

恒星射电耀发 6 cm 波段偏振观测试验*

白建勇^{1,2†} 韩金林² 高旭阳² 王 陈² 张立云¹

(1 贵州大学理学院物理系 贵阳 550025)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要 利用新疆天文台南山基地 25 m 射电望远镜在 6 cm 波段对恒星 V772 Her 和 β Per 进行了偏振观测试验. 通过数据处理和校准得到恒星的射电光变曲线. 探测到 V772 Her 的射电耀发现象, 耀发时的线偏振度约达 30%, 偏振位置角约 4° ; 探测到 β Per 的缓变成份及叠加其上的快速耀发, β Per 耀发时线偏振很弱.

关键词 恒星: 耀发, 方法: 数据分析, 偏振

中图分类号: P 161; **文献标识码:** A

1 引言

在恒星赫罗图中, 不同类型的恒星都观测到射电辐射^[1-2]. 在射电波段观测恒星可与其它波段一起研究恒星磁活动的物理现象^[3]. 恒星的射电辐射主要来自大质量恒星星风中的等离子体韧致辐射和中等质量恒星冕区中的中等相对论带电粒子在磁场中运动引起的高频段回旋同步辐射以及低频段相干辐射. 很多恒星中发现了射电耀发现象, 即恒星磁场在短时间内因重联而大量释放能量, 引起粒子加速, 产生电磁辐射. 双星的相互作用过程引发不同轨道相位上恒星的磁活动, 产生射电耀发. 射电耀发是研究恒星磁场、粒子加速、质量转移和双星星风碰撞物理过程最直接的探针^[4].

过去 30 多年中, 得益于高分辨率、高灵敏度干涉阵的发展, 对恒星的射电观测研究越来越深入. Wendker 于 1995 年汇总了 3 021 个恒星的射电观测结果, 有 821 个恒星探测到了射电辐射, 2 192 个恒星有射电强度上限^[5]. 恒星射电辐射一般较弱, 高分辨率成图需要大望远镜非常灵敏的观测, 如最新用 VLBA (Very Long Baseline Array)、GBT (Green Bank Telescope)、Effelsberg 和 VLA (Very Large Array) 一起对 Algol 系统 β Per 进行的观测, 分辨率达到 $0.4 \text{ mas} \times 0.6 \text{ mas}$, 首次观测到亚巨星冕区磁场结构^[6]. 恒星的射电探测可以用于研究星风损失率和粒子能量转移机制. 国外单天线大望远镜的恒星射电长期流量监测也偶有发表^[7]. 国内望远镜的灵敏度和分辨率普遍都不高, 过去对恒星的射电观测几乎没有进行过.

2012-02-13 收到原稿, 2012-03-07 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (11003023, 10833003) 和国家自然科学基金委员会与中国科学院天文联合基金 (10978010) 资助

† jybaiyx@163.com

我们利用新疆天文台南山基地 25 m 射电望远镜在 6 cm 波段对一批恒星进行了射电观测. 但只有对 V772 Her 和 β Per 的观测得到了一些有意义的耀发结果. V772 Her 属于 RS CVn 密近色球活动双星, 轨道周期为 0.88 d, 主星是 G0V 主序星, 伴星是 M0V 主序星, 距离我们仅 42 pc^[8]. 这类双星经常有射电和 X 射线爆发, 强度比太阳耀发时高几个量级. 其射电辐射主要是回旋同步辐射和相干辐射^[1-2,9]. 根据前人对 V772 Her 的射电观测, 在 6 cm 波段观测到该星的流量密度为 5.4 mJy^[10] 或 26.5 mJy^[11], 在 3.6 cm 波段是 7.7 mJy^[12], 但是所有观测均未探测到射电耀发现象. β Per 是最近 (28.5 pc) 的 Algol 半接双星, 轨道周期为 2.87 d, 主星是较亮的、热的 B8V 主序星, 伴星是较冷的 K2IV 亚巨星^[13], 伴星通过洛希瓣向主星转移质量. Algol 双星与 RS CVn 型双星辐射性质相似, 不同的是, Algol 系统的射电辐射主要来自 K 型亚巨星的磁活动, 通常无偏振或者弱偏振^[1-2]. 前人对 β Per 进行的观测包括: Wade 等^[14] 在 1972 年首次观测到该星的射电辐射; 随后 3 yr 中 Gibson 等^[15] 在 1.4 GHz、2.7 GHz、6 GHz 以及 8.1 GHz 对其进行了大量的观测, 发现该星存在强烈耀发, 在这 4 个波段的耀发极大值分别约为 0.1 Jy、0.2 Jy、0.7 Jy 和 1.05 Jy; Richards 等^[13] 从 1995 到 2000 年在 2.3 GHz 和 8.3 GHz 对该星进行长期监测, 发现该星有 (48.9 ± 1.7) d 的活动周期现象; 2010 年 Peterson 等^[6] 综合 VLBA、GBT、Effelsberg 和 VLA 观测到该星的冕区磁场结构.

本文报告了我们进行恒星射电试验的观测结果. 第 2 节介绍观测和数据处理, 第 3 节是观测结果和分析, 最后是结论和讨论.

2 观测和数据处理

在 2010 年 9 月 15 至 17 日、2011 年 4 月 11 至 13 日以及 11 月 30 日, 我们使用中国科学院新疆天文台南山基地 25 m 射电望远镜对恒星系统 V772 Her 和 β Per 在 6 cm 波段进行了观测.

望远镜位于乌鲁木齐南山观测站, 北纬 43° , 东经 87° , 海拔 2 029 m, 距该市 70 km. 射电望远镜的 6 cm 接收机位于高频仓内的副焦面上, 是双偏振通道系统, 具体系统参数如表 1 所示, 其中 T_{sys} 为系统温度. 宽带模式下带宽 600 MHz, 中心频率 4 800 MHz, 参考信号强度 (天线温度 T_a) 为 1.7 K. 为避免南天印度卫星干扰, 设置了一个滤波器, 使得窄带模式下的带宽、中心频率分别为 295 MHz 和 4 963 MHz, 窄带模式下的参考信号强度 (T_a) 为 1.45 K. 射电信号被喇叭馈源收集后, 经正交极化器后分为左旋 (L) 和右旋 (R) 两路圆偏振信号; 两路信号分别经制冷的 HEMT 前置放大器放大, 经混频得到中频信号, 再经功分器生成两路 L 和 R 信号, 一路 L 信号和 R 信号检波得到总强度 I_1 和 I_2 , 另外一路 L 信号和 R 信号经偏振计得到偏振参量 U 和 Q .

表 1 6 cm 波段接收机系统参数

Table 1 Parameters for 6 cm band receiving system

Parameter	Value
Frequency(MHz)	4800/4963
Bandwidth(MHz)	600/295
T_{sys} (K)	22
Calibration signal(K)	1.7/1.45
Half-power Beam Width	9.5'
Aperture efficiency	62%
Beam efficiency	67%
Conversion factor(KT_{B}/Jy)	0.164

乌鲁木齐的 6 cm 系统目前具备 3 种观测模式: mapping、pointing 和 onoff 模式. mapping 模式是对目标进行成图观测, 这次观测试验中我们用于观测一级校准源; pointing 模式是对目标进行十字扫描, 适合较亮的、短期内稳定的目标, 在我们的试验中用于观测二级校准源; onoff 模式是对目标 (on) 及周围 4 个 off 点 (无明显射电结构) 进行交替定点观测. 我们观测恒星时, 首先观测一级校准源, 用于流量定标, 然后观测在目标源附近的二级校准源, 接着再用 onoff 模式观测恒星. onoff 模式观测一段时间就穿插进行一次二级校准源的观测, 大约每 2 h 观测一次一级校准源.

对于用 mapping 模式观测得到的数据, 可利用中德 6 cm 银道面偏振巡天数据处理包 TOOLBOX, Mapax 直接处理^[16].

对于 pointing 模式的处理, 以图 1 为例: 每次 pointing 模式观测包含两次十字形扫描, 扫描方向为沿地平坐标方位 (Azimuth) 方向扫描两次, 俯仰 (Elevation) 方向扫描两次. 单次扫描采用高斯加直线来拟合, 拟合公式为 $S = a_1 \exp[-(\frac{t-a_2}{a_3})^2] + Kt + S_0$, 公式中 a_1 、 a_2 、 a_3 、 K 、 S_0 为拟合参数, t 是观测时间, 其中高斯成份为目标的贡献, 直线成份来自天空背景、地面辐射等. 地面辐射随着地平高度的增加迅速下降, 因此观测时的基线经常是倾斜的. 对于两次十字扫描, 我们用椭圆高斯来拟合目标的流量密度: 将 4 次峰值的平均值记为 S_p ; 椭圆高斯的长轴 θ_{maj} 和短轴 θ_{min} 可由两个扫描方向的半高全宽 (单位 s) × 扫描速度 (2'/s) 求得. 目标的积分流量密度由下式得到:

$$S = \begin{cases} S_p \frac{\theta_{\text{maj}} \theta_{\text{min}}}{\theta^2}, & \theta_{\text{min}} > \theta, \\ S_p \frac{\theta_{\text{maj}}}{\theta}, & \theta_{\text{maj}} > \theta > \theta_{\text{min}}, \\ S_p, & \theta > \theta_{\text{maj}}. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\theta = 9.5'$, 为望远镜观测束宽度.

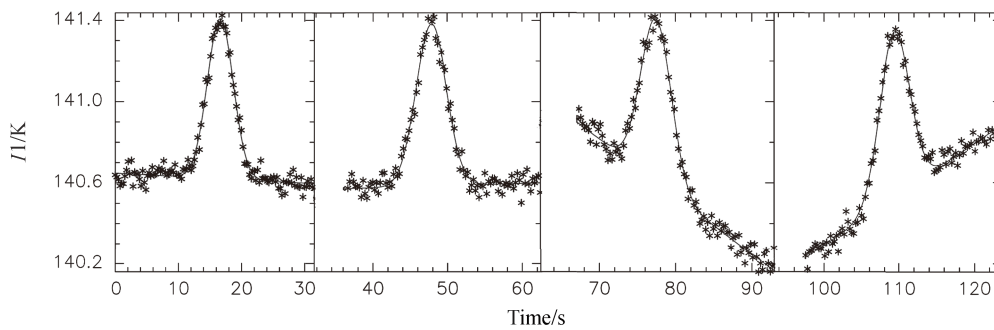


图 1 用 pointing 模式观测强源时得到的 $I1$ 通道数据. 实线为高斯加直线拟合结果.

Fig. 1 The data from channel $I1$ in the pointing mode to observe a strong calibration source. The solid lines represent the best Gaussian and linear fitting results.

对于 onoff 模式, on 位置接收到的射电强度 $S_{\text{total}}(t) = S_{\text{star}}(t) + S_{\text{bg}}(t)$, 其中 $S_{\text{bg}}(t)$ 为背景强度, 包括地面辐射、天空背景、系统噪声以及视场内其它射电源的贡献. 随着观测时间推移, 地面辐射随目标位置的变化而变化, 因此各 off 位置接收的射电流量密度会随时间变化, 我们利用二次拟合得到各 off 位置射电流量密度随时间变化关系 $S_i(t)$, $i=1,2,3,4$, 然后以 4 个 off 点强度的平均值作为目标处的背景: $S_{\text{bg}}(t) = \frac{1}{4} \sum S_i(t)$, $i=1,2,3,4$, 则恒星的射电流量密度为 $S_{\text{star}}(t) = S_{\text{total}} - S_{\text{bg}}(t)$. 经过检查, 发现 on 与 off 位置的 $10'$ 内的射电源强度基本不随时间变化, 数值比地面辐射要小.

对单次观测拟合后, 还需要进行定标校准和数据拼接. 一级校准源 3C286 在 6 cm 波段的流量密度为 7.5 Jy, 偏振位置角为 33° , 线偏振度为 11.3%. 其它的一级偏振校准源还有 3C48 和 3C138, 其流量密度、偏振位置角和偏振度分别为 (5.5 ± 0.1) Jy、 $108^\circ \pm 2^\circ$ 、4.2% 和 (3.9 ± 0.1) Jy、 $169^\circ \pm 1^\circ$ 、10.8%. 二级校准源从 VLA 校准源表中选取, 与观测目标相距小于 $10'$. 对一级校准源多次观测分别求得 $I1$ 、 $I2$ 、 U 和 Q 的一级校准因子, 并通过线性拟合得到一级校准因子随时间变化情况; 然后利用一级校准因子校准二级校准源, 以校准后的二级校准源多次观测的平均值为标准值, 用标准值除以观测值得到二级校准因子, 同时得到二级校准因子随时间变化情况; 最后利用二级校准因子来校准观测恒星目标, 得到目标的 $I1$ 、 $I2$ 、总强度 $I = \frac{1}{2}(I1 + I2)$. 对于偏振参量 U 和 Q , 我们先进行星位角的校准, 再利用一级偏振校准因子来校准它们的强度. 最后将校准后的结果按照时间顺序拼接, 得到恒星的射电光变曲线.

3 结果和分析

我们对两个恒星系统 V772 Her 和 β Per 进行了观测, 表 2 是两个恒星系统的参数. 我们通过数据处理得到恒星的射电光变曲线, 并选取总强度 $I > \bar{I} + 3\sigma$ 为标准判断恒星经历射电耀发, 其中 \bar{I} 为总强度的平均值.

表 2 两颗恒星 V772 Her 和 β Per 的基本参数Table 2 Basic parameters for two stars V772 Her and β Per

Parameter	V772 Her	β Per
R.A.(J2000)	18h 05m 49.7114s	03h 08m 10.1315s
Dec(J2000)	+21°26'45.233"	+40°57'20.332"
Binary class	RS CVn	Algol
Masses of two stars(M_{\odot})	1.0 & 0.6	2.9 & 3.5
Distance(pc)	41.89	28.5±0.8
Spectral type	G0V & M0V	B8V & K2IV
Period(d)	0.88	2.87
Orbital inclination	77°±7°	81.4°±0.2°
2nd calibrator	J1759+237	J1902+315

图 2 是 V772 Her 2011 年 4 月 13 日 (HJD: 2455664) 的观测结果, 左图为射电光变曲线, 从上到下依次为二级校准源总强度 Cal , 恒星总强度 I , 斯托克斯参量 U 、 Q , 线偏振强度 PI 和偏振位置角 PA , 虚线为 $\bar{I} + 3\sigma$ 线和 $\overline{PI} + 3\sigma$ 线; 右图是恒星的射电耀发的放大图, 从上到下依次为总强度 I 、望远镜俯仰 El 、方位 AZ 和校准信号 Ref . 我们测得总强度平均值 $\bar{I} = 8.2$ mJy, 与前人观测相符^[10], 总强度的标准差 $\sigma = 26.8$ mJy, 则判定强度大于 $\bar{I} + 3\sigma = 88.6$ mJy 时为恒星耀发. 我们在 22:33UT 处发现有一处明显的结构 (图 2 右图). 由数据可以看出: 望远镜俯仰和方位平稳, 说明跟踪稳定; 参考信号稳定, 说明系统稳定; 因此总强度的变化来自恒星. 该耀发持续约 2 min, 峰值强度 257.6 mJy, 平均线偏振度约 30%, 偏振位置角 PA 约 4°, 推测耀发时射电辐射可能来自回旋同步辐射或同步辐射. 其它时间的偏振强度也偶有超出 $\overline{PI} + 3\sigma$, 但是对应的总强度无明显变化, 我们认为可能来自仪器或地面辐射等影响.

β Per 的两次观测结果在图 3 显示, 具体说明同图 2 左图. 在 2011 年 4 月 13 日观测中, 我们测得 $\bar{I} = 183.7$ mJy, 总强度的标准差 $\sigma = 64.3$ mJy, 则耀发判定标准为 $I > \bar{I} + 3\sigma = 376.6$ mJy. 我们在 02:13UT 处发现耀发结构, 图 4 为该耀发的放大图, 具体说明同图 2 右图. 同样根据望远镜方位、俯仰及参考信号的稳定程度, 我们判定总强度的变化来自恒星. 该耀发持续约 1 min, 峰值强度 444.5 mJy. 耀发时有可能与之对应的微弱的线偏振, 线偏振度约 8%, 偏振位置角约 11°. 对比 2011 年 11 月 30 日 (HJD: 2455895) 的观测结果发现: 4 月 13 日观测基线约 180 mJy, 11 月 30 日观测基线约 10 mJy. 因此推断 4 月 13 日观测时 β Per 可能正处于长期缓慢变化中, 一个短暂的耀发附加其上.

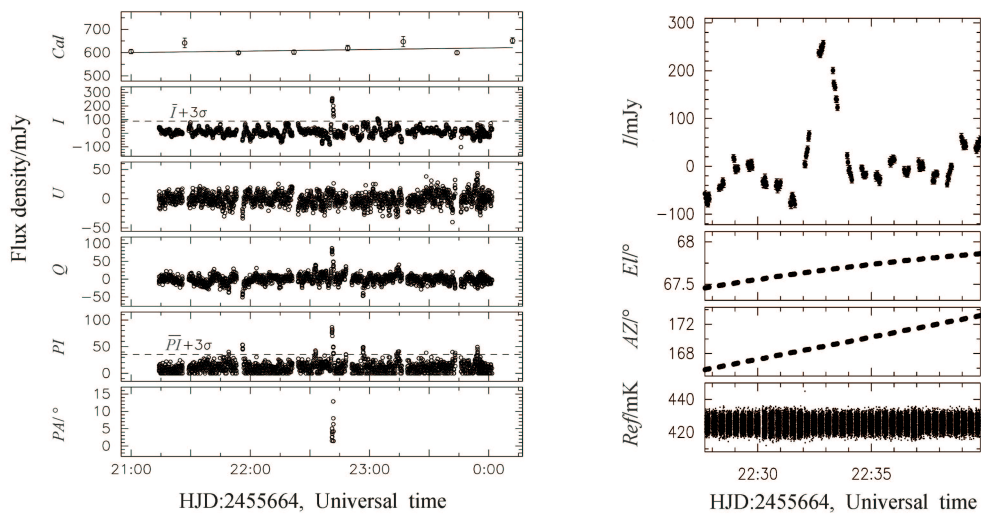


图 2 在 6 cm 波段 V772 Her 的射电光变曲线 (左图) 和耀发 (右图)

Fig. 2 Radio light curve (left panel) and flare (right panel) for star V772 Her at 6 cm band

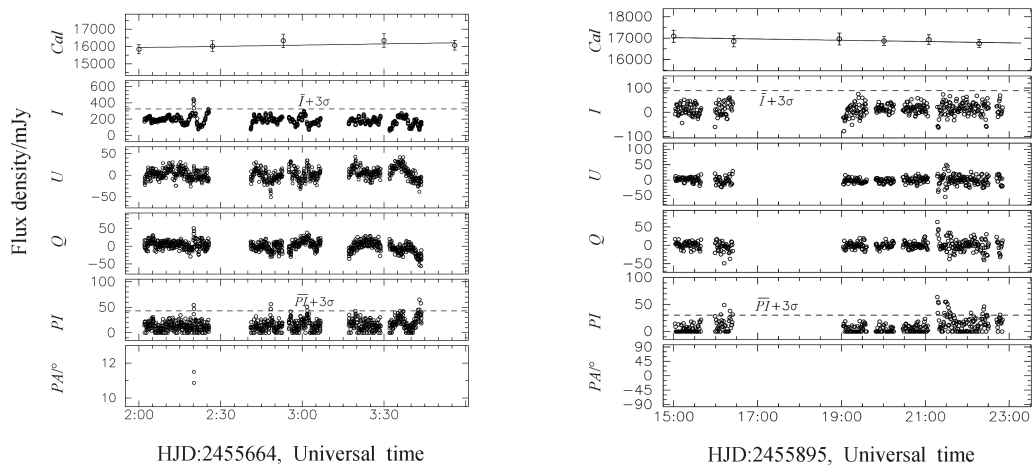


图 3 在 6 cm 波段两次观测 β Per 得到的射电光变曲线. 左图为 2011 年 4 月 13 日的观测, 右图是 2011 年 11 月 30 日的观测.

Fig. 3 The radio light curves for star β Per at 6 cm band on 2011 April 13 (left panel), and 2011 November 30 (right panel)

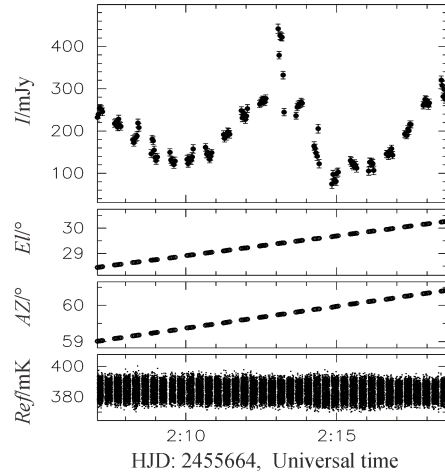


图 4 6 cm 波段 2011 年 4 月 13 日观测到 β Per 的射电耀发

Fig. 4 The radio flare for star β Per at 6 cm band on 2011 April 13

4 结论和讨论

恒星的射电辐射与恒星活动和双星演化密切相关, 对恒星射电辐射的探测可以对恒星的磁场、耀发、辐射特性等进行研究, 它逐渐成为天文研究中的重要领域. 但是目前国内几乎没有针对恒星进行的射电观测. 我们利用国内小望远镜对恒星 V772 Her 和 β Per 进行了射电偏振观测试验. 探测到 V772 Her 的射电耀发现象, 耀发持续约 2 min, 峰值强度 257.6 mJy, 线偏振度约 30%, 偏振位置角约 4° , 辐射机制可能为回旋同步辐射或同步辐射. 我们还在 6 cm 波段探测到恒星系统 β Per 的耀发和可能与之相关的偏振辐射. 由于该辐射线偏振度较低, 我们推测其冕区或存在消偏振机制. 通过对比不同时期探测的基线水平, 我们推断可能探测到该星的缓变成份.

观测试验中发现, 因为小望远镜的灵敏度和分辨率有限, 对观测目标提出了一些苛刻要求: (1) 目标必须是已知的较强射电源, 否则很难探测和判断; (2) 乌鲁木齐 25 m 望远镜观测束宽 $9.5'$, 因此目标周围 $10'$ 内不能有强源, 否则会对观测造成一定影响, 同时 onoff 模式观测时 off 位置 $10'$ 内也要尽量无明显射电结构.

近几年中国加快了大型望远镜的建设步伐, 如已经开工建设的 FAST、上海 65 m 射电望远镜、计划中的乌鲁木齐 110 m 射电望远镜以及提议建设的 China-ART^[17] 等. 恒星射电将是中国望远镜联网达到一定灵敏度和分辨率后必然开展的课题, 势必成为国内大望远镜在科学上的突破点之一. 我们的观测试验仅仅为将来利用国内射电望远镜做恒星射电研究提供了一些初步经验.

致谢 感谢中国科学院新疆天文台南山基地工作人员对本观测的协助.

参 考 文 献

- [1] Güdel M. ARA&A, 2002, 40: 217
- [2] Paredes J M. EAS, 2005, 15: 187
- [3] Berger E, Rutledge R E, Phan Bao N, et al. ApJ, 2009, 695: 310
- [4] Bastian T S. SSRv, 1994, 68: 261
- [5] Wendker H J. A&A, 1995, 109: 177
- [6] Peterson W M, Mutel R L, Güdel M, et al. Natur, 2010, 463: 207
- [7] Massi M, Menten K, Neidhöfer J. A&A, 2002, 152: 382
- [8] Drake S A, Simon T, Linsky J L. AJ, 1986, 91: 1229
- [9] Kundu M R, White S M. MmSAI, 1992, 63: 715
- [10] Drake S A, Simon T, Linsky J L. ApJS, 1989, 71: 905
- [11] Eker Z, Ak N Filiz, Bilir S, et al. MNRAS, 2008, 389: 1722
- [12] Fox D C, Linsky J L, Veale A. A&A, 1994, 284: 91
- [13] Richards M T, Waltman E B, Ghigo F D, et al. ApJS, 2003, 147: 337
- [14] Wade C M, Hjellming R M. Natur, 1972, 235: 270
- [15] Gibson D M, Viner M R, Peterson S D. ApJ, 1975, 200: 143
- [16] Sun X H, Reich W, Han J L, et al. A&A, 2006, 447: 937
- [17] 韩金林. 科学, 2009, 1: 63

Polarization Observation Experiments for Radio Flares of Stars at 6 cm Band

BAI Jian-yong¹ HAN Jin-lin² GAO Xu-yang² WANG Chen² ZHANG Li-yun¹

(¹ Department of Physics, College of Science, Guizhou University, Guiyang 550025)

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

ABSTRACT The radio continuum and polarization observations of the stars V772 Her and β Per are carried out with the Urumqi 25 m radio telescope at 6 cm band. We use the mapping mode to observe the first calibration source, the pointing mode to observe the second calibration source, and the onoff mode to observe star object. The light curves of stars are obtained after data processing and calibration. We detected a radio flare from star V772 Her on 2011 April 13. The linear polarization fraction of this flare is about 30%, and the polarization angle is about 4°. We detected another flare from β Per on 2011 April 13. A possible related weak linear polarization may also be detected. Our observations rank first in detecting the radio flares of stars with the Chinese domestic radio telescope.

Key words stars: flare, methods: data analysis, polarization