

文章编号: 1000-8349(2005)04-0331-15

太阳射电微波爆发及其精细结构研究进展

李舒浩^{1,2}, 王蜀娟², 钟晓春¹

(1. 西南交通大学 理学院物理系, 成都 610031; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 太阳射电微波爆发携带着爆发源区的物理环境及辐射机制等诸多重要信息。其辐射频段较高, 通常来自低日冕磁重联区, 尤其是微波爆发的精细结构, 持续时间短、变化快、结构复杂, 可以反映重联过程复杂的磁场结构、高能粒子运动等许多特征。综述了太阳微波射电爆发分类研究的 3 个主要阶段, 介绍了每一阶段的重要爆发类型、物理机制研究及相应的观测设备, 讨论了进一步研究的方向。

关键词: 天体物理学; 微波爆发; 综述; 太阳耀斑; 辐射机制

中图分类号: P182.2⁺4 **文献标识码:** A

1 引 言

作为与太阳耀斑等强烈太阳活动密切相关的射电辐射剧烈增强现象, 太阳射电爆发一直是人们密切关注和深入研究的对象。1950 年, Wild 和 McCready^[1] 首次将频谱分析仪引入到太阳射电观测中, 在太阳射电爆发研究领域获得了突破性的进展, 他们发现在米波段存在着多种不同类型的射电爆发, 从而拉开了对太阳射电爆发频谱分类研究的序幕^[2]。另一方面, 随着观测技术和仪器设备的日臻完善、观测资料的日益丰富, 对太阳射电爆发物理机制的研究也逐渐深入。

20 世纪 60 年代以后, 人们从较高时间分辨率的太阳射电观测中, 发现原来用较低时间分辨率观测到的太阳微波爆发中存在着各种不同时标的精细结构^[3]。1961 年 Tanaka^[4] 在 1~3 GHz 频段的单频观测中就发现了一些尖锐的高偏振爆发(1965 年 Kundu^[5] 对此作了评述)。1977~1978 年, Dröge^[6] 在 1.4 GHz、Slottje^[7] 在 2.65 GHz 又观测到了一些持续时间为几十毫秒的尖峰辐射, 引起了人们的广泛关注。随着观测技术的不断进步, Güdel 和 Benz^[8] (1988)、Allart 等人^[9] (1990)、Bruggmann 等人^[10] (1990) 又分别在 0.3~1、4~8、6~8.5 GHz 的连续频段上对射电微波爆发进行了观测和研究, 报道了一些典型的爆发类型。1990 年

收稿日期: 2005-02-07; 修回日期: 2005-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10333030、10225313); 国家 973 资助项目(G2000078403)

之后, 频谱仪技术的发展使人们观测到了日益丰富的微波爆发事件, 并开始对其分类进行系统研究。

最初是低分辨率的频谱研究, 典型工作是 1994 年 Isliker 和 Benz^[11] 在 1~3 GHz 频段总结了过去的单频和频谱观测资料, 唯象地进行了较为系统的微波爆发分类。之后, 人们发现了许多爆发精细结构, 开始了伴随精细结构的频谱研究阶段。2001 年, Jiříčka 等人^[12] 在对 1992~2000 年期间 0.8~2.0 GHz 频段观测到的微波爆发进行频谱分析时, 发现了许多新的爆发形态及精细结构, 他们发现由 Isliker 和 Benz 于 1994 年提出的微波爆发分类已经不能用来合理划分他们的观测结果了, 于是他们先补充了微波爆发频谱形态的唯象分类, 然后将观测到的微波爆发与相关太阳活动进行了比较, 发现某些类型可能起源于同一种辐射机制。近年来投入观测的高分辨率频谱仪获得了大量高时间分辨率、高频率分辨率、高灵敏度的微波爆发数据, 人们开始了高分辨率的频谱研究。2004 年, Fu 等人^[13,14] 总结中国国家天文台的太阳宽带射电频谱仪 (SBRs) 近 4 年的观测资料, 发现了一些新的爆发形态和时间更短的精结构, 给出了微波射电爆发及其精细结构的频谱形态一种新的分类, 同时概述了一些典型爆发分类的辐射机制的最新研究成果。

2 低分辨率的频谱研究

这里主要介绍早期在连续频段对微波射电爆发的观测和研究工作, 因为连续频段上的频谱图能更直观地反映出微波爆发的频谱形态及其变化过程, 至于更早期对微波射电爆发的单频观测可以参考文献 [4~7]。

早期对于微波射电爆发及其精细结构的观测, 由于观测仪器时间分辨率和频率分辨率较低, 虽然能观测到多种爆发形态和精细结构, 但不能很好地分辨其细节。1988 年, Güdel 和 Benz^[8] 对 1979~1983 年期间在 0.3~1 GHz 频段的爆发进行了研究。这些爆发数据由瑞士苏黎世的 IKARUS 频谱仪观测得到^[15], 其中大部分数据观测精度的时间分辨率为 0.1 s、频率分辨率为 3 MHz。根据频谱形态, Güdel 和 Benz 将这些爆发事件分成了 4 种主要类型: 类 III 型爆发、脉动、弥漫连续谱和尖峰。至于不同类型间可能的重叠之处, 他们指出这也许能通过提高分辨率 (尤其是时间分辨率) 来改进。1990 年, Allart 等人^[9]、Bruggmann 等人^[10] 又分别对在 4~8、6~8.5 GHz 连续频段上观测到的微波射电爆发进行了研究, 描述了微波 blips、尖峰、漂移结构和斑块等爆发分类特征。

早期对微波爆发的分类研究中, 比较有代表性的是 Isliker 和 Benz^[11] 于 1994 年的研究。他们的数据来自瑞士苏黎世联邦工学院的 Phoenix 频谱仪在 1989~1993 年期间的观测, 这也是人们首次利用高分辨率频谱仪对 1~3 GHz 频段进行的观测^[16]。其中大部分数据的观测精度为: 时间分辨率 40、50 ms 或 100 ms, 单通道带宽 1、3 MHz 或 10 MHz。这与早期 Enome 和 Orwig^[17] 单频观测的结果一致。根据记录的频谱图并基于唯象的观点, Isliker 和 Benz^[11] 对观测到的微波爆发给出了一个在当时较为系统的类型描述。其中比较重要和典型的爆发分类有窄带 III 型爆发、窄带尖峰辐射、弥漫连续谱和脉动。

(1) 窄带 III 型爆发

窄带 III 型爆发被定义为持续时间短、无偏振、带宽为几十 MHz 的爆发。单个窄带 III 型爆

发的典型持续时间小于 0.3 s。这种爆发经常成群出现, 并且很多情况下这个爆发群是由一些中心频率相近的单个爆发构成, 这种结构被称为“链”, 如图 1 所示。

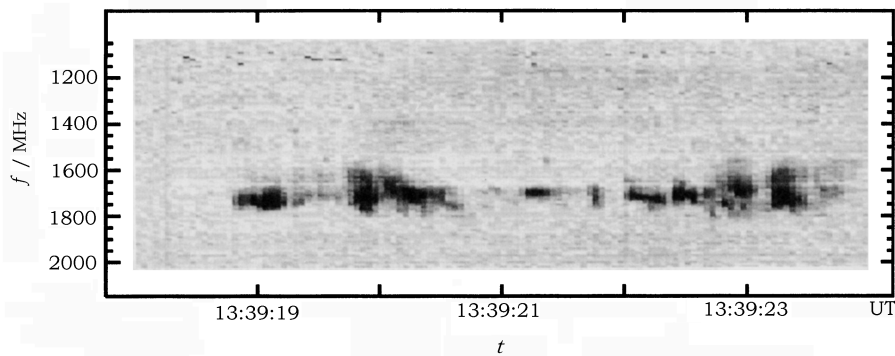


图 1 窄带Ⅲ型爆发链 (1989-11-19) ^[11]

(2) 窄带尖峰辐射

早期单频观测中曾有人用“尖峰辐射”来描述持续时间从几 ms 至几 s 的任一短时间爆发。而在 Isliker 和 Benz 的分类描述中, 只将持续时间为几十 ms 的窄带尖峰称为尖峰辐射^[18]。窄带尖峰辐射是一种经常在微波频段出现的爆发, 它的一些亚群有时显示出频率中的谐波结构。图 2 为一大群窄带尖峰辐射。

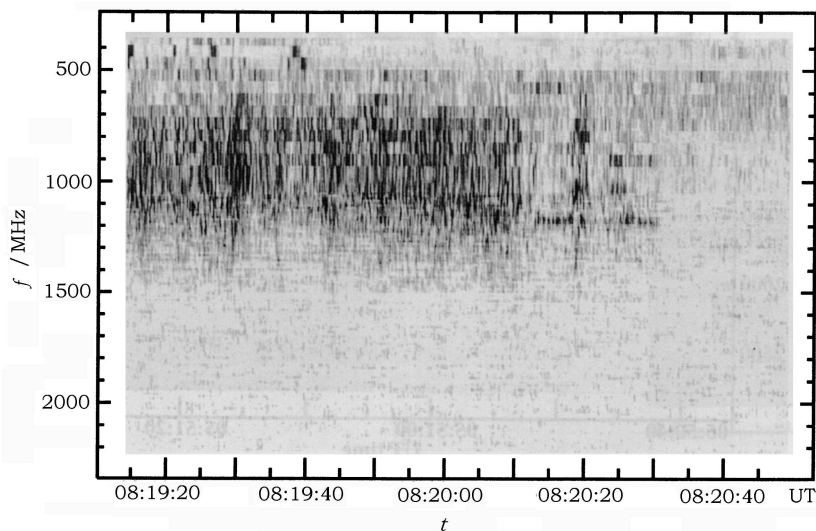


图 2 一大群窄带尖峰辐射 (1990-06-24) ^[11]

(3) 弥漫连续谱

特征持续时间在 1 至几十秒之间的连续谱辐射被称为弥漫连续谱, 它也是一种经常在微波频段出现的爆发, 具有多种形态, 圆偏振通常很弱, 在一些文章中也被称为“斑块”。统计表明, 窄带 (< 0.1 GHz) 和宽带 (> 0.1 GHz) 弥漫连续谱发生的比率大致相同^[11]。一些弥漫连续谱的持续时间很长但带宽很窄, 另一些则持续时间较短但带宽很宽 (图 3 是一个例子)。

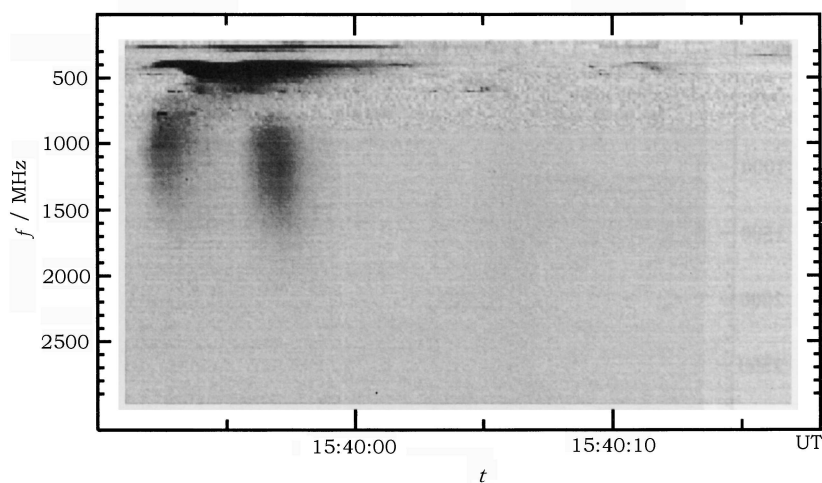


图 3 短时间宽带宽弥漫连续谱 (1992-09-12) ^[11]

(4) 脉动

中心频率相近并且带宽大于 100 MHz 的一系列脉冲被称为脉动。其中单个脉冲的持续时间通常很短。典型情况下, 这些脉冲彼此间隔 0.1~1 s。它们的外形比一群Ⅲ型爆发更整齐, 并且具有较高的频漂率和偏振 (图 4 是一个例子)。

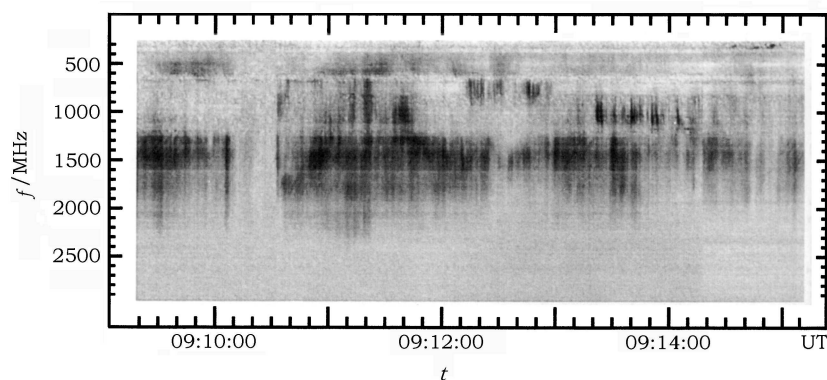


图 4 脉动 (1993-01-07) ^[11]

3 伴随精细结构的频谱研究

20 世纪 90 年代以后, 随着太阳射电观测设备分辨率的进一步提高, 人们在早期微波射电爆发观测的基础上发现了一些更细致的结构, 对于原来已经观测到的一些爆发也获得了更多的细节信息。

1993 年, Jiříčka 等人 ^[19] 对 1992-09-05~1992-09-07 期间在 0.1~4.2 GHz 频段观测到的快漂爆发进行了研究。该期间, 太阳活动突然增加, Jiříčka 等人共观测到 51 个耀斑事件, Ⅲ型

以及类Ⅲ型快漂爆发是这段时期的主要爆发现象。Jiříčka 等人发现, 大多数的快漂爆发为负频率漂移(从高频向低频漂移), 在 $1\sim 4.2$ GHz 频段的频漂率为 $-1\sim -4$ GHz/s; 在 $1\sim 4.2$ GHz 频段的高频范围也有一些正频率漂移(从低频向高频漂移)的爆发, 其频漂率为 $1\sim 4$ GHz/s。

2001 年, Karlický 等人^[20]对 2000-07-10~2000-07-14 期间在 $0.8\sim 7.6$ GHz 频段观测到的微波爆发进行了研究。这次宽频带观测由我国国家天文台的太阳宽带射电频谱仪 SBRs^[14]和捷克的 Ondřejov 射电频谱仪合作完成。Karlický 等人通过爆发频谱图发现了漂移脉动结构、带有斑马纹的漂移谐波结构、窄带尖峰漂移分支等多种爆发形态, 还测定了漂移脉动结构的特征周期以及斑马射电源的磁场, 并概述了这些爆发间的关系。

这一时期对太阳微波射电爆发分类研究比较有代表性的工作, 当属 2001 年 Jiříčka 等人^[12]对 1992~2000 年期间在 $0.8\sim 2.0$ GHz 频段观测到的微波射电爆发及其精细结构的研究。这些爆发是由捷克的 Ondřejov 射电频谱仪观测并记录的, 其时间分辨率和频率分辨率分别为 0.1 s 和 5 MHz, 在 1992-06-01~2000-06-30 期间共观测到 681 个射电事件。长时间的观测积累了丰富的微波爆发数据, 其中包括许多新的爆发类型, 例如漂移脉动结构、花边纹结构以及斑马纹结构的一种亚类型等。

3.1 微波爆发形态

(1) 漂移脉动结构

具有缓慢的整体频率漂移的脉动被称为漂移脉动结构。它是在对脉动研究过程中发现的一类十分典型和重要的爆发形态。1999 年, Kliem 等人^[21]对 1992-10-05 UT 09:25 的漂移脉动结构进行了研究。该结构的频谱图如图 5 所示, 它在 $0.6\sim 2$ GHz 频段上调制了一个向低频缓慢漂移的连续谱。Kliem 等人认为, 这个漂移脉动结构由准周期的粒子加速事件产生, 而这些加速事件又由一个大尺度电流片中的动态磁重联产生。这个磁重联受磁岛的重复形成和合并所控制, 同时新接合的磁岛又导致了一个不断增长的等离子体团。为了支持这一模型, Kliem 等人还给出了一个动态磁重联的二维磁流体动力学 (MHD) 仿真。在这个模型框架下, 射电观测揭示了耀斑中等离子体团形成的细节。

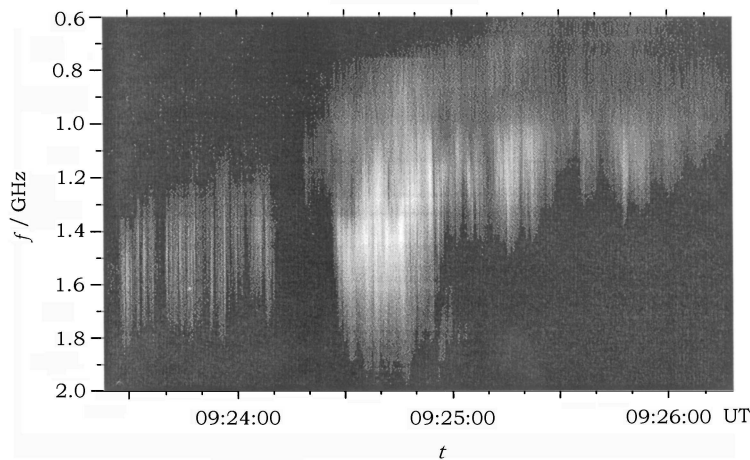


图 5 漂移脉动结构 (1992-10-05)^[21]

Jiříčka 等人^[12]研究发现, 漂移脉动结构通常在耀斑脉冲相的初始阶段被观测到, 其频漂率的最大值和最小值分别为 $+80 \text{ MHz/s}$ 和 -67 MHz/s , 并且大多数 (47%) 为负频率漂移, 少数 (13%) 为正频率漂移, 剩下的频漂率是变化的 (图 6 是一个例子)。

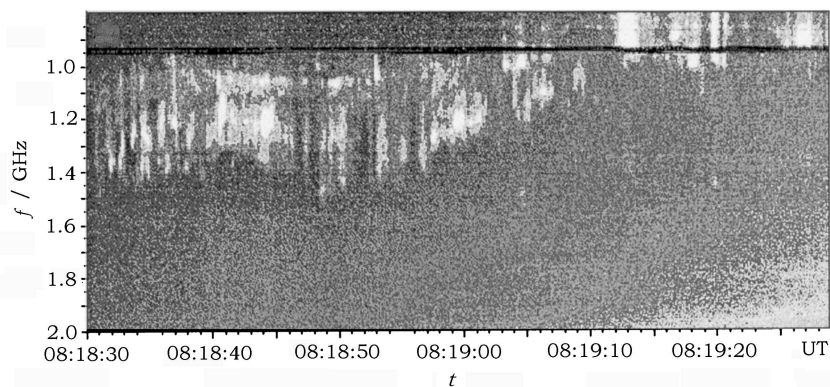


图 6 漂移脉动结构 (1998-08-18)^[12]

(2) 花边纹结构

这种精细结构以前从未观测到过, 它是 Jiříčka 等人^[12]发现的一类新的爆发形态。其特征是频率变化快速, 这些变化既有正的 (频率增大) 也有负的 (频率减小)。根据频谱图上的形态它被命名为“花边纹”, 是一类十分罕见的精细结构, 如图 7 所示。

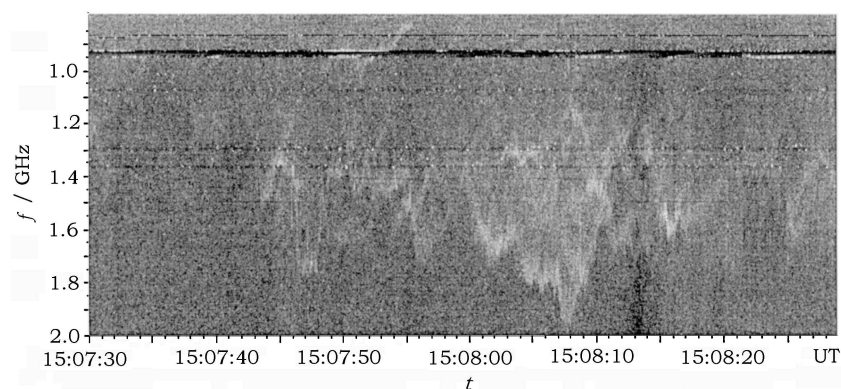
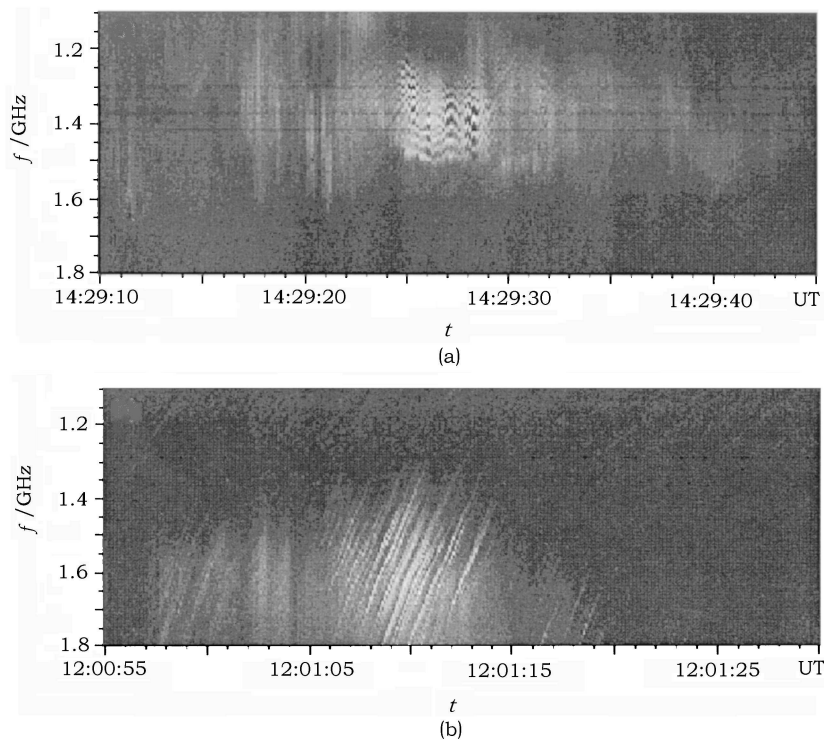


图 7 花边纹结构 (1999-08-17)^[12]

(3) 斑马纹结构

斑马纹结构也叫平行漂移带, 它是一些发射线, 这些发射线彼此间近似规律地保持一定距离。Jiříčka 等人^[12]新发现了一类叠加在纤维上的斑马纹结构。相对于经典斑马纹结构 (如图 8(a)), 这类斑马纹结构出现几率较少, 其特征是发射线的数量很多, 线间频率间隔很小 (如图 8(b))。Jiříčka 等人将其定义为斑马纹结构的一种亚类型, 并发现它们占有所有斑马纹事件的 17%。

图 8 斑马纹结构^[12]

(a) 经典斑马纹结构 (1998-05-02) ; (b) 叠加在纤维上的斑马纹结构 (1998-11-23) 。

3.2 爆发机制

除了对爆发频谱分类研究, Jiříčka 等人^[12] 还将观测到的微波爆发与其他一些太阳活动进行了对照和比较, 在爆发辐射机制和物理过程的理论研究上取得了一定进展:

(1) 通过与 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 数据比较, 发现大多数微波射电爆发对应于 C 级 X 射线耀斑, 其原因是 M 和 X 级耀斑数量的逐渐减少, 以及 B 级耀斑对应的射电辐射强度的减弱 (X 射线耀斑从强到弱分为 X、M、C、B 级);

(2) 通过与 GOES 软 X 射线辐射极大值出现的时间进行对照, 发现大多数微波射电爆发是在软 X 射线耀斑极大值 (耀斑热极大) 之前被观测到的, 这符合以下常识: 频率在 1 GHz 以上的爆发大多对应于软 X 射线耀斑极大值之前的耀斑脉冲相;

(3) 通过与 Potsdam-Tremsdorf 天文台观测到的米波 III 型爆发 (粒子束) 进行类比, 发现孤立宽带脉冲、快漂爆发、窄带 III 型爆发可能来源于相同的辐射机制 —— 高能粒子束产生的辐射。

4 高分辨率的频谱研究

最近几年, 随着观测技术的进一步改进, 分辨率和灵敏度更高的射电频谱仪出现了, 其中比较典型和备受注目的是中国的太阳宽带射电动态频谱仪 (SBRs)^[14]。SBRs 是第一个在微

波频段很宽的频率范围内观测并记录太阳射电爆发的动态频谱仪,其观测频率范围为 0.7~7.6 GHz,由 0.7~1.5、1.1~2.06、2.6~3.8、4.5~7.5、5.2~7.6 GHz 5 个子频谱仪组成,时间分辨率分别为 5、5、8、5、5 ms,频率分辨率分别为 1.37、4、10、10、20 MHz,对于一些特定频段,SBRS 的时间分辨率还能达到 1 ms 左右。表 1 给出了 SBRS 与其他一些典型太阳射电频谱仪观测范围和分辨率的对比。从表 1 可见 SBRS 的观测频段更宽,时间分辨率更高,这对于微波射电爆发观测和研究都十分有益。关于 SBRS 的详细介绍和定标方法参见文献 [14,22~25]。

表 1 工作中的太阳微波射电频谱仪性能比较^[14]

频谱仪	观测频率范围 /MHz	时间分辨率 /ms	灵敏度
Phoenix	100~4000	100	
Ondřejov	800~4500	100	
BSS ¹⁾	200~2500	10~1000	
SBRS	700~7600	1~10	2% $S_{\odot}$ ²⁾

注: 1) BSS 即 BSS-Brazilian Solar Spectroscope; 2) $S_{\odot}$ (表示宁静太阳射电辐射的流量密度。

基于 SBRS 获得的大量高分辨率、高灵敏度的微波爆发数据,人们观测到了许多更复杂的爆发形态,一方面在更细微的结构上对已知的爆发类型进行分析,另一方面不断发现一些新的爆发形态。同时,高分辨率、高灵敏度的观测也极大地促进了对各种爆发辐射机制和物理过程的理论研究。2004 年, Fu 等人^[13]总结了 20 世纪 90 年代末期至 2003 年的分类研究工作,并提出了一种新的微波射电爆发的分类。这里我们通过一些典型的和新的爆发形态来介绍高分辨率频谱研究的最新进展。

4.1 微波爆发形态

(1) 微波Ⅲ型爆发和Ⅲ型爆发对

Ⅲ型爆发是所有太阳射电辐射中研究最集中的形式,最初是在米波中发现的^[26]。Isliker 和 Benz^[11] (1994) 将微波中类似它的结构称为类Ⅲ型爆发。之后的研究发现,微波中的这种快速漂移结构有许多与米波不同的特征, Fu 等人^[13] (2004) 明确将其分类为微波Ⅲ型爆发(如图 9 所示)。它的频率漂移率大多数是正的,而且主要集中在 40 MHz/s 至 22 GHz/s; 在一个给定的频率通道上,它的持续时间从小于 30 ms 至大于 200 ms 不等; 频率范围从几十 MHz 到大于 1 GHz^[27~31]。太阳微波Ⅲ型爆发作为日冕低层高能电子束的标志已经引起了广泛关注。

1997 年, Fu 等人在对 1994-01-05 1~2 GHz 频段观测到的一个微波爆发事件进行分析时,发现了一种具有两个不同频率漂移率分支的微波Ⅲ型爆发,并将其称为微波Ⅲ型爆发对。这个爆发在频谱图上表现出两个频率漂移分支(频漂率分别为 -0.31 GHz/s 和 +0.325 GHz/s),在两个分支间有一个分界频率,并且两个频率漂移分支的开始频率之间还有一个“频率门限”,在这个门限的频率范围内没有Ⅲ型爆发出出现^[32]。1998 年, Huang 等人^[33]指出,一个指数为 4.5 的幂律分布能够很好地拟合这个爆发相应的电子束能谱,这个电子束可能是被一个尺度为 10^7 m、强度为 10^{-4} V/m 的电场加速。2000 年, Ning 等人^[43]研究估计,在该爆发的重联区域中 $\beta \approx 0.01$ (β 表示太阳等离子体的比压,即气体热动压力与磁压力的比值),并推断

电子束离开重联区域后的速度为 1.07×10^3 km/s。要弄清太阳耀斑的物理过程, 最重要的问题是能量释放和加速区域的定位^[34]。找到微波Ⅲ型爆发对的分界频率对解决上述问题有重要意义^[13]。

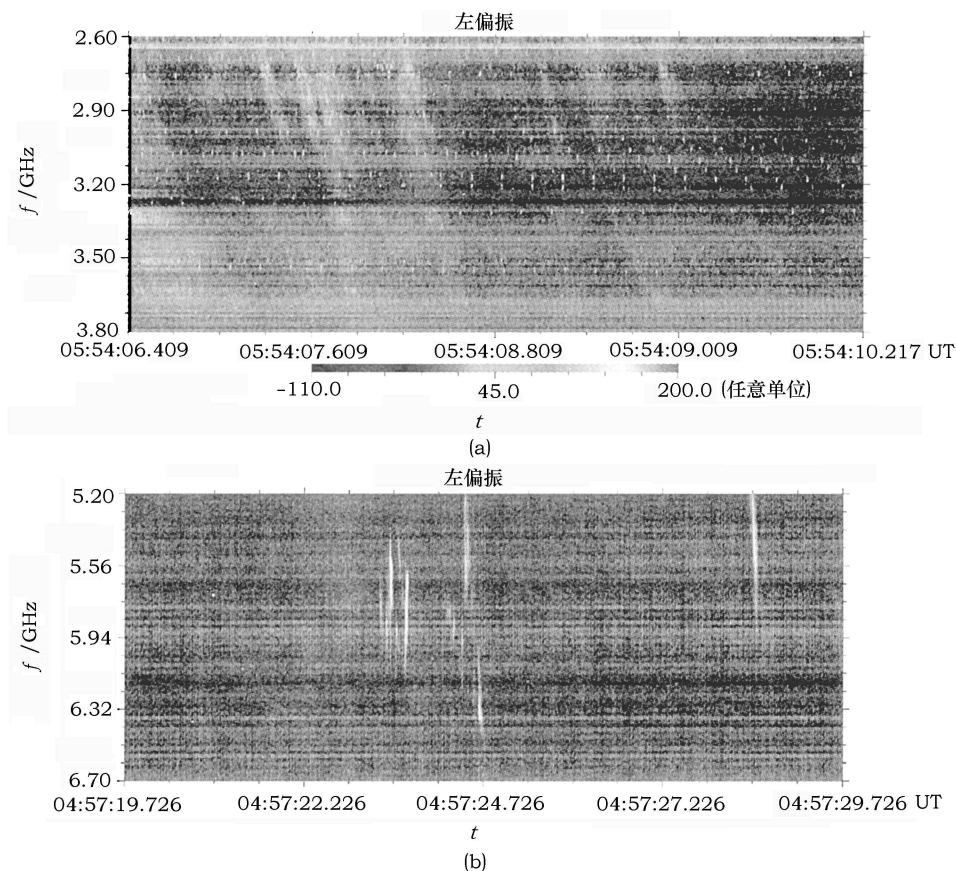


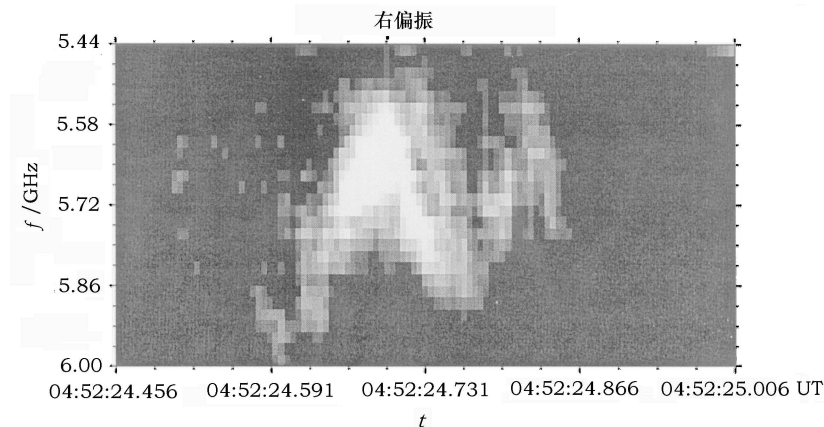
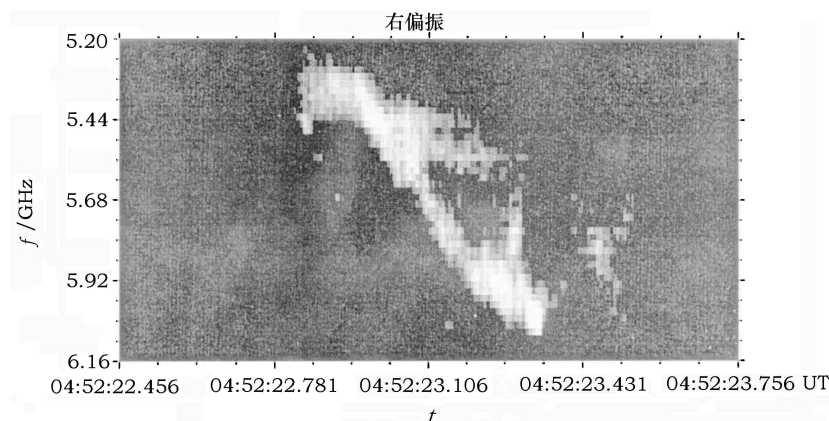
图9 微波Ⅲ型爆发^[13]
(a) 2.6~3.8 GHz 频段; (b) 5.2~7.6 GHz 频段。

(2) 微波 M 型和 N 型爆发

微波 M 型和 N 型爆发是微波Ⅲ型爆发的亚类型, 因频率漂移, 它们的频谱图呈 M 或 N 型, 因而被称为 M 型或 N 型爆发。与普通的微波Ⅲ型爆发相比, 微波 M 型和 N 型爆发要罕见得多。它们的例子分别如图 10、图 11 所示。

2000 年, Ning 等人^[35]报道了 1999-05-03 在 2.6~3.8 GHz 频段观测到的微波 M 型爆发, 并提出了一个模型, 认为此爆发是由沿磁力线运动以及反射的电子束辐射产生的 (这个电子束最初可能形成于一个 IV - DCIM (分米波脉动) 型爆发的等离子体团), 有可能是 N 型爆发后电子束反射作用的又一迹象。

2001 年, Wang 等人^[31]报道了 1999-11-27 在 5.2~7.6 GHz 频段观测到的微波 M 型和 N 型爆发, 认为它们可能是米波或分米波 U (或 N) 型爆发在微波频段的延伸, 在物理本质上归

图 10 M 型爆发 (1999-11-27) ^[31]图 11 N 型爆发 (1999-11-27) ^[31]

因于磁弧足根附近的反射作用以及磁弧顶部附近啸声波湍流导致的散射作用。

(3) 微波毫秒级尖峰辐射和尖峰辐射对

太阳射电尖峰辐射的特征是：持续时间非常短，频率带宽非常窄，高偏振，在频率和时间上无序。Wang ^[36] (2003) 报道了一个处于 5.2~7.6 GHz 的微波尖峰辐射事件，其参量为：尖峰数目 99 个；每个尖峰的持续时间小于 10 ms；中心频率 5.87 GHz；每个尖峰的平均带宽 24.5 MHz，是中心频率的 0.4%。Wang 等人 ^[37] (2002) 还对 1998-04-15 在 2.6~3.8 GHz 内的微波尖峰辐射事件进行了详细的分析。

类似于微波Ⅲ型爆发对，将具有两个不同频率漂移率分支的微波毫秒级尖峰辐射称为微波毫秒级尖峰辐射对。2002 年，Liu 等人 ^[38] 报道了这种尖峰辐射，其频率漂移分支的频率漂移率分别为 -21 GHz/s 和 +56 GHz/s，两个分支的分界频率为 2900 MHz，左旋偏振度随频率呈波浪形变化。与微波Ⅲ型爆发对不同的是，微波毫秒级尖峰辐射对两个分支的开始频率之间不存在“频率门限”。

(4) 漂移脉动结构

最近, Kliem 等人^[21] (2000) 和 Karlický 等人^[20] (2001) 报道了一种缓慢的负漂移脉动结构, 并把它看作是动态磁重联的标志。漂移脉动结构的整体缓慢负漂移形成于整个重联区域的等离子体团向上运动到等离子体密度较低的一个位置。Wang 等人^[39] (2001)、Liu 等人^[40] (2003)、Tan 等人^[41] (2004) 用 SBRs 观测到了许多更具细节的此类结构, 发现其频漂率通常在 -3 MHz/s 和 -60 MHz/s 左右^[39,40]。图 12 显示了其中一组漂移脉动结构的细节。

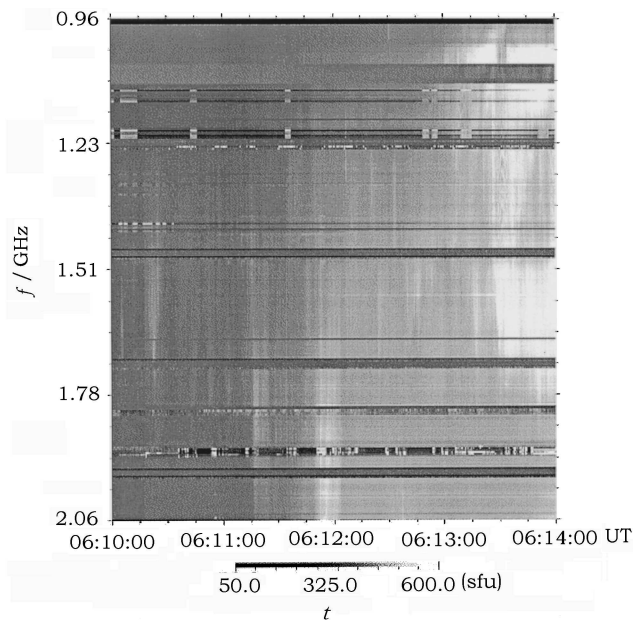


图 12 漂移脉动结构的细节 (2003-10-26)^[41]

(5) 微波斑块

早期研究表明, 斑块 (即弥漫连续谱) 的持续时间为 1 至几十秒, 圆偏振通常很弱, 流量

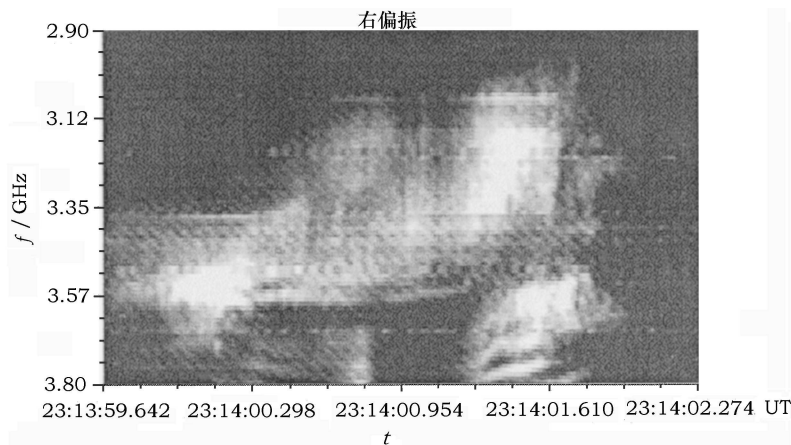


图 13 微波斑块 (1998-06-12)^[42]

密度不高^[11]。而在2001年, Wang等人^[42]对1998-06-12在2.6~3.8 GHz频段观测到的一个微波斑块事件(如图13)进行研究后发现, 这个斑块的持续时间非常短(大约300 ms), 偏振度非常高(100%RCP, RCP即Right Circular Polarization), 流量密度也非常高(1000 sfu, sfu即solar flux unit), 带宽极窄(相对带宽约5%), 谱指数非常高。基于这些观测特征, Wang等人认为微波斑块的辐射机制很可能是等离子体辐射或脉泽辐射, 而不是回旋同步加速辐射。

4.2 微波精细结构的基本单元

由于太阳微波射电频谱仪分辨率和灵敏度的提高, 人们在对微波爆发及其精细结构的分类研究中不断获得一些更细致的信息。随着研究的深入, 最近人们又提出了新的问题——微波精细结构有基本构成单元吗? 如果存在, 那么它是什么?

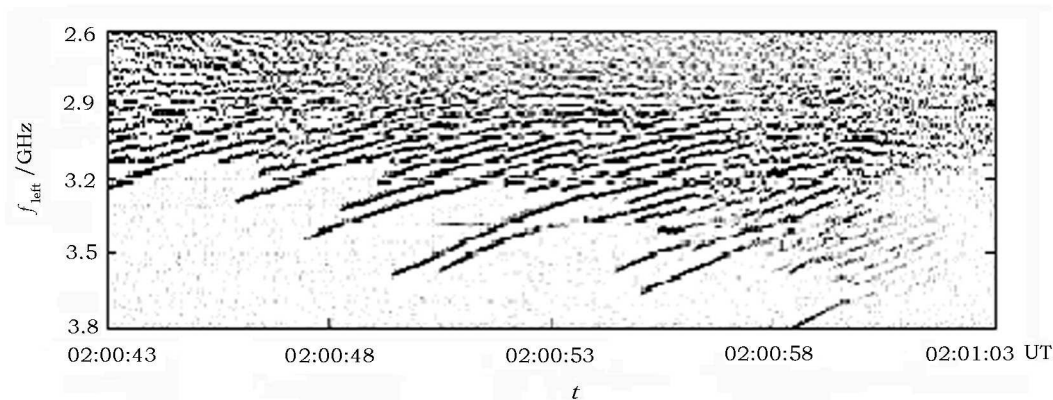


图14 叠加在纤维上的斑马纹结构(2002-04-21)^[14]

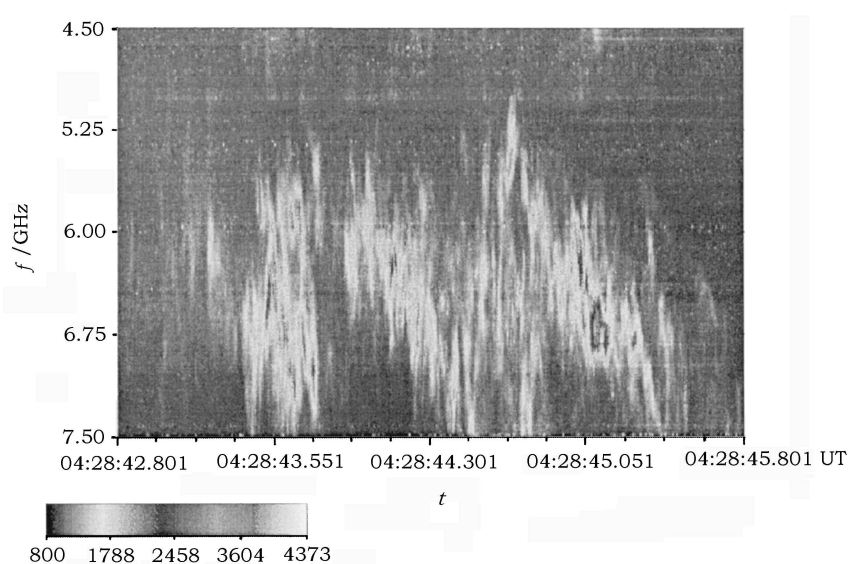


图15 由许多毫秒级尖峰辐射构成的超精细结构^[13]

图 14 和图 15 分别显示了 SBRs 观测到的一个叠加在纤维结构上的斑马纹结构, 及一个包含许多微波毫秒级尖峰辐射的超精细结构, 这个超精细结构中的微波毫秒级尖峰辐射的持续时间 (5 ms 或 8 ms) 与 SBRs 的时间分辨率相当。目前, 人们对于这些精细结构和微波毫秒级尖峰辐射已经提出了完全不同的辐射机制, 认为微波精细结构的构成存在两种可能: (1) 有两种精细结构, 其中一种由微波毫秒级尖峰辐射构成, 而另一种不是; (2) 所有的精细结构都由微波毫秒级尖峰辐射构成, 只是由于受现有观测设备分辨率和灵敏度的限制, 大多数微波毫秒级尖峰辐射没有被发现^[13]。

5 讨 论

以上介绍了对太阳射电微波爆发及其精细结构分类研究的 3 个主要阶段性进展。可以看

表 2 太阳射电微波爆发及其精细结构的分类

类 型	特 征	说 明	主要文献
微波 IV 型爆发	Δt 约几分钟, $\Delta f > 400$ MHz	经常叠加有多种精细结构	[11]
微波 III 型爆发	$\frac{\Delta f}{\Delta t}$ 约 40 MHz/s~20 GHz/s, f 约几十 MHz 到 > 1 GHz	低日冕区高能电子束的标志, 包括 III 型爆发对、U 型爆发、M 型爆发和 N 型爆发等亚类型, 有时以链状形式出现, 反映低日冕区高能电子束的复杂运动	[11~13, 30~32]
脉动	$\Delta f \geq 200$ MHz 的脉冲群, 群整体时间 > 10 s, 单个脉冲参量值相类似	脉冲之间间隔为 0.1~1 s, 具有准周期性, 可出现在发射过程或吸收过程中, 包括漂移脉动结构、毫秒级准周期脉动等亚类型	[11~13]
漂移脉动结构	具有很慢的整体频率漂移, 整体频率率量级为几十 MHz/s	可能是动态磁重联引起的等离子体团运动的标志, 与 CME 联系密切	[12,13,20,21, 39~41]
尖峰辐射	Δt 约几十 ms, 频带宽很窄, 高偏振, 在时-频域中具有无序性	存在谐波结构, 常叠加在宽带连续谱上, 还发现有类似微波 III 型爆发对的微波尖峰辐射对	[11~13,18,37,38]
纤维结构	$\frac{\Delta f}{\Delta t}$ 约 100 MHz/s, 规律重复出现的爆发群	具有相似的中等频率率, 有些出现在吸收过程中, 与米波的同类爆发特征不同	[12,13]
斑马纹 (平行漂移带)	彼此之间有规律地保持距离的辐射线	有经典斑马纹和叠加在纤维结构上的斑马纹, 与米波的同类爆发特征不同	[12~14,41]
孤立宽带脉冲	$\Delta f > 200$ MHz 的脉冲群, 群整体时间 ≤ 10 s, 单个脉冲参量值不相同		[12]
微波斑块	无明确定义, 目前的例子是 Δt 约 1 至几十秒, 弱偏振	可能来自等离子体辐射或脉泽辐射	[11,13,42]
花边纹	频率快速正向或负向变化, 外形像花边	十分罕见, 高频末端截止非常突然	[12]

出,对于太阳射电微波爆发及其精细结构的分类研究总体上经历了由粗到细、由浅到深、由现象到本质的发展过程。基于上述 3 个阶段的研究结果,将太阳微波爆发及其精细结构的频谱分类以常见到不常见的次序总结在表 2 中^[11~13]。目前对于一些微波爆发的辐射机制还没有完全弄清楚,因此,在分类研究的同时,现在的研究工作正努力从物理角度对各类爆发及其精细结构作出解释。理论研究将是今后太阳微波射电爆发观测和研究工作的重点。

太阳射电频谱仪是观测太阳射电爆发的直接工具,它的性能指标直接影响最终的观测结果和后续的数据处理,分辨率越高,记录的频谱图越清晰,获得的关于爆发和精细结构的细节信息就越多,对于爆发频谱形态和物理本质的研究也就越有帮助。因此,进一步提高射电频谱仪的分辨率和灵敏度也是今后努力的方向。

对于太阳微波射电爆发观测和研究而言,由于爆发所处的频段较高,而微波精细结构的强度随频率的增大而减小^[13],导致了观测存在最终极限。为了从弱强度的数据中收集到新的信息,数学工具和数据处理技术(例如小波分析等)的运用十分重要。

当然将观测数据与其他地面设施观测和空间观测获得的数据进行联合分析也十分重要,这将有助于弄清特定时期内太阳的整体活动情况,对深入理解太阳活动的物理过程以及各种太阳活动间的关系具有重大意义。

参考文献:

- [1] Wild J P, McCready L L. *Aust. J. Phys.*, 1950, 3: 387
- [2] 赵仁扬. 太阳射电辐射理论, 北京: 科学出版社, 1999: 2~4
- [3] 林元章. 太阳物理导论, 北京: 科学出版社, 2002: 486~492
- [4] Tanaka H. *Proc. Res. Inst. Atmosph.*, 1961, 8: 1
- [5] Kundu M R. *Solar Radio Astronomy*, New York: Interscience Publication, 1965: 660
- [6] Dröge F. *A&A*, 1977, 57: 285
- [7] Slottje C. *Nature*, 1978, 275: 520
- [8] Güdel M, Benz A O. *A&AS*, 1988, 75: 243
- [9] Allart M A F, van Nieuwkoop J, Slottje C *et al.* *Sol. Phys.*, 1990, 130: 183
- [10] Bruggmann G, Benz A O, Magun A *et al.* *A&A*, 1990, 240: 506
- [11] Isliker H, Benz A O. *A&AS*, 1994, 104: 145
- [12] Jiříčka K, Karlický M, Mészárosóvá H *et al.* *A&A*, 2001, 375: 243
- [13] Fu Q J, Yan Y H, Liu Y Y *et al.* *ChJAA*, 2004, 4(2): 176
- [14] Fu Q J, Ji H R, Qin Z H *et al.* *Sol. Phys.*, 2004, 222: 167
- [15] Perrenoud M R. *Sol. Phys.*, 1982, 81: 197
- [16] Benz A O, Güdel M, Isliker H *et al.* *Sol. Phys.*, 1991, 133: 385
- [17] Enome S, Orwig L E. *Nature*, 1986, 321: 421
- [18] Benz A O. *Sol. Phys.*, 1986, 104: 99
- [19] Jiříčka K, Karlický M, Kepka O *et al.* *Sol. Phys.*, 1993, 147: 203
- [20] Karlický M, Yan Y, Fu Q *et al.* *A&A*, 2001, 369: 1104
- [21] Kliem B, Karlický M, Benz A O. *A&A*, 2000, 360: 715
- [22] Fu Q J, Qin Z H, Ji H R *et al.* *Sol. Phys.*, 1995, 160: 97
- [23] Ji H R, Fu Q J, Liu Y Y *et al.* *Acta Astrophys. Sin.*, 2000, 20(2): 209
- [24] Ji H R, Fu Q J, Liu Y Y *et al.* *Sol. Phys.*, 2003, 213: 359
- [25] Sych R A, Yan Y H. *ChJAA*, 2002, 2(2): 183
- [26] Alvarez H, Haddock F T. *Sol. Phys.*, 1973, 29: 197

- [27] Huang G L, Fu Q J, Qin Z H. *Ap&SS*, 1999, 266: 389
- [28] Ning Z J, Fu Q J, Lu Q K. *PASJ*, 2000, 52: 919
- [29] Ning Z J, Fu Q J, Yan Y H *et al.* *Ap&SS*, 2001, 277: 615
- [30] Wang S J, Yan Y H, Fu Q J. *A&A*, 2001, 373: 1083
- [31] Wang S J, Yan Y H, Zhao R Z *et al.* *Sol. Phys.*, 2001, 204: 155
- [32] Fu Q J, Ji H R, Lao D B *et al.* *Acta Astrophys. Sin.*, 1997, 17: 441
- [33] Huang G L, Qin Z H, Yang G *et al.* *Ap&SS*, 1998, 259: 317
- [34] Aschwanden M A, Treumann R A. In: Gerard T ed. *Proc. of CESRA Workshop, Lecture Notes in Physics*, Nouan le Fuzelier: Springer, 1997: 108
- [35] Ning Z J, Yan Y H, Fu Q J *et al.* *A&A*, 2000, 364: 793
- [36] Wang M. In: Henoux J C, Fang C, Vilmer N eds. *Proc. of the Second France-Chinese Meeting on Solar Physics*, Beijing: International Academic Publishers, 2003: 78
- [37] Wang S J, Yan Y H, Fu Q J. *Sol. Phys.*, 2002, 209: 185
- [38] Liu Y Y, Fu Q J, Qin Z H *et al.* *Science in China (Ser. A)*, 2002, 45(Suppl.): 114
- [39] Wang S J, Yan Y H, Fu Q J. *A&A*, 2001, 370: L13
- [40] Liu Y Y, Fu Q J, Wu H A *et al.* In: Henoux J C, Fang C, Vilmer N eds. *Proc. of the Second France-Chinese Meeting on Solar Physics*, Beijing: International Academic Publishers, 2003: 71
- [41] Tan C M, Fu Q J, Yan Y H *et al.* *ChJAA*, 2004(4), 3: 205
- [42] Wang M, Fu Q J, Xie R X *et al.* *Sol. Phys.*, 2001, 203: 145
- [43] Ning Z J, Fu Q J, Lu Q K. *Sol. Phys.*, 2000, 194: 137

Progress of Solar Radio Microwave Bursts and Fine Structures

LI Shu-hao^{1,2}, WANG Shu-juan², ZHONG Xiao-chun¹

(1. Department of Physics, Science College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The complicated radio spectrum detected in solar radio bursts contain a lot of important information on their source regions including physical environment and emission mechanisms. The emission of the microwave bursts is in higher frequency range (GHz) and often came from the magnetic reconnection region in lower corona. Especially, because of their morphologic features of short duration, rapid frequency drift, complicated types and so on, the microwave fine structures could bring out rich information on the source regions such as the complicated configuration of magnetic reconnection, the movement of energetic particle, etc. In this paper, three main stages of researches on the solar microwave bursts and the fine structures are reviewed. The main burst types, the mechanism researches and the observational instrument for each stage are summarized. The future proposals are discussed as well.

Key words: astrophysics; microwave burst; review; solar flare; emission mechanism