

ZHOU Zhaodi, ZHANG Hui, NI Binbin, ZHANG Xiaojia, ZHU Changbo, FU Song. Kinetic magnetic turbulence associated with flux transfer events observed by THEMIS satellite (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(2): 169-177. DOI:10.11728/cjss2018.02.169

通量传输事件相关的动力学磁场湍流观测研究^{*}

周招弟^{1,2,3} 张辉^{1,2} 倪彬彬^{4,5}
张晓佳^{6,7} 朱昌波^{1,2,3} 付松⁴

1(中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室 北京 100029)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 空间环境野外科学观测研究站 北京 100029)

3(中国科学院大学地球科学学院 北京 100049)

4(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

5(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)

6(加利福尼亚大学大气与海洋科学系 洛杉矶 90095)

7(加利福尼亚大学地球物理与空间科学系 洛杉矶 90095)

摘要 THEMIS 卫星观测到通量传输事件 (FTE) 的同时, 也在磁层侧涡流区域观测到强磁场扰动现象. 利用快速傅里叶变换分析磁场扰动频谱特征发现: 大约在 FTE 的扰动频率 (约 0.1 Hz) 处, 功率谱密度达到峰值; 在质子回旋频率 (约 1 Hz) 至 64 Hz 的频段内, 功率谱密度随着频率的增大而减小, 服从幂律分布 $P_0 f^{-\alpha}$. 因此, 可以认为这些磁场扰动为低纬边界层中的动力学磁场湍流. 研究结果表明, 当低纬边界层 (Low Latitude Boundary Layer, LLBL) 中卫星相对磁层顶或 FTE 的位置越来越远时, 功率谱密度与功率谱斜率 α (幂律指数) 降低, 但 FTE 所在的方位角或低纬磁层顶的磁地方时对幂律指数 α 和功率谱密度没有显著影响. 这些观测特征表明移动的 FTE 是磁场湍流的源. 磁层顶上的大规模扰动 (如 FTE) 和相关的磁场湍流从动力学尺度揭示了磁鞘与磁层的类黏滞相互作用. 然而低纬边界层中 FTE 磁层侧涡流形成所需的黏滞性是否可由磁场湍流来提供还需要验证.

关键词 通量传输事件, 磁场湍流, 幂律指数, 功率谱密度, 黏滞性

中图分类号 P 353

Kinetic Magnetic Turbulence Associated with Flux Transfer Events Observed by THEMIS Satellite

ZHOU Zhaodi^{1,2,3} ZHANG Hui^{1,2} NI Binbin^{4,5}

ZHANG Xiaojia^{6,7} ZHU Changbo^{1,2,3} FU Song⁴

1(Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

* 国家自然科学基金项目 (41274171) 和中国科学院科技创新交叉与合作团队项目 (KZZD-EW-01-3) 共同资助

2017-04-11 收到原稿, 2017-10-24 收到修定稿

E-mail: zhouzhaodi@mail.iggcas.ac.cn

2(Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

3(College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

4(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072)

5(State Key Laboratory of Space Weather, Nation Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

6(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of California, Los Angeles 90095)

7(Institute of Geophysics and Space Physics, University of California, Los Angeles 90095)

Abstract Intense magnetic fluctuations are recorded in the magnetosphere near the magnetopause when Flux Transfer Events (FTE) are passed by the THEMIS satellites. The power spectra of these fluctuations obtained by Fast Fourier Transform (FFT) show that the Power Spectra Density (PSD) peaks around the disturbance frequency of FTE (about 0.1 Hz), and decreases from the proton gyrofrequency (about 1 Hz) to 64 Hz following a power law of $P_0 f^{-\alpha}$. These fluctuations are interpreted as magnetic turbulences in the kinetic regime in the Low Latitude Boundary Layer (LLBL). The results show that both the PSD and the slopes of the power spectra α decrease when the observing satellite position is more and more away from the magnetopause or the FTE location in the LLBL. However, α and the PSD are independent from the azimuthal position of FTE or local time of the low latitude magnetopause. All these observations suggest that the moving FTEs are the source for these magnetic fluctuations. Large scale perturbations on the magnetopause, *e.g.* FTEs and the associated magnetic turbulences, provide a hint which may reveal the interaction between the magnetosheath and the magnetosphere in a kinetic scale. Whether the magnetic turbulences can provide enough viscosity for the forming of the flow vortices on the magnetospheric side of FTEs or not need to be further confirmed.

Key words Flux transfer event, Magnetic turbulence, Spectral index, Power spectra density, Viscosity

0 引言

通量传输事件 (Flux Transfer Event, FTE) 最早由 Russell 和 Elphic 在 1978 年考察 ISEE 1/2 飞船观测数据时发现并提出^[1]. Russel 等将磁场的局域磁层顶法向分量出现双极扰动并且总磁场强度增强的结构定义为 FTE. 研究表明, 行星际磁场南向时, FTE 是向阳侧磁层顶处磁鞘磁场与磁层磁场瞬时重联的产物, 具有磁绳结构^[1-5]. 在通量绳内部及其周围区域, 例如附近的磁层和磁鞘中, 均能观测到磁场扰动现象^[6-8].

磁层顶上 FTE 的移动也会对周围磁层和磁鞘中的等离子体产生扰动. 由于通量管弯曲或者通量绳内部具有张力, 通量管移动的速度与其周围等离子体

运动的速度不相等, 并且 FTE 外部区域等离子流扰动模式取决于 FTE 与其周围等离子体的速度差^[5]. FTE 运动速度可比其附近等离子体更快、更慢或者相同, 这些情况下 FTE 对周围等离子体流的扰动模式已被定性描述^[9].

此外, 假设 FTE 的横截面是圆的, 并且 FTE 外部等离子体不可压缩及非黏性, 也可以定量描述 FTE 对周围等离子体流扰动模式^[10]. 这些研究发现, 如果 FTE 比周围等离子体运动快, 则 FTE 外部的等离子体流扰动具有偶极场形式.

在实际卫星观测中发现 FTE 的磁层侧具有偶极场形式的等离子体流扰动^[11]. 然而通过分析 THEMIS 卫星观测数据发现, 当 FTE 沿着磁层顶背阳方向移动时, 磁层侧等离子体流为涡流模式而不

是偶极模式. 二维 MHD 数值模拟表明, FTE 与周围磁层顶等离子体之间的黏性相互作用是涡流产生必不可少的要素^[12].

传统上认为磁层顶附近的磁层等离子体不存在黏滞性, 但是湍流可能会提供有限的黏滞性^[13]. 湍流通过非线性相互作用, 将能量从大尺度运动结构转移到小尺度扰动结构上, 形成一个典型的幂律谱 $P = P_0 f^{-\alpha}$, 其中 P 为给定频率 f 处的功率谱密度, α 为幂律指数^[14-16]. 在磁层顶附近区域经常能观测到各种频段上的湍流^[17-21].

卫星在穿越磁层顶事件中经常观测到非常低频段 (0~10 Hz) 的磁场湍流, 幂律指数 α 范围为 2~3, 并且功率谱在磁层顶处最强. 早期并没有将这些湍流与磁层顶上的某种特殊结构联系起来^[22,23]. 后来有研究认为低频 (1~4 Hz) 磁场扰动与 FTEs 密切相关, 且电子加热/加速现象表明, 这些磁场扰动与电子之间可能存在相互作用^[24]. 基于 ISEE 1/2 的观测, 磁层顶附近磁场湍流从 5.6 Hz 延伸到 1000 Hz 这样非常高的频率, 这些湍流有一个典型的功率谱 $f^{-3.3}$, 并且通常在磁层顶及其附近边界层中功率谱密度最大^[25].

在许多磁层顶穿越事件中, 10~10³ Hz 频段内, 磁场湍流的幂律指数通常为 3.9, 并且在不同的事件中, 功率谱密度大小可以相差一个数量级^[26]. 某些情况下, 倾斜的功率谱会发生断裂, 不同的频段上斜率不同. 这些高频磁场扰动有时也能在 FTE 内部或其外部磁层侧的边界层等离子体中被观测到^[1,27]. 高频磁场湍流可能导致很强的扩散, 使磁鞘中的质子渗透到磁层中^[26], 并且磁场湍流可能在粒子的加速/加热以及质量和动量传输中发挥重要作用^[28-31].

在磁层侧与 FTE 相关的涡流区域中, 存在高频磁场扰动^[12]. 有限的黏滞性可能由磁场扰动和粒子之间的相互作用提供. 这里通过检索具有高分辨率磁场数据的 FTE 证实, 低纬边界层中 FTE 磁层侧的磁场扰动是动力学磁场湍流. 幂律指数 α 和功率谱密度随着观测卫星在磁层顶法向方向远离低纬边界层中 FTE 而减小, 但并不依赖于 FTE 的方位角或低纬磁层顶的磁地方时. 这些观测特征表明磁场湍流的源是移动的 FTE, 而与 FTE 的“年龄”无关. 因此, 磁场湍流可能提供有限的黏滞性并在 FTE 磁层侧的低纬边界层中形成涡流.

1 仪器数据及 FTE 选择标准

这里选用 THEMIS 卫星 2007 和 2008 这两年中 5-10 月的观测数据. 在这期间 THEMIS 卫星在低纬度轨道上反复穿越日侧磁层顶^[32]. 磁场数据来自于磁通门磁强计 (FGM)^[33] 和探测线圈磁强计 (SCM) 的探测数据^[34], 等离子体数据来自于静电分析仪 (ESA) 的探测数据^[35]. SCM 通过三种模式测量低频磁场扰动, 包括 FS (Fast Survey) 模式 (8 s⁻¹), PB (Particle Burst) 模式 (128 s⁻¹) 及 WB (Wave Burst) 模式 (8192 s⁻¹). 这里选用 PB 的高频磁场数据对其进行快速傅里叶变化, 获取磁场频谱特征. 等离子体和低频磁场数据的时间分辨率均为 3 s, 并且这些数据都采用地心太阳磁层 (GSM) 坐标系, 或者局域磁层顶边界法向 (LMN) 坐标系. LMN 坐标系 N 轴指向局域磁层顶边界法线朝外的方向, 可以根据 Shue 等^[36] 的磁层顶经验模型确定, M 轴方向沿着 $z_{\text{GSM}} \times N$ 的磁层顶切向方向, 其中 z_{GSM} 为 GSM 坐标系的 z 轴, 而 M 轴与 L, N 轴构成右手系.

根据 Zhang 等^[37] 的标准选择卫星位于磁层里侧, 并且观测到 Particle Burst 高频磁场扰动和涡流的 FTE 作为事件库, 该库总共包含 134 个 FTE. 在磁层顶黎明和黄昏侧接近磁层顶的区域, 磁层里与 FTE 相伴随的涡流分别为顺时针和逆时针旋转, 即在磁层顶附近区域等离子体切向流是背阳的, 而在更靠近磁层里边的区域, 切向流是向阳的^[12]. 根据总磁场强度 (B_t) 的变换特征和等离子体切向流的方向, 可以将这 134 个事件分为以下三组.

一是 B_t 在 B_N 的双极结构中心处下降.

二是 B_t 相对背景磁层磁场强度有所增强, 并且等离子体切向流是背阳的, 卫星更靠近磁层顶或 FTE.

三是 B_t 相对背景磁层磁场强度有所增强, 但是等离子体切向流是向阳的, 卫星更靠近磁层里侧或离 FTE 更远.

根据 Zhang 等^[17] 提出的卫星相对 FTE 的轨道分类标准, 将这三组事件分别定义为 T3-FTE (76 个事件), T4_{AS}-FTE (26 个事件) 和 T4_S-FTE (32 个事件), 其中卫星在 T3-FTE 中最接近 FTE 结构, 在 T4_S-FTE 中离 FTE 最远, 而在 T4_{AS}-FTE 中位于两者之间.

2 事例分析

THEMIS-E 卫星大约在 2008 年 6 月 16 日 22:13 UT 观测到 T3-FTE, 如图 1(a)~(c) 所示, 约在 2008 年 9 月 23 日 20:45 UT 观测到 T4_{AS}-FTE, 如图 1(d)~(f) 所示. THEMIS-D 卫星约在 2008 年 8 月 21 日 23:17 UT 观测到 T4_S-FTE, 如图 1(g)~(i) 所示. 图 1 中 B 为磁场; B_t 为磁场总强度; B_N, B_M, B_L 分别为磁场在 LMN 坐标系下的三分量; V_M 为切向方向的流动, 计算公式为 $-V_M \cdot \text{Sign}(\mathbf{M} \cdot \mathbf{x}_{\text{GSM}})$, 正号表示切向流是背阳方向, 负号表示切向流是向阳方向. 磁场频谱通过快速傅里叶变换 (FFT) 得到. 横坐标的 0 表示 PB 模式起始时刻.

从图 1 可以看出, 这三个事例中 B_N 都出现明显的双极扰动特征, 而 B_t 的变化不一样. 图 1(a) 中 B_t 在 B_N 双极结构中心处下降, 这是因为卫星穿越 FTE 与磁层之间的转换区域^[12,37], FTE 期间 V_M 为正 (见图 1b), 即观测到很强的背阳流. 图 1(d) (g) 中, B_t 相对于磁层背景磁场均有所增强, 然而在 FTE 期间, 观测到的切向流分别为背阳流和向阳流. 在图 1(c) (f) (i) 中能清晰看到, 当卫星观测到 FTE 信号时, 磁场扰动都明显增强, 这表明磁层顶处低纬边界层中 FTE 磁层里侧具有磁场扰动现象^[12].

为比较不同轨道事例的磁场频谱特征, 图 1(j) 给出了 FTE 期间三组事件的总磁场平均功率谱密度 (PSD). T3-FTE, T4_{AS}-FTE 和 T4_S-FTE 事件的

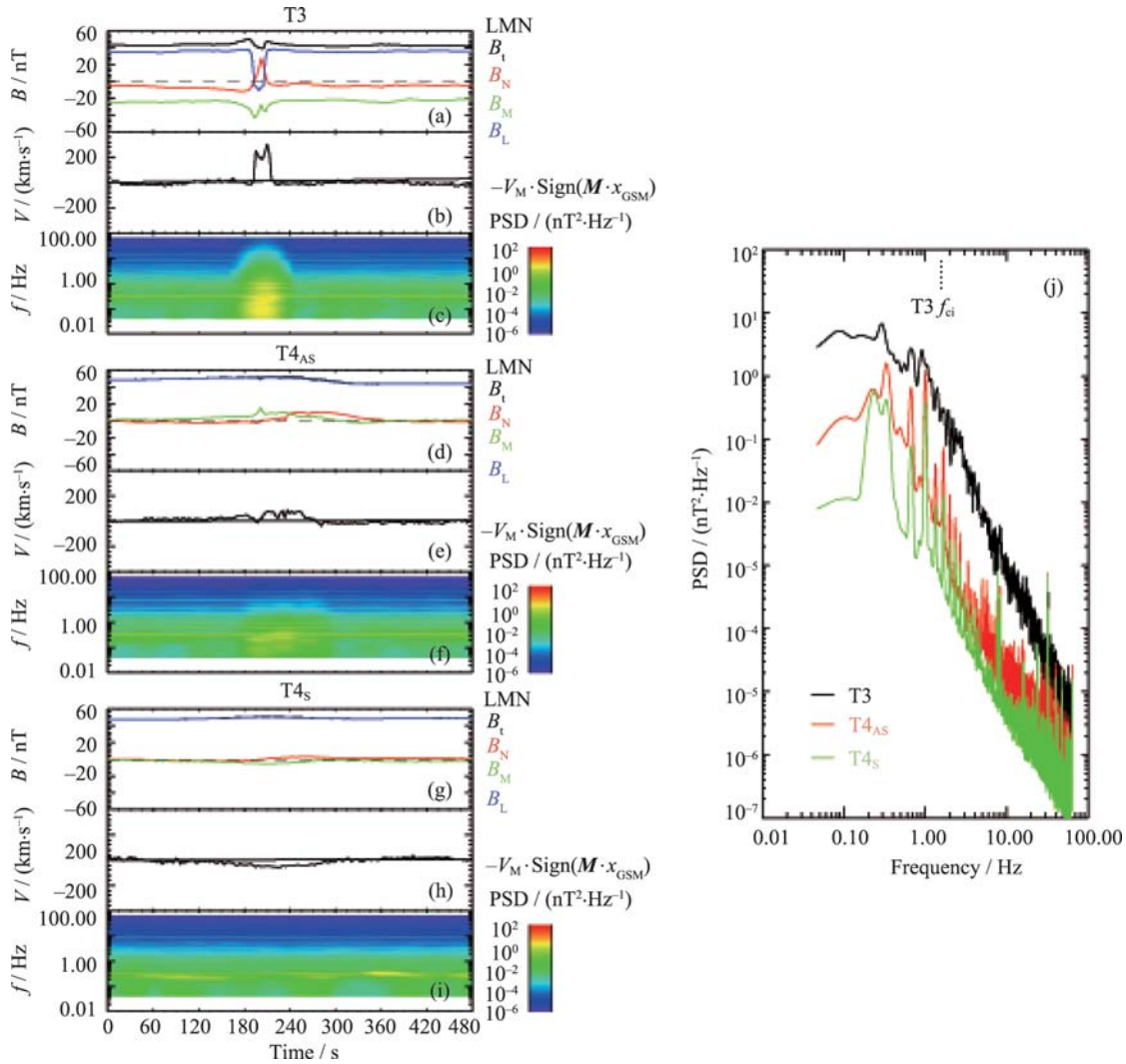


图 1 THEMIS 卫星观测到的 T3-FTE, T4_{AS}-FTE, T4_S-FTE 事件

Fig. 1 T3-FTE, T4_{AS}-FTE and T4_S-FTE events observed by THEMIS satellite

质子回旋频率 f_{ci} 分别为 0.70, 0.74, 0.75 Hz. 由图 1(j) 可以看到, 在对数坐标系下, 质子回旋频率和奈奎斯特频率 (64 Hz) 之间的功率谱密度随频率的增大而近似单调递减. 因此在 f_{ci} 至 64 Hz 的频段, 功率谱都遵循幂律分布 $P_0 f^{-\alpha}$, 功率谱密度均在低频处到达峰值. 利用最小绝对值偏差法 (LAD) 对 f_{ci} 至 64 Hz 频段的功率谱曲线进行线性拟合, 求得斜率的绝对值即为幂律指数 α . T3-FTE, T4_{AS}-FTE 和 T4_S-FTE 事件的幂律指数 α 分别约为 2.97, 2.43, 2.06. 幂律指数 α 和功率谱密度都随卫星离 FTE 的相对距离增大而减小.

3 统计分析

T3-FTE, T4_{AS}-FTE, T4_S-FTE 事件的总磁场功率谱散点分别如图 2(a)~(c) 所示. 图中彩色曲线

表示给定组别的平均功率谱密度. 功率谱密度大约在 0.1 Hz 频率处达到最大值, 并且在 f_{ci} 至 64 Hz 频段内基本服从幂律分布. 为了分析局域磁层顶法向方向上观测卫星相对 FTE 的距离对幂律指数 α 和功率谱密度的影响, 图 2(d) 给出了这三组事件的平均功率谱密度. 由图 2(d) 可以看出, T3-FTE, T4_{AS}-FTE, T4_S-FTE 事件的湍流强度逐渐变弱. 图 2(e)~(g) 给出了三组事件 f_{ci} 至 64 Hz 频段幂律指数 α 分布直方图. 图 2 中箭头指向幂律指数 α 的平均值, 箭头上的线段表示 $[\langle\alpha\rangle - \delta, \langle\alpha\rangle + \delta]$, δ 为 α 的标准方差. 三组事件的幂律指数 α 的分布有部分重叠, 但可以明显看出有相对移动. T3-FTE, T4_{AS}-FTE, T4_S-FTE 事件的平均幂律指数 α 逐渐减小, 分别约为 3.05, 2.65, 2.16. 统计结果表明, 磁层顶法向方向上的磁场湍流幂律指数 α 和功率谱密度都随着观测卫星离 FTE 的相对距离增加而衰减, 这与以上

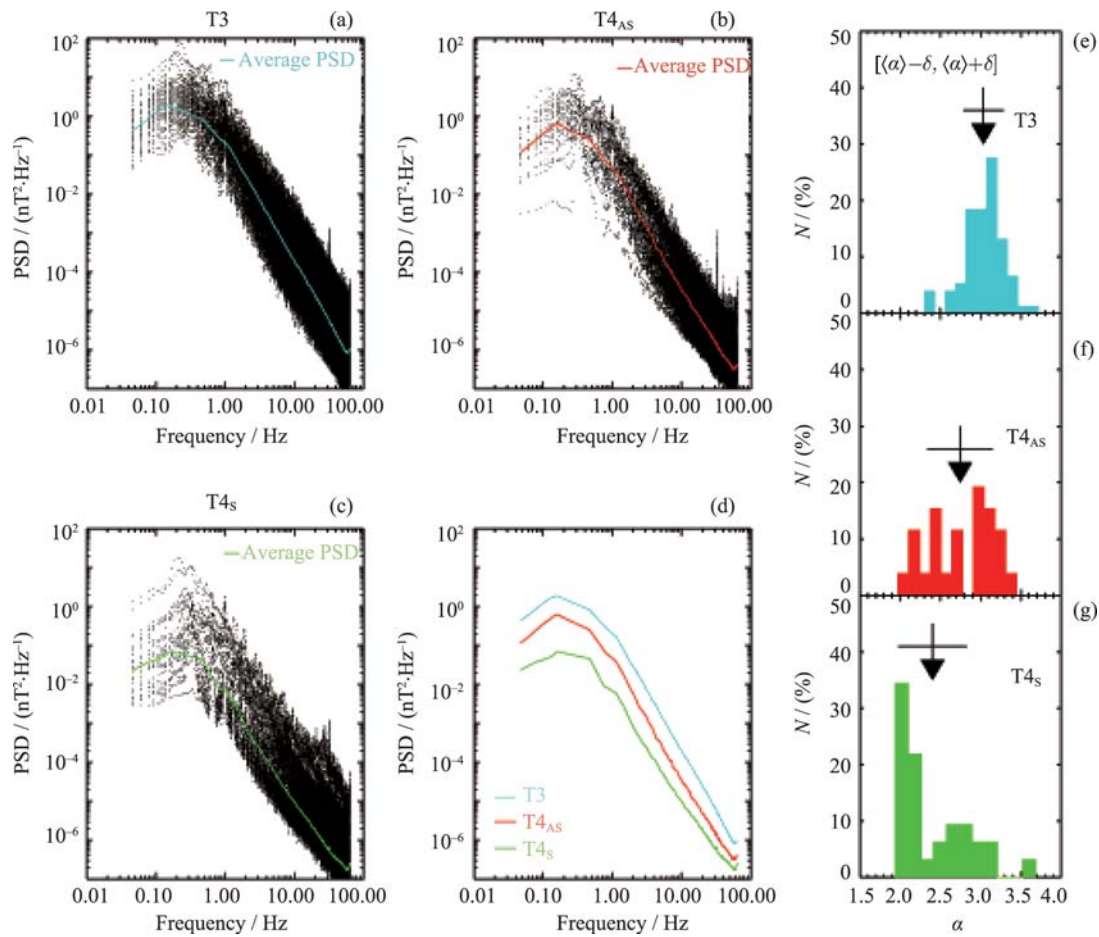


图 2 T3-FTE, T4_{AS}-FTE 及 T4_S-FTE 事件的总磁场功率谱密度 (PSD) 和幂律指数 α . N 表示事件所占百分比

Fig. 2 Power Spectra Density (PSD) of the total magnetic field and the spectral indices α of T3-FTE, T4_{AS}-FTE and T4_S-FTE events. N represents the event percentage

事例分析结论一致.

FTE 在磁层顶日下点区域附近产生, 向两侧翼或高纬地区移动^[1,12]. 这里选择 T3-FTE 事件进一步考察磁场湍流是否与 FTE 的形成或运动有关. T3-FTE 事件根据磁地方时 (LMT) 被分成两类, 一类为 subsolar-T3-FTE, 即 $|\text{MLT} - 12| \leq 2$ (34 个), 另一类为 flanks-T3-FTE, 即 $|\text{MLT} - 12| > 2$ (42 个). 图 3(a)~(c) 分别为 T3-FTE, subsolar-T3-FTE 及 flanks-T3-FTE 事件的总磁场功率谱. 图 3 中彩色曲线表示平均功率谱密度, 图 3(d) 同时给出了三组事件的平均功率谱密度. 图 3(e)~(g) 分别为 T3-FTE, subsolar-T3-FTE 及 flanks-T3-FTE 事件在 f_{ci} 至 64 Hz 频段幂律指数 α 的分布. 图 3 中箭头指向幂律指数 α 的平均值, 箭头上的线段表示 $[\langle\alpha\rangle - \delta, \langle\alpha\rangle + \delta]$, δ 为 α 的标准方差. 从图 3 可以看出, subsolar-T3-FTE 和 flanks-T3-FTE 事件的幂律指

数 α 分布和总磁场功率谱密度基本与 T3-FTE 事件一致. 因此, 磁场湍流的特性与 FTE 所在磁地方时方向的位置无关, 即与 FTE 的“年龄”无关.

4 讨论与结论

利用快速傅里叶变换得到总磁场频谱, 并通过最小绝对偏差方法求得 FTE 期间总磁场功率谱的斜率. 通过事例研究和统计分析可以发现, 在 f_{ci} 至 64 Hz 频段 FTE 磁层侧低纬边界层中的等离子体涡流区域, 总磁场功率谱服从幂律分布 $P = P_0 f^{-\alpha}$. 因此该区域与 FTE 伴随的磁场扰动为湍流. 磁场湍流幂律指数 α 的范围在 2~3.7 之间, 这与在地球其他区域^[16,38,39] 和太阳风中^[40,41] 观测到的磁场湍流一致.

以上研究表明, 磁层顶边界层是磁场湍流的源

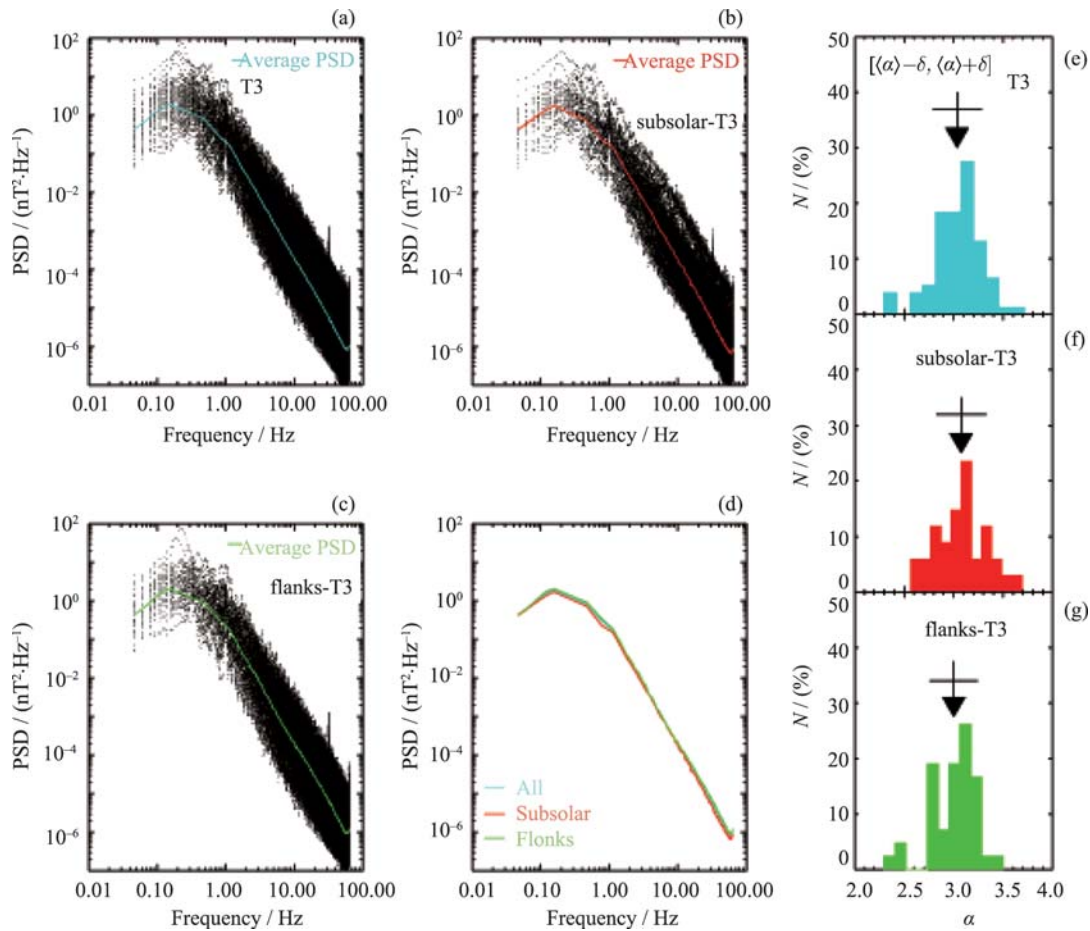


图 3 T3-FTE, subsolar-T3-FTE, flanks-T3-FTE 事件的总磁场功率谱密度 (PSD) 和幂律指数 α

Fig. 3 Power Spectra Density (PSD) of the total magnetic field and the spectral indices α of T3-FTE, subsolar-T3-FTE and flanks-T3-FTE events

区 [22,25,26,28,42], 但并没有具体指向某种结构. 这里利用 12 个穿越平静磁层顶的事例验证磁层顶平静时是否也会观测到磁场湍流现象. 观测表明, 这些平静时期的磁层顶穿越事例中的总磁场功率谱与上文提到的与 FTE 相关的总磁场功率谱明显不同. 图 4 给出了两个穿越平静磁层顶的事例. 事例 1 为 2015 年 4 月 18 日 17:39 UT 左右 THEMIS-A 卫星从磁层侧穿越到磁鞘的情况 (见图 4a~c). 事例 2 为 2015 年 3 月 17 日 04:51 UT 左右 THEMIS-A 卫星从磁鞘侧穿入磁层的情况 (见图 4d~f). 图 4 的磁场和等离子体密度数据表明, 磁层顶是平静的, 不存在明显的特殊结构. 利用卫星 FFT 仪器提供的磁场频谱数据 (fff_32_scm3), 计算了 17:37:30 UT–17:38:30 UT 和 04:51:00 UT–04:52:00 UT 这两个事例的总磁场平均功率谱密度, 并用折线连接起来, 如图 4(g) 所示, 两个事例基本重叠. 图 4(g) 给出了 T3-FTE, T4_{AS}-FTE, T4_S-FTE 事件的平均功率谱密度. 从图 4(g)

可以看出, 磁层顶平静时观测到的总磁场功率谱曲线与 FTE 相关的总磁场功率谱曲线不匹配, 其在 f_{ci} 至 64 Hz 频段内并不服从幂律分布 $P_0 f^{-\alpha}$, 这进一步证明了 FTE 可能是磁场湍流的源.

总之, 对数坐标系下低纬边界层中与 FTE 相伴的等离子体涡流区域中, f_{ci} 至 64 Hz 频段内的总磁场功率谱密度几乎为线性. 谱密度约在 0.1 Hz 处达到峰值, 此频率周期基本上对应于 FTE 的时间尺度. 在磁层顶法向方向上, 幂律指数 α 和总磁场功率谱密度随离 FTE 相对距离的增大而减小, 但是与 FTE 的“年龄”无关. 这些观测结果表明, 移动的 FTE 是观测到的磁场湍流的源, 而这些湍流的形成与 FTE 形成过程无关.

与 FTE 相关的磁场湍流可能散射粒子, 从而对磁鞘或 FTE 与磁层之间的粒子以及动量传输过程产生重要作用 [43–45], 即磁场湍流在粒子穿越磁层顶的空间扩散和传输中具有重要影响 [23,28,46–50]. 此外,

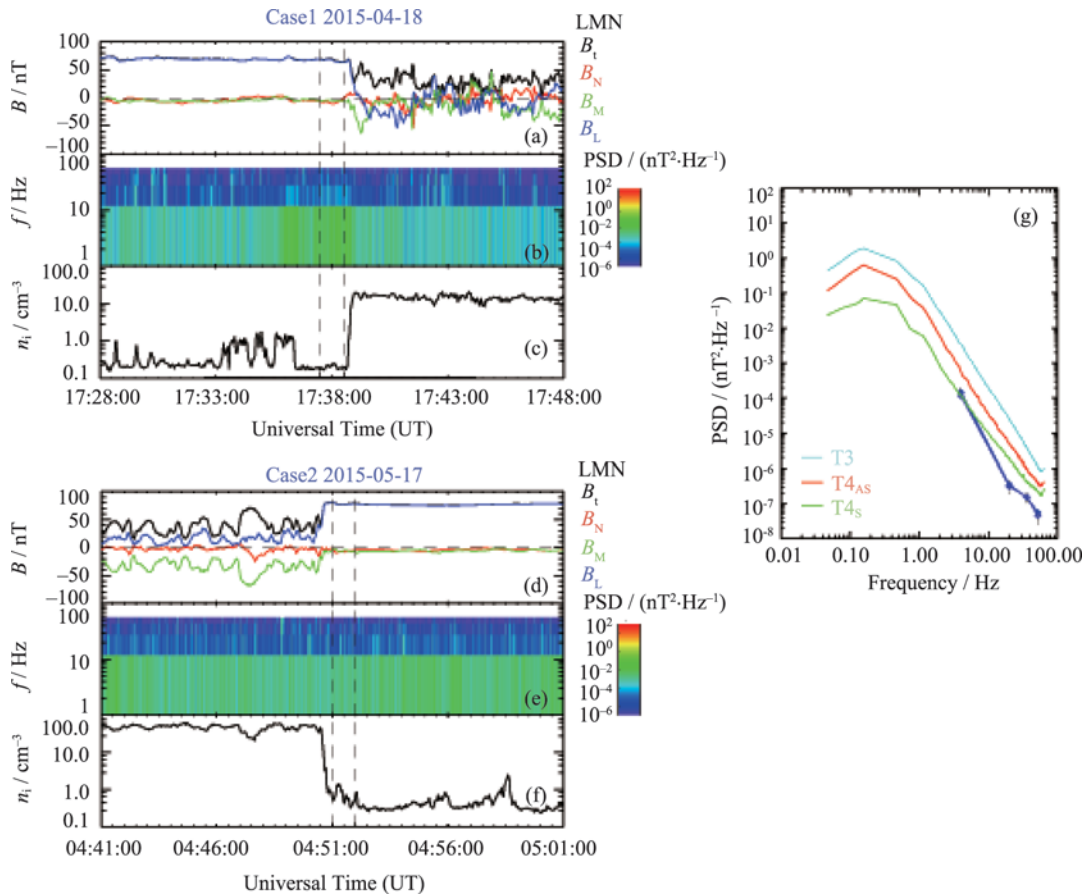


图 4 穿越平静磁层顶的两个事例. (b) (e) 为利用卫星 FFT 提供的 fff_32_scm3 数据
Fig. 4 Two crossings of quiet magnetopause. (b) (e) are fff_32_scm3 data of FFT

湍流还可以在等离子体结构中发挥作用^[51]. 需要进一步研究和证实磁场湍流是否能够提供足够的黏滞性, 从而解释磁层顶 FTE 的磁层侧低纬边界层中涡流的形成机制.

参考文献

- [1] RUSSELL C T, ELPHIC R C. Initial ISEE magnetometer results: magnetopause observations [J]. *Space Sci. Rev.*, 1978, **22**(6): 681-715
- [2] PASCHMANN G, HAERENDEL G, PAPAMASTORAKIS I, *et al.* Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**(A4): 2159-2168
- [3] LEE L C, FU Z F. A theory of magnetic flux transfer at the Earth's magnetopause [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1985, **12**(2): 105-108
- [4] PU Z Y, HOU P T, LIU Z X. Vortex-induced tearing mode instability as a source of flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(A11): 18861-18869
- [5] SOUTHWOOD D J. Theoretical aspects of ionosphere-magnetosphere-solar wind coupling [J]. *Adv. Space Res.*, 1985, **5**(4): 7-14
- [6] BERCHEM J, RUSSELL C T. Flux transfer events on the magnetopause: spatial distribution and controlling factors [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(A8): 6689-6703
- [7] RIJNBEEK R P, COWLEY S W H, SOUTHWOOD D J, *et al.* A survey of dayside flux transfer events observed by ISEE 1 and 2 magnetometers [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(A2): 786-800
- [8] ZHANG H, KHURANA K K, KIVELSON M G, *et al.* Modeling a force-free flux transfer event probed by multiple time history of events and macroscale interactions during substorms (THEMIS) spacecraft [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(A1): A00C05
- [9] KOROTOVA G I, SIBECK D G, ROSENBERG T. Geotail observations of FTE velocities [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**(1): 83-92
- [10] FARRUGIA C J, ELPHIC R C, SOUTHWOOD D J, *et al.* Field and flow perturbations outside the reconnected field line region in flux transfer events: theory [J]. *Planet. Space Sci.*, 1987, **35**(2): 227-240
- [11] LIU J, ANGELOPOULOS V, SIBECK D, *et al.* THEMIS observations of the dayside traveling compression region and flows surrounding flux transfer events [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**(17): L17S07
- [12] ZHANG H, KIVELSON M G, ANGELOPOULOS V, *et al.* Flow vortices associated with flux transfer events moving along the magnetopause: observations and an MHD simulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**(A8): A08202
- [13] SONNERUP B U Ö, SIEBERT K D. Theory of the low latitude boundary layer and its coupling to the ionosphere: a tutorial review [M]//Earth's Low-Latitude Boundary Layer. Washington: American Geophysical Union, 2013
- [14] CAI C L, CAO J B, ZHOU G C, *et al.* Whistler turbulence at the magnetopause: a nonlinear generation mechanism [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(1): 272-276
- [15] TU C Y, MARSCH E. MHD structures, waves and turbulence in the solar wind: observations and theories [J]. *Space Sci. Rev.*, 1995, **73**(1/2): 1-210
- [16] ZIMBARDO G, GRECO A, SORRISO-VALVO L, *et al.* Magnetic turbulence in the geospace environment [J]. *Space Sci. Rev.*, 2010, **156**(1-4): 89-134
- [17] CUMMINGS W D, COLEMAN JR P J. Magnetic fields in the magnetopause and vicinity at synchronous altitude [J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**(17): 5699-5718
- [18] NEUGEBAUER M, RUSSELL C T, SMITH E J. Observations of the internal structure of the magnetopause [J]. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(4): 499-510
- [19] SCKOPKE N, PASCHMANN G, HAERENDEL G, *et al.* Structure of the low-latitude boundary layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**(A4): 2099-2110
- [20] STASIEWICZ K, KHOTYAINTSEV Y, GRZESIAK M. Dispersive Alfvén waves observed by Cluster at the magnetopause [J]. *Phys. Scr.*, 2004, T107: 171
- [21] STASIEWICZ K, SEYLER C E, MOZER F S, *et al.* Magnetic bubbles and kinetic Alfvén waves in the high-latitude magnetopause boundary [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12): 29503-29514
- [22] REZEAU L, PERRAUT S, ROUX A. Electromagnetic fluctuations in the vicinity of the magnetopause [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1986, **13**(11): 1093-1096
- [23] REZEAU L, MORANE A, PERRAUT S, *et al.* Characterization of Alfvénic fluctuations in the magnetopause boundary layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(A1): 101-110
- [24] LE G, ZHENG Y, RUSSELL C T, *et al.* Flux transfer events simultaneously observed by polar and cluster: flux rope in the subsolar region and flux tube addition to the polar cusp [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(A1): A01205
- [25] GURNETT D A, ANDERSON R R, TSURUTANI B T, *et al.* Plasma wave turbulence at the magnetopause: observations from ISEE 1 and 2 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A12): 7043-7058
- [26] TSURUTANI B T, SMITH E J, THORNE R M, *et al.* Wave-particle interactions at the magnetopause: contributions to the dayside aurora [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1981, **8**(2): 183-186
- [27] PASCHMANN G, PAPAMASTORAKIS J, SCKOPKE N, *et al.* Altitude and structure of an auroral arc acceleration region [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 1983, **88**(A9): 7121-7130
- [28] CHASTON C C, WILBER M, MOZER F S, *et al.* Mode conversion and anomalous transport in Kelvin-Helmholtz

- vortices and kinetic Alfvén waves at the Earth's magnetopause [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(17):175004
- [29] JOHNSON J R, CHENG C Z. Kinetic Alfvén waves and plasma transport at the magnetopause [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(11):1423-1426
- [30] JOHNSON J R, CHENG C Z. Stochastic ion heating at the magnetopause due to kinetic Alfvén waves [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(23):4421-4424
- [31] LEE L C, JOHNSON J R, MA Z W. Kinetic Alfvén waves as a source of plasma transport at the dayside magnetopause [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A9):17405-17411
- [32] SIBECK D G, ANGELOPOULOS V. THEMIS science objectives and mission phases [J]. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**(1-4):35-59
- [33] AUSTER H U, GLASSMEIER K H, MAGNES W, *et al.* The THEMIS fluxgate magnetometer [J]. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**(1-4):235-264
- [34] ROUX A, LE CONTEL O, COILLOT C, *et al.* The search coil magnetometer for THEMIS [J]. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**(1-4):265-275
- [35] MCFADDEN J P, CARLSON C W, LARSON D, *et al.* The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration [J]. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**(1-4):277-302
- [36] SHUE J H, SONG P, RUSSELL C T, *et al.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A8):17691-17700
- [37] ZHANG H, KIVELSON M G, KHURANA K K, *et al.* Evidence that crater flux transfer events are initial stages of typical flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**(A8):A08229
- [38] ALEXANDROVA O. Solar wind *vs.* magnetosheath turbulence and Alfvén vortices [J]. *Nonlin. Proc. Geophys.*, 2008, **15**(1):95-108
- [39] NYKYRI K, GRISON B, CARGILL P J, *et al.* Origin of the turbulent spectra in the high-altitude cusp: cluster spacecraft observations [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**(3):1057-1075
- [40] DENSKAT K U, BEINROTH H J, NEUBAUER F M. Interplanetary magnetic field power spectra with frequencies from 2.4×10 to the -5 th Hz to 470 Hz from HELIOS-observations during solar minimum conditions [J]. *J. Geophys. Zeitschrift Geophys.*, 1983, **54**(1):60-67
- [41] LEAMON R J, SMITH C W, NESS N F, *et al.* Observational constraints on the dynamics of the interplanetary magnetic field dissipation range [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A3):4775-4787
- [42] RINAWA M L, SHARMA R P, MODI K V, *et al.* The nonlinear evolution of kinetic Alfvén wave with the ion acoustic wave and turbulent spectrum in the magnetopause region [J]. *J. Geophys. Res.*, 2015, **120**(2):1238-1247
- [43] GRECO A, TAKTAKISHVILI A L, ZIMBARDO G, *et al.* Ion dynamics in the near-Earth magnetotail: magnetic turbulence versus normal component of the average magnetic field [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A10):1267
- [44] MENG C I, ANDERSON K A. Characteristics of the magnetopause energetic electron layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**(31):4237-4243
- [45] BAKER D N, STONE E C. The magnetopause energetic electron layer, 1. Observations along the distant magnetotail [J]. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**(A9):4327-4338
- [46] FAGANELLO M, CALIFANO F, PEGORARO F. Numerical evidence of undriven, fast reconnection in the solar-wind interaction with earth's magnetosphere: formation of electromagnetic coherent structures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(10):105001
- [47] GRECO A, TAKTAKISHVILI A L, ZIMBARDO G, *et al.* Ion transport and Lévy random walk across the magnetopause in the presence of magnetic turbulence [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A11):1395
- [48] LABELLE J, TREUMANN R A. Plasma waves at the dayside magnetopause [J]. *Space Sci. Rev.*, 1988, **47**(1/2):175-202
- [49] MATSUMOTO Y, HOSHINO M. Turbulent mixing and transport of collisionless plasmas across a stratified velocity shear layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(A5):A05213
- [50] TAKTAKISHVILI A, ZIMBARDO G, AMATA E, *et al.* Ion escape from the high latitude magnetopause: analysis of oxygen and proton dynamics in the presence of magnetic turbulence [J]. *Ann. Geophys.*, 2007, **25**(8):1877-1885
- [51] GRIGORENKO E E, SAUVAUD J A, ZELENYI L M. Spatial-temporal characteristics of ion beamlets in the plasma sheet boundary layer of magnetotail [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**(A5):A05218