

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.02.07

# 天马望远镜连续谱观测系统

董 健<sup>1,2</sup>, MUFAKHAROV Timur<sup>1</sup>, 刘庆会<sup>1,2</sup>, 沈志强<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 射电天文重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 天马望远镜是目前亚洲最大的全方位可转动的射电望远镜。连续谱观测对于天马望远镜具有重要意义。主要介绍天马望远镜连续谱观测系统的相关信息及其实现情况, 包括: 天马望远镜连续谱观测的过程、天马望远镜连续谱观测系统的硬件和软件系统的组成, 以及连续谱观测系统的测试观测结果。在 C 波段 6.5 GHz 的观测结果表明: 连续谱观测系统可实现单点观测和成图观测。修正后指向误差的平均值为 2.2", 均方根误差为 4.3"。目前该系统已用于天马望远镜的连续谱观测, 取得了较好的结果, 验证了系统的有效性。

**关 键 词:** 望远镜; 连续谱; 数据处理; 观测控制

**中图分类号:** P111.44      **文献标识码:** A

## 1 引 言

天马望远镜是目前亚洲最大的全方位可转动的射电望远镜。该望远镜主反射面直径为 65 m, 由 14 圈共 1008 块高精度实面板单元拼装而成, 配备了 L, S/X, C, Ku, K, X/Ka, Q 共 7 套接收机, 对应的观测波长范围为 7~210 mm。天马望远镜在中国射电望远镜历史上首次采用了主动反射面系统, 其调整后的主反射面精度的均方根误差 (root mean square, RMS) 达到了 0.28 mm, 1~50 GHz 频率的 8 个波段各仰角的观测效率均达到 50%, 达到国际先进水平<sup>[1-3]</sup>。

连续谱观测对于天马望远镜具有重要意义。首先, 连续谱观测数据可用于测试望远镜的性能, 连续谱观测系统是天马望远镜的必备系统; 其次, 通过多波段的连续谱观测, 我们可以确定源的谱指数, 这对于银河系小尺度磁场、超新星遗迹和银河系辐射模板等课题的研究都具有重要意义; 最后, 对连续谱流量的监测数据有助于研究射电源时变特性和星际介质的结构。

本文主要介绍天马望远镜连续谱观测系统的相关信息及其实现情况, 包括连续谱观测过

---

收稿日期: 2018-07-24; 修回日期: 2018-09-25

资助项目: 国家自然科学基金 (11503070, U1631119, 11590781, 11590784); 中国科学院青年创新促进会基金 (2018305)

通讯作者: 董健, dongjian@shao.ac.cn

程、系统的硬件和软件组成、数据处理算法，以及测试观测情况等。

## 2 连续谱观测过程

天马望远镜的连续谱观测可分为单点观测和成图观测两类。单点观测通过十字扫描来实现，每组十字扫描由多次沿着赤经和赤纬方向的子扫描构成；成图观测通过 OTF (on-the-fly) 扫描实现，可认为由多次单点观测组合而成。单点观测和成图观测的数据定标采用快速周期性噪声注入方法。

在观测中，我们穿插流量校准源，以校准目标源流量。望远镜的指向误差会影响连续谱流量测量的精度和成图的准确性，因此，在观测流量校准源的同时，我们对指向误差进行快速修正。

## 3 连续谱观测系统的硬件和软件组成

### 3.1 系统结构

为了最大化复用设备，天马望远镜连续谱观测系统与谱线 OTF 观测系统共用类似的系统<sup>[4]</sup>，如图 1 所示。该系统由控制软件、天线、接收机、中频传输系统、连续谱终端和数据处理程序组成。各组成部分的关系如下：控制软件协调天线、接收机、中频传输系统和连续谱终端协同完成观测，并记录各设备状态信息；单点和成图观测完成后，数据处理程序快速处理观测数据，并将数据上传至 FTP 服务器。观测者可从 FTP 服务器下载观测数据，进行后处理。

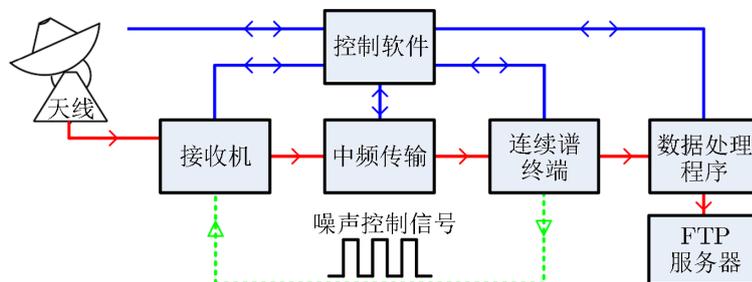


图 1 天马望远镜连续谱观测系统

观测系统采用周期性噪声注入定标方式(周期为 50 ms)。噪声源开关控制信号由连续谱终端产生，并通过光纤传输至接收机的噪声源。连续谱终端采用 DIBAS (digital backend system) 终端，观测模式为 Model。Model 共有 1 024 个通道，每个通道的带宽为 1 464.8 kHz，因此，连续谱观测的最大记录带宽为 1.5 GHz。

### 3.2 控制软件

控制软件从上往下可分为逻辑控制层、设备控制层和设备层，如图 2 所示。逻辑控制层实现连续谱观测逻辑，由 Python 语言实现，采用模型-视图-控制器 (model-view-controller,

MVC) 模式。连续谱观测纲要采用文本格式, 便于逻辑控制层的读取和解析。在纲要中, 我们定义了单点观测和成图观测的观测参数, 包括扫描范围、扫描速度、行间隔、观测频率和带宽等信息。逻辑控制层按顺序读取纲要信息, 以进行观测。由于在观测过程中需要进行指向修正, 因此在纲要中需要对指向修正的十字扫描进行特殊标记。逻辑控制层读取到此标记时, 会自动进行相应的处理。设备控制层由 Python 和 C++ 实现, 它将设备软件化, 并提供一组软件接口供逻辑控制层使用。设备层由天线、接收机、连续谱终端和中频传输等硬件设备组成。

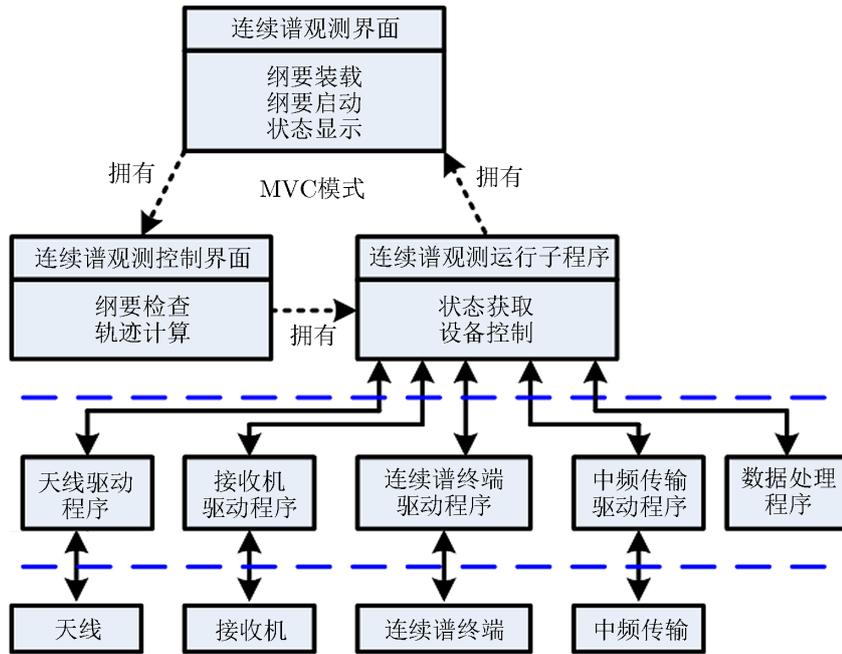


图 2 连续谱控制软件结构图

### 3.3 数据处理算法

数据预处理程序采用 Python 编写。观测完成后, 控制软件发送观测标记符 (每组观测数据都有一个自动生成的唯一的标记符) 给数据预处理程序。数据预处理程序根据观测标记符查找状态数据和观测数据后, 再对数据进行处理。数据预处理流程图如图 3 所示。

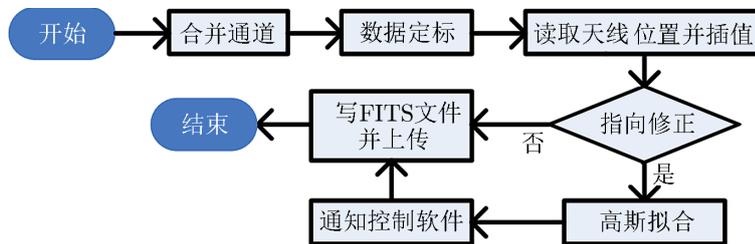


图 3 数据预处理流程图

数据预处理的步骤如下：首先，数据预处理程序读取连续谱终端的记录数据，并根据观测纲要中的带宽值，合并数据通道。由于采用了快速周期性噪声注入定标方法，合并后的观测数据包括有噪声注入和无噪声注入的两组数据  $P_{\text{on}}^{\text{Cal}}(t)$  和  $P_{\text{off}}^{\text{Cal}}(t)$ ，其中  $t$  为数据记录时间。采用式 (1) 和式 (2) 可分别获得定标因子  $\tau$  和定标后的数据  $M(t)$ 。

$$\tau = \left\langle \frac{T_{\text{mean}}^{\text{Cal}}}{P_{\text{on}}^{\text{Cal}}(t) - P_{\text{off}}^{\text{Cal}}(t)} \right\rangle, \quad (1)$$

$$M(t) = \frac{P_{\text{on}}^{\text{Cal}}(t) + P_{\text{off}}^{\text{Cal}}(t)}{2} \times \tau = P_{\text{off}}^{\text{Cal}}(t) + \frac{T_{\text{mean}}^{\text{Cal}}}{2}, \quad (2)$$

其中， $T_{\text{mean}}^{\text{Cal}}$  为带宽范围内的平均噪声定标值， $M(t)$  中包含了一半的  $T_{\text{mean}}^{\text{Cal}}$  值。

然后，数据预处理程序读取天线位置数据  $P_a(t)$ ，并根据  $M(t)$  中的时间值  $t$  对  $P_a(t)$  进行线性插值，得出  $M(t)$  的位置值，从而得到  $M(p)$ ，其中  $p$  为所述赤经或赤纬的位置数据。

接着，如果需要进行指向修正，数据预处理程序则会对  $M(p)$  按式 (3) 进行线性和高斯拟合，得出赤经和赤纬方向的指向误差  $m$ ，并发送给观测软件。控制软件将赤经和赤纬方向的指向偏差转换为方位和俯仰方向的指向误差后，再对指向快速修正。

$$M(p) = k \times p + b + a \times \exp \left[ -2 \ln 2 \left( \frac{p - m}{\text{HPBW}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

其中， $k$  为基线斜率， $b$  为基线常数， $a$  为高斯函数幅度， $\text{HPBW}$  为半功率波束宽度。如果不需要进行指向误差修正，则直接跳转到下一步。最后，数据预处理程序将  $M(p)$  记录到 FITS 文件中，并将此数据上传至 FTP 服务器<sup>[5]</sup>。

观测者下载数据后，对数据进行后处理。后处理的流程图如图 4 所示。预处理数据包括目标源的数据和定标源的数据两部分。我们对观测数据移除基线，并计算指向偏差量、幅度、 $\text{HPBW}$  和  $\text{RMS}$ 。数据后处理程序根据定标源计算出增益曲线和央斯基/开尔文转换系数，以校准目标源的流量。在后处理中，数据后处理程序绘制出目标源和定标源的观测数据，以及对观测数据进行质量控制。如果观测数据的质量较差，则人工删除数据，不对其作进一步处理。

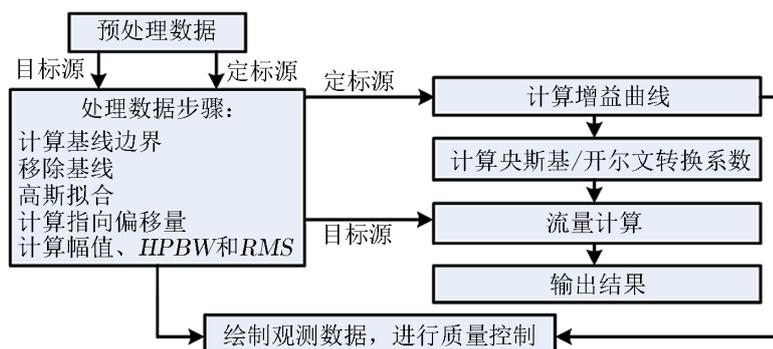
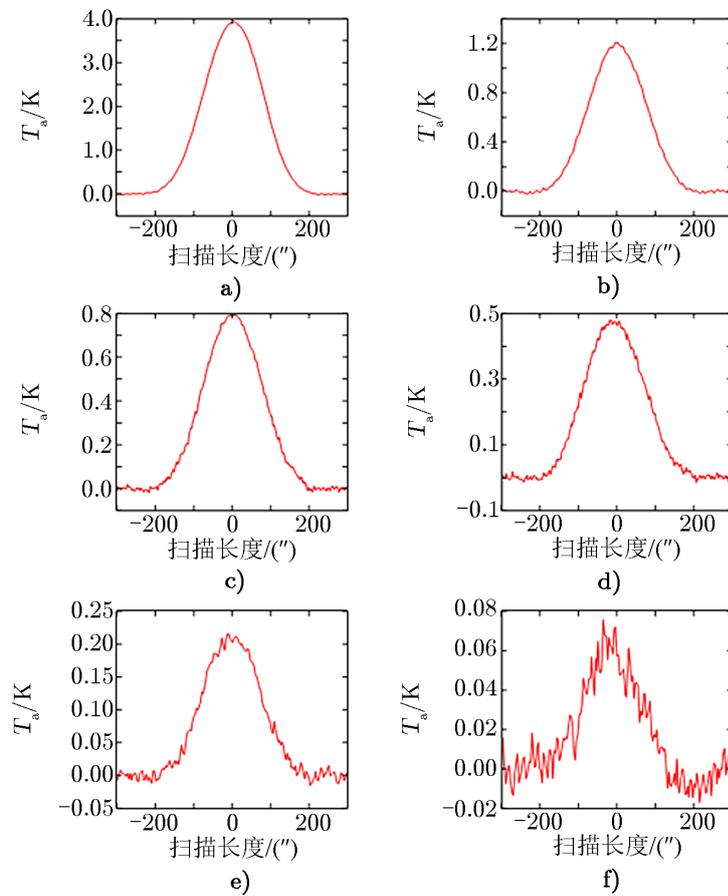


图 4 数据后处理流程图

## 4 实际观测

我们选取了不同流量的射电源进行观测, 以验证连续谱观测系统的有效性。观测时天气晴朗, 观测频率为 C 波段 6.5 GHz, 带宽为 500 MHz, 噪声注入周期为 50 ms, 连续谱终端记录时间为 0.1 s (连续谱终端记录的数据分为 2 个 50 ms)。我们分别进行了单点观测和成图观测。

我们在 2017 年 12 月选择了 3C286, 1354+195, Mrk501, B21438+38B, B21420+32 和 0421+143 共 6 颗不同流量的射电源进行间断性的单点观测, 所采用的天线扫描速度为  $20''\cdot\text{s}^{-1}$ , 扫描长度为  $700''$ 。共计完成有效扫描 210 次。在观测中系统温度维持在 22 K 左右。移除基线后的观测结果如图 5 所示, 探测天线亮温度  $T_a$  可达 0.06 K。校准后的流量及误差结果如表 1 所示。



注: 从 a) 到 f) 分别为 3C286, 1354+195, Mrk501, B21438+38B, B21420+32 和 0421+143 共 6 颗射电源的高斯轮廓。

图 5 不同流量的射电源观测结果图

表 1 6 颗射电源的校准结果

射电源名	流量	误差量	射电源名	流量	误差量
3C286	6.10	$\pm 0.06$	B21438+38B	0.73	$\pm 0.05$
1354+195	1.84	$\pm 0.05$	B21420+32	0.31	$\pm 0.05$
Mrk501	1.31	$\pm 0.05$	0421+143	0.09	$\pm 0.06$

天马望远镜在中国的射电望远镜连续谱观测中首次采用了指向快速修正方法。在 6 颗射电源的观测中, 我们均选择了观测目标附近的一颗强流量射电源进行指向快速修正, 修正后的指向误差分布如图 6 所示, 指向误差的平均值为  $2.2''$ , 均方根误差为  $4.3''$ 。我们对射电源 3C286 进行了对准-偏开连续谱观测, 以检验单点十字扫描的正确性。对准-偏开观测得到的流量为 6.15 Jy, 与十字扫描观测结果吻合。

2018 年 9 月 10 日我们选择了猎户星云的核心区域进行成图观测。扫描的中心坐标为 RA 05:32:41, DEC  $-05:34:53$ 。扫描范围为  $40' \times 40'$ , 天线扫描速度为  $0.8(')\cdot s^{-1}$ , 行间隔为  $1'$ , 一次观测的总时间约为 45 min, 系统温度约为 23 K。观测结果如图 7 所示。所得到的观测结果与 GBT 在 X 波段的观测结果类似<sup>[6]</sup>。

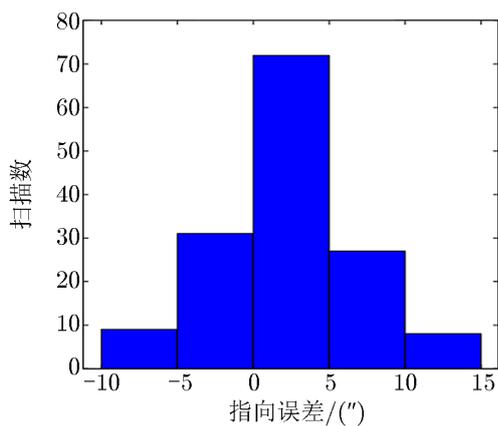
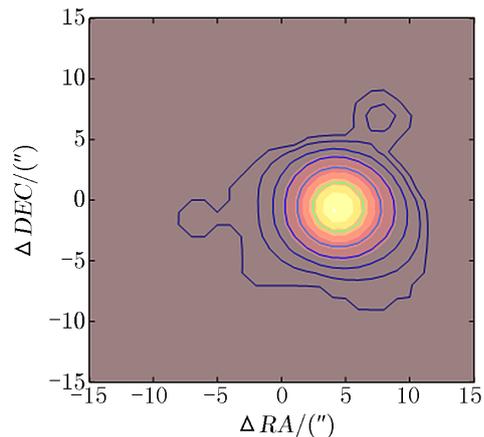


图 6 指向误差分布图



注: 采用  $2^{-n}$  的等高线绘制, 最高流量为 155 Jy。

图 7 对猎户星云连续谱成图观测结果

## 5 总结与展望

目前, 连续谱观测系统已用于天马望远镜的连续谱观测, 并已经取得较好的结果, 验证了连续谱观测系统的有效性。今后, 我们将对连续谱观测系统进行升级, 以满足偏振观测的要求。

## 致谢

感谢中国科学院新疆天文台刘俊对天马望远镜连续谱观测系统的研发工作给予的指导和帮助。

## 参考文献:

- [1] Li J, Shen Z Q, Wang J Z, et al. ApJ, 2017, 849: 115
- [2] Yang K, Chen X, Shen Z Q, et al. ApJ, 2017, 846: 160
- [3] Dong J, Zhong W Y, Wang J Q, et al. IEEE Trans Antennas Propag, 2018, 66: 2044
- [4] 董健, 吴亚军, 袁瑾, 等. 天文学进展, 2016, 34: 212
- [5] Liu X, Yang P P, Liu J, et al. MNRAS, 2017, 469: 2457
- [6] <http://images.nrao.edu/76>

# Continuum Observing System of the Tianma Radio Telescope

DONG Jian<sup>1,2</sup>, MUFAKHAROV Timur<sup>1</sup>, LIU Qing-hui<sup>1,2</sup>, SHEN Zhi-qiang<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;  
2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The Tianma Radio Telescope (TMRT) is the largest and fully steerable radio telescope in Asia. The continuum observation is important for the TMRT. In this paper, we provide the information and implementation of the continuum observing system in the TMRT. The specific contents are as follows: section 2 demonstrates the continuum observing process, section 3 presents the hardware and software systems of the TMRT continuum observing system, section 4 shows the test observation results in C band at 6.5 GHz. The system can be used for single-point and map observation. The mean and root mean square of the pointing error is 2.2'' and 4.3'' after correction. At present, the continuum observing system has been used as a regular observation mode of TMRT, and has obtained good results which verifies the reliability of the system.

**Key words:** telescopes; continuum observation; data reduction; observation control