第 21 卷 第 2 期 天 文 学 进 展 Vol.21, No.2
2003 年 6 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Jun., 2003

伴随米波 III 型爆发的快速脉动现象的观测分析

马 媛 谢瑞祥 郑向明
(中国科学院国家天文台云南天文台 昆明 650011)

摘 要

统计分析了太阳 22 周峰年期间云南天文台声光频谱仪在 230~300 MHz 频率范围，记录到的 III 型爆发和毫秒级快速脉动共存事件。发现有两种不同的脉动现象：(1) 普通型脉动；(2) 包迹型脉动。并在此基础上对 III 型 – 脉动共存事件与之对应的光学活动及相关事件，脉动的形态、周期、带宽等观测特征作了分析和讨论。

关 键 词 射电天文学 — 快速脉动 — 统计 — III 型爆发

分 类 号 P162.11

1 引 言

太阳射电爆发中的毫秒级快速脉动 III 型爆发共生现象，是近年来太阳射电物理研究的一个新颖课题。这种伴随着太阳耀斑发生的震荡现象不仅直接反映了活动源区各种物理参量，而且还反映了非热粒子束流在源区与辐射电磁波的相互耦合作用时的周期调制，对弄清射电活动区的物理背景，进一步探讨快速辐射事件的物理机制，都有十分重要的意义。

早在 20 世纪 60 年代，人们就发现在米波和分米波太阳射电爆发中存在准周期脉动现象 [1,2]。20 世纪 80 年代以来，从米波到微波的射电脉动现象均已被观测到 [3~13]。脉动现象首先在分米波范围内被发现，其周期一般在 0.5~50 s 之间。继而 2~5 min 的长周期脉动现象被观测到，随着射电望远镜时间分辨率的提高，具有更短周期的尖峰辐射和准周期脉动现象也陆续被发现。Aschwanden 和 Benz (1986) [14] 分析了 100~1000 MHz 频率范围记录到的Ⅲ型爆发和脉动现象，并对分米波脉动与硬 X 射线的关系作了研究；Aschwanden 等人还统计了苏黎世 (1980/1981) 报道的所有分米波脉冲事件，发现其中 35% 是脉动现象 [14]。Slottje (1981) [14] 研究了 IV 型爆发的精细结构，发现其中 41% 由脉动现象构成；ElgarΦy (1986) [7] 报道了在米波、分米波Ⅳ型爆发中另一种精细结构 —— 快速脉冲链，其在 300 MHz 上的周期范围是 0.01~0.04 s，在 500 MHz 上的周期范围是 0.03~0.21 s。至今，已有多种脉动模型：MHD 震荡、加速过程的调制和等离子体不稳定的周期的自组系统等，但对太阳射电快速脉动还没有很成熟的理论解释。国内外一些学者对脉动现象的研究，主要集中在周期为 0.5~50 s 的脉动现象的分析，而对毫秒级的快速脉动现象以及与它们共生的 III 型爆发的分析则不多见。

国家 973 项目 (G20000784) 资助课题
2002-02-04 收到 2003-01-22 收到修定稿

我们对云南天文台声光频谱仪在 22 周峰年期间，观测到的 III 型爆发和毫秒级快速脉动 (< 100 ms) 共存事件作了统计分析，得到 230~300 MHz 频率范围内的脉动事件的一些基本特征，并对其产生机制作了定性讨论。

2　观测结果

云南天文台声光频谱仪工作频率为 230~300 MHz，时间分辨率为 10 ms，频率分辨率为 0.5 MHz，天线直径 10 m。它在 22 周峰年期间 (1990 年 7 月 ~1992 年 1 月) 观测到 195 群 III 型爆发，其中只有 25 群伴随毫秒级快速脉动事件。在这些事件中，III 型爆发发生在低频段 (约 230~270 MHz)，脉动发生在高频段 (约 270~300 MHz)。伴随 III 型爆发的脉动有两类，一类是普通型脉动 (在平衡位置上上下起伏)，另一类是包迹型脉动 (快速脉动叠加在一个缓变的包迹上)。两个典型事件如下：

(1) 1991 年 5 月 7 日事件

1991 年 5 月 7 日我们在 00:49:00 UT 记录到一组 III 型爆发与毫秒级脉动共存事件 (见图 1)。从图 1 可以看出：III 型爆发约在 230~266 MHz 频率范围内发生，并有正、负频率漂移率。在低频端 (230~251 MHz) 为负漂移，漂移率为 -69 MHz/s；在 252~266 MHz 为正漂移，漂移率为 83 MHz/s。按照 Tarnstrom 和 Phlip 的分类，其漂移率为中等 [15]。毫秒级的快速脉动发生在 266~300 MHz 频段上，其脉动周期在 20~53 ms 之间，为包迹型快速脉动。此事件有 M2.3 级软 X 射线事件与之对应。太阳地球物理资料 (S.G.D) 发表的射电资料中，在米波段也记录到了 III 爆发。

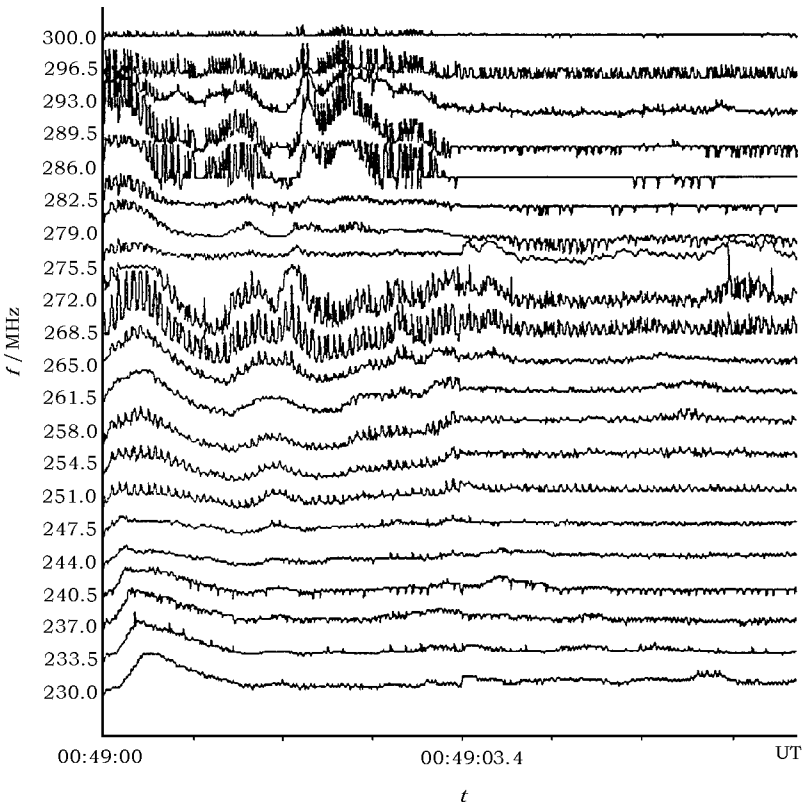

图 1　1991 年 5 月 7 日发生在 230~300 MHz 频率的脉动事件

(2) 1990 年 8 月 31 日脉动事件

1990 年 8 月 31 日 02:40:32 UT 我们在 290~300 MHz 记录到了一组普通型脉动事件 (见图 2) 。从图 2 可以看出: 事件初期是简单的 Spike 现象, 之后是毫秒级脉动, 脉动周期在 20~50 ms 范围内。仅从时间轮廓图上看, Spike 现象与快速脉动现象不容易区分开来, 我们将高于平衡位置之上的单个或成群的尖峰叫做 Spike 现象, 而在平衡位置上下波动且周期较为明显的叫做脉动现象。此事件发生在 6233 活动区 SN 级耀斑的下降相上, 与 S.G.D 发表的米波事件也有对应。

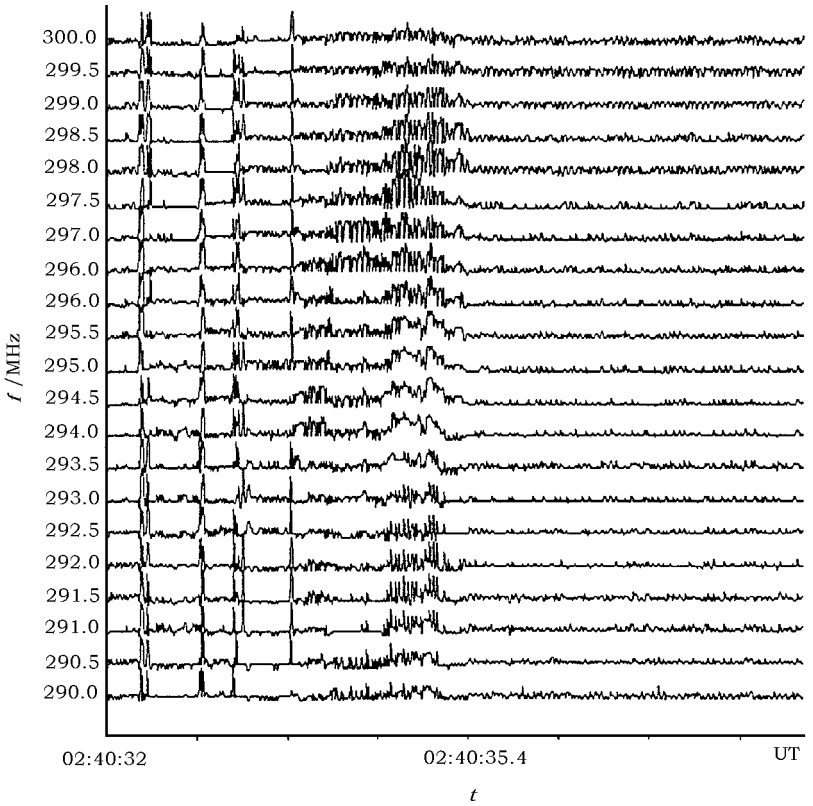

图 2 1990 年 8 月 31 日发生在 290~300 MHz 频率的脉动事件

3 初步统计

3.1 III 型 – 脉动共存事件与光学活动的关系

我们分析的 25 个 III 型 – 脉动共存事件中, 有 19 个事件发生在 Hα 耀斑爆发期间, 占爆发总数的 76% , 其中 68% 与亚耀斑 (SF 、SN) 对应, 只有 6 个 1 级以上的耀斑。有 8 个事件发生在耀斑的初始和上升相期间, 说明它们与磁重联初始能量释放有关; 有 10 个事件发生在耀斑脉冲的下降或结束时刻, 说明耀斑脉冲相后仍然存在着能量释放和粒子加速过程。与软 X 射线关系不密切的事件, 仅为 44% 。与 S.G.D 发表的米波事件对应的事件有 18 个, 占 72% 。这可能与仪器性能有关: 云南天文台频谱仪虽然频带窄, 但是时间分辨率高, 容易发现爆发中的时间精细结构。

3.2 脉动特征

(1) 频率漂移

在上述 25 个事件中，有 13 个事件存在频率漂移，正、负漂移率都在 38~390 MHz/s 之间，平均为 108 MHz/s (见图 3) 。从图 3 可看出：发生在 51~100 MHz/s 之间的脉动事件最多，其次是 101~150 MHz/s 之间。米波 III 型爆发的平均漂移率是 111 MHz/s 。此外，云南天文台声光频谱仪在 22 周峰年期间观测到了 170 个没有脉动事件伴随的 III 型爆发的频率漂移率，其中可测漂移率的事件有 121 个。它们的频率漂移率在 30~506 MHz/s 之间，平均 120 MHz/s 。发生在 51~100 MHz/s 频段内的 III 型爆发最多，其次是 101~150 MHz/s 。另外，我们还对 20 个不伴随 III 型爆发的毫秒级快速脉动事件作了分析，其中有 11 个事件存在频率漂移率，它们的漂移率在 35~230 MHz/s 之间，平均为 118 MHz/s 。伴随 III 型爆发的毫秒级快速脉动事件的漂移率是在 38~390 MHz/s 之间，平均为 108 MHz/s ，与前者只差 10 MHz 。

图 3　快速脉动事件的频率漂移率分布

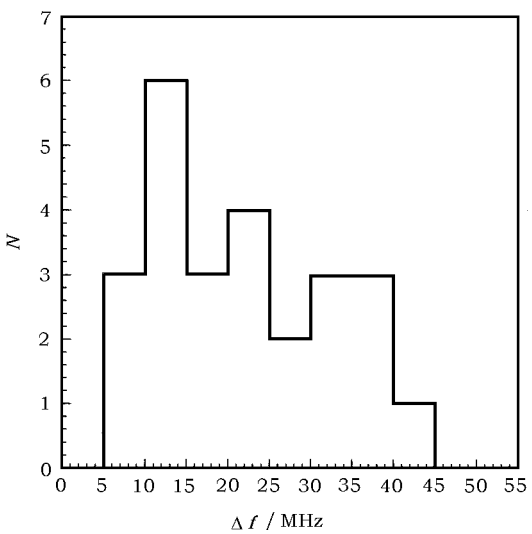

图 4　快速脉动事件的带宽分布

(2) 带宽

我们测得 230~300 MHz 上的脉动带宽在 8~45 MHz 之间 (见图 4) 。从图 4 可看出: 快速脉动事件发生在 11~15 MHz 之间的最多, 其次是 21~25 MHz 。

(3) 寿命

包迹型和普通型脉动事件的寿命没有明显的差别, 都在 172~2530 ms 之间。图 5 给出了它们的寿命分布。

(4) 周期

两类脉动事件的周期都在 20~55 ms 之间, 均属于快速脉动现象。 ElgarΦy (1985) [6] 在 300~500 MHz 频率上观测到最小脉动周期为 50 ms 。我们的结果与文 [6] 的结果较为接近。

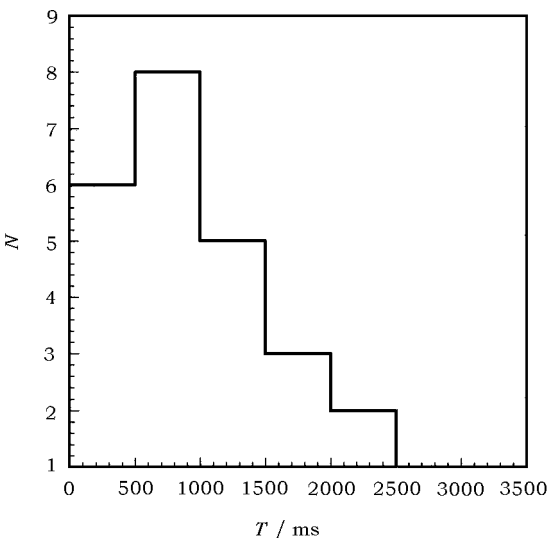

图 5 快速脉动事件的总持续时间分布

4 分析和讨论

从以上统计可以看出: 发生在 230~300 MHz 频率范围的 III 型 – 脉动共存事件的一个显著特性是含有极短周期的射电脉动现象, 这从图 1 的时间轮廓可清楚地看出, 它们的周期在 20~55 ms 之间。如果这样短的脉动周期是由于磁流管的磁声振荡和磁陷中快速粒子束反射两种机制引起的, 则有关系式: $P \approx 4a/V_{\rm A}$ 和 $L \approx PV$ [7] 。由上式可推导出流量管半径和磁陷长度。可以发现, 对于米波射电辐射的日冕高度, 这些推导出的值不合理的小, 所以应考虑另外的机制。

此外, 由于共生的 III 型爆发平均漂移率是 111 MHz/s , 毫秒级脉动的平均漂移率是 108 MHz/s , 与 III 型爆发的值很接近, 如果两者在频谱上有连续性, 则可考虑它们可能是由同一个辐射机制引起的。以前一些作者曾试图对 III 型爆发和脉动现象用同一个电子束模型来解释 [14] , 这是因为这两种辐射都具有相同的频率漂移的连续时间分布, 以致它们均可用同一个电子束驱动。我们也有这样的事例 (见文 [16]) , 然而本文很多事例 (如图 1) 从频谱特征上看显然不存在相同频率漂移的时间连续性, 因此应属于不同的加速电子群在不同环境条件下引起的, 它们的辐射机制也应不同。我们认为本文所举的两个典型事件中的米波 III 型爆发是归因于等离子体辐射机制, 即在等离子体中传播的电子束激励了等离子体中波 (如 Langmuir 波) , 继而转换成靠近等离子体频率 ($\omega_{\rm pe}$ 或 $2\omega_{\rm pe}$) 的横电磁波, 由于同时存在向上和向下传播的电子束, 便产生了具有正和负频率漂移的 III 型爆发 [17] 。典型事件中的甚快速周期脉动可能要归因于非线性等离子体辐射机制 [18,19] , 因为太阳射电精细结构非线性处理研究的结果已经清楚地表明, 电磁波最快生长模式的类型强烈依赖于所选择的电子分布函数 [20] , 所以有效观测条件所限制的电子分布函数的选择十分重要。假设快速脉动起源于具有一个强磁场 ($\omega_{\rm Be} \geq \omega_{\rm pe}$, $\omega_{\rm Be}$ 是电子回旋频率) 的等离子体结构中, 那么有加速电子沿一个磁环向下沉降, 驱动了静电高混杂波, 而且高混杂波的频率 $\omega_{\rm UH}$ 接近电子回旋频率 $\omega_{\rm Be}$, 当它们在电子束的反方向上传播时被缓慢地放大, 经过波 – 波非线性相互作用, 两个高混杂波在频率 $2\omega_{\rm UH} \approx 2\omega_{\rm Be}$ 上互相耦合产生射电辐射 [18,19] 。该模型的数值计算也已表明, 在射电辐射时间序列中包含了不规则的类 Spike 现象和约 30 ms 周期的振荡。另外, 在非线性等离子体效应的另一个极限情况下, 如在具有 $\omega_{\rm pe} > \omega_{\rm Be}$ 的磁活动等离子体环境中, 则有文 [17] 指出, 如果源区被充分扩展时, 可以简化波的方程式为一个特定的类型系统 [21] , 该系统可描述波能量密度曲线的非线性周期振荡 [17] , 如果波的吸收由热的电子与离子碰撞所决定, 则振荡周期独立于快速电子参数, 因此可能是很稳定的。对典型的冕拱条件, 振荡周期能在 10 ms 至几秒内变化。特别指出, 非线性等离子体机制 (在二次谐波频率 $\approx 2\omega_{\rm pe}$ 上的辐射占优势的特定条件下) 能产生射电超精细时间结构的毫秒级脉动。本文的观测事例支持了以上所假设的

模型。

本文图 1 中作为背景辐射的包迹可能也是由非线性等离子体辐射机制所致，我们认为当存在一个加速粒子的恒定源时，快速电子注入磁陷 (冕环) 的过程能够多重地、不规则地重复进行，以致造成包迹复现的结果 [17] 。

参 考 文 献

1 Thomrpson A R, Maxwell A. ApJ, 1962, 136: 546
2 Young C W, Spencer C L, Moreton G E *et al.* ApJ, 1961, 133: 243
3 Aschwanden M J. Sol. Phys., 1987, 111: 113
4 Aschwanden M J, Benz A O, Kane S R. A&A, 1990, 229: 206
5 Correia E, Kaufmann P. Sol. Phys., 1987, 111: 143
6 ElgarΦy Φ. Astron. Tidsskr., 1985, 2: 71
7 ElgarΦy Φ. Sol. Phys., 1986, 104: 43
8 Elgaroy O, Engvik L, Osnes E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76: 1994
9 Isliker H, Benz A O. A&A, 1994, 104: 145
10 Jürgen K, Marian K. Sol. Phys., 1989, 119: 399
11 Markus J, Aschwanden M J, Arnold O *et al.* ApJ, 1993, 416: 857
12 Slottje C. Nature, 1978, 275: 520
13 Wiehl H J, Benz A O, Aschwanden M J. Sol. Phys., 1985, 95: 167
14 Aschwanden M J, Benz A O. A&A, 1986, 158: 102
15 Tarnstrom G L, Phlip K W. A&A, 1972, 17: 267
16 马媛，谢瑞祥，郑向明等. 天文学报， 2000, 41: 270
17 Fleishman G D, Mel'nikov V F. Phys.-Usp., 1998, 41(12): 1157
18 Vahos L, Sharma R R, Papadopoulos K. ApJ, 1983, 275: 374
19 Fleishman G D, Stepanov A V, Yurovsky Yu F. Sol. Phys., 1994, 153: 403
20 Fleishman G D, Yastregov S G. Sol. Phys., 1994, 153: 389
21 Dory R A, Guest G E, Harris E G. Phys. Rev. Lett., 1965, 14: 131

Observations and Analysis of Solar Radio Narrow-Band Fast Pulsation Phenomena Associated With Metric Type III Burst

Ma Yuan　Xie Ruixiang　Zheng Xiangming

(*National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

Abstract

The type III burst-ms fast pulsation events, corresponding optical activities and correlative events observed with the acousto-optic spectrograph at the Yunnan observatory during the 22nd solar cycle are statistically analyzed in this paper. We found two kinds of pulsation phenomena. Some basic characteristics of the pulsation events such as shape, period, frequency band in the 230∼300 MHz range and relative solar active phenomena are obtained, and the production mechanism is qualitatively discussed.

Key words　radio astronomy—fast pulsation—statistics—type III burst