

2012 年北京 MST 雷达（香河站）大气水平风场数据集

ISSN 2096-2223

CN 11-6035/N



文献 DOI:

10.11922/csdata.2020.0078.zh

数据 DOI:

10.12176/01.05.019

文献分类: 地球科学

收稿日期: 2020-07-20

开放同评: 2020-12-08

录用日期: 2021-05-23

发表日期: 2021-06-30

田玉芳^{1,2,3*}, 陈泽^{1,2,3}, 吕达仁^{1,2,3}

1. 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室 (LAGEO), 北京 100029
2. 中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站, 河北香河 065400
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 大气水平风场是研究大气动力特征、过程以及上下层之间的动力耦合的重要参数。MST (Mesosphere Stratosphere and Troposphere) 雷达在大气风场探测中发挥独特的作用, 可获取高时空分辨率的大气风场廓线数据。在国家重大科技基础设施项目子午工程支持下由中国科学院大气物理研究所建设的北京 MST 雷达位于中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站 (39.75°N, 116.96°E)。本数据集包含 2012 年北京 MST 雷达探测的 3–25 km 大气水平风速、水平风向数据。垂直分辨率 600 米, 探测时间间隔为 30 分钟。去除异常点后的风场廓线与探空数据有很好的-一致性。本数据集可在对流层-下平流层大气风场、波动等大气动力学以及大气过程研究中发挥独特作用。

关键词: 北京 MST 雷达; 水平风速; 水平风向; 对流层-下平流层; 香河站

数据库 (集) 基本信息简介

数据库 (集) 名称	北京 MST 雷达 (香河站) 产品中模式数据
数据作者	中国科学院大气物理研究所
数据通信作者	田玉芳 (tianyufang@mail.iap.ac.cn)
数据时间范围	2012年
地理区域	中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站 (39.75°N, 116.96°E)
数据量	31.3 MB
数据格式	*.dat
数据服务系统网址	http://www.dx.doi.org/10.12176/01.05.019
基金项目	国家重大科技基础设施子午工程; 国家自然科学基金 (41905042); 中国科学院重大科技基础设施开放研究项目 “基于子午工程的中低纬大气层-电离层的相互作用研究”。
数据库 (集) 组成	数据集共包括11 801个数据文件, 均为北京MST雷达 (香河站) 中模式产品数据, 数据量31.3 MB。

* 论文通信作者

田玉芳: tianyufang@mail.iap.ac.cn

引言

大气风场是表征大气平均运动状态的重要参量。尤其高时间分辨率的大气风场廓线数据可揭示大气动力特征及变化,提高数值天气预报准确性,在研究天气系统消演变、污染物传输、大气波动特征以及大气上下层之间的动力耦合等方面均有重要作用。

可获取大气风场垂直分布的探测手段主要有无线电探空、激光雷达、流星雷达、中频雷达以及各类大气探测雷达,如 MST (Mesosphere Stratosphere and Troposphere) 雷达、ST (Stratosphere and Troposphere) 雷达以及风廓线雷达等。各类大气探测雷达探测原理相似,采用的无线电波长不同,适用于不同高度大气层的探测。功能强大的 MST 雷达工作在甚高频 (VHF) 频段,可对对流层-下平流层以及中间层-低热层大气风场进行高时空分辨率的全天时探测。

自 1974 年国际第一部 MST 雷达建成以来^[1],MST 雷达技术在大气风场探测,大气动力特征与过程研究中发挥了非常重要的作用。由于 MST 雷达占地面积大,建设与运行费用高,目前国际上在运行的 MST 雷达数量有限,包括 PANSY、MAARSY、MU radar、EAR、Gadanki MST radar、UK NERC MST radar 等。我国于 1980 年代中期研制成功第一部 VHF-ST 雷达,可对对流层-下平流层大气风场、湍流等进行探测。自 1993 年开始陆续获取了多种探测结果^[2-4]。近年来我国雷达技术得到迅速发展,在国家重大科技基础设施子午工程项目的支持下,北京 MST 雷达与武汉 MST 雷达于 2011 年成功建设,代表我国在 MST 雷达探测方面技术的发展,同时也为大气动力特征与过程研究及相关应用等提供宝贵的数据。

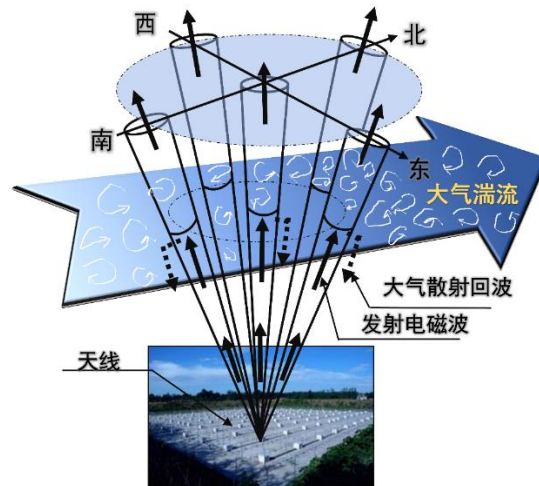
北京 MST 雷达由中国科学院大气物理研究所建设,位于中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站 (39.75°N, 116.96°E)。观测站始建于 1973 年,为适应大气物理科学研究与应用发展的需求而建立,对大气物理、化学、动力等多要素开展综合观测,也是中国科学院日地空间环境观测网络站之一。

北京 MST 雷达占地 10 000 m²,天线阵由 576 个三单元八木天线组成。雷达工作频率为 50 MHz \pm 1 MHz,有低、中、高 3 种探测模式,本数据集包含 2012 年中模式探测的 3–25 km 高度范围内水平风速、风向数据,探测时间间隔为 30 分钟,雷达具体的参数详见 Tian 和 Lu^[5]。国内学者应用北京 MST 雷达数据已开展了大气风场、波动、对流层顶高度等方面的研究^[5-11]。

1 数据采集和处理方法

1.1 雷达探测原理

MST 雷达应用相控阵以及数字波束合成技术,依次发射东西南北垂直 5 个波束,当雷达发射的电磁波遇到大气折射指数不规则体(湍流活动导致大气温度、湿度等的脉动使得大气折射指数发生变化)产生湍流散射,散射气团随风移动,通过接收各波束的散射回波来合成得到大气风场信息。此外,MST 雷达的回波机制还包括镜面反射和热散射,分别主要在对流层顶区以及中间层-低热层起作用^[12]。北京 MST 雷达天线阵及雷达探测原理示意图见图 1。

图1 北京 MST 雷达天线阵及探测原理示意图^[13]

1.2 信号处理

大气回波信号由雷达天线接收经馈线传输至收发组件接收端，经滤波放大后传输至模数转换器采样，再由数字波束合成系统进行波束合成，经信号处理机进行脉冲压缩、时域积累（相干积累）、去偏移滤波、加窗处理、快速傅里叶变换（FFT）谱分析、杂波抑制、频域积累（谱平均）最后得到功率谱密度数据，供下一步进行数据处理，得到大气参数信息。

1.3 数据处理

数据处理过程通过对功率谱密度数据进行预处理、噪声电平估算、目标回波识别、谱矩估算，将各波束得到的径向速度进行合成来得到大气风场数据。图 2 为雷达数据处理流程图，相关处理步骤如下：

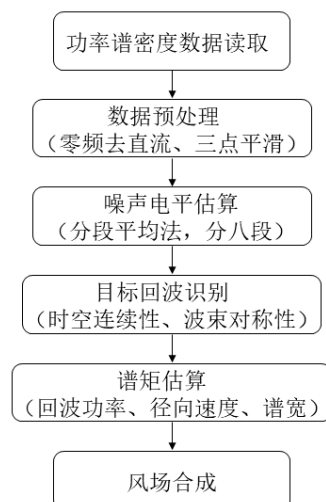


图2 MST 雷达数据处理流程图

(1) 预处理

在处理功率谱密度数据之前，先进行零频去直流以及三点平滑处理。由于地杂波等影响，雷达

功率谱密度图中零频处会出现异常高值，取零频左右各两点的功率谱密度均值代替零频原有值，之后再对功率谱密度数据进行三点平滑处理，可部分消除地杂波、脉冲噪声的影响，提高信噪比与谱峰识别能力。图 3 给出 2012 年 1 月 4 日 01:40（世界时）北京 MST 雷达西波束探测 12 km 高度处原始及经过预处理后的功率谱密度图。

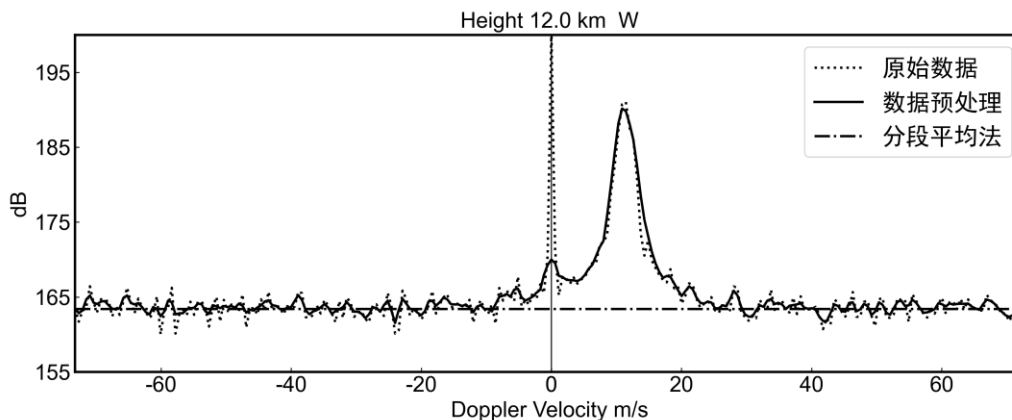


图 3 北京 MST 雷达一次探测原始及经过预处理后的功率谱密度图

（2）噪声电平估算

采用分段平均法来快速估算噪声电平值。该方法基于噪声服从自由度为 $2N/k$ 的 χ^2 分布的假设，将某个距离库上 FFT 点数为 N 的功率谱密度数据分为 k 段，计算每一段的均值，将最小均值作为该距离库的噪声电平值，实际使用时通常选取 $k=8$ ^[14]。图 3 在功率谱密度图中给出了应用分段平均法（八段）处理得到的噪声电平值，信号在该值之上。这种方法算法复杂度低，计算速度快，易于实现。

（3）目标回波识别

MST 雷达的探测目标为大气折射指数不规则体，也即大气湍流。其作为大气风场探测的示踪物，由于大气风场具有时空连续性，使得 MST 雷达可以探测到这种时空连续性的特征。MST 雷达的回波功率谱密度满足高斯分布特征，目标信号在功率谱密度图中为功率最大、峰值最大、谱宽最大的峰区。

找出每一个距离库功率谱密度数据中的所有信号，即高于噪声电平的数据段。计算各信号段频移点上的功率谱数据之和，该值最大者被认为是准目标回波。再基于目标信号的时空连续性（上下距离库及相邻时次，目标回波对应的中心频移变化是连续的）以及对称波束目标回波中心频移对称性（南北波束、东西波束在假设大气水平风场均匀时，对称波束在同高度距离库上所测得的径向速度具有对称性）来确定目标回波。图 4 为 2012 年 1 月 4 日 01:40（世界时）北京 MST 雷达东西、南北波束分别在 4 个距离库高度的功率谱密度图及目标回波识别结果，可见通过以上方法可排除干扰信号，确定目标回波。

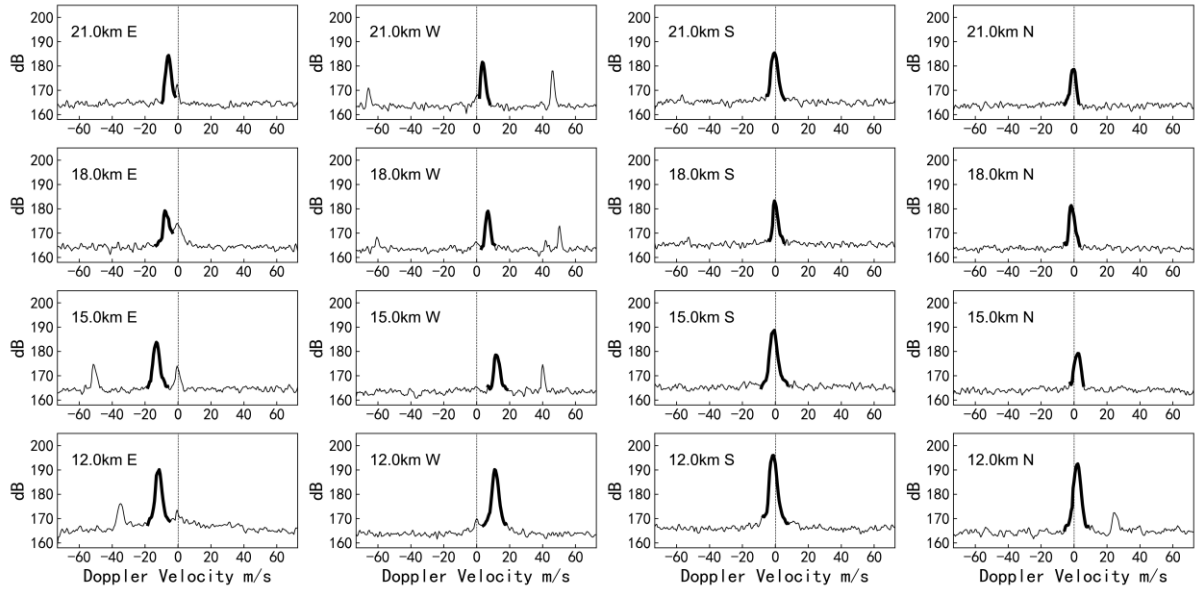


图 4 北京 MST 雷达东西、南北波束功率谱密度图及目标回波识别结果 (加粗曲线)

(4) 谱矩估算

对于每个波束、每个距离库的功率谱数据, 计算信号功率谱的 0 阶矩、一阶矩和二阶矩, 计算公式如下^[15]:

零阶矩, 即目标回波功率, 对目标回波部分的功率谱密度 S_i 积分:

$$M_0 = \sum_{i=1}^N S_i \quad (1)$$

其中, M_0 是目标回波功率, N 为目标回波的总 FFT 点数, S_i 是第 i 个点的功率谱密度。

一阶矩, 即多普勒频移:

$$M_{1f} = \frac{1}{M_0} \sum_{i=1}^N (S_i * f_i) \quad (2)$$

其中 f_i 为第 i 个点的频率。

二阶中心矩, 即多普勒频移谱宽:

$$M_{2f} = \frac{1}{M_0} \sum_{i=1}^N S_i * (f_i - M_{1f})^2 \quad (3)$$

多普勒频移 f 与多普勒速度 v_r 存在以下关系:

$$f = \pm \frac{2v_r}{\lambda} \quad (4)$$

其中 λ 为雷达波长。

因此可以将多普勒频移与多普勒频移谱宽换算成多普勒速度与速度谱宽。

某距离库的最大多普勒速度为:

$$v_{max} = \frac{1}{4M} \lambda f_r \quad (5)$$

其中, M 为相干积累数, f_r 为脉冲重复频率。

(5) 风场合成

对于五波束探测的 MST 雷达, 根据径向速度计算出水平风的经向与纬向分量, 再进行合成, 具体计算公式如下所示:

$$\begin{cases} u_E = \frac{V_{rE} - \omega \cos \theta}{\sin \theta} \\ u_W = \frac{V_{rW} - \omega \cos \theta}{\sin \theta} \\ v_N = \frac{V_{rN} - \omega \cos \theta}{\sin \theta} \\ v_S = \frac{V_{rS} - \omega \cos \theta}{\sin \theta} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u = \frac{u_E + u_W}{2} \\ v = \frac{v_N + v_S}{2} \\ \omega = V_{rZ} \end{cases} \quad (7)$$

其中, V_{ri} 是指第 i 波束的径向速度, $E/S/W/N/Z$ 分别指东、南、西、北与垂直波束。 θ 为斜波束的天顶角, u 、 v 与 ω 分别是纬向风、经向风与垂直速度。

1.4 数据传输与发布

北京 MST 雷达探测数据生成后实时传输到子午工程数据中心进行发布。

2 数据样本描述

数据集为 MST 雷达中模式探测的实时采样高度上的产品数据。数据文件由文件头和数据项组成。第一行为文件头, 依次为观测的年、月、日、小时、分钟、台站代码以及设备号。第二行开始为数据项。数据项按照高度先后顺序, 由每个高度的观测值连续排列组成, 观测值包含高度、水平风向、水平风速、垂直速度以及大气折射率结构常数 C_n^2 这 5 个变量。本文只介绍水平风速与水平风向数据。

数据样例如图 5 所示, 文件名为 “XHT_MST01_DWM_L21_STP_20120201001010.dat”, 数据项目格式如表 1 所示。图 6 给出了数据廓线样例图。

1	2012	2	1	0	10	XHT	MSTR
2	0.00	9999.00	9999.00	9999.00	9999.00	9999.00	
3	0.58	9999.00	9999.00	9999.00	9999.00	9999.00	
4	1.16	277.96		0.97	-0.24	-183.01	
5	1.74	340.40		14.77	0.13	-174.86	
6	2.32	335.90		14.23	-0.16	-152.87	
7	2.90	330.79		13.18	-0.37	-149.54	
8	3.48	316.45		14.32	-0.40	-145.67	
9	4.06	303.18		19.54	-0.02	-147.82	
10	4.64	300.38		27.12	0.12	-144.60	
11	5.21	298.82		42.41	-0.42	-145.27	

图 5 北京 MST 雷达中模式产品数据样例

表 1 北京 MST 雷达中模式产品数据项格式

第 N 列	数据项中文名称	数据项英文名称	记录格式	物理单位 (中英文)	无效缺省值	数值范围
1	高度	Alt	f6.2	公里 (km)	/	0-160
2	水平风向	D	f7.2	度 (°)	9999.00	0-360
3	水平风速	S	f7.2	米秒 (m/s)	9999.00	0-200

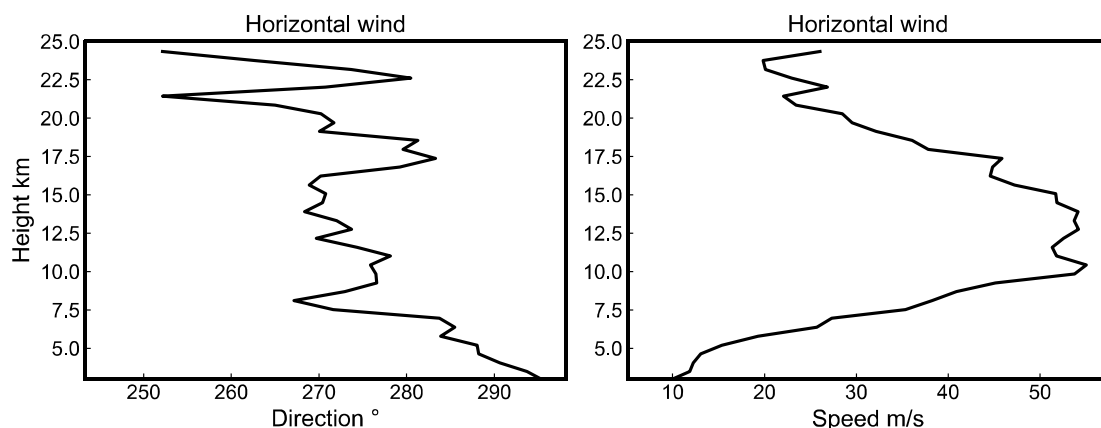
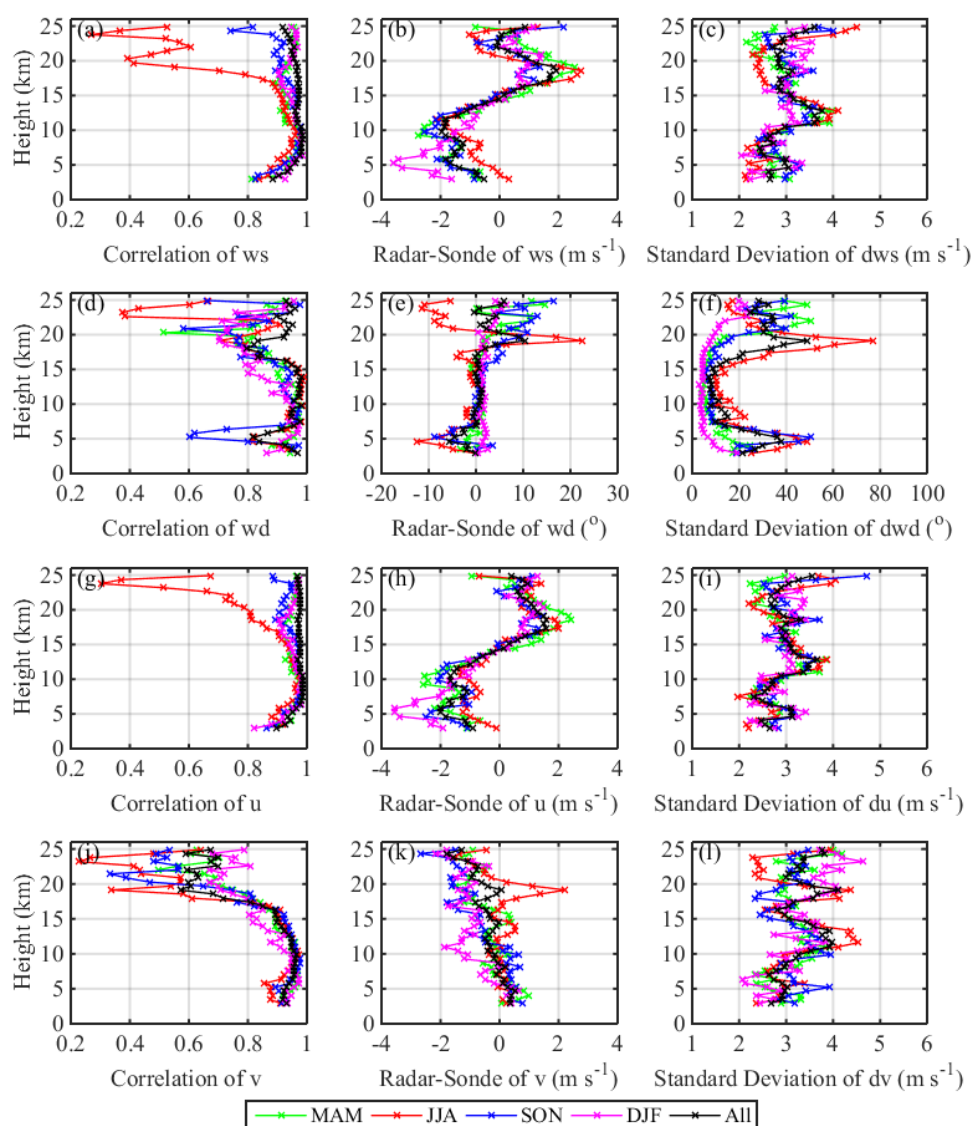


图 6 北京 MST 雷达 201203082310 探测的水平风向、风速廓线图

图 7 MST 雷达与探空测得的水平风速 ws , 水平风向 wd , 纬向风 u 和经向风 v 在各高度上季节、年平均的相关系数、差值以及差值的标准差廓线图^[5]

3 数据质量控制和评估

由于 MST 雷达的探测目标主要是大气湍流，回波信号弱，易受到杂波干扰。在经过信号处理、数据处理之后，仍然会出现个别异常值点。因此在使用数据之前，需要做质量控制。可采用 3 倍标准差准则来剔除异常值点，保证风场数据的时空连续性。对于 MST 雷达探测的每条廓线，先做 5 点中心平均，将得到的廓线作为参考廓线，计算原始廓线与参考廓线的差值。如果差值在 $\bar{Av} \pm 3\sigma$ (\bar{Av} 和 σ 分别为差值数据的平均值以及标准差) 范围之外，则其对应的点被识别为异常值而去掉^[5]。

Tian 和 Lu^[5]将北京 MST 雷达 2012 年全年 3–25 km 水平风速、风向与北京探空数据做对比分析，共 427 组对比廓线，15 210 组对比点。廓线个例对比结果显示二者有很好的一致性。进一步的统计结果表明水平风速、风向的相关系数分别为 0.97、0.92，平均差值分别为 -0.44 m/s、 0.77° ，平均绝对差值分别为 2.51 m/s、 12.02° ，均方根误差分别为 2.28 m/s 与 21.78° ，相对偏差分别为 7% 与 2%。图 7 给出 MST 雷达与探空测得的水平风速、风向、纬向风、经向风在各高度上季节、年平均的相关系数、差值以及差值的标准差分布廓线图^[5]。全年平均来看，各高度上水平风速平均差值在 $-2 \sim 2$ m/s 之间。表明 MST 雷达与探空探测的水平风有很好的一致性，MST 雷达数据可靠。

MST 雷达系统复杂，发射功率大，且全天时连续工作。为了保证雷达可长期运行，在雷达运行初期间歇性停机调整雷达状态，因此数据非完全连续。

4 数据使用方法和建议

本数据集可以用来开展对流层–下平流层大气动力特征与过程等方面的研究。

本数据集是雷达观测的产品数据，使用前建议根据研究、应用需求做质量控制剔除异常值点。由于雷达发射功率所限，18 km 以上数据获取率与可靠性下降，建议使用时需谨慎。对数据连续性有要求时，需先查看雷达数据获取的时间信息。

致 谢

本数据得到了国家重大科技基础设施子午工程项目资助，并得到了国家科技基础条件平台–国家空间科学数据中心 (<http://www.nssdc.ac.cn>) 的大力支持和帮助。感谢中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站工作人员等对北京 MST 雷达运维所做的工作。

数据作者分工职责

田玉芳 (1989—)，女，山西朔州人，博士，博士后，研究方向为全大气层（边界层、对流层–平流层、中间层–低热层）动力特征、过程及大气层之间垂直耦合研究。主要应用大气雷达如 MST 雷达、ST 雷达、风廓线雷达等开展研究。主要承担工作：数据处理及质量检验。

陈泽 (1993—)，男，湖北大冶人，硕士，研究方向为基于 MST 雷达的中层大气特征与过程研究。主要承担工作为：数据处理。

吕达仁 (1940—)，男，江苏常熟人，硕士，研究员，研究方向为大气物理、地球–大气系统遥感原理与技术研究、日地物理及地球系统过程研究等。主要承担工作：数据质量检验。

参考文献

- [1] WOODMAN R F, GUILLEN A. Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1974, 31(2): 493-505 DOI:10.1175/1520-0469(1974)031<0493:roowat>2.0.co;2.
- [2] 吕达仁. 地球环境和气候变化探测与过程研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997, 51-56.
- [3] LI W, LU D. Preliminary results of atmospheric turbulence observation with Xianghe MST/ST radar[J]. *Acta Meteorologica sinica*, 1998, 12(4): 394-399.
- [4] 吕达仁, 陈洪滨. 平流层和中层大气研究的进展[J]. *大气科学*, 2003, 27(4): 750-769.
- [5] TIAN Y F, LU D R. Comparison of Beijing MST radar and radiosonde horizontal wind measurements[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(1): 39-53 DOI: 10.1007/s00376-016-6129-4.
- [6] 田玉芳, 吕达仁. 北京 MST 雷达探测中间层-低热层观测结果初步分析[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(02): 440-452.
- [7] 田玉芳. 晴空大气探测雷达对大气层几个层区的探测与应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 中国科学院大气物理研究所, 2016.
- [8] HUANG C, ZHANG S, CHEN G, et al. Planetary Wave Characteristics in the Lower Atmosphere Over Xianghe (117.00 degrees E, 39.77 degrees N), China, Revealed by the Beijing MST Radar and MERRA Data[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2017, 122(18): 9745-9758.
- [9] CHEN F, CHEN G, SHI C, et al. Strong downdrafts preceding rapid tropopause ascent and their potential to identify cross-tropopause stratospheric intrusions[J]. *Annales Geophysicae*, 2018, 36(5):1403-1417.
- [10] CHEN F, CHEN G, TIAN Y F, et al. High-resolution Beijing mesosphere-stratosphere-troposphere (MST) radar detection of tropopause structure and variability over Xianghe (39.75 degrees N, 116.96 degrees E), China[J]. *Annales Geophysicae*, 2019, 37(4): 631-643.
- [11] HUANG K M, XI Y, WANG R, et al. Signature of a Quasi 30-Day Oscillation at Midlatitude Based on Wind Observations From MST Radar and Meteor Radar[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2019, 124(21): 11266-11280.
- [12] BALSLEY B B, GAGE K S. The MST radar technique: Potential for middle atmospheric studies[J]. *Pure & Applied Geophysics*, 1980, 118(1):452-493 DOI: 10.1007/bf01-586464.
- [13] 陈泽. 基于北京 MST 雷达的数据处理算法改进及对流层顶区大气探测研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 中国科学院大气物理研究所, 2020.
- [14] PETITDIDIER M, SY A, GARROUSTE A, et al. Statistical characteristics of the noise power spectral density in UHF and VHF wind profilers[J]. *Radio Science*, 1997, 32(3): 1229-1247 DOI: 10.1029/97rs00250.
- [15] WOODMAN R F. Spectral moment estimation in MST radars[J]. *Radio Science*, 1985, 20(6): 1185-1195.

论文引用格式

田玉芳, 陈泽, 吕达仁. 2012 年北京 MST 雷达（香河站）大气水平风场数据集[J/OL]. 中国科学数据,

中国科学数据, 2021, 6(2)

2021, 6(2). (2021-03-19). DOI: 10.11922/csdata.2020.0078.zh.

数据引用格式

中国科学院大气物理研究所. 北京 MST 雷达（香河站）产品中模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-09-20). DOI: 10.12176/01.05.019.

A dataset of Beijing MST radar horizontal wind fields at Xianghe Station in 2012

TIAN Yufang^{1,2,3*}, CHEN Ze^{1,2,3}, LYU Daren^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, P.R. China

2. Xianghe Observatory of Whole Atmosphere, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Xianghe 065400, P.R. China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China

*Email: tianyufang@mail.iap.ac.cn

Abstract: The atmospheric horizontal wind is an essential parameter for studying atmospheric dynamic characteristics, processes, and dynamic coupling between the upper and lower atmosphere. MST (Mesosphere Stratosphere and Troposphere) radar plays a unique role in atmospheric wind field detection and can obtain horizontal wind profiles with high temporal and spatial resolution. The Beijing MST radar was built and operated by the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences with the support of the Chinese Meridian Project. It is located at Xianghe Observatory of Whole Atmosphere, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (39.75°N, 116.96°E). This dataset contains atmospheric horizontal wind speed and direction, observed by the Beijing MST radar in 2012. The detection height ranges from 3 to 25 km, the vertical resolution is 600 m, and the sampling interval is 30 minutes. After removing the abnormal points, the horizontal wind profile is consistent with the nearest Beijing radiosonde data. This dataset can play a unique role in studies of atmospheric dynamics like atmospheric wind fields, waves, etc., and processes in the troposphere and lower stratosphere.

Keywords: Beijing MST radar; horizontal wind speed; horizontal wind direction; troposphere and lower stratosphere; Xianghe Station

Dataset Profile

Title	Beijing MST radar middle mode product data at Xianghe Station
Data corresponding author	TIAN Yufang (tianyufang@mail.iap.ac.cn)
Data authors	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
Time range	2012
Geographical scope	Xianghe Observatory of Whole Atmosphere, Institute of Atmospheric Physics, Chinese

	Academy of Sciences (39.75°N, 116.96°E)
Data volume	31.3 MB
Data format	*.dat
Data service system	< http://www.dx.doi.org/10.12176/01.05.019 >
Sources of funding	Meridian Project; National Natural Science Foundation of China (41905042); The Open Research Project of Large Research Infrastructures of CAS - "Study on the interaction between low/mid-latitude atmosphere and ionosphere based on the Chinese Meridian Project".
Dataset composition	The dataset consists of 11,801 data files with a size of 31.3 MB.