

## 2012–2020 年武汉崇阳站 MST 雷达回波数据集

ISSN 2096-2223

CN 11-6035/N

龚晓林<sup>1</sup>, 周晓明<sup>1\*</sup>, 陈昱<sup>1</sup>, 张维帆<sup>1</sup>

1. 武汉大学, 武汉 430072

**摘要:** MST (Mesosphere-Stratosphere and-Troposphere) 雷达是一种用于观测中间层、平流层和对流层大气三维风场的大型阵列式相控阵雷达。MST 雷达工作在甚高频 (VHF) 频段, 主要利用湍流散射、菲涅尔反射和热散射的回波机制, 获取不同高度区间的大气三维风廓线和湍流特性参数。武汉 MST 雷达由子午工程和武汉大学共同投资建设, 是我国大陆首批建设的 MST 雷达, 位于湖北省崇阳县 (29.51° N, 114.13° E)。雷达使用多普勒波束扫描技术, 通过不共面的 3 个或者 5 个波束扫描, 对收发信号的自相关处理得到不同方向的功率谱数据。通过其不同波束方向上的径向多普勒速度可以解算得到三维风场。2012–2020 年, 武汉 MST 雷达连续不间断地对雷达上空大气风场进行探测, 其雷达回波功率谱数据、径向数据和产品数据上传至子午工程数据中心网站。通过武汉 MST 雷达数据可以得到我国中低纬地区中高层大气风场的空间和时间变化, 为研究我国中低纬上空中高层大气动力学过程、弄清中高层大气与电离层及低层大气的耦合机制、建立我国上空中高层大气风场模式、提供空间环境监测和预报服务等提供重要的数据支撑。

**关键词:** MST 雷达; 中高层大气; 风场; 数据共享

### 数据库 (集) 基本信息简介

数据库 (集) 名称	2012–2020 年武汉崇阳站 MST 雷达回波数据集
数据作者	武汉大学
数据通信邮箱	g.chen@whu.edu.cn
数据时间范围	2012–2020 年
地理区域	湖北崇阳站 (114.13°E, 29.51°N)
探测距离分辨率	150 m、600 m 或 1200 m
数据量	1 096 969 条记录
数据格式	*.dat, *.txt
数据服务系统网址	<a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.031">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.031</a> (径向高模式) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.032">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.032</a> (径向低模式) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.033">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.033</a> (径向中模式) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.034">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.034</a> (功率谱高模式) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.035">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.035</a> (功率谱低模式) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.036">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.036</a> (功率谱中模式) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.037">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.037</a> (产品高模式)

文献 DOI:

0.11922/csdata.2021.0023.zh

数据 DOI:

10.12176/01.05.031

10.12176/01.05.032

10.12176/01.05.033

10.12176/01.05.034

10.12176/01.05.035

10.12176/01.05.036

10.12176/01.05.037

10.12176/01.05.038

10.12176/01.05.039

文献分类: 地球科学

收稿日期: 2021-03-22

开放同评: 2021-04-29

录用日期: 2021-06-23

发表日期: 2021-06-29

\* 论文通信作者

周晓明: zhou.xm@whu.edu.cn

数据服务系统网址	<a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.038">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.038</a> （产品低模式） <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.039">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.039</a> （产品中模式）
基金项目	国家重大科技基础设施子午工程
数据库（集）组成	本数据集由武汉崇阳站MST雷达功率谱高/中/低模式数据、武汉崇阳站MST雷达径向高/中/低模式数据和武汉崇阳站MST雷达产品高/中/低模式数据组成，共包括1 096 969个数据文件，每半小时产生9个数据文件，数据大小约为283 GB。

## 引 言

中高层大气是中层大气和高层大气的总称，一般是指 10 公里以上的地球大气，主要包括对流层上部、平流层、中间层和热层，其上部与电离层相重叠，是一个极为复杂的多过程耦合系统。中高层大气不仅占据着非常巨大的大气体积，存在着非常复杂的光化学、动力学和热力学过程，而且与人类的活动、航空航天和国防安全等密切相关。中高层大气主要以中性大气为主，其主要探测参数包括大气密度、温度、压强、成分及风场等，其探测相对比较困难，因此中高层探测技术的发展及其仪器的研制一直是该领域的研究重点。

现代中高层大气探测技术开始于 20 世纪初，随着无线电技术的发展以及无线电探空仪的研制成功，使得人们从地面及以上几百米的探测高度迅速上升到对流层和低平流层高度范围。20 世纪 40 年代，探空火箭技术的进步又进一步将大气探测高度提高到 100 km 范围，同时无线电波在不同空气团介质上产生反射散射理论的建立。一大批大气遥感仪器，如风廓线雷达、中频雷达、流星雷达、声雷达、激光雷达等相继应用到中高层大气参数的探测中。目前利用气球和飞机对大气进行探测的最大高度范围大约在 30 公里左右，卫星的在轨高度一般在 250 公里以上，并绕地球快速运行，均不能对某一地区的中高层大气进行长期有效的探测。探空火箭是唯一一种可以对中高层大气进行原位探测的手段，但是探空火箭费用高昂，且具有不可持续性。地基遥感探测技术是目前国内和国际上最为主要的中高层大气探测手段，而 MST 雷达是对中性三维中高层大气风场探测能力最强的观测设备。

MST 雷达是一种可靠的全天候地面遥感探测设备，可提供长时间、优良时空分辨率的观测数据，有助于中高层大气中新过程、新现象的发现和理解。国内学者基于 MST 雷达陆续开展了一些关于我国中低纬地区大气波动方面的研究。Qing 和 Huang 等人分别利用武汉 MST 和北京 MST 雷达观测结果研究了低层大气惯性重力波和行星波<sup>[1-2]</sup>。关于 MST 雷达在不同高度大气中的回波机制<sup>[3]</sup>以及在反演温度剖面应用也被广泛研究<sup>[4]</sup>。作为 MST 雷达对中间层观测的研究重点，Zhang 等人结合武汉和北京两地的 MST 雷达观测数据对我国中纬度中层垂直风进行统计研究<sup>[5]</sup>。

与其他高空测风系统相比，MST 雷达具有时间及空间分辨率高、不间断持续观测时间长、探测高度范围大、时效性强等特点。与再分析数据相比，受益于更高的时间分辨率，MST 雷达为研究对流层顶高度的短周期变化提供了可能性<sup>[6-8]</sup>。众所周知，大气潮汐是受太阳辐射能量激发的全球振荡波，潮汐波是调制对流层顶进行日或半日周期变化的重要机制。在没有高分辨率大气压、温度数据的情况下，雷达反演的风场数据是观测潮汐波的重要途径<sup>[9]</sup>。MST 雷达的持续观测运行对于深入研究中高层大气风场的空间结构和时间变化、弄清中高层大气风场与电离层以及低层大气的耦合机制、探究中高层大气中关键的动力学过程、建立我国中低纬上空中高层大气风场模式、提供空间环境监测和预报服务等具有重要的科学意义和工程应用价值。

1 数据采集和处理方法

武汉 MST 雷达是一种采用互补二相编码脉冲压缩技术的大型阵列式相控阵雷达，工作在甚高频（VHF）频段，为 53.8 MHz 的定频频率，总发射峰值功率约为 172 kW。其天线阵列包含 576 根三单元线性极化八木天线，按照 24×24 的矩阵形式排列，整个天线占地约为 100 m×100 m。通过其波束控制系统可以形成对称的雷达波束（东、西、南、北、中），其倾斜波束最大天顶角为 20°，天顶步进控制角度为 1°。如图 1 所示为武汉崇阳站 MST 雷达的天线阵列。



图 1 武汉崇阳站 MST 雷达天线阵列

武汉 MST 雷达的天线馈电系统采用对称的布局结构，按馈电方式可以分为 4 个子天线阵面，每个子阵面有 36 组，每组有一个百叶机箱，每个百叶机箱内有 4 个收发模块（T/R 模块）分别与 4 个天线单元相连，每个天线 T/R 模块的发射功率约为 300 W。整个天线阵列构成由 24 个天线单元组成的 24 个行（列），天线 T/R 模块通过行列扫描开关分别与两个 24：1 的功分器相连。除与天线 T/R 模块外，还有 24 个行列 T/R 模块，主要用来控制天线阵列单行（列）信号的发射和接收。每个行列 T/R 模块通过功分器与 24 个天线 T/R 模块相连，控制每一行或者一列天线的收发切换及波形移相。整个雷达控制系统有统一的电源系统和自检测系统，电源系统为所有的工作模块提供对应的直流电压源，自检测系统对所有馈电路径进行工作状态数据采集并进行自检分析。MST 雷达的系统框图及总体技术参数分别如图 2 和表 1 所示。

表 1 武汉 MST 雷达的总体技术参数

名称	技术参数
工作频率	53.8 MHz
峰值功率	172.8 kW
发射波形	互补码序列
占空比	10%或 20%
天线阵列	24×24 三单元八木天线
有效天线口径	~9216 m <sup>2</sup>
半功率波束宽度	3.2° 铅笔状波束

名称	技术参数
天线驻波比	$\leq 1.1$
天线阵列工作模式	多普勒波束扫描
波束指向	北、南、天顶、西、东方向，天顶角 0–20°可调

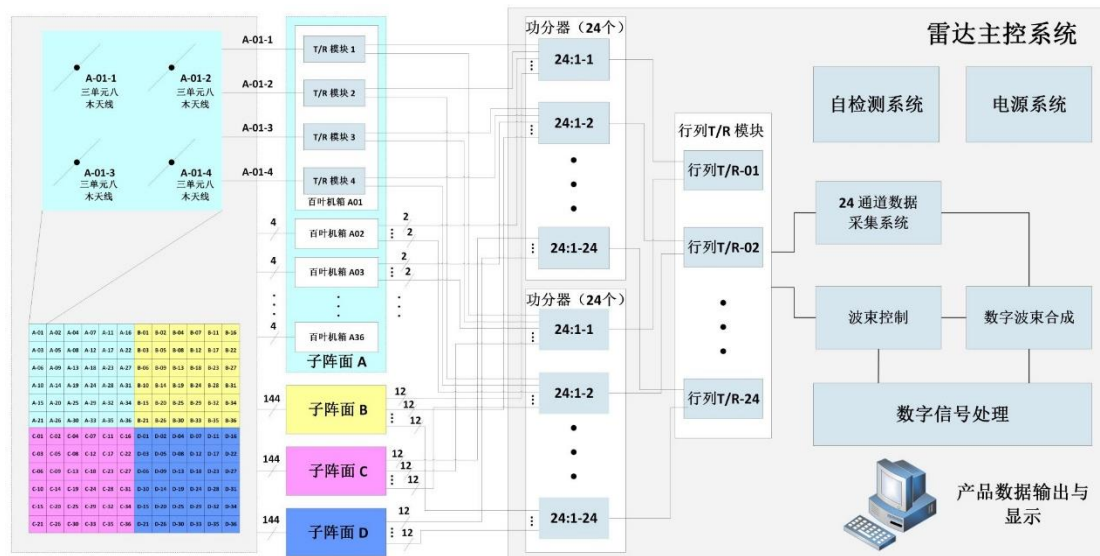


图 2 武汉 MST 雷达系统框图

24 个行列 T/R 模块是 MST 雷达有源相控阵合成指定方向波束的核心器件。发射信号时，雷达频率源部分由 24 路直接数字式频率合成器（DDS）产生 24 通道载波频率为 53.8 MHz 的脉冲调制信号。每通道调制信号通过对应的行列 T/R 模块进行初级放大和相移后通过功分器馈入 24 个天线 T/R 模块。经过移相和功率放大后的调制信号通过各天线单位辐射到空中，形成特定的波束指向<sup>[10]</sup>。

雷达系统接收回波与发射信号相反。对中层大气探测来说，其后向散射回波信号非常微弱，大多数处于接收机系统噪声以下。为保证回波接收灵敏度及大气探测精度，MST 雷达采用了数字中频技术。回波信号通过功率合成后在接收通道进行混频，再由数字中频系统进行处理。系统采用直接数字采样对信号相位进行数字域检测，能够很好保证各接收通道之间的相位正交性和幅度一致性。生成的 I/Q 数据直接传输到信号处理计算机终端。

大气扰动产生的风和波动可以从雷达接收到的后向散射功率谱中提取出来<sup>[11]</sup>。武汉 MST 雷达的信号处理方式主要包括杂波抑制、脉冲压缩、相干积累、加窗处理、FFT（快速傅里叶变换）处理、频域积累等<sup>[12]</sup>。其处理流程如图 3 所示。

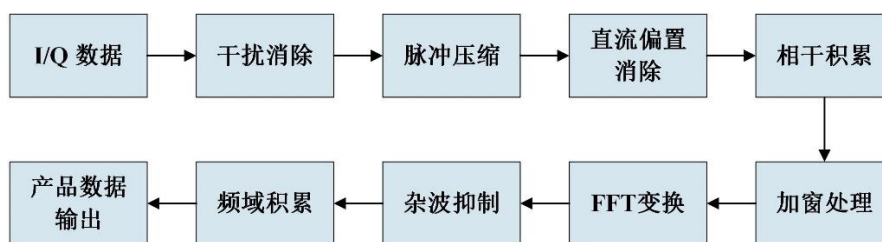


图 3 MST 雷达信号处理流程图

MST 雷达探测大气湍流的回波信号非常微弱，特别是距离地面较远的中间层大气回波。为了更



好检测微弱回波信号，除了采用低噪声、抗干扰的电路设计减少系统噪声外，武汉 MST 雷达利用脉冲压缩技术，通过发射波形为互补二相编码的调制脉冲来提高回波的信噪比<sup>[13]</sup>。还采用相干积累来提高回波信号的信噪比，增强探测性能。在信号处理过程中，雷达回波频谱估计的主要方式为 FFT，通过选择适当的窗函数可以用来减少 FFT 过程产生的频谱泄露并增强带外抑制效果。功率谱平均可以进一步对回波杂散信号进行抑制，同时提高风速测量的准确性和可信性。通过其信号处理过程，最终输出的雷达原始数据为功率谱数据，即 0 级产品数据，再通过雷达数据处理终端软件反演生成对应的 1 级产品数据和 2 级产品数据，其主要参数有后向散射功率、功率谱密度、水平风速、垂直风速、信噪比、大气折射指数结构常数等。武汉 MST 雷达有低模式、中模式和高模式 3 种工作模式，分别对应大气的对流层、平流层和中间层的高度范围。其 3 种工作模式对应的工作参数如表 2 所示。

表 2 MST 雷达三种模式对应参数

工作模式	低模式	中模式	高模式
码字	16 位互补码	16 位互补码	32 位互补码
发射脉冲宽度	16 $\mu\text{s}$	64 $\mu\text{s}$	256 $\mu\text{s}$
脉冲重复周期	160 $\mu\text{s}$	320 $\mu\text{s}$	1280 $\mu\text{s}$
占空比	10%	20%	20%
压缩脉冲宽度	1 $\mu\text{s}$	4 $\mu\text{s}$	8 $\mu\text{s}$
相干积累数	128	64	8
FFT 点数	256	256	512
谱平均数	10	10	10
距离分辨率	150 m	600 m	1200 m
探测高度范围	2.55–10.05 km	10.2–25.2 km	60–120 km
最大探测速度	68.1 m/s	68.1 m/s	136.1 m/s
速度分辨率	0.53 m/s	0.53 m/s	0.53 m/s
5 波束扫描时间	5 min	5 min	5 min

武汉 MST 雷达的日常工作模式采用五波束扫描，即在一个探测周期内，雷达波束依次进行 5 个方向（北、南、天顶、西、东方向）的波束扫描探测。单个模式的探测扫描时间约为 5 分钟，三模式五波束常规探测（24 小时不间断运行）周期小于 30 分钟。为增加探测数据分辨率，也可以将五波束扫描减少为三波束扫描（南或北、天顶、东或西 3 个方向），每个波束扫描探测时间约为 1 分钟。大气风速可以利用多普勒波束扫描技术，通过 5 个或 3 个波束的径向速度来计算估计<sup>[14]</sup>。

采用谱矩计算方式，针对离散的功率谱数据，其零阶、一阶、二阶谱矩表示为：

$$m_0 = \sum_{i=1}^N p_i \Delta f \quad (1)$$

$$m_1 = \sum_{i=1}^N f_i p_i \Delta f \quad (2)$$

$$m_2 = \sum_{i=1}^N f_i^2 p_i \Delta f \quad (3)$$

式中,  $N$  为 FFT 的点数,  $p_i$  和  $f_i$  分别是第  $i$  点的功率值和频率值,  $\Delta f$  为频率分辨率。依据动差法计算, 大气风场的主要参数如下:

信号功率估值:

$$P_r = m_0 \quad (4)$$

多普勒速度估值:

$$\tilde{v} = \frac{m_1}{m_0} \Delta v \quad (5)$$

式中  $\Delta v = \frac{\lambda \Delta f}{2}$ , 为多普勒速度分辨率; 其中  $\lambda$  为雷达发射电磁波的波长。

速度谱宽估值:

$$\tilde{\psi} = 2\Delta v \left[ \frac{m_2}{m_0} - \left( \frac{m_1}{m_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式(5)得到的多普勒速度是对应方向波束的径向速度, 则纬向风速  $u$ , 经向风速  $v$  和垂直风速  $w$  分别为:

$$u = (v_E - v_W) / 2 \sin(\theta) \quad (7)$$

$$v = (v_N - v_S) / 2 \sin(\theta) \quad (8)$$

$$w = v_z(h) \quad (9)$$

式中,  $v_E$ 、 $v_W$ 、 $v_S$ 、 $v_N$  和  $v_z$  分别表示东、西、南、北和天顶方向波束的径向速度,  $\theta$  是倾斜波束的天顶角。武汉 MST 雷达采用 3 波束扫描探测时也可用相同的方式计算出大气三维风速。

## 2 数据样本描述

本数据集包含武汉崇阳站 MST 雷达低、中、高模式的径向多普勒功率谱数据(0 级数据)、径向数据(1 级数据)和产品数据(2 级数据)。在日常工作模式下, 低、中、高模式依次进行, 每 30 分钟生成一组数据, 包含低、中、高模式的功率谱数据、径向数据和产品数据。

功率谱数据的数据格式为 dat, 数据集的 dat 文件以 CYT\_MST01\_DP\*\_L01\_STP\_YYYYLLDDHHMMSS.dat 形式命名并存储。其中\*表示观测模式, L 表示低模式(3.5–10 km), M 表示中模式(11–25 km), H 表示高模式(60–90 km), YYYY、LL、DD、HH、MM、SS 分别为观测数据记录的年份、月、日、时、分、秒。功率谱数据文件由文件标识、测站基本参数、性能参数、观测参数及观测数据组成, 全部为二进制格式, 功率谱数据文件根据探测模式实时动态生成, 每个模式生成一个文件。功率谱数据的具体格式说明如表 3–6 所示。

表 3 功率谱数据文件标识格式说明

类型	变量名	字节数	说明
char	FileID[8]	8	文件标识, 这里为 WNDFFT
float	VersionNo	4	数据格式版本号, 两位整数, 两位小数, 这里为 02.00
long int	FileHeaderLength	4	表示文件头的长度, 4 位整数

表 4 功率谱数据测站基本参数格式说明

类型	变量名	字节数	说明
char	Country[16]	16	国家名, 文本格式输入
char	Province[16]	16	省名, 文本格式输入
char	Station[16]	16	台站名, 文本格式输入, 以台站名的汉语拼音输入
char	StationNumber[16]	16	区站号, 文本格式输入
char	RadarType[16]	16	雷达型号, 文本格式输入
char	Longitude[16]	16	天线所在经度, 文本格式输入 书写格式如: E75/15/28
char	Latitude[16]	16	天线所在纬度, 文本格式输入 书写格式如: N31/52/1
char	Altitude[16]	16	海拔高度, 以米为计数单位, 文本格式输入
short int	Azimuth	2	天线的方位角(角度单位: 0.01 度)
short int	WorkMode	2	工作模式, 1–7 分别代表低 1、低 2、低 3、中 1、中 2、高 1 和高 2 七个模式。
short int	BeamNum	2	工作波束, 采用 16 进制
char	Temp[34]	34	保留字

表 5 功率谱数据雷达性能参数格式说明

类型	变量名	字节数	说明
unsigned int	Ae	4	天线增益 (分贝), 两位整数
float	AgcWast	4	馈线损耗 (分贝), 两位整数, 一位小数
float	AngleE	4	东波束与铅垂线的夹角 (度), 两位整数, 一位小数
float	AngleW	4	西波束与铅垂线的夹角 (度), 两位整数, 一位小数
float	AngleS	4	南波束与铅垂线的夹角 (度), 两位整数, 一位小数
float	AngleN	4	北波束与铅垂线的夹角 (度), 两位整数, 一位小数
float	AngleR	4	中 (行) 波束与铅垂线的夹角 (度), 两位整数, 一位小数
float	AngleL	4	中 (列) 波束与铅垂线的夹角 (度), 两位整数, 一位小数
unsigned int	ScanBeamN	4	扫描波束数, 一位整数
unsigned int	SampleP	4	采样频率 (兆赫兹), 三位整数
unsigned int	WaveLength	4	发射波长 (毫米), 四位整数
float	Prp	4	脉冲重复频率 (赫兹), 五位整数
float	PusleW	4	脉冲宽度 (微秒), 两位整数, 一位小数
unsigned short	HBeamW	2	水平波束宽度 (度), 两位整数
unsigned short	VBeamW	2	垂直波束宽度 (度), 两位整数
float	TranPp	4	发射峰值功率 (千瓦), 两位整数, 一位小数
float	TranAp	4	发射平均功率 (千瓦), 两位整数, 一位小数
unsigned int	StartSamplBin	4	起始采样库的距离高度, 五位整数
unsigned int	EndSamplBin	4	终止采样库的距离高度, 五位整数
short int	BinLength	2	距离库长 (米), 三位整数

类型	变量名	字节数	说明
short int	BinNum	2	距离库数，三位整数
char	Temp[40]	40	保留字

表 6 功率谱数据观测参数格式说明

类型	变量名	字节数	说明
unsigned short	SYear	2	观测记录开始时间（年），四位整数
unsigned char	SMonth	1	观测记录开始时间（月），两位整数
unsigned char	SDay	1	观测记录开始时间（日），两位整数
unsigned char	SHour	1	观测记录开始时间（时），两位整数
unsigned char	SMinute	1	观测记录开始时间（分），两位整数
unsigned char	SSecond	1	观测记录开始时间（秒），两位整数
unsigned char	TimeP	1	时间来源，0 为计算机时钟，1 为 GPS，2 为其他
unsigned long int	SMillisecond	4	秒的小数位（毫秒），三位整数
unsigned char	Calibration	1	标校状态，0 为无标校，1 为自动标校，2 为一周内人工标校，3 为一月内人工标校
short int	BeamfxChange	2	波束方向改变
unsigned short	EYear	2	观测记录结束时间（年），四位整数
unsigned char	EMonth	1	观测记录结束时间（月），两位整数
unsigned char	EDay	1	观测记录结束时间（日），两位整数
unsigned char	EHour	1	观测记录结束时间（时），两位整数
unsigned char	EMinute	1	观测记录结束时间（分），两位整数
unsigned char	ESecond	1	观测记录结束时间（秒），两位整数
short int	NNtr	2	非相干积累，三位整数
short int	Ntr	2	相干积累，三位整数
short int	Fft	2	FFT 点数，四位整数
short int	SpAver	2	谱平均数，三位整数
char	BeamDir[10]	10	波束顺序标志（东、南、西、北、中（行）、中（列）分别用 E、S、W、N、R、L 表示，填在字符串相应的位置上），六位
float	AzimuthE	4	东波束方位角修正值（度） 顺时针偏离为正，逆时针偏离为负 两位整数，一位小数
float	AzimuthW	4	西波束方位角修正值（度） 顺时针偏离为正，逆时针偏离为负 两位整数，一位小数
float	AzimuthS	4	南波束方位角修正值（度） 顺时针偏离为正，逆时针偏离为负 两位整数，一位小数
float	AzimuthN	4	北波束方位角修正值（度） 顺时针偏离为正，逆时针偏离为负 两位整数，一位小数
char	Temp[40]	40	保留字

功率谱数据为：float DspToDpDat [gate][SpwidNum]; gate 表示总距离库数（为高、中、低三模式距离库数之和），SpwidNum 表示 FFT 点数。数据示例如下：

DspToDpDat[0][0]: 库 0 的 0 号滤波器幅度；

.....



DspToDpDat[0][SpwidNum-1]: 库 0 的 SpwidNum-1 号滤波器幅度;

DspToDpDat[1][0]: 库 1 的 0 号滤波器幅度;

.....

DspToDpDat[1][SpwidNum-1]: 库 1 的 SpwidNum-1 号滤波器幅度;

.....

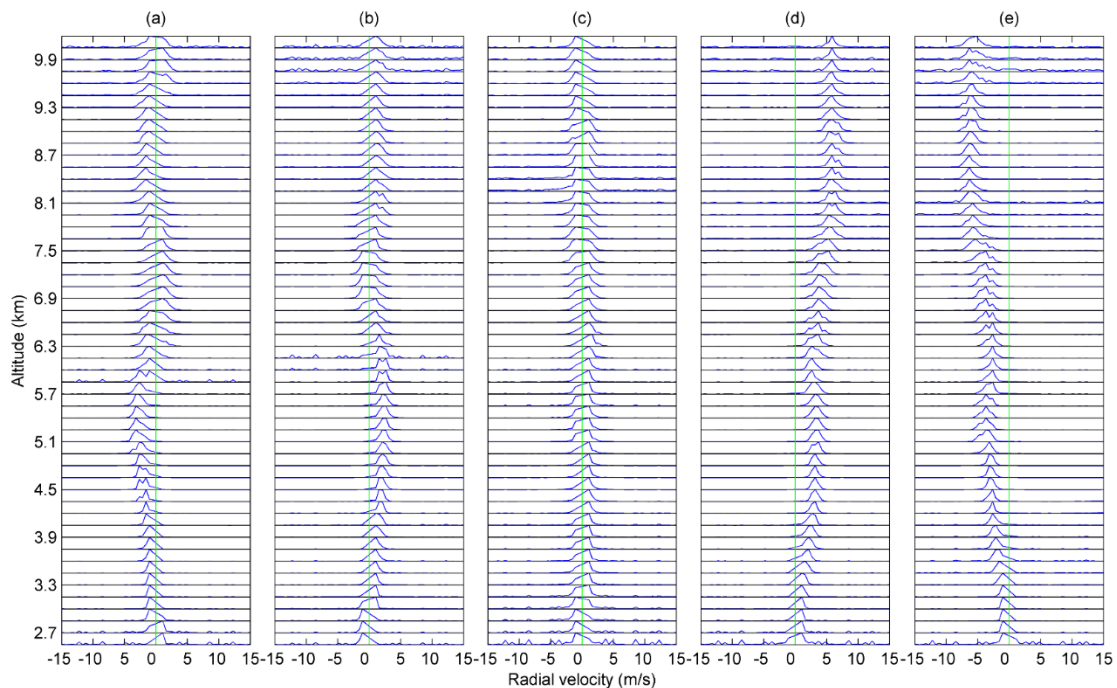
DspToDpDat[gate-1][0]: 库 gate-1 的 0 号滤波器幅度;

.....

DspToDpDat[gate-1][SpwidNum-1]: 库 gate-1 的 SpwidNum-1 号滤波器幅度;

谱线的编号依次从左到右展开, 有几个波束方向就有几个 DspToDpDat 数组顺序排下去。

对流层是地球大气层中湍流最多的一个分层, 也是最低的一层。它在中纬度区域的高度范围从地表到离地面平均为 10–12 km 的高度。绝大多数气象活动都发生在对流层, 其大气湍流也最多最强, 因此 MST 雷达在对流层的探测回波强度也最高。如图 4 所示, 为武汉 MST 雷达在低模式五波束扫描探测过程中生成记录的一个探测周期的回波功率谱数据。其对称的南北方向波束和东西方向波束的多普勒功率谱峰基本对称, 因此在加密探测时, 也可以采用三波束扫描的方式来减少探测周期, 增加数据的时间分辨率。



2014 年 11 月 29 日 13: 30 UT。从左到右依次为 10°-北波束, 10°-南波束, 天顶波束, 10°-西波束和 10°-东波束。

图 4 武汉 MST 雷达低模式五波束扫描多普勒谱

径向数据为实时的采样高度上的各个径向的数据文件, 由文件头和数据段组成, 数据段包括数据头和数据块。其数据记录的文件格式为 TXT, 文件名后缀为 \*.dat, 以 CYT\_MST01\_DJ\*\_L11\_STP\_YYYYLLDDHHMMSS.dat 形式命名和存储, 该文件可以直接采用记事本打开。其中\*表示观测模式, YYYY、LL、DD、HH、MM、SS 表示时间, 与前文对功率谱数据的表述一致。文件头包括: 观测时间(年月日时分秒)、台站代码、设备号、垂直波束宽度、水平波束宽度、天线增益、发射波长, 每一项均采用“空格”为分隔符。数据头包括: 扫描波束数、观测模式号、相干积分数、非相干积分数(谱平均数)、FFT 点数、脉冲宽度、脉冲重复周期、发射峰值功率、

发射平均功率、波束偏离垂直方向的角度，每一项均采用“空格”为分隔符。数据项按照高度先后顺序由 N 个高度上的观测值连续排列组成，N 的值与雷达不同探测模式时设置的探测高度范围和距离分辨率有关，每个高度的观测值包含高度、波束方位、波束仰角、谱宽、和信噪比等多个变量。上述变量在每个高度上有 n 组，n 为实际探测时的波束数，雷达进行 5 波束扫描探测时 n 为 5，进行 3 波束扫描探测时 n 为 3。所有数据项均采用“空格”为分隔符。其具体格式说明如表 7–9 所示。

表 7 径向数据文件头格式说明

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
01	年	YEAR	I4	年 (Year)	/	2010–2050
02	月	Month	I2	月 (Month)	/	01–12
03	日	Day	I2	天 (Day)	/	01–31
04	时	Hour	I2	小时 (Hour)	/	00–23
05	分	Minute	I2	分 (Minute)	/	00–59
06	秒	Second	I2	秒 (Second)	/	00–59
07	台站代码	StationCode	A3	台 (set)	/	/
08	设备号	InstrumentID	A4	号 (Number)	/	/
9	垂直波束宽度	BeamwidthV	I4	度 (°)	/	1–5
10	水平波束宽度	beamwidthH	I4	度 (°)	/	1–5
11	天线增益	AntennaGain	f5.2	分贝 (dB)	/	30–36
12	发射波长	TransmittingWave	I5	毫米	/	5576

表 8 径向数据头格式说明

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	扫描波束数	BeamNum	I4	波束数 (Beam N)	/	1–6
2	观测模式号	ObservationMode	I4	模式 (Mode)	/	1–7
3	相干积分数	Coh	I5	积分数 (Integral N)	/	2–256
4	谱平均数	Incoh	I5	谱平均数 (SAv N)	/	2–100
5	FFT 点数	FFTNum	I5	点数 (FFT N)	/	256–2048
6	脉冲宽度	Pulse Width	I5	微秒 (μs)	/	1–512
7	脉冲重复周期	Pulse Cyc	I5	微秒 (μs)	/	1–5120
8	发射峰值功率	Peak Power	I5	千瓦 (kw)	/	10–200
9	发射平均功率	Average Power	I5	千瓦 (kw)	/	1–60

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
10	波束偏离垂直方向的角度	Elevation	I5	度 (°)	/	0–20

表 9 径向数据项格式说明

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
01	高度	Alt	F6.2	公里 (km)		0–160
02	波束方位	Az1	I4	度 (°)		0、90、180、270
03	波束仰角	El1	I4	度 (°)		70–90
04	谱宽	W1	F7.2	米秒 (m/s)	9999.00	0–50
05	信噪比	SN1	F7.2	dB	9999.00	0–50
.....						
06	波束方位	Azn	I4	度 (°)		0、90、180、270
07	波束仰角	Eln	I4	度 (°)		70–90
08	谱宽	Wn	F7.2	米秒 (m/s)	9999.00	0–50
09	信噪比	SNN	F7.2	分贝 (dB)	9999.00	0–50

产品数据文件为实时的采样高度上的产品数据，由文件头和数据项组成。其数据记录的文件格式为 TXT，文件名后缀为\*.dat，以 CYT\_MST01\_DW\*\_L21\_STP\_YYYYLLDDHHMMSS.dat 形式命名和存储，该文件可以直接采用记事本打开。其中\*表示观测模式，YYYY、LL、DD、HH、MM、SS 表示时间，与前文对功率谱数据的表述一致。文件头包括观测时间（年月日时分）、台站代码和设备号组成，每一项均采用“空格”为分隔符。数据项按照高度先后顺序由 N 个高度上的观测值连续排列组成，每个高度的观测值包含高度、风向、水平风速、垂直风速和大气折射指数结构常数 5 个变量，数据项均采用 1 个空格为分隔符。具体格式说明如表 10-11 所示。

表 10 产品数据文件头格式说明

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
01	年	YEAR	I4	/	/	2010–2050
02	月	Month	I2	/	/	01–12
03	日	Day	I2	/	/	01–31
04	时	Hour	I2	/	/	00–23
05	分	Minute	I2	/	/	00–59
06	台站代码	StationCode	A3	/	/	/
07	设备号	InstrumentID	A4	/	/	/

表 11 产品数据项格式说明

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
01	高度	Alt	F6.2	公里 (km)	/	0–160
02	风向	D	F7.2	度 (°)	9999.00	0–360
03	水平风速	S	F7.2	米秒 (m/s)	9999.00	0–200
04	垂直风速	Vw	F7.2	米秒 (m/s)	9999.00	–50~50
05	大气折射指数结构常数	CN2	F7.2		9999.00	–200~-100

利用产品数据中的水平风速、垂直风速和风向就可以得到对应高度处的大气水平风场矢量，MST 雷达的低、中、高模式主要对应不同的高度探测范围（低模式为 3.5–10 km，中模式为 11–25 km，高模式为 60–90 km），其探测得到的大气参数一致。如下图 5 所示，为利用 2 级产品数据得到的低模式高度范围的大气水平风场矢量图。图中水平风速的方向由箭头方向表示（向上为北方向），风速的强度由箭头的大小和背景色度条表示，可以看出在 16:00UT–6:00UT，7–8 km 处有强烈的风切变。

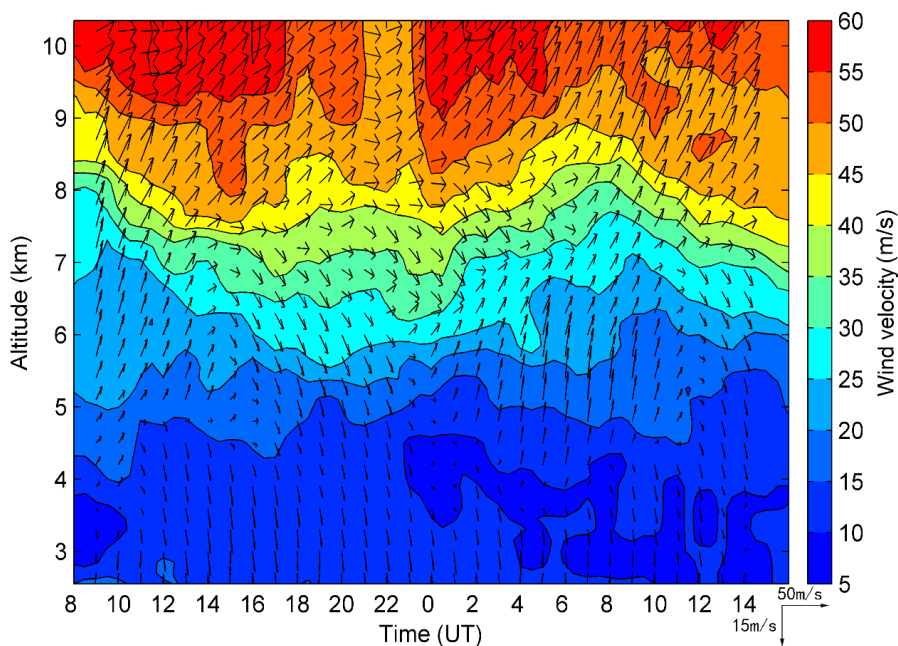


图 5 武汉 MST 雷达记录的低模式风场矢量（2014 年 11 月 30 日 8: 00 UT 到 12 月 1 日 14: 00 UT）

### 3 数据质量控制和评估

武汉崇阳站 MST 雷达探测的各级数据从数据采集、数据处理到数据发布均由计算机自动处理完成，从 2012 年至今运行稳定可靠，全天候不间断对雷达上空对流层、平流层和中间层的大气风场进行监测。按照每半小时产生 9 个文件计算（低、中、高模式各自对应应有 0 级、1 级、2 级数据文件），2012–2020 总共应有 1 419 120 个文件，现有 1 096 969 个文件，文件完整率约为 77.3%，数据丢失主要由突然断电、设备故障、仪器停机维护以及雷达维护改造引起。为了保证数据的可靠性，采用了以下措施对数据质量进行控制：

(1) 定期维护 T/R 组件, 更换损坏和性能下降的器件, 确保 80% 及以上的收发模块正常工作, 以保证足够的功率辐射以及合成波束的正确性。

(2) 在观测站内配备常规容易损坏的模块器件库存, 对设备故障及时维修和上报, 保证设备最大限度处于正常工作状态。

(3) 定期检查上传日志和数据中心文件, 对错误的数据进行重新上传, 对上传失败的数据及时补传, 保证数据传输的可靠性和及时性。

## 4 数据价值

MST 雷达作为一种无线电观测设备能够在除雷电外的绝大多数天气条件下 24 小时持续运行, 对站点上空大气做高时间和距离分辨率的连续实时采样, 是目前对流层、平流层和中间层中性大气三维风场探测能力最强大的无线电设备。本数据可支持对我国中低纬地区开展中性大气风场等空间天气要素的观测研究, 结合现有的中高层大气观测, 了解中低纬地区大气波动的结构特征, 开展中层–平流层–对流层能量耦合过程研究; 结合其他区域和种类的空间环境探测设备, 开展不同纬度大气的能量传输和耦合过程、中性大气–电离层的耦合机制等方面的研究。本数据为我国空间环境相关领域的科学研究、工程项目、数值模拟和预报研究提供数据支持。

## 致 谢

本数据论文的完成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。

## 数据作者分工职责

龚晚林 (1990—), 男, 博士, 工程师, 主要承担工作为数据服务。

周晓明 (1966—), 男, 本科, 高级工程师, 主要承担工作为数据生产。

陈 罡 (1980—), 男, 博士, 教授, 主要承担工作为设备研制。

张维帆 (1994—), 女, 博士, 主要承担工作为数据服务。

## 参考文献

- [1] QING H Y, ZHOU C, ZHAO Z Y, et al. A statistical study of inertia gravity waves in the troposphere based on the measurements of Wuhan Atmosphere Radio Exploration (WARE) radar[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(7): 3701–3714. DOI:10.1002/2013jd020684.
- [2] HUANG C, ZHANG S, ZHOU Q, et al. WHU VHF radar observations of the diurnal tide and its variability in the lower atmosphere over Chongyang (114.14° E, 29.53° N), China[J]. Annales Geophysicae, 2015, 33(7): 865–874. DOI:10.5194/angeo-33-865-2015.
- [3] QING H Y, ZHAO Z Y, XU Y H, et al. Observation and study of the aspect sensitivity and echo mechanism based on the Wuhan MST radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(2): 211–215. DOI:10.1109/LGRS.2018.2871824.



- [4] 青海银, 张援农, 周晨, 等. 基于 MST 雷达垂直风速的大气温度剖面反演[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 094301. DOI:10.7498/aps.63.094301.
- [5] ZHANG W F, CHEN G, ZHANG S D, et al. Statistical study of the midlatitude mesospheric vertical winds observed by the Wuhan and Beijing MST radars in China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(18): e2020JD032776. DOI:10.1029/2020JD032776.
- [6] 青海银, 赵正予, 周晨. 基于武汉 MST 雷达的对流层顶观测研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1395–1402. DOI:10.6038/pg2018CC0198.
- [7] 潘震豪, 周晓明, 陈罡, 等. 冷锋期间武汉 MST 雷达低平流层回波异常现象[J]. 空间科学学报, 2018, 38(4): 492–501. DOI:10.11728/cjss2018.04.492.
- [8] CHEN F L, CHEN G, SHI C H, et al. Strong downdrafts preceding rapid tropopause ascent and their potential to identify cross-tropopause stratospheric intrusions[J]. Annals of Geophysics, 2018, 36(5): 1403–1417.
- [9] HUANG C M, ZHANG S D, CHEN G, et al. Planetary wave characteristics in the lower atmosphere over Xianghe (117.00°E, 39.77°N), China, revealed by the Beijing MST radar and MERRA data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(18): 9745–9758. DOI:10.1002/2017jd027029.
- [10] CHEN G, CUI X, CHEN F L, et al. MST radars of Chinese meridian project: system description and atmospheric wind measurement[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(8): 4513–4523. DOI:10.1109/TGRS.2016.2543507.
- [11] SATO T, TSUDA T, KATO S, et al. High-resolution MST observations of turbulence by using the MU radar[J]. Radio Science, 1985, 20(6): 1452–1460. DOI:10.1029/rs020i006p01452.
- [12] THATIPARTHI S R, GUDHETI R R, SOURIRAJAN V. MST radar signal processing using wavelet-based denoising[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4): 752–756. DOI:10.1109/LGRS.2009.2024556.
- [13] WAKASUGI K, FUKAO S. Sidelobe properties of a complementary code used in MST radar observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23(1): 57–59. DOI:10.1109/TGRS.1985.289500.
- [14] ANANDAN V K, RAMACHANDRA REDDY G, RAO P B. Spectral analysis of atmospheric radar signal using higher order spectral estimation technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(9): 1890–1895. DOI:10.1109/36.951079.

## 论文引用格式

龚晚林, 周晓明, 陈罡, 等. 2012–2020 年武汉崇阳站 MST 雷达回波数据集[J/OL]. 中国科学数据, 2021, 6(2). (2021-06-22). DOI: 10.11922/csdata.2021.0023.zh.

## 数据引用格式

(1) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达径向高模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-09-13) [2020-07-13]. DOI: 10.12176/01.05.031.

- (2) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达径向低模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-09-13) [2020-07-13]. DOI: 10.12176/01.05.032.
- (3) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达径向中模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-09-13) [2020-07-13]. DOI: 10.12176/01.05.033.
- (4) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达功率谱高模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-07-27) [2020-07-10]. DOI: 10.12176/01.05.034.
- (5) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达功率谱低模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-07-24) [2020-07-13]. DOI: 10.12176/01.05.035.
- (6) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达功率谱中模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-07-22) [2020-07-13]. DOI: 10.12176/01.05.036.
- (7) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达产品高模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-07-08) [2020-07-13]. DOI: 10.12176/01.05.037.
- (8) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达产品低模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2010-07-06) [2020-07-10]. DOI: 10.12176/01.05.038.
- (9) 武汉大学. 武汉崇阳站 MST 雷达产品中模式数据[DB/OL]. 国家空间科学数据中心. (2011-07-08) [2020-07-13]. DOI: 10.12176/01.05.039.

## Mesosphere-Stratosphere-Troposphere radar dataset during

### 2012–2020 from Chongyang, Wuhan Station

GONG Wanlin<sup>1</sup>, ZHOU Xiaoming<sup>1\*</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, ZHANG Weifan<sup>1</sup>

1. Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China

\*Email: zhou.xm@whu.edu.cn

**Abstract:** The Mesosphere-Stratosphere-Troposphere (MST) radar is a large phased array radar, which enables the detection of three-dimensional wind fields in the mesosphere, stratosphere and troposphere. The MST radar operates in the very high frequency (VHF) band. The radar mainly applies the echo mechanism of turbulent scattering, Fresnel reflection and heat scattering to obtain the atmospheric three-dimensional wind profiles and turbulence characteristic parameters at different heights. Wuhan MST radar is invested and built by the Chinese Meridian Project and Wuhan University. It is the first MST radar built in the Chinese mainland, which locates at Chongyang county, Hubei province (29.51°N, 114.13°E). By using the Doppler Beam Swinging (DBS) technique with three or five non-coplanar scattering beams, the radar can obtain the power spectrum data in different directions through autocorrelation processing of the sending and receiving signals. The three-dimensional wind fields can be calculated from the radial Doppler velocities in different beam directions. Wuhan MST radar continuously detected the atmospheric wind fields from 2012 to 2020, and radar echo power spectrum, radial and product data were uploaded to Meridian Project Data Center. Through this dataset, the spatial and temporal variations of middle and upper atmospheric wind fields in the low- and mid-latitude regions of China can be derived. The dataset is useful for promoting the research of the middle and upper atmospheric dynamics in the low- and mid-latitude regions of China, and figuring out the coupling mechanisms between the low-middle-upper atmosphere and ionosphere. The dataset will also

provide significant support for the establishment of wind field models in middle and upper atmosphere, as well as space weather monitoring and forecast.

**Keywords:** MST radar; middle and upper atmosphere; wind fields; data sharing

### Dataset Profile

<b>Title</b>	Mesosphere-Stratosphere-Troposphere radar dataset during 2012–2020 from Chongyang, Wuhan Station
<b>Data correspondence</b>	g.chen@whu.edu.cn
<b>Data author</b>	Wuhan University
<b>Time range</b>	2012–2020
<b>Geographical scope</b>	Chongyang, Hubei province of China (114.13°E, 29.51°N)
<b>Range resolution</b>	150 m, 600 m or 1200 m
<b>Data volume</b>	1,096,969 entries
<b>Data format</b>	*.dat, *.txt
<b>Data service system</b>	<a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.031">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.031</a> (high mode radial data) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.032">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.032</a> (low mode radial data) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.033">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.033</a> (middle mode radial data) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.034">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.034</a> (high mode power spectrum data) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.035">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.035</a> (low mode power spectrum data) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.036">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.036</a> (middle mode power spectrum data) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.037">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.037</a> (high mode product data) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.038">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.038</a> (low mode product data) <a href="http://dx.doi.org/10.12176/01.05.039">http://dx.doi.org/10.12176/01.05.039</a> (middle mode product data)
<b>Source of funding</b>	Meridian Project
<b>Dataset composition</b>	The dataset consists of the radial data in high, middle and low modes as well as the product data in high, middle, and low modes of Wuhan MST radar, including 1,096,969 data files, with 9 data files generated every half hour. The data size is about 283 GB.