

ACE 飞船观测的行星际磁场准 27 天重现周期和结构

马莉, 赵树贤, 吴平静

中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘要 ACE 飞船发射于 1997 年 8 月 15 日, 将维持到 2024 年, 位于日地连线重力平衡点 L1。本文采用 ACE 飞船行星际磁场观测数据, 基于 GSE 坐标系, 确定 L1 点的行星际磁场主体方位, 进而将行星际磁场观测数据转换为极性符号序列。对于序列中的任一时间点, 通过改变以它为中心的子序列探测行星际磁场的准 27d 重现周期和结构, 再应用模板匹配方法识别重现结构, 最后采用分段常值函数拟合获得分段稳定的周期和结构。得到的主要结果如下: (1) 1999—2008 年间, IMF 重现周期绝大多数在 (27 ± 2) d 范围内, 只有 1 个例外, 即 2001 年 10 月 27 日 10:00—11 月 28 日 12:00 时间内, 重现周期为 21d14h; (2) 2001 年 1 月 8 日 12:00—2004 年 7 月 17 日 04:00, IMF 为 2 扇瓣结构, 2004 年 7 月 17 日 05:00—2007 年 6 月 30 日 23:00, IMF 为 4 扇瓣结构, 2007 年 7 月 1 日 00:00—2008 年 12 月 31 日 23:00, IMF 为 2 扇瓣结构。

关键词 ACE 飞船; 行星际磁场; 准 27 天重现性; 重现性指数; 模板匹配

中图分类号 P353

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.11.003

Quasi 27-day Reoccurrence Period and Structure of IMF Observed by ACE

MA Li, ZHAO Shuxian, WU Pingjing

Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract ACE was launched on August 15, 1997 and placed into an orbit about the L1 point between the Earth and the Sun. The L1 point is one of several points where the gravitational attraction of the Sun and Earth are equal and in the opposite direction. The Parker spiral angle at L1 point with ACE MAG data is calculated and the data is converted to the polarity symbolic sequence. For any point in the sequence, the quasi 27-day reoccurrence period and the structure of IMF are detected through altering the sub-sequence centered on this point. And then, the reoccurrence structure is identified with the template matching method. Finally, the piecewise constant function fitting is used to obtain the piecewise constant period and structure. The obtained results are as follows: (1) in the period of 1999—2008, the reoccurrence period is mostly in the range of (27 ± 2) days, with only one exception: a month from 2001-10-27 10:00 to 2001-11-28 12:00, the reoccurrence period is 21 days and 14 hours; (2) from 2001-01-08 12:00 to 2004-07-17 04:00, IMF is in a two fan disc structure; from 2004-07-17 05:00 to 2007-06-30 23:00, IMF is in a four fan disc structure; from 2007-07-01 00:00 to 2008-12-31 23:00, IMF is in a two fan disc structure.

Keywords ACE spacecraft; interplanetary magnetic field; quasi 27-day reoccurrence; reoccurrence index; template matching

0 引言

行星际磁场(IMF)是由太阳风带到行星际空间的太阳磁场^[1]。由于太阳自转, IMF被拉成螺旋状, 在地球轨道处 IMF方向与日地连线的夹角约为 45° — 50° ^[2]。行星际电流片是沿

着太阳磁赤道面扩展将反方向磁力线分开的薄电流片^[3]。由于太阳自转轴与太阳磁轴间存在夹角, 随着太阳旋转行星际电流片呈现出“芭蕾舞裙”状, 地球时而位于电流片上方, 时而位于电流片下方, 使得黄道面上 IMF 呈现出扇形瓣结构, 多为

收稿日期: 2012-03-07; 修回日期: 2012-04-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAC35B0)

作者简介: 马莉, 研究员, 研究方向为时空序列数据分析和地震预测, 电子信箱: moma1987@163.com; 赵树贤(通信作者), 副研究员, 研究方向为时空序列分析和地震预测, 电子信箱: shuxianzhao@yahoo.com.cn

2 扇瓣结构和 4 扇瓣结构, 相邻扇形瓣具有相反极性^[1-2]。这种极性结构具有由太阳自转引起的准 27d 周期的重现性^[2-3], 同时也受到太阳磁场变化和地球所处黄道位置变化影响, 使得周期长度和扇形结构呈现出复杂的变化特征^[4]。在这个方面开展研究较早、较多且较深入的是 Leif、Svalgaard 等^[5]。所用方法是: 确定每日的 IMF 极性, 绘制到 27 列网格的 IMF 日极性图(每个网格表示 1 日, 每行表示 1 个 Bartel 太阳自转周期, 网格填充颜色表示极性)中; 根据极性变化前后至少维持 4d 相同极性的原则(有时可放宽到 3d)确定扇瓣边界; 分段用直线拟合扇瓣极性变化点, 计算直线的斜率以粗略地确定准 27d 重现周期及其重现结构的变化。

为了更加精确地确定黄道面上 IMF 的准 27d 重现周期及其结构的演化, 本文采用 ACE 飞船(Advanced Composition Explorer, 1997 年 8 月 25 日发射, 将维持到 2024 年, 位于日地连线重力平衡点 L1 上, 距地球 150 万 km, 相当于 4 倍地月距离^[6])的 IMF 观测数据^[7], 首先将其转换为极性符号序列, 对于序列中的任一时间点, 通过改变以它为中心的子序列探测 IMF 的重现周期及其重现结构, 然后应用模板匹配方法^[8]识别重现结构, 最后应用分段函数拟合方法获得分段表示的 IMF 准 27d 重现周期和结构。

1 准 27 天重现周期和结构探测

本文采用 ACE 磁力计(MAG)载荷观测的 GSE 坐标系统的时均数据。GSE 是地心黄道坐标系, x 轴指向太阳, z 轴指向黄北极, y 轴按照右手规则确定。设黄道面 IMF 的归一化矢量序列为 $(B_{x_1} B_{y_1}), (B_{x_2} B_{y_2}), \dots, (B_{x_k} B_{y_k}), \dots, (B_{x_K} B_{y_K})$, 其中 $B_{x_k}^2 + B_{y_k}^2 = 1, k=1, 2, \dots, K$ 。 B_{x_k} 表示 IMF 的 x 轴坐标, B_{y_k} 表示 IMF 的 y 轴坐标。

通过下式确定 L1 点的 IMF 主体方位 Ψ :

$$\Psi = \max_{\varphi \in [0, 360]} \sum_{k=1}^K |B_{x_k} \cos \varphi + B_{y_k} \sin \varphi|$$

应用截止到 2010 年 5 月 28 日的所有数据, 得到 $\Psi \approx 134^\circ, 314^\circ$, 二者相差 180° 。即 L1 点的 IMF 方位与日地连线的夹角约为 46° 。

这里取 $\Psi=134^\circ$, 根据 Ψ 将上述 IMF 矢量数值序列转换为极性符号序列:

$$pol_k = \begin{cases} A & B_{x_k} \cos \Psi + B_{y_k} \sin \Psi \geq 0 \\ T & B_{x_k} \cos \Psi + B_{y_k} \sin \Psi < 0 \end{cases}$$

其中, A 为 IMF 方向背离太阳, T 为 IMF 方向指向太阳。

对于上述符号序列中的任一时间点, 通过改变以它为中心的子序列探测 IMF 的重现周期及其结构。子序列定义为 I 个周期, 周期长度为 J 个采样周期的 $I \times J$ 个数据。在 I 个周期中, 第 j 个相位点 A 的出现率记为 $occA_j$, T 的出现率记为 $occT_j$ 。每个相位点均取出现率最高的极性, 这样的周期结构序列的重现程度最高, 称为重现结构, 记为 s_1, s_2, \dots, s_j , 其中第 j 个相位点的极性为

$$s_j = \begin{cases} A & occA_j > occT_j \\ T & occT_j > occA_j, j=1, 2, \dots, J \\ N & occA_j = occT_j \end{cases}$$

其中, N 为该相位点极性既非 A 也非 T , 二者均没有表现出重现优势。

那么, 重现结构的重现程度可用各相位点最大出现率的平均值表示, 即

$$RI_{IJ} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \max(occA_j, occT_j)$$

称为子序列的重现性指数, RI 在 $[0.5, 1]$ 上变化, RI 越大, 重现程度越高; 当 $RI=0.5$ 时, 该结构无重现优势, 当 $RI=1$ 时, 该结构在各周期上精确重现。

在准 27d 重现周期变动范围 $[20d06h, 33d18h]$ 内, 计算不同周期数的准 27d 重现性指数为

$$RI_j = \max_{j \in [20d06h, 33d18d]} RI_{IJ}$$

图 1 展示的是 1999—2008 年整时点上, 2—10 个周期的

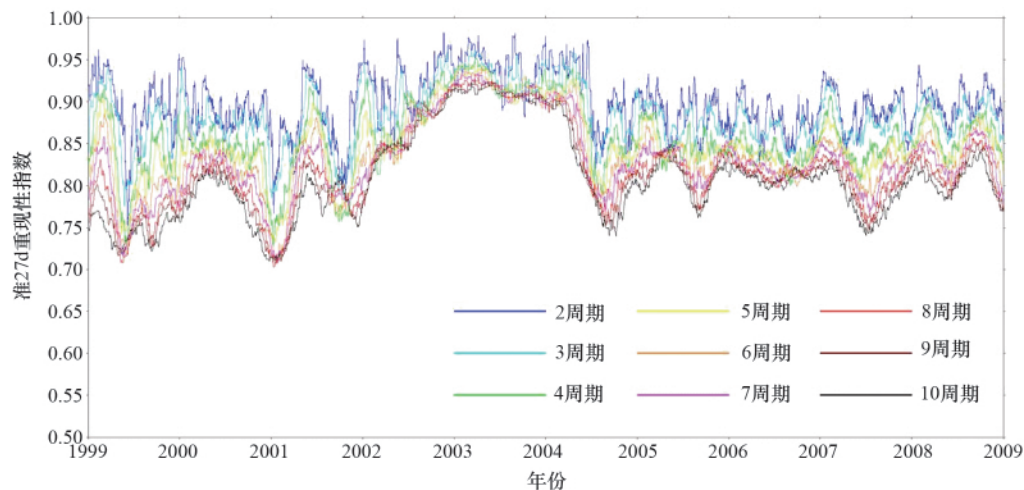


图 1 不同周期数的行星际磁场准 27d 重现性指数变化

Fig. 1 Variations of IMF quasi-27-day reoccurrence index with different number of period

准 27d 重现性指数, 以此可以确定每个整时点准 27d 重现性指数最大时的周期数, 图 2 给出了 1999—2008 年行星际磁场准 27d 重现周期变化, 图中横轴上方颜色条显示不同周期数, 与图 1 相同。颜色条上方的背景图像展示相应周期个数,

不同周期长度的子序列的重现性指数, 颜色越红表示重现性指数越大, 颜色越黑表示重现性指数越小。[20d06h, 33d18h] 内的重现性指数最大时的周期即为准 27d 重现周期, 图 2 中黄色线显示该周期的结构即为准 27d 重现结构。

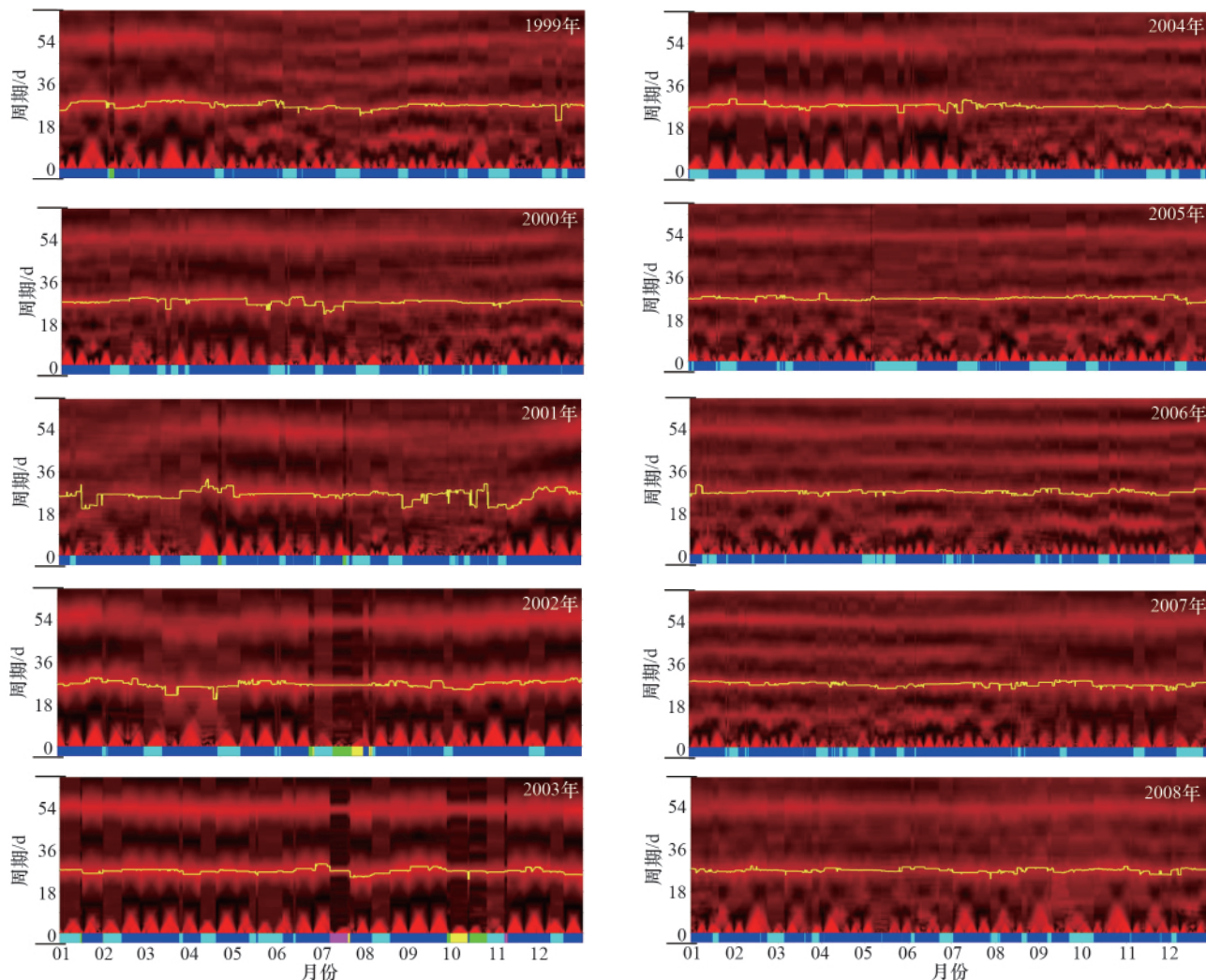


图 2 1999—2008 年行星际磁场准 27d 重现周期变化

Fig. 2 Variations of IMF quasi 27-day recurrence period for the period of 1999—2008

2 准 27 天重现结构识别

以 1/8 为扇瓣宽度单位, 基于整单位宽度, 可将 2 扇瓣 IMF 结构划分为 8 类, 4 扇瓣 IMF 结构划分为 20 类, 如图 3 所示。图中, 蓝色表示 IMF 方向背离太阳, 红色表示 IMF 方向指向太阳, 模板上方字符表示模板标识号, 数字部分表示从上方按照顺时针方向排列的扇瓣宽度, 字母表示第 1 个扇瓣的 IMF 极性。所对应的 2 周期重现性扫描图如图 4 所示。对于结构类型 44, 其所对应的多周期重现性扫描图见图 5。由图 4、图 5 可以直观地识别出 IMF 结构, 如 2003 年, IMF 基本维持 44 这种结构, 但多数情况很难直观识别, 为此, 采取模板匹配的方法识别 IMF 的重现结构。

设重现结构序列是 s_1, s_2, \dots, s_J , 由某一类型结构生成的相同周期匹配模板为 b_1, b_2, \dots, b_J , 则其匹配率 U 为

$$U = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u_j \quad j=1, 2, \dots, J$$

其中,

$$u_j = \begin{cases} 1 & s_j = b_j \\ 0 & s_j \neq b_j \end{cases}$$

U 最大时的结构类型即为该重现结构所属的结构类型。

图 6 展示的是 1999—2008 年整时点上的准 27d 重现结构类型, 图中, 蓝色表示以 A 开头的结构类型, 红色表示以 T 开头的结构类型。

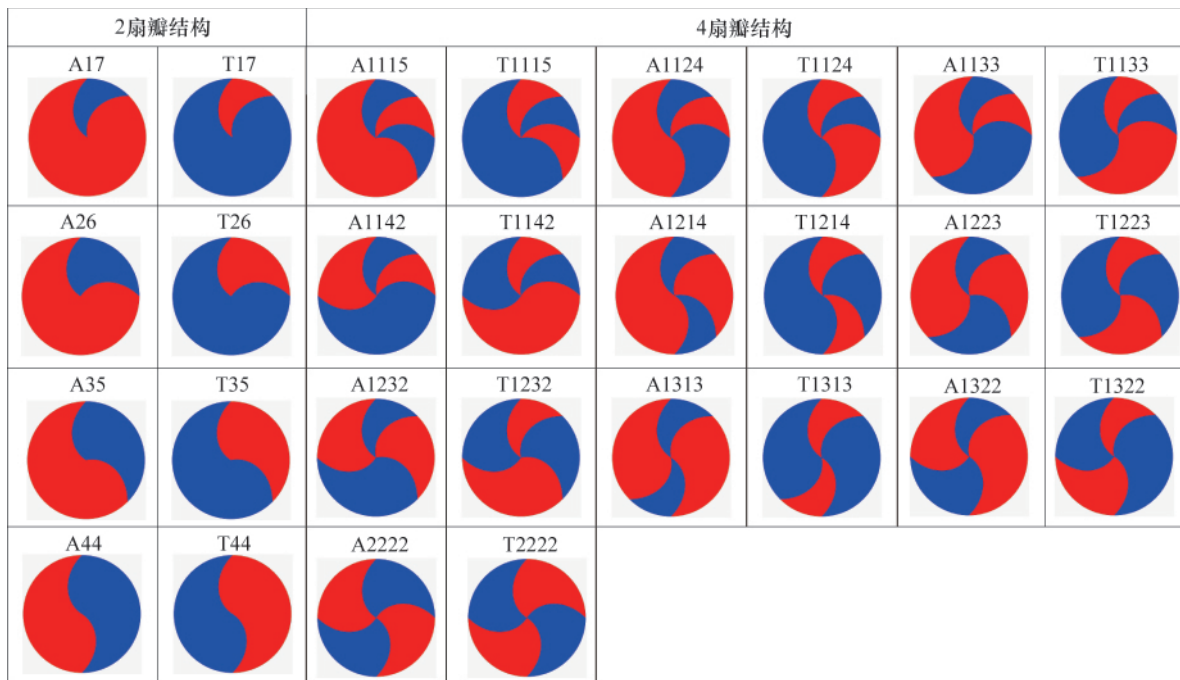


图3 行星际磁场扇瓣结构类型
Fig. 3 Types of IMF sector structure

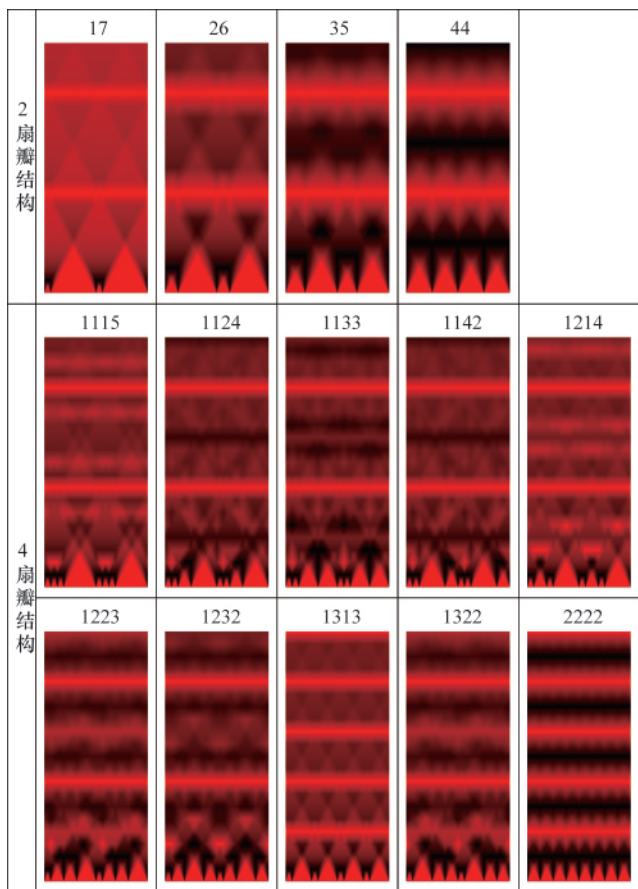


图4 各结构类型 27d 周期模板的 2 周期重现性扫描图
Fig. 4 Two period reoccurrence scan of all types of 27 periodicity template

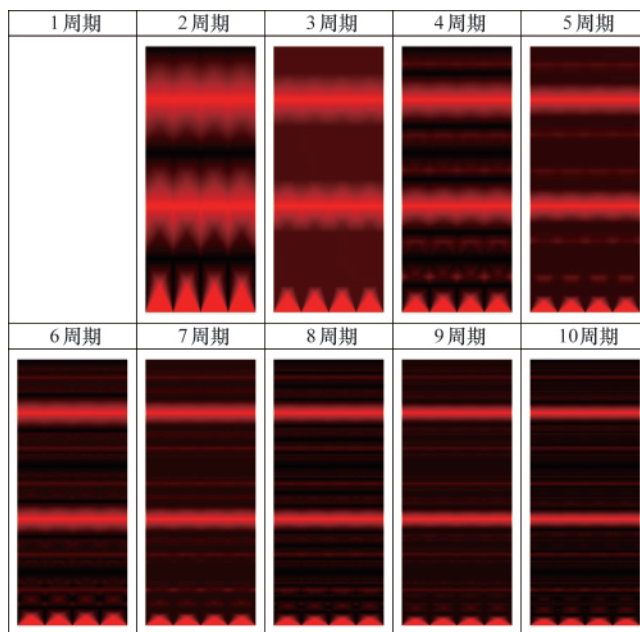


图5 结构类型 44 的 27 天周期模板的多周期重现性扫描图
Fig. 5 Multiple period reoccurrence scan of 27 periodicity template of type 44

3 分析

图4、图5中 27d 周期模板的重现性扫描图展示出两条明确的红色条带,一条对应 27d 周期,一条对应 2x27d 周期,这是由模板的 27d 周期性决定的。图2中 IMF 重现性扫描图同样也展示出两条甚为清晰的红色条带,一条在 27d 附近,一条在 2x27d 附近,再次证明 IMF 具有准 27d 重现性。

从图 2 和图 6 中可以看出,IMF 准 27d 重现周期及其结构均具有分段的稳定性,本文采用分段常值函数拟合获得分段稳定的周期与结构。

图 7 和图 8 分别展示了重现周期的累计残差-分段数变

化曲线及累计不符合数-分段数变化曲线,曲线从急剧变化到缓慢变化的转折点(图中红点),所对应的分段数选为拟合函数的分段数。重现周期的分段数为 23 段,重现结构的分段数为 24 段。据此得到的分段稳定的周期和结构见表 1。

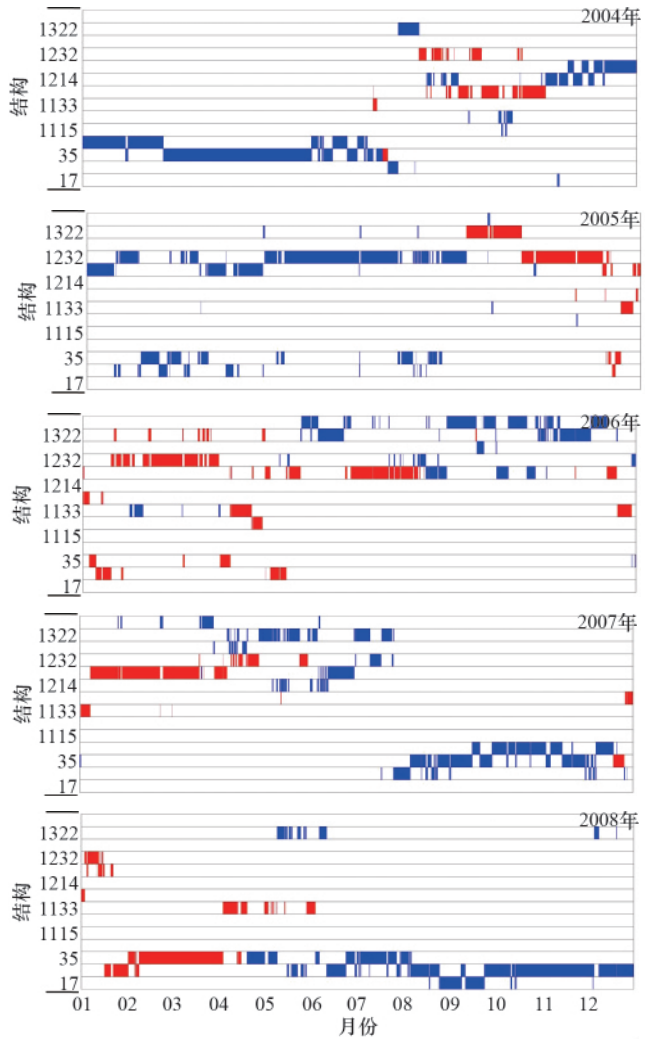
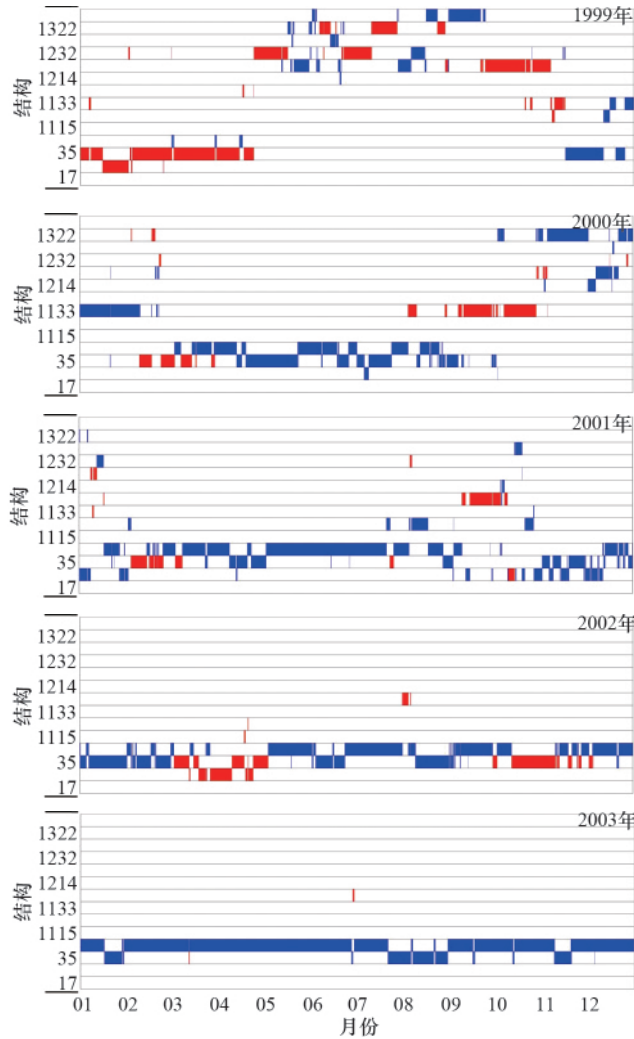


图 6 1999—2008 年行星际磁场准 27d 重现结构变化

Fig. 6 Variations of IMF quasi 27-day recurrence structure for the period of 1999—2008

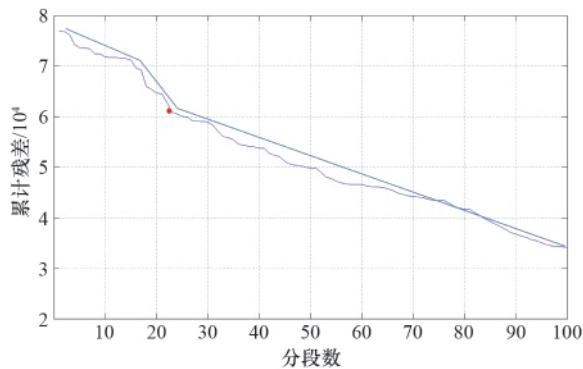


图 7 1999—2008 年行星际磁场准 27d 重现周期的累计残差-分段数变化曲线

Fig. 7 Curve of total error-segment number of IMF quasi 27-day recurrence period in the period of 1999—2008

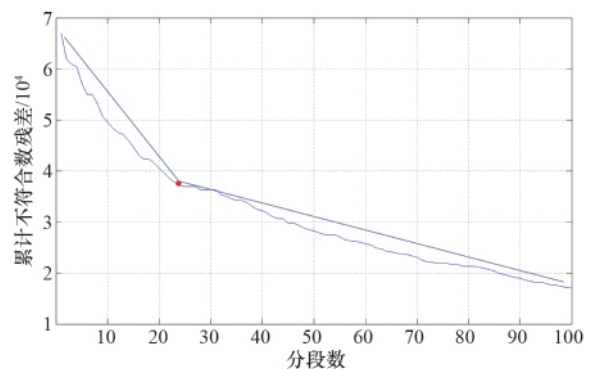


图 8 1999—2008 年行星际磁场准 27d 重现结构的累计不符合数-分段数变化曲线

Fig. 8 Curve of total error-segment number of IMF quasi 27-day recurrence structure in the period of 1999—2008

表 1 1999—2008 年 IMF 分段稳定周期及其结构

Table 1 Piecewise constant period and structure of IMF between 1999 and 2008

| 时间范围 | | 周期 | | 结构 | |
|------------------|------------------|--------|------|-------|--------|
| 起始时间 | 终止时间 | 长度 | 误差/% | 类别 | 不符合率/% |
| 1999-01-01 00:00 | 1999-04-15 21:00 | 28d03h | 3.4 | T35 | 22.3 |
| 1999-04-15 22:00 | 1999-04-25 04:00 | 26d05h | 3.4 | | |
| 1999-04-25 05:00 | 1999-08-06 22:00 | | | | |
| 1999-08-06 23:00 | 1999-08-31 04:00 | 27d00h | 1.6 | T1232 | 60.1 |
| 1999-08-31 05:00 | 1999-11-16 17:00 | | | T1223 | 56.4 |
| 1999-11-16 18:00 | 2000-02-03 16:00 | 28d09h | 1.6 | A1133 | 42.2 |
| 2000-02-03 17:00 | 2000-02-09 08:00 | | | | |
| 2000-02-09 09:00 | 2000-05-09 16:00 | 25d23h | 4.9 | 44 | 55.7 |
| 2000-05-09 17:00 | 2000-07-16 15:00 | | | | |
| 2000-07-16 16:00 | 2000-08-25 17:00 | 27d08h | 2.1 | T1133 | 66.6 |
| 2000-08-25 18:00 | 2001-01-08 11:00 | | | | |
| 2001-01-08 12:00 | 2001-01-16 23:00 | 25d10h | 4.8 | 44 | 36.8 |
| 2001-01-17 00:00 | 2001-03-26 12:00 | | | | |
| 2001-03-26 13:00 | 2001-05-02 21:00 | 28d21h | 3.6 | A35 | 53.9 |
| 2001-05-02 22:00 | 2001-09-15 12:00 | | | | |
| 2001-09-15 13:00 | 2001-10-27 09:00 | 26d13h | 3.9 | 44 | 23.7 |
| 2001-10-27 10:00 | 2001-11-28 12:00 | | | | |
| 2001-11-28 13:00 | 2002-02-25 20:00 | 21d14h | 5.4 | A35 | 53.9 |
| 2001-11-28 13:00 | 2002-02-25 20:00 | | | | |
| 2002-02-25 21:00 | 2002-03-04 00:00 | 27d14h | 3.2 | T35 | 49.5 |
| 2002-03-04 01:00 | 2002-05-05 04:00 | | | | |
| 2002-05-05 05:00 | 2002-05-06 22:00 | 25d13h | 3.2 | 44 | 23.7 |
| 2002-05-06 23:00 | 2002-10-16 00:00 | | | | |
| 2002-10-16 01:00 | 2003-07-22 10:00 | 26d05h | 2.8 | 44 | 23.7 |
| 2002-10-16 01:00 | 2003-07-22 10:00 | | | | |
| 2003-07-22 11:00 | 2004-01-15 03:00 | 27d03h | 2.4 | 44 | 23.7 |
| 2003-07-22 11:00 | 2004-01-15 03:00 | | | | |
| 2004-01-15 04:00 | 2004-02-23 04:00 | 26d18h | 3.1 | 44 | 23.7 |
| 2004-01-15 04:00 | 2004-02-23 04:00 | | | | |
| 2004-02-23 05:00 | 2004-07-17 04:00 | 27d15h | 2.6 | A35 | 16.4 |
| 2004-07-17 05:00 | 2004-08-10 02:00 | | | T1142 | 60.4 |
| 2004-08-10 03:00 | 2004-11-01 19:00 | 26d19h | 1.4 | A1223 | 52.3 |
| 2004-11-01 20:00 | 2005-04-27 04:00 | | | A1232 | 34.7 |
| 2005-04-27 05:00 | 2005-08-06 04:00 | 27d04h | 2.4 | T1232 | 50.2 |
| 2005-08-06 05:00 | 2005-10-14 13:00 | | | | |
| 2005-10-14 14:00 | 2006-02-09 16:00 | 26d23h | 2.2 | T1223 | 52.2 |
| 2006-02-09 17:00 | 2006-05-15 01:00 | | | | |
| 2006-05-15 02:00 | 2006-08-29 00:00 | 27d16h | 2.7 | 2222 | 55.5 |
| 2006-08-29 01:00 | 2006-12-19 05:00 | | | | |
| 2006-12-19 06:00 | 2007-01-07 19:00 | 27d16h | 2.7 | T1223 | 55.8 |
| 2007-01-07 20:00 | 2007-06-03 00:00 | | | | |
| 2007-06-03 01:00 | 2007-06-30 23:00 | 27d00h | 2.5 | A35 | 52.8 |
| 2007-07-01 00:00 | 2007-09-29 19:00 | | | 44 | 39.3 |
| 2007-09-29 20:00 | 2007-12-26 15:00 | 27d00h | 2.5 | T35 | 45.4 |
| 2007-12-26 16:00 | 2008-02-08 10:00 | | | | |
| 2008-02-08 11:00 | 2008-04-19 18:00 | 27d01h | 2.1 | A35 | 48.1 |
| 2008-04-19 19:00 | 2008-08-05 22:00 | | | | |
| 2008-08-05 23:00 | 2008-08-18 02:00 | 27d07h | 2.4 | A26 | 22.0 |
| 2008-08-18 03:00 | 2008-12-31 23:00 | | | | |

表 1 表明, (1) 1999—2008 年间, IMF 重现周期绝大多数在 (27 ± 2) d 范围内, 只有一个例外, 即 2001 年 10 月 27 日 10:00—11 月 28 日 12:00 的 1 个月时间内, 重现周期为 21d14h; (2) 2001 年 1 月 8 日 12:00—2004 年 7 月 17 日 04:00, IMF 为 2 扇瓣结构, 2004 年 7 月 17 日 05:00—2007 年 6 月 30 日 23:00, IMF 为 4 扇瓣结构, 2007 年 7 月 1 日 00:00—2008 年 12 月 31 日 23:00, IMF 为 2 扇瓣结构。

4 结论

本文应用 ACE 飞船 IMF 观测数据, 基于 GSE 坐标系统, 确定 L1 点行星际磁场主体方位, 进而将行星际磁场观测数据转换为极性符号序列, 对于序列任一时间点, 通过改变以它为中心的子序列, 应用重现性指数指标探测 IMF 重现周期及其重现结构, 然后应用模板匹配方法识别重现结构, 最后应用分段函数拟合方法获得了 1999—2008 年间分段表示的 IMF 准 27d 重现周期和结构。结果表现出如下特征: (1) 1999—2008 年间, IMF 重现周期绝大多数在 (27 ± 2) d 范围内; (2) 2001 年 1 月 8 日 12:00—2004 年 7 月 17 日 04:00, IMF 为 2 扇瓣结构, 2004 年 7 月 17 日 05:00—2007 年 6 月 30 日 23:00, IMF 为 4 扇瓣结构, 2007 年 7 月 1 日 00:00—2008 年 12 月 31 日 23:00, IMF 为 2 扇瓣结构。

参考文献 (References)

- [1] Interplanetary Magnetic Field (IMF) [R/OL]. 2012-02-02. <http://pluto.space.swri.edu/IMAGE/glossary/IMF.html>.
- [2] 刘振兴, 等. 太空物理学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
Liu Zhenxing, et al. Space physics[M]. Harbin: Harbin Industrial University Press, 2005.
- [3] McFadden L A, Weissman P R, Johnson T V. 太阳系百科全书 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
McFadden L A, Weissman P R, Johnson T V. Encyclopedia of the solar system[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [4] Takalo J, Mursula K. Annual and solar rotation periodicities in IMF components: Evidence for phase/frequency modulation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 119-124.
- [5] Svalgaard L, Wilcox J M. Long-term evolution of solar sector structure[J]. *Solar Physics*, 1975, 41(2): 461-475.
- [6] Christian E R, Davis A J. Advanced Composition Explorer (ACE) mission overview[R/OL]. 2012-01-27. http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html.
- [7] ACE MAG level 2 data [EB/OL]. 2012-01-27, http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lv2DATA_MAG.html.
- [8] 孙即祥, 姚伟, 滕书华. 模式识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
Sun Jixiang, Yao Wei, Teng Shuhua. Pattern recognition [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.

(责任编辑 朱宇)

· 学术动态 ·

“第六届国际计算机及计算机技术在农业中的应用研讨会”征文

“第六届国际计算机及计算机技术在农业中的应用研讨会”将于 2012 年 10 月 19—21 日在湖南省张家界市召开。会议由国际信息处理联合会先进农业信息处理专业委员会, 中国农业大学主办。

征文范围: (1) 决策支持系统、专家系统及人工智能; (2) 3S 和精细农业; (3) 机器视觉; (4) 计算机图形学和虚拟现实; (5) 计算机仿真、优化和建模; (6) 智能传感、监测和自动控制技术; (7) 农产品质量安全、检测与溯源技术; (8) 农产品电子商务技术; (9) 物联网关键技术及模型; (10) 云计算及农业应用。

全文截稿日期: 2012 年 6 月 30 日。

联系电话: 010-62737994。

电子信箱: ccta2011@163.com。

会议网站: <http://www.iccta.cn>。