

肖赛冠,肖佐,史建魁等. 电离层高频多普勒记录在扩展-F 研究中的应用. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2162-2166, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.002.

Xiao S G, Xiao Z, Shi J K, et al. Application of the HF Doppler observations in studying spread-F. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2162-2166, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.002.

电离层高频多普勒记录在扩展-F 研究中的应用

肖赛冠¹, 肖佐^{1,2}, 史建魁¹, 张东和^{1,2}, 郝永强², 黄为权²

1 中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

2 北京大学地球物理系, 北京 100871

摘 要 本文通过观测实例探讨并论证了电离层高频多普勒观测在扩展-F 研究中的应用. 实例和相应分析表明: 首先, 由于高频多普勒记录的时间连续性, 有利于从观测角度了解扩展-F 的时间演化过程; 其次, 高频多普勒偏移对不规则结构造成的回波弥散、对不同尺度行进电离层扰动(TID)以及耀斑引起的突然频率偏移(SFD)效应都很敏感, 这些现象在记录上出现的时间关系有利于了解扩展-F 的触发因素或扩展-F 与其他电离层背景扰动之间的联系或相互作用; 最后, 高频多普勒记录对于持续时间较长(几小时以上)或很短(小于 1 小时)的扩展-F 都能够完整地反映, 不会产生因为观测间歇形成的缺失, 也可以有效区分究竟是连续一次还是一段时间内断续的扩展-F 现象. 高频多普勒观测有其自身的优点同时也具有一定的局限性, 本文对其局限性诸如缺乏空间分辨率等也做了分析. 指出发挥高频多普勒观测的优势, 综合应用多种资料, 通过不同手段的数据分析和比较, 可以更好地为电离层扰动的物理机制和预报研究提供正确的观测依据.

关键词 扩展-F, 高频多普勒观测, 电离层不规则结构

doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.002

中图分类号 P352

收稿日期 2012-03-09, 2012-06-19 收修定稿

Application of the HF Doppler observations in studying spread-F

XIAO Sai-Guan¹, XIAO Zuo^{1,2}, SHI Jian-Kui¹, ZHANG Dong-He^{1,2},
HAO Yong-Qiang², HUANG Wei-Quan²

1 State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract In this paper, the applications of the HF Doppler shift observations in the study on ionospheric spread-F are demonstrated with observational cases. These cases show that, the HF Doppler shift observation is continuous so that the evolution process of the ionospheric spread-F can be clearly understood in the view of observation. The HF Doppler frequency shifts are so sensitive to the scattering of the echoes caused by ionospheric irregularities, to the various scale of traveling ionospheric disturbances (TIDs), and to sudden frequency deviation (SFD) caused by solar flare that it has good advantage to investigate the physics mechanism of spread-F and the correlation between the spread-F and the ionospheric background disturbances according to the time series of the ionospheric disturbances in the observational records. The HF Doppler shift can

基金项目 国家自然科学基金(40974091, 41174135, 41131066), 空间天气学国家重点实验室专项基金, 以及中国科学院国家空间科学中心“空间天气和空间气候与全球变化的关系”课题资助.

作者简介 肖赛冠, 女, 1969 年生, 理学博士, 副研究员, 主要从事电离层物理、电离层扰动特性、电离层与低层大气耦合研究.

E-mail: sgxiao@spaceweather.ac.cn

observe the different time scale of the spread-F (from less than 1 hour to more than several hours) completely. It will be avoided to lose in the time series in record the spread-F occurrence and can decide the precision start and end time of the spread-F. Beside the obvious advantage, the HF Doppler also has some limitations in the observation, such as the spatial resolution. With comprehensive observation and data analysis, it is helpful for studying the physical mechanisms of the spread-F and for forecasting the ionospheric disturbances.

Keywords Spread-F, The HF Doppler observation, Ionospheric irregularities

1 引言

电离层高频多普勒测量开始于 20 世纪 60 年代^[1],用于电离层扰动的探测,并已指出回波与扩展-F 的联系.有研究表明,在当地频-高图上观测到扩展-F 的同时高频多普勒观测谱明显展宽,并指出该多普勒展宽与扩展-F 有关^[2];自 20 世纪 90 年代中期,随着计算机技术的快速发展,高频多普勒探测方法作为一种简易而便捷的工具,得到了很好的应用和发展.在电离层的动力学特性研究方面,人们利用多普勒观测开展电离层 TID 的研究,常采用的方法有多站及单站多普勒观测,多站台阵可以确定电离层扰动的水平传播速度及方向并对扰动源进行定向定位^[3-5];单站观测可以确定扰动水平传播的相速度和方向^[6-7].宁百齐等^[8]在电离层不规则结构的多普勒特性研究中发现扩展-F 回波总是引起扩散的多普勒谱,并分析了散开的回波分别与 Es 和扩展-F 的关系;肖佐、肖赛冠等^[9-11]报道了一些典型的电离层多普勒观测现象,并进一步用高频多普勒探讨论了电离层对台风响应以及散开回波与 TID 的关系等等.这些研究表明高频多普勒观测不仅可以进行电离层扰动的水平传播及方向定位,也可以很好地进行扩展-F 的分析研究.

迄今为止,扩展-F 的观测研究多集中于测高仪资料的统计分析或立足于频-高图基础上的形态研究.一般而言,长期的资料积累是测高仪统计研究的重要优势,但其不利一面是只有小时值,不能研究时间演化;多普勒测量的优势则在于观测不间断且采样时间间隔小,但也有一定的局限性,即一般专门的多普勒测量只使用一个或几个稳定的频率,因而观测结果常常只反映某几个特定高度上的特征,其高度分辨率差,难于显示观测现象随高度的空间演化,例如不能用于 bubble 的形态研究,相干或非相干散射雷达具有多普勒功能,但这种雷达不能用于常规观测. Jayachandran 等^[12]用同时的多普勒和

测高仪资料研究了赤道地区扩展-F 发生的背景条件,显示了多手段综合观测在电离层扰动特性研究中的优点.但针对扩展-F 的研究,多普勒观测的时间连续性仍然发挥独特的作用,如 Abdu 等^[13]指出的,夜晚电离层背景固然是扩展-F 发生的必要条件,但并非有利背景条件下就必然发生,常常需要特定的触发因素,恰恰在这一点上,高频多普勒具有不可替代的优点,它同时对波状扰动和不规则体散射敏感,对研究两者之间的先导关系以及伴随关系极为有利.

2 数据和方法

本文的数据来源于北京大学高频多普勒台站.北京大学高频多普勒台站始建于 1986 年,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.在 2005 年以前,设备采样率为 16 次/秒,对 256 个采样数据进行 FFT 分析,在 27 s 的时间间隔内完成一个数据点记录,因此两个点之间的时间间隔是 27 s,每 640 个记录为一个数据包,可形成一条多普勒频移随时间变化的记录曲线,代表 4.8 h 内多普勒频移的时间变化,也称为动态谱图,能反映频移的时变性、频谱结构和动态范围.记录图中分别用上下两条线来表示 +1 Hz 和 -1 Hz 的频移,两条线的中间位置代表 0 Hz 的频移,横坐标代表北京地方时(BT)^[14].电离层不规则结构对反射回波产生的影响在高频多普勒观测中表现为回波频移描述的不规则弥散.图 1 展示了宁静时期白天的典型多普勒记录.

3 多普勒频移记录在扩展-F 观测和研究中的可能应用

通常情况下,日落后由于 E 层的消失,使背景电离层电子密度梯度增大,电离层处于重力不稳定

状态,由于 Rayleigh-Taylor(R-T)机制,导致电离层中较容易出现不规则结构,特别是在赤道地区,日落后 E 区电场的反转进一步形成电离层 bubble 并沿磁力线向赤道两侧低磁纬地区扩散,因此,扩展-F 通常被看作是电离层 F 区的夜间现象.但观测表明,这一提法并非绝对,近年来关于白天以及中纬度地区的扩展-F 现象的观测事例也有报道^[15],由于中纬度地区的磁场位型以及白天的背景条件均不利于 R-T 不稳定性的发生,因而对其机制的深入研究自然引起了人们的兴趣,这也从一个方面显示了中纬度地区以及白天扩展-F 现象观测的重要性.

我们曾揭示了较大振幅的中尺度声重波与夜间扩展-F 的紧密联系^[11],从一个方面表明了多普勒资料由于其时间连续性在直观地显示声重波与扩展-F 关系方面的优越性,事实上,声重波和扩展-F 间的关系并非只限于先导性的种子作用,也常表现出相互伴随甚至波动后随现象,这之间的时间演化关系

表现出复杂的形态,一次完整的夜间事件可持续若干个小时,只有多普勒记录能够不间断地显示这种关系.同时,扩展-F 出现前后有没有背景的扰动,多普勒频移资料能够提供清晰的记录(图 2).

扩展-F 事件通常持续数十分钟至几个小时,还很少有人细致研究扩展-F 存在时间与背景或外界条件之间的关系,而我们认为这种关系的统计研究也是一个重要方面,明显地,多普勒资料比测高仪记录在这方面更为适合.

白天扩展-F 的出现虽然是小概率事件,但表现出与夜间现象形态上的差异,这种差异的研究对白天现象的机制研究十分重要.因此,系统地分析白天扩展-F 演化和形态特征,多普勒资料在这方面可以发挥重要的作用(图 3).

扩展-F 与多种地球物理事件的相关性研究是另一个重要方面.多普勒资料对耀斑、台风、火山爆发等太阳或地面激烈的气象活动都很敏感,在记录

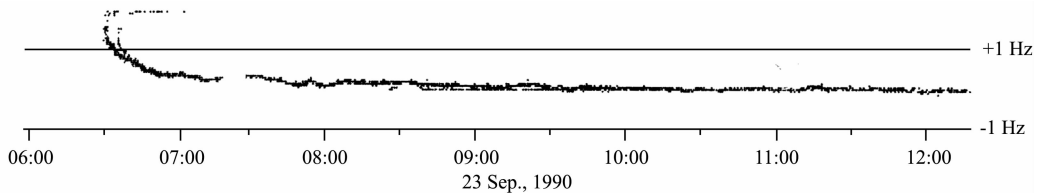


图 1 宁静时期白天的典型多普勒记录,反映了日出效应以及电离层等效反射面在上午时段的抬升

Fig. 1 Typical HF Doppler records during the quiet daytime illustrating the sunrise effect and the ionospheric equivalent reflector surface risen in the morning

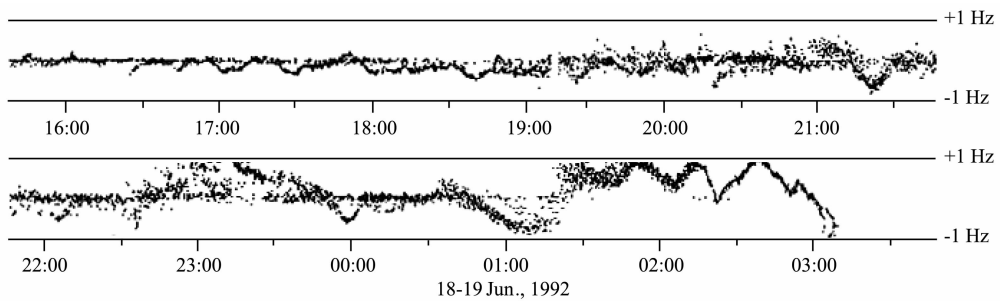


图 2 一次完整的夜间事件,注意其持续时间长,伴随着波状扰动(该时段以及前后没有明显地球物理扰动)

Fig. 2 A complete record of one event. Note that the longer duration and the wavelike disturbances companied (there is no any geophysical activity before and after and during the time of these records)

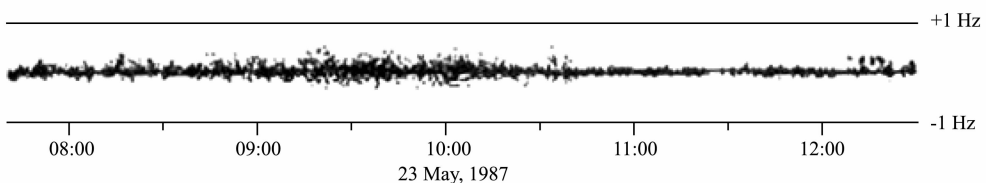


图 3 一次白天扩展-F 事件,注意持续时间较短,频移变化范围小,且没有波状扰动伴随

Fig. 3 A daytime spread-F event. Duration is relatively short, the range of frequency shift is small and there is no any wavelike disturbance companied

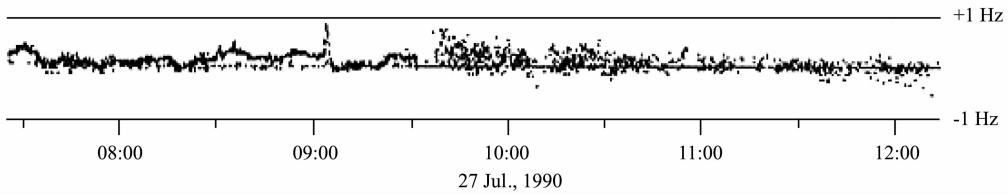


图 4 一次白天扩展-F 记录,注意前半小时出现一次耀斑效应,白天现象是否与耀斑导致的电离层突然变化有关,有待进一步研究

Fig. 4 A record of daytime spread-F. Note that there is a solar flare half an hour ahead of the spread-F appearing. It needs further study whether there is a correlation between daytime spread-F phenomenon and ionospheric sudden variation caused by the solar flare

上都有明显表征,扩展-F 与这些现象同时或先后出现的记录对电离层与低层大气耦合过程在什么条件下触发扩展-F 的了解有重要意义.此外,多普勒记录对没有明显电离层扰动而出现的扩展-F、白天短时存在的扩展-F 等现象的研究也都存在有利的一面(图 4).

4 结论和讨论

本文通过观测实例,探讨并论证了电离层高频多普勒记录在扩展-F 研究中的应用,主要结论是:

(1) 高频多普勒记录是时间连续的,有利于从观测角度了解扩展-F 的时间演化过程;

(2) 高频多普勒偏移对不规则结构造成的回波弥散,对不同尺度 TID 以及耀斑引起的 SFD 效应都很敏感,这些记录的同时或先后出现之间的关系有利于了解扩展-F 的触发或与一些其他电离层背景扰动之间的联系或相互作用,通过统计探求其相关性,在物理机制研究方面发挥重要的作用;

(3) 最后,对于持续时间较长(几小时以上)或很短(例如小于 1 小时)的扩展-F,高频多普勒记录也能够完整地反映,可以有效区分究竟是连续一次还是一段时间内两次或多次的扩展-F 现象,而不会造成非连续观测手段在观测间歇时段内相应现象的缺失.

当然,高频多普勒记录在扩展-F 现象研究中也有一定的局限,最重要的是,如前所述,我们使用的 10 MHz 电波在发射与接收点之间距离约 700 km 倾斜传播时,其等效反射高度大体上在 140~180 km 之间(白天较低)的一个高度区间上,几乎没有高度分辨率,因而不能对扩展-F 在电磁场作用下在垂直方向的行为(例如赤道 bubble 现象)有所反映,在完整地监测扩展-F 演化方面受到限制;其次,多普勒记录只对背景的快速变化敏感,但对电离层暴演化过程没有细致的反映,也就是说,直接由多普勒记录直观

地获取电离层暴期间的扩展-F 行为有局限.

Es 和扩展-F 本质上都是电离层小不规则结构对电波散射的观测体现,在频-高图中其高度和形态有截然的区别.而在高频多普勒记录中,则需要从发射频率,回波散开形态,散开的地方时、季节变化等规律通过细致分析加以区分.宁百齐等^[8]分析了多普勒散开回波的谱与 Es 和扩展-F 的关系,肖佐和肖赛冠等^[10-11]通过电离层对台风响应以及声重波和扩展-F 的相关确认了高频多普勒散开回波的扩展-F 特性.我们相信,这些研究结果的综合以及互相配合使多普勒手段在电离层不规则结构的深入分析中发挥更好的作用.

不同的设备有着各自的特点.GPS TEC 记录也是时间连续的,台站遍布全球,其时间分辨率和地域覆盖的广泛性,加之其对信号幅度、相位闪烁的敏感使其在不规则结构观测研究中占有重要的地位;测高仪虽然只有小时值,但其记录历史长达 70 余年,也有较好的地域覆盖,在扩展-F 长期演变以及地域差异等方面的统计研究方面仍居于不可替代的位置,特别要指出,先进的数字测高仪具有多普勒频移和漂移测量功能.另一方面,TEC 是电子数密度的积分值,特定高度上的小尺度结构可能被掩盖,测高仪记录也不利于个别事件的特例研究.当前,GPS 闪烁对精密定位的干扰已引起人们对电离层扩展-F 预警和预报的极大关注,充分发挥多种电离层观测记录各自特点,综合应用这些资料,通过不同手段的数据分析,为机制和预报研究提供正确的观测依据,是目前电离层空间天气重要应用方向之一.

致谢 感谢北京大学高频多普勒观测站提供了大量的电离层观测数据及北京大学空间物理与应用技术研究所电离层工作组的合作与研讨;感谢审稿人对本文提出的宝贵意见和建议.

参考文献(References)

[1] Davies K, Watts J M, Zacherisen D H. A study of F2-layer

- effects as observed with a Doppler technique. *J. Geophys. Res.*, 1962, 67(2): 601-609.
- [2] Cornelius D W, Essex E A. HF Doppler observations associated with spread F. *J. Geophys. Res.*, 1979, 84(A4): 1361-1368.
- [3] 李钧. 电离层声重波引起的高频多普勒频移. 地球物理学报, 1983, 26(1): 1-8.
Li J. HF Doppler frequency shifts of a HF radio wave caused by the ionospheric acoustic-gravity waves. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1983, 26(1): 1-8.
- [4] 李钧, 万卫星, 李利斌等. 全球大气重力波联测期间电离层扰动的台阵观测. 中国科学(A辑), 1991, (7): 762-766.
Li J, Wan W X, Li L B, et al. Network observation of ionospheric disturbances during the WAGS in October, 1985. *Sci. China (Math Sci.)*, 1991, 34(9): 1138-1143.
- [5] 万卫星, 李钧. 用数字测高仪漂移测量研究电离层声重波扰动. 地球物理学报, 1993, 36(5): 561-569.
Wan W X, Li J. Study of ionospheric gravity wave disturbances from drift measurements of a digisonde. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1993, 36(5): 561-569.
- [6] Dyson P L. Relationships between the rate of change of phase path (Doppler shift) and angle of arrival. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1975, 37(8): 1151-1154.
- [7] 万卫星, 李钧. 电离层声重波扰动的高频无线电诊断. 地球物理学报, 1989, 32(6): 609-620.
Wan W X, Li J. HF radio diagnostics of the ionospheric AGW disturbance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1989, 32(6): 609-620.
- [8] 宁百齐, 李钧. 电离层不规则结构的多普勒谱特性. 空间科学学报, 1996, 16(1): 36-42.
Ning B Q, Li J. Doppler spectrum of ionospheric irregularities. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 1996, 16(1): 36-42.
- [9] 肖佐, 刘凯军, 张东和. 典型电离层多普勒记录及其讨论. 空间科学学报, 2002, 22(4): 321-329.
Xiao Z, Liu K J, Zhang D H. Some typical records of ionospheric Doppler shift and their significance in the study of ionospheric morphology. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 2002, 22(4): 321-329.
- [10] Xiao Z, Xiao S G, Hao Y Q, et al. The morphological features of ionospheric response to typhoon. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112, A04304, doi: 10.1029/2006JA011671.
- [11] Xiao S G, Xiao Z, Shi J K, et al. Observational facts in revealing a close relation between Acoustic-Gravity Waves and Midlatitude Spread-F. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114, A01303, doi: 10.1029/2008JA013747.
- [12] Jayachandran B, Balan N, Rao P B, et al. HF Doppler and ionosonde observations on the onset conditions of equatorial spread F. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(A8): 13741-13750.
- [13] Abdu M A, Alam Kherani E, Batista I S, et al. Gravity wave initiation of equatorial spread F/plasma bubble irregularities based on observational data from the SpreadFEX campaign. *Ann. Geophys.*, 2009, 27(7): 2607-2622.
- [14] 肖佐, 霍宏暹, 邹积清等. DQ-87 型地球物理数据采集和处理系统. 地球物理学报, 1987, 30(6): 653-658.
Xiao Z, Huo H X, Zou J Q, et al. DQ-87 data processing system for geophysical observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1987, 30(6): 653-658.
- [15] Bowman G G, Dunne G S, Hainsworth D W. Mid-latitude spread-F occurrence during daylight hours. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1987, 49(2): 165-176.

(本文编辑 何 燕)