

## 多频电场信号的 STL 分解及残差特征分析

潘可鑫<sup>1</sup>, 李忠<sup>1</sup>, 泽仁志玛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>防灾科技学院 河北廊坊

<sup>2</sup>应急管理部国家自然灾害防治研究院 北京

**【摘要】**为揭示电离层不同频段电磁信号的结构差异及其特征表现,针对多频信号分量可比性不足的问题,本文使用 STL 对 CSES 观测的 ULF、ELF、VLF 及 HF 频段电场数据进行统一分解。在固定观测区域与时间窗口下,对各频段信号的趋势项、周期项与残差项进行分析与对比。结果表明,STL 能够在不同频段有效分离趋势与周期成分,残差主要反映短时扰动及非平稳信息;ULF 与 ELF 频段趋势平缓、周期稳定,VLF 频段以趋势成分为主导,HF 频段趋势与周期特征相对较弱。研究结果揭示了 STL 方法在多频电场信号分析中的适用性与差异性,为基于残差项开展震前异常检测提供了方法基础。

**【关键词】**电离层扰动; STL; 多频段分析; 残差项; 趋势与周期

**【基金项目】**河北省地震灾害仪器与监测技术重点实验室开放基金 (FZ224104)

**【收稿日期】**2025 年 12 月 14 日

**【出刊日期】**2026 年 1 月 5 日

**【DOI】**10.12208/j.jer.20260002

### STL decomposition and residual feature analysis of multi-frequency electric field signals

Kexin Pan<sup>1</sup>, Zhong Li<sup>1</sup>, Zhima Zeren<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Disaster Prevention, Langfang, Hebei

<sup>2</sup>National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management, Beijing

**【Abstract】**To reveal the structural differences and characteristic manifestations of ionospheric electromagnetic signals across different frequency bands, and to address the issue of insufficient comparability among multi-frequency signal components, this paper employs Seasonal-Trend decomposition using Loess to perform a unified decomposition of electric field data observed by the China Seismo-Electromagnetic Satellite in the ULF, ELF, VLF, and HF bands. Under a fixed observation area and time window, the trend, seasonal, and residual components of the signals in each frequency band are analyzed and compared. The results indicate that STL can effectively separate the trend and seasonal components across different frequency bands, with the residual component mainly reflecting short-term disturbances and non-stationary information. Specifically, the ULF and ELF bands exhibit smooth trends and stable seasonalities; the VLF band is dominated by the trend component; and the HF band shows relatively weak trend and seasonal characteristics. These findings reveal the applicability and variability of the STL method in analyzing multi-frequency electric field signals, providing a methodological basis for pre-earthquake anomaly detection based on residual components.

**【Keywords】** Ionospheric disturbance; STL; Multi-frequency analysis; Residual component; Trend and periodic

#### 引言

地震前电离层电磁扰动的观测与分析是地震电磁学研究中的重要方向之一。已有研究表明,在强震发生前后,电离层电磁环境可能出现不同形式的扰动特征,包括电磁场强度变化、频谱结构调整及噪声水平异常等,这为探索地震—电离层耦合机制提供了重要依据<sup>[1-3]</sup>。

随着中国电磁监测试验卫星张衡一号 (China

Seismo-Electromagnetic Satellite, CSES) 的成功发射与稳定运行,其所获取的连续、全球覆盖的多频段电磁观测数据为震前电磁异常研究提供了可靠的数据基础,并已被广泛应用于不同地震事件的案例分析与统计研究中<sup>[4-5]</sup>。已有研究表明,基于季节性趋势分解方法 (Seasonal-Trend decomposition using Loess, STL) 的时间序列方法能够有效分离趋势、周期与随机扰动成分,

第一作者简介:潘可鑫 (2001-) 女,研究方向为灾害信息处理技术。

并在不同领域的复杂非平稳序列分析与预测中展现出良好的稳健性与通用性, 为复杂电磁时间序列的结构分析提供了可行的技术途径<sup>[6-7]</sup>。

然而现有工作多聚焦于特定频段或单一物理量, 研究重点通常放在信号是否出现异常, 而对不同频段电场信号之间的可比性与差异性关注不足, 对时间序列的结构特征及其在不同尺度上的表现缺乏系统分析<sup>[8]</sup>。CSES 电场探测仪在超低频(Ultra Low Frequency, ULF)、极低频(Extremely Low Frequency, ELF)、甚低频(Very Low Frequency, VLF)及高频(High Frequency, HF)多个频段同步获取的功率谱密度信号在背景变化及噪声特性等方面均存在差异, 直接基于原始信号进行跨频段比较难以有效揭示其内在结构特征。

已有研究尝试将 STL 方法应用于 ELF 频段数据分析<sup>[9]</sup>, 并取得一定效果。在此基础上, 本文将 STL 方法拓展至多频段电场功率谱密度数据中进行系统对比分析, 对既有结果进行验证并进一步补充不同频段结构特征的差异。基于此, 本文对 CSES 多频段电场功率谱密度数据进行统一去趋势处理, 重点考察 STL 在多频段电场信号中对趋势、周期与残差成分的分离效果, 并对不同分量在趋势与周期结构上的差异特征进行统一分析, 从而为后续基于去除背景与周期成分的电场信号开展地震相关性分析提供稳定且具有可比性的扰动成分基础。

## 1 方法

在电离层电磁监测中, 采集到的信号通常具有强非平稳性和复杂周期特性。为有效分离信号的长期趋势、周期波动和随机扰动成分, 本研究采用 STL 对电场时间序列进行分析。STL 由 Cleveland 等人于 1990 年提出, 是一种适用于非线性、非平稳时间序列的稳健分解方法<sup>[10]</sup>, 其通过 Loess 局部加权回归对趋势项和周期项进行估计, 能够自适应信号随时间变化的非线性特征和不均匀波动, 而无需预设全局线性模型。该方法通过迭代方式分离长期变化与周期性波动, 具备良好的多尺度分解能力, 适用于包含多频率成分的电场信号。通过调节平滑参数, STL 可控制对异常值的敏感性, 在保留趋势与周期信息的同时减弱随机噪声的干扰, 这对震前信号异常的检测具有重要意义。

给定时间序列  $Y_t$  ( $t = 1, 2, \dots, N$ ), STL 可将其分解为三部分:

$$Y_t = T_t + S_t + R_t$$

其中  $T_t$  表示趋势项 (Trend), 反映信号的长期变

化规律, 对应轨道间的背景演化, 是电场纬向的周期性变化;  $S_t$  表示周期项 (Seasonal), 反映信号中可识别的周期性振荡成分, 代表电场经向的周期性变化;  $R_t$  表示残余项 (Remainder), 包含信号中无法由趋势和周期解释的部分, 主要是随机扰动或突发异常, 是异常分析的重点对象。

周期参数的合理设定是确保 STL 分解结果具备物理可解释性的关键前提, 其取值并非基于数据拟合或经验选择, 而是根据电离层电场信号的物理周期规律。针对 CSES 卫星电场观测数据的特点, 本文中周期的确定主要基于电离层电场信号在轨道尺度上的重复变化特征。由于卫星在近似固定轨道条件下对相近纬度区域进行周期性重复观测, 电场信号在空间分布及背景演化上呈现出一定的准周期结构, 该特征在沿轨构建的时间序列中表现为相对稳定的周期性变化。综合考虑轨道长度、采样分辨率等因素, 本文选取单轨道长度作为周期参数, 以刻画主导周期特征, 并避免将短时扰动误并入周期分量。为保证不同频段分解结果在结构分析上的可比性, 该周期参数在各频段中保持一致, 其取值依据电离层信号的物理长度规律而非经验选择, 从而在多频段分解中既体现物理鲁棒性, 又保证结构分析结果的可比性。

为评估 STL 分解后不同分量的特征效果, 本文从趋势项、周期项及残余项三个层面对分解结果进行分析评价。残差方差占比反映在去除趋势项和周期项后, 残差在原始信号中所占的相对比例, 以表征短时波动成分在整体信号中的表现程度, 其值较大通常对应高频扰动或不规则成分占比较高的情况。周期项差分方差用于表征周期分量的连续性与稳定性, 其值越小, 周期结构越平滑。残差均值与残差标准差分别反映残差项的整体偏置和波动幅度, 残差均值接近零通常意味着趋势与周期成分已被较好剥离, 而较小的残差标准差通常对应更稳定的去趋势结果。趋势斜率用于描述趋势项的变化方向与变化速率, 反映信号的整体演化特征。趋势强度  $F_t$  与季节性强度  $F_s$  则分别刻画趋势项和周期项在原始信号中的相对贡献程度, 其值越大, 表明对应分量在信号结构中占据更为显著的地位。

本文以原始信号序列为基准, 对比分析 STL 分解前后信号在趋势、周期及短时扰动表征上的差异。通过比较不同频段原始信号及其残余项在波动特征与非平稳性方面的变化, 并开展多频段间的横向对比, 分析各频段残差结构的差异性与一致性, 评估 STL 在削弱背景与周期成分、增强扰动信息可识别性方面的效果, 从

而为后续基于残差序列的震前异常检测提供分析基础。

## 2 数据与研究区域

### 2.1 数据介绍

中国电磁监测试验卫星张衡一号于 2018 年 2 月 2 日成功发射入轨, 运行于约 500km 高度的太阳同步轨道。其主要任务是对全球范围内的电磁场、电离层等离子体环境及高能粒子进行综合观测, 为地震电磁学研究和空间环境变化分析提供基础数据支撑。卫星搭载包括电场探测仪 (Electric Field Detector, EFD) 在内的八种高精度科学载荷<sup>[1]</sup>。其中 EFD 用于采集 ULF (DC~16Hz)、ELF (6Hz~2.2kHz)、VLF (1.8kHz~20kHz) 以及 HF (18kHz~3.5MHz) 四个频段的电场信号, 涵盖波形数据和功率谱密度数据, 并同步记录三个正交分量, 分别对应 Ex、Ey 和 Ez (南北、东西及上下方向)。上述多频段、多分量电场数据具有显著的非平稳性和尺度差异特征, 为开展基于 STL 分解的去趋势处理与分量分离研究提供了理想的数据基础, 也为后续对去趋势电场信号开展物理解释及地震相关性分析奠定了数据条件<sup>[2]</sup>。

### 2.2 工作区域及数据处理

本研究基于张衡一号卫星电场探测仪获取的功率谱密度数据, 选取 2021 年 9 月 8 日墨西哥南部 Mw7.0 地震为分析对象, 震中位置约为北纬 17.12°, 西经 98.87°。由于张衡一号卫星的重访周期为五天, 本文选取震时及其前四天 (9 月 3 日-9 月 7 日) 的各频段观测数据为分析样本。尽管时间窗口相对有限, 但采用固定重访周期的单轨观测模式, 各频段观测点数量仍较为充足。其中, ULF 频段共获取 64752 个有效观测点 (覆盖 71 条轨道), ELF 频段 326742 个观测点 (71 条轨道), VLF 频段 57672 个观测点 (72 条轨道), HF 频段 65664 个观测点 (72 条轨道)。因此, 在时间跨度相对受限的条件下, 数据样本规模依然充足, 能够为后续统计分析分解结果的稳定性评估提供可靠的数据支撑。

该地震事件具有明确的时间窗口和固定的空间位置, 为多频段电场信号处理及方法验证提供了相对稳定的数据条件。研究区域位于构造活动较为活跃的板块交汇带, 电离层电磁环境具有一定的代表性, 有利于检验在复杂背景条件下去趋势方法的稳定性与适用性。通过固定时间与固定空间范围对 CSES 电场观测数据进行筛选与分析, 可以有效减少由观测区域差异引入的不确定性, 从而更加客观地评估 STL 分解在多频段电场功率谱密度数据中的分量分离效果及差异。因此

本研究的主要目标在方法层面的验证与多频段结构特征的系统分析, 未来工作将基于更多震例样本开展进一步的统计检验与对比分析, 以验证所构建方法框架的普适性与稳健性。

为提高 STL 分解在 CSES 电场功率谱密度数据中的稳定性与可靠性, 本文在分解前对原始观测数据进行了统一的数据处理。本研究对每条轨道数据进行统一的去头去尾处理, 剔除首尾高纬地区的边缘点, 以减少对趋势项和残差项估计的干扰。由于日间轨道受多种环境因素影响较大<sup>[3]</sup>, 本文仅选取升轨 (夜间) 观测数据进行分析, 以降低降轨观测信号对电场信号的潜在干扰。对满足时间连续性和空间约束条件的升轨数据按时间顺序进行拼接, 构建时间序列用于分析。另外, 考虑到功率谱密度数据的数值幅度较小, 进行 STL 分解与可视化时可能导致数值稳定性降低及分量幅度差异体现不明显, 本文在分解前对原始数据进行统一的幅值放大处理, 将数据整体放大千倍。该线性尺度变换不改变信号的相对变化特征和时间结构, 仅用于提升数值计算的稳定性与分解结果的可辨识性。在此基础上, 为明确分解的物理时间尺度, 本文以单条轨道的观测长度作为 STL 分解的全局周期参数。通过轨道尺度刻画电场信号的背景变化和周期结构, 可以有效反映电离层电场的主导周期特征, 同时实现趋势项与周期项的合理分离, 保证分解结果在物理意义上的可解释性与多频段分析的一致性。

## 3 实验结果与分析

为系统分析不同频段电场功率谱密度信号的长期趋势与周期性变化特征, 本研究采用 STL 方法, 对 ULF、ELF、VLF 和 HF 四个频段的观测序列分别进行分解。STL 将原始时间序列分解为趋势项、周期项和残差项, 从而实现长期变化、准周期波动及随机扰动的有效区分。通过对趋势项、周期项及残差项的定量指标分析, 来评价 STL 在不同频段信号上的分解效果, 并进一步对各频段特征进行对比。图 1 (a) - (d) 依次是 ULF、ELF、VLF、HF 的 STL 分解结果, 其中各子图依次表示原始信号、趋势项、周期项和残差项, 横轴为日期尺度, 纵轴为功率谱密度幅值。

从图 1 的分解结果可以看出, 不同频段电场功率谱密度信号在趋势项、周期项和残差项方面表现出明显差异。Trend 子图展示了数据的长期变化特征, 对应卫星不同轨道之间的背景变化情况, 可以看出在 ULF、ELF 频段的趋势项在日尺度上呈现出较为明显的周期性双峰趋势, 相比之下, VLF 频段中该特征有所减弱,

而 HF 频段中趋势项的周期性变化则不甚明显。Seasonal 子图刻画了信号在单轨尺度上的周期结构, 各频段在该分量中均表现出较为稳定、以单轨为单位交错分布的周期性“V”字形特征。Residual 子图整体围绕零值波动, 未表现明显的长期趋势或低频漂移特征, 但保留了原始数据中的局部波动特征, 表明 STL 分解在去除背景趋势和稳定周期结构的同时, 较好地保留

了原始信号中的非平稳扰动成分。这代表 STL 分解能够在多频段电场信号中实现不同时间尺度成分的有效分离。同时本研究结果进一步验证了前人将 STL 方法应用于 ELF 频段数据分析的可靠性与合理性, 并在此基础上拓展和完善了多频段结构化分析框架, 为后续深入开展残差项异常识别与震前扰动特征研究奠定了方法基础。

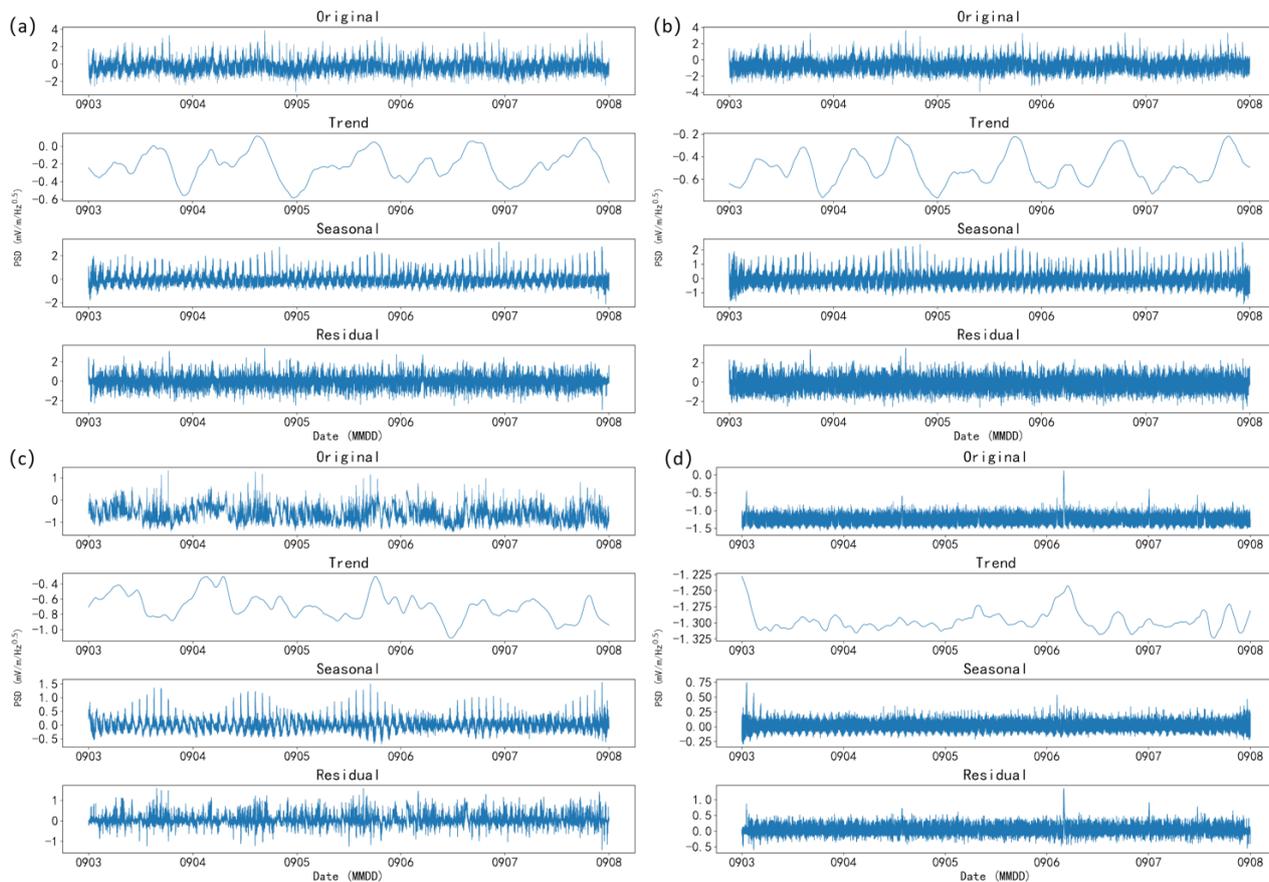


图 1 ULF、ELF、VLF 和 HF 频段电场信号的 STL 分解结果

表 1 四频段 STL 分解主要指标统计

频段	残差方差占比	周期项差分方差	残差均值	残差标准差	趋势斜率	趋势强度 $F_t$	季节性强度 $F_s$	K-W 检验 (p)
ULF	0.566	0.087964	0.024501	0.417500	$1.46 \times 10^{-7}$	0.1334	0.5093	0.128
ELF	0.559	0.063280	0.004253	0.364102	$-7.43 \times 10^{-9}$	0.1245	0.4987	$1.10 \times 10^{-53}$
VLF	0.588	0.012156	0.028938	0.217071	$6.11 \times 10^{-7}$	0.3694	0.4522	$9.79 \times 10^{-30}$
HF	0.284	0.006968	0.015522	0.112241	$9.41 \times 10^{-8}$	0.0175	0.2696	$9.70 \times 10^{-24}$

为进一步对上述分解特征进行定量刻画与对比分析, 表 1 汇总了四个频段 STL 分解的主要定量评价指标, 包括残差方差占比、周期项差分方差、残差均值与标准差、趋势斜率以及趋势强度 $F_t$ 和季节性强度 $F_s$ 。

从残差方差占比来看, ULF、ELF 和 VLF 频段的残差方差占比均在 0.5 左右, 说明 STL 能够在这些频

段中有效剥离趋势与周期成分, 使残差主要反映短时扰动和随机波动。相比之下, HF 频段的残差方差占比明显降低 (0.284), 表明高频信号中可被 STL 识别的趋势与周期结构相对有限。

趋势项反映信号的长期变化特征, 其斜率和趋势强度可以用于定量描述趋势变化的显著性。ULF 与

ELF 频段的趋势斜率均接近于零 (ULF 为  $1.46 \times 10^{-7}$ , ELF 为  $-7.43 \times 10^{-9}$ ), 对应的趋势强度  $F_t$  分别为 0.1334 和 0.1245, 表明低频段信号的长期变化较为平缓, 整体以准稳定背景为主。相比之下 VLF 频段的趋势斜率明显较大 ( $6.11 \times 10^{-7}$ ), 趋势强度提升至 0.3694, 显示出更为显著的长期变化特征。这一结果表明, 在 VLF 频段中, 趋势项对原始信号的解释能力明显增强。HF 频段的趋势强度最低 ( $F_t=0.0175$ ), 趋势斜率虽为正值, 但幅度也较小, 说明高频段信号中长期趋势成分较弱。

周期项用于描述信号中稳定的准周期波动, 其连续性可通过周期项差分方差进行衡量。ULF 频段的周期项差分方差为 0.087964, ELF 频段为 0.063280, 二者均表现出较好的周期连续性, 说明低频段信号中存在稳定、连续的周期结构。这种周期性在单轨道尺度上通常表现为较为一致的波动形态。VLF 频段的周期项

差分方差较低 (0.012156), 表明周期项相对平滑, 但其季节性强度  $F_s$  仍保持在 0.4522, 说明周期成分依然存在, 但相对于趋势项的重要性有所减弱。HF 频段的周期项差分方差最低 (0.006968), 且季节性强度仅为 0.2696, 表明高频信号中的周期性特征较弱, STL 提取到的周期项幅度和稳定性均有限。图 2 (a) - (d) 依次展示了 ULF、ELF、VLF、HF 信号经 STL 分解得到的周期项的自相关函数 (Autocorrelation Function, ACF)。可以观察到, 四个频段的周期项均在多个滞后阶数上呈现出较为显著的正相关峰值, 且各峰值之间的间隔基本一致, 表明该分量具有稳定的准周期结构。随着滞后阶数的增加, ACF 峰值幅度逐渐衰减, 但仍保持明显的周期性特征, 说明该周期在较长时间尺度内具有良好的连续性, 并非短时间偶然振荡。这表明 STL 方法能够从原始信号中有效提取具有统计显著性的周期成分, 而非由随机波动或趋势残留导致的伪周期。

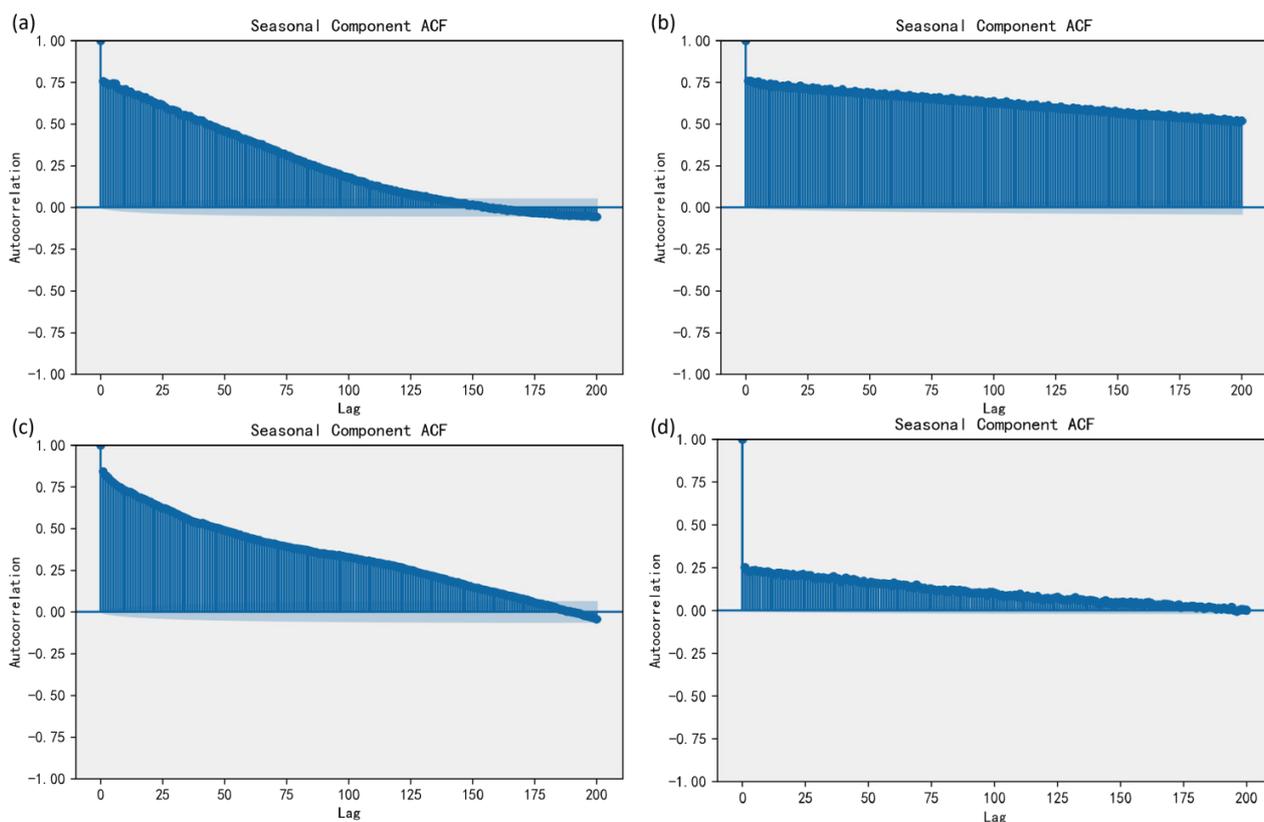


图 2 ULF、ELF、VLF 和 HF 频段电场信号的周期项 ACF

残差项主要反映 STL 无法解释的高频扰动和随机噪声成分。随着频率升高, 残差标准差呈明显下降趋势: ULF (0.4175) > ELF (0.3641) > VLF (0.2171) > HF (0.1122)。这一结果表明, 高频段信号的短时波动幅

度整体较小, 而低频段中随机扰动和非平稳成分更为显著。同时, 各频段残差均值均接近于零, 说明 STL 分解在统计意义上保持了残差项的无偏性, 进一步验证了分解结果的合理性。

Kruskal-Wallis 检验结果表明, ULF 残差与其他频段的分布差异不显著 ( $p=0.128$ ), 而 ELF、VLF 和 HF 的残差分布与其他频段存在高度显著差异 ( $p$  值均低于  $10^{-24}$ )。这一统计结果与 STL 分解后的信号特征相符, 低频段 ULF 残差中仍包含一定的非平稳扰动, 但其分布与其他频段总体差异有限, 可用于识别长期尺度的异常事件; 而 ELF、VLF 和 HF 的残差显著偏离其他频段, 表明各频段在残差特征上存在统计上的显著差异, 为基于残差的异常检测提供了可靠的统计支撑。

#### 4 结论

本文使用 STL 方法对 2021 年 9 月 8 日的墨西哥地震震时及重访周期时段内的各频段功率谱密度数据进行分解, 并综合趋势强度、季节性强度及残差的结构特征, 对不同频段信号分解结果的差异性和 STL 方法的适用性进行了分析, 为后续基于残差项的异常检测研究提供可能性。主要结论如下:

(1) STL 分解在不同频段中均能在不同程度上削弱背景趋势和稳定周期结构, 使残差项更突出短时扰动和非平稳信息。这一处理降低了趋势和周期对异常识别的干扰, 为后续基于残差的异常检测任务提供了更为稳健和可解释的信号输入。

(2) 低频段 (ULF、ELF) 信号具有平缓的长期趋势与较为稳定的周期结构。其残差方差占比较高, 残差标准差亦相对较大, 表明在剥离主要趋势与周期后, 残差中仍蕴含显著的非平稳扰动能量。因此, 低频段残差适用于识别幅度较大、持续时间较长、与背景缓慢变化或轨道尺度周期偏离明显的异常事件。

(3) VLF 频段表现出不同于低频段的特征。趋势强度高于低频段, 而周期项的连续性和季节性强度相对减弱。表明长期演化过程在该频段更为显著, 而周期项的连续性及其强度与低频段相比较弱。经 STL 分解后, 趋势项较好地吸收了背景的缓慢变化, 残差项更集中地反映了中短时间尺度的局地扰动, 使该频段残差更符合“震前异常信号载体”的特征, 适合进一步开展异常检测与特征提取分析。

(4) HF 频段的趋势与周期性成分均较弱, 残差方差和标准差均最小, 表明该频段信号整体呈现较强的平稳性。相比之下, 低频段残差波动幅度较大, 反映出其包含更为显著的随机扰动与非平稳成分。HF 频段残差标准差最小、序列表现最平稳, 这一特征表明其在极短时扰动的反映上具有潜在敏感性, 可作为辅助频段用于捕捉短时异常信号。

通过多频段 STL 分解结果在统计特性和信号结构

上的一致性与差异性分析, 本研究不仅验证了该方法在各频段的适用性与合理性, 揭示了电场信号从低频到高频在趋势、周期与残差结构上的系统性特征。该结果在一定程度上补充并拓展了以往基于单一频段的分析研究, 为不同频段信号的结构可比性研究提供了统一的分析框架。同时, 本研究为后续基于残差项开展震前异常检测与定量分析奠定了方法学基础与数据支撑。

#### 参考文献

- [1] 余涛, 毛田, 王云冈, 等. 汶川特大地震前电离层主要参量变化[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 1086-1092.
- [2] Leonard R S, Barnes Jr R A. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70(5): 1250-1253.
- [3] Liu J Y, Chen Y I, Pulintsev S A, et al. Seismo-ionospheric signatures prior to  $M \geq 6.0$  Taiwan earthquakes[J]. Geophysical research letters, 2000, 27(19): 3113-3116.
- [4] Shen X H, Zhang X M, Yuan S G, et al. The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(5): 634-642.
- [5] Zhima Z, Dapeng L, Xiaoying S, et al. Current status and scientific progress of the Zhangheng-1 satellite mission[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2022, 54(4): 455-465.
- [6] Theodosiou M. Forecasting monthly and quarterly time series using STL decomposition[J]. International Journal of Forecasting, 2011, 27(4): 1178-1195.
- [7] Yin H, Jin D, Gu Y H, et al. STL-ATTTLSTM: vegetable price forecasting using STL and attention mechanism-based LSTM[J]. Agriculture, 2020, 10(12): 612.
- [8] 何宏伟, 王秀英, 赵国存, 等. 张衡一号卫星探测的赤道附近电场分布及其与电离层分布的关系[J]. Chin. J. Space Sci. 空间科学学报, 2023, 43(5): 821-832.
- [9] 宋俊杰. 强震震例电磁异常分析及智能报告生成方法研究与实现[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2025.
- [10] Cleveland R B, Cleveland W S, McRae J E, et al. STL: A seasonal-trend decomposition[J]. J. off. Stat, 1990, 6(1): 3-73.
- [11] Huang J P, Lei J G, Li S X, et al. The Electric Field Detector (EFD) onboard the ZH - 1 satellite and first observational

- results[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, 2(6): 469-478. 105299.
- [12] 刘世为. VLF 电磁波在地-电离层波导中的传输特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [13] Zawdie K A, Dhadly M S, McDonald S E, et al. Day-to-day variability of the bottomside ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, 205:

**版权声明:** ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

