

230—300MHz 太阳射电声光频谱仪

王京生 夏志国 陈敬英 蒋苏云 闵茂林

(中国科学院云南天文台, 昆明)

许炳活 黄庚辰 任国鑫

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

摘 要

为了观测太阳米波射电现象的动态频谱, 研制了一台数字式米波太阳射电声光频谱仪。其设计指标适合于观测太阳宁静期间不太罕见的 I 型射电爆发。频带范围 230—300MHz, 频谱分辨率 250kHz, 时间分辨率 80ms。声光器件是采用钼酸铅偏转器, 数据采集使用光电二极管阵加微计算机。软件具有爆发判断、仪器频响修正和自动绘图输出功能。馈源采用对数周期天线。该声光频谱仪与云南天文台的 10m 口径射电望远镜相连接, 可清晰地观测到与太阳黑子群相关的 I 型射电爆发的动态频谱图象。

一、引 言

经常在太阳地球物理资料 (S. G. D.) 上发表太阳射电爆发动态频谱¹⁾资料的台站共有六个^[1]。其中东半球自东经 10° 至 150° 的广阔地域中, 除在澳大利亚的 Learmonth 有个站有时发布 25—75MHz 的资料外, 没有其它常规发布资料的台站。为了研究太阳上与射电爆发共生的各种现象的物理机制以及为了进行太阳活动预报, 收集尽可能完整的射电爆发动态频谱观测资料是十分必要的。昆明地处东经 103°, 在这里建立一个射电频谱观测点, 可以弥补这一经度地区资料的空白。

在米波和分米波段, 目前经常使用的太阳射电频谱仪有三种类型, 即扫频型、多通道滤波器型和声光型。其中扫频型是最先发展起来的, 在太阳射电爆发分型研究的过程中发挥过重要作用, 但由于其灵敏度和时间分辨率较低, 近年各国新建的太阳射电频谱仪已不再单独使用这种型式。多通道滤波器型兼有灵敏度和时间分辨率高的优点, 但当需要增大接收带宽和/或提高频谱分辨率(这两方面在太阳研究中往往同时都需要)的场合, 仪器价格急剧增加, 使它的应用范围受到一定的限制。声光型是七十年代后期发展起来的, 价格相对地比较低廉。随着现代声光技术的进步, 这种类型的频谱仪日臻成熟, 现已进入实际应用的阶段。

目前世界上采用声光型射电频谱仪进行太阳观测的有日本、澳大利亚、瑞士和中国。为了

本文 1985 年 7 月 12 日收到, 1986 年 4 月 2 日收到修改稿。

1) “动态频谱” Dynamic spectrum, 一译作“运动频谱”。本文取英文原义译为“动态频谱”。

表 1 数字式太阳射电声光频谱仪性能参数

国 别	年代	台 站	带宽 (MHz)	谱分辨率 (kHz)	时间分辨率 (ms)	天线直径 (m)	参考文献
日 本	1977	野边山	200	800	35	8	[2]
澳大利亚	1979	Culgoora	80	320	62.5	13.7	[3]
瑞 士	1983	Zurich	150	150	0.2	7	[4]
中 国	1984	云南	70	250	80	10	

扩大信息获取的能力,八十年代的声光频谱仪已普遍配备了光电二极管阵和微型计算机,实现了数字化。表 1 列出世界现有数字式声光射电频谱仪的主要性能参数。

云南天文台与上海硅酸盐研究所合作研制成功的数字式声光频谱仪是世界同类仪器中的第四架。观测频带 230—300MHz,谱分辨率 250kHz,时间分辨率 80ms (1985 年末已改进到 40ms,表中所列是鉴定时的数值)。1984 年投入试观测,多次接收到太阳 I 型爆发。1985 年 1 月通过了中国科学院数学学部组织的技术鉴定,认为该仪器的研制成功,为我国 22 周太阳活动峰年的观测研究开拓了一个有意义的新领域。

声光频谱仪的工作原理,许多文献已有介绍(例如文献[5,6]),本文不再重复。为了取得经验,掌握声光频谱技术细节,我们学习了北京天文台、紫金山天文台和国外同行的有益经验,并进行了详细的实验准备工作。早期实验是在一台频率范围为 70—140MHz 的样机上进行的。使用了一具菱形天线,后端使用连续示波器照相机进行记录,获得了一些初步的太阳射电爆发频谱照片,为以后的工作奠定了基础。

二、目的和要求

从广泛的太阳研究课题来看,从什米波到毫米波整个射电窗口频段内的太阳辐射频谱都令人感兴趣。但从技术和经费的现实性考虑,我们第一阶段的目标必须是有限的。为此,在拟定设计要求时考虑了以下因素。

1. 主要观测对象

这台频谱仪完成的时候正值太阳宁静时期,II,III,IV 型射电爆发出现的机会将很少。I 型爆发是米波噪暴的重要组成部分,常与黑子共生,出现的机会还不太少。这台频谱仪将以 I 型爆发作为主要观测对象。宁静年间日面黑子有时甚至到只有一群。这时 I 型爆发虽也减少,但它与黑子之间的关系却变得更加明显。

I 型爆发较常出现的频率是在 100 至 300MHz 之间,具有明显的偏振,其寿命在零点几秒到几秒之间。近年有人用高时间分辨率的频谱仪搜寻寿命极短的 I 型爆发,已观测到毫秒级的米波尖峰辐射现象。I 型爆发频带甚窄,一般不超过 10MHz。约有半数呈现负向频漂,但在一次噪暴事件期间, I 型爆发出现的频率范围相当稳定。以上特征在设计时需加以考虑。

I 型爆发的辐射机制目前研究得远不如其它类型的清楚。Wentzel 等人^[7]认为, I 型爆发是由光球浮升的弱冲激波在日冕磁场中传播激起的。详细观测对应于不同磁场位形出现的 I 型动态频谱,将为探明辐射机制提供有用的资料。

有些出现在米波段的毫秒尖峰辐射是伴随 III 型爆发的,Barrow 等人曾在 264MHz 频率上

观测到周期约 10ms 的准周期振荡现象^[8]。另外,由于 III 型爆发高频起始段的频谱,对于验证李春生等人^[9]提出的解释微波尖峰辐射的“空心束”模型有一定参考价值,它也是我们的重要观测对象之一。

2. 人为干扰

仪器所在的凤凰山最经常受到的人为干扰是电视和调频广播,其工作频率在 230MHz 以下。其中最强的电视和调频广播信号从天线旁瓣窜入所造成的干扰约比宁静太阳从主瓣进入的信号电平强 50—60dB。

3. 技术连贯性

实验样机所用的器件是一只带宽为 70MHz 的钼酸铅 (PbMoO_4) 声光偏转器。云南天文台新建的 10m 口径射电望远镜,目前主焦点上由于其它任务的需要装有 L 波段波纹喇叭,声光频谱仪所用的米波宽带馈源暂时只能偏焦放置,圆偏振测量暂时不能进行。现阶段设计决定采用 140—460MHz 的线偏振对数周期馈源。和声光偏转器的带宽相比,馈源频段已留有相当的余量,今后可把观测频带扩展到 150—450MHz 范围。22 周年峰年期间,还将考虑增加二维圆偏振测量。另外,由于经费的限制,目前使用的低档微机容量小、速度慢,只能满足 I 型爆发最低限度的观测需要。今后有条件时购置功能较强的微机,还可把整机性能大幅度地加以提高。

三、结构和性能

数字式太阳米波射电声光频谱仪的方框图,见图 1。抛物面天线直径 10m,线偏振对数

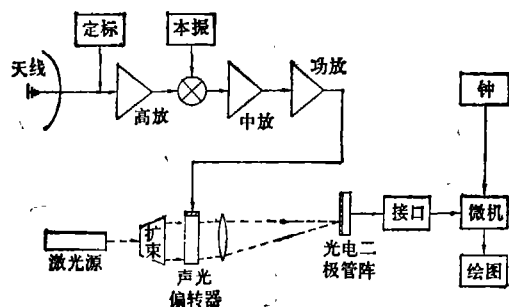


图 1 太阳米波声光频谱仪框图

周期馈源复盖频段 140—460MHz,是云南天文台和贵州红旗机械厂合作研制的。之所以采用直径达 10m 的天线,是因为频谱接收机的灵敏度受谱分辨率 Δf (相当于辐射计的带宽)和时间分辨率 τ (相当于辐射计的时间常数)的限制,远比一般射电辐射计的灵敏度低,必须增大天线的接收面积加以补偿。我们的 $\sqrt{\Delta f \cdot \tau}$ 值约比一般辐射计的小 30 倍,假设接收机的噪声系数一样,选用直径 10m 的天线,频谱仪的实际灵敏度和一个普通直

径 2m 的辐射计相仿。从表 1 所列各国同类仪器天线直径(从 7m 到 13.7m)也可以看出,10m 直径的天线规模是适中的。

宽频带超外差式接收机的噪声系数为 6dB,是南京长虹无线电厂试制的。考虑到后端的频谱分辨率 (250kHz) 和时间分辨率 (80ms),整机灵敏度约为 30K。宽频带功率放大器增益 40dB,最大不失真输出为 3W,是上海硅酸盐研究所研制的。

声光偏转器的中心工作频率为 110MHz,3dB 带宽为 70MHz;声光介质系用钼酸铅晶体,通光孔径为 16mm,换能器系用铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体,器件最大衍射效率为 50%;由于加装了内部散热装置,器件的温升和由此引起的频漂比较小。

激光源是 Hughes 公司制造的 1mW 线偏振 He-Ne 气体激光管。接收声光互作用衍射

谱的器件是 Reticon 公司出品的 RL 1024 H 光电二极管阵, 每个阵元宽度 $15\mu\text{m}$, 共含 1024 个阵元。接口含有采样保持电路和八位模数转换器。微机是用云南电子设备厂生产的 YEE8100 型, 主钟频率 1.77MHz, 内存容量 64K, 字长 8 位。绘图输出使用 X-Y 记录仪。

软件使用汇编语言, 除一般常用的数据采集、存盘、打印、显示等程序外, 还专为本仪器编制了爆发判断、定标和频响修正以及两种不同形式的动态频谱绘图输出程序。仪器的定标目前是用一台国产 ZF-2A 型噪声信号发生器, 用时插入, 不用时取下。以后拟改成体积较小的固体噪声源, 固定使用。对太阳进行巡视观测时, 每隔 10min 仪器自动打印一次“宁静”太阳的射电频谱。一方面作为爆发的背景, 在处理爆发数据时予以减除, 一方面作为整个仪器工作状态是否正常的一种监视手段。这里所说的“宁静”实际上是包含了太阳射电的缓变成分在内。当太阳上出现爆发时, 仪器的爆发判断程序根据信号强度是否达到一定的阈值, 而决定是否将数据存入磁盘。这个阈值可以由观测人员灵活掌握。在太阳活动低年, 这个阈值可以定得低些, 例如不妨选取超过“宁静”太阳平均水平的 10% 就算作出现爆发。存入磁盘的爆发数据事后经过减除背景、定标和仪器频响修正等项处理, 在 X-Y 记录仪上绘出动态频谱图形。图形是用多条曲线组成的立体图表示的, 横坐标可以选为时间轴(这时纵坐标表示强度, 同时不同高度的曲线代表不同的频率, 参看图 2), 也可以选为频率轴, 视研究者的需要而定。

仪器建立后, 对其工作频带、频谱分辨率和时间分辨率进行了测试。测试结果已列在表 1 中。其中测量频带和频谱分辨率所用的信号, 是采用一台标准信号发生器给出的正弦信号, 经放大后馈送到一具宽带发射天线, 经空间辐射传送到 10m 天线的对数周期馈源, 由馈源接收后再经接收机放大、变频后通过 200m 长的电缆传递到声光谱仪。最后由计算机打印出来, 所以包含了整个系统的频率响应和瞬态效应在内, 是比较符合实际使用情况的。

由于我们所用微机和模数转换器速度的限制, 光电二极管阵的扫描速度不能充分发挥, 目前只用了最慢的速度, 扫描周期为 80ms。比起声光偏转器的超声波渡越时间 $4.3\mu\text{s}$ 来要长得多, 整个声光谱仪的时间分辨率也就由扫描周期决定了。今后换用速度较快的微机和接口, 仪器的时间分辨率还可以大幅度提高。

频谱仪放在一个有恒温装置的暗室里。放置仪器的水泥台直接建筑在基岩上, 中间有防震设施隔离地面传来的振动。所有光学部件除激光管和光电二极管阵外, 都放在一个便于调节的光具座上。目前所使用的光具座长度略嫌不足, 今后拟换用一具较长的, 以便把所有部件都安放在同一光具座上。

由于受微机容量的限制, 3 秒钟内所采数据即装满内存, 遇有太阳出现爆发, 接着需要花费 40 秒钟从内存传送到磁盘。这样, 对于成群出现的爆发, 漏记的概率是 0.93 (这仅是对于连续成群的爆发而言。对于孤立出现的爆发, 因爆发判断程序的选择作用, 只要二次爆发的间隔不小于 43s, 即不会发生漏记)。最近又将软件作了一些改进, 传送时间可由 40s 缩短到 20s, 漏记率也将随之减少。更进一步的改进, 需要更换微机和外围设备。

四、结 果

这台数字式声光谱仪于 1984 年 7 月建成投入试观测, 先后多次记录到太阳 I 型射电爆发。图 2 是 1986 年 2 月 14 日 UT 02 h 40 m 观测到的 I 型爆发的一个例子。图中时间-强度曲线每隔 0.5MHz 绘出一根。由于图面的限制, 这里只给出了 278—286MHz 的一部份。横

坐标表示时间,中间的间断是因微机于3秒钟内记满了内存,必须把数据传送到磁盘,传送期间微机采数暂停引起的。图上方的单位标记代表当日的准宁静太阳射电流量。其长度是根据

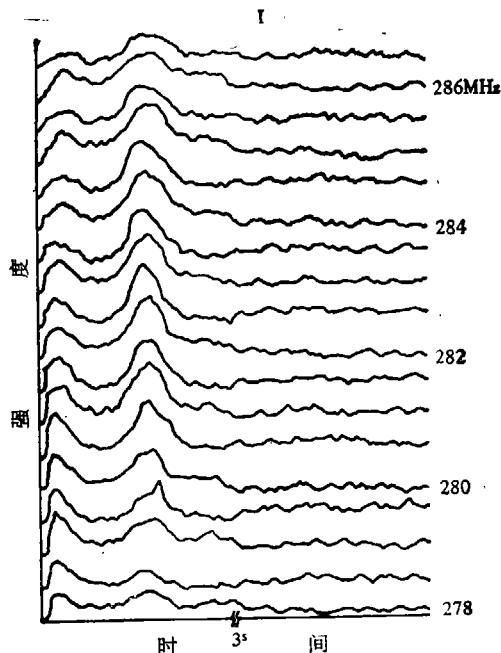


图2 1986年2月14日太阳I型爆发频谱

当日无爆发时太阳射电减去天空背景的数值在230—300MHz全频段内取平均得到的。参阅国外多年观测的经验性数据^[10],这个频段准宁静太阳的射电流量大致在9—13s.f.u.之间。

图2中明显见到在278MHz至300MHz之间先后紧密相连地出现了二个爆发。第一个的最大频率在280.5MHz附近,流量为当日准宁静太阳流量的3.3倍,带宽约8MHz,持续时间约0.8s。第二个爆发出现在第一个之后1.5s,其频率比第一个稍高,幅度比第一个明显地大。最大频率约在282.5MHz,流量为当日准宁静太阳的4.3倍,带宽约8MHz,持续时间1.3s。频漂皆不明显。所有以上特征皆与国际公认的I型爆发的特征相符。

这一天日面西侧有一面积较大的黑子群,2月上旬和中旬,我们记录到较多的I型爆发。在同一时期,仪器还记录到同一频率

范围内的连续增强辐射,在处理爆发资料时,已被当作“背景”减去,在图2中已看不出来。在此以前几个月内,因太阳处于宁静状态,我们的仪器记录到的爆发很少。2月14日这天,据国内外台站报道,太阳上先后出现了质子耀斑、X射线暴、射电爆发和噪暴,说明我们记录到的I型爆发是和太阳活动的增强相关的。

参加本项研制和实验的还有叶彬浚、刘旭、程力、刘威卫、杜冬余、罗维楚、赵国珍等同志,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Solar Radio Waves Spectral Observations, *Solar-Geophysical Data*, 1984, 474 (Supplement), 26—27.
- [2] Kai, K., Sawa, M., Shiomi, Y. et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 32(1980), 371—376.
- [3] Stewart, R. T., Cole, T. W. et al., *Solar Phys.*, 71 (1981), 3—4.
- [4] Perrenoud, M. R., *Solar Phys.*, 81(1982), 197—203.
- [5] Cole, T. W., *Proc. IEEE*, 61(1973), 1321—1323.
- [6] 徐介平, 声光器件的原理、设计和应用, 科学出版社, 1982.
- [7] Wentzel, D. G., in *Solar Radio Storms, Proc. 4th CESRA Workshop*, Trieste-August, 1982, 145—154.
- [8] Barrow, C. H., Benz, A. O. et al., *ibid.*, 109—118.
- [9] 李春生、傅其骏、严玉华、江淑英、李宏为, 天体物理学报, 5(1985), 9—18.
- [10] Allen, C. W. 编, 物理量和天体物理量 (杨建译), 上海人民出版社, 1976, 237.