



空间甚低频太阳Ⅱ型射电暴研究进展

高冠男, 汪敏, 董亮, 郭少杰

Advances in Space VLF Type II Solar Radio Bursts

GAO Guannan, WANG Min, DONG Liang, and GUO Shaojie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20190222001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间甚低频太阳射电Ⅲ型爆研究进展

Research Advances of Solar Radio Type III Bursts at Space Very Low Frequencies

深空探测学报(中英文). 2021, 8(1): 92-99

基于空间矢量天线的太阳低频射电爆发探测研究

Study of Very Low Frequency Solar Radio Emission Detection with Space Vector Antenna

深空探测学报(中英文). 2021, 8(1): 100-108

行星低频射电爆发的空间探测进展

Introduction of Space Exploration Progress for Planetary Radio Burst Emission

深空探测学报(中英文). 2021, 8(1): 80-91

在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究

Key Technologies of Very Low Frequency Radio Observations on the Lunar Far-Side

深空探测学报(中英文). 2017, 4(2): 150-157

月球空间环境研究进展

A Review of Lunar Space Environment Study

深空探测学报(中英文). 2021, 8(5): 486-494

太阳电池阵深空探测适应性设计概论

Solar Cell Array Design for Deep Space Exploration Missions

深空探测学报(中英文). 2020, 7(1): 41-46



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

空间甚低频太阳 II 型射电暴研究进展

高冠男^{1,2,3}, 汪敏^{1,2,3}, 董亮^{1,2,3}, 郭少杰^{1,2,3}

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650216; 2. 中国科学院 天体结构与演化重点实验室, 昆明 650216;

3. 中国科学院 天文大科学研究中心, 北京 100101)

摘要: 耀斑和日冕物质抛射 (Solar flares and coronal Mass Ejections, CME) 是产生灾害性空间天气的源扰动。II 型射电暴是 CME 驱动的激波在日冕和行星际空间中运动引起电磁波辐射的结果。以研究太阳物理和空间天气预警预报为背景, 对 II 型射电暴特别是甚低频 II 型射电暴的频谱特征以及物理成因进行分析, 认为甚低频 II 型射电暴不但可以用于估计 CME 激波的运动速度、诊断日冕磁场等物理参数, 还可以为空间天气预警预报方面提供参考。研究结果可以为空间甚低频射电观测设备的科学研究及应用方面提供有益的参考。

关键词: 太阳爆发; 耀斑; 日冕物质抛射; 太阳射电暴

中图分类号: P182.2+4

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)04-0423-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20190222001

引用格式: 高冠男, 汪敏, 董亮, 等. 空间甚低频太阳 II 型射电暴研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(4): 423-432.

Reference format: GAO G N, WANG M, DONG L, et al. Advances in space VLF type II solar radio bursts[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(4): 423-432.

引言

太阳上最引人注目并与空间天气关系密切的活动现象是耀斑和日冕物质抛射 (Solar flares and coronal Mass Ejections, CME)。在紫外和 X 射线波段, 耀斑以超过平时太阳辐射几十万倍的强度产生紫外和 X 射线辐射, 对地球电离层造成剧烈扰动, 直接影响地面上的短波无线电通讯。而 CME 携带大量的等离子体物质, 以超过 1 000 km/s 的速度抛向行星际空间, 可以对日地空间环境和地磁场产生剧烈扰动^[1-3]。

在空间天气学的研究中, 耀斑和 CME 是空间灾害性扰动过程的源扰动。空间灾害性天气是由太阳扰动、行星际扰动、磁层扰动、电离层扰动和中高大气层扰动组成的有时序因果关系链模式。空间天气的主要研究内容就是在了解各层间耦合过程的基础上, 提供空间灾害性天气模式与预报。

随着一批令人瞩目的太阳观测项目的实施, 中国太阳物理和空间天气学将得到长足的发展, 在太阳活动极大期即将到来之际, 将迎来一个新的高峰, 在空间和地面, 遥测和局地, 将通过高分辨率设备实现对太阳和行星际空间前所未有的多波段、多视角、高质

量的综合观测^[4]。

射电辐射是太阳爆发活动的即时响应, 是探测 CME 和日冕激波以及高能电子加速辐射的一个重要的窗口。太阳爆发时在射电波段出现的剧烈且短促的流量增强现象叫做太阳射电暴。灾害性空间天气或太阳风暴通常是由太阳耀斑和 CME 引发的, 因此对灾害性空间天气的预报和预警需要对太阳耀斑和 CME 进行实时和全天候的监测。当强耀斑和 CME 发生时, 射电流量会随之增强, 太阳射电常用射电动态频谱仪观测, 给出的数据是射电强度随频率和时间的变化图谱, 常称为射电动态频谱。根据动态频谱上的爆发形态变化, 太阳射电暴可分为频率漂移速度快的 III 型射电暴、频率漂移速度较慢且通常具有基频和二次谐波辐射的 II 型射电暴 (频率漂移率通常 ≤ 1 MHz/s)、宽频连续谱辐射 IV 型射电暴、依附在 III 型暴上频率被大大展宽的 V 型射电暴和持续时间很短的尖峰爆发群 I 型射电暴, 如图 1 所示^[5]。

其中, II 型射电暴是 CME 激波的最佳指示器, 通过 II 型射电暴的频率漂移率可以估算 CME 激波的运动速度, 还可以利用 II 型射电暴的发生频率估计 CME 激波所在的日冕高度进而估计 CME 激波到达地球时的

收稿日期: 2019-02-22 修回日期: 2020-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11941003, 11663007, 11703089, U1831201, 41764007); 中国科学院“西部之光”人才培养计划

1.2 甚低频 II 型射电暴（行星际 II 型射电暴）

CME在行星际空间运动并产生激波，激波在行星际空间中运动加速电子并产生行星际的 II 型射电暴，通常发生在10米–百米–千米波段（观测频段低于30 MHz）。行星际空间的 II 型射电暴是Malitson等^[15]利用空间卫星数据于1973年发现的，随后其它的空间观测也证实了行星际 II 型射电暴的存在^[12]。因此，利用甚低频太阳射电频谱仪对行星际 II 型射电暴的实时不间断监测可以直接等同于对CME激波的实时和全天候监测。特别是对于正对地球而来的CME，在日冕仪上很难发现，而通过射电手段监测它所驱动激波产生的 II 型射电暴则是有效的观测手段。

通过统计研究人们分别发现千米和10米–百米（Decametric-Hectometric, DH）波 II 型射电暴与行星际激波关系密切，因此，目前通常认为行星际 II 型射电暴是由CME驱动的激波产生^[4]。米波和行星际 II 型射电暴的关系，Cane等^[16]的统计研究表明，起始频率高于1 MHz的 II 型射电暴是米波 II 型射电暴在行星际空间的延伸，而起始频率低于1 MHz的 II 型射电暴则是由CME驱动的行星际激波所产生的。Mujiber等^[17]的统计研究发现CME的速度越快越容易同时产生米波和行星际的 II 型射电暴，反之，若CME的速度较慢则不容易产生任何波段的射电暴。目前，米波 II 型射电暴和行星际 II 型射电暴的关系问题仍然是观测统计研究的重点之一。

在日冕和行星际空间中等离子体密度的迅速降低，使得磁场完全控制了其中等离子体的运动学和动力学状态，再加上和太阳风的耦合，使得日冕和行星际磁场以及粒子加速的演化特征和物理本质更为复杂。目前普遍认为 II 型射电暴的主要辐射机制为等离子体辐射。等离子体辐射的重要特点是可以通过射电暴的发生频率直接得到所在区域的密度。根据等离子体辐射的特点，观测频率 f_{obs} 、等离子体辐射频率 f_{pe} 和电子密度 n_e 的关系表示为 $f_{\text{obs}} = s f_{\text{pe}}$ ， $f_{\text{pe}} (\text{kHz}) = 8.98 \sqrt{n_e (\text{cm}^{-3})}$ 。这里 s 代表谐波数， $s = 1$ 时代表基频结构， $s = 2$ 代表二次谐波结构。

再通过日冕密度模型，还可以计算射电辐射源所在的日冕高度或位置。在日冕高度的计算中经常采用的模型之一是Leblanc等^[18]利用卫星观测到的 III 型射电暴推导出，从日冕到1 AU的电子密度分布公式

$$n_e = (3.3 \times 10^5 r^{-2} + 4.1 \times 10^6 r^{-4} + 8.0 \times 10^7 r^{-6}) \text{cm}^{-3} \quad (1)$$

其中： n_e 是日冕电子数密度，单位为 cm^{-3} ； r 是以太阳半径 R_{sun} 为单位的距日距离，这里需要注意的是，根据

不同的日冕密度模型所获得距日距离会稍有差异。日冕密度模型使得射电辐射频率与射电辐射源的位置信息相联系，发生在高频的射电辐射源更接近太阳表面，而发生在更低频率的射电辐射源更远离太阳。因此，甚低频 II 型射电暴的发生频率直接反映了行星际空间密度。再按照特定的日冕–行星际密度模型，转换为空间位置及空间速度，即可得到激波的传播速度。特别是 II 型射电暴可以延伸到很低的频率，意味着激波在行星际空间中运动并有可能到达地球，因此通过其它观测仪器已经很难观测到CME的运动时，通过 II 型射电暴的漂移频率仍可以追踪激波并估计其运动速度^[6]。

另外，与太阳光球及色球的磁场测量不同，日冕的极低表面亮度、来自光球的辐射干扰、日冕辐射的光学薄特性、日冕的高温，以及日冕磁场的微弱等联合效应，导致常规状态下测量日冕和行星际磁场极端困难。而对于日冕和行星际磁场的测量对太阳物理和空间天气的预报预警都极其重要，因此，日冕和行星际磁场测量是太阳物理和空间天气共同的重要科学目标之一。迄今可靠的太阳–行星际磁场诊断主要来自于射电探测手段。

通过 II 型射电暴还可以对日冕和行星际磁场环境和强度进行诊断。II 型射电暴的一个重要观测特征是具有分裂带结构。常见的解释是，激波不同位置的辐射产生了 II 型射电暴的基频或二次谐频的分裂结构，分裂带的低频和高频结构分别产生于激波上游和下游。因此，根据分裂带的观测，可以推算出激波的上下游的参数比，进而可以推算出激波所处的日冕环境和日冕磁场强度。Gao等^[14]基于云南天文台米波太阳射电频谱仪所观测到的先后两个 II 型射电暴的分裂带结构，利用两种方法估计了日冕磁场强度。发现对于第一个 II 型射电暴，当日冕高度从 $1.7 R_{\text{sun}}$ 到 $2 R_{\text{sun}}$ 时，日冕磁场强度从2 G下降到1 G。对于第二个 II 型射电暴，当日冕高度从 $1.46 R_{\text{sun}}$ 到 $1.6 R_{\text{sun}}$ 时，日冕磁场强度B从6.3 G下降到3.8 G。以上两种计算方法给出的日冕磁场强度基本一致。Mancuso等^[19]对射电和极紫外（Extreme Ultraviolet, EUV）观测到CME驱动的激波和冕流相互作用进行了三维重建，对日冕磁场进行诊断。诊断出日冕的磁场强度可以表示为 $B(r) = (12.6 \pm 2.5) r^{-4}$ 的关系（ r 为到日心距离），与之前的估计值非常吻合，范围为 $r = 1.1 \sim 2.0 R_{\text{sun}}$ 。Kishore等^[20]对4个不同的低频 II 型射电暴（35~85 MHz）事件进行研究，这4个 II 型射电暴都具有基频和二次谐频，以及分裂带结构。通过分裂带结构对日冕磁场强度进行估计，发

现每个 II 型射电暴所获的磁场强度并不相同, 并且通过日冕密度模型对 II 型射电暴所处的日冕位置进行估计, 发现越是靠近太阳的 II 型射电暴, 所估计出的磁场强度变化越快, 相反越远离太阳的磁场强度变化越慢。这个结果表明了越靠近太阳表面, 磁场强度变化越快。同时他们的工作也证实了利用 II 型射电暴的分裂带来估计日冕磁场的重要性。

值得一提的是, 利用法拉第旋转对日冕和行星际的磁场进行测量也是利用射电方法测量日冕和行星际磁场的重要发展方向。利用法拉第旋转测量日冕和行星际磁场起源于 1969 年, 当时利用的是卫星信号^[21]。但是可利用的卫星有限, 而且测量精度有限。之后的研究者通常利用稳定的射电偏振源进行法拉第旋转的测量^[22]。目前, 国际上 LOFAR (Low Frequency ARray) 和 JVLA (Jansky Very Large Array) 射电阵都将利用法拉第旋转测量日冕和行星际磁场作为重要的科学目标和研究方向^[23]。中国正在参与的国际 SKA (Square Kilometre Array) 项目, 将使得中国的科学工作者可以利用大视场、多波束高灵敏度和高分辨率的 SKA 望远镜对日冕和行星际磁场进行更为精确的测量。

II 型射电暴辐射源所处的位置也是目前太阳射电研究的重点。LOFAR 低频射电阵观测频率为 20~90 MHz, 该设备的射电成像观测为定位 10 米波射电辐射源所在的 CME 位置发挥了作用。Nicolina 等^[24]采用 LOFAR 的成像观测, 研究 II 型射电暴和相关的 CME 的位置关系, 他们的观测结果支持 II 型射电暴的分裂带来源于激波波前上下游位置的假设。Zucca 等^[25]利用 LOFAR 的成像观测并结合多波段的观测数据, 观测到日冕激波引发的 50~70 MHz 的 II 型射电辐射源位于 CME 的侧面, 并与激波面近似垂直, 该 II 型射电暴频谱结构具有基频和二次谐频结构, 基频和二次谐频结构都具有分裂带结构(见图 3), 以及二次谐频中的多带结构。基于 LOFAR 的射电成像观测, 表明了分裂带结构的辐射源具有共空间结构(在观测不确定性范围内), 因此, 他们的观测支持了 II 型射电暴的分裂带是来自激波上游和下游的射电辐射的解释。然而, Du 等^[26]的工作中, 分析了多个分裂带事件的分裂频率比, 以及比值与频漂的参数的相关性, 发现 80% 以上的数据点都分布在 1.15~1.25 之间, 分裂比几乎是个常量, 这就对 II 型射电暴分裂带起源于激波的上下游提出了新的挑战。

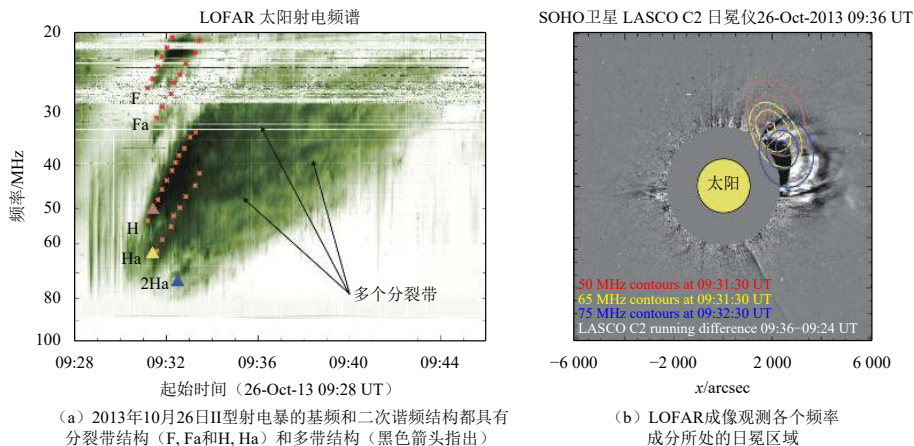


图 3 LOFAR 观测到的 II 型射电暴的分裂带结构及辐射源位置^[25]

Fig. 3 Band-splitting structure and emitter location of type II solar radio bursts observed by LOFAR^[25]

研究表明行星际的 II 型射电暴也包含着的射电精细结构, 通常认为太阳射电精细结构经常发生在米波和分米波段, 这是由于这些波段通常对应于耀斑和 CME 的初始能量释放的低日冕区域, 这个区域的磁场和日冕密度不均匀, 导致了射电动态频谱图上各种射电精细结构伴随着射电暴发生。Chernov 等^[27]对 1997—2005 年 WIND/WAVES 中 RAD2 的数据进行统计, 发现行星际 II 型射电暴上也伴有射电精细结构, 例如: 漂移的纤维爆发 (fiber) 等[如图 4 (a) 所示的

纤维状结构], 可能的解释是激波在窄的喷流结构中传播并产生了共振跃迁辐射所导致的。他们还发现行星际的 IV 型射电暴并不仅仅是连续谱辐射, 它的上面还伴有快速和窄带的射电精细结构[如图 4 (b) 所示], 这些结构的形成可能是由发生在 10 米波段的射电精细结构 (fiber 或 herringbone 结构) 向甚低频延伸的结果。这些射电精细结构的发现使得人们对行星际射电暴有了新的认识。他们还发现了一些米波纤维暴结构和 herringbone 结构会延伸到行星际空间, 这可能就说

明了在米波至10米波段的这两种射电暴结构是相同的辐射机制导致的。行星际 II 型射电暴的精细结构与激波在行星际空间的运动过程有关，研究行星际 II 型射电暴的精细结构可以了解高能粒子或激波在行星际运动与行星际的等离子体相互作用的情况，有助于诊断行星际的磁场位型和密度的信息。

10米至千米波段只能通过空间设备进行观测。通过 II 型射电暴的观测来监测CME激波在日冕和行星际空间的运动过程，并且还可以利用不同空间射电频谱设备进行射电辐射源的初步定位，如图5所示。Mäkelä等^[28]基于WIND/WAVES、STEREO/WAVES (A/B) 3台空间射电频谱仪的观测资料，利用方位分析技术 (direction finding analysis) 对行星际 II 型射电暴的辐射源进行了位置分析，得出了由于CME-CME的相互作用，导致了 II 型射电暴的辐射源随之移动的结论。这种方法弥补了射电动态频谱观测虽然可以达到很高的时间分辨率和频率分辨率，但是没有空间分辨率的短板。

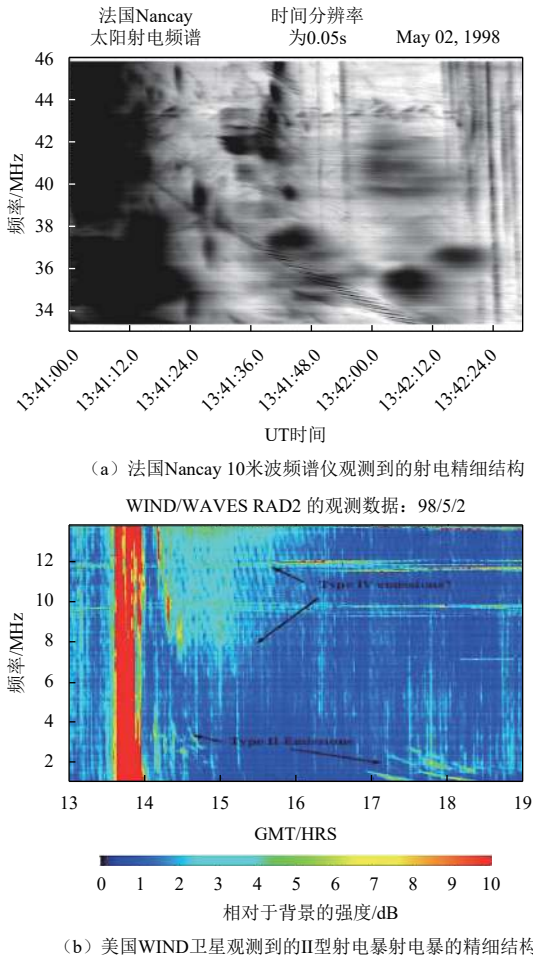


图 4 II 型射电暴上叠加的射电精细结构^[27]

Fig. 4 Inter-planetary type II solar radio bursts with fine structures^[27]

在天文领域，通常将低于30 MHz的射电频率范围称为甚低频波段 (Very Low Frequency, VLF) 或超长波 (Ultra-Long Wavelength, ULW)。通常将米波波段 (约300 MHz) 以下的频率范围统称为低频射电。由于地球电离层的吸收和反射，观测频率低于10 MHz左右的射电观测，地基设备对这一频段范围不能进行探测，必须通过空基望远镜对甚低频波段进行观测。对 II 型射电暴的观测可以从较低的日冕 (距离太阳表面约0.37 R_{sun}) 一直延伸到行星际空间 (距离太阳1 AU 或215 R_{sun} 左右)，即从米波波段一直到千米波波段都可以进行监测，其中米波波段可以在地面进行，而

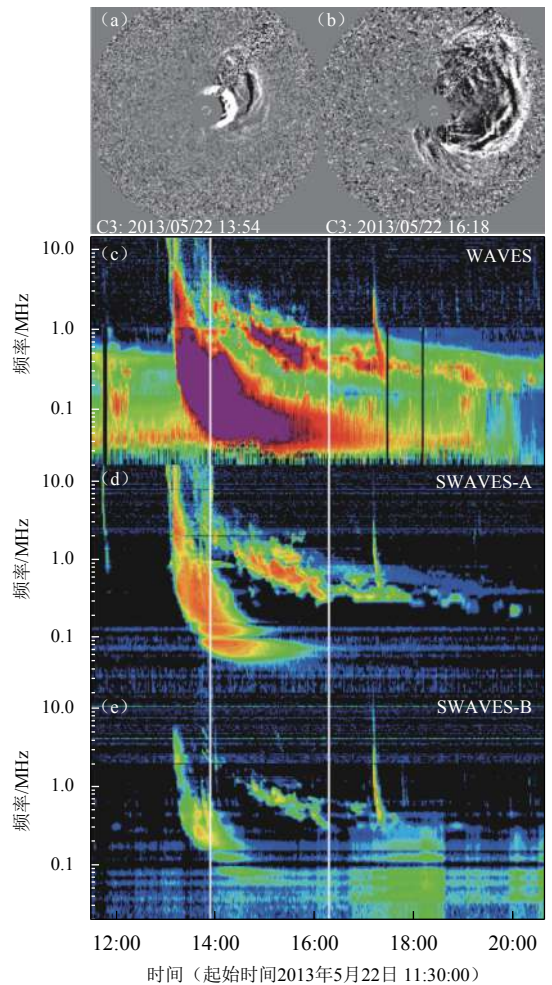


图 5 当CME发生时空间射电频谱仪观测到的行星际III型和 II 型射电暴^[28]

Fig. 5 Inter-planetary type III and II solar radio bursts with CME observed by WIND/WAVES, STEREO/WAVES (A/B) ^[28]

Mäkelä等^[29]继续利用方位分析方法对行星际 II 型射电暴的辐射源进行分析，给出辐射源的位置信息，观测结果支持发生在米波的 II 型暴和行星际的 II 型射

电暴是由同一个CME驱动产生的观点。目前对于行星际II型射电暴(甚低频波段)的辐射源的定位研究主要依赖于方位分析技术。

为了追踪行星际II型射电暴的辐射源,从而提供与CME相关的粒子加速机制和行星际磁场结构的关键信息,美国提出了SunRISE(Sun Radio Interferometer Space Experiment)空间射电干涉望远镜阵计划,主要实现对0.1~25 MHz的行星际II型射电暴的成像观测,计划于2023年发射。Hegedus等^[30]对SunRISE和月基射电干涉望远镜阵进行了建模仿真,发现月基射电干涉望远镜可以更好地避免轨道卫星所带来的无线电干扰。

2 行星际II型射电暴与空间天气的关系

地磁暴是高速等离子体云到达地球空间后,引发的最具代表性的全球空间环境扰动事件。行星际II型射电暴与地磁暴的关系密切,早在1981年,美国ISEE-3卫星连续8 d的观测数据发现了4个行星际II型射电暴,相同的时间段内,有3次明显的地磁暴发生,其中两次对应了行星际II型射电暴的发生时间,意味着这两次地磁暴是由行星际激波与地磁层相互作用引起的。然而,行星际的II型射电暴和地磁暴并不是一一对应,地磁暴的产生和行星际磁场方向有关,南向的行星际磁场(Interplanetary Magnetic Field, IMF)更容易导致地磁暴的发生,反之,北向的磁场更不容易导致明显的地磁暴^[31]。

太阳高能粒子(Solar Energetic Particle, SEP)能量为数KeV~数GeV,这些高能粒子会对航天器的电子设备以及航天员健康产生重大影响。行星际II型射电暴与太阳高能粒子事件的关系密切。Gopalswamy等^[32-33]利用1996—2005年的观测数据,发现42%的CME(平均速度为1 117 km/s)是射电宁静的,但都不与SEP事件相联系,与之相对的,58%的CMEs是有射电信号的,并且55%与SEP事件相联系。统计结果表明,能够驱动产生行星际II型射电暴的CME比较快速(平均速度为1 115 km/s),并且与太阳高能粒子事件相关。2013年,Reames^[34]研究发现最强的SEP事件都是由CME驱动的激波导致的。2015年,Winter和Ledbetter^[8]进一步统计研究发现,峰值强度大于10 MeV的SEP事件都与行星际II型射电暴相联系。他们利用10米-百米波段的II型射电暴作为输入参数所建立的预报SEP事件的模型,预报准确率可以和目前人工预报的准确度相当^[35]。因此,统计结果表明,II型射电暴,特别是行星际II型射电暴是SEP事件很好的指示器^[36]。

预测激波到达地球的问题,是空间天气预报的重要内容之一。国内外学者都进行了深入的研究,建立了各种预报模型。数十年前建立起的模型有:STOA(Shock Time of Arrival model)模型^[37],用来预测耀斑激波;ISPM(Interplanetary Shock Propagation model)模型^[38],用来预测激波事件;HAFv.2^[39]模型,用来预测太阳风事件;SPM模型^[40],也用来预测激波事件,等等。其中利用米波II型射电暴作为输入参数的是STOA和ISPM模型^[41]。在选择米波II型射电暴时,前提要求所选择的II型射电暴必须是孤立的事件,不能出现复杂的II型射电暴,复杂的II型射电暴往往预示着激波和激波的相互作用。这会导致利用该模型预测产生很大的误差。

WIND/WAVES卫星观测获得了大量的百米至千米波的II型射电暴,Cremades等^[42]利用空间射电频谱仪观测到的千米波II型射电暴计算行星际激波的到达时间,可以将预报准确度控制在6 h左右。这比利用米波II型射电暴预测准确度提高了6 h。而且Cremades等^[42]利用行星际II型射电暴计算激波速度来预测激波到达地球时间的方法并不要求该II型射电暴一定为孤立事件。

以上可知,利用地基望远镜观测到米波II型射电暴的频率漂移可以计算日冕激波的速度,进而预测激波到达地球时间等重要的物理参数。通过空间望远镜可以观测到10米、百米乃至千米波的II型射电暴,计算出行星际激波的速度。随着II型射电暴向低频延伸,测得的射电动态频谱也在变化,导致计算激波的速度也会发生变化,产生预报误差。结合地基和空间的观测数据对II型射电暴进行研究,对提高空间天气预报的准确度非常有益。

3 国内外空间甚低频观测设备

对于大于1 AU处行星际II型射电暴的观测,1990年10月,美国和欧洲合作发射成功的Ulysses卫星做出了巨大的贡献(该卫星已于2009年6月停止工作)。该卫星上搭载的射电和等离子体探测器(Unified Radio and Plasma wave experiment, URAP)^[43]在23太阳活动周峰年期间遥感和本地测量了大量的行星际II型射电暴,对于行星际II型射电暴的形成机制以及形成区域都给出了很多重要的结论。Lengyel-Frey等^[44]对Ulysses卫星在1~5 AU处观测到的42个行星际激波及相应的行星际II型射电暴进行研究发现,行星际II型射电暴的基频辐射是来自电子等离子体波与离子声波等波的相互作用,而二次谐波辐射则可能是由电

子等离子体波间的相互作用产生的，而且利用本地测量发现Ⅱ型射电暴的辐射源位于行星际激波的上游区域。

国际上目前有代表性的监测太阳射电辐射的卫星分别是WIND/WAVES卫星^[45]（美国1994年发射成功，观测频率20 kHz~13.825 MHz）和STEREO/SWAVES（A/B）卫星^[46]（美国2006年发射成功，观测频率10 kHz~16 MHz），探测目标便是甚低频射电辐射源。这3台设备实现了对太阳的多点观测（如图5所示）。

之前的Ulysses卫星在太阳风的形成等多方面都有重大发现，该卫星上搭载了射电和等离子体探测器（URAP）^[43]，观测频段约为1 kHz~1 MHz，主要任务是探测太阳的极区，其运行轨道与黄道面几乎垂直，因此结合距离1 AU处黄道面附近的WIND/WAVES的观测，可以对行星际Ⅱ型射电暴进行三维联合观测。加之本文中提到的美国SunRISE空间射电干涉望远镜阵计划于2023年发射，将对0.1~25 MHz的行星际Ⅱ型射电暴的辐射源进行射电成像观测，届时美国将同时具有空间低频射电频谱和成像观测的能力。

对于小于1 AU的太阳抵近探测，美国和欧洲相继提出Parker Solar Probe（PSP）和Solar Orbiter项目^[47-48]。2018年8月12日美国成功发射PSP，即原来的Solar Probe Plus，抵近太阳探测高能粒子的加速和传输机制是其重要科学目标之一^[48-49]。PSP将在9.86~53.7 R_{sun} 的黄道面上测量粒子的分布，相比于更远处太阳的测量，传播造成的误差会更小，因此有助于识别各种加速机制。PSP搭载双通道射电频谱仪（RFS），工作频率范围是10 kHz~19.2 MHz，分为LFR（10 kHz~2.4 MHz）和HFR（1.6 MHz~19.2 MHz）两个频段，LFR的主要科学目标是本地的QTN测量，HFR主要为遥感测量。PSP的轨道周期为90 d，近日点为9.4 R_{sun} 。PSP已经有部分射电频谱资料对外发布，频率分辨率为5%相对带宽，时间分辨率为1 min，PSP、STEREO和WIND联合进行对太阳射电辐射的观测，有望带来前所未有的新发现机会。2020年2月10日欧洲航天局（European Space Agency, ESA）主导的卫星项目Solar Orbiter发射升空，该项目的主要观测任务之一是对太阳两级附近区域进行探测，运行轨道在近日点为50 R_{sun} 附近，而远日点为300 R_{sun} 之外。其上搭载了射电和等离子体波探测器（Radio and Plasma Waves, RPW），将对0.1 Hz~20 MHz的射电信号进行探测^[47]。

最近，中国也提出了太阳爆发的抵近探测计划^[50]，该计划将比以上两个项目更接近太阳风暴核心能量释放区——磁重联电流片内部，计划搭载低频射电频谱

仪，具备遥感和本地测量Ⅱ型射电暴的产生和传播过程的能力。

中国科学家在20世纪90年代提出空间太阳望远镜项目，并提出了搭载空间射电频谱仪的构想。经过30多年的努力，“嫦娥四号”（CE-4）的成功发射，使得中国对空间射电观测实现了突破^[51]。由于大气层和电离层的干扰，地球上的测站几乎无法进行甚低频射电天文观测，而月球背面这块风水宝地，可以很大程度上屏蔽这些干扰。2019年12月，中国成功发射“嫦娥四号”卫星，分为着陆器和中继星。射电频谱仪LFRS（Low Frequency Radio Spectrometer）由中国科学院电子研究所主导设计研发。安装在“嫦娥四号”着陆器平台上的空间射电信号观测仪器，是实现“嫦娥四号”任务科学探测目标的重要科学载荷。由于着陆器平台在该频段内自身存在非常强的噪声，所以如何将信号从背景噪声中提取出来是低频射电频谱仪的关键技术^[52]。

另外一台射电探测仪器是中国和荷兰合作研发的射电探测仪NCLE（the Netherlands-China Long-wavelength Explorer）。“鹊桥号”携带NCLE，在位于月球背面的L₂点附近进行射电天文测量、太阳风暴和行星无线电脉冲探测等一系列实验性的天文实验^[53]。2019年12月，“嫦娥四号”任务工程团队对“鹊桥号”中继星上所搭载的中-荷低频射电探测仪NCLE载荷实施了3根天线展开工作。此次天线的展开标志着NCLE载荷正式进入科学探测阶段，且成为目前距离地球较远且可长期工作的空间射电天文台。NCLE载荷与“嫦娥四号”着陆器搭载的低频射电频谱仪，构成了月球表面和空间的一对可以独立和协同工作的射电天文台，在数据定标和系统校准方面将互相帮助提供重要的数据参考。

此外，中继星还搭载月球轨道超长波天文观测微卫星，由哈尔滨工业大学主导，主要对1~30 MHz射电信号进行观测，检测太阳和系内行星的超长波射电活动^[54]。2019年7月31日，已经完成所有任务的“龙江二号”卫星按照既定计划撞上月球背面坠毁，结束任务。

目前，“嫦娥四号”着陆器和中继星搭载的空间射电载荷都处于正常运行状态，地面和空间射电频谱仪联合定标工作也在进行中，对观测数据初步处理和分析正在进行中。目前遇到的主要困难是，太阳活动比较少，而且载荷并不是24 h开机，使得可供研究的太阳射电爆发事件非常少。太阳活动25周年即将到来，届时将有比较多的太阳活动事件，可提供较多太阳射电爆发的研究样本。期待在空间射电观测领域有重要的新发现，这些发现将为中国探月工程后续开展

以无人月球科研站为主的月球及深空探测活动开拓道路^[55]。

4 结束语

行星际 II 型射电暴的观测研究对太阳物理和空间天气的预报有着重要的研究和实际意义。特别是中国航空航天事业的快速发展,对太阳高能粒子事件等灾害性空间天气的预报和预警需求越来越迫切。中国对甚低频太阳射电爆发的观测研究起步较晚,但随着“嫦娥四号”的成功发射,着陆器和中继星上搭载的 LFRS 和 NCLE 等设备将开启中国对空间甚低频射电观测研究的新时代。

对于 LFRS 和 NCLE 的数据降噪处理和射电流量定标等关键技术正在稳步推进,加之由于星上设备开机时间有限,而之前的太阳射电爆发事件又很少,所以期待太阳活动 25 周峰年的到来给我们带来较多的研究样本,可以对中国的两台空间射电信号观测设备数据进行深入处理研究。

在处理数据的过程中发现,甚低频射电频谱仪的工作频率比较低,容易受到星上其它载荷的噪声干扰,笔者认为,研制低噪声的卫星平台,或提高星载低频射电频谱仪的抗干扰能力等技术对于空间甚低频射电观测尤其重要。

随着欧美等国家陆续发射升空的太阳探测器(最近发射的 PSP、Solar Orbiter),以及中国的太阳抵近探测计划等,可以明确未来太阳探测的发展趋势仍是多波段、多角度、本地+遥测手段相结合地观测太阳。就观测太阳 II 型射电暴而言,已经不仅仅满足于地基和空基的射电频谱观测,而向着地基和空基射电成像观测迈进(例如将于 2023 年发射的 SunRISE)。这样就可以完成米波到 10 米直至百米波的射电频谱和成像观测全覆盖,可以追踪 CME 驱动激波产生 II 型射电暴在整个日地空间的运动和传播,将有助于研究 CME/激波加速、太阳风加速以及日冕和行星际磁场等关键问题,并可以大大提升对灾害性空间天气的预报预警能力。

参 考 文 献

- [1] LIN J. Energetics and propagation of coronal mass ejections in different plasma environments[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2002, 2: 539-556.
- [2] LIN J, SOON W, BALIUNAS S L. Theories of solar eruptions: a review[J]. *New Astronomy Reviews*, 2003, 47(2): 53-84.
- [3] GARY D E, KELLER C U. Solar and space weather radiophysics[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [4] 甘为群, 颜毅华, 黄宇. 2016—2030 年我国空间太阳物理发展的若干思考[J]. *中国科学*, 2019, 49(49): 059602.
- [5] GAN W Q, YAN Y H, HUANG Y. Prospect for space solar physics in 2016—2030[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(49): 059602.
- [6] DULK G A. Radio emission from the Sun and stars[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1985, 23: 169-224.
- [7] DULK G A, LEBLANC Y, BOUGERET J L. Type II shock and CME from the corona to 1 AU[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(15): 2331-2334.
- [8] VASANTH V, UMATHY S, VRŠNAK B, et al. Investigation of the coronal magnetic field using a type II solar radio burst[J]. *Solar Physics*, 2014, 289(1): 251-261.
- [9] WINTER L M, LEDBETTER K. Type II and type III radio bursts and their correlation with solar energetic proton events[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 809(1): 105.
- [10] DING L G, WANG Z W, FENG L. Is the enhancement of type II radio bursts during CME interactions related to the associated solar energetic particle event?[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(1): 005.
- [11] 高冠男, 林隽, 汪敏, 等. 太阳米波和分米波 II 型、III 型射电暴及其精细结构观测研究进展[J]. *天文学进展*, 2011, 1(1): 35-47.
- [12] GAO G N, LIN J, WANG M, et al. Research and observation of and type III solar radio metric and decimetric type II bursts with fine structures[J]. *Progress in Astronomy*, 2011, 1(1): 35-47.
- [13] PAYNE-SCOTT R, YABSLEY D E, BOLTON J G. Relative time of arrival of bursts of solar noise on different radio frequencies[J]. *Nature*, 1947, 160(4060): 256-257.
- [14] MCLEAN D J, LABRUM N R. Solar radiophysics: studies of emission from the sun at the metre wavelengths[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [15] LIN J, MANCUSO S, VOURLIDAS A. Theoretical investigation of the Onsets of type II radio bursts during solar eruptions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 649(2): 1110-1123.
- [16] GAO G N, WANG M, WU N, et al. The broken lane of a type II radio burst caused by collision of a coronal shock with a flare current sheet by collision of a corona shock with a flare current sheet[J]. *Solar Physics*, 2016, 291(11): 3369-3384.
- [17] MALITSON H H, FAINBERG J, STONE R G. Observation of a type II solar radio burst to 37R[J]. *Astrophysical Letters*, 1973, 14: 111.
- [18] CANE H V, STONE R G. Type II solar radio bursts, interplanetary shocks, and energetic particle events[J]. *Astrophysical Journal*, 1984, 282: 339-344.
- [19] MUJIBER RAHMAN A, UMATHY S, SHANMUGARAJU A., et al. Solar and interplanetary parameters of CMEs with and without type II radio bursts[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(4): 516-525.
- [20] LEBLANC Y, DULK G A, BOUGERET J L. Tracing the electron density from the corona to 1 AU[J]. *Solar Physics*, 1998, 183(1): 165-180.
- [21] MANCUSO S, FRASSATI F, BEMPORAD A, et al. Three-dimensional reconstruction of CME-driven shock-streamer interaction from radio and EUV observations: a different take on the diagnostics of coronal magnetic fields[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 624: L2.
- [22] KISHORE P, RAMESH R, HARIHARAN K, et al. Constraining the solar coronal magnetic field strength using split-band type II radio burst observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 832: 59.
- [23] BASTIAN T S. NgVLA observations of the solar wind, science with a

- next generation very large array[J]. *ASP Conference Series*, 2018, 517: 87.
- [22] KOOI J E, FISCHER P D, BUFFO J J, et al. VLA measurements of faraday rotation through coronal mass ejections[J]. *Solar Physics*, 2017, 292: 56.
- [23] TIM B, JAMES C, JUSTIN K, et al. Astro2020: decadal survey on astronomy and astrophysics[EB/OL]. [2020-05-22]. <https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>.
- [24] NICOLINA C, KONTAR EDUARD P, HOLMAN GORDON D, et al. CME-driven shock and type II solar radio burst band splitting[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 868: 79.
- [25] ZUCCA P, MOROSAN D E, ROUILLARD A P, et al. Shock location and CME 3D reconstruction of a solar type II radio burst with LOFAR[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 615: A89.
- [26] DU G H, KONG X L, CHEN Y, et al. An observational revisit of band-split solar type-II radio bursts[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 81(1): 52.
- [27] CHERNOV G P, KAISER M L, BOUGERET J L, et al. Fine structure of solar radio bursts observed at decametric and hectometric waves[J]. *Solar Physics*, 2007, 241(1): 145-169.
- [28] MÄKELÄ P, GOPALSWAMY N, REINER M J, et al. Source regions of the type II radio burst observed during a CME-CME interaction on 2013 May 22[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 827(2): 141.
- [29] MÄKELÄ P, GOPALSWAMY N, AKIYAMA S. Direction-finding analysis of the 2012 July 6 type II solar radio burst at low frequencies[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 867(1): 40.
- [30] HEGEDUS ALEXANDER M, KASPER JUSTIN C, MANCHESTER WARD B. Tracking solar type II bursts with space based radio interferometers[C]// American Astronomical Society, AAS Meeting #232. [S. l.]: AAS, 2018.
- [31] MACDOWALL R J, KLIMAS A J, LENGYEL-FREY D, et al. Comparison of interplanetary type II radio burst observations by ISEE-3, Ulysses and Wind with Applications to Space Weather Prediction[C]//31st ESLAB Symposium. Noordwijk. Netherlands: ESA, 1997.
- [32] GOPALSWAMY N. Solar and geospace connections of energetic particle events[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 321-337.
- [33] GOPALSWAMY N, YASHIRO S, AKIYAMA S, et al. Coronal mass ejections, type II radio bursts, and solar energetic particle events in the SOHO era[J]. *Annales Geophysicae*, 2008, 26(10): 3033-3047.
- [34] REAMES DONALD V. The two sources of solar energetic particles[J]. *Space Science Reviews*, 2013, 175(1-4): 53-92.
- [35] SWALWELL B, DALLA S, WALSH R W. Solar energetic particle forecasting algorithms and associated false alarms[J]. *Solar Physics*, 2017, 292(11): 173.
- [36] SMART D F, SHEA M A. A simplified model for timing the arrival of solar flare - initiated shocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90: 183-190.
- [37] SMITH Z, DRYER M, ORT E, et al. Performance of interplanetary shock prediction models: STOA and ISPM[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, 62(14): 1265-1274.
- [38] DRYER M, FRY C D, SUN W, et al. Prediction in real time of the 2000 July 14 heliospheric shock wave and its companions during the 'Bastille' epoch[J]. *Solar Physics*, 2001, 204(1/2): 265-284.
- [39] FENG X S, ZHAO X H. A new prediction method for the arrival time of interplanetary shocks[J]. *Solar Physics*, 2006, 238(1): 167-186.
- [40] MANOHARAN P K, ANANTHAKRISHNAN S, DRYER M, et al. Solar wind velocity and normalized scintillation index from single-station IPS observations[J]. *Solar Physics*, 1995, 156(2): 377-393.
- [41] J A N A R D H A N P, B A L A S U B R A M A N I A N V, ANANTHAKRISHNAN S, et al. Travelling interplanetary disturbances detected using interplanetary scintillation at 327 MHz[J]. *Solar Physics*, 1996, 166(2): 379-401.
- [42] CREMADES H, ST CYR O C, KAISER M L. A tool to improve space weather forecasts: Kilometric radio emissions from Wind/WAVES[J]. *SPACE WEATHER*, 2007, 5(8): S08001.
- [43] STONE R G, BOUGERET J L, CALDWELL J, et al. The Unified radio and plasma wave investigation[J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1992, 92(291): 291-316.
- [44] LENGYEL-FREY D, THEJAPPA G, MACDOWALL R J, et al. Ulysses observations of wave activity at interplanetary shocks and implications for type II radio bursts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(A2): 2611-2622.
- [45] BOUGERET J L, KAISER M L, KELLOGG P J, et al. Waves: the radio and plasma wave investigation on wind spacecraft[J]. *Space Science Review*, 1995, 71(1-4): 231-263.
- [46] BOUGERET J L, GOETZ K, KAISER M L, et al. SWAVES: the radio and plasma wave investigation on the STEREO mission[J]. *Space Science Review*, 2008, 136(1-4): 487-528.
- [47] NASA. Solar Orbiter[EB/OL]. (2020-02) [2020-05-22]. <https://science.nasa.gov/missions/solar-orbiter/>.
- [48] KASPER JUSTIN C, ROBERT A, GERRY A, et al. Solar Wind Electrons Alphas and Protons(SWEAP) investigation: design of the solar wind and coronal plasma instrument suite for solar probe plus[J]. *Space Science Reviews*, 2016, 204(1-4): 131-186.
- [49] BALE S D, GOETZ K, HARVEY P R, et al. The FIELDS instrument suite for solar probe plus. measuring the coronal plasma and magnetic field, plasma waves and turbulence, and radio signatures of solar transients[J]. *Space Science Reviews*, 2016, 204(1-4): 49-82.
- [50] 林隽, 汪敏, 田晖, 等. 太阳爆发的抵近探测[J]. *中国科学*, 2019, 49(49): 059607.
- LIN J, WANG M, TIAN H, et al. In situ measurements of the solar eruption[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(49): 059607.
- [51] 梅丽, 苏彦, 周建锋. 极低频射电天文观测现状与未来发展[J]. *天文研究与技术*, 2018, 15(2): 127-139.
- MEI L, SU Y, ZHOU J F. The history and development of the low-frequency radio observation[J]. *Astronomical Research & technology*, 2018, 15(2): 127-139.
- [52] 张韬, 苏彦. 嫦娥四号低频射电频谱仪降低背景噪声方法的研究[J]. *天文研究与技术*, 2019, 16(3): 312-320.
- ZHANG T, SU Y. Research of the method for reducing background of very low frequency radio spectrum on Chang'E-4[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2019, 16(3): 312-320.
- [53] 薛长斌, 周晴, 王雷, 等. “嫦娥4号”任务有效载荷系统设计与实现[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(6): 515-521.
- XUE C B, ZHOU Q, WANG L, et al. Design and implementation of payload system in chang'e-4 mission[J]. *Journal of Deep Space*

- Exploration, 2017, 4(6): 515-521.
- [54] 贾瑛卓, 邹永廖, 薛长斌, 等. 嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置[J]. 空间科学学报, 2018, 38(1): 118-130.
- JIA Y Z Z, ZOU Y L, XUE C B, et al. Scientific objectives and payloads of Chang' E-4 mission[J]. Chinese Journal of Space Science, 2018, 38(1): 118-130.
- [55] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报(中英文), 2019, 6(5): 405-416.
- WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405-416.

作者简介:

高冠男(1982-), 女, 副研究员, 主要研究方向: 太阳射电, 空间天气。
通讯地址: 云南省昆明市东郊凤凰山云南天文台(650216)
电话: (0871)63920882

E-mail: ggn@ynao.ac.cn

汪敏(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 太阳射电, 射电天文技术。

通讯地址: 云南省昆明市东郊凤凰山云南天文台(650216)

电话: (0871)63920866

E-mail: wm@ynao.ac.cn

董亮(1982-), 男, 高级工程师/客座教授, 主要研究方向: 射电天文技术, 空间天气-导航系统影响, **本文通讯作者**。

通讯地址: 云南省昆明市东郊凤凰山云南天文台(650216)

电话: (0871)63920860

E-mail: dongliang@ynao.ac.cn

郭少杰(1987-), 男, 助理研究员, 主要研究方向: 低频射电阵。

通讯地址: 云南省昆明市东郊凤凰山云南天文台(650216)

电话: (0871)63920860

E-mail: guosj891025@ynao.ac.cn

Advances in Space VLF Type II Solar Radio Bursts

GAO Guannan^{1,2,3}, WANG Min^{1,2,3}, DONG Liang^{1,2,3}, GUO Shaojie^{1,2,3}

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

2. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

3. Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Solar flares and coronal mass ejections (CMEs) are the source disturbances of space weather. The type II solar radio burst is the result of electromagnetic radiation caused by CME driven shock moving in corona and interplanetary space. Based on the study of solar physics and space weather forecast, the spectrum characteristics and physical causes of type II radio burst, especially VLF type II solar radio burst, are analyzed, it shows that VLF type II solar radio burst can not only be used to estimate the velocity of CME shock, diagnose the coronal magnetic field, but also provide reference for space weather forecast. The research results can provide useful reference for the scientific research of space VLF radio observation equipment.

Keywords: solar eruptions; flare; CME; solar radio bursts

Highlights:

- The physical mechanism, history, research progress of metric and inter-planetary type II solar radio bursts are introduced.
- The relationship between inter-planetary type II radio bursts and space weather (geomagnetic storms, solar energetic particle events, etc.) is introduced.
- The space VLF observation equipment are introduced, especially the space radio spectrometers of Chang'e-4.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]