

空间环境之无线电探测

王 霄

一、空间环境无线电探测

20世纪初,爱德华·阿普尔顿等用连续波和脉冲波实验方法证实了电离层的存在,开创了用无线电方法探测电离层的技术的历史。之后,20世纪40年代后期和50年代,人们开始使用火箭、卫星等空间飞行器对电离层进行无线电探测和直接探测。此后,各种地基和天基无线电探测手段被大量用来进行空间环境监测;利用无线电方法,通过对自然和人工发射电磁波的接收及对接收信号参量的分析而获得空间环境参量,满足人们对空间环境探索、认识和了解以及各种应用系统的需求。

作为各波段无线电波传播的介质,中高层大气、电离层、磁层和行星际等环境的结构、变化和扰动不同程度地影响不同波段的无线电波的传播特性。因此,通过对空间环境中透射的、反射的和散射的无线电波信号强度、传播时延、相位变化等参量的测量,必要时加以反演计算,可以遥感探测出空间环境的不同参量及其时空变化特性。如电离层探测的常规设备——电离层测高仪,它从地面以扫频方式垂直向上发射调制的高频(0.5~30 MHz)无线电脉冲,在同一地点接收不同频率上由电离层反射的回波;当忽略碰撞和磁场的

影响时,根据阿普尔顿-哈特里公式(见磁离子理论),入射波将在 $f-f_N$ 时反射回来,其中 f_N 为等离子体频率(MHz), f 为发射频率(MHz), N 为电子密度(m^{-3}),利用电波来回传播的时间 τ (称为时延),可得到虚高($h'=c\tau/2$)随频率变化曲线,即电离图或频高图(ionogram), c 为自由空间中电磁波传播速度。通过度量、解释和分析反演频高图,得到探测点上空F2层峰高度以下电子密度的高度分布,即电子密度剖面,同时根据回波的极化、振幅、相位以及到达角和多普勒频移,可以获得更丰富的关于电离层结构与动力学的信息。

空间环境的无线电探测主要有透射探测(如行星际闪烁探测、卫星信标电离层电子总含量探测)、反射探测(如电离层测高仪探测、高频多普勒探测等)以及散射探测(相干、非相干散射雷达探测)。

与其他手段相比,空间环境的无线电监测手段具有以下主要优点和特点:

(1) 监测高度范围广:各种无线电探测设备可以监测中高层大气、电离层、磁层、行星际的结构如扰动,甚至太阳表面的活动如太阳耀斑爆发,也可以从不同波段的无线电手段中加以监测;

(2) 监测参量多:以非相干



子午工程云南曲靖观测站非相干散射雷达
44米天线罩

散射雷达为代表的无线电手段可监测空间环境的成分、密度、温度、电场、风场等数十种重要参量;

(3) 可全天候不间断进行几乎连续的监测:基本不受天气等环境因素的影响;

(4) 成本相对低廉,适用于作长期的日常监测。

二、子午工程无线电探测要素

国家重大科技基础设施——东半球空间环境地基综合监测子午链(简称“子午工程”)空间环境监测系统无线电监测分系统的主要监测参数有:中高层大气的矢量风场、钠密度,电离层的电子浓度、离子浓度、电离层等离子体漂移速度、电离层电子积分总含量、电离层常规垂测参量(峰值浓度、峰值高度等)、不规则结构和闪烁指数以及行星际等离子体运动速度等。这些科学数据可以用来研究我国区域上空和全球空间的中高层大气和电离层环境的物理变化特性,建立空间天气模型,同时为航天活动、通信导航、卫星定位等高新技术领域提供应用服务。

关于子午工程的详细信息,请参见子午工程总工程师、空间



天气学国家重点实验室主任王赤研究员在美国著名杂志 *Space Weather* 发表的文章“New Chains of Space Weather Monitoring Stations in China” (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2010SW000603.shtml>)。

三、子午工程无线电监测分系统

子午工程无线电监测分系统由4个相互联系的子系统构成：

1 非相干散射雷达 (ISR)

建于云南省曲靖市沾益县 (25.6°N, 103.8°E)。雷达发射脉冲功率 2 MW, 利用高空大气中等离子体热起伏的微弱散射信号来遥测高空大气的物理参数, 这种热起伏引起的散射信号是非相干的。非相干散射信号的功率谱与所探测等离子体的速度分布函数成正比, 因此非相干散射雷达能直接测量等离子体的多种物理参数, 如探测从约 100 千米到 1000 千米的电离层和中高层大气的多种参量, 包括电子密度、电子温度、离子温度、离子成分、等离子体速度、离子-中性粒子碰撞频率等, 以及 1500 千米高度的磁层 (等离子体层) 参数。这些参数会对低纬电离层动力学研究、磁层-电离层耦合研究、电离层-热层耦合研究、对流层和平流层研究起到巨大的促进作用。

非相干散射信号是微弱的, 与噪声电平相当, 获得电离层参数的精确测量必须提高信噪比。雷达设计不仅要采用高发射功率和高增益天线, 而且还要采用当前最先进的信号处理技术, 如相干积

累, 低噪声放大, 脉冲编码, 压缩, 数字滤波, FFT (Fast Fourier Transform, 快速傅里叶变换) 等先进技术, 保证高精度的参数测量。因此, 非相干散射雷达是一部大功率, 高精度测量雷达。

2 无线电雷达链

主要设备包括:

(1) 高频相干散射雷达 (HF 雷达)

利用电离层不规则结构散射特性, 可探测 52° 方位张角、3000 千米距离范围以内的电离层结构和

运动参量, 主要包括雷达回波强度、电离层对流速度、速度谱展宽等。建于中国南极中山站 (图 1), 可以监测极区电离层场向排列的不均匀体及其运动。

(2) 中间层-平流层-对流层雷达 (MST 雷达)

子午工程建设两台 MST 雷达, 分别建于北京 (图 2) 与武汉两个综合观测站。它是一种工作在 VHF 频段的大气层观测专用雷达, 用以观测中间层 (Mesosphere) - 平流层 (Stratosphere) - 对流层



图 1 子午工程南极中山站高频雷达天线阵



图 2 子午工程香河观测站 MST 雷达阵全貌





图3 子午工程海南富克观测站甚高频相干散射雷达天线阵

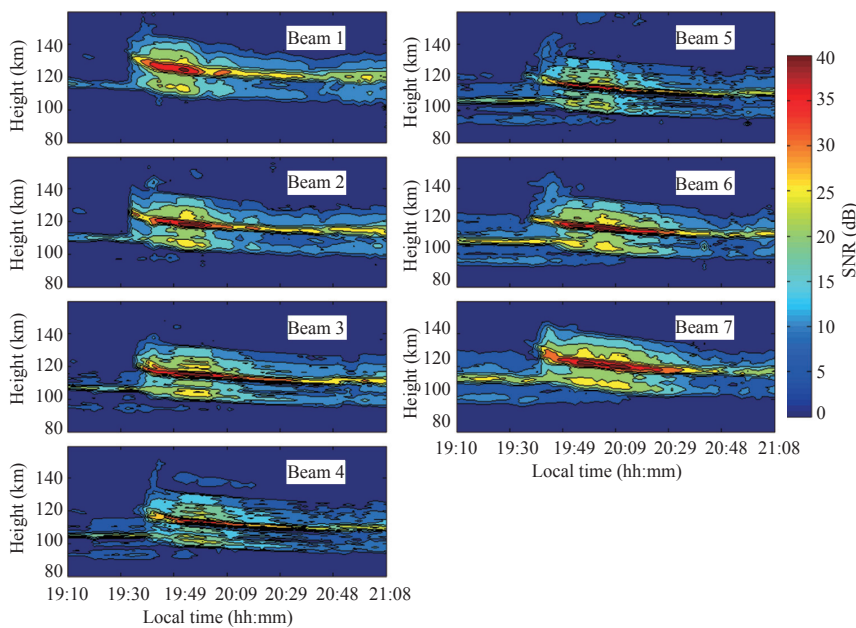


图4 子午工程海南富克观测站甚高频相干散射雷达观测到的电离层E层不规则结构演化过程



图5 子午工程漠河观测站流星雷达天线

(Troposphere) 的风场矢量、大气波动和湍流，必要时可扩展功能至低热层状态的监测。工作时，通过发射高频探测脉冲信号，电磁波信号遇到大气湍流后散射返回，雷达天线接收到回波信号，经过信号处理和计算，形成湍流回波信号功率谱，再进行进一步数据处理和分析，反演出大气风场。

(3) 甚高频相干散射雷达 (VHF 雷达)

建于海南综合站 (图3)，雷达的工作频率为 47.5MHz，能够观测 3 m 左右尺度的电离层 E、F 区的场向不规则结构。它工作在 VHF 频段，利用电离层 E、F 区不均匀结构对雷达信号散射，测量电离层场向不均匀结构回波的强度与多普勒频移，探测研究电离层不均匀结构特性及变化 (图4)。

(4) 全天空流星测风雷达

建于武汉综合观测站，利用流星余迹回波的测量，探测 80 ~ 110 千米高度范围的风场矢量，通过反演还可获得中层顶区的温度等参量。

全天空流星测风雷达 (又称无线电流星雷达，图5) 是国际上 20 世纪末才发展起来的一种新型流星雷达，利用发射一定频率无线电波，接收从低电离层高度 (100 km 左右) 上，由于流星进入地球高层大气与大气摩擦烧蚀产生的电离气体余迹的反射回波，并经分析计算从而获得在 80 ~ 100 km 高度范围内大气风场、大气扩散系数、流星通量、流星位置和流星运动速度等参数。全天空流星测风雷达已成为中高层大气和空间环境观测研究的有效手段，是空间环境监测和空间物理研究中的一种重要科学探测设备。

3 数字 / 常规电离层测高仪链

电离层垂直探测是用高频无线电波从地面对电离层进行日常观测的技术。这种技术使用的探测设备称为电离层测高仪。它垂直向上发射频率随时间变化的无线电脉冲，在同一地点接收这些脉冲的电离层反射信号，测量出电波往返的



传递时延,从而获得反射高度与频率的关系曲线。这种曲线称为频高图或垂测电离图。从频高图上可以度量、反演计算出电离层 F2 峰值高度以下的电子浓度剖面以及各层的关键参数(如临界频率、峰值高度等),同时从频高图可以获得电离层 E、F 层的不规则结构以及电离层吸收信息。数字电离层测高仪可以获得更多的信息,如回波方向、多普勒频移等,同时,它具有电离层等离子体漂移观测模式,可以观测电离层不同高度的等离子体漂移运动速度(图 6)。

垂直探测技术也有它的局限性,例如,难于探测 D 层的电离程度,难于获得 E 层和 F 层之间谷区(120~140 千米)的信息,不能研究 F 层峰以上的电离层等,这些缺陷须用其他探测方法加以弥补。

子午工程利用原有不同类型的电离层测高仪,通过适当新建和改造升级,形成了观测、数据处理和传输自动化的数字测高仪链和测高仪网络。主要包括:

(1) 数字测高仪链

更新/升级武汉、海南及南极中山站 3 个综合站上运行的数字测高仪,新建北京综合观测站和漠河站(图 7) 2 台同类型数字测高仪,在整个子午链上形成了具有频高图自动度量功能、监测结果实时网上发布的数字测高仪观测链(图 8)。

(2) 常规垂测站网

选取东经 120° 子午线上的满洲里、长春、广州及沿北纬 30° 纬线的重庆、拉萨等电离层台站中适合的纳入测高仪链网,统一数据

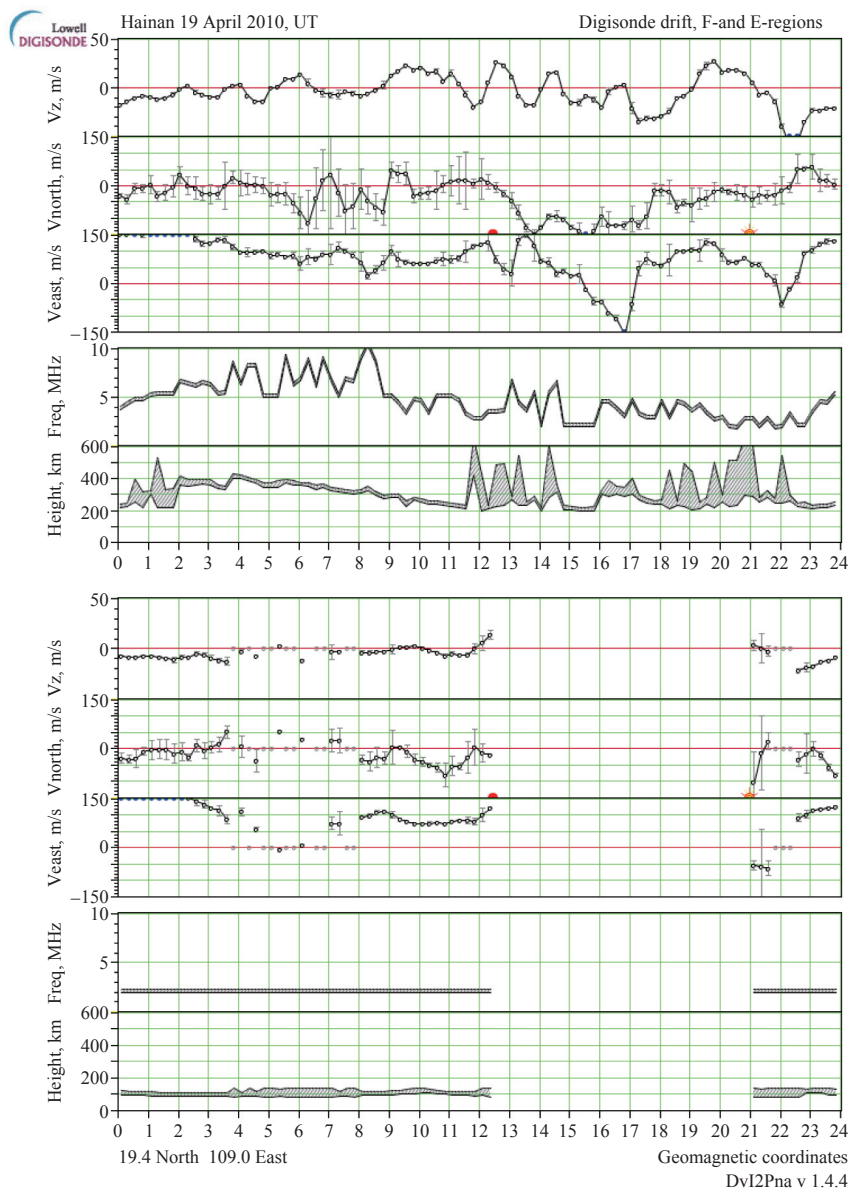


图 6 海南台站探测的 E 层和 F 层等离子体漂移速度

格式,并逐步完善联网。

4 空间环境扰动的实时连续监测链

主要设备包括:

(1) 行星际闪烁 (IPS) 监测设备

行星际闪烁 (Interplanetary Scintillation, IPS) 是指当电磁波穿过行星际空间时,电磁波被太阳风等离子体不规则结构散射、折射而形成的强度和相位的一种快速随机

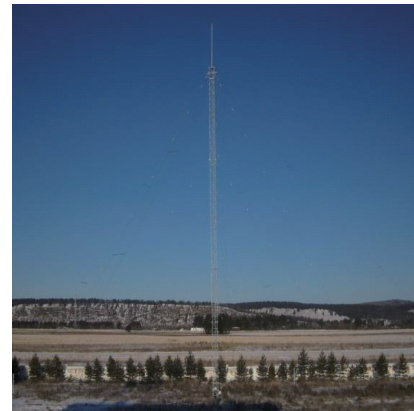


图 7 子午工程漠河观测站数字测高仪发射天线

起伏现象。

地基行星际闪烁观测，可测量任何日心距和任何日球纬度上的太阳风风速，还可以长期监测和跟踪，是研究日地系统整体行为的重要手段。

子午工程利用国家天文台大型射电望远镜，监测行星际扰动，从射电信息中提取行星际空间太阳风速度和太阳风等离子体不规则结构的有关资料。

(2) 宇宙线监测设备

子午工程建设两台宇宙线监测设备，分别是位于北京综合站的

中子堆和广州站的闪烁体望远镜，用于太阳质子事件和太阳耀斑效应监测。

北京综合站的中子堆设备，主要探测的是原初宇宙线高能粒子与大气相互作用所产生的高能中子成分。通过探测地面次级宇宙线的强度，可以反演出太阳系中高能宇宙线强度的变化，间接地推算出行星际中的不均匀结构对宇宙线的调制，从而在这些结构到达地球之前对其可能造成的地球物理效应做出预报。

广州宇宙线台站采用 μ 子多

方向闪烁体望远镜设备，由 24 个相对独立的探头单元组成，主要记录宇宙线垂直、东、西、南、北五个方向的 μ 子强度，对于研究宇宙线 μ 子强度长期连续变化及太阳活动引起的行星际磁场扰动结构等具有重要意义。

(3) 电离层 TEC 和电离层闪烁监测网

随着全球定位系统 (GPS) 的广泛使用，采用 GPS 双频信标的测量获取电离层 TEC (Total Electronic Contents, 总电子含量) 参量以及电离层闪烁信息 (图 9) 成为当前最为重要的和广泛采用的方法。

双频接收机可以同时接收不同频率的载波信号，利用不同频率对电离层延迟的不一样，可以计算出电波穿过电离层路径上的总电子含量。卫星发射的无线电信号穿过电离层时，电离层的不规则结构会引起信号强度和相位的快速随机起伏，人们称这种现象为电离层闪烁。可以利用 GPS 接收机接收到的信号的幅度、相位和载噪比等参数计算出幅度和相位的闪烁指数，以此来衡量电离层闪烁的强度。

子午工程利用双频、多系统的 GPS 接收机，以不同基线配置在东经 120° 子午线附近，组网了实时监测电离层电子总含量，并对电离层扰动的水平传播及太阳耀斑的 TEC 效应 (SITEC) 进行监测；同时在特殊区域进行 GPS 信标的电离层闪烁效应监测。

(4) 高频多普勒频移 (HFD) 监测系统

子午工程高频多普勒频移

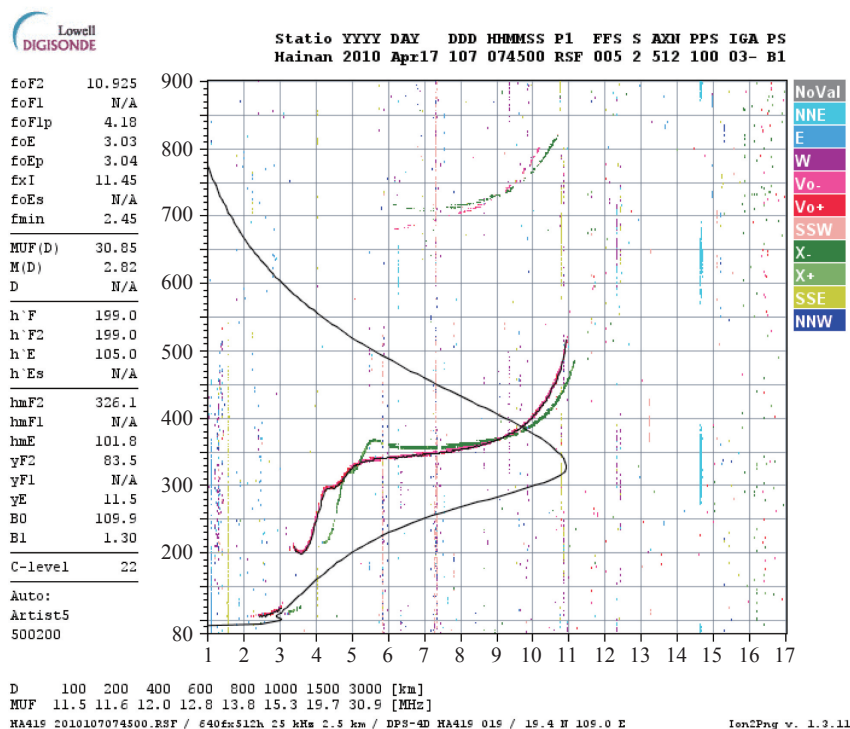


图 8 海南台站探测的电离图



图 9 子午工程电离层 TEC 和闪烁监测仪



(HFD) 监测系统(图 10)通过接收由国家授时中心发射的 10 MHz 的电磁波授时信号,记录由电离层折射指数变化或等效反射面运动造成的电离层反射波的多普勒频率偏移。研究表明,电离层不规则结构在多普勒频移谱上会产生明显的信号。

电离层多普勒频移观测技术是一种非常有效的电离层扰动监测方法,是常规电离层观测的一个重要补充。特别是用于对电离层状态进行连续观测,发现并分析中小时间尺度的电离层扰动,该技术更具有无可替代的优点。结合在地面上部署 3 点以上的电离层多普勒频移连续监测设施,更能分析得到扰动的来源和传播速度等空间信息,由此可对电离层中的各种扰动,尤其是针对电离层骚扰等进行实时的监测,为电离层空间天气预报以及电波传播服务。

子午工程在我国境内东经 120° 附近建设、形成了长短基线配合的高频多普勒监测网络(北京综合站由 3 台接收机构成高频多普勒台阵,武汉综合站一套高频多普勒系统),用于监测不同尺度电离层扰动的传播,以及太阳耀斑的短波效应,如短波消逝(SWF)、突然频偏(SFD)等。

四、子午工程无线电探测的特点

子午工程无线电探测分系统的各子系统各具特色。

非相干散射雷达(ISR)以探测参量多,覆盖高度范围广及功能

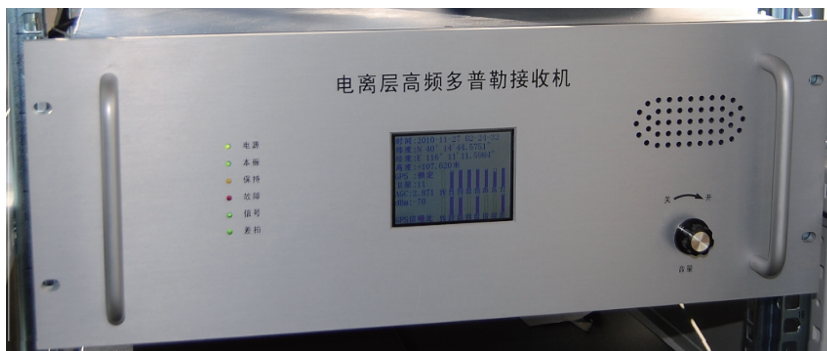


图 10 子午工程电离层高频多普勒频移监测仪

强大为突出特点,突出了在一个点(一个重点观测站)上对空间天气的重点监测,主要用于空间天气事件及中高层大气中精细结构变化的重点研究,同时也体现了子午工程的先进性。

由多种无线电雷达构成的雷达链、数字/常规测高仪链网,可以对各种空间天气事件的发生、发展与传播过程进行日常和加密的监测,获得各种中高层大气和电离层的各种参量变化,主要用于对空间天气发生、发展和传播特性研究以及空间天气的预报研究。

空间环境扰动的实时连续监测链在面(站网)层面上对某些空间天气参量进行连续监测,主要服务于空间天气事件的警报。

同时,整个子午工程无线电监测分系统在探测功能、探测参量、探测范围和时间分辨上又相互补充,相互配合,形成一个既有微观变化(ISR 单点重点监测),又有宏观变化(各链网全面监测),同时又有预警信息输入(空间环境扰动实时监测)的,系统性的、观测参量全面的,中国区域的中高层大气、电离层的综合监测系统。此监测网络基本可以满足我

国区域中高层大气、电离层模型构建,空间环境信息系统构建以及空间天气预报模型构建等的需求,同时为各种空间环境保障提供有力的数据支撑。

(北京中国科学院国家科学中心 100190)

作者简介

王霄,博士,中国科学院国家空间科学中心副研究员,子午工程副主任设计师;主要从事电离层探测、数据处理以及电离层物理方面的研究。目前主要进行低纬电离层的数据分析和理论研究工作。

