

河南地区 Pi2 地磁脉动观测结果分析^{*}

范国华¹⁾ 王宣文^{1,2)} 姚同起¹⁾ 韩克礼¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国科学院空间中心日球物理数值开放实验室

摘要 1996 年 9 月我们在河南信阳—汤阴布设了由 6 个测点组成的测线, 对 Pi2 地磁脉动进行了同时观测, 并对该南北测线上 Pi2 地磁脉动出现的同时性进行了探讨。分析结果指出, Pi2 地磁脉动首先出现在测线最南端的信阳测点, 越往北同一变化出现的时间越晚。该区域地表的南北向似传播速度约为 140 km/s。基于 Pi2 地磁脉动随时间变化的不稳定性, 以及基子波的可延伸性与局部化特性, 我们选择合适的基子波形式, 利用子波变换分析了 Pi2 脉动所含主要的周期变化成分的周期和振幅随时间的变化, 指出其周期和振幅都随时间有复杂的变化形式。

关键词 Pi2 地磁脉动 互相关函数 子波分析

引言

磁层等离子体内存在有各种波动, 波动的频率范围为 $10^{-3} \sim 10^6$ Hz。磁层等离子体除了电磁波(哨声波、磁流波——阿尔文波)外, 还有静电波(等离子体波——电子声波、离子声波)的波动模式。其中作为磁流波现象的重要波动就是地磁脉动。1954 年 Dungey 认为, 这种脉动可能是由磁层内传播的磁流波所引起的。根据 Obayashi 和 Jacobs(1958)以及其他人的了解, 脉动周期的纬度分布可以作为沿着磁力线的阿尔文驻波来理解(大林辰藏, 1984)。

我国地处中低纬区, Pi2, Pc3 等地磁脉动丰富, 开展对它们的观测研究, 有着得天独厚的优势。1996 年 10 月 22 日~11 月 2 日, 在河南地区布设了一条地磁短周期变化测线。自南向北测点分别为信阳、驻马店、许昌、郑州、辉县和汤阴(图 1)。该测线基本上分布在东经 114°附近, 自南向北测点间的南北向直线距离分别为 87, 123, 83, 83 和 53 km, 测线南北向延伸约 429 km(从北纬约 32°~36°)。在测线上进行了三分量地磁短周期变化的同步观测。所用仪器为 GM-1 型磁通门磁力仪。该仪器噪声水平为 0.05 nT, 数值记录器时间服务的守时精度为每天误差 0.02 s。本研究所用的观测资料取自各测点自 10 月 22~24 日的每秒一次采样的数字记录^①。基本上利用了该时间段内所有具有较大幅度、且在各测点

* 国家重大基金项目资助(49990453), 中国地震局地球物理研究所论著 00AC1008。

1999-05-20 收到初稿, 1999-08-13 收到修改稿, 1999-09-13 决定采用。

① 由于驻马店测点的 H 记录有很强的环境人为电磁噪声, 分析时未用该点的记录。

上均有良好记录的 Pi2 地磁脉动或脉动串, 共 9 个时间段。其主要视周期范围为 40~60 s。本研究包含两方面的内容: 其一, Pi2 脉动在该南北向测线各测点上的时间分布特点, 它们是同时发生的, 还是存在某种似传播特性; 其二, 在一个测点上 Pi2 地磁脉动随时间变化的复杂性。

国内外学者对 Pi2 地磁脉动进行了大量的各类有关的统计分析和理论研究, 对 Pi2 的各种特性和机理均有不少认识, 但是还存在不少需要进一步工作的地方, 例如 Sun 和 Kan(1985)提出, 是否在西向浪涌(极光)之后, 在宽的纬度范围内同时开始 Pi2? 本研究可以给该问题提供一个观测事实, 其分析结果可对进一步认识 Pi2 提供一些有益的信息。

1 Pi2 在河南测线上的非同时性

图 2 给出了几个 Pi2 地磁脉动 H 分量在各测点上的记录。各测点仪器根据电台报时信号手动对时, 对时误差约为 0.1 s, 记录器时间服务守时精度为 0.02 s/d。在我们记录的 3 天时间内, 各测点记录的同步时间误差小于 0.2 s。由图 2 可以看出, Pi2 的同一变化(波峰、波谷)在各测点间不是同时的, 从南到北逐渐延迟而形成一倾斜的轴线。为了尽可能客观地得到各测点之间 Pi2 脉动波形的延迟关系, 我们计算了各测点之间的互相关函数 $r_{xy}(\tau)$ 。

$$r_{ij}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_i^{(t)} - \bar{x}_i^{(t)}) (x_j^{(t+\tau)} - \bar{x}_j^{(t+\tau)})$$

$$(\tau = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots)$$

由于用于分析的 Pi2 中 H 分量普遍地具有较大的变化幅度, 利用 H 分量进行探讨应该能得到较好的效果。本研究中, $x_i(t)$, $x_j(t)$ 相应于第 i 和 j 个测点的 H 分量变化, 寻找 $r_{xy}(\tau)$ 中相应的最大值的 τ 。 τ 应反映两变化序列同一变化间的延迟。在实际的计算中, 我们将一 Pi2 地磁脉动又分成几个幅度较大的简单形态变化, 例如波峰、波谷形态, 分别求不同测点同一简单变化形态的互相关函数, 从中得到它们之间的延迟。这样, 从 9 个 Pi2 脉动或脉动串中, 获得了 26 组测点间同一变化的相应延迟值, 其结果列于表 1。

我们假定在研究区内 Pi2 在地表的似传播速度(不是真正的 Pi2 传播途径中的传播速度)是一常数, 即距离和到时之间存在线性关系, 则可以用图解方法求得这种似传播速度(见图 3)。从图 3 可见, 在 100 km 处相对应的 τ 为 0.7 s, 故似传播速度约为 140 km/s。利用 $s=a+vt$ 的线性回归公式, 所求得的似传播速度为 105 km/s。我们较倾向于图解结果, 因为在图解中表示了用公式求回归系数所不能表示的合理因素。例如, 在测点本身 Pi2 不可能延迟, 即直线必须通过原点。而用公式

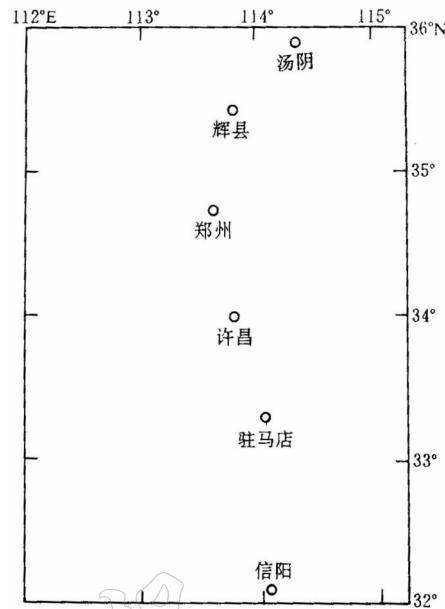


图 1 河南测线各测点的位置

表 1 从所计算的互相关函数中得到的延迟时间

测点对	2-1	3-1	4-1	5-1
延迟值/s	0.6±0.6	1.8±0.9	3.2±0.7	3.4±1.2

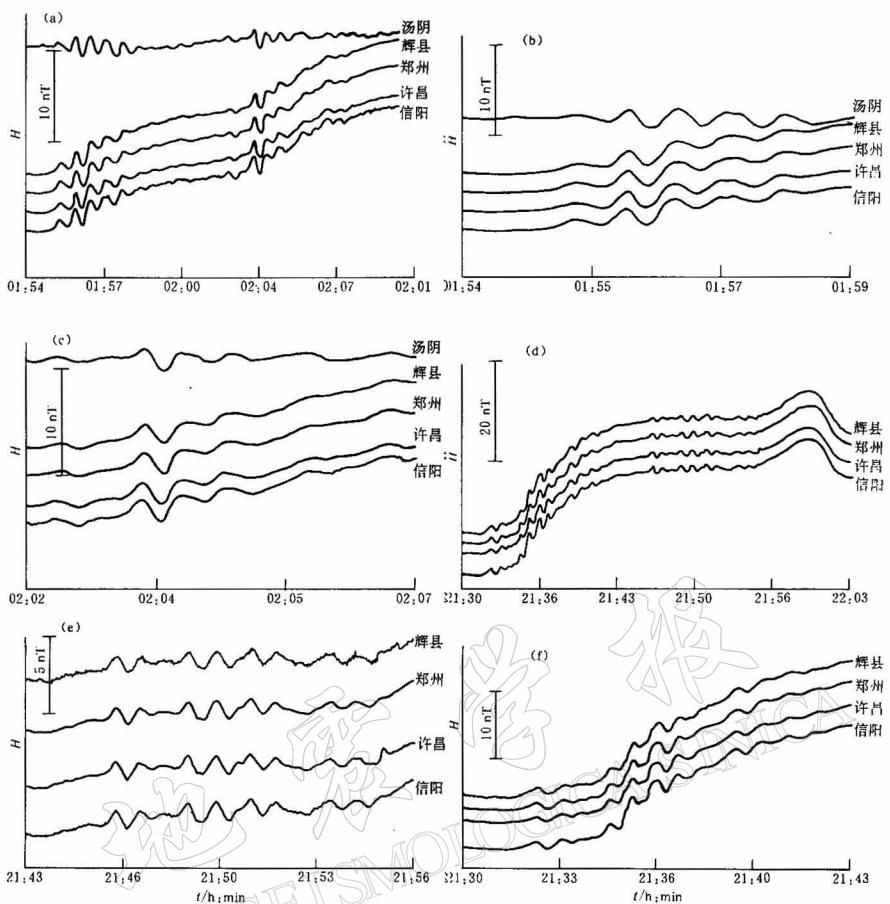


图 2 (a) 为河南测线各测点记录的 Pi2 地磁脉动 H 分量曲线(10月22日21 h 30 min~22 h 04 min);
 (b)、(c) 分别为(a)中前后两部分的放大图; (d) 为河南测线各测点记录的 Pi2 地磁脉动 H 分量曲线(10月23日1 h 54 min~2 h 10 min); (e)、(f) 分别为(d)中前后两部分的放大图

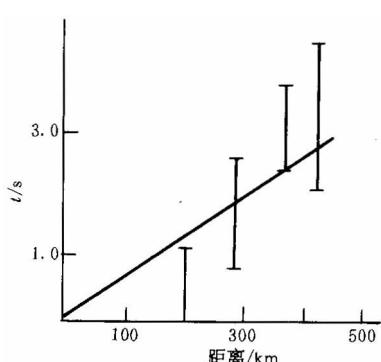


图 3 图解方法求 Pi2 的似传播速度

求回归直线时, 为保证最小回归方差, 其直线并不通过原点, 在物理上这是不合理的。通过上面的分析可得如下结论: 在我们所研究的区域内, Pi2 地磁脉动不是同时发生的。Pi2 的同一波形首先出现在南北向测线的最南端测点信阳, 越往北其出现的时间越晚。在地表存在一似传播过程, 其传播速度约为 140 km/s。Sun 和 Kan(1985)探讨了 Pi2 地磁脉动的瞬态响应理论, 该文最后提到他们的模型过于简单, 不能涉及在 Pi2 地磁脉动中的几个重要问题: 其一是, 在西向行波之后, 是否在一宽的纬度区域内 Pi2 是同时开始的? 尽管我们的观测时间较短, 但在沿同一经度具有多测点的良好质量的 Pi2 脉动观测记录, 记录和分析

结果具有相当的可信度.

2 Pi2 脉动随时间变化分析

Pi2 地磁脉动属于地磁脉动中不规则的一类, 周期多为 40~150 s. 基于这种脉动随时间变化的无规则性, 利用子波变换的延拓性和局部化特性, 我们分析了所记录的 Pi2 脉动所含的周期变化成分随时间的变化. 在子波变换中, 我们选择的基子波函数属于变性高斯函数的类型 (Nose' *et al.*, 1998; Guillemain *et al.*, 1992; Arfib, Boyer, 1992; Gram-Hansen, Dorize, 1992; David, Chapron, 1992), 具有如下形式:

$$\Psi_{a,b}(t) = \alpha^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

其中, $\Psi(t)$ 为

$$\Psi(t) = k^{1/2} \pi^{-1/4} e^{-(kt)^2/2} e^{i\omega t}$$

随时间变化序列 $s(t)$ 的子波变换 $C_{a,b}$ 为

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{a,b}^*(t) s(t) dt$$

* 表示复数共轭.

下面我们随意给出了 3 个 Pi2 脉动的分析结果, 这 3 个郑州台的 Pi2 分别开始在约 23 日 01 点 55 分 10 秒、23 日 02 点 03 分 30 秒和 22 日 21 点 48 分 30 秒(图 2). 表 3 分别给出了以 Pi2 起始时间为 0 的每隔 20 s 的主要周期成分. 子波分析给出了在局部时间的变化形

表 3 3 个 Pi2 主要周期成分随时间的变化

时间/s	事件 1		事件 2		事件 3	
	幅度/nT	周期/s	幅度/nT	周期/s	幅度/nT	周期/s
0	0.38	45	0.32	65	0.25	55
20	0.58	40	0.54	35	0.40	55
40	0.82	35	0.84	30	0.51	60
60	0.94	40	0.68	35	0.56	60
80	0.78	40	0.42	35	0.56	60
100	0.58	40	0.36	40	0.51	60
120	0.48	45	0.34	55	0.47	65
140	0.44	45	0.36	60	0.45	70
160	0.35	40			0.41	65
180	0.23	40			0.38	55
200	0.14	40			0.32	55
220	0.11	35			0.23	65
240	0.10	30			0.23	90
260	0.08	40				
280	0.07	90				
300	0.08	95				

态分解为从中间点向两侧衰减的类正(余)弦变化成分. 从分析结果可以看出, 在 Pi2 脉动的时间变化过程中, 所包含的主要周期成分及其幅度随时间都是在不断变化的. 仔细对照比较具体的 Pi2 脉动随时间变化的形态(图 2b, e)和相应的子波分析结果, 可以看出, 子波分析结果相当正确地反映了 Pi2 脉动中所包含的周期变化成分随时间变化的复杂过程. 至

于其主要周期随时间变化是否存在某种规律性,由于我们观测时间较短,所记录的 Pi2 脉动不多,还不能进行这种探讨。我们还分别绘制了各 Pi2 脉动的磁变化水平分量的矢端轨迹。从矢端轨迹看来,其绘出的近似椭圆形态轨迹的长轴方向、大小及扁率也都随时间有一复杂的变化过程。

3 讨论与结论

鉴于我们的观测周期很短,以及以前已有大量各种有关 Pi2 脉动的统计工作,本文仅就河南地区 Pi2 脉动在南北向测线上出现的同时性以及 Pi2 脉动随时间变化的特性进行了初步探讨。在我们观测期间出现的 Pi2 都发生在地方时的半夜象限内,与以前主要发生在夜间的统计结论一致(孙炜, 1981)。虽然我们的观测期短,记录的 Pi2 脉动不多,但是却有利于作 Pi2 脉动的同时性讨论所需的各测点高精度时间服务的条件。在相当空间距离范围内,沿经度分布的多测点观测,增加了同时性讨论的可信度。在同时性讨论中,利用不同测点变化间互相关函数中最大值相应的延迟来得到不同测点间同一变化发生的时间差,是多个观测值的统计结果。基于以上各点,我们分析所得的 Pi2 脉动,首先出现在测线最南端的台站,其出现的时间向北逐渐延迟,在地面的似传播速度约为 140 km/s,应当有相当大的可信度。在 Pi2 脉动过程随时间变化性质的讨论中,基于 Pi2 脉动过程随时间的不稳定性,利用了适用于讨论不同时间局部特性的子波变换方法。基于子波分析的这种特征,它确实给出了不同时间局部 Pi2 脉动的特性。这里我们给出了不同时间局部变化所包含的主要似正(余)弦变换(一种向两侧逐渐衰减的正(余)弦形变化)的周期及振幅。其周期及振幅随时间有较复杂的变化过程。由于资料不多,只能给出其不稳定特性,而不能讨论其不稳定性是否存在某种规律性。以后我们会加强对是否存在规律性的探讨。这种不稳定特性的探讨,以及不同区域南北向、东西向地面似传播速度的探讨,对进一步了解 Pi2 脉动,认识其产生机理和传播过程是有益的。本文只是一种初步的探讨。

参 考 文 献

- 大林辰藏. 1984. 日地空间物理. 北京: 北京师范大学出版社, 491~510
- 孙炜. 1981. 北京地区 Pi2 型地磁脉动的初步分析. 地球物理学报, **24**(2): 136~143
- Arfib D, Boyer F. 1992. Resynthesis and transformation of sounds: wavelets versus short-time Fourier transforms. In: Meyer Y ed. *Wavelets and Applications*. New York: Masson, 70~76
- David P M, Chapron B. 1992. Underwater acoustic, wavelets and oceanography. In: Meyer Y ed. *Wavelets and Applications*. New York: Masson, 114~119
- Guillemain P, Kronland-Martinet R, Martens B. 1992. Estimation of spectral lines with the help of the wavelet transform, applications in NMR spectroscopy. In: Meyer Y ed. *Wavelets and Applications*. New York: Masson, 38~60
- Gram-Hansen K, Dorize C. 1992. On the choice of parameters for time-frequency analysis. In: Meyer Y ed. *Wavelets and Applications*. New York: Masson, 86~92
- Nose' M, Iyemon T, Takeda M, et al. 1998. Automated detection of Pi2 pulsations using wavelet analysis: 1. Method and an application for substorm monitoring. EPS, **50**(9): 773~784
- Obayashi T, Jacobs J A. 1958. Geomagnetic pulsations and the Earth's outer atmosphere. *Geophys J*, **1**: 53
- Sun W, Kan J R. 1985. A transient-response theory of Pi2 pulsations. *J Geophys Res*, **90**(A5): 4 395~4 397