

武汉中层大气中频雷达 及其初步探测结果

李凤琴 胡 雄 张冬娅 张训械
黄泽荣 熊建刚 曾 桢

(中国科学院武汉物理与数学所 武汉 430071)

摘 要

首先简要地讨论了武汉中频雷达观测原理和设备的组成. 该雷达测量 60—100 km 高度的大气风场和电子密度. 风场采用分布天线测量技术和全相关分析方法得到, 电子密度通过微分吸收和微分相位技术获得. 初步观测结果表明: (1) 武汉上空冬季 60—100 km 高度的纬向风多为西风, 风速为 30—50 m/s, 经向风速为 10—20 m/s. 垂直风速较小, 一般在 5 m/s 以内. (2) 60—100 km 高度范围的大气风场和电子密度均有明显的日变化, 风场在某些时段和高度区间有较强的风剪切出现. (3) 80 km 以上高度大气的风场和电子密度存在较明显的扰动现象, 它可能与大气波动过程有关.

关键词 中频雷达—中层大气—大气风场

1 引言

中频雷达用于测量中层和低热层高度 (60—100 km) 大气风场及电子密度. 从 20 世纪 80 年代以来, 中频雷达探测技术和分析方法不断完善, 特别是发射机实现了全固态化, 具有设备简单、价格低廉、运行方便和无人值守等突出优点, 中频雷达站迅速增加^[1]. 目前国际上共有 20 多个中频雷达站运转, 主要分布在北美、澳大利亚、日本等国家和地区, 它已经成为这个区域风场和电子密度常规观测的最主要手段, 以及中层大气风场参考模式的最重要的资料来源^[2]. 在此以前, 我国还没有这种探测设备, 缺乏我国上空中层大气风场数据, 它严重影响我国空间技术发展, 不能满足这个领域的科学研究需求.

在各方面的支持下, 武汉中频雷达站 (30°N, 114°E) 于 2000 年底建成并开始运转. 经过近半年运行, 获得了这个高度范围的大气风场和电子密度剖面的丰富资料. 2001 年 1 月到 3 月中旬, 我们与日本鹿儿岛中频雷达 (32°N, 135°E) 进行了联合观察. 鹿儿岛中频雷达观测站是从 1996 年开始运行的, 曾与火箭进行过对比和校正试验. 这次联合观测有利于两个台站资料比对, 检验我们资料的质量. 其次, 两个中频雷达站纬度非常接近, 通过资料联合分析可以得到潮汐和行星波随经度分布. 联合观测取得了非常好的结果. 有关联合观测报告将在另外文章发表. 这里我们将集中讨论雷达设备的测量技术和分析方法, 以及大气风场和电子密度剖面的初步观测和分析结果.

2001-03-02 收到原稿, 2001-11-04 收到修定稿

2 中频雷达的工作原理及组成

2.1 工作原理

60—100 km 高度属于电离层 D 区和 E 区的下部, 其特点是电子密度比较低, 电子与中性大气成分之间的碰撞频率较高, 因此, 电子与中性大气运动速度是一致的. 通过测量电子运动速度, 人们可以得到中性大气风场. 在这个区域存在几米到几百米尺度的电离层不均匀团块, 不均匀块界面上存在折射指数梯度, 电波发生部分反射. 在这个高度范围内还存在其他回波反射和散射机制, 如湍流散射和 Thompson 散射. 对于中频雷达, 部分反射过程是主要的. 中频雷达反射信号强度与电子密度的梯度成正比, 与电波频率的平方成反比, 即频率越低, 则回波信号越强. 但当频率太低时, 电波将在较低高度上发生全反射, 不能够得到较高高度上的回波. 通常选择 1.8—2.5 MHz 的中频频段为宜. 结合武汉电磁环境和兼容特性, 以及雷达站的背景噪声电平, 我们选择雷达工作频率为 2 MHz 附近. 在这个频率附近噪声电平比较低, 有利于提高接收信号的信噪比, 提高探测精度. 雷达站的工作频率选择是非常重要的, 它对于雷达探测结果有重要影响.

低电离层受地球磁场的控制, 具有各向异性的双折射特性. 当给定频率的电波入射时, 有两种特征波在介质中传播. 根据理论计算, 在赤道 $\pm 15^\circ$ 以外, 垂直入射的电波可以满足准纵传播近似条件, 两种特征波都是圆偏振波. 当我们进行大气风场测量时, 要求中频雷达天线消除极化的影响, 而测量电子密度时天线又能分别得到 O、X 波回波. 因此, 天线应该是能够发射和接收不同偏振波, 并对发射和接收波的偏振特性进行控制. 即通过发射和接收某一圆偏振波, 避免另一个特征波的干扰, 消除介质各向异性的影响. 中频雷达天线采用偏振天线和极化控制技术, 满足测量要求. 天线分布见图 1. 雷达的发射天线阵采用 4 个半波偶极子组成的正方形天线阵, 它可以在天线极化控制下产生所需要的圆偏振波或线偏振波. 而接收天线采用 3 个在空间上分开的天线, 每个天线由交叉半波偶极子组成. 这种模式称为分布天线模式 (Spaced Antenna Mode), 图 1 中 3 个接收天线分布在等边三角形的顶点上, 三角形边长为 185 m.

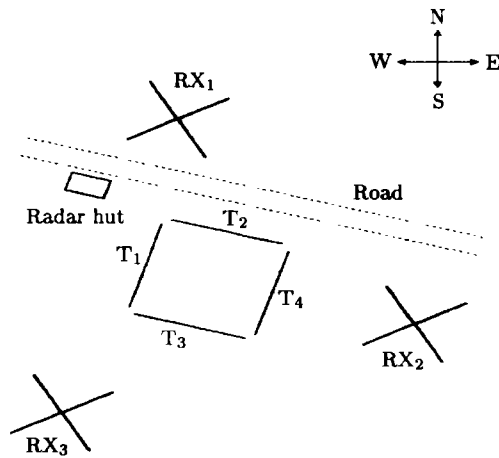


图 1 雷达的天线分布, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为 4 个发射天线, RX_1 、 RX_2 和 RX_3 表示 3 个接收天线

Fig.1 Scheme of the radar antenna

中频雷达测量回波幅度和相位, 大气风场是从 3 个接收天线接收的复振幅的全相关分析得到. 在安装和调试天线中, 将 4 个发射天线和 6 个接收天线的附加相位加以消除, 避免由于天线固有的相位引起的测量误差. 附加相位消除可以通过非常细心调整天线长度和耦合回路实现.

2.2 雷达系统的组成

中频雷达设备是全固态的, 具有较高的可靠性和便于维修. 系统由发射机、接收机、天线馈线、数据处理与显示系统等组成, 图 2 为其总体原理方框图.

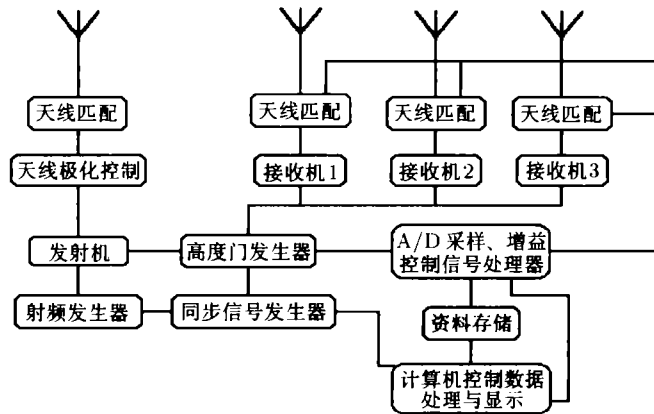


图 2 雷达总体原理方框图

Fig.2 Block diagram of Wuhan MF radar

中频雷达的发射机由 10 个固态功率模块组成. 每个模块输出 2.5 kW 功率, 合成后得到 25 kW 功率输出. 发射功率分成两路, 经天线分配器变成 4 路馈送到 4 个发射天线. 收发模块提供同步、高度门控制和 A/D 采样控制信号, 控制雷达回波接收和采样.

接收机接收雷达回波, 正交检波后, 经 A/D 采样得到复信号. 对复信号的全相关分析得到风场随高度分布; 利用微分吸收和微分相位技术可以得到电子密度剖面. 计算机数据处理与显示系统负责数据的计算、储存和显示, 并可向有关的输出设备 (如打印机、磁盘等) 输出. 同时监视器还可以显示雷达各部分的状态. 雷达设备可以通过电话线进行远距离操作控制, 传输观测数据, 实现无人值守.

3 实验方法与结果分析

3.1 实验方法

雷达系统的数据处理与显示部分由两台式计算机完成. 其中一台用于雷达运行控制; 而另一台计算机用于数据采集、分析和结果显示. 通过人机对话界面, 选定系统运行的参数和采样参数, 并将这些参数通过接口传送到发射机的信号处理器, 控制雷达发射机工作和接收机的信号采样. 风场计算及输出是通过通信口, 从 A/D 采样及信号处理器读取数据, 对它们作全相关分析, 计算得到各个高度上的大气风场及其它有关参量, 并将风场数据储存或输出到磁盘机等. 风场显示、系统状态监视也是通过人机交互方式, 监视器显示所选择的参量, 或者监视系统各部分的工作状态.

雷达系统通过两种不同的工作方式, 完成风场与电子密度的探测. 通常在探测风场时, 雷达发射一种偏振波 E 波 (非寻常波) 或 O 波 (寻常波). 由 3 个天线阵接收返回的信

号. 探测电子密度时, 发射机交替发射 O 波和 E 波, 然后分别测量 E 波和 O 波的相位和振幅. 图 3 为 2001 年 2 月 9 日接收机的两路交叉偶极子天线上采集的原始信号. 雷达工作在测风模式, 探测高度 74 km.

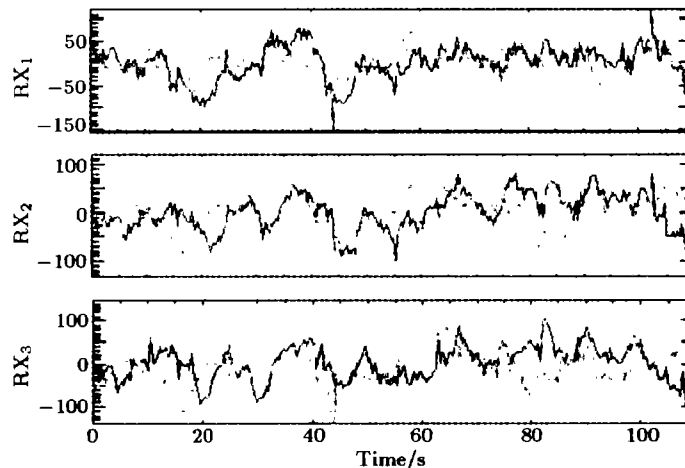


图 3 探测风场模式工作时交叉接收天线接收的两路原始信号

Fig.3 Received signals of cross antennas during the measurement model of the wind field

雷达每测量一次风场或电子密度为 2 min, 风场与电子密度的测量交替进行, 一个循环 4 min. 雷达的时间分辨率为 2 min, 而空间垂直分辨率为 2 km.

3.2 结果与讨论

下面是 2001 年 2 月 9 日中频雷达探测的初步分析结果. 图 4 为 60—100 km 的水平风场记录. 由于夜间电离层 D 区基本消失, 所以夜间不能够得到 80 km 以下的风场. 上限的探测数据有时可达 120 km, 但自 100 km 以上, 由于需要消除电离层对电波群时延的影响, 一般不分析也不给出其风场数据.

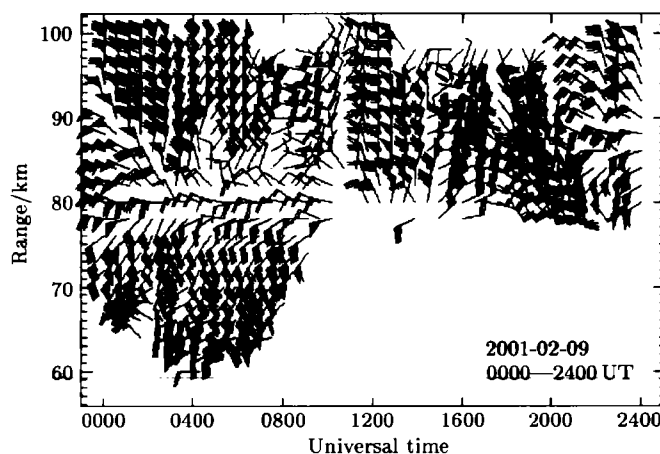


图 4 水平风场图

Fig.4 Horizontal field measured by MF radar

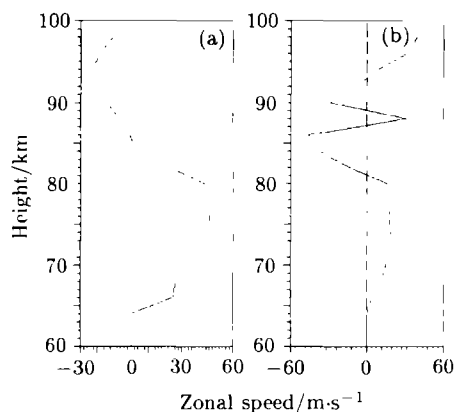


图 5 纬向风与经向风场小时平均剖面 (2001 年 2 月 9 日, 0400—0500 UT)

Fig.5 Hourly average winds of the zonal and meridional components (at 0400—0500 UT, on Feb.9, 2001)

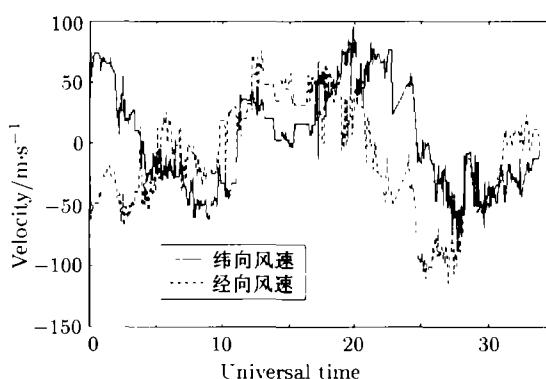


图 6 90 km 高度的纬向风与经向风

Fig.6 Variations of the zonal and meridional components with time at 90 km at 0000—1000 UT, on Feb. 10, 2001

由图 4 可见, 80 km 以下基本上处于西风带, 风向为西风, 风速 30—50 m/s. 在 82—100 km 间, 风向随昼夜时间而变化, 特别是在 82—93 km 间, 在中层顶附近, 风场变化特别剧烈, 在 0200—0700 UT 的时间-高度的剖面图上, 风场呈旋转型. 在 0800 UT 左右, 在 83 km 附近形成强烈的剪切风场, 这种风场对飞行器往往造成极大危害.

我们曾仔细分析了武汉中层大气风场随高度变化的特点. 60—80 km 高度范围的大气风场存在一些起伏, 但是, 其变幅相对较小. 随着探测高度上升到中层顶时, 风场方向和速率变化更大, 而且随高度增加而加强, 表明存在大气波动放大现象, 周期几分钟的波动尤为明显 (这里没有给出结果). 中层顶的大气波动可能对空间天气过程有重要影响, 而且它可能在短时间内和比较狭窄的高度范围, 引起风场的强切变. 这些问题的研究不仅有其理论上的意义, 而且有重要的实际意义.

图 5 为 60—100 km 间的平均纬向风和经向风场. 从图可见, 在 83 km 以下, 纬向风以西风为主, 平均风速可达 50 m/s 左右, 83 km 以上风速明显减弱, 正如在图 4 看到的白天有时可能出现东风, 风场的变化较为复杂. 而 80 km 以下的经向风场以南风 (向极区) 为主, 风速在 10—20 m/s 左右, 而在 83 km 以上, 风速明显减弱. 其风场的垂直剖面显示出波动结构.

图 6 为 90 km 高度纬向风与经向风随时间变化的曲线. 由图可见, 纬向风和经向风

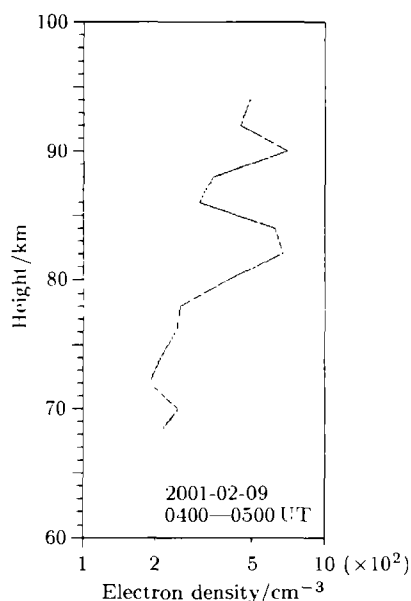


图 7 电子密度小时平均剖面

Fig.7 Profile of the electron density for hourly average

的波动较大,且两者都具有近似一致的变化周期,显示两者具有相同的扰动源.以上数据的功率谱估计表明扰动周期以 24、12、7.4、2.5、1.6、0.98、0.64 h 为主,其中尤以 24 h 的扰动最为突出.可见,90 km 高度的大气具有多种扰动成分的复杂的扰动特性,这对于空间环境与空间物理的研究与应用都是十分重要的.胡雄等^[6]曾对日本中频雷达的风场数据进行了动态谱分析和双谱分析,发现在中层顶区域有较强的大气潮汐波、重力波和行星波的活动,而且准两天行星波与大气潮汐、重力波之间还具有相位相干的现象,可能存在大气不同类型波动成分之间的相互作用,这些构成了中层顶区域大气动力学的复杂性和多样性.

图 7 为 2001 年 2 月 9 日电子浓度随高度变化图.在 78 km 高度,电子浓度为 $400/\text{cm}^3$ 左右,95 km 处达 $2000/\text{cm}^3$.

另外,根据多日的记录分析可以看出,风场和电子浓度均具有明显的逐日变化.

4 初步结论

武汉中频雷达是我国第一台探测中层大气风场和低电离层电子密度的设备,它对于开展中层顶区域大气动力学和电离层的研究工作具有重要的意义.从大气风场和电子密度初步分析得到的一些非常有意义的结果如下:

(1) 武汉中频雷达日间可以测量到 60—100 km 大气风场和电子密度剖面,夜间可以得到 80—100 km 相应的观测数据.数据的时间分辨率为 2 min,空间垂直分辨率为 2 km.它是中层和低电离层常规观测的很好手段.观测结果也说明,雷达选用的工作频率是合适的,功率满足测量要求.它与日本鹿儿岛联合观测证实,两者观测结果趋势是非常一致的.

(2) 武汉上空冬季 2001 年 2 月 9 日的观测结果的主要特点是,60—80 km 纬向风是西风,速度为每秒几十米.在 80 km 附近风场西风变为东风.我们曾观测到风速为每秒百米量级的强风.60—80 km 高度范围,风场变化较小,80 km 以上变化幅度较大.90 km 高度资料分析结果表明,在这一高度存在丰富的不同周期的大气波动现象,尤其是 24 h 的潮汐风.

(3) 武汉上空冬季,电离层电子密度具有一些特点.80 km 以下,日间电子密度为每立方厘米几百个电子,数值比较稳定.80 km 以上,它随高度和时间变化较大,这些变化可能与大气波动过程有关.

参 考 文 献

- [1] Holdsworth D A, Reid I M. A Simple model of atmospheric radar backscatter description and application to the Full Correlation Analysis of spaced sensor data. *Radio Sci.*, 1995, **30**(4):1263—1280
- [2] Manson A H, Meek C E, Vincent R A, Smith M J. Mean winds of the mesosphere (60—80 km), as measured by MF radar. *Handbook for MAP*, 1985, **16**:36—45
- [3] Sato T. Radar principles. *Handbook for MAP*, 1989, **30**:19—53
- [4] Ratcliffe J A. Some aspects of diffraction theory and their application in the ionosphere. *Rep. Prog. Phys.*, 1956, **19**:188—267

- [5] Briggs B H. The analysis of spaced sensor records by correlation technique. *Handbook for MAP*, 1984, 13:166—186
- [6] 胡雄, 张训斌, K Igarashi. 中频雷达风场的双谱分析. *空间科学学报*, 1999, 19(3):226—231

MESOSPHERIC MF RADAR IN WUHAN AND ITS PRELIMINARY OBSERVATION RESULTS

LI Fengqin HU Xiong ZHANG Dongya ZHANG Xunjie
HUANG Zerong XIONG Jiangang ZENG Zhen

(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract

The MF radar was installed and firstly used to observe the mesospheric electron wind and ionospheric density over Wuhan. In this paper, the principle and configurations of the radar and its preliminary observations are presented. Providing the measurements of wind field and the electron density at height ranges from 60 to 100 km, the radar is configured with Spaced Antenna Mode. The method of Full Correlation Analysis is applied to estimate the wind field, while the Differential Absorption or Differential Phase Experiment technique is used to measure the electron density. The preliminary observation results show that (1) the zonal wind usually is in west wind at Feb. 9, 2001, its value about 30—50 m/s, while the meridional wind is about 10—20 m/s and vertical wind is weak with a speed is less than about 5 m/s at 60—100 km height over Wuhan. (2) There's obviously diurnal variation of wind field and electron density at 60—100 km, and a wind shear is occasionally observed. (3) there's obvious disturbance of the wind field in the mesosphere, which could be connected with the atmospheric waves.

Key words MF radar, Mesosphere, Mesospheric wind