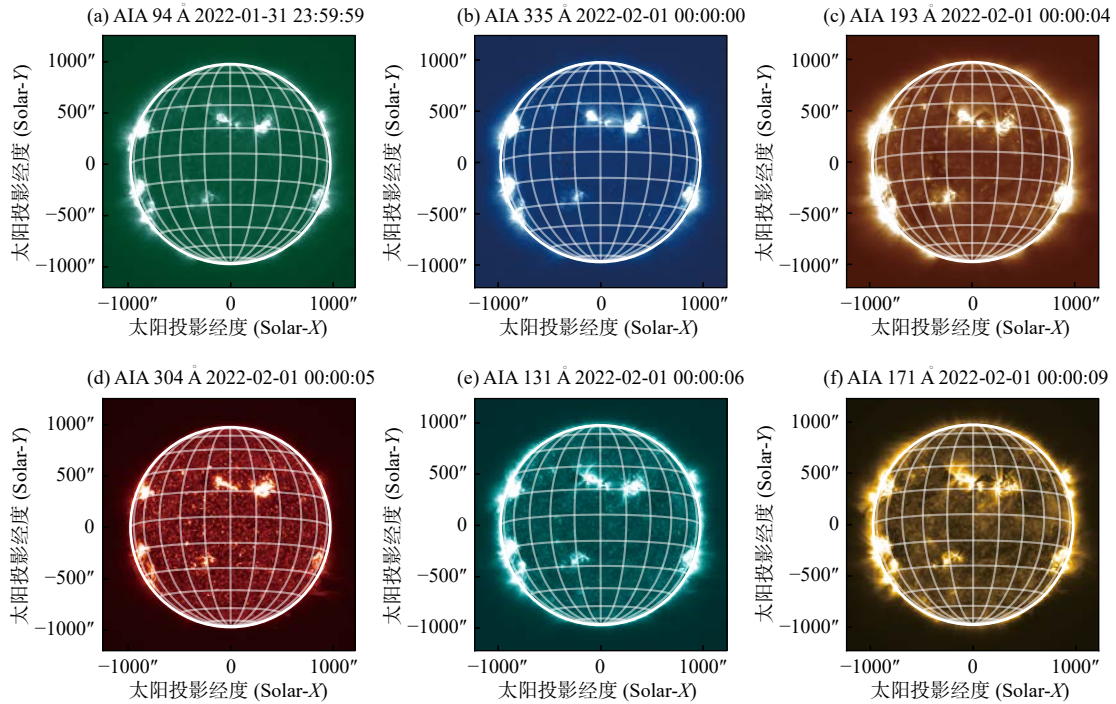


图 3 SDO 卫星于 2022 年 1 月 31 日 23:59:59 UT 至 2 月 1 日 00:00:09 UT 观测的不同波段日面图像. (a-f) 分别为 94 Å、335 Å、193 Å、304 Å、131 Å、171 Å 波段

Fig. 3 Images of solar disk at different bands observed by the SDO satellite from 23:59:59 UT on January 31 to 00:00:09 UT on February 1, 2022. Panels (a) to (f) show the images in the 94 Å, 335 Å, 193 Å, 304 Å, 131 Å and 171 Å wavelength bands, respectively

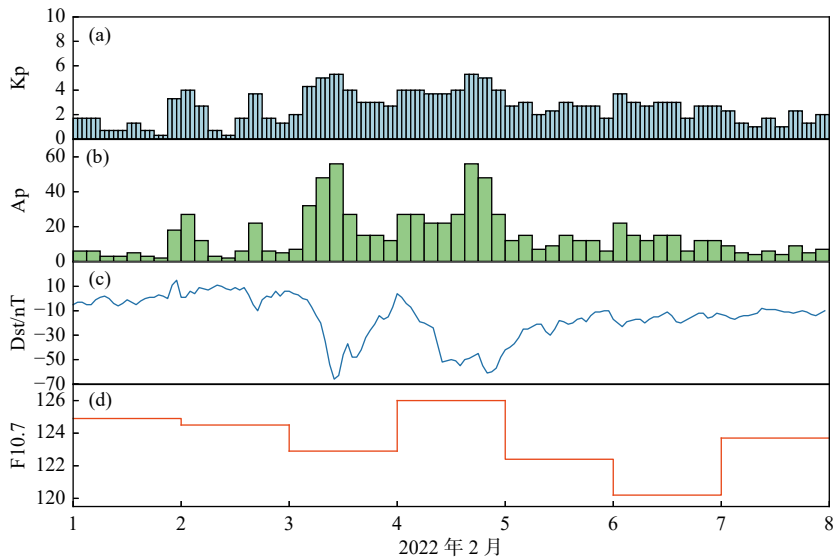


图 4 2022 年 2 月 1—8 日期间 Kp、Ap、Dst 和 F10.7 指数随时间的变化  
Fig. 4 Variations in Kp, Ap, Dst, and F10.7 indices during February 1-8, 2022

全球卫星导航系统有了更深入的认识，它不仅可作为军用、民用定位卫星，还可以为科学研究做出重要的贡献. 我们认识到了为什么地球卫星轨道能作为重要的战略资源，以及我国北斗卫星计划的重要性.

### 1.3 流星雷达探测中性大气

作为对流星和流星雨非常感兴趣的空间物理

专业学生，听到将利用流星雷达进行研究时，我们感到非常欣喜和激动. 这是一个难得的机会，让我们有机会深入研究这些神奇的天体现象，探索它们的形成和演化过程. 我们通过测量大量流星体的径向速度、到达角和高度等信息，可以反演得到大气的纬向风场和经向风场. 在老师讲解原理后，我们参照示例代码，进行数据处理和分析. 我们使用漠河、北京、蒙城、武汉四个观测

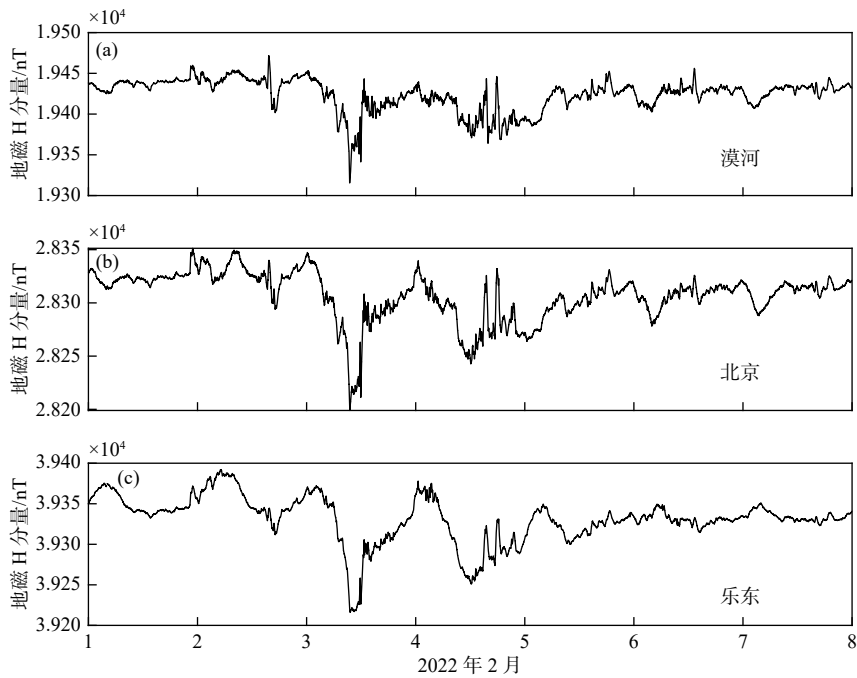


图 5 2022 年 2 月 1—8 日期间北京、乐东、漠河三站地磁场 H 分量随时间的变化

Fig. 5 Variation of H component of the geomagnetic field at Beijing, Ledong, and Mohe stations during February 1-8, 2022

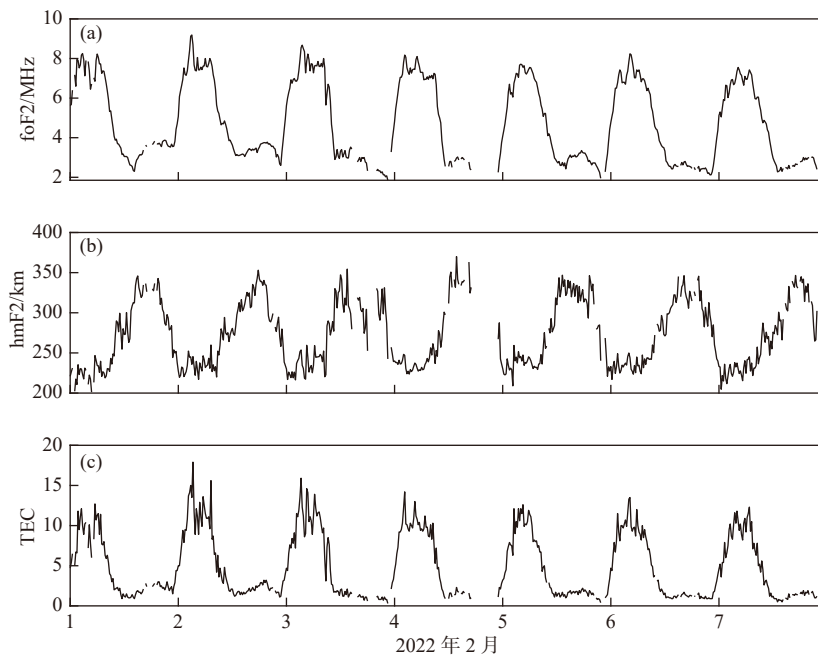


图 6 2022 年 2 月 1—8 日期间漠河站电离层测高仪观测的 foF2、hmF2 和 TEC 随时间的变化

Fig. 6 Variations of foF2, hmF2, and TEC observed by the ionosonde at Mohe Station with time during February 1-8, 2022

站的流星雷达观测数据作图, 结果如图 8 所示. 可以看到, 无论是经向风还是纬向风, 均可以发现半日潮汐的特征. 而流星雷达测量的风场位于中间层顶区域, 在 2022 年 2 月 3—4 日地磁暴事件期间未看到明显的磁暴引起的扰动. 这可能是由于此次地磁暴不够强, 从而太阳爆发活动难以影响到中低层大气.

## 2 总结与思考

通过对多种观测信息的整合和分析, 我们初步认识了太阳爆发对地球近地空间环境的影响. 在实践教育结束前, 我们对前面几天开展的空间天气因果链进行分析、总结汇报. 为了呈现一个精彩的故事, 而不仅仅是简单地罗列数据, 我们进行了时间

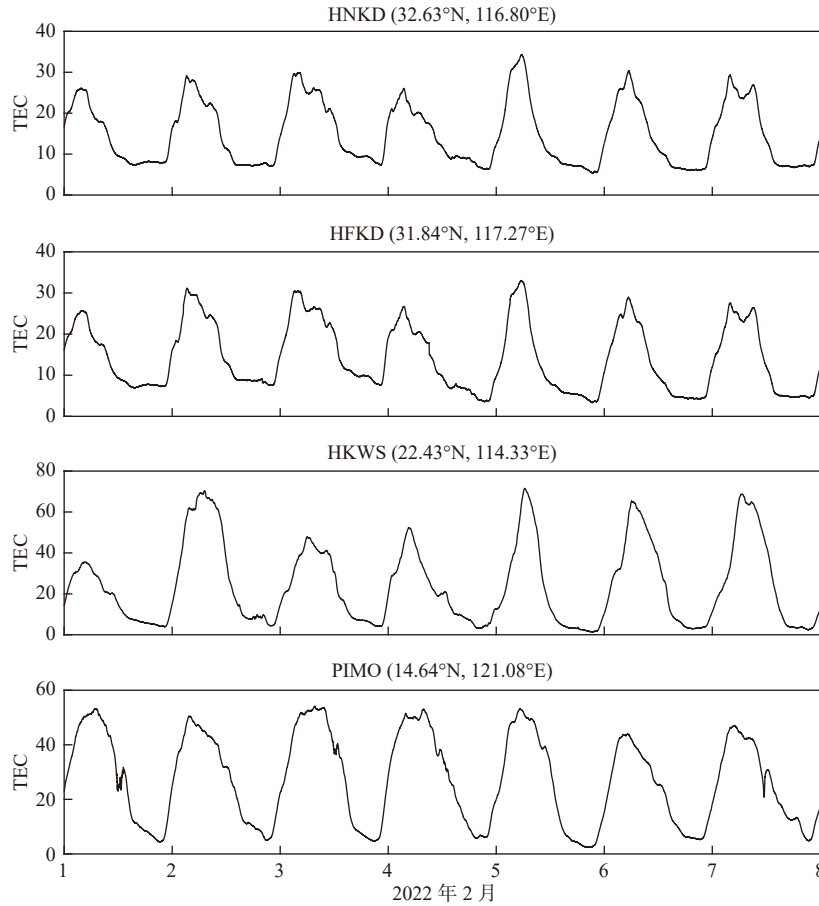


图 7 2022 年 2 月 1—8 日期间 4 个不同台站观测到的北斗地球同步轨道卫星 (C03) TEC 随时间的变化  
 Fig. 7 TEC variations of Beidou geostationary satellite (C03) observed by 4 different stations during February 1-8, 2022

和内容上的统筹规划. 由于我们每个人都有自己擅长的领域, 在小组中, 分工明确可以让我们更高效地完成任 务. 同时, 小组成员的互帮互助相比单干让我们能更加齐心协力地解决问题, 也增强了大家的默契. 小组内以及小组间的讨论和交流, 让我们更加深入地思考这些事件的特征及其物理过程. 在最后的整理中, 我们努力将自己的抽象思维转化为具象的语言, 让其他同学更容易理解.

最终, 通过集中交流和汇总结果, 我们完成了大部分汇报演示文稿, 并在实验室尝试做了一次汇报. 针对汇报中出现的问 题, 我们互相提出了很多有建设性的意见并加以修改. 同在一个实验室的其他组同学也提供了很大的帮助, 我们也积极向老师请教. 针对汇报时长的限制, 我们进行了时间内容上的安排与协调. 在汇报评比中, 各个小组展现出了丰富多样的才能和特长. 最后的评比中, 我们小组荣幸地获得了一等奖 (如图 9 所示).

本次实践教育让我们认识到, 仅仅完成数据和图片的处理是不够的, 必须梳理清楚其背后的物理

机制. 通过不断地交流、分享、领悟, 我们才能更好地完成实践教育任务, 乃至 于更好地进行日后的科研工作.

宋代诗人陆游曾写道: “纸上得来终觉浅, 绝知此事要躬行”. 仅仅从书本上获取知识是不够深刻的, 必须通过实践来真正理解知识的精髓. 在本次实践教育之前, 我们作为大二和大三的学生, 主要通过课本和老师的讲解来学习空间物理专业的理论知识. 通过本次实践教育, 我们初步接触到科研, 了解到空间科学研究中观测数据的来之不易.

本次实践教育不仅锻炼了我们自主学习的能力, 还提升了小组分工合作能力. 通过参加实践教育, 我们也学会了科学计算软件的基本使用, 这对于以后进行科研工作很有帮助; 成功地克服了初次尝试科研时的 “忐忑不安”, 通过亲手操作各种高科技设备和研究分析, 感受到了空间科学的无限魅力, 更加期待在未来进一步探索空间科学壮阔而隽美的蓝图.

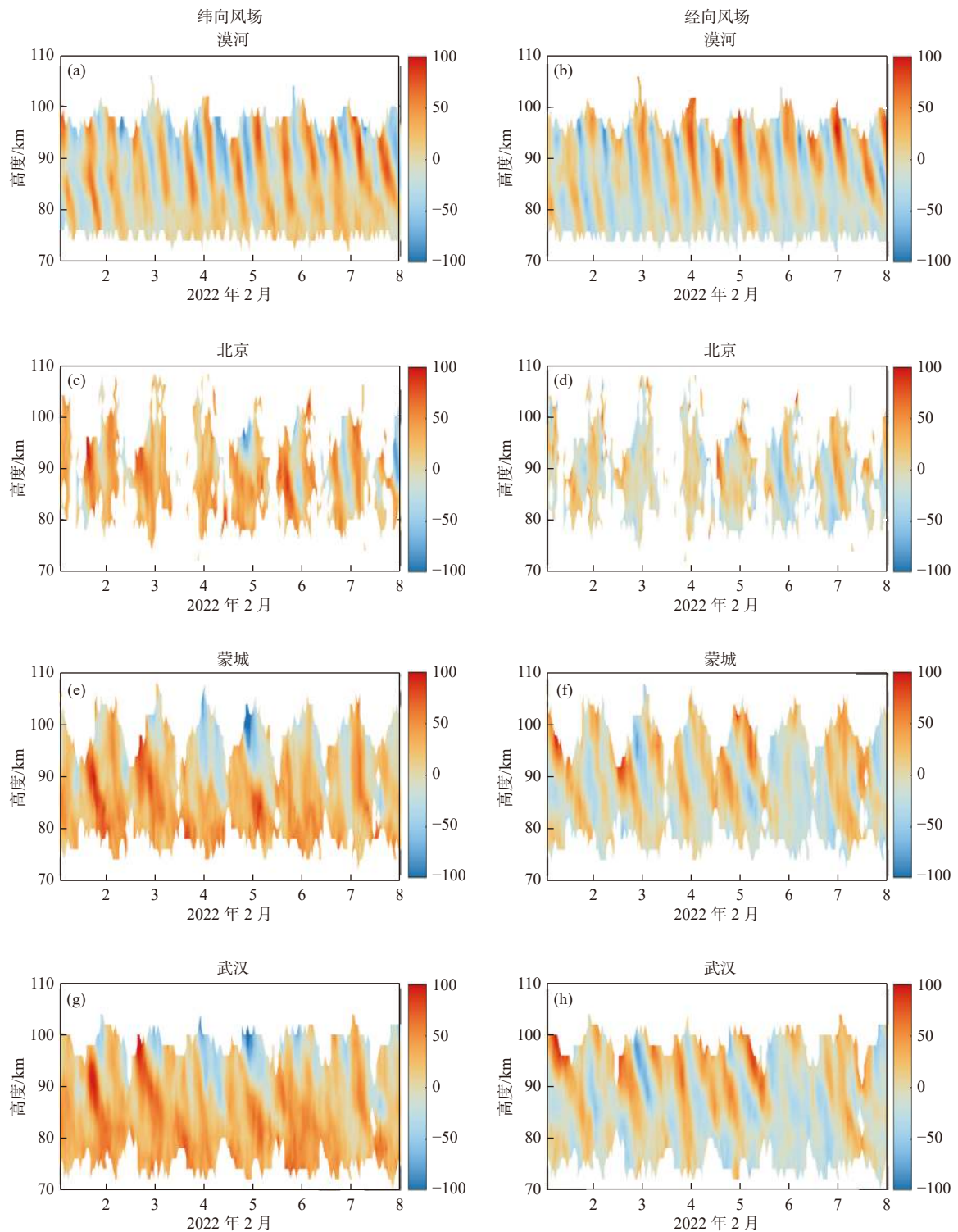


图 8 2022 年 2 月 1—8 日期间漠河、北京、蒙城、武汉站流星雷达观测的纬向风场和经向风场随时间和高度的变化  
Fig. 8 Variation of zonal and meridional wind as a function of date and altitude observed by the meteor radars at Mohe, Beijing, Mengcheng, and Wuhan Stations during February 1-8, 2022



图9 同学们分组汇报实践教育总结

Fig. 9 Each group to give a summary report of the practical education

## 数据与来源

本次实践教育中主要使用的子午工程数据来自子午工程数据中心: <https://data2.meridianproject.ac.cn/>.

## 致谢

感谢中国科学技术大学地球和空间科学学院雷久侯教授、任德馨博士、中国科学院地质与地球物理研究所刘立波研究员等老师在实践教育和论文撰写中提供的大量指导. 感谢子午工程为本次实践教育提供观测数据. 感谢安徽蒙城地球物理国家野外观测研究站、黑龙江漠河地球物理国家野外观测研究站、北京空间环境国家野外观测研究站等提供教学实习.

## References

- Dang T, Li X, Luo B, et al. 2022. Unveiling the space weather during the Starlink satellites destruction event on 4 February 2022[J]. *Space Weather*, 20: e2022SW003152. DOI: [10.1029/2022SW003152](https://doi.org/10.1029/2022SW003152).
- Huang X, Reinisch B W. 1996. Vertical electron density profiles from the Digisonde network[J]. *Advances in Space Research*, 18(6): 121-129. DOI: [10.1016/0273-1177\(95\)00912-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00912-4).
- Liu L B, Wan W X. 2014. A brief overview on the issue on Space Physics and space weather[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(11): 3493-3501 (in Chinese). DOI: [10.6038/cig20141101](https://doi.org/10.6038/cig20141101).
- Wang C, Feng X S, Wan W X, et al. 2009. The Meridian chain of comprehensive ground-based space environment monitors in the Eastern Hemisphere[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 37(6): 32-38 (in Chinese).
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. *Space Weather*, 8: S08001.
- Wang C, Chen Z Q, Xu J Y. 2020. Introduction to Chinese Meridian Project—Phase II[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 40(5): 718-722.
- Wang C, Chen Z Q, Hu L H, et al. 2021. Development and prospect of China's space-based and ground-based space environment monitoring platforms[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 38(3): 225-239 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 刘立波, 万卫星. 2014. 我国空间物理研究进展[J]. *地球物理学报*, 57(11): 3493-3501.
- 王赤, 冯学尚, 万卫星, 等. 2009. 东半球空间环境地基综合监测子午链简介 [J]. *国际地震动态*, 37 (6): 32-38
- 王赤, 陈志青, 胡连欢, 等. 2021. 我国空间环境天/地基监测平台的发展态势和展望[J]. *航天器环境工程*, 38(3): 225-239.