第 47 卷 第 1 期 天 文 学 报 Vol.47 No.1
2006 年 1 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jan., 2006

微波 III 型爆发的观测特征*

马 媛 [1,2] 谢瑞祥 [1,2] 郑向明 [1,2] 颜毅华 [2]

(1 中国科学院国家天文台 / 云南天文台 昆明 650011)
(2 中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要 统计分析了国家天文台 2.6—3.8 GHz 高时间分辨率射电动态频谱仪在 23 周峰年期间 (1998.4—2003.1) 观测到的 266 个 III 型爆发. 对这些事件的频率漂移、持续时间、偏振、带宽、开始和结束频率做了详细分析. 开始和结束频率的统计分析表明, 开始频率在一个非常大的范围, 从小于 2.6 GHz 到大于 3.8 GHz, 而结束频率的截止区相对集中, 从 2.82—3.76 GHz. 这些现象说明, 电子加速的高度相当分散, 在观测频率范围内具有正、负漂移率的 III 型爆发数基本相等, 这可能意味着被加速的向上和向下传播的电子束在 2.6—3.8 GHz 范围有相同的比例. 统计结果表明, 微波 III 型爆发的辐射机制主要是等离子体辐射和电子回旋脉泽辐射过程.

关键词 太阳: 射电辐射, 太阳: 活动性, 微波Ⅲ型爆发
中图分类号: P 111; **文献标识码**: A

1 引言

射电 III 型爆发是最早被认识的太阳射电辐射现象之一. 迄今为止, 对太阳射电米波段 III 型爆发的观测和研究已比较深入, 很多作者做过分析 [1−7]. 近年来随着高灵敏度、高时间、高频谱分辨率射电望远镜投入观测, 在分米波和微波段也发现存在漂移精细结构, 它们与毫秒尖峰明显地不同. 而米波 III 型爆发与微波 III 型爆发的观测特征是: 频率漂移、时间尺度、带宽和偏振方面具有相似性. 文 [8] 在 3100—5205 MHz 频率上观测到漂移微波精细结构; 文 [9] 介绍了 1—3 GHz 的窄带微波 III 型爆发的研究结果; 文 [10] 对 1.6 GHz 频率观测到的 44 群中等强度的分米波 III-RS 爆发作了统计研究. 由于 III 型爆发在太阳耀斑中起着十分重要的作用, 因此, 在不同频率上对 III 型爆发进行观测和研究是非常重要的. 以往主要是对米波和分米波段 III 型爆发的研究, 对微波 III 型爆发的统计研究则不多, 只有几个研究者做过报道 [9,11−16]. 此外, 目前对微波 III 型爆发的产生机制也还不很清楚.

我们统计了国家天文台动态频谱仪在太阳第 23 周峰年期间 (1998 年 4 月—2003 年 1 月) 利用 2.6—3.8 GHz 频段记录到的 266 个 III 型爆发, 对它们的一些参数作了分析, 得到一些有意义的结果.

2004-11-25 收到原稿, 2005-04-05 收到修改稿
* 国家重点基金 (10333030), 国家自然科学基金 (10473020), “973”(G2000078403) 和科学院 “西部之光 ” 项目资助

2　仪器和观测

国家天文台动态频谱仪工作频率为 2.6—3.8 GHz , 时间分辨率为 0.2 s 和 8 ms, 频率分辨率为 10 MHz; 可测左、右旋圆偏振分量的偏振度.

在太阳第 23 周峰年期间 (1998 年 4 月 —2003 年 1 月), 国家天文台观测记录到许多微波爆发，我们从中挑选出 266 个微波 III 型爆发，对这些 III 型爆发的频率漂移、半功率持续时间、偏振和光学活动作了统计分析. 所用的 Hα 耀斑资料取自太阳地球物理资料 (SGD) 和中国太阳地球物理资料 (CSGD).

3　资料比较和分析

3.1　III 型爆发的分布

利用动态频谱仪 2.6—3.8 GHz 记录到的 266 个 III 型爆发，其中在 238 个不同的 Hα 耀斑中发生. 这些 III 型爆发的开始和结束频率有很大的变化，包括正、负漂移率，但是，在 266 个爆发中有 189 个的开始和结束频率均在这个频段内 (正、负漂移率的爆发分别为 103 个和 86 个), 只有 77 个爆发的开始和结束频率在这个频段以外 (正、负漂移率的爆发分别为 41 个和 36 个).

从这些观测结果，我们发现 266 个 III 型爆发中开始频率的分布有非常大的离散. 这说明 III 型爆发主要是由冕环俘获电子向上或向下传播和沉降电子形成损失锥分布造成的 [16].

3.2　III 型爆发与太阳耀斑的关系

在分析的 266 个 III 型爆发中，有 238 个 III 型爆发发生在 Hα 耀斑爆发期间， 185 个发生在 Hα 耀斑的上升相 (开始到极大时刻), 53 个发生在 Hα 耀斑的衰减相 (极大到结束时刻). 有 106 个爆发发生在 2 级以上的耀斑中， 92 个对应 1 级耀斑， 40 个发生在亚耀斑中. 有 172 事件对应软 X 射线事件，这说明 III 型射电爆发与对应的 Hα 耀斑的级别相关并不密切.

3.3　频率漂移

由于电子束在太阳耀斑中起着十分重要的作用，而 III 型爆发的频率漂移率体现了电子束的运动方向和速度. 对此，我们计算了微波 III 型爆发的频率漂移. 在我们分析的 266 个 III 型爆发中，有 254 个可测到频率漂移. 正漂移 (由低频到高频) 的 III 型爆发有 133 个，占总爆发的 52%; 漂移率在 238—10833 MHz/s 之间，平均为 2420 MHz/s. 负漂移 (由高频到低频) 的 III 型爆发有 121 个，占总爆发的 48%; 负漂移在 235—14074 MHz/s 之间，平均为 2830 MHz/s; 负漂移率大于正漂移率. 取绝对值的平均漂移率为 2615 MHz/s. 此外，我们还对米波段 (230—300 MHz) 的 122 个 III 型爆发的频率漂移率作了统计，结果平均漂移率为 377 MHz/s.

文 [17] 在 1—4.2 GHz 范围内, 观测到的 III 型爆发中负漂移率占优势, 少数为正漂移

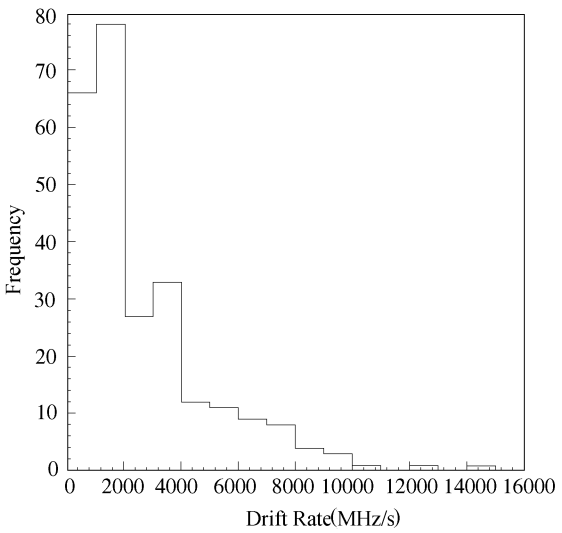

图 1 频率漂移率的直方图

Fig. 1 Histogram of frequency drift rate

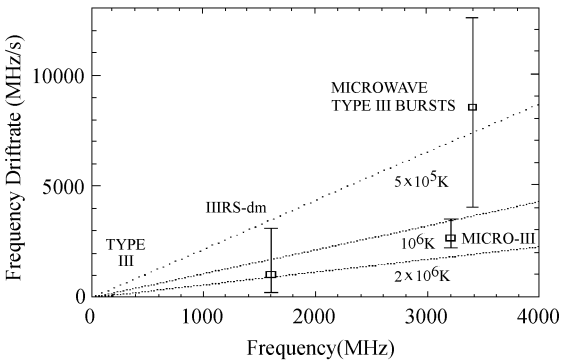

图 2 平均漂移率相对于频率的变化， 4 个点分别对应微波 III 型爆发、米波 III 型爆发 (Stähli and Benz, 1987) 、微波 III 型 -RS 爆发 (Hanumant 等， 1994) 和微波 III 型爆发 (MICRO-III). 这几条线是在等离子体辐射且垂直电子束速度为 $10^{10}\,\mathrm{cm\,s^{-1}}$ 的假设下不同等温大气的预测函数.

Fig. 2 Average drift rates versus frequencies. Four points correspond to microwave type III bursts, metric type III bursts (Stähli and Benz, 1987), microwave type III- RS bursts (Hanumant et al., 1994) and microwave type III bursts (MICRO-III). The lines are the predicted function for an isothermal atmosphere at different temperatures under the assumption of plasma emission and a vertical beam velocity of $10^{10}\,\mathrm{cm\,s^{-1}}$ (Stähli and Benz, 1987)

率, 正和负漂移率都在 1—4 GHz /s 之间. 文 [8] 在 3100—5205 MHz 频率范围测得的漂移率变化是 1700—17000 MHz/s, 平均漂移率是 8100 ± 4300 MHz/s. 文 [10] 在 1.6 GHz 频率上, 报道了 44 群中等强度的分米波 III-RS 型爆发的漂移率, 变化在 ∼ 400 和 3000 MHz/s 之间. 文 [9] 在 1—3 GHz 范围内观测到 III 型爆发正漂移率占优势, 其漂移率约为 1 GHz/s; 就漂移方向而言，我们的结果与文 [17] 的结果较为接近. 就漂移率来说，我们统计的漂移率比文 [8] 的小，漂移率的范围比文 [16] 的大. 这可能与观测频率差别有关. 从以上的统计结果可以看出： III 型爆发的漂移率是随着频率的增高而变大. 图 1 是频率漂移率的直方图，图 2 是漂移率曲线与文 [8] 和文 [10] 的漂移率作比较.

从图 1 可看出：漂移率在 1000—2000 MHz/s 范围内发生的最多，在 10000 MHz/s 以上的仅有 4 个.

3.4 半功率持续时间

时间尺度是微波 III 型爆发中的一个重要参数, 它能反映出源区的大小, 但到目前为止, 对 III 型爆发的寿命没有统一的描述, 有的 III 型爆发的寿命很长, 有的则很短. 我们计算了在 2.6—3.8 GHz 记录到的 266 个 III 型爆发的半功率持续时间在 100—1620 ms 之间, 平均是 613 ms. 文 [18] 统计了 100—3000 MHz 频段的半功率持续时间在 100—600 ms 之间; 文 [8] 得到 3100—5205 MHz 之间的寿命是 25—200 ms; 文 [10] 在 1.6 GHz 频率上测得 44 群中等强度的分米波 III-RS 爆发的半功率持续时间是 280—1500 ms, 平均是 ∼700 ms. 我们在米波段测得 III 型爆发的平均半功率持续时间为 477 ms. 其结果与文 [18] 的较为接近. 半功率持续时间的分布见图 3.

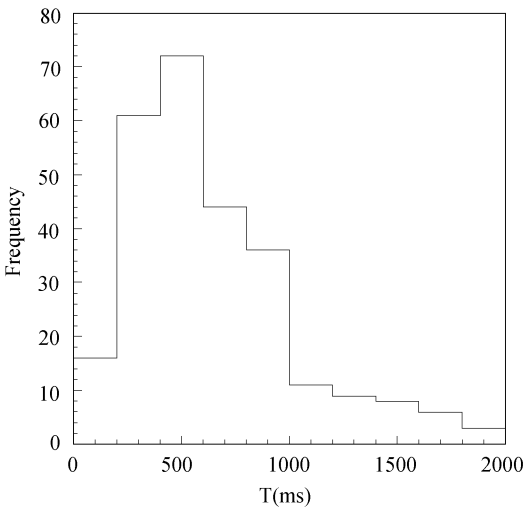

图 3　半功率持续时间的分布图

Fig. 3　Histogram of half-power duration

3.5 偏振

偏振特性是另一个非常重要的参数，它与辐射机制密切相关，能直接反映源区的等

离子体参数和磁场的变化情况. 通常微波 III 型爆发为部分圆偏振 [19−21]. 典型的偏振度范围从 0%—50%. 因为微波爆发发射起源于中等相对论性电子回旋加速辐射. 在我们分析的 266 个微波 III 型爆发中, 可测到偏振的有 255 个, 其中偏振度小于 5% 的有 34 个, 由于仪器分辨率的原因故舍去, 则可测偏振的爆发有 221 个. 偏振度在 6%—90% 之间, 平均为 35%. 其中右旋偏振有 135 个, 占 61%, 左旋偏振有 86 个, 占 39%. 我们在 1—2 GHz 测得的平均偏振度为 24%. 而文 [21] 在米波段测得的平均偏振度是 11%, 从以上统计的结果可看出; III 型爆发的偏振度随着频率的增高而变大. 图 4 为偏振度的分布图.

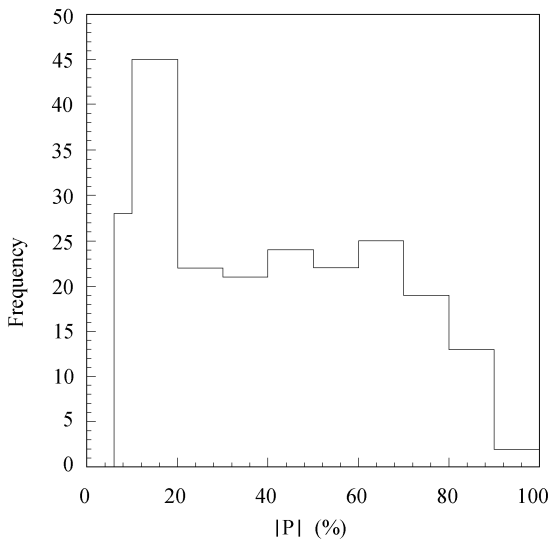

图 4 偏振度的分布图

Fig. 4 Histogram of polarization degree

3.6 频率宽度

在 2.6—3.8 GHz 频段内的带宽是 100—1200 MHz, 平均带宽为 518 MHz. 按照文 [9] 在 1—3 GHz 对 III 型爆发的分类. 窄带 III 型爆发 ($\Delta f \leq 100$ MHz) 有 9 个, 占总爆发的 3%; 中带 III 型爆发 (100 MHz$< \Delta f <$ 500 MHz) 有 143 个, 占总爆发数的 54%; 宽带 III 型爆发 ($\Delta f \geq 500$ MHz) 有 114 个, 占总爆发数的 43%. 本文的统计与他们的宽带结果比较接近.

4 结果

通过以上分析可看出: 在太阳 23 周峰年期间, 我们在 2.6—3.8 GHz 频段观测到的 266 个微波 III 型爆发, 其结果与有关文献在不同波段观测统计比较, 存在以下特征:

(1) 有 189 个 III 型爆发出现在 2.6—3.8 GHz 频段, 其中 86 个是负漂移率 III 型爆

发， 103 个为正漂移率 III 型爆发. 另外有 77 个爆发（41 个负漂移率， 36 个正漂移率) 的开始频率已超出我们的仪器范围，但是，结束频率则在 2.8—3.76 GHz 频段范围内.

正漂移率 III 型爆发的开始频率在 2.75—3.76 GHz 之间，结束频率在 2.62—3.32 GHz 之间；负漂移率 III 型爆发的开始频率在 2.62 到 3.54 GHz 频率范围，结束频率在 2.82—3.76 GHz 频率范围.

(2) 大多数 III 型爆发 (185 个) 发生在耀斑脉冲相上，只有 53 个爆发发生在衰减相上. 在 266 个爆发中有 9 个窄带（$\Delta f \leq 100$ MHz）爆发， 114 个宽带 III 型爆发（$\Delta f \geq 500$ MHz).

(3) 半功率持续时间在 100—1620 ms 之间，平均是 613 ms. 长寿命的 III 型爆发比短寿命的少.

(4) 61%III 型爆发为右旋圆偏振，偏振度在 6%—90% 之间，平均为 35%.

5　讨论

(1) 由于我们的观测在短分米波段，所以具有正漂移率的Ⅲ型爆发可能会进入等离子体辐射的高频截止区，因为色球层蒸发波前使分米波范围中等离子体密度的梯度变陡和温度增加，从而导致等离子体辐射的不透明度 (自由 - 自由吸收) 强烈地减小，当蒸发波前在耀斑环中上升时，可能遇到向下传播的电子束，如漂移很快的分米波 III-RS 型射电爆发，但是当电子束已经穿过蒸发波前区域之后，等离子体辐射的不透明度又增大了，由于等离子体的高密度和高密度介质中的长途径，等离子体辐射将被完全吸收，称为高频截止 [12]. 在本文中有 144 群反向 III 型爆发的截止频率在 2.82—3.76 GHz 频率范围. 这说明等离子体辐射的高频截止区已经超过由文 [12] 给出的 1.1—3.0 GHz 的范围.

(2) 有 189 个 III 型爆发开始于 2.62—3.76 GHz 频率范围， 41 个事件的开始频率低于 2.6 GHz, 36 个大于 3.8 GHz. 这说明电子加速的位置非常的分散，加速区高达厘米波段，这已经大大超过 400—1000 MHz 的范围 [21].

(3) 本文的统计结果与我们对 23 周太阳活动上升期间 1—2 GHz 的统计结果相似，只是在 2.6—3.8 GHz 频率范围内的漂移率和偏振度更高，这可能与不同的观测频段有关.

(4) III 型爆发包括不同的辐射过程，对于分米波正和负漂移率的 III 型爆发最可能的辐射机制应是等离子体辐射 (基波或谐波) 和电子回旋脉泽辐射 [8,22−23]. 一般而言，主要有二种激励源产生 III 型爆发：电子束驱动和损失锥驱动的 III 型爆发. 因为传播的电子束不但可以激励米波，还可以激励分米波和微波段上的 Langmuir 波 [15], 通过等离子体辐射 (基波或谐波) 产生射电 III 型爆发；另一类一般是具有正漂移率的 III 型爆发，它们是由冕环捕获的沉降电子损失锥分布通过电子回旋脉泽辐射产生.

此外，主要有两类 III 型爆发的磁位形：开放的和封闭的磁结构，如果发射 III 型爆发的非热电子是沿着开放磁场线传播，则呈现负漂移率和宽带的特征；如果是沿着封闭环传播，则可呈现正的或负的漂移率和窄带特征 [24].

致谢　作者特别感谢傅其骏老师和邵承文同学的帮助和支持.

参 考 文 献

1 Alvarez H, Haddock F T. Solar Phys, 1973, 29: 197
2 Alvarez H, Haddock F T. Solar Phys, 1973, 30: 175
3 Benz A O, Furst E, Hirth W, et al. Nature, 1981, 291: 21
4 Benz A O, Zlobec P, Jaeggi M. A&A, 1982, 109: 305
5 黄光力，王德育，毛定一. 天体物理学报， 1995, 15(1): 75
6 Xie Rui-xiang, Wang Min, Yan yi-hua, et al. ChA&A, 26(3): 308
7 Xie Rui-xiang, Wang Min, Yan yi-hua, et al. AcASn, 2002, 43(2): 145 (谢瑞祥，汪敏，颜毅华，等. 天文学报 2002, 43(2): 145)
8 Stähli M, Benz A O. A&A, 1987, 175: 271
9 Isliker H, Benz A O. A&AS, 1994, 104: 145
10 Hanumant S, Sawant H S, Francisco C R, et al. ApJ, 1994, 90: 689
11 Aschwanden M J, Benz A O, Dennis B R, et al. ApJ, 1995, 455: 347
12 Aschwanden M J, Benz A O. ApJ, 1995, 438: 997
13 Benz A O, Bernold T E X, Dennis B R. ApJ, 1983, 271: 355
14 Aschwanden M J, Benz A O. ApJ, 1995, 438: 997
15 Fu Q J, Qin Z H, Liu Y Y, et al. ApSS 1997 250: 189
16 Aschwanden M J. Apace Science Reviews, 2002, 101: 1
17 Jiricka K, Karlicky M, Kepka O, et al. Solar phys, 1993, 147: 203
18 Melendez J L, Sawant H S, Fernandes F C R, et al. Solar Phys, 1999, 187: 77
19 Akabane K. Ann Tokyo Astron Obs 2nd ser, 1958, 6: 57
20 Sawant H S, Costa J E R, Trevisan R H, et al. Solar Phys, 1987, 111: 189
21 Benz A O, Zlobec P. A&A 1978, 63: 137
22 Wang D Y. ChA&A, 2004, 28(4): 404
23 Wang D Y. AcASn, 2004, 45(2): 168 (王德育 . 天文学报， 2004, 45(2): 168)
24 Kundu M R. Proc Of an international Meeting held Guadeloupe. DOM, France: Solar Jets and Coronal Plumes, (ESA SP-421, May 1998) 1998, 179-190

Observational Characteristics of Microwave Type III Bursts

MA Yuan[1,2] XIE Rui-xiang[1,2] ZHENG Xiang-ming[1,2] YAN Yi-hua[2]

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

(2 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

Abstract Type III bursts 266 in total observed with the 2.6—3.8 GHz high temporal resolution dynamic spectrometer of NAOC during the 23 rd solar cycle (from April 1998 to January 2003) are statistically analyzed. The frequency drift rates (normal and reverse slop), durations, polarizations, bandwidth, starting and ending frequencies are analyzed in detail. From the statistical results of starting and ending frequencies it is shown that the range of starting frequencies is very large from less than 2.6 GHz to greater than 3.8 GHz; but the ending frequency range is relatively narrow from 2.82 GHz to 3.76 GHz. These phenomena

mean that the sites of electrons acceleration are quite scattered, while the cutoff regions of the radio type III bursts are in the limiting domain. The burst number with positive and negative drift rates are nearly equal. This correlation may suggest the same proportion of electron beams in the directions of upward and downward, accelerated in the range of 2.6—3.8 GHz. The emission mechanisms of microwave type III bursts are mainly caused by the plasma radiation and electron gyro-maser radiation. Usually, there are two excitements to produce type III bursts: electron beam-drive and loss cone-drive type III bursts. Their magnetic configurations mainly contain two types: opening or closed magnetic structures.

Key words sun: radio radiation, sun: activity, microwave type III burst