

紫金山天文台太阳射电频谱仪定标*

卢 磊^{1,2,3†} 刘四明^{1,2‡} 宋其武^{1,2} 宁宗军^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院暗物质和空间天文重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 定标是射电天文观测中基础而重要的工作. 定标工作可以得到太阳观测中的一个重要物理量: 太阳射电辐射流量, 可以扣除射电频谱仪的通道不均匀性, 清晰显示射电频谱特征. 结合紫金山天文台射电频谱仪的观测数据, 详细介绍了定标的基本方法, 分析了定标常数的变化情况, 最后给出了定标结果, 并与野边山射电偏振计以及RHESSI (The Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) 卫星硬X射线波段的几个太阳耀斑的观测结果进行了比较, 结果符合耀斑的光变特征. 其中对一个耀斑脉冲相硬X射线流量和微波光变的相关性的分析表明这些观测可以用来研究有关的辐射机制以及相应的能量释放和粒子加速过程.

关键词 太阳: 耀斑, 太阳: 射电辐射, 太阳: 频谱, 仪器: 频谱仪, 方法: 定标

中图分类号: P182; **文献标识码:** A

1 引言

通常认为太阳射电爆发活动是由于磁重联所激发的局地等离子体震荡或粒子加速引起的. 对这些射电爆发活动精细结构的观测, 能够帮助我们更好地理解日冕物质抛射、太阳耀斑等过程中的能量释放及粒子加速机制^[1-7]. 射电日像仪可以用来观测射电爆发源的位置, 只是相关设备造价高, 已有的日像仪空间分辨率不是很高, 所采用的观测波段也不多, 因此, 迄今为止射电动态频谱观测仍然是研究太阳射电爆发活动的主要手段. 为了实现对太阳第23个活动周峰年进行宽频段射电观测, 北京天文台(现为国家天文台)、紫金山天文台(下文简称“紫台”)、云南天文台以及南京大学联合推进了一个合作项目. 该项目可实现对太阳进行频宽为7 GHz的射电观测, 主要由5个射电频谱仪组成, 其中北京天文台3个, 工作频段依次为1~2 GHz、2.6~3.8 GHz以及5.2~7.6 GHz, 紫台有1个, 工作频段为4.5~7.5 GHz, 云南天文台有1个, 工作频段为0.7~1.5 GHz. Fu等^[8]曾对此项目做过详细介绍. 紫台射电频谱仪于1999年8月投入工作, 由于其具有较高

2014-08-16收到原稿, 2014-11-25收到修改稿

*国家自然科学基金(11173064, 11233008)和中科院战略性先导科技专项B类(XDB09000000)资助

†leilu@pmo.ac.cn

‡liusm@pmo.ac.cn

的时间分辨率和频率分辨率, 到目前为止已经观测到了大量的射电爆发事件以及一些该波段特有的频谱精细结构^[9-15]. 然而, 由于定标和数据处理工作的复杂性, 有很多事件仍在进一步的处理之中. 本文就定标的基本方法展开讨论, 给出定标后的一些基本结果, 并将几个耀斑的定标结果与野边山的射电偏振计^[16]、RHESSI卫星^[17](硬X射线波段)的观测结果进行了比较, 结果符合耀斑的基本光变特征.

本文主要分为3个部分, 第1部分是引言部分, 简要介绍太阳射电以及中国射电频谱仪的基本状况, 第2部分介绍了定标的基本原理, 并给出定标的一些结果, 第3部分总结并讨论了影响定标精度的一些因素.

2 定标原理和方法、数据处理实例与误差分析

射电频谱仪得到的原始数据在不同的频率和不同的仪器之间不具有可比性, 需要在原始数据的基础上做进一步处理, 定出太阳射电辐射的真正流量(物理单位: $1 \text{ sfu} = 10^{-19} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$), 此过程称之为定标. 简单地说, 定标就是给出一个标准尺度, 把频谱仪给出的数字校准成有物理单位的参量. 目前定标的方法主要有以下3种:

1. 绝对定标: 对于一个方向瓣较宽的小天线, 射电源在频率 f 处的流量密度可表示为

$$F(f) = \frac{8\pi k_B c^2}{\eta D_0 K f^2} \cdot \Delta T_A \cdot e^{\tau_0 \sec(z)}, \quad (1)$$

其中 f 是观测频率, k_B 是玻尔兹曼常量, c 是光在真空中的速度, η 是天线的效率, D_0 是天线方向作用系数, K 是天线方向图改正因子, τ_0 是大气吸收因子, z 是天顶距, $e^{\tau_0 \sec(z)}$ 可以近似为1, ΔT_A 为射电源的天线温度增量. 由实验可测天线增益 $G (= \eta D_0)$, 得到天线增益就可以由上述公式把天线温度转换成射电辐射流量, 这就是绝对定标. 运用该方法需要研制专门的器材, 消耗的成本较高, 一般不为人们所采用. 傅其骏等^[18]、周树荣等^[19]对该方法均有过详细的介绍.

2. 相对定标: 相对定标是根据已知的标准源对原始数据进行定标, 也是最为常用的一种定标方法, 本文所讨论的就是相对定标法.
3. 非线性定标: 对于一些非常大的射电爆发活动, 接收机收到的射电信号往往会超出它的线性响应范围, 这就需要对原始数据进行非线性定标, Yan等^[20]提出了一种非线性定标的方法.

下面我们结合紫台射电频谱仪的观测数据, 详细介绍相对定标法. 来自太阳的射电信号先后要经过两次传输(天线和接收机)才能最终转换成可供存储的电子信号. 图1是太阳射电望远镜系统工作原理简图, 自左向右依次是射电信号的接收、传输、采集过程, 反过来便是数据处理时需要进行的定标过程. 利用太阳射电频谱仪进行射电观测时, 每日至少需要进行一次定标观测, 以便获得从观测数据归算到太阳标准流量的定标参数. 射电频谱仪定标观测时的数据保存在定标文件中, 分别记录了宁静太阳流量密度、天空背景流量密度、噪声源和终端对应的4个部分信息, 对每一部分选择好合适的时间段后, 可分别计算每一通道宁静太阳射电流量密度、天空背景流量密度、噪声源流量密度以及终端流量密度的平均观测值 R_{qs} 、 R_b 、 R_n 、 R_t , 观测数据与射电信号之间的具体关系如下:

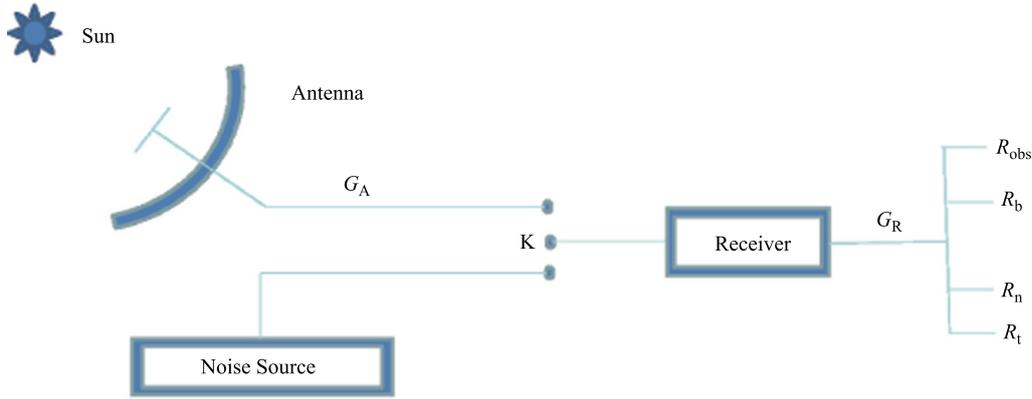


图 1 太阳射电望远镜系统工作原理简图. G_A 是与天线有效面积有关的特性参数, G_R 是接收机特性参数, R_{obs} 是日常观测数据, R_b 、 R_n 、 R_t 依次表示定标观测时的背景强度、噪声源强度、终端强度.

Fig.1 Schematic diagram of the solar radio telescope. G_A and G_R represent the response of the antenna and the receiver, respectively. R_{obs} , R_b , R_n , and R_t indicate the recorded observational, background, noise, and terminal data, respectively.

$$T_{qs}(f) = G_A(f) \cdot (F_{qs}(f) + F_b(f)), \quad (2)$$

$$T_b(f) = G_A(f) \cdot F_b(f), \quad (3)$$

$$R_{qs}(f) = G_R(f) \cdot T_{qs}(f) + r(f), \quad (4)$$

$$R_b(f) = G_R(f) \cdot T_b(f) + r(f), \quad (5)$$

$$R_n(f) = G_R(f) \cdot T_n(f) + r(f), \quad (6)$$

$$R_t(f) = G_R(f) \cdot T_t(f) + r(f), \quad (7)$$

其中 r 是常数,表示天线温度为0 K时接收机的读数, T_{qs} 、 T_b 、 T_n 、 T_t 分别是宁静太阳(含天空背景)、天空背景、噪声源及终端对应的天线温度, R_{qs} 、 R_b 、 R_n 、 R_t 分别是定标观测时记录的宁静太阳(含天空背景)、天空背景、噪声源及终端的强度, F_{qs} 是宁静太阳射电流量密度(不含天空背景), F_b 是天空背景流量密度. 另外, 太阳射电流量密度 F_{obs} (不含天空背景)和对应的观测值 R_{obs} 一样满足(2)、(4)式, 因此有如下表达式

$$R_{obs}(f) = G_R(f) \cdot G_A(f) \cdot (F_{obs}(f) + F_b(f)) + r(f), \quad (8)$$

(3)式代入(5)式可得:

$$R_b(f) = G_R(f) \cdot G_A(f) \cdot F_b(f) + r(f). \quad (9)$$

由(8)–(9)便得到太阳射电的定标公式:

$$F_{obs}(f) = \frac{R_{obs}(f) - R_b(f)}{G_A(f) \cdot G_R(f)}, \quad (10)$$

由(6)–(7)可得:

$$G_R(f) = \frac{R_n(f) - R_t(f)}{T_n - T_t}, \quad (11)$$

((2)–(3))/((4)–(5)) 可得

$$G_A(f) = \frac{R_{qs}(f) - R_b(f)}{G_R(f) \cdot F_{qs}(f)}. \quad (12)$$

(11)式中, $T_n - T_t$ 可近似认为是8000 K, (12)式中的标准宁静太阳射电流量密度 F_{qs} 可通过以下两种方法得到:

近似公式法: 使用参数化的宁静太阳射电流量密度 F_{qs} ^[21],

$$F'_{qs}(f) = 8.45 \times 10^{-1} f^{0.5617}, \quad 350 \sim 6000 \text{ MHz} \quad (13)$$

式中频率 f 的单位是MHz, F'_{qs} 的单位是sfu. 考虑到宁静太阳流量密度受到太阳活动周的影响, 宁静太阳射电流量密度被修订为

$$F_{qs}(f) = F'_{qs} + \Delta F \cdot Z, \quad (14)$$

式中 Z 是太阳黑子数目(可以通过www.ngdc.noaa.gov网站获得), 增长因子 ΔF 可以通过下式得到:

$$\Delta F = 1.20 \times 10^{-5} f^{1.374}, \quad 30 \sim 2770 \text{ MHz} \quad (15)$$

$$\Delta F = 35.12 f^{-0.5045}, \quad 2770 \sim 10000 \text{ MHz} \quad (16)$$

标准源差分法: F_{qs} 可通过其他观测台站直接得到. 本文采用标准源差分法来获取 F_{qs} :

1. 从野边山观测站的射电数据网站(<http://solar.nro.nao.ac.jp/norp/data/avg/>)下载记录每日平均宁静太阳射电流量密度的文件;
2. 由于野边山射电偏振计只在7个固定频率(1, 2, 3.75, 9.4, 17, 35, 80 GHz)处进行观测, 我们选择对3.75, 9.4 GHz频率处的宁静太阳射电流量密度进行线性差分, 从而得到4.5~7.5 GHz频率范围内的每日标准宁静太阳流量密度 F_{qs} .

图2(a)显示了在6个固定频率处, 野边山射电偏振计测得的每日平均宁静太阳射电流量密度随时间的变化情况, 图2(b)显示了不同日期宁静太阳的频谱, 绿、蓝、红3种颜色依次代表2000年1月31日($Z = 58$)、2000年3月31日($Z = 16$)、2000年7月20日($Z = 11$) 3个日期, Δ 代表野边山射电偏振计在6个固定频率(1, 2, 3.75, 9.4, 17, 35 GHz)处每日平均宁静太阳射电流量密度, 实线代表线性差分得到的4.5~7.5 GHz范围内的 F_{qs} , 虚线表示通过近似公式法得到1~6 GHz范围内的参数化的 F_{qs} ^[21]. 近似公式法是在对大量观测数据进行统计分析的基础上建立的经验公式, 与本文中采用的标准源差分法相比, 存在一定偏差.

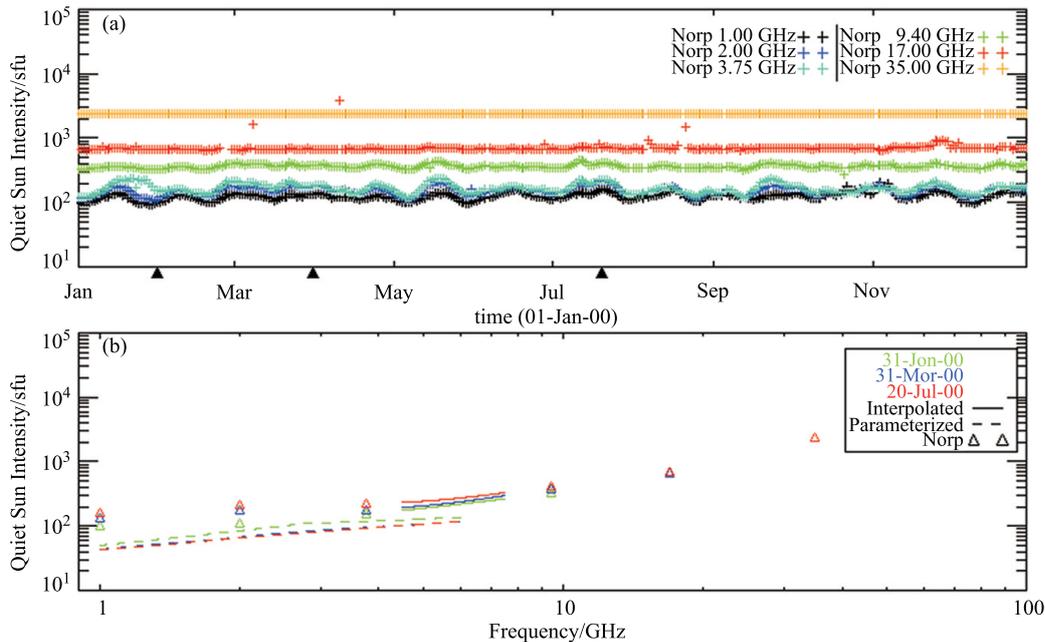


图2 每日标准宁静太阳射电流量密度示意图。(a)显示了在频率1, 2, 3.75, 9.4, 17, 35 GHz处, 野边山射电偏振计测得的标准宁静太阳流量密度随时间的变化情况;(b)中绿、蓝、红3种颜色依次代表2000年1月31日、2000年3月31日、2000年7月20日3个日期(a中横坐标轴上3个黑色箭头处), Δ 代表野边山射电偏振计测得的 F_{qs} , 实线代表差分得到的 F_{qs} , 虚线表示参数化的 F_{qs} 。

Fig. 2 The daily solar radio flux density of the quiet Sun. Panel (a) shows the light curves of the quiet Sun fluxes of the Nobeyama polarimeters at 1, 2, 3.75, 9.4, 17, and 35 GHz; Panel (b) shows the radio spectrum of the quiet Sun. The green, blue, and red colors represent January 31, March 31, and July 20 2000, respectively. Δ represents F_{qs} observed by the Nobeyama polarimeters, the solid line represents the interpolated F_{qs} , and the dashed line represents the parameterized F_{qs} , respectively.

知道每日标准宁静太阳流量密度 F_{qs} 后, 便可根据(11)、(12)式计算相应的仪器参数 G_R 、 G_A 。在讨论具体定标方法之前, 我们先对紫台射电频谱仪的仪器参数 G_R 、 G_A 的稳定性做简要分析, 主要分以下几个步骤进行:

1. 选用2000年的观测数据及定标数据, 运用(11)式、(12)式计算各个频率通道上每天的 G_R 、 G_A 值;
2. 计算各个频率通道上 G_R 、 G_A 的标准偏差 σ , 去除偏差大于 3σ 的反常值;
3. 对剩余的正常值进行统计分析, 分析结果见图3(一天中, G_R 、 G_A 各一个点)。

图3(a)显示了在随机选取的几个频率通道上 G_R 随时间的变化情况, 图3(b)显示了相应通道上 G_A 随时间的变化情况, 图3(c)显示了各个频率通道上, G_R 的反常点占总点数的比例, 图3(d)显示了各个频率通道上, G_A 的反常点占总点数的比例, 图3(e)显示了 G_R 在各频率通道上的相对标准偏差(标准偏差与平均值的比值), 图3(f)显示了 G_A 在各频率通道上的相对标准偏差。从图3不难看出, G_R 在很多通道上的稳定性远不如 G_A , G_A 除在个别通道表现出极度不稳定外(经检验, 少数极不稳定的通道为已损坏通道), 在绝大多数通道上, 相对标准偏差都维持在10%以内, 也就是说 G_A 是一组能长期保持稳定的物理量, 在误差允许的范围内, 可以认为 G_A 是一组常量。

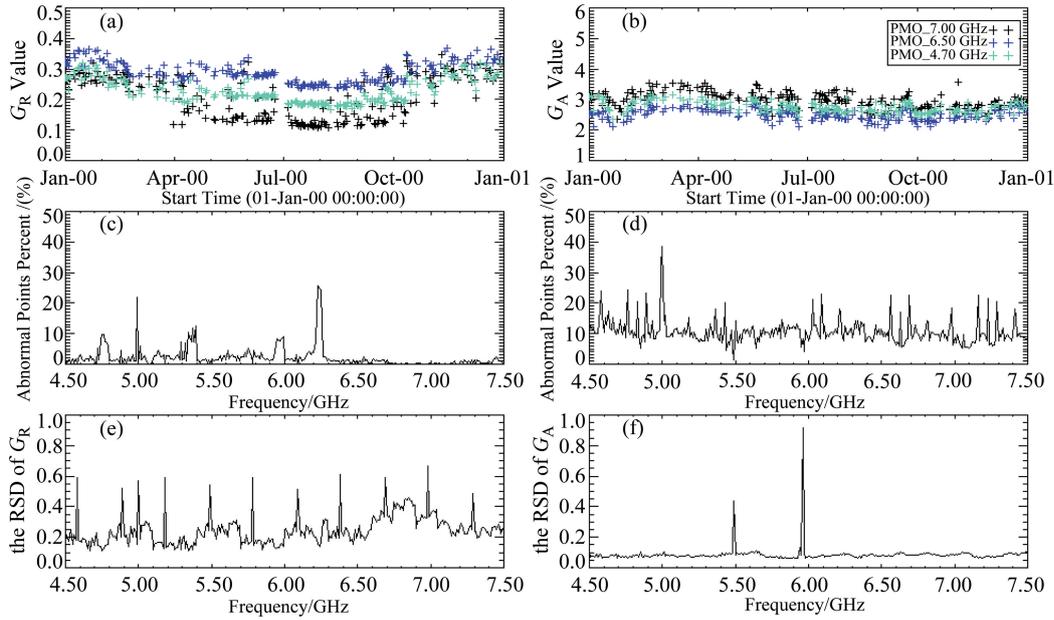


图3 G_R 、 G_A 在2000年的变化情况。(a)显示了在几个频率通道上 G_R 随时间的变化情况(一天一个点);(b)显示了相应通道上 G_A 随时间的变化情况(一天一个点);(c)显示了各个频率通道上, G_R 的反常点占总点数的比例;(d)显示了各个频率通道上, G_A 的反常点占总点数的比例;(e)显示了 G_R 在各频率通道上的相对标准偏差;(f)显示了 G_A 在各频率通道上的相对标准偏差。

Fig.3 The daily variations of G_R and G_A in 2000. Panels (a) and (b) are for G_R and G_A , respectively, at a few frequencies indicated with different colors (one point corresponds to one day); Panels (c) and (d) show the fraction of abnormal points (deviating from the mean value by more than 3 times the standard deviation) of G_R and G_A as a function of the frequency, respectively; Panels (e) and (f) give the relative standard deviation of G_R and G_A , respectively.

要实现定标,必先确定定标常数,我们可以通过以下两种方法来确定定标常数:

参考标准源定标法:假设不考虑 G_R 、 G_A 在一天内的变化,可直接令

$$M(f) = \frac{1}{G_A(f) \cdot G_R(f)}, \quad (17)$$

(10)式可化为

$$F_{\text{obs}}(f) = (R_{\text{obs}}(f) - R_b(f)) \cdot M(f), \quad (18)$$

(18)式便是参考标准源定标公式.标准宁静太阳射电流量密度 F_{qs} 及相应的测量值 R_{qs} 同样满足(18)式,故可得定标参量 M 的计算公式:

$$M(f) = \frac{F_{\text{qs}}(f)}{R_{\text{qs}}(f) - R_b(f)}. \quad (19)$$

(19)式中当日标准宁静太阳射电流量密度 F_{qs} 可以通过其他观测台站得到(具体方法上文已详细介绍).运用参考标准源定标法可以直接、简便地确定定标常数.由于该方法用到的定标数据较少(仅用到定标文件中记录的当天天空背景的记录值 R_b),故可在一定

程度上减少误差, 然而由于其对标准源的依赖很大, 每天都要参照其他观测台站的标准宁静太阳流量密度, 因此在常规定标工作中, 参考标准源定标法并不可取. 图4给出我们运用参考标准源定标法对2000年4月8日的一次太阳耀斑事件进行定标的结果. 图4(a)、(b)分别表示原始数据定标处理前后在6.30 GHz处的光变曲线(时间分辨率是5 ms), 图4(c)中黑色实线是原始数据的频谱曲线, 黑色点虚线表示定标参量 M 随频率的变化情况, 图4(d)中黑色实线、绿色实线、蓝色实线依次表示在02:38:37UT、02:39:32UT、02:41:22UT 3个时刻(图(f)中横坐标轴上黑色箭头处), 经定标处理后的数据的频谱曲线, 红色实线是对野边山观测数据线性差分得到的标准宁静太阳频谱, 图4(e)、(f)分别表示原始数据在定标处理前后的动态频谱. 通过对比可以看出, 原始数据经过定标处理后, 扣除了平场, 射电爆发信息可以非常清楚地显现出来.

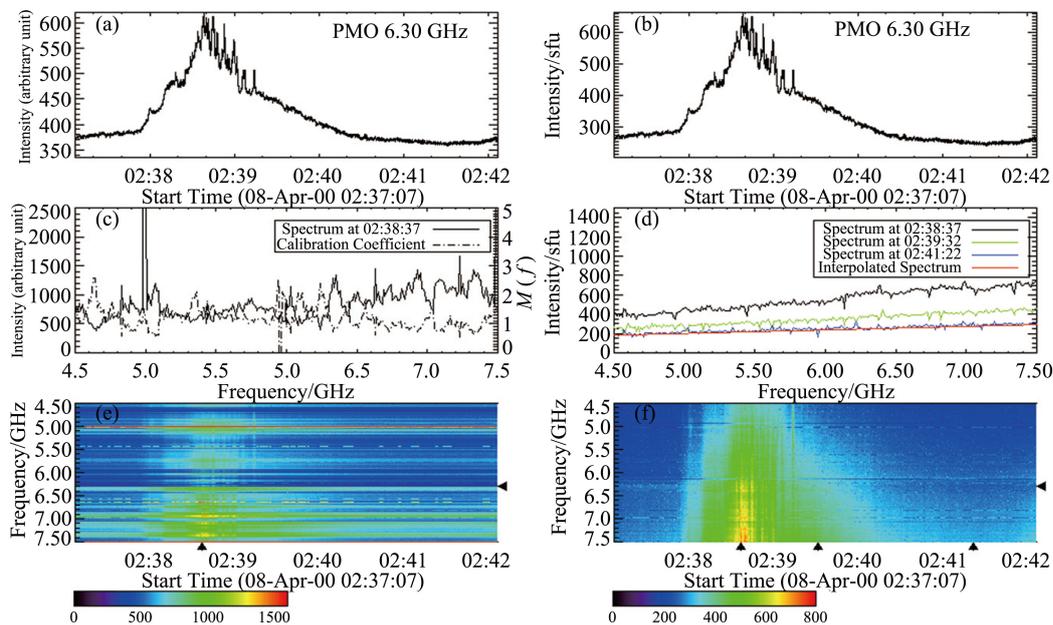


图 4 对2000年4月8日耀斑事件定标前后对比. (a)表示原始数据在6.30 GHz处(e中纵坐标轴上黑色箭头处)的光变曲线; (b)表示定标后的数据在6.30 GHz处(f中纵坐标轴上黑色箭头处)的光变曲线; (c)黑色实线显示了在02:38:37UT时刻(e中横坐标轴上黑色箭头处)原始数据的频谱曲线, 黑色点虚线显示了定标参量 M 随频率的变化情况; (d)黑色实线、绿色实线、蓝色实线依次表示在02:38:37、02:39:32、02:41:22UT时刻(f中横坐标轴上黑色箭头处), 经定标处理后的数据的频谱曲线, 红色实线表示从野边山射电偏振计的几个固定频率差分得到的标准宁静太阳频谱; (e)原始数据的动态频谱; (f)经定标处理后的数据的动态频谱.

Fig. 4 The comparison between the calibration data and the raw data of a flare on April 8, 2000. Panel (a) shows the light curve of the raw data at 6.30 GHz; Panel (b) shows the light curve of the calibrated data at 6.30 GHz; In panel (c), the black solid line shows the spectrum of the raw data at 02:38:37UT, the black dot-dashed line shows the dependence of M on the frequency f ; Panel (d) shows the calibrated spectra at 02:38:37UT, 02:39:32UT, and 02:41:22UT. The red solid line represents the spectrum of the quiet Sun derived from observations of the Nobeyama polarimeters; Panel (e) shows the spectrogram of the raw data; Panel (f) shows the spectrogram of the calibrated data.

图5给出了我们对该耀斑事件的定标结果与野边山射电偏振计的观测结果之间的比较. 通过比较可以看出, 紫台射电频谱仪与野边山射电偏振计对该耀斑的观测结果

相一致, 并且在观测频段上形成了良好的互补. 此外由于紫台射电频谱仪(时间分辨率为5 ms)比野边山射电偏振计(时间分辨率1 s)具有更高的时间分辨率, 因此我们可以看到更多的时间精细结构(图5中黑线和黄线上的尖峰结构, 它们对应于缓慢漂移的射电爆发^[22]).

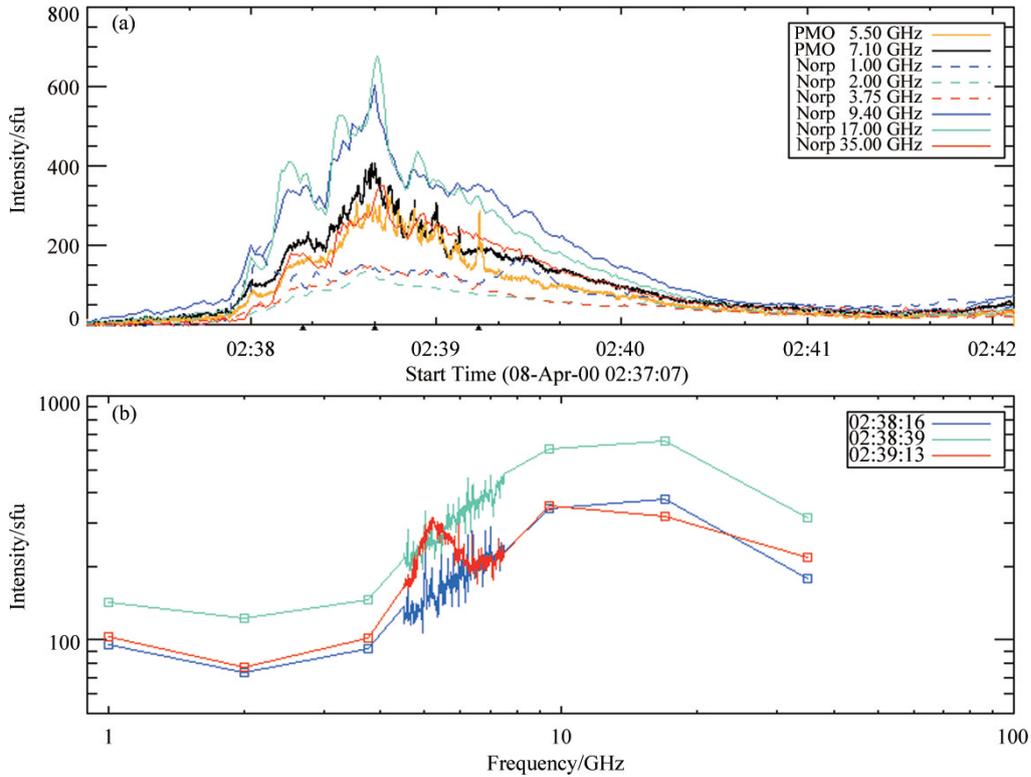


图 5 2000年4月8日事件的定标结果与其他仪器观测结果的比较. (a)给出了紫台射电频谱仪与野边山射电偏振计在不同频率处的光变曲线(为了便于比较, 光变曲线均已减去太阳背景流量密度); (b)显示3个时刻(对应于图(a)中横坐标轴上黑色箭头处)的频谱曲线, \square 代表野边山射电偏振计的观测结果, 4.50~7.50 GHz频率范围内的频谱曲线是紫台射电频谱仪的定标结果.

Fig. 5 Comparison of radio observations of the flare in Fig. 4 made with the solar radio spectrometer of the Purple Mountain Observatory and the Nobeyama polarimeters. Panels (a) and (b) show the light curves and the spectra, respectively (for comparison, the sun's background flux density has been subtracted). \square represents the observations of the Nobeyama polarimeters, and the spectrum at waveband 4.50–7.50 GHz is the calibration results of the solar radio spectrometer of the Purple Mountain Observatory.

常系数定标法: 考虑到 G_A 相对稳定, 我们可以将(11)式代入(10)式, 再令

$$C_A(f) = \frac{8000 \text{ K}}{G_A(f)}, \quad (20)$$

(10)式可化为

$$F_{\text{obs}}(f) = \frac{R_{\text{obs}} - R_b(f)}{R_n(f) - R_t(f)} \cdot C_A(f), \quad (21)$$

(21)式是我们定标用到的基本公式. 标准宁静太阳射电流量密度 F_{qs} 及其相应的观测值 R_{qs} 同样满足(21)式, 故可得定标常数 C_A 的计算公式:

$$C_A(f) = \frac{F_{qs}(f) \cdot [R_n(f) - R_t(f)]}{R_{qs}(f) - R_b(f)}. \quad (22)$$

通过前文的讨论可知, 天线特性参数 G_A 是一个相对稳定量, 根据(20)式可推断 C_A 也是一个相对稳定量. 图6给出了2000年定标常数 C_A 的变化情况, 图6(a)上显示了在随机选取的几个频率通道上定标常数随时间的变化情况(每天一个点, 图中已去除反常点), 图6(b)中显示各个频率通道上, C_A 的反常点占总点数的比例, 图6(c)显示了 C_A 的相对标准偏差(实线)以及平均值(点虚线)随频率的变化情况. 从图6可以看出, 定标常数除在个别通道表现得极度不稳定外, 在绝大多数通道上其相对标准偏差都维持在10%以内, 比较稳定(经检验, 少数极不稳定的通道为已损坏通道). 故 C_A 既可以通过(22)式直接计算求得, 也可以通过一段时间内的 C_A 进行统计平均得到, 而后者得到的定标常数对其他台站的依赖性明显降低(对于定标常数有明显变化趋势的情况, Tan等^[23]采用移动平均值的方法对定标常数进行拟合, 然后运用拟合后的定标常数对原始数据进行定标, 得到了很好的定标结果).

图7是运用常系数定标法对2000年1、2月份每日宁静太阳观测数据的定标结果与野边山射电偏振计观测结果的比较(每个“+”对应一天). 图7(a)、(b)分别对应两个频率处的比较结果, 横坐标轴代表紫台射电频谱仪定标得到的每日宁静太阳射电流量密度, 纵坐标轴代表野边山射电偏振计线性差分得到的每日宁静太阳射电流量密度, correlation表示二者的相关性(值越接近1, 说明二者相关性越高), standard.dev表示二者的标准偏差(单位: sfu), 后者可以通过下式求得:

$$\sigma_{PMO-NORP} = \sqrt{\frac{\sum (PMO_sfu - NORP_sfu)^2}{N - 1}}. \quad (23)$$

(23)式中, PMO_sfu 是紫台射电频谱仪定标后的宁静太阳射电流量密度, $NORP_sfu$ 是野边山射电偏振计线性差分得到的宁静太阳射电流量密度, N 是每组数据的元素个数, $\sigma_{PMO-NORP}$ 表示两组数据的标准偏差(单位: sfu). 图7中RSD表示二者的相对标准偏差(标准偏差与 $NORP_sfu$ 的均值的比值).

图8给出了运用常系数定标法对2003年11月13日的一次太阳耀斑事件的定标结果. 图8(a)给出了04:58:54UT时刻的频谱曲线(黑色实线)以及定标常数随频率的变化曲线(黑色点虚线), 图8(b)给出了3个不同时刻的频谱曲线(黑, 绿, 蓝3条实线)以及对野边山射电偏振计线性差分得到的宁静太阳频谱(红色实线). 图8(c)、(d)给出了原始数据定标前后的动态频谱图. 图9给出了对该事件的定标结果与野边山射电偏振计以及RHESSI卫星的观测结果的比较. 图9(a)是RHESSI卫星在硬X射线不同能段之间的观测结果, 图9(b)是野边山射电偏振计以及紫台射电频谱仪的观测结果(为便于比较, 光变曲线均已减除背景), 图9(c)是3个时刻的频谱(对应于(b)中横坐标轴上3个黑色箭头处), “□”代表野边山射电偏振计的观测结果, 4.50~7.50 GHz频段内的频谱曲线是紫台射电频谱仪的定标结果. 从图9可以看出, 紫台射电频谱仪的定标结果与野边山射电偏振计的观测结果具有很好的一致性, 并与RHESSI卫星在硬X射线不同能段的观测结果具有一

定的相关性. 为了定量比较不同微波波段与硬X射线不同能段之间的相关性, 我们对该耀斑事件的脉冲相(04:58:00—05:00:00UT)不同能段的光变曲线的相关性进行分析, 计算结果见图10.

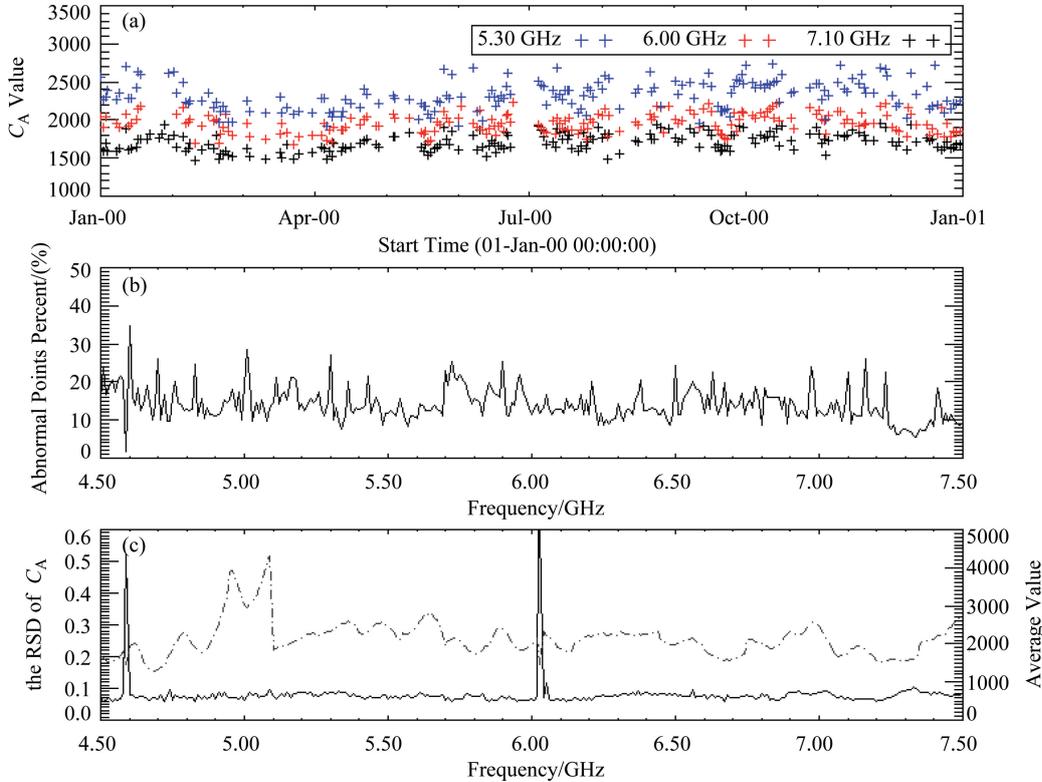


图 6 (a)显示了在几个固定通道上 C_A 随时间的变化情况(一天一个 C_A , 用+表示); (b)显示了各个频率通道上, C_A 的反常点占总点数的比例; (c)显示了 C_A 的相对标准偏差(实线)以及平均值(点虚线)随频率的变化情况.

Fig. 6 Panel (a) shows the daily variation of C_A in 2000 at a few frequencies indicated with different colors (one point corresponding to one day); Panel (b) shows the fraction of abnormal points (deviating from the mean value by more than 3 times the standard deviation) of C_A as a function of the frequency; Panel (c) gives the relative standard deviation (solid line) and the average value (dot-dashed line) as a function of the frequency.

图10给出了紫台射电频谱仪在不同微波波段的光变与硬X射线不同能段的光变之间的相关性. 可以看出射电光变和硬X射线流量密度之间的相关性总体而言随硬X射线的能量的增加而增强, 这与微波辐射主要由高能(> 100 keV)电子通过回旋加速辐射机制产生相一致. 随着X射线能量的增加, 产生硬X射线的电子能量和产生微波辐射的电子能量越接近, 相应的光变相关性也会增强. 同样的道理可以解释在25 keV以上的硬X射线光变和微波光变的相关系数会随着微波频率的降低而增加. 在我们计算的时间段(04:58:00—05:00:00UT), 25 keV以下X射线流量主要处在上升相, 而微波光变主要表现为一个脉冲, 这可以解释它们之间的相关系数较小甚至呈反相关性. 我们将在未来的工作中对这些相关性做更详细的分析, 以进一步理解相应的辐射机制以及有关的能量释放和粒子加速过程.

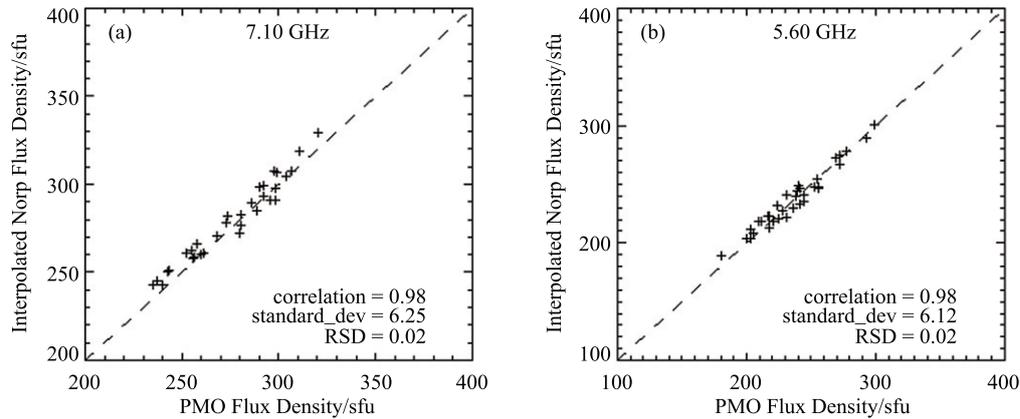


图 7 在不同频率处, 紫台射电频谱仪通过常数标定法得到的宁静太阳射电流量密度与野边山射电偏振计通过线性差分法得到的宁静太阳射电流量密度的对比(一天一个点, 用+表示). (a)是7.10 GHz的比较结果, (b)是5.60 GHz的比较结果.

Fig. 7 The comparison between the calibration results of the solar radio spectrometer of the Purple Mountain Observatory and the interpolated flux density of the Nobeyama polarimeters at a few frequencies. Panels (a) and (b) are for 7.10 GHz and 5.60 GHz, respectively.

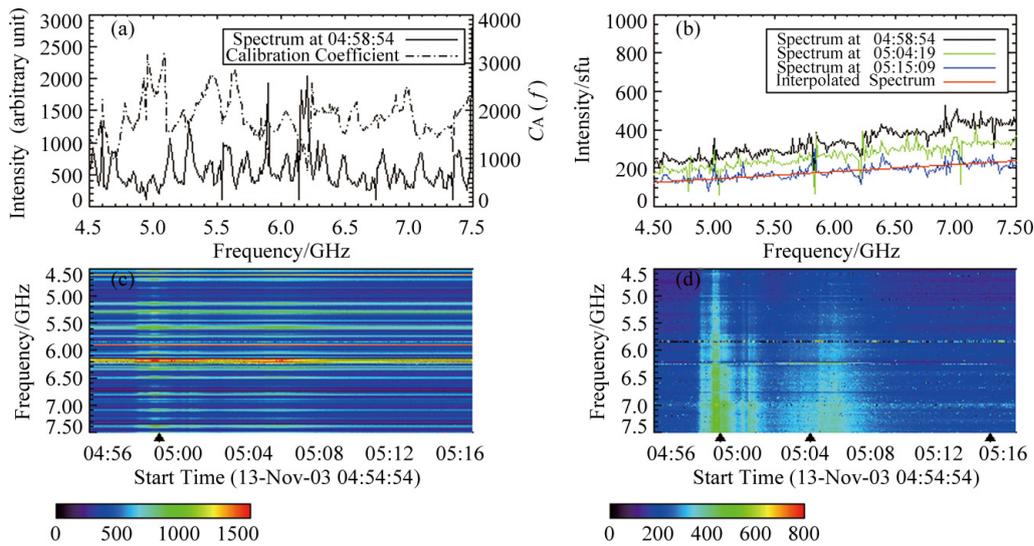


图 8 对2003年11月13日耀斑事件定标前后对比. (a)黑色实线显示了在04:58:54UT时(图(c)中横坐标黑色箭头处), 原始数据的频谱曲线, 黑色点虚线显示了定标常数 C_A 随频率的变化情况; (b)黑色实线、绿色实线、蓝色实线依次表示在04:58:54、05:04:19、05:15:09UT时刻(d中横坐标黑色箭头处), 经定标处理后的数据的频谱曲线, 红色实线表示从野边山射电偏振计的观测数据差分得到的宁静太阳频谱; (c)原始数据的动态频谱; (d)经定标处理后的数据的动态频谱.

Fig. 8 The comparison between the calibration data and the raw data of a flare on November 13, 2003. In panel (a), the black solid line shows the spectrum of the raw data at 04:58:54UT, the black dot-dashed line shows the dependence of C_A on the frequency f ; Panel (b) shows the calibrated spectra at 04:58:54UT, 05:04:19UT, and 05:15:09UT. The red solid line represents the spectrum of the quiet Sun derived from the Nobeyama polarimeters; Panel (c) shows the spectrogram of the raw data; Panel (d) shows the spectrogram of the calibrated data.

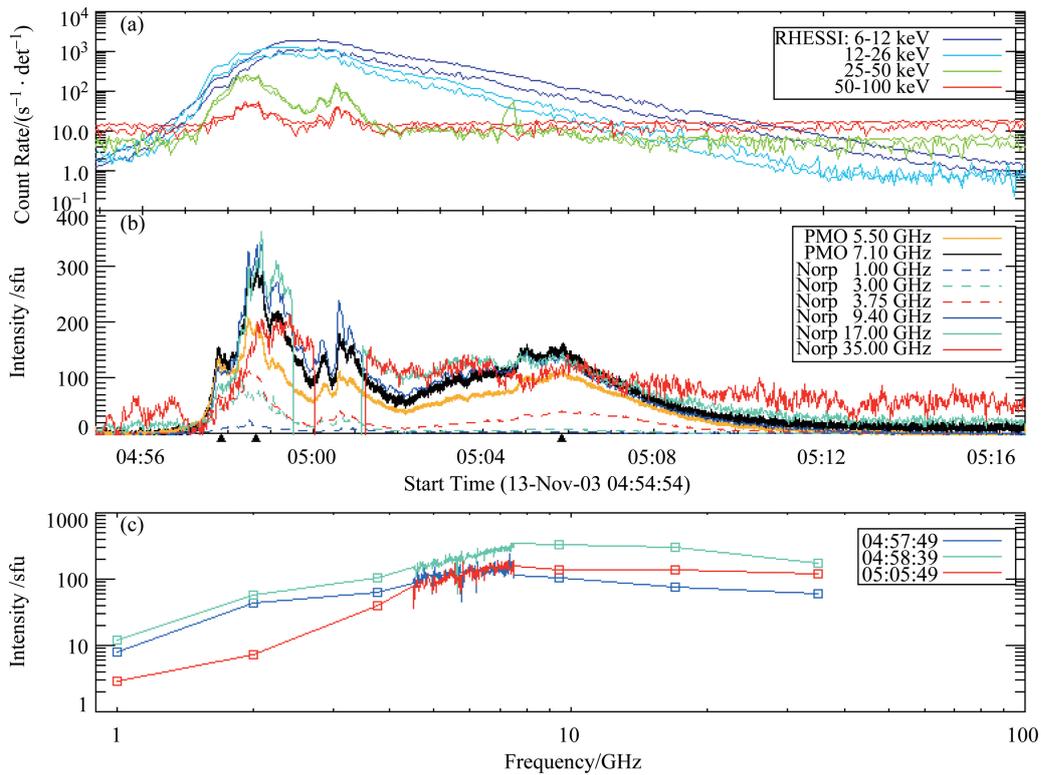


图 9 对 2003 年 11 月 13 日耀斑事件的定标结果与其他仪器观测结果的比较. (a) 是 RHESSI 卫星在硬 X 射线不同能段的光变曲线; (b) 给出了紫台射电频谱仪与野边山射电偏振计在不同频率处的光变曲线(为了便于比较, 光变曲线均已减去太阳背景流量密度); (c) 显示 3 个不同时刻(用 3 种不同颜色表示, 对应于图(b)中横坐标轴上 3 个黑色箭头处)的频谱曲线, \square 代表野边山射电偏振计的定标结果, 4.50~7.50 GHz 频率范围内的频谱曲线是紫台射电频谱仪的定标结果.

Fig. 9 Comparison of radio observations of the flare in Fig. 8 made with the solar radio spectrometer of the Purple Mountain Observatory and observations from other instruments. Panel (a) shows the light curves of the hard X-ray band of RHESSI satellite; Panel (b) shows the light curves of the solar radio spectrometer of the Purple Mountain Observatory as well as the Nobeyama polarimeters at a few frequencies; Panel (c) shows the spectra at a few epochs (for comparison, the sun's background flux density has been subtracted in Panels (b) and (c)). \square represents the observation of Nobeyama polarimeters, and the spectra at waveband 4.50–7.50 GHz are the calibration results of the solar radio spectrometer of the Purple Mountain Observatory.

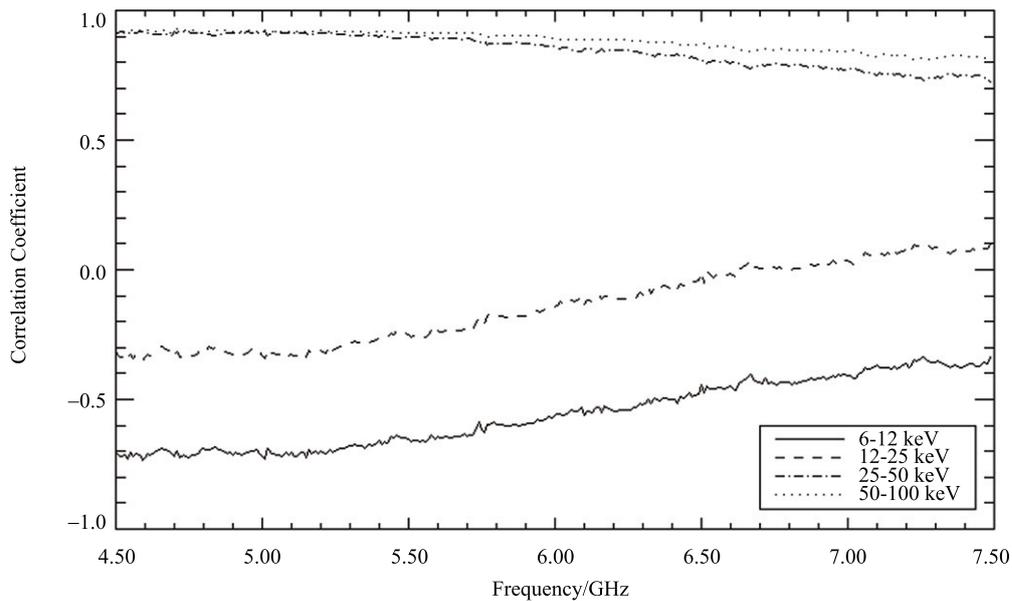


图 10 在耀斑的脉冲相(04:58:00—05:00:00UT), 不同微波波段的光变与硬X射线不同能段的光变之间的相关性

Fig. 10 The correlation coefficients of light curves between microwave band and hard X-ray band during the impulsive phase of a flare on November 13, 2003 (04:58:00—05:00:00UT)

3 总结与讨论

定标作为射电天文基础而重要的工作, 不仅可以扣除平场, 使射电信息清晰地显示出来, 而且可以为后续工作积累丰富的经验和技能, 进而为新设备的研制和数据处理工作打下坚实的基础. 本文主要介绍了射电频谱仪定标中经常用到的相对定标法, 并分别用参考标准源定标法和常数定标法对紫台射电频谱仪的观测数据进行定标. 通过把两个耀斑的射电观测数据的定标结果与野边山射电偏振计以及RHESSI卫星(硬X射线波段)的观测结果进行比较可以看出, 太阳射电爆发活动在不同微波波段以及硬X射线不同能段具有不同的光变行为, 不同波段光变行为之间的相关性和相应的辐射机制密切相关, 紫台射电频谱仪的观测数据可以与其他波段的光变观测相结合, 用来确定有关的辐射机制, 进而研究有关的能量释放及粒子加速机制.

然而, 考虑到以下几个方面的原因, 我们的定标工作仍然会存在一定的误差^[23]: (1) 馈源、噪声源以及内部元器件的不稳定性; (2) 外界非太阳信号的干扰; (3) 个别太阳射电爆发活动过于强烈, 以至于超出接收机的线性响应范围; (4) 频谱仪个别通道损坏, 导致频谱仪在该通道上对外来信号没有响应; (5) 在有大型的耀斑爆发时, 我们定标时选的宁静太阳可能不是真正的宁静太阳; (6) 大气的吸收. 我们定标处理的是太阳辐射穿过大气的辐射信号, 没有考虑大气的吸收作用; (7) 选用的标准源的精度, 不同的观测台站观测结果总会存在一定的偏差, 本工作中我们选用野边山射电偏振计的观测结果作为标准源, 定标结果与其他台站相比, 可能会存在一定的偏差. 在以后的定标工作中, 我们将针对以上几个方面进行修进, 力求做到更加精确.

致谢 作者感谢国家天文台谭程明博士的帮助和有益讨论, 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- [1] Tan C, Yan Y H, Liu Y Y, et al. *AdSpR*, 2008, 41: 969
- [2] Tan C, Tan B, Yan Y, et al. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2012, 8: 499
- [3] Ning Z, Fu Q, Lu Q. *PASJ*, 2000, 52: 919
- [4] Ning Z, Fu Q, Lu Q. *A&A*, 2000, 364: 853
- [5] Chernov G P, Yan Y H, Fu Q J. *A&A*, 2003, 406: 1071
- [6] Yan Y, Fu Q, Liu Y, et al. *ASPC*, 2003, 289: 401
- [7] Wang M, Fu Q, Xie R, et al. *A&A*, 2001, 380: 318
- [8] Fu Q, Ji H, Qin Z, et al. *Solar Physics*, 2004, 222: 167
- [9] Xu F Y, Yao Q J, Meng X, et al. *ChJAA*, 2001, 1: 469
- [10] Xu F Y, Xu Z C, Huang G I, et al. *Solar Physics*, 2003, 216: 273
- [11] Karlický M, Bárta M, Jiricka K, et al. *A&A*, 2001, 375: 638
- [12] Ning Z J, Liu Y Y, Fu Q J, et al. *ChJAA*, 2003, 3: 381
- [13] Ning Z, Yan Y, Fu Q, et al. *A&A*, 2000, 364: 793
- [14] Ning Z, Wu H, Xu F, et al. *Solar Physics*, 2007, 241: 77
- [15] Ning Z, Wu H, Xu F, et al. *Solar Physics*, 2008, 250: 107
- [16] Torii C, Tsukiji Y, Kobayashi S, et al. *PRIAN*, 1979, 26: 129
- [17] Lin R P, Dennis B R, Hurford G J, et al. *Solar Physics*, 2002, 210: 3
- [18] 傅其骏, 郑乐平, 李小聪, 等. *天体物理学报*, 1982, 2: 191
- [19] 周树荣, 许富英, 于兴风. *天文学报*, 1991, 32: 239
- [20] Yan Y, Tan C, Xu L, et al. *SoChA*, 2002, 45: 89
- [21] Benz A O, Monstein C, Beverland M, et al. *Solar Physics*, 2009, 260: 375
- [22] Bárta M, Karlický M, Žemlička R. *Solar Physics*, 2008, 253: 173
- [23] Tan C M, Yan Y H, Tan B L, et al. *SoChG*, 2009, 52: 1760

Calibration of Solar Radio Spectrometer of the Purple Mountain Observatory

LU Lei^{1,2,3} LIU Si-ming^{1,2} SONG Qi-wu^{1,2} NING Zong-jun^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT Calibration is a basic and important procedure in the radio astronomy. It deduces the solar radio flux which is an important physical quantity of solar observation. It also deducts the flat-field of the spectrometer, displaying the radio spectrogram clearly. In this paper, we first introduce the basic method of calibration based on the data of solar radio spectrometer of the Purple Mountain Observatory. We then analyze the variation of the calibration coefficients, and give the calibrated results for a few flares. These results are compared with those from the Nobeyama solar radio polarimeters and hard X-ray band of RHESSI (The Reuven Ramaty High Energy Solar

Spectroscopic Imager) satellite, which shows the consistency with the characteristics of the typical solar flare light curves. In particular, the correlation between the radio flux and hard X-ray flux variations can be used to study the relevant emission mechanism, the related energy release and particle acceleration process.

Key words sun: flares, sun: radio radiation, sun: spectrum, instrumentation: spectrometer, methods: calibration