

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.02.05

天马望远镜谱线 OTF 观测系统

董 健¹, 吴亚军¹, 袁 瑾¹, 李尚活^{1,2}, 李 娟¹,
王均智¹, 陈 曦¹, 刘庆会¹, 沈志强¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: OTF (On-The-Fly) 观测模式是目前单天线最有效的谱线成图观测技术, 广泛应用于单天线的谱线成图观测。主要介绍 OTF 观测模式在天马望远镜的实现情况。首先介绍天马望远镜 OTF 观测模式的观测过程和基本观测参数; 接着分别对天马望远镜 OTF 观测系统的结构、观测控制软件、DIBAS (Digital Backend System) 谱线终端、中频传输系统以及数据预处理软件进行介绍; 最后给出对 W3 区域中的 6 条氢复合线的试观测结果。目前, 天马望远镜的 OTF 观测系统已完成多次对外开放的谱线成图观测, 均取得较好的观测结果, 验证了该系统的有效性。

关键词: 射电望远镜; 分子谱线; OTF 观测模式; 观测系统

中图分类号: P111.44

文献标识码: A

1 引 言

天马望远镜 (Tian Ma Telescope) 是目前亚洲最大、全方位可转动的大型射电望远镜。该望远镜主反射面直径为 65 m, 由 14 圈共 1 008 块高精度实面板单元拼装而成, 共配备 L、S/X、C、Ku、K、X/Ka、Q 7 套接收机。对应的观测波长范围从最长 21 cm 到最短 7 mm, 在此波长范围内涵盖丰富的分子谱线 (如羟基脉泽谱线、水脉泽、氨分子、甲醇和一氧化硅脉泽等), 对这些谱线进行观测是研究星际分子辐射区的物理环境、运动学和天体演化的有力手段^[1]。天马望远镜凭借其高灵敏度和宽频率覆盖范围等优势, 将在分子谱线天文观测研究中发挥极其重要的作用。

OTF 观测模式是目前单天线最有效的谱线成图观测技术, 广泛应用于各望远镜的谱线成图观测。在 OTF 观测中, 天线均匀、快速地扫过一个天区, 谱线终端快速记录观测数据, 与传统的位置切换观测模式相比, OTF 观测模式具有以下优点^[2, 3]: (1) 通过减少天线转动

收稿日期: 2015-12-17; 修回日期: 2016-02-02

资助项目: 国家自然科学基金 (11503070, 11590781); 天文专项—高精度测量与控制 (Y587141002); 中国科学院上海天文台青年创新基金 (Y597061009)

通讯作者: 董健, dongjian@shao.ac.cn

和振荡时的无效时间, 以及采用大量 ON 点测量共用一个 OFF 点测量的观测方法来提高观测效率; (2) 快速观测整个观测区域, 以减少系统变化 (如大气情况、系统增益、望远镜指向等) 对单幅图的影响, 而图之间的系统变化, 可通过加权平均以及相关技术予以消除; (3) 数据记录频率高于 Nyquist 采样频率, 不会造成空间分辨率的丢失。

本文主要介绍天马望远镜谱线 OTF 观测系统的相关信息以及实现情况, 包括 OTF 观测过程和参数、系统的软件和硬件组成、数据预处理算法以及测试观测情况等。

2 OTF 观测过程和参数

天马望远镜 OTF 观测模式支持赤经、赤纬以及银经、银纬两种扫描方式, 采用快速周期性噪声注入定标方法^[4], OFF 点测量采用位置切换方式。其扫描过程如图 1 所示: 扫描区域宽度为 L_y 、每个扫描行之间的间距为 L_s , 则扫描行数 $N_{\text{row}} = \left\lfloor \frac{L_y}{L_s} \right\rfloor + 1$ 。一个扫描行可分为加速段、匀速段和转移段, 长度分别为 L_a 、 L_x 、 L_b 。扫描时, 望远镜伺服驱动以匀加速方式驱动望远镜达到匀速段所需的运行速度 V_{scan} ; 接着望远镜以 V_{scan} 速度通过匀速段; 最后望远镜转移到下一行或者 OFF 点。望远镜与 DIBAS 谱线终端在每行的起始位置和 OFF 点同步运行。每个扫描行和 OFF 点为独立的观测, 单独记录数据并进行相应的观测调整。为增加 OTF 扫描的均匀性, 每次 OTF 扫描由两组互垂直的扫描构成。以下分析以一组扫描为例。

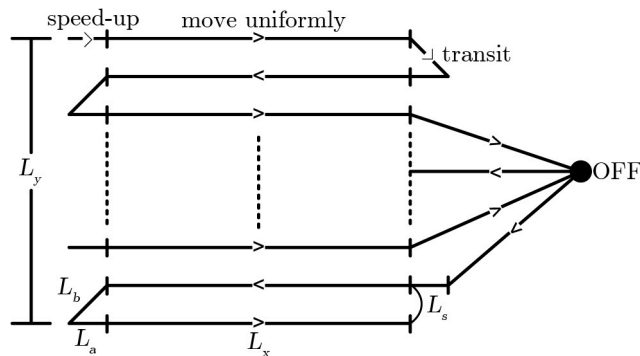


图 1 OTF 扫描过程示意图

设 N_{rpo} 、 t_{off} 、 t_{syn} 、 t_{tran} 分别为 OFF 点观测频率、单次 OFF 点测量时间、望远镜与谱线终端同步时间 (约 6 s)、望远镜转移到下一行或者 OFF 点的总时间, 则一次 OTF 扫描的总时间 t_{tot} 为:

$$t_{\text{tot}} = N_{\text{row}} \times \left(\frac{2L_a + L_x}{V_{\text{scan}}} + t_{\text{syn}} \right) + \left\lfloor \frac{N_{\text{row}}}{N_{\text{rpo}}} \right\rfloor \times (t_{\text{OFF}} + t_{\text{syn}}) + t_{\text{tran}} \quad (1)$$

t_{tran} 时间约占 t_{tot} 的 20%, 则公式可简化为:

$$t_{\text{tot}} \approx \left\{ N_{\text{row}} \times \left(\frac{2L_a + L_x}{V_{\text{scan}}} + t_{\text{syn}} \right) + \left\lfloor \frac{N_{\text{row}}}{N_{\text{rpo}}} \right\rfloor \times (t_{\text{OFF}} + t_{\text{syn}}) + t_{\text{tran}} \right\} \times 1.2 \quad (2)$$

设望远镜有效观测时间为 t_{eff} ，可得到：

$$t_{\text{eff}} = N_{\text{row}} \times \frac{L_x}{V_{\text{scan}}} . \quad (3)$$

设观测数据网格化间隔为 d ，卷积函数修正因子为 η ，则一幅图的单个网格化点的积分时间 $t_{\text{cell}}^{\text{ON}}$ 为：

$$t_{\text{cell}}^{\text{ON}} = \frac{t_{\text{eff}}}{L_x \times L_y} \times d^2 \times \eta . \quad (4)$$

则一副图中网格化点数 N_{cell} 为：

$$N_{\text{cell}} = \frac{t_{\text{eff}}}{t_{\text{cell}}^{\text{ON}}} . \quad (5)$$

单个网格化点的等效 OFF 积分时间 $t_{\text{cell}}^{\text{OFF}}$ 为：

$$t_{\text{cell}}^{\text{OFF}} = \frac{t_{\text{cell}}^{\text{OFF}}}{N_{\text{cell}}} . \quad (6)$$

一幅图的噪声水平 σ_{cell} 为：

$$\sigma_{\text{cell}} = \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{\Delta v}} \sqrt{\frac{1}{t_{\text{cell}}^{\text{ON}}} + \frac{1}{t_{\text{cell}}^{\text{OFF}}}} , \quad (7)$$

其中， T_{sys} 为系统温度， Δv 为谱线终端的带宽。对于 N 次观测，单一旋向的噪声水平 σ 为：

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{cell}}}{\sqrt{N}} . \quad (8)$$

3 OTF 观测系统的软件和硬件系统组成

3.1 系统结构

天马望远镜谱线 OTF 观测系统如图 2 所示。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、DIBAS 谱线终端，协同完成观测。观测结束后，控制软件发送信息到数据处理服务器，数据处理服务器对观测数据实时预处理，并将数据上传至 FTP 服务器供观测者下载。观测系统采用周期性噪声注入定标方式（周期最短可达 50 ms），噪声源开关控制 TTL 信号由 DIBAS 产生，并通过光端机 (OTR) 传输至噪声源，以实现噪声注入与谱线终端记录的精确同步。

3.2 控制软件

OTF 控制软件采用分层体系结构设计，由逻辑控制层、硬件控制层和硬件层组成，其中逻辑控制层和硬件控制层采用分布式中间件 ICE 连接，如图 3 所示。逻辑控制层用于实现具体的 OTF 观测逻辑，由 Python 语言实现；硬件控制层将硬件设备软件化，提供一组软件接口给逻辑控制层使用。为提高实时性，此部分软件采用 C++ 语言实现。硬件控制层是一个公用层，其他观测模式（例如谱线单点观测、脉冲星观测）均可使用此层软件；硬件层由设备驱动组成，硬件控制层通过此层软件直接控制硬件设备。

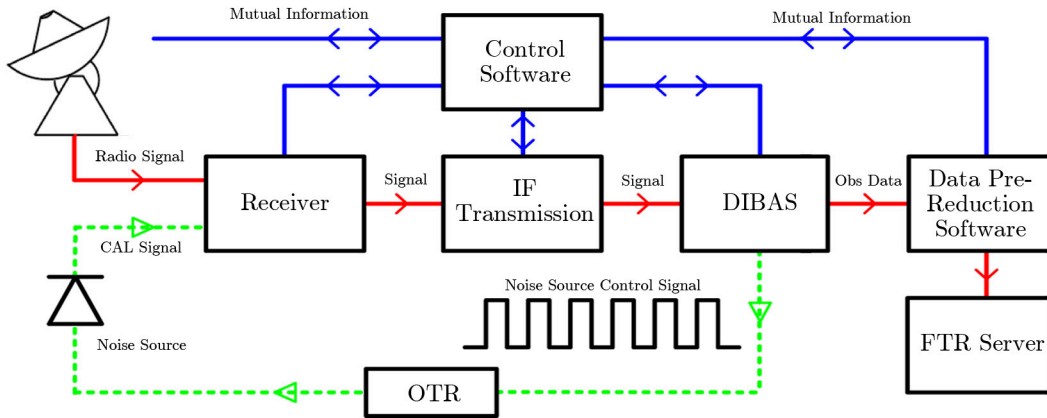


图 2 天马望远镜谱线 OTF 观测系统结构图

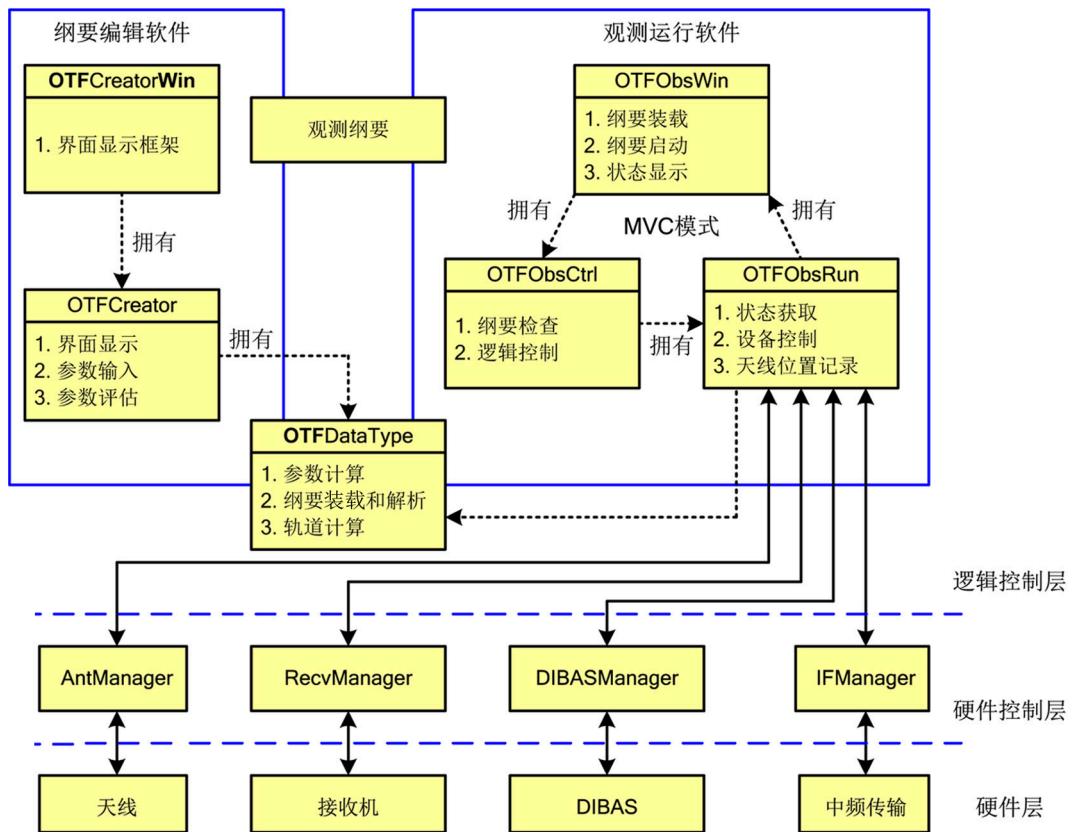


图 3 OTF 控制软件分层体系结构设计图

逻辑控制层是 OTF 控制软件的核心, 由观测纲要编辑软件和观测运行软件两部分组成, 两部分软件通过观测纲要和一个公用类相联系。观测纲要编辑软件供观测者编辑和评估观测参数, 以生成观测纲要, 其中参数计算和评估公式采用本文第 2 章中所示的公式。观测纲要采用通用的 XML 格式, 便于存储、传递和解析。观测运行软件 (界面如图 4 所示) 采用 MVC 设计模型, 最大限度地将硬件设备控制与上层界面解耦合, 便于扩展应用。观测运行软件读取、解析观测纲要, 并按照纲要中的运行参数, 协同硬件设备自动观测。在观测时, 观测运行软件监视设备运行状态, 并以 10 Hz 频率记录天线位置和时间信息, 用于后期的数据预处理。观测前, 观测运行软件根据 DIBAS 终端的输入功率自动设置功率衰减, 将输入功率置于 DIBAS 终端的输入线性范围的中心, 同时根据 DIBAS 的观测模式自动设置本振信号, 以将观测频率置于带通中心。

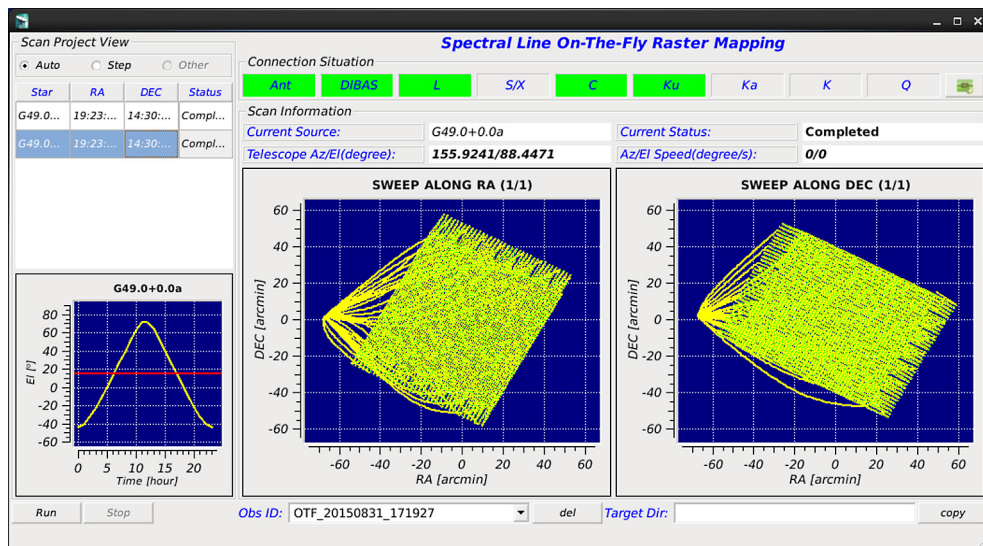


图 4 观测运行软件界面

3.3 DIBAS 谱线终端

DIBAS 谱线终端由美国 NRAO (National Radio Astronomy Observatory) 和上海天文台合作开发完成, 可同时处理三组双偏振中频信号, 最高带宽为 1.5 GHz。其硬件主要由数据采集系统、高性能服务器组和存储器系统三部分组成。数据采集系统将望远镜接收的模拟信号转换为数字信号, 并根据观测模式做相应的预处理, 主要由模拟单元、频率综合模块、模数转换器和 Roach II 处理平台组成。模拟单元对中频模拟信号进行放大和滤波, 放大增益为 38 dB; 滤波器有 1 950 MHz、1 450 MHz、450 MHz 三种带宽, 以对应不同的观测模式。频率综合模块利用氢原子钟的 10 MHz 标频产生 ADC 的采样时钟, 其频率根据观测模式自动设定。模数转换器 ADC 将模拟的信号采样量化以数字的方式输出, 采用 8 位量化, 最高 4 GHz 采样率。Roach II 平台对采样后的数字信号进行预处理, 并组帧通过 10 Gb 网络发送给服务器组。高性能服务器组采用超微服务器架构, 配置 NVIDIA GTX780 GPU 做加

速; 服务器配置 1 Gb 网络用于控制, 10 Gb 光纤网络用于与数据采集系统传输数据, 40 Gb Infiniband 网络与存储器系统作数据的读写。存储器系统目前有 80 TB 的存储空间, 采用 lustre 存储方案, 观测数据采用 FITS 格式记录。

DIBAS 谱线终端支持 29 种不同的观测模式。模式 1, 2, 3 为单边带的宽带模式, 带宽最高达 1 500 MHz, 最高频率分辨率 61 kHz; 模式 4—19 为单边带的窄带模式, 频率分辨率最高可达 0.02 kHz; 模式 20—29 为子带模式, 共有 8 组带宽 24 MHz 或 16 MHz 的子带, 频率分辨率最高达 0.24 kHz。DIBAS 终端提供参数设置、启动、停止、等待等软件接口, 其参数设置也较为灵活, 包括观测模式、单点积分时间、观测时间、观测 ID、观测者名等。

DIBAS 终端既能够提供宽频率覆盖, 又能够提供高分辨率模式, 并且自动化功能强大, 极大提高天马望远镜谱线 OTF 观测能力。

3.4 中频传输系统

中频传输系统主要由宽带光纤传输实现, 硬件主要由宽带光信号收发机、信号选通、下变频、电调衰减、信号分配等单元组成, 核心单元为宽带光信号收发机。宽带光信号收发机可覆盖 0.95~12 GHz 的频率范围, 4 个独立通道。收发机分别置于前端馈源舱和后端终端室, 以实现微波信号的电光和光电转换。观测时, 接收机的微波信号首先输入光信号发射机, 转换成光信号, 通过光纤电缆传输至终端室, 再经光信号接收机重新恢复成微波信号; 接着, 微波信号送进开关矩阵, 该开关矩阵覆盖 1~18 GHz 频率范围, 可以实现任意输出一路信号以及使一路输入信号分成多路输出的功能; 最后信号输入超宽带下变频单元, 将宽带微波信号下变频至 DIBAS 终端可处理频带, 目前可选中频输出带宽有 150~512 MHz、150~1 024 MHz、150~2 048 MHz、100~2 500 MHz 四组。下变频单元内置频率综合器和数控衰减器, 以实现本振控制 and 增益调整。中频传输系统提供功率衰减和本振控制软件接口, 用于 OTF 观测的功率和频率调节。

3.5 数据预处理软件

数据预处理软件采用 Python 编写, 运行在 Linux 系统之上。观测完成后, 控制软件发送观测 ID 到数据预处理服务器, 数据预处理服务器开启数据预处理软件实时处理观测数据。其算法处理流程图如图 5 所示。



图 5 数据预处理算法流程图

预处理软件首先读取每个 OFF 点测量数据 $P_{\text{OFF}}^{\text{Cal}}(f, t)$ 、 $P_{\text{OFF}}(f, t)$ (分别代表有注入噪声数据和无噪声注入的 DIBAS 数值), f 为带通对应的频率, t 为数据记录时间。采用向量式定标算法^[4], 可得:

$$T_{\text{OFF}}(f) = \left\langle T_{\text{Cal}}(f) \times \frac{P_{\text{OFF}}^{\text{Cal}}(f, t) + P_{\text{OFF}}(f, t)}{P_{\text{OFF}}^{\text{Cal}}(f, t) - P_{\text{OFF}}(f, t)} \times \frac{1}{2} \right\rangle, \quad (9)$$

$$P_{\text{OFF}}^R(f) = \left\langle \frac{P_{\text{OFF}}^{\text{Cal}}(f, t) + P_{\text{OFF}}(f, t)}{2} \right\rangle, \quad (10)$$

其中, $T_{\text{Cal}}(f)$ 为噪声源噪声曲线, $T_{\text{OFF}}(f)$ 为每个 OFF 点的时间平均定标值, $P_{\text{OFF}}^R(f)$ 为每个 OFF 点的时间平均功率值。接着读取每个 ON 点测量数据 $P_{\text{ON}}^{\text{Cal}}(f, t)$ 、 $P_{\text{ON}}(f, t)$ (分别代表有注入噪声数据和无噪声注入的 DIBAS 数值), f 为带通对应的频率, t 为数据记录时间。根据每个 ON 点对应的 OFF 点数据, 采用向量式定标算法, 可得:

$$T_{\text{ON}}(f, t) = T_{\text{OFF}}(f, t) \times \left\{ \frac{P_{\text{ON}}^{\text{Cal}}(f, t) + P_{\text{ON}}(f, t)}{2P_{\text{OFF}}^R} - 1 \right\}, \quad (11)$$

其中, $T_{\text{ON}}(f, t)$ 为 ON 点测量数据定标值。然后读入天线位置数据 $P_a(t)$, 利用 $T_{\text{ON}}(f, t)$ 的时间值对 $P_a(t)$ 线性插值, 得出每个 ON 点的位置值, 从而得到 $T_{\text{ON}}(f, t, p)$ 。再对 $T_{\text{ON}}(f, t, p)$ 的频率进行多普勒修正, 然后得到 $T_{\text{ON}}(f', t, p)$ 。将 $T_{\text{ON}}(f', t, p)$ 按照与 Gildas/CLASS 软件相兼容的 FITS 格式文件记录。最后, 数据预处理程序将此数据上传至 FTP 服务器。

4 实际观测

对 W3 进行试观测, 以验证 OTF 观测系统的有效性。观测在 C 波段进行, 波束宽度为 $4'$, 系统温度在 20 K 左右。DIBAS 采用模式 20, 同时观测 6 条氢复合线。观测范围为 $20' \times 20'$, 每副图观测时间约为 30 min, 共观测 25 次。观测完成后, 采用 Gildas/CLASS 软件后处理, 网格化区域大小约为 $1.35'$, 采用高斯卷积函数, 卷积函数修正因子约为 3, 则理论噪声约为 15 mk。图 6 为 H117 α 的谱线积分强度图, 速度积分范围为 $-70 \sim -5$ km/s。图 7 给出中心点位置的 6 条谱线轮廓。观测结果与前期的观测结果相符^[5, 6]。

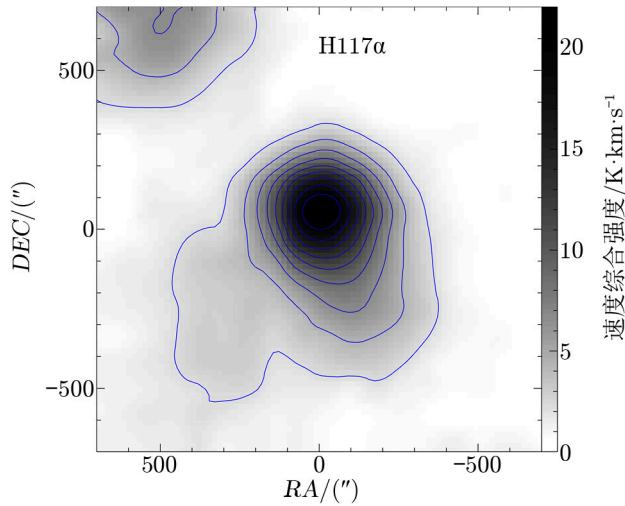


图 6 H117 α 的谱线积分强度图

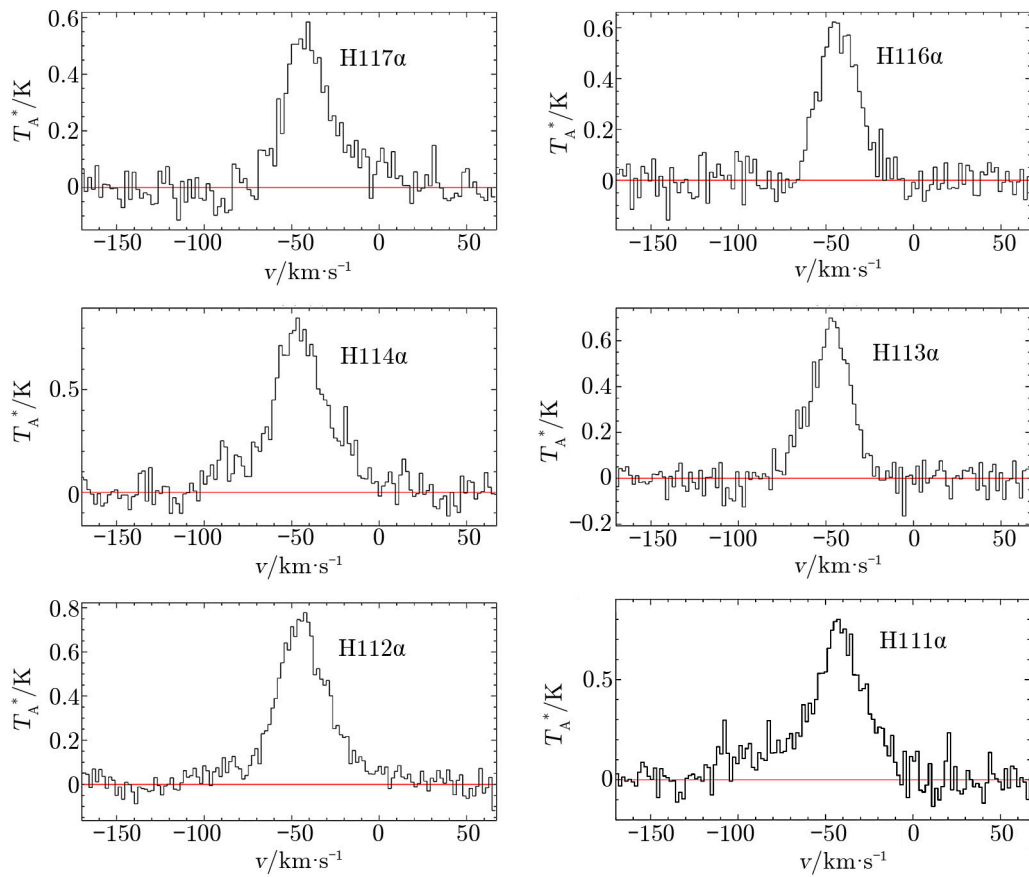


图 7 中心点位置的 6 条谱线轮廓

5 总结与展望

目前 OTF 观测模式已用于天马望远镜的谱线成图观测, 已完成多次对外开放的谱线成图观测, 均得到较好的结果, 基本验证了 OTF 观测系统的有效性。未来, 天马望远镜将配备双波束 K、Q 波段接收系统以及 7 波束 K 波段接收系统, 由于 OTF 系统良好的可扩展性设计, 经过扩展后, 可完全支持今后的谱线成图观测。

致谢

感谢中国科学院紫金山天文台孙继先和中国科学院新疆天文台吴刚对上海天马望远镜谱线 OTF 观测系统的研发工作给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 沈志强. 上海 65 米射电望远镜. 科学, 2013, 65(3): 15

- [2] Mangum J G, Emerson D T, Greisen E W. *A&A*, 2007, 474: 679
[3] Tsuyoshi S, Norio I, Kazuyoshi S, et al. *PASJ*, 2008, 60: 445
[4] Winkel B, Kraus A, Bach U. *A&A*, 2012, 540: 140
[5] Lockman F J. *ApJS*, 1989, 70: 469
[6] Dickel H R, Harten R H, Gull T R. *A&A*, 1983, 125: 320

Spectral Line On-The-Fly Observing System of the Tian Ma Telescope

DONG Jian¹, WU Ya-jun¹, YUAN Jin¹, LI Shang-huo^{1,2}, LI Juan¹,
WANG Jun-zhi¹, CHEN Xi¹, LIU Qing-hui¹, SHEN Zhi-qiang¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The On-The-Fly (OTF) observing mode is the most efficient spectral line imaging technique, which is widely used to perform mapping observations with the single-dish telescopes. The implementation of the OTF mode in the Tian Ma telescope is described in this paper. The specific contents are as follows. Firstly, the OTF observing process and parameters are introduced. Secondly, the system architecture of the OTF observing system, the control software, the DIBAS (Digital Backend System) spectral line backend, the Intermediate Frequency transmission system, and the data pre-reduction algorithm are described. Finally, the six hydrogen recombination lines of the W3 region are presented. At present, the OTF observing system has completed several opening observations, and these observations have obtained good results which verify the OTF system.

Key words: radio telescope; molecular spectral line; OTF observing mode; observing system