

研究论文

基于小波分析的地磁甚低频脉动指数及其在高磁纬度地区甚低频脉动共轭对比研究中的应用

徐中华¹ C. Robert Clauer¹ Michael D. Hartinger² Hyomin Kim³
Daniel R Weimer¹

(¹ 美国弗吉尼亚理工大学, 弗吉尼亚州 黑堡 24061;

² 美国科罗拉多州博多尔市空间科学研究所, 科罗拉多州 博多尔

69122; ³ 美国新泽西理工学院日地研究中心, 新泽西州 纽瓦

克 07102)

摘要 地磁甚低频脉动是甚低频磁流体波在磁层中传播的地面表现, 开发近实时空间天气产品来监测这些地磁脉动至关重要。本文基于小波分析提出一种地磁甚低频脉动指数, 并将其应用于研究在南极洲及西格陵兰岛的磁共轭位置观测到的地磁甚低频脉动。研究结果表明, (1)该指数可有效识别 Pc4—Pc5 频率范围内的脉动事件(包括瞬态事件), 并获得甚低频脉动在时域和频域的重要特征。(2)基于共轭位置地磁脉动的小波分析比较揭示了冬至日、夏至日条件下南北半球甚低频脉动的相似性和差异。本研究也表明, 南北半球磁共轭位置观测到地磁脉动存在的差异受到行星际磁场条件、磁场拓扑、观测磁纬度和日照等条件影响, 需要进一步研究案例中实际磁层和电离层配置以及驱动条件。

关键词 地磁扰动 地磁甚低频脉动 地磁共轭

doi: 10.13679/j.jdyj.20230067

0 引言

地磁甚低频(Ultra Low Frequency, ULF)脉动是甚低频磁流体波在磁层中传播的地面表现。50 多年前, Dungey^[1]认为可以用地磁场线激发的阿尔文波来解释微脉动。它们独特的周期性启发 Dungey 提出用相对半球电离层之间反射的驻波来解释磁脉动^[2]。因此, 开发近实时空间天气(Space Weather)产品来监测这些地磁脉动至关重要, 比如对磁力计数据进行适当的频谱分析(例如使用小波分析技术)对于地磁感应电流(Geo-magnetically Induced Current, GIC)风险评估很重要^[3-4]。此外, ULF 脉动也可以在辐射带/环流动力学中发挥重要作用^[5-6]。因此, 地磁甚低频

波特性的常规表征是空间天气预报重要的潜在组成部分。

ULF 脉动基于其频率和稳定性可分为连续脉动和不规则脉动, 其中, Pc1—Pc5 表示连续脉动, Pi1 和 Pi2 表示不规则脉动^[7]。甚低频率脉动(Pc4—Pc5, 约 2~22 mHz)是由许多不同现象引起的磁流体动力(Magnetohydrodynamic, MHD)波, 例如场线共振(Field line resonance, FLR); 它们通常产生于太阳风/磁鞘或磁层顶/边界层中^[8-12]。研究者可以使用地面磁力计或天基磁场和电场的现场观测来测量脉动。先前的几项研究对磁层 Pc4—Pc5 脉动的单色和宽带频率源进行了建模^[13-16]。在高纬度地区, ULF 频谱包括准周期性(突发式)涨落和单色、空间相干脉动^[17-18]。准周期波动通常是由瞬态事件引起的, 例如太阳风压力脉冲和

[收稿日期] 2023 年 10 月收到来稿, 2024 年 1 月收到修改稿

[基金项目] 美国国家科学基金(NSF-OPP 1744828, NSF-AGS 2027168)资助

[作者简介] 徐中华, 男, 1977 年生。教授, 主要从事空间物理研究。E-mail: zxu77@vt.edu

磁层顶的压缩^[19]。此外,也有研究使用边界处或附近的航天器报告了与瞬态事件相关的 ULF 脉动^[20-22]。还有研究在低纬度观测到与磁层空腔模式振荡相关的甚低频脉动^[4,23]。当满足阿尔文共振条件时,通过 FLR 激发多谐波驻振,FLR 激发的 ULF 脉动由磁场线两端电离层的电导率控制^[24]。

地磁甚低频脉动可以在地球表面的两个点同时观测到,这些点连接在同一条地磁场线上,但位于不同半球的相对端,这通常被称为“磁共轭”^[25]。通过地面测量可以发现北半球和南半球之间的磁场甚低频脉动存在同时对称/不对称现象。沿着磁场线传播的某些类型的波是地面站处于共轭位置的共轭特征之一。Liu 等^[26]研究了出极除区域附近甚低频脉动的地面测量,以确定南极中山站和北极朗伊尔站是否实现地磁共轭。地面磁力计的多点观测网络为揭示日地电磁系统的耦合机制提供了潜在解释^[24]。由于地面上观测到的 ULF 脉动通常与磁层中发生的现象有关,可

以用现场卫星观测(例如来自 THEMIS, Geostationary Operational Environment Satellite(GOES))和 OMNI 行星际磁场(OMNI IMF)观测的数据提供沿磁层内磁场线的背景信息。结合地面台站和卫星的测量,沿着共轭磁场线,从空间到两个半球电离层做甚低频脉动事件的研究。

为了研究 ULF 脉动的特征,在之前的研究中已经开发了几种 ULF 指数^[20, 27-30]。这些 ULF 指数通过使用地面和卫星测量,重点关注亚暴爆发、ULF 波功率对行星际参数的响应以及地磁活动指数(磁暴环电流指数(Dst)、3 小时磁情指数(Kp)和极区磁亚暴强度指数(AL)等)等主题。由于不同的数据限制,这些指数的时间分辨率从秒到小时不等。由于这些脉动通常与太阳风和磁层中

的瞬态事件有关,因此,为了比较两个半球的共轭甚低频脉动,需要时域和频域的高分辨率信息。由于脉动源的多尺度和非线性特性,甚低频脉动是非平稳的,通常是脉冲性的,并且它们的频谱可以随时间变化而变化。

小波分析特别适合于研究 ULF 脉动,因为它可以将信号分解为多个频带中随时间变化的变化。这些与时间相关的变化仍然保留了位于原始时刻的脉冲特征,因此可以在时域中的不同位置

之间进行脉动的比较。近年来,学者对使用小波分析各种非线性地球物理数据越来越感兴趣^[27, 31-33]。小波分析应用广泛,可用于多分辨率分析(multiresolution analysis, MRA)、交叉小波分析和时间尺度分析^[34]。

本文目标是展示如何通过使用磁共轭观测来改善 ULF 脉动指数。基于小波的 ULF 脉动指数通过过滤来自在南极新部署的自主磁力计链、自主自适应低功耗仪器平台(Autonomous Adaptive Low-Power Instrument Platform, AAL-PIP)链的原始磁场数据计算^[35-36],并于 2013 年 1 月通过小波分析将西格陵兰岛的磁共轭链转化为 Pc4—Pc5

频段。例如,在 2013 年 1 月 19 日通过索引识别

比较两个半球链之间的幅度、频谱、相关性和相位等细节特征,以研究半球间磁共轭性。ULF 脉动案例分析揭示了沿磁力线从两个半球的磁层传播到地面的瞬态事件的独特特征。

1 数据和研究方法

对于 ULF 脉动指数,在北半球,本文使用了丹麦国家太空研究所(DTU Space)运行和管理的格陵兰岛西海岸地面磁通门式磁力计链的数据(http://www.space.dtu.dk/English/Research/Scientific_data_and_models/Magnetic_Ground_Stations.aspx#desc)。在南半球,使用了由弗吉尼亚理工大学的磁层-电离层科学小组(MIST)部署和管理的位于东南极高原的 AAL-PIP 磁通门式磁力计链的数据(<http://mist.ece.vt.edu>)。磁通门式磁力计是一种用于测量磁场强度矢量变化的高精度仪器,广泛应用于观测空间物理现象引发的地球磁场变化。地磁共轭站的位置如图 1 所示。西格陵兰磁力计数据以 1 Hz 和 20 Hz 的速率采样。均方根(RMS)噪声在 1 mHz~1 Hz 频段内约为 0.1 nT,时间精度为 1 s,对于 20 Hz 采样率下的大多数数据,最终分辨率为 0.25 nT;对于 1 Hz 采样率下的数据,最终分辨率为 0.125 nT 采样率。在设置过程中,传感器轴沿当地磁北(H)、磁东(E)和垂直向下(Z)方向;本文仅检查 H 分量(图中也称为“X”)的扰动。AAL-PIP 中的磁通门磁力计部署在东南极高原,用于远程高纬度地理空间数据收集。时

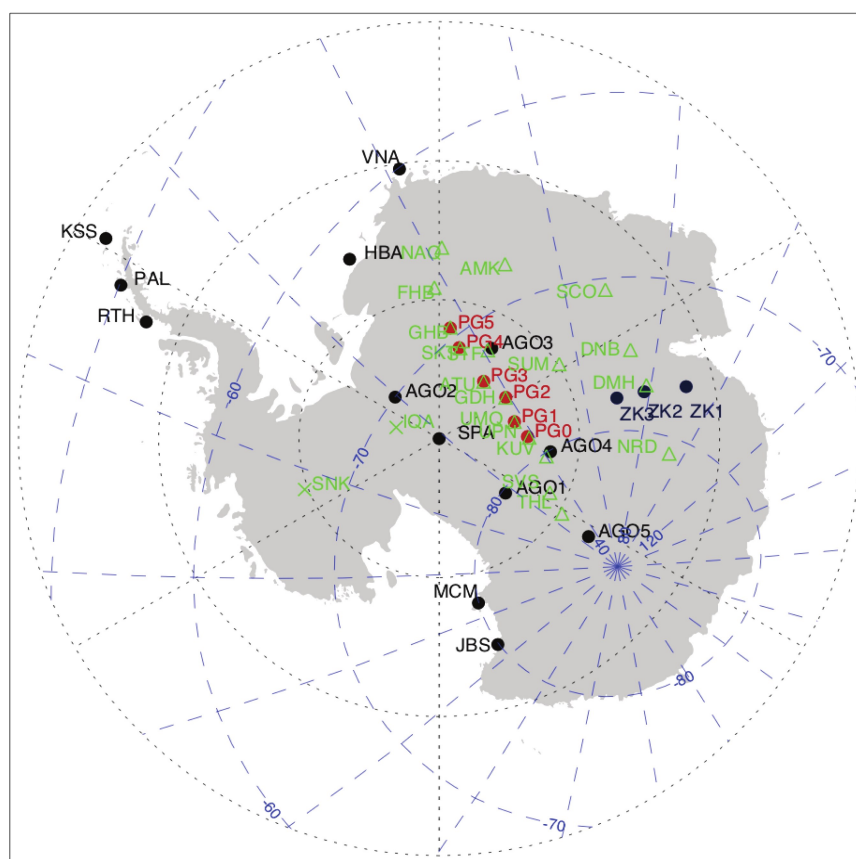


图 1 南北半球地磁共轭站的位置。其中蓝色虚线为磁经纬度, 黑色虚线为地理经纬度, 数字对应单位是度。红色圆点标识(PG0—PG5)是位于南极的地磁台站位置。绿色三角标识(NAQ 等)是将位于北半球格陵兰岛的地磁台站沿地球磁场模型投影到南极的位置。黑色圆点标识(AGO1 等)是位于南极的地磁台站。可以看出 PG0 与 Upernavik (UPN), PG1 与 Umanaq (UMQ), PG2 与 Godhavn (GDH), PG3 与 Attu (ATU), PG4 与 Sukkertoppen (SKT), PG5 与 Godthaab (GHB)的位置几乎重合, 即处于磁共轭位置, 形成磁共轭站对

Fig.1. Locations of geomagnetic stations in northern and southern hemispheres. The blue dotted line is the magnetic longitude and latitude in degree, and the black dotted line is the geographical longitude and latitude. The red dots (PG0—PG5) are geomagnetic stations in Antarctica. The green triangles (NAQ and others) are geomagnetic stations in Greenland, northern hemisphere projected to the southern hemisphere along the Earth's magnetic field model. The black dots (AGO1 and others) are geomagnetic stations in Antarctica. The positions of PG0 and UPN, PG1 and UMQ, PG2 and GDH, PG3 and ATU, PG4 and SKT, and PG5 and GHB almost overlap, which are magnetic conjugate station pairs

间精度为 1 s, 最终分辨率为 0.01 nT 更多关于南半球的磁场信息详细信息参见 Xu 等^[37]。在事件研究中, 高级成分探测器(Advanced component detector, ACE)卫星测量用于检查太阳风等离子体参数和超低频脉动的磁气层起源, 本文中主要使用了 ACE 磁场仪器的数据^[38]。

选择小波分析的原因之一是超低频脉动的驱动因素往往与特定的频率范围有关, 因此, 可以使用频率分离来分离由不同机制驱动的脉动。小波分析可以将磁场测量分解为不同频带内的变化 (MRA), 同时仍然保留这些变化中的局部时变特

征。这使得可以根据驱动因素的频率来分离变化。另一个原因是高纬度地区的地磁超低频脉动通常与太阳风/磁层中的瞬态事件有关。为了捕捉磁场测量中的脉冲特征, 最大重叠离散小波变换(Maximum overlapping discrete wavelet transform, MODWT)^[39]的小波分析具有无样本大小限制(2 的幂限制), 分析结果对数据起点时间不敏感, 并且没有人为的“对齐”效应等特点^[3]。时域中的脉冲模式可以通过 MODWT 在原始地磁测量中的选定频带内进行定位和滤波, 然后在时域中的共轭位置进行比较。

为了处理丢失的数据,磁力计数据采用“Piecewise Cubic Hermite Interpolation”方法进行插值^[40]。本研究中两个半球的所有站点所使用的地面磁力计数据均被转换为 10 s (0.1 Hz)分辨率,无间隙,并应用小波分析处理数据进行频谱分析。具体流程如下,首先应用 MODWT 分析将地磁数据过滤并分解为特定频带的不同时间序列,以进行地磁脉动研究。这些时间序列被命名为细节系数“Details”和平滑系数“Smooth”^[39]。细节系数 D_i 对应于每秒 2^{-i-1} 到 2^{-i} 周期范围内的频率,对应于基期 2^i 和 2^{i+1} 之间的物理时间尺度(其中, $i=1,2,3,\dots$, 称为细节级别)。平滑系数 S_i 由每秒 2^{-i-1} 周期以下的样本均值和频率分量组成,与原始时间序列相比,外观上平滑。由于小波分析的基周期为 10 s,对于分解时间序列细节 1 (D1),扰动周期在 20~40 s 之间,中频为 33.3 mHz;对于细节 2 (D2),它在 40~80 s (16.7 mHz)之间,依此类推,直到达到数据跨度的最大值。最后一个频带将是平滑的,其中主要包含直流分量。Pc4 频率脉动主要位于 D2 和 D3, Pc5 频率脉动将位于 D4 和 D5 当原始数据被 MODWT 分解为“细节”和“平滑”系数序列(Details 和 Smooth)时,分解序列中的峰值与原始信号保持相同的时间信息。将所有“细节”和“平滑”系数相加会返回原始数据。本文将 Pc5 指数定义为 D4 和 D5 之和,将 Pc4 指数定义为 D2 和 D3 之和。

析结果

根据地磁数据计算的小波指数显示了有关磁共轭站对中地磁脉动的幅度、相关性和频谱信息。单独研究的几个案例以及使用 2013 年 1 月 19 日对 3 个磁共轭站对(ATU-PG3, GDH-PG2 和 UMQ-PG1)进行的统计研究的结果如下。

根据行星际磁场(Interplanetary Magnetic Field, IMF)的情况和数据可获得性,文中选取 2013 年 1 月 19 日的数据作为样本研究。对来自 3 个共轭对(ATU-PG3, GDH-PG2 和 UMQ-PG1)的原始地磁数据进行了小波分析处理。2013 年 1 月 19 日 ACE 卫星测量的 IMF 参数如图 2 所示,显示了当时的磁层和太阳风背景条件。需要注意的是,SPADES 中的 OMNI 数据在 08:33 —

14:33 UT 之间存在缺失数据的间隙。使用实时 ACE 数据补全时,ACE 卫星到地面的延迟时间随着太阳风的变化而变化^[41]。根据图 2 底部面板中看到的 Pc5 脉动指数(高于背景水平)的增强, Pc5 ULF 波出现在 01:00—03:00 UT, 08:00—09:00 UT, 14:00—16:00 UT, 17:00—18:00 UT 和 22:00—23:00 UT 期间。由于 01:00—03:00 UT 和 22:00—23:00 UT 周期嵌入到可能与 ULF 脉动无关的亚暴活动中,因此 08:30—09:30 UT(案例 1), 14:00—16:00 UT(案例 2)和 17:00—18:00 UT(案例 3)周期选择显示 ULF 脉动活动的示例。

对于 08:30—09:30 UT 期间的案例 1,去趋势磁场变化(通过从原始信号中去除平滑系数 Smooth S12 分量,即周期长于 81920 s 的趋势)Pc4/Pc5 指数如图 3 所示。它表明脉动为共轭站对之间的幅度和相位不同。图 3a 展示出较低频率的脉动,即去趋势磁场变化。这些脉动的详细特征如图 3b 和图 3c 中的滤波 Pc4/Pc5 脉动指数所示。共轭站对的 Pc4/Pc5 脉动的幅度和相位之间存在明显差异。Pc5 脉动显示北站峰值在 20~30 nT 左右,南站峰值在 60~80 nT 左右。南站和北站之间的延误时间从 1 min (GDH-PG2)到 3 min (ATU-PG3)不等。

共轭对的振幅谱图如图 4 所示。振幅谱图是波振幅的动态谱,而不是传统的功率动态谱。选

择波幅而不是波功率的原因是:波幅同时表现出 2 分正向和负向变化,而计算功率时,会将负向变化转化为正向变化,减少了正负变化的信息。在研究共轭对之间的相位差时,幅度谱将提供更多信息。X 轴是 08:30—09:30 UT 的 UT 时间, Y 轴是 0.1~33.3 mHz 的频率。为了与传统功率谱图区分开,振幅谱图将较高频带绘制在底部。谱图中的红色和蓝色表示正扰动和负扰动(北为正,单位是 nT)。颜色越深,地磁扰动越强。结果表明,北半球站这些干扰主要分布在 0.3~2.1 mHz 频段,而南半球站则主要分布在 0.1~4.2 mHz 频段。这一时期共轭对之间的差异是明显的。频谱图中的这些差异表明,在此期间,北半球的站点与南半球的站点不处于类似的当前系统下。表 1 列出了共轭对之间的二维 (2-D) 相关性。相关性表明所

有 3 对均具有较差的相关性。

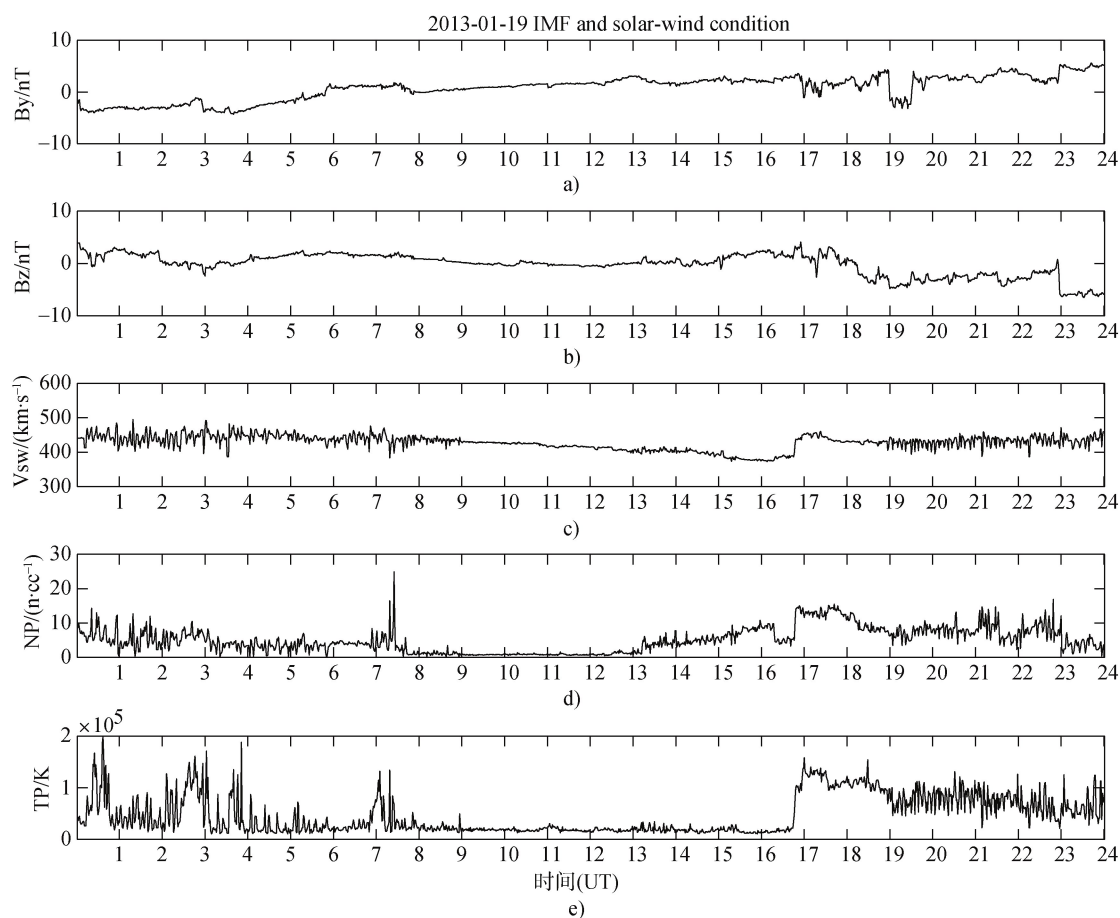
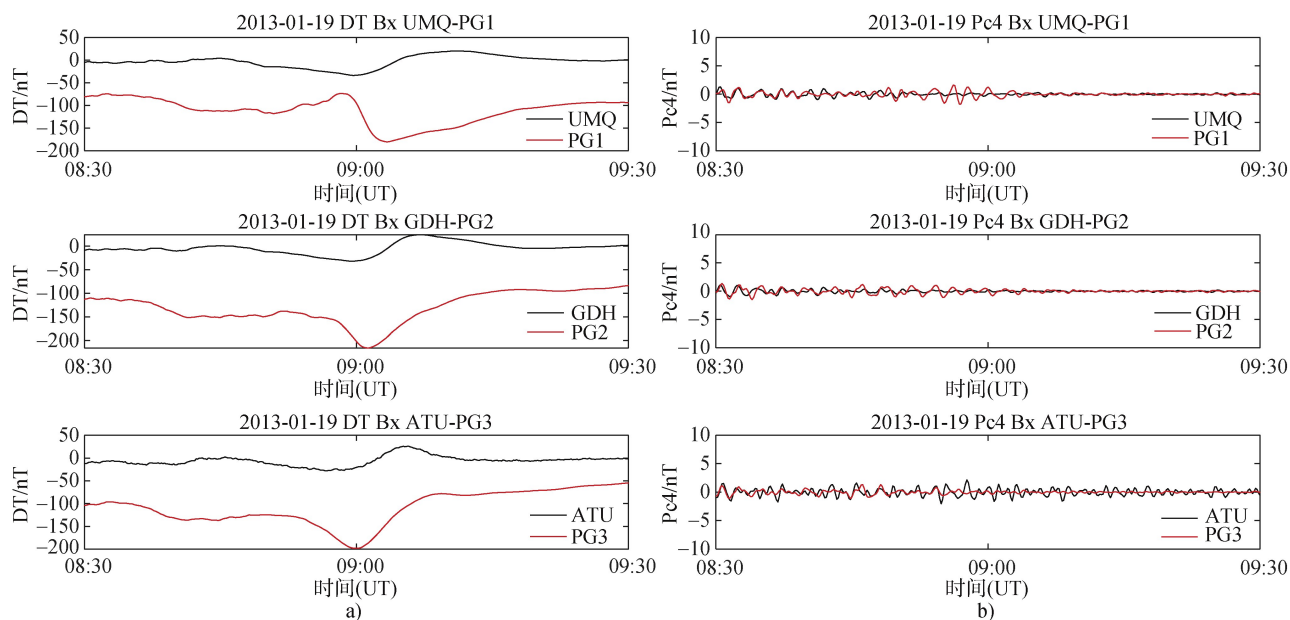


图2 2013年1月19日行星际磁场 IMF 的背景信息 a)By 分量; b)Bz 分量; c)太阳风速度(Vsw); d)质子数密度(NP); e) ATU 的 Pc5 指数作为地磁甚低频 ULF 脉动活动的示例

Fig.2. IMF conditions on 2013-01-19. a) By component (By); b) Bz component (Bz); c) velocity of solar wind (Vsw); d) number density of protons (NP); e) the Pc5 index from ATU is also shown here as an example of ULF pulsation activity



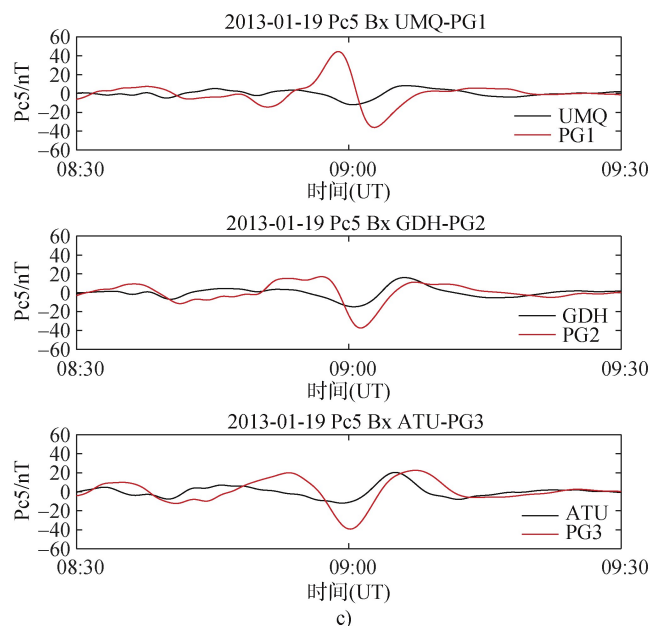
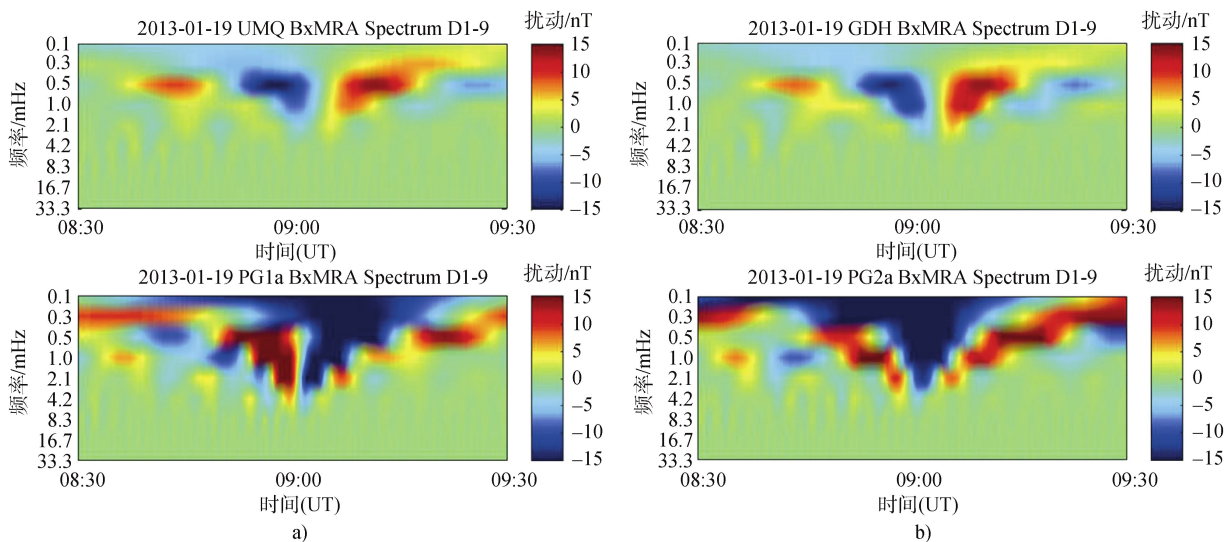


图 3 2013 年 1 月 19 日 08:30—09:30 UT 期间案例 1, De-trend (DT)为去掉长期变化基线的量。a)磁共轭站对的原始磁场变化; b) Pc4 指数; c) Pc5 指数

Fig.3. Case 1 during 08:30—09:30 UT, 2013-01-19, DT is De-trend. a) original magnetic field variation of conjugate pairs; b) Pc4 indices; c) Pc5 indices

对于 14:00—15:00 UT 期间的案例 2, 去趋势磁场变化和 Pc4/Pc5 脉动指数如图 5 所示。14:30—14:50 UT, 3 对 Pc5 脉动中的双极结构 (图 5a 和 5c)是由移动对流涡 (TCV) 事件引起的^[19]。Pc5 脉动的幅度在图 5c 中的共轭对之间是兼容的。UMQ-PG1 对之间为 40~70 nT, GDH-PG2 对之间为 75~85 nT, ATU-PG3 对之间为 80~95 nT。当脉动在 14:30 UT 左右开始时, 时滞约为 2 min。

案例 2 频谱图如图 6 所示, 设置与图 4 相同。南北两个半球的地磁扰动主要发生在 0.3~4.2 mHz 的频段之间。在 1~2.1 mHz 附近, 有 1 次红色增强, 随后是深蓝色增强, 然后是另一次红色增强和浅蓝色色块。红色对应于峰, 蓝色对应于谷。这些扰动是由相同的 TCV 经过引起的, 其周期约为 20 min。本例的二维相关性(表 1)显示 PG1-UMQ 具有较低的相关性, 而 GDH-PG2 和 ATU-PG3 对具有较高相关性。



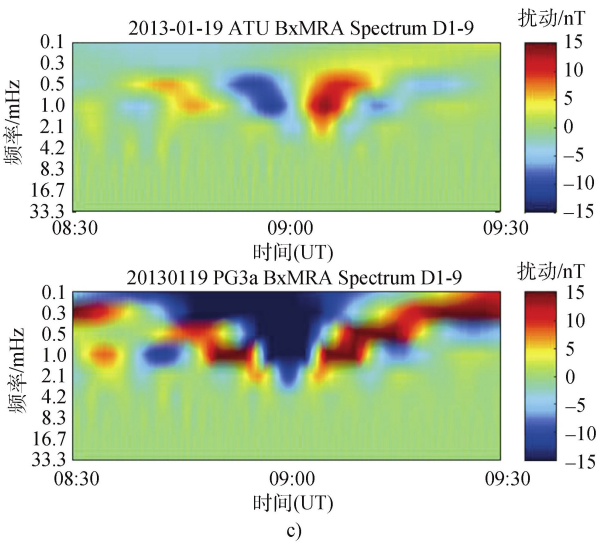


图 4 2013 年 1 月 19 日 08:30—09:30 UT 期间共轭对的小波分析频谱变化图对比。其中 X 轴是 UT 时间, Y 轴是频率波段, 颜色表示地球磁场在不同频率波段的正负变化幅度。a)UMQ-PG1 共轭对; b)GDH-PG2 共轭对; c)ATU-PG3 共轭对

Fig.4. Spectra of conjugate pairs during 08:30—09:30 UT, 2013-01-19. X axis is UT time, Y axis is frequency band, the color represents the positive and negative variations of magnetic field. a) UMQ-PG1 conjugate pair; b) GDH-PG2 conjugate pair; c) ATU-PG3 conjugate pair

表 1 2013 年 1 月 19 日磁共轭站对之间的二维(2-D) 相关系数

Table 1. 2-D correlation between three conjugate pairs during three cases on 2013-01-19

UT时间	UMQ-PG1	GDH-PG2	ATU-PG3
08:30—09:00UT	-0.32	0.40	0.43
14:00—15:00UT	0.57	0.78	0.87
17:00—18:00UT	0.79	0.92	0.92

对于案例 3, 在 17:00—18:00 UT 期间, 去趋势磁场变化和 Pc4/Pc5 指数如图 7 所示。光谱图如图 8 所示, 设置与图 4 相同。所有共轭对之间的模式都很相似, 但相似性从较高纬度对 UMQ-PG1 到较低纬度对不断增加。纬度对 ATU-PG3 从图 7b 和 7c 中滤波后的 Pc4—Pc5 脉动图中可以看出, Pc4 脉动对于 17:32—17:37 UT 之间的共轭对来说是同相的, 但南半球的幅度较高; Pc5 脉动也同相(10~20 s 或 $5\sim 10^\circ$ 差异, 考虑到周期约为 720 s), 并且共轭对之间具有相似的幅度(5 nT 差异)。频谱图 8 显示, 0.3~4.2 mHz 频段的干扰最强, 但在 17:32 UT 处 Pc4 脉动增强至约 10 nT。表 1 所示的所有 3 对的二维相关系数都很高。对于 GDH-PG2 和 ATU-PG3

对, 相关系数高达 0.92。这是一个独特的案例, 在南北半球冬至/夏至日条件下, 当电离层电导率和其他参数预计存在较大的南北不对称性时, 很少发现共轭位置处的高度相关脉动。

3 讨论

尽管地磁共轭位置的定义是该位置位于同一磁力线的两端, 但磁力线在地磁扰动期间通常会发生扭曲。地面地磁观测站的位置利用 IGRF 模型进行选择。该模型没有考虑磁层流、亚暴和其他因素引起的地球磁场扭曲。根据 MHD 模型中跟踪磁力线的经验, 实际共轭位置可能会因情况而异, 特别是当本文中的共轭对位于高地磁纬度 (CGM 为 $73\sim 76^\circ$) 时, 它们位于靠近极隙区和开闭磁力线边界的位置。为了研究磁场拓扑的变化是否影响 2013 年 1 月 19 日不同纬度站对的相似程度, 每个脉动峰值前后 PG1, PG2 和 PG3 的共轭位置是通过跟踪用 T96 模型修改的国际地磁参考场(International geomagnetic reference field, IGRF) 模型中的场线来计算的^[42], 使用行星际磁场参数作为输入, 包括 IMF Bx 分量、By 分量、

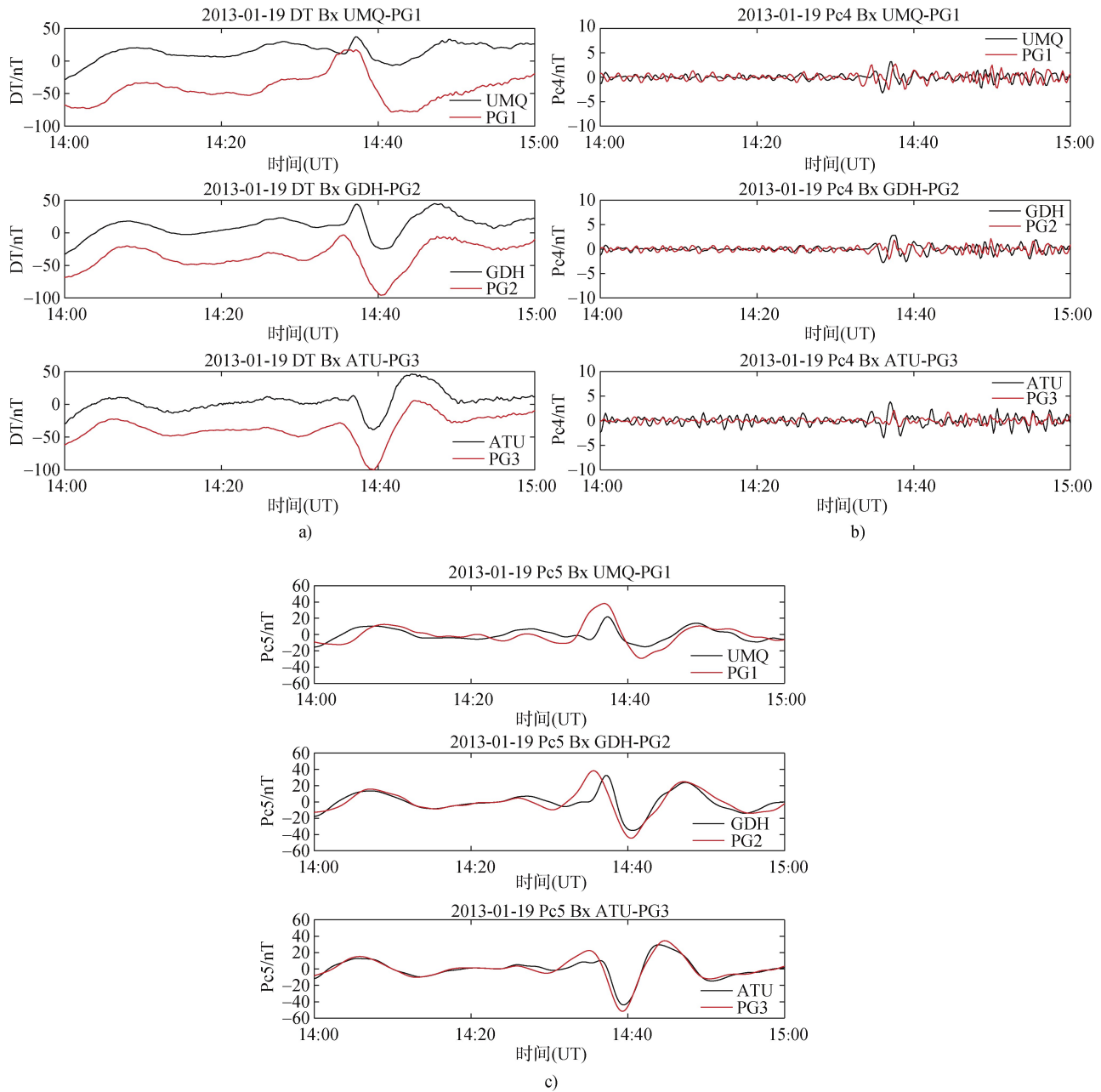


图 5 2013 年 1 月 19 日 14:00—15:00 UT 期间案例 2。a) 磁共轭站对的原始磁场变化; b) Pc4 指数; c) Pc5 指数
Fig.5. Case 2 during 14:00—15:00 UT, 2013-01-19. a) original magnetic field variation of conjugate pairs ; b) Pc4 indices; c) Pc5 indices

Bz 分量与案例周期相关的太阳风参数,从每个南半球的站点位置沿着模型跟踪磁力线到北半球。这些计算出的位置与格陵兰站(UMQ, GDH 和 ATU)位置之间的差异在表 2 中列出。结果表明,在案例 1 中,所有 3 对站的模型位置和实际位置之间的差异大于案例 2 和 3 此外,UMQ-

PG1 对的差异大于 GDH-PG2 和 ATU-PG3 的差异。除了这些情况下磁场拓扑发生变化外,IMF 条件和其他驱动因素也有所不同,如图 2 所示。对于案例 1,脉动接近 09:00 UT。IMF By 和 Bz(GSM) 接近 0 nT,而太阳风速度在 $440 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 时存在一些扰动。对于案例 2,脉动在 14:30 UT

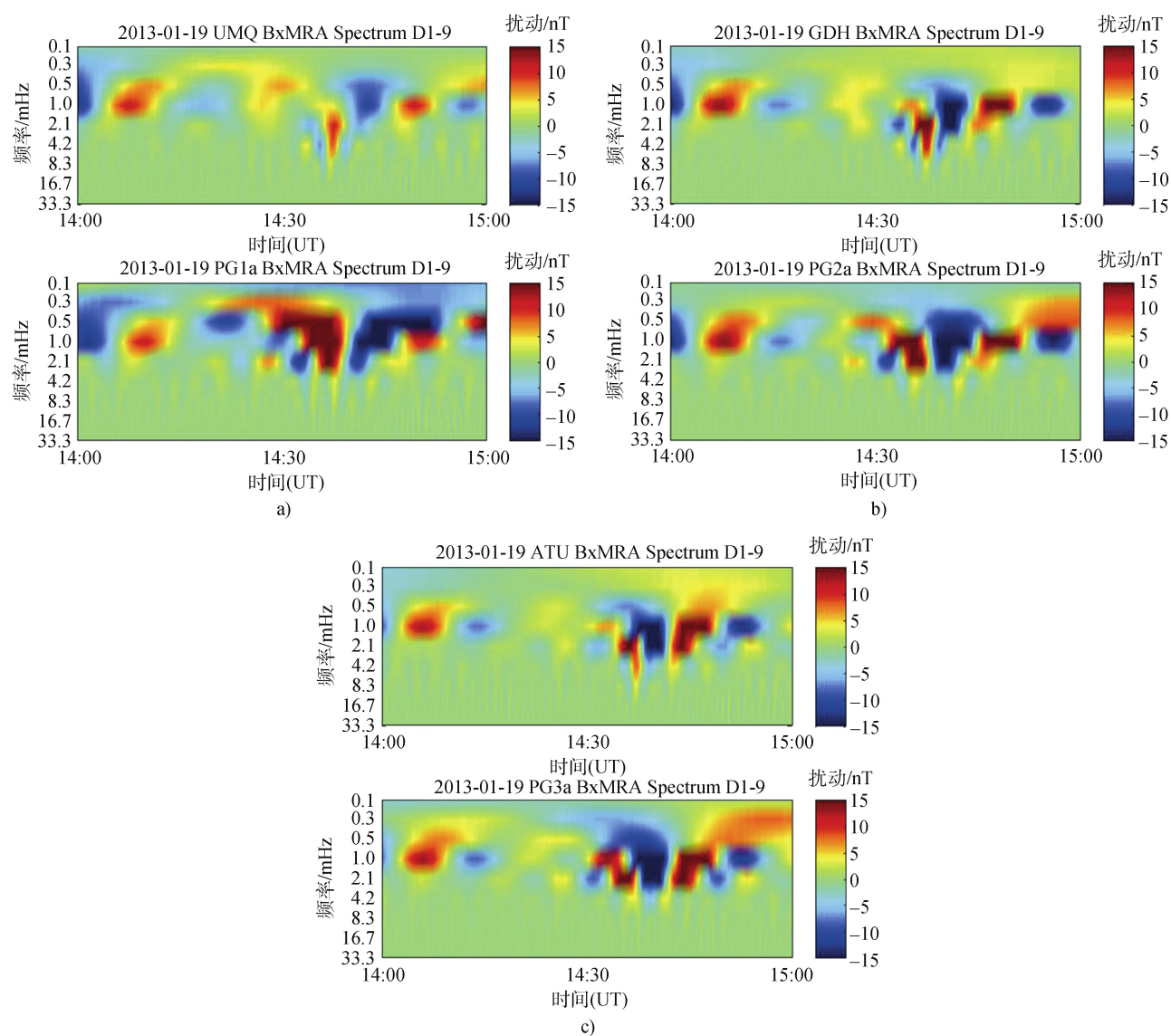
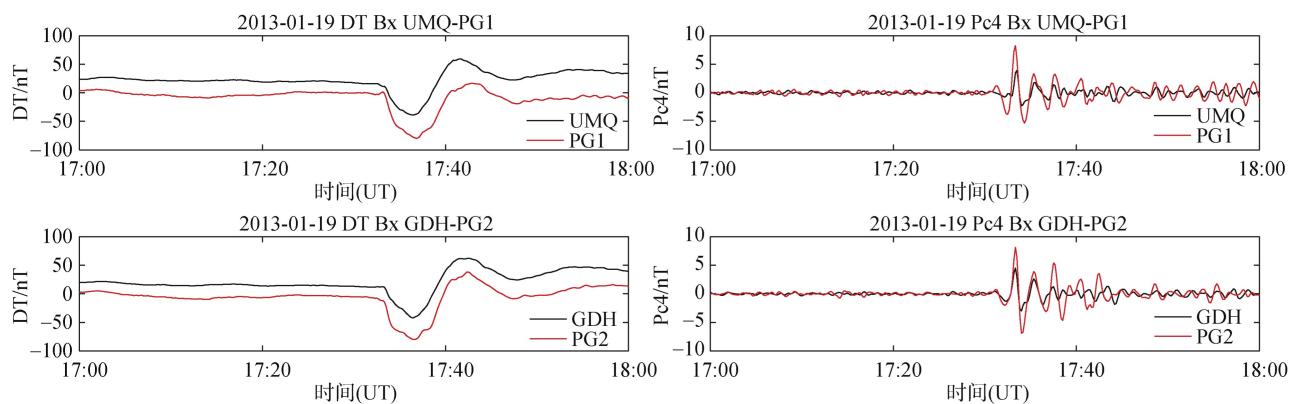


图 6 2013 年 1 月 19 日 14:00—15:00UT 期间共轭对的小波分析频谱变化图对比。a) UMQ-PG1 共轭对; b) GDH-PG2 共轭对; c) ATU-PG3 共轭对

Fig.6. Spectra of conjugate pairs during 14:00—15:00 UT, 2013-01-19. a) UMQ-PG1 conjugate pair; b) GDH-PG2 conjugate pair; c) ATU-PG3 conjugate pair



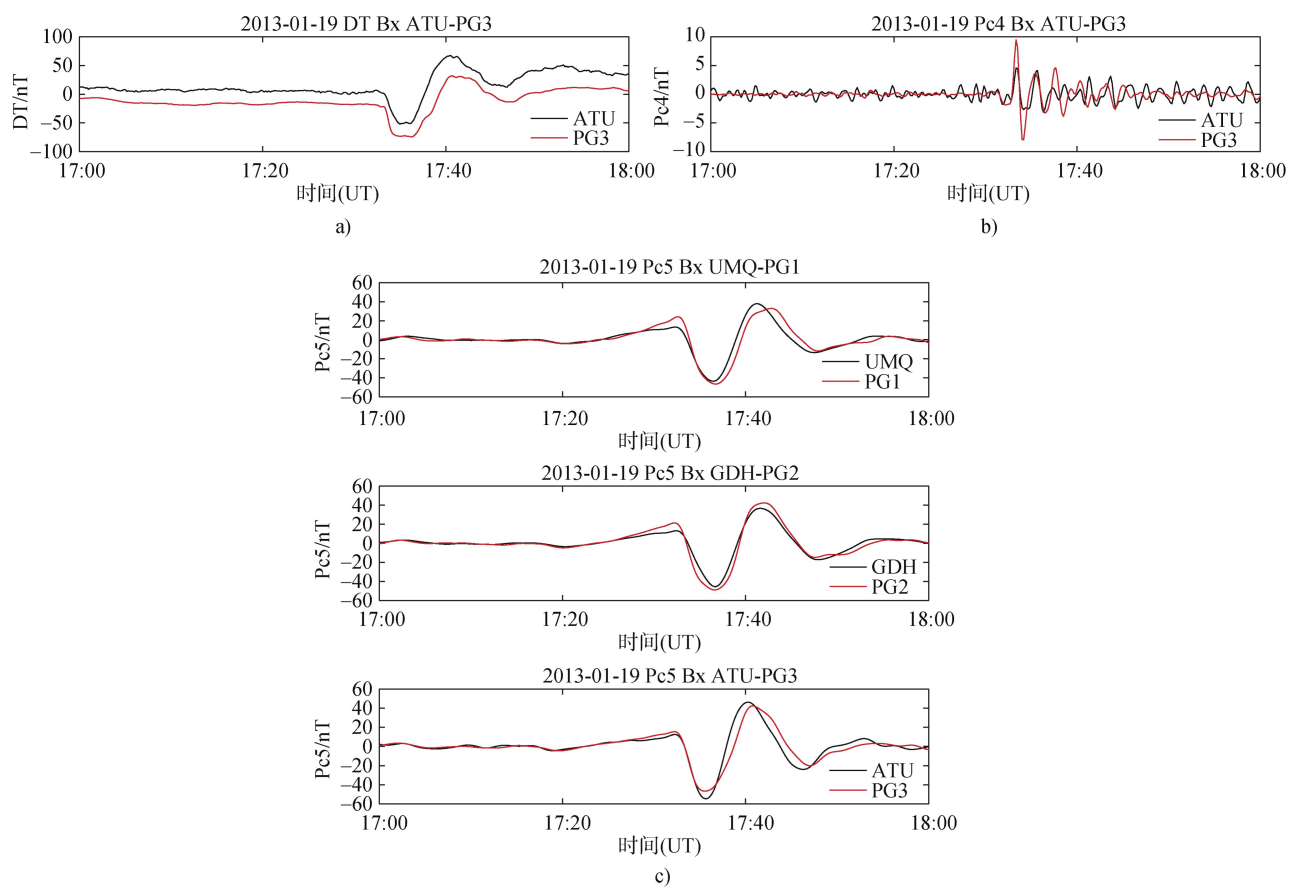
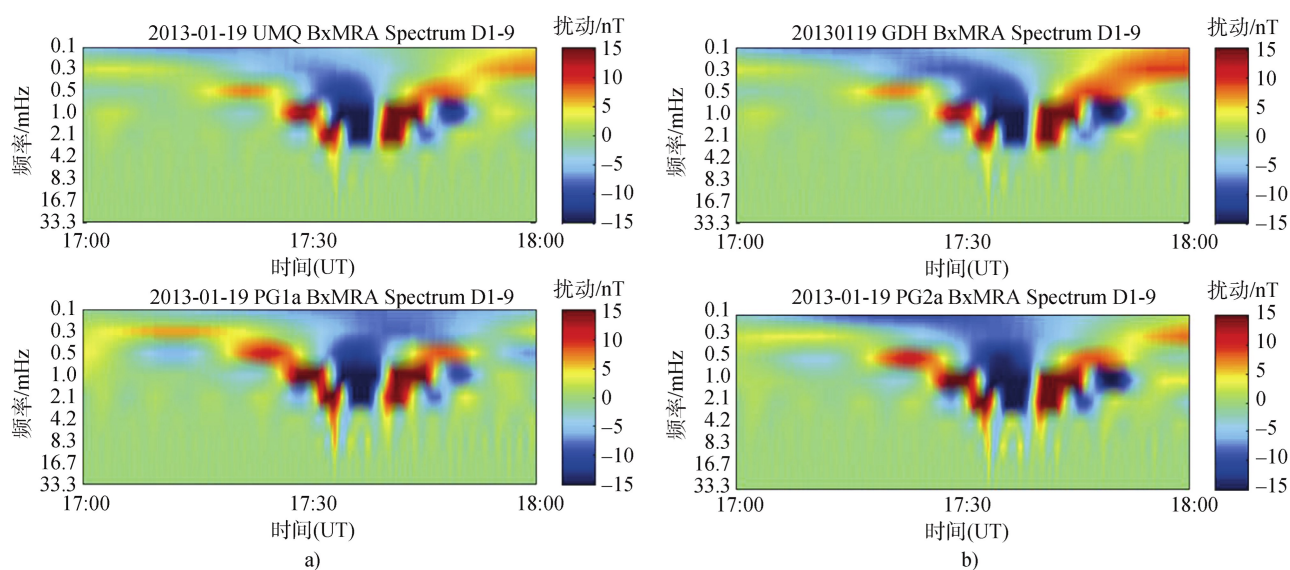


图 7 2013 年 1 月 19 日 17:00—18:00 UT 期间案例 3. a) 磁共轭站对的原始磁场变化; b) Pc4 指数; c) Pc5 指数

Fig.7. Case 3 during 17:00—18:00 UT, 2013-01-19. a) original magnetic field variation of conjugate pairs; b) Pc4 indices; c) Pc5 indices



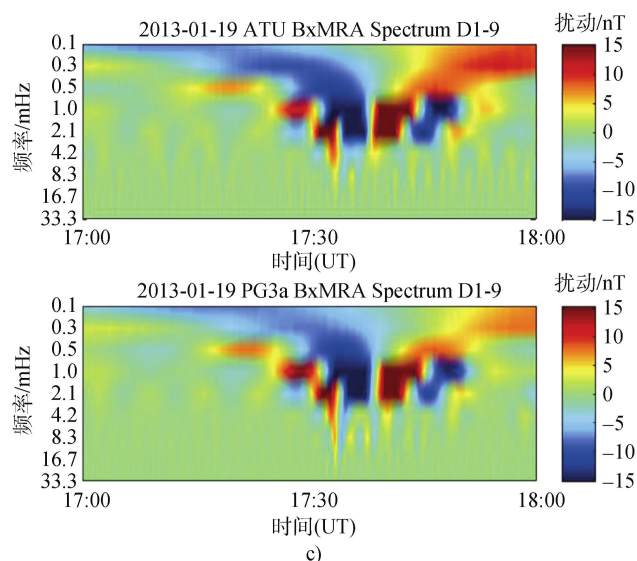


图8 2013年1月19日17:00—18:00 UT期间共轭对的小波分析频谱变化图对比。a) UMQ-PG1共轭对; b) GDH-PG2共轭对; c) ATU-PG3共轭对

Fig.8. Spectra of conjugate pairs during 17:00—18:00 UT, 2013-01-19. a) UMQ-PG1 conjugate pair; b) GDH-PG2 conjugate pair; c) ATU-PG3 conjugate pair

表 2 通过 T96 模型沿着磁力线跟踪南半球的站点位置到北半球的纬度(dLat)和经度(dLon)

Table 2. The difference of latitudes (dLat) and longitudes (dLon) between conjugate locations by mapping the stations in the southern hemisphere to the northern hemisphere with T96 Model before (and after) the pulsations

		峰值前 (dLat,dLon)	峰值后 (dLat,dLon)
08:30— 09:30 UT	UMQ-PG1	(−2.92, −17.94)	(−2.81, −16.24)
	GDH-PG2	(−2.56, −12.77)	(−2.22, −10.49)
	ATU-PG3	(−2.92, −13.61)	(−2.34, −10.55)
14:00— 15:00 UT	UMQ-PG1	(−1.53, −3.48)	跟踪到开
	GDH-PG2	(0.61, 4.82)	放 磁力
	ATU-PG3	(0.07, 2.77)	线
17:00— 18:00 UT	UMQ-PG1	(−1.80, −14.41)	(1.06, 0.70)
	GDH-PG2	(0.27, −0.95)	(0.36, 2.52)
	ATU-PG3	(0.32, 0.063)	(−0.81, −5.03)
			(0.55, 3.49)
			(0.22, 2.92)

附近开始。相关 IMF 条件表明 By 约为 2 nT, Bz 接近 0 nT, 小扰动位于太阳风速度和质子温度 上。这些 IMF 和太阳风条件可能导致腔模 ULF 脉动^[4, 43]。此外, By>0 且 Bz=0 的 IMF 条件可能

导致对流不对称^[44]，进而导致 ULF 脉动特性的半球间不对称。对于案例 3，脉动出现在 17:30 UT

2 所示, 在 17:30 UT 左右, V_{sw} , NP

和 TP 中出现了突发脉冲 (Sudden Impulse, SI) 事件。IMF By 和 Bz 分量在这次 SI 事件后改变了方向, 这是 17:30 UT 附近地面上发现的地磁脉动的触发因素。在两个半球的共轭位置发现的相似脉动表明相同的源/能量通过磁层传播并传输到两个半球的地面。Pc4 指数的相关性约为 0.5,

Pc5 指数的相关性约为 0.9。这是本文在 2013 年 1 月的统计研究中发现的唯一案例,有趣的是,3 对 Pc4 和 Pc5 指数相关性都如此高,且发生在 北半球/南半球的冬季/夏季, 冬季和夏季之间的 不对称电离层电导率通常会对其模模式产生不 对称的影响。全面详细的调查将在另外的论文中 介绍。

上述讨论可以看出, 2013 年 1 月 19 日的 3 个案例中, 磁场拓扑结构都发生了变化, ULF 脉动的驱动源也发生了变化。在统计研究中, 站点对

之间每小时的二维相关性显示出很大程度的变异性。通过计算共轭对之间脉动指数的相关性, 本文发现部分 GDH-PG2 和 ATU-PG3 对在 Pc5 中都具有较高的相关性, 但 UMQ-PG1 对具有较低的

相关性, 而部分 GDH-PG2 和 UMO-PG1 对具有较

相关性。Pc5 对均具有较高相关性, 但左右。如图 NP ATU-PG3 对具有较低相关性, 甚至存在负相关的

情况。这些相关性的差异可能是由于场线在不同的太阳风和 IMF 条件下扭曲时共轭位置发生变化造成的。原始共轭位置向极点或赤道方向移动。此外, IMF 条件 ($B_y > 0$) 可以改变电离层对流的配置, 并通过改变磁场拓扑来生成 ULF 脉动的不对称模式。需要进一步研究案例中实际磁层和电离层配置以及驱动条件。

4 结论

本文通过对地面磁场数据应用小波分析, 开发了地磁甚低频 ULF 脉动指数, 重点研究了南北半球间的共轭 ULF 脉动。比较了位于地磁共轭位置的东南极的 AAL-PIP 磁力链的数据和西格陵兰岛磁力链的数据。以 2013 年 1 月 19 日的 3 个案例为例, 比较了位于共轭位置处的地磁 ULF 脉动指数的相关性、幅度和频谱。这些基于小波分析的地磁脉动指数可对北半球和南半球名义磁共轭位置(基于 IGRF 模型)观测到的信号之间的相关性进行常规监测。

比较地磁 ULF 脉动指数的相关性、幅度和频谱的结果显示, 北半球和南半球站之间的脉动变化对比因情况而异。ATU-PG3 对的相关性最高, 案例 3 的相关性最高。它表明, 即使在几个小时内, 相似度也会因驱动条件和磁场拓扑的变化而发生变化。

IMF 和其他太阳风参数的变化会导致不同 ULF 脉动模式的磁场拓扑和能源发生变化。3 个 ULF 脉动案例研究中的外部驱动条件不同。案例 1 和 2 与太阳风速、质子密度和温度的扰动有关。此外, IMF 条件 (B_y 分量 > 0) 可能会改变电离层对流/磁场拓扑的配置, 并导致基于 IGRF 模型的磁共轭位置处的不同 ULF 脉动特性。在案例 3

中, ULF 脉动与突发脉冲事件有关。这种大规模能源的影响通过磁层传播, 并几乎同时传输到两个半球的地面。利用 IGRF/T96 模型计算的共轭位置表明, 由于高纬度 UMQ-PG1 更接近极尖区域, 因此比低纬度 GDH-PG2 和 ATU-PG3 对共轭位置差异更大。

综上所述, 基于小波分析的 ULF 脉动指数有助于研究南北半球共轭位置 ULF 脉动的异同, 并有助于选择案例研究。共轭位置处指数的比较揭示了超低频脉动如何从磁层传播到地面磁场线的两端。对共轭超低频脉动的进一步研究将有助于确定地球磁层、电离层和大气层的动力学和耦合及其对太阳和陆地输入的响应。

致谢 感谢美国国家科学基金委员会的研究经费支持 (NSF-OPP 1744828, NSF-AGS 2027168) 感谢美国航空航天局在 CDAWeb 网上提供的 ACE 及其他太阳风数据。感谢丹麦科技大学提供的磁通门磁力计数据。

参考文献

- 1 DUNGEY J W. Hydromagnetic waves[M]//Physics of Geomagnetic Phenomena. New York: Academic Press, 1967.
- 2 VILLANTE U. Ultra low frequency waves in the magnetosphere[M]//KAMIDE Y, CHIAN A. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 397-422.
- 3 XU Z, GANNON J L, RIGLER E J. Report of geomagnetic pulsation indices for space weather applications[M]. USA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2013. <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1166/>.
- 4 HARTINGER M, ANGELOPOULOS V, MOLDWIN M B, et al. Observations of a Pc5 global (cavity/waveguide) mode outside the plasmasphere by THEMIS[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2012, 117(A6): A06202.
- 5 KOZYREVA O, PILIPENKO V, ENGBRETSON M J, et al. In search of a new ULF wave index: Comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons[J]. Planetary and Space Science, 2007, 55(6): 755-769.
- 6 OZEKE L G, MANN I R. Energization of radiation belt electrons by ring current ion driven ULF waves[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2008, 113(A2). DOI:10.1029/2007JA012468.
- 7 JACOBS J A, KATO Y, MATSUSHITA S, et al. Classification of geomagnetic micropulsations[J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69(1): 180-181.
- 8 SAITO T. Geomagnetic pulsations[J]. Space Science Reviews, 1969, 10(3): 319-412.
- 9 SOUTHWOOD D J, HUGHES W J. Theory of hydromagnetic waves in the magnetosphere[J]. Space Science Reviews, 1983, 35(4): 319-412.

- 301-366.
- 10 HUGHES W J. Magnetospheric ULF Waves: A tutorial with a historical perspective//ENGBRETSON M J, TAKAHASHI K, SCHOLER M. Solar wind sources of magnetospheric ultra-low-frequency waves[M]. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1994, 81: 1-11. DOI: 10.1029/GM081p0001.
 - 11 ANDERSON B J. Statistical studies of Pc 3-5 pulsations and their relevance for possible source mechanisms of ULF waves[J]. *Annales Geophysicae*, 1993, 11(2/3): 128-143.
 - 12 ANDERSON B J. An overview of spacecraft observations of 10 s to 600 s period magnetic pulsations in the earth's magnetosphere[M]//ENGBRETSON M J, TAKAHASHI K, SCHOLER M. Solar wind sources of magnetospheric ultra-low-frequency waves. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2013: 25-43.
 - 13 SOUTHWOOD D J. The behaviour of ULF waves and particles in the magnetosphere[J]. *Planetary and Space Science*, 1973, 21(1): 53-65.
 - 14 CHEN L, HASEGAWA A. A theory of long-period magnetic pulsations: 1. Steady state excitation of field line resonance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(7): 1024-1032.
 - 15 CHEN L, HASEGAWA A. A theory of long-period magnetic pulsations: 2. Impulse excitation of surface eigenmode[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(7): 1033-1037.
 - 16 LEE D H, LYSAK R. Magnetospheric ULF wave coupling in the dipole model: The impulsive excitation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 17097-17103.
 - 17 HOWARD T A, MENK F W. Propagation of 10-50 mHz ULF waves with high spatial coherence at high latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(2): 231-234.
 - 18 PILIPENKO V, BELAKHOVSKY V, ENGBRETSON M J, et al. Are dayside long-period pulsations related to the cusp?[J]. *Annales Geophysicae*, 2015, 33(3): 395-404.
 - 19 KIM H, CLAUSER C R, ENGBRETSON M J, et al. Conjugate observations of traveling convection vortices associated with transient events at the magnetopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(3): 2015-2035.
 - 20 KOROTOVA G I, SIBECK D G, WEATHERWAX A, et al. THEMIS observations of a transient event at the magnetopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116(A7): A07224.
 - 21 TURNER D L, ERIKSSON S, PHAN T D, et al. Multispacecraft observations of a foreshock-induced magnetopause disturbance exhibiting distinct plasma flows and an intense density compression[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116(A4): A04230.
 - 22 ZHANG H, SIBECK D G, ZONG Q G, et al. Global magnetospheric response to an interplanetary shock: THEMIS observations[J]. *Annales Geophysicae*, 2012, 30(2): 379-387.
 - 23 KIVELSON M G, ETCHETO J, TROTIGNON J G. Global compressional oscillations of the terrestrial magnetosphere: The evidence and a model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1984, 89(A11): 9851-9856.
 - 24 OBANA Y, YOSHIKAWA A, OLSON J V, et al. North-south asymmetry of the amplitude of high-latitude Pc 3-5 pulsations: Observations at conjugate stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, 110(A10): A10214. DOI:10.1029/2003JA010242.
 - 25 OGUTI T. Conjugate point problems[J]. *Space Science Reviews*, 1969, 9(6): 745-804.
 - 26 LIU Y H, FRASER B J, LIU R Y, et al. Conjugate phase studies of ULF waves in the Pc5 band near the cusp[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, 108(A7): 1274.
 - 27 NOSÉ M, IYEMORI T, TAKEDA M, et al. Automated detection of Pi 2 pulsations using wavelet analysis: 1. Method and an application for substorm monitoring[J]. *Earth, Planets and Space*, 1998, 50(9): 773-783.
 - 28 ROMANOVA N, PILIPENKO V, CROSBY N. ULF wave index and its possible applications in space physics[J]. *Bulgarian Journal of Physics*, 2007, 34(2): 136-148.
 - 28 ROMANOVA N, PILIPENKO V, CROSBY N, et al. ULF wave index and its possible applications in space physics[J]. *Bulgarian Journal of Physics*, 2007, 34(2): 136-148.
 - 29 SINGH A K, MISHRA S, SINGH R. ULF wave index as magnetospheric and space-weather parameters[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(8): 1427-1436.
 - 30 BOROVSKY J E, DENTON M H. Exploring the cross correlations and autocorrelations of the ULF indices and incorporating the ULF indices into the systems science of the solar wind-driven magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014,

- 119(6): 4307-4334.
- 31 LUI A T Y, NAJMI A H. Time-frequency decomposition of signals in a current disruption event[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(24): 3157-3160.
- 32 WEI H L, BILLINGS S A, BALIKHIN M. Prediction of the *Dst* index using multiresolution wavelet models[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2004, 109: A07212. DOI:10.1029/2003JA010332.
- 33 XU Z H, ZHU L, SOJKA J, et al. An assessment study of the wavelet-based index of magnetic storm activity (WISA) and its comparison to the *Dst* index[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70(11/12): 1579-1588.
- 34 TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- 35 MUSKO S B, CLAUER C R, RIDLEY A J, et al. Autonomous low-power magnetic data collection platform to enable remote high latitude array deployment[J]. The Review of Scientific Instruments, 2009, 80(4): 044501.
- 36 CLAUER C R, KIM H, DESHPANDE K, et al. An autonomous adaptive low-power instrument platform (AAL-PIP) for remote high-latitude geospace data collection[J]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2014, 3(2): 211-227.
- 37 XU Z H, HARTINGER M D, CLAUER C R, et al. Newly established autonomous adaptive low-power instrument platform (AAL-PIP) chain on East Antarctic Plateau and operation[J]. Advances in Polar Science, 2019, 30(4): 362-374. DOI: 10.13679/j.advps.2019.0028.
- 38 STONE E C, FRANSEN A M, MEWALDT R A, et al. The Advanced Composition Explorer[J]. Space Science Reviews 1998, 86(1-4): 1-22.
- 39 PERCIVAL D B, WALDEN A T. Wavelet methods for time series analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- 40 FRITSCH F N, CARLSON R E. Monotone piecewise cubic interpolation[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1980, 17(2): 238-246.
- 41 WEIMER D R. A flexible, IMF dependent model of high-latitude electric potentials having “Space Weather” applications[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(18): 2549-2552.
- 42 TSYGANENKO N A, STERN D P. Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland Current systems[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1996, 101(A12): 27187-27198.
- 43 LIU W W. Interaction of solar wind pressure pulses with the magnetosphere: IMF modulation and cavity mode[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2012, 117, A08234. DOI:10.1029/2012JA017904.
- 44 WEIMER D R, OBER D M, MAYNARD N C, et al. Predicting interplanetary magnetic field (IMF) propagation delay times using the minimum variance technique[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2003, 108(A1): 1026.

Wavelet-based ULF pulsation indices and their application to geomagnetically conjugate ULF pulsation studies at high latitudes

XU Zhonghua¹, C. Robert CLAUER¹, Michael D. HARTINGER², Hyomin KIM³,
Daniel R WEIMER¹

(¹ Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA;

² Space Science Institute, Boulder, Colorado 69122, USA;

³ Center for Solar-Terrestrial Research, New Jersey Institute of Technology, Newark 07102, USA)

Abstract

Geomagnetic Ultra Low Frequency (ULF) are terrestrial manifestations of the propagation of very low frequency magnetic fluid waves in the magnetosphere, and it is critical to develop near real-time space weather products to monitor these geomagnetic disturbances. A wavelet-based index is described in this paper and applied to study geomagnetic ULF pulsations observed in Antarctica and their magnetically conjugate locations in West Greenland. Results showed that (1) the index is effective for identification of pulsation events in the Pc4–Pc5 frequency range, including transient events, and measures important characteristics of ULF pulsations in both the temporal and frequency domains. (2) Comparison between conjugate locations reveals the similarities and differences between ULF pulsations in northern and southern hemispheres during solstice conditions, when the largest asymmetries are expected. Results also showed that the geomagnetic pulsations at conjugate locations respond differently according to the Interplanetary Magnetic Field condition, magnetic field topology, magnetic latitude of the observation, and other conditions. The actual magnetospheric and ionospheric configurations and driving conditions in the case need to be further studied.

Keywords geomagnetic disturbance, Ultra Low Frequency (ULF) wave, geomagnetically conjugate