

数据论文

基于子午工程观测数据的地磁
超低频波数据集方少峰^{1,3} 任杰² 邹自明^{1,3}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国地质大学地球物理与信息技术学院 北京 100083)

3(国家空间科学数据中心 北京 100190)

摘要 子午工程作为中国重要的空间环境监测基础设施,在空间物理研究中意义重大,尤其为超低频(ULF)波观测提供了关键支撑.本研究基于2011–2021年子午工程多站点磁通门磁力仪采集的地磁场水平分量(H)与磁偏角分量(D)秒采样数据,经数据清洗、降噪预处理后,结合时频分析(Morlet小波变换)与统计方法,构建了高质量、长时序的地磁超低频波数据集.数据集覆盖高、中、低纬五个台站,包含Pc3~Pc5规则脉动事件标注及原始序列,以jsonl格式存储,支持主流科研软件读取.该数据集填补区域观测空白,为磁层波动、空间天气建模等研究提供了基础数据,助力提升中国空间环境监测能力,可用于ULF波自动识别及耦合机制研究.

关键词 超低频波, 子午工程, 时频分析, 空间环境

中图分类号 P353

数据集基本信息

数据集名称	基于子午工程观测数据的地磁超低频波数据集
数据通信作者	方少峰 (fangsf@nssc.ac.cn)
数据作者	方少峰, 任杰, 邹自明
数据时间范围	2011年1月1日至2021年12月31日
数据空间范围	漠河站 (122°20' E, 53°30' N), 九峰站 (114°29' E, 30°30' N), 三亚站 (109°35' E, 19°30' N), 满洲里站 (117°25' E, 49°32' N), 马陵山站 (118°27' E, 34°42' N)
时间分辨率	1 s
数据量	17.7 GByte, 55个文件
数据格式	*.jsonl
数据库(集)访问网址	DOI: https://doi.org/10.12176/01.04.00041-V01 CSTR: https://cstr.cn/14804.11.01.04.00041-V01
基金项目	国家重点研发计划项目 (2022YFF0711400)
数据库(集)组成	数据集由一系列数据文件组成,覆盖2011–2021年,覆盖漠河站、九峰站、三亚站、满洲里站以及马陵山站五个台站,每年每台站形成一个数据文件,共包括55个文件.数据文件包含地磁场 H 分量(水平分量)和 D 分量(磁偏角分量)的原始观测序列(seq_H和seq_D),以及经标注的Pc3 (10~45 s), Pc4 (45~150 s), Pc5 (150~600 s)事件信息(例如事件是否发生、单色波/宽频波类型)

2025-05-30 收到原稿, 2025-09-25 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Dataset of Geomagnetic Ultra-low Frequency Waves Based on Meridian Project Observation Data

FANG Shaofeng^{1,3} REN Jie² ZOU Ziming^{1,3}

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

2(School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083)

3(National Space Science Data Center, Beijing 100190)

Abstract The Meridian Project, as an important space environment monitoring infrastructure in China, is of great significance in space physics research, especially providing key support for the observation of Ultra-Low-Frequency (ULF) waves. Based on the second-sampled data of the horizontal component (H) and declination component (D) of the geomagnetic field collected by multi-station fluxgate magnetometers of the Meridian Project from 2011 to 2021, this paper constructs a high-quality and long-time-series dataset of geomagnetic ULF waves through data cleaning, noise reduction preprocessing, and combined with time-frequency analysis (Morlet wavelet transform) and statistical methods. The dataset covers 5 stations at high, middle and low latitudes, includes event annotations and original sequences of Pc3~Pc5 regular pulsations, and is stored in jsonl format, supporting reading by mainstream scientific research software. This dataset fills the gap in regional ULF wave observations, provides basic data for research such as magnetospheric fluctuations and space weather modeling, helps improve China's space environment monitoring capabilities, and can be used for automatic ULF wave identification and coupling mechanism research.

Key words Ultra low frequency waves, Meridian project, Time-frequency analysis, Space environment

Dataset Profile

Title	Dataset of Geomagnetic Ultra-low Frequency Waves Based on Meridian Project Observation Data
Data Corresponding Author	FANG Shaofeng (fangsf@nssc.ac.cn)
Data Author (s)	FANG Shaofeng, REN Jie, ZOU Ziming
Time Range	1 Jan. 2011 to 31 Dec. 2021
Spatial Range	Mohe Station (122°20' E, 53°30' N), Jiufeng Station (114°29' E, 30°30' N), Sanya Station (109°35' E, 19°30' N), Manzhouli Station (117°25' E, 49°32' N), Malingshan Station (118°27' E, 34°42' N)
Time Resolution	1 s
Data Volume	17.7 GByte, 55 files
Data Format	*.jsonl
Database/Dataset URL	DOI: https://doi.org/10.12176/01.04.00041-V01 CSTR: https://cstr.cn/14804.11.01.04.00041-V01
Source (s) of Funding	National Key Research and Development Program of China (2022YFF0711400)
Dataset /Database Composition	This dataset consists of a series of data files, covering the period from 2011 to 2021, and includes five stations: Mohe Station, Jiufeng Station, Sanya Station, Manzhouli Station and Malingshan Station. Each station generates one data file per year, resulting in a total of 55 files. The data files contain the original observation sequences (seq_H, seq_D) of the H component (horizontal component) and D component (magnetic declination component) of the geomagnetic field, as well as the annotated information of Pc3 (10~45 s), Pc4 (45~150 s), and Pc5 (150~600 s) events (such as whether an event occurs, the type of monochromatic wave/broadband wave)

0 引言

地球磁层是一个充满动态过程的复杂等离子体环境, 其中地磁超低频 (ULF) 波作为磁层物理的关键研究对象, 在能量传输、粒子加速与磁层-电离层耦合等过程中起核心作用. ULF 波的频率范围通常为 $0.001\sim 5$ Hz, 其时空分布特性与太阳风-磁层相互作用、磁层内部动力学过程密切相关, 对空间天气的形成与演化具有重要影响^[1]. 地磁超低频波, 又称为地磁脉动, 可以分为规则连续型脉动 (Pc 类) 和不规则扰动型脉动 (Pi 类) 两大类, 其中 Pc 类脉动具有规律且主要连续的形态, 按周期划分为 Pc1 ($0.2\sim 5$ s) 脉动、Pc2 ($5\sim 10$ s) 脉动、Pc3 ($10\sim 45$ s) 脉动、Pc4 ($45\sim 150$ s) 脉动、Pc5 ($150\sim 600$ s) 脉动; Pi 类脉动呈现不规则形态, 直接与磁场扰动 (如磁暴突发开始、磁湾) 及高层大气现象 (如极光) 相关联, 按照周期划分为 Pi1 脉动 ($1\sim 40$ s, 短周期成分, 常叠加在长周期波动上) 和 Pi2 脉动 ($40\sim 150$ s, 长周期成分)^[2].

子午工程作为中国自主建设的重大空间环境监测基础设施, 覆盖了从低纬到中高纬的关键地理区域, 具备多站点协同观测能力^[3]. 其搭载的磁通门磁力仪 (Fluxgate Magnetometer, FGM) 地磁监测设备可对地球磁场的 H 分量 (水平分量)、 D 分量 (磁偏角分量) 以及 Z 分量 (垂直分量) 进行秒级采样的连续观测, 为 ULF 波的精细研究提供了独特的数据支撑. 依托子午工程的多站点协同观测网络, 可获取不同地理纬度 (极区、中纬度、赤道附近等) 和地方时的磁场波动数据 (Pc 类规则脉动的周期分布、Pi 类不规则脉动与磁暴的关联性等), 为 ULF 波的时空演化特征 (Pc1~Pc5 各子类的区域分布差异、磁暴期间 Pi1/Pi2 分量的耦合机制等) 和物理机制 (太阳风-磁层能量传输、电离层-磁层耦合过程等) 研究提供了高时空

分辨率的连续观测数据支撑, 例如中国区域 Dst 指数数据集的构建, 可更精准反映中国区域地磁扰动特征^[4-6].

为了促进 ULF 波的研究从单一事件分析逐步转向长期统计特性与物理机制的深入探索, 发展基于统计机器学习的 ULF 波自动识别和关联分析方法^[7-10], 本研究聚焦于 2011—2021 年子午工程多站点磁通门磁力仪秒采样观测数据, 通过系统的数据清洗、降噪处理及时频分析, 旨在构建首个基于中国本土观测的长时序地磁 ULF 波数据集 (Pc3~Pc5). 该数据集不仅可填补区域观测空白, 还将为磁层波动理论验证、空间天气建模及辐射带电子动力学等研究提供基础数据, 助力中国在空间环境监测与预测领域的自主创新能力提升.

1 数据采集与处理方法

1.1 数据来源

研究数据源自子午工程 2011—2021 年期间的地磁观测成果, 具体由分布于中国不同地理纬度的多站点磁通门磁力仪采集获得. 观测对象为地磁场的 H 分量 (水平分量) 与 D 分量 (磁偏角分量), 数据采集频率为 1 Hz, 具备高时间分辨率特征. 具体地, 原始数据来源于黑龙江漠河站、武汉九峰站、海南三亚站、内蒙古满洲里站以及山东马陵山站 (见表 1).

1.2 数据处理流程

数据处理流程如图 1 所示, 主要分为以下三个步骤.

步骤 1 从子午工程获取 FGM 仪器的地磁 H 分量和 D 分量观测数据, 依次进行数据完整性分析、数据清洗, 再通过经验模态分解与重构处理数据, 剔除数据的长趋势变化信息.

表 1 台站名称与位置
Table 1 Stations and their locations

台站名称	地理经度 (E)	地理纬度 (N)	地磁经度 (W)	地磁纬度 (N)
黑龙江漠河站 (MHT)	122°20'	53°30'	167.6°	43.9°
武汉九峰站 (JFT)	114°29'	30°30'	173.5°	20.7°
海南三亚站 (SYS)	109°35'	19°30'	177.9°	9.7°
内蒙古满洲里站 (MZL)	117°25'	49°32'	171.5°	39.8°
山东马陵山站 (MLS)	118°27'	34°42'	170.0°	25.0°

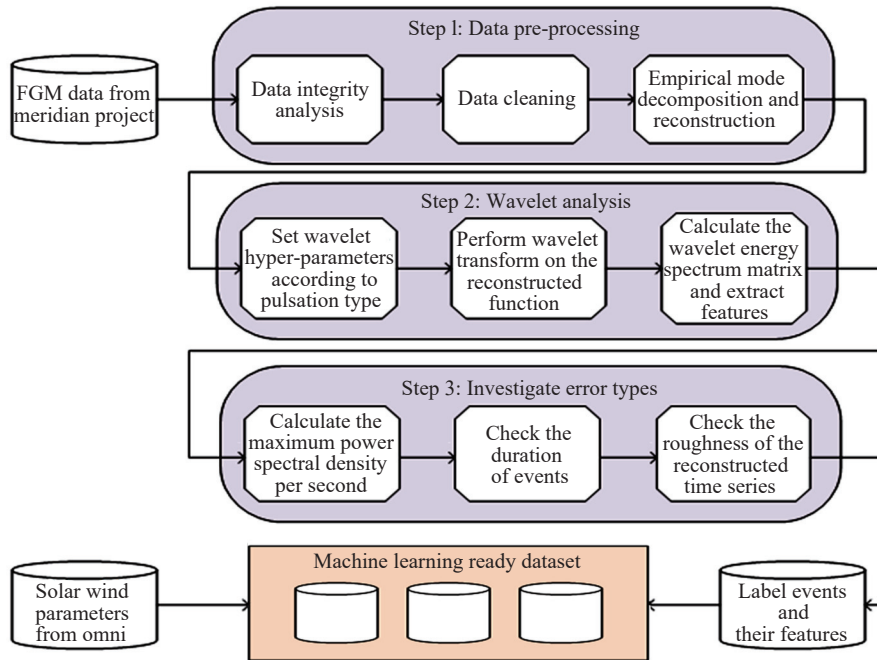


图1 数据处理流程

Fig. 1 Flow of data processing

步骤2 对预处理后的数据进行小波分析, 根据脉动类型设置小波超参数, 对重构后的函数进行小波变换, 计算小波能量谱矩阵并提取特征。

步骤3 排查错误类型, 主要通过检查小波能量谱的一阶导数以及事件的持续时间, 最终结合来自Omni的太阳风参数, 生成适用于机器学习的数据集, 并对事件及其特征进行标记。

1.3 数据预处理

数据预处理部分主要包括数据完整性分析、数据清洗、经验模态分解与重构。数据完整性分析主要是针对从子午工程获取的FGM数据, 检查数据是否存在缺失值以及数据记录是否连续等情况, 评估数据整体的完整程度, 为后续数据处理提供基础。数据清洗主要是针对完整性分析中发现的噪声数据、错误数据、重复数据等进行处理, 通过滤波、插值、去重等方法, 提高数据质量, 保证数据的准确性和一致性。经验模态分解与重构^[11]是将复杂的数据信号分解为多个本征模态函数, 去除噪声、趋势变化等干扰成分后, 再将处理后的模态函数进行重构, 使数据更能反映真实特征, 为后续的小波分析做准备。

1.4 小波分析与特征提取

Morlet小波具备出色的自适应时频分析能力, 对

低频信号, 其窗口形状自动变得扁平, 频率分辨率高, 可细致分析低频成分; 对高频信号, 窗口形状自动变得瘦长, 时间分辨率高, 能精准捕捉高频信号的快速变化, 在处理复杂信号时, 能兼顾不同频率成分的时间和频率定位需求, 被广泛应用于地磁观测数据分析^[12,13]。因此, 数据处理流程部分选取了Morlet小波对预处理后的地磁观测数据进行分析, 有

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot F_b}} e^{i2\pi F_c x} \cdot e^{-\frac{x^2}{F_b}}.$$

其中, F_c 为Morlet小波的中心频率, F_b 为Morlet小波的带宽参数。中心频率决定了小波对特定频率成分的聚焦能力, 而不同类型的地磁脉动具备明确的频率区间划分, 对同一数据和特定类型的脉动, 尝试多组中心频率, 通过对比小波变换前后信号重构的均方误差, 筛选最优指标值, 误差越小说明参数与信号适配性越好。同时, 统计目标频率区间内能量占比, 占比越高说明 F_c 的选择对特征频率的聚焦能量越强; 带宽参数 F_b 控制小波的时频窗口形状, 需在频率分辨率(区分相近频率信号的能力)与时间分辨率(捕捉信号快速变化的能力)间权衡, 为了精准区分相近频率信号, 取 $F_b = 0.5F_c$, 以获得更好的时频分辨率。

具体流程如下。选取地面台站平静期 H 分量和

D 分量探测数据进行小波变换, 获得 $0.001\sim 1$ Hz 频率范围内的背景功率谱. 对该台站的 H 分量和 D 分量按照时间顺序对每 1 天数据进行一次小波变换, 同时要求进行小波变换前针对该时段的观测数据, 前后各延长 1 h, 去除小波变换边界上的不确定性^[14]. 选定要识别的波段, 例如 Pc5 ($150\sim 600$ s), 按照时间顺序, 判断 H 分量或 D 分量的小波功率谱是否高出背景功率谱 100 倍, 若否, 记为 -1; 若是, 利用波动类型自动识别程序对功率谱作进一步分析, 依据贝叶斯准则判据 (BIC), 若 $\Delta B > 5$, 记为单色波 (赋值为 1), 否则记为宽频波 (赋值为 0).

波动类型自动识别程序主要使用 Inglis 等^[15,16]提出的 AFINO 分析程序进行单色波和宽频波的判别. 具体地, 对小波变换得到的能谱数据进行模型比较, 其中单幂律谱+常数模型如下:

$$S_0 = Af^{-\alpha} + C.$$

单幂律+常数+高斯分布模型如下:

$$S_1 = S_0 + B \exp \left[\frac{-(\ln f - \beta)^2}{2\sigma^2} \right].$$

计算两个模型的贝叶斯信息准则判据为

$$B = -2\ln L + k\ln n.$$

其中, $\Delta B = B_{S_1} - B_{S_0}$, ΔB 越大, 表明波动功率谱的单色性越强.

以漠河站 2015 年 1 月 18 日的观测数据的 Pc5 脉动分析为例, 图 2(a)(b) 为黑龙江漠河站地磁 H 分量和 D 分量的观测序列; 图 2(c)(d) 为对应 H 分量和 D 分量的小波功率谱; 图 2(e)(f) 为 H 分量和 D 分量的单色波/宽频波的标注结果, 其中 M 表示单色波 (Monochromatic Wave)、B 表示宽频波 (Broadband Wave)、N 表示没有波 (No Wave); 图 2(g)(h) 为 H 分量和 D 分量的 Pc5 波动标识, 有波动时用黑点标识; 图 2(i) 为地磁 Sym- H 指数; 图 2(j) 为地磁 AU 和 AL 指数.

图 3 所示为基于贝叶斯信息准则判据的波动类型识别, 图 3(a)(b) 分别为 H 分量和 D 分量的分析结果, 其中黑色直线为原始观测数据的功率谱, 绿色虚线为单幂律谱模型 S_0 对原始数据的功率谱拟合结果, 红色虚线为单幂律+常数+高斯分布模型 S_1 对原始数据的功率谱拟合结果, 同时图中标注了 ΔB 的计算结果, 即两个模型的贝叶斯信息准则判据的差, 从两个

模型的拟合结果以及 ΔB 的计算结果可以判定其为单色波, 对应图 2(e)(f) 的标注结果.

1.5 排查错误类型

在以上构建好的候选波动事件数据库的基础上, 进一步排查错误类型^[14,17]. 首先计算每秒钟最大功率谱, 然后按照以下标准进行排查: 连续时间点的最大功率谱密度均大于 $0.5 \text{ nT}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$; 持续时间至少为该时间段波动峰值周期的两倍; 振幅不超过 10 nT ; 事件足够光滑, 相邻时间点的振幅变化小于 1 nT .

1.6 生成 AI-Ready 数据集

对排查后的数据按照 30 min 进行时间序列分割, 提取表 2 中列出的信息, 保存为标准的 jsonl 格式数据.

2 数据样本描述

数据集覆盖 2011 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日, 累计时长 11 年, 可捕捉 ULF 波的长期变化趋势 (例如太阳活动周期内的波动特征), 由 5 个典型纬度台站 (见表 1) 构成观测网络, 地理纬度范围为 $19^\circ 30' \text{N}$ (三亚)– $53^\circ 30' \text{N}$ (漠河), 覆盖赤道、中纬以及高纬区域, 可对比不同地磁纬度下 ULF 波的时空差异.

本数据集包含地磁场 H 分量 (水平分量) 和 D 分量 (磁偏角分量) 的原始观测序列 (seq_H, seq_D), 以及经标注的 Pc3 ($10\sim 45$ s), Pc4 ($45\sim 150$ s), Pc5 ($150\sim 600$ s) 事件信息 (例如事件是否发生, 单色波/宽频波类型). 如图 4 所示, 数据以 jsonl 格式存储, 每个文件对应 30 min 观测时段, 包含表 2 所示 15 个关键字段, 支持 Python 和 MATLAB 等主流科研软件读取.

3 数据质量控制与评估

本数据集在数据预处理阶段通过数据完整性校验、数据清洗以及利用经验模态分解与重构方法去除趋势, 保证了输入数据的完整性和异常值的剔除, 并避免了长趋势对 ULF 信号的干扰. Morlet 小波分析中, 通过对比不同台站平静期背景功率谱 (见图 2), 验证小波超参数 (中心频率、带宽) 设置的合理性; 基于贝叶斯信息准则 (BIC) 的单色波/宽频波分类中, 通过人工抽检 10% 样本 (见图 3), 验证自动识别程序

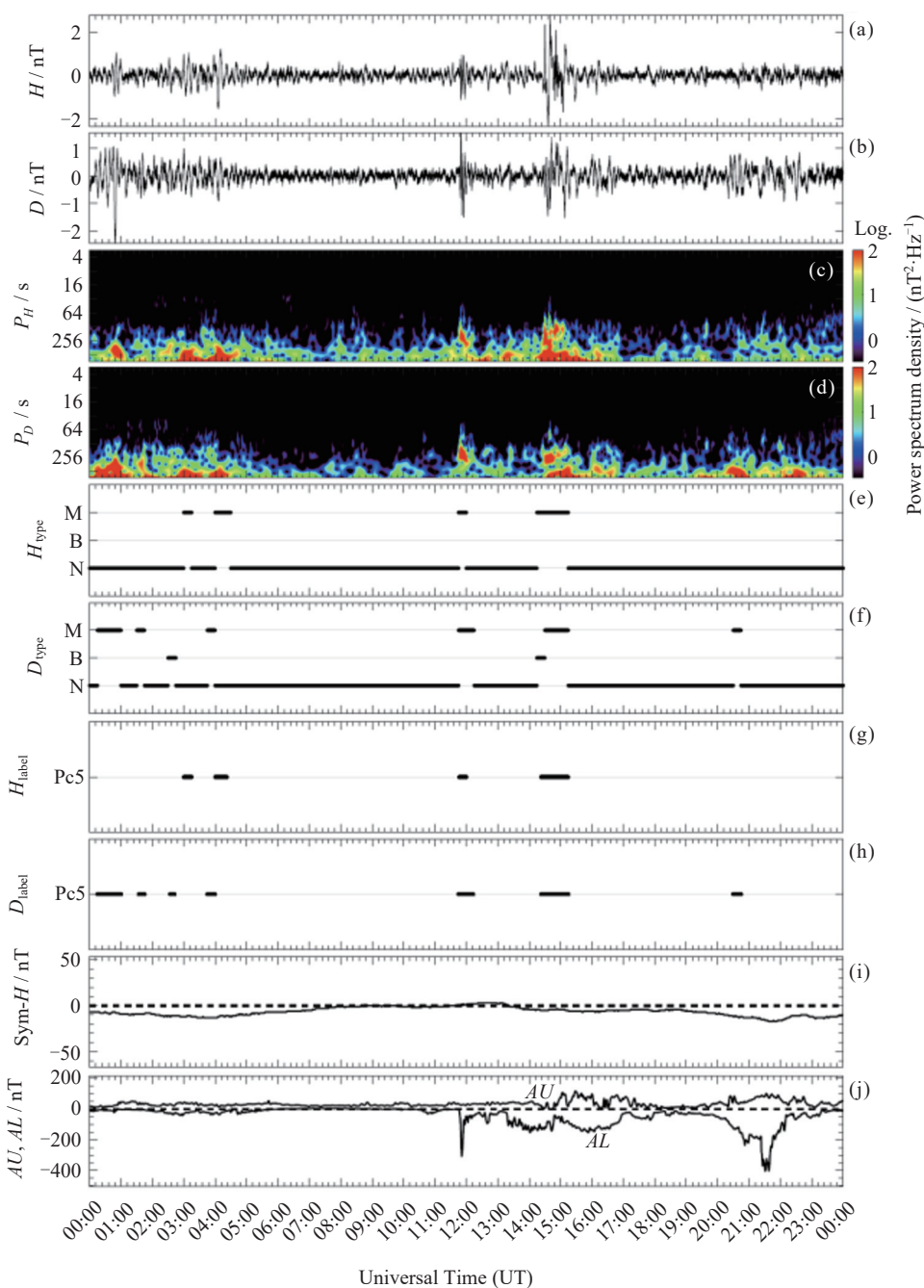


图2 漠河站 2015 年 1 月 18 日 Pc5 脉动分析及标注结果

Fig. 2 Schematic diagram of Pc5 pulsation analysis and annotation results at Mohe station on 18 January 2015

的准确率 (实测判别准确率 $> 92\%$), 并修正误判事件. 原始数据为 1 s 采样, 经 30 min 分割后, 时间精度保持为 1 s, 满足 ULF 波精细时频分析需求.

尽管本数据集经过系统的预处理和质量控制, 为地磁超低频波的研究提供了一定的支撑, 但仍存在以下局限性, 使用者需结合研究需求合理应用: 数据集

仅包含中国境内五个台站, 在全球尺度上空间分布仍较局限, 建议结合国际地磁观测网络数据 (如 INTERMAGNET) 进行补充分析, 或利用多源数据融合方法扩展空间覆盖维度; 在强磁暴 ($Dst < -100$ nT) 或复杂空间天气事件期间, 地磁信号可能受突发扰动干扰, 导致宽频波与单色波误判, 或弱信号被噪声掩

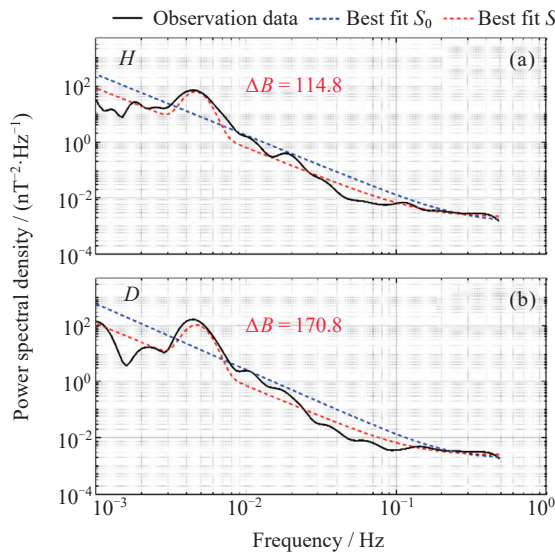


图 3 波动类型识别示例

Fig. 3 Examples of wave type identification

盖, 建议对关键研究时段 (例如磁暴主相) 的事件标注进行人工复核, 可结合 Sym- H , AU/AL 等指数辅助判断信号可靠性; 由于原始数据采样频率为 1 Hz, 本数据集聚焦于 Pc3~Pc5 规则脉动, 未包含 Pc1 (0.2~5 s), Pc2 (5~10 s) 及 Pi 类 (不规则脉动) 等其他 ULF 波形, 建议结合其他地磁观测网络数据 (如 CARISMA) 进行补充分析。

4 数据使用方法与建议

数据集存储于国家空间科学数据中心^{*}, 用户需注册账号, 并通过实名认证后申请下载. 以 jsonl 文件存储, 每个文件对应 30 min 观测时段, 包含表 2 所示 15 个关键字段 (见图 4), 支持 Python (pandas 库) 和 MATLAB (jsondecode 函数) 等主流科研软件读取。

使用 Python 读取 jsonl 文件, 提取 seq_H 和 seq_D 原始序列, 结合 epoch 时间字段构建时间序列. 通过 Pc3/H、Pc4/H 等布尔型标注字段 (0 表示无事件, 1 表示有事件) 筛选目标事件, 结合 Type/H_Pc3 等类型字段 (0 表示宽频波, 1 表示单色波) 分析波动特性. 对选中事件段进行小波重分析 (推荐使用 Matplotlib 或 PyWavelets 库), 复现图 2 所示功率谱分布, 结合太阳风参数 (Dst 指数、 AU/AL 指数等) 探究物理机制。

^{*} <https://www.nssdc.ac.cn>

表 2 地磁超低频波数据集关键字信息
Table 2 Keywords information of geomagnetic ultra-low-frequency wave dataset

序号	关键字	描述
1	epoch	观测时间
2	seq_H	H 分量观测原始序列
3	seq_D	D 分量观测原始序列
4	Pc3/H	H 分量Pc3事件标注
5	Pc3/H_type	H 分量Pc3事件单色波标注
6	Pc4/H	H 分量Pc4事件标注
7	Pc4/H_type	H 分量Pc4事件单色波标注
8	Pc5/H	H 分量Pc5事件标注
9	Pc5/H_type	H 分量Pc5事件单色波标注
10	Pc3/D	D 分量Pc3事件标注
11	Pc3/D_type	D 分量Pc3事件单色波标注
12	Pc4/D	D 分量Pc4事件标注
13	Pc4/D_type	D 分量Pc4事件单色波标注
14	Pc5/D	D 分量Pc5事件标注
15	Pc5/D_type	D 分量Pc5事件单色波标注

```
{
  "epoch": "2015-01-02 00:00:00",
  "len": 1800,
  "seq_H": [-73.5, -73.5, -73.4, -73.44, -73.44, ...]
  "seq_D": [71.94, 71.9, 71.9, 71.8, 71.75, 71.9, ...]
  "Pc3/H": 0.0,
  "Pc3/D": 0.0,
  "Pc4/H": 0.0,
  "Pc4/D": 0.0,
  "Pc5/H": 0.0,
  "Pc5/D": 1.0,
  "Type/H_Pc3": -1.0,
  "Type/D_Pc3": -1.0,
  "Type/H_Pc4": -1.0,
  "Type/D_Pc4": -1.0,
  "Type/H_Pc5": -1.0,
  "Type/D_Pc5": 0.0
}
```

图 4 数据样本示例

Fig. 4 Example of data sample

利用数据集的标签信息 (例如 Pc3 事件标注) 训练分类模型 (随机森林、卷积神经网络等), 实现 ULF 波自动识别与预测. 结合子午工程其他观测数据 (电离层电子密度、太阳风速度等), 构建 ULF 波与磁暴、极光等空间天气事件的统计关联模型。

致谢 本项成果使用了国家重大科技基础设施子午工程科学数据. 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>) 提供了数据资源/数据分析环境/计算服务/应用平台支持.

参考文献

- [1] PULKKINEN T I, PALMROTH M, TANSKANEN E I, *et al.* Solar wind—magnetosphere coupling: a review of recent results[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(3): 256-264
- [2] JACOBS J A, KATO Y, MATSUSHITA S, *et al.* Classification of geomagnetic micropulsations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, **69**(1): 180-181
- [3] QIN Jiamei, ZHONG Dingkun, FENG Xueshang, *et al.* A summary of data resources produced by the Meridian Project[J]. *China Scientific Data*, 2021, **6**(2): 1-23 (秦佳媚, 钟鼎坤, 冯学尚, 等. 子午工程数据资源概述 [J]. 中国科学数据 (中英文网络版), 2021, **6**(2): 1-23)
- [4] ZHANG Qingmei, WANG Chi, LI Hui, *et al.* Characters of the Pc3-4 magnetic pulsations at middle and low latitudes: preliminary geomagnetic results from Chinese meridian project[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(6): 608-616 (张青梅, 王赤, 李晖, 等. 中低纬度 Pc3-4 地磁脉动特性研究——子午工程数据分析初步结果 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(6): 608-616)
- [5] LI Hui, LIU Ziqian. A dataset of Dst indexes in China (2010-2022)[J]. *China Scientific Data*, 2023, **8**(4): 322-328 (李晖, 刘子谦. 中国区域 Dst 指数数据集 (2010-2022)[J]. 中国科学数据 (中英文网络版), 2023, **8**(4): 322-328)
- [6] ZHANG Min. Study on Characteristic of Geomagnetic Pulsation and Geomagnetic Storm in Meridian Region[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2012 (张敏. 子午圈地磁脉动和磁暴特征研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2012)
- [7] BALASIS G, AMINALRAGIA-GIAMINI S, PAPADIMITRIOU C, *et al.* A machine learning approach for automated ULF wave recognition[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2019, **9**: A13
- [8] OMONDI S, YOSHIKAWA A, ZAHRA W K, *et al.* Automatic detection of auroral Pc5 geomagnetic pulsation using machine learning approach guided with discrete wavelet transform[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **72**(3): 866-883
- [9] ANTONOPOULOU A, BALASIS G, PAPADIMITRIOU C, *et al.* Convolutional neural networks for automated ULF wave classification in swarm time series[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(9): 1488
- [10] OSMANE A, SAVOLA M, KILPUA E, *et al.* Quantifying the non-linear dependence of energetic electron fluxes in the Earth's radiation belts with radial diffusion drivers[J]. *Annales Geophysicae*, 2022, **40**(1): 37-53
- [11] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, **454**(1971): 903-995
- [12] BALASIS G, DAGLIS I A, GEORGIOU M, *et al.* Magnetospheric ULF wave studies in the frame of Swarm mission: a time-frequency analysis tool for automated detection of pulsations in magnetic and electric field observations[J]. *Earth, Planets and Space*, 2013, **65**(11): 1385-1398
- [13] BALASIS G, PAPADIMITRIOU C, DAGLIS I A, *et al.* ULF wave power features in the topside ionosphere revealed by Swarm observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(17): 6922-6930
- [14] ZENG Zhengjun, ZHANG Ying, DU Aimin, *et al.* Characteristics of Pc3 compressional waves in the topside ionosphere[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, **35**(3): 918-924 (曾正君, 张莹, 杜爱民, 等. 顶部电离层 Pc3 压缩波的波动特征 [J]. 地球物理学进展, 2020, **35**(3): 918-924)
- [15] INGLIS A R, IRELAND J, DOMINIQUE M. Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares: re-evaluating their nature in the context of power-law flare Fourier spectra[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **798**(2): 108
- [16] INGLIS A R, IRELAND J, DENNIS B R, *et al.* A large-scale search for evidence of quasi-periodic pulsations in solar flares[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **833**(2): 284
- [17] PAPADIMITRIOU C, BALASIS G, DAGLIS I A, *et al.* An initial ULF wave index derived from 2 years of Swarm observations[J]. *Annales Geophysicae*, 2018, **36**(2): 287-299

作者简介



方少峰 (第一作者) 男, 博士, 中国科学院国家空间科学中心高级工程师, 中国科学院青年创新促进会成员, 主要研究方向为数据挖掘与空间天气学的交叉融合研究.
E-mail: fangsf@nssc.ac.cn



邹自明 (通信作者) 男, 博士, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 国家空间科学数据中心主任. 主要研究方向为空间科学与数据科学交叉领域研究.
E-mail: mzou@nssc.ac.cn