第 8 卷 第 2 期 空 间 科 学 学 报 Vol. 8, No. 2
1988 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 1988

利用高频返回散射技术探测电离层大尺度扰动

张秀菊 焦培南 姜炳武
(中国电波传播研究所)

摘 要

本文叙述了利用相控阵脉冲多普勒探测技术测量电离层大尺度扰动 (LSTID). 给出了 LSTID 的分析方法和计算方法. 对典型事件进行了计算并获得了 LSTID 的特征参量. 在研究中采用折皱反射模式说明了 LSTID 的形态.

一、引 言

对电离层扰动和电离层不均匀体运动的观测研究已经有几十年历史了. 早在 30 年代人们就发现了这一自然现象,50 年代中期垂直入射数据用于研究电离层扰动(TID),在电离层扰动期间电离图上常常出现异常的点,圈和多重描迹, Munko 和 Heister 定性的解释了在扰动区电离图上会出现异常现象的原因.

60 年代人们利用短波信号的幅度研究 TID. 近几年高多普勒探测网成为研究 TID 的主要手段. 非相干散射和遥感也被用于观测 TID.

Croft 论证了在通常高频地面后向散射研究中所采用的脉冲长度的情况下"固定地面距离"的概念可以得到正确的物理解释. 并且 Dearden 证实了 Croft 论证的实验确实性, 随着引起地面后向散射回波多普勒频移机理的澄清和计算机的广泛应用使频谱的模拟就成了可能. Earl 完成了特定条件下 TID 的模拟.

利用高频后向散射探测系统测量大尺度电离层扰动谱的研究比较少,实际上,用这种办法进行探测是极有发展前途的, 因为仅仅用一台探测器就能提供几千公里各个方向上的关于电离层和地面的信息.

近几年来,利用具有相控阵天线的脉冲多普勒探测系统测量了 LSTID 事件,本文说明了这一技术的理论和实现, 给出了分析和计算 LSTID 的方法, 并利用它计算了典型 LSTID 事件, 获得了 LSTID 的特征参量,在研究中利用折皱模式说明了 LSTID 的形态.

本文于 1987 年 7 月 2 日收到.

二、LSTID 模式和实验分析方法

电离层几乎总是处于变化状态，它有代表大块电离物流动的漂移速度，并且通常还蕴藏着在内部传播的各种波动，然而，当无线电波经过电离层折射和反射时电离图是“清晰”的、描迹是“光滑”的，被称为“宁静”状态，单位幅度的窄脉冲串经过“宁静”电离层斜向传输后接收信号的频谱是没畸变的，谱图显示出高斯形结构，高频后向散射频谱为楔形，如图 1 所示它们呈窄带谱.

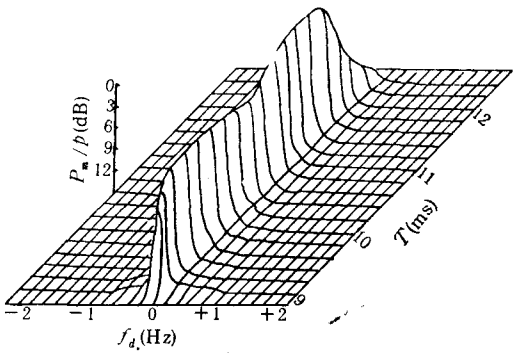


图 1　1978 年 11 月 15 日，11:30LT

Fig. 1　Nov. 15, 1978, 11:30LT

然而，实验观测指出自然的和人为的事件都能引起电离层扰动，因此，电离层中的扰动是经常存在的，在诸多扰动中有一种是由声重力波所驱动的，当声重力波传播到上层进入到电离层时，在与电离层相互作用的过程中产生了波动.

人们对于这种扰动的研究在技术理论和实现方法上现在还不够充分.

很久以前人们就知道在一跳传播的信号上用正弦折皱反射模拟 TID 效应，在说明接收信号的频率和到达角的周期起伏，用这种模式模拟是很成功的，这种弯曲反射模式最早被 Munro 应用于垂直入射或接近垂直入射的情况. Bramley 给出了斜入射情况的最好的解释. Toman 用计算机模拟说明了与 TID 反射面有关的到达角和多普勒频移的变化，它与正弦折皱表面一致，Lyon 也同样假定高频信号反射发生在电子浓度呈正弦折皱水平表面上

$$Z = h + A\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda}\right].$$

其中 Z 是地球以上的高度，x 表示波传播方向上的水平距，h，λ 和 A 分别是 TID 的高度，水平波长和幅度. Tedd 利用 Georges 和 Stephenson 所描述的无线电波通过扰动电离层折射和反射的波模式，用 Jones 射踪程序计算了经过扰动电离层的射线路径，电离层的电子浓度的变化由 $N = N_0(r, \theta, \varphi)(1 + \beta)$ 描述，其中 N_0 是以地球为中心的极坐标中的环境电子浓度，β 是由于 TID 引起的变化量.

$$\beta = \delta\exp\{-[(r - R_0 - Z_0)/H]^2\}\cos 2\pi\left[t' + \frac{\eta R}{\lambda_x} + \frac{r - R_0}{\lambda_z}\right],$$

其中 R_0 为地球半径，Z_0 为最大波幅高度，H为波幅的标高，λ_x 和 λ_z 分别为水平波长和垂直波长，δ 为扰动幅度. 用这个模式计算的结果与正弦折皱模式基本上是一致的. 研究指出由高频返回散射的多普勒谱可以推导出电离层的等效反射面的垂直运动速度，回波谱的主频率被定义为多普勒频移，假定多普勒频移随时间的变化是正弦折皱形式，相应的无线电波的等效反射面也是正弦变化，基于这种思想，本文利用正弦折皱模式分析了试验数据.

利用高频返回散射相控阵系统可以获得含有 TID 信息的后向散射回波，经过 FFT 谱分析可以得到三维谱图（时延-功率-多普勒频移）也就是高频后向散射信道的散射函数.

对于三维谱图进行了如下处理：

1. 固定某一方位的一群时延点（等效反射点）观察它的多普勒频移（频谱主值）随时间的变化，它显示的是这一点电离层在扰动期间的状态，见图 3.

2. 观察在扫描范围内两个（或三个）方位对应的三个等效返射点的多普勒频移曲线，而后计算它们的互相关函数，它们的相关曲线通常是正弦曲线，见图 2. 由三点的相对几何关系和相关计算可得到 LSTID 通过三点的时间长度，周期，用以计算出 LSTID 的特征参量.

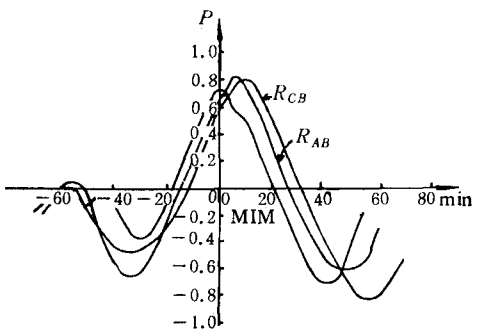


图 2 1984 年 4 月 24 日，19:00—23:00
Fig. 2 Apr. 24, 1984, 19:00—23:00

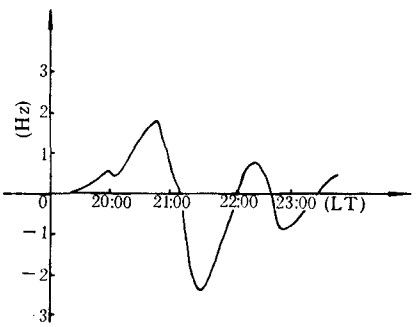


图 3 1984 年 4 月 24 日，19:00—23:00
Fig. 3 Apr. 24, 1984, 19:00—23:00

三、典型 TID 事件分析

在实验期间观测到 TID 的记录，这里就几个典型的大尺度 TID 事件进行分析.

1984 年 4 月 24 日 19:00—23:00，用 14.5MHz 频率探测到一次大尺度 TID 事件. 图 3 给出了方位为 328°，时延为 10ms 处回波的多普勒主峰值随经历时间的变化，它显示了正弦状的二个周期的变化. 图 4 给出了该处不同周波数（相应于经历时间）的频谱形状的变化. 从单个频谱的能量分布看来，是有十分明显展宽的多峰结构，而且就每个峰值的展宽是高斯型的. 图 5 是 21:25 时刻扰动的三维多普勒谱图. 它表示了不同时延有不同的多普勒频率，而且随时延的变化多普勒频率是由正变负，又由负变正，显示了等效反射面随时间是作下降→上升→下降的变化，其相应的最大运动速度是 −55.7m/s，+48.5m/s，

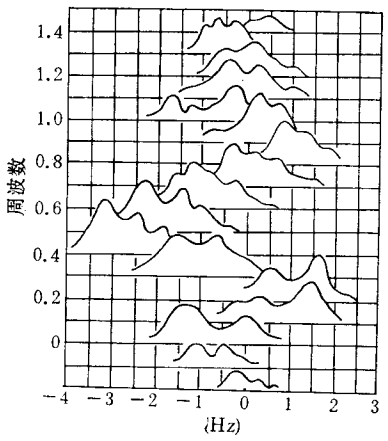


图 4　1984 年 4 月 24 日，19:00—23:00LT，$f = 14.5$MHz

Fig. 4　Apr. 24, 1984, 19:00—23:00LT, $f = 14.5$MHz

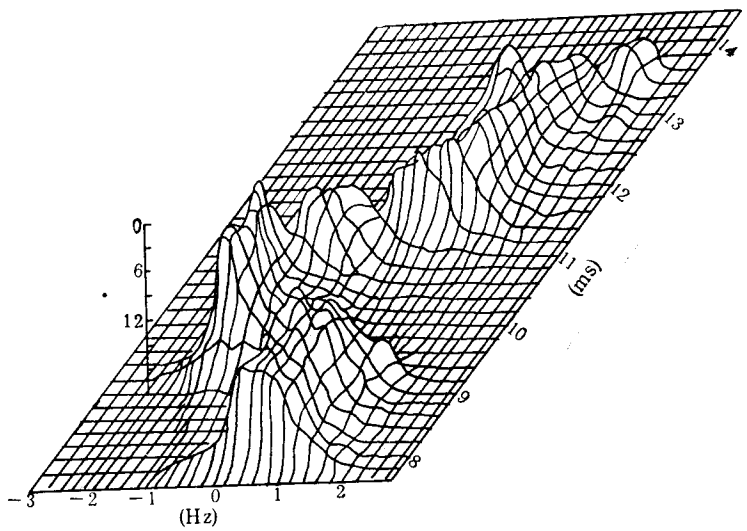


图 5　1984 年 4 月 24 日，21:25LT，$f = 14.5$MHz

Fig. 5　Apr.24, 1984, 21:25LT, $f = 14.5$MHz

—24.3m/s．不同方位和时延的频谱主峰随时间变化曲线的相关分析结果示于图 2，AB 两点扰动波通过的时间差为 6 分钟，AC 两点扰动波通过的时间差为 1.3分钟，CB 两点扰动波通过的时间差为 8 分钟，波动的周期为 80 分钟，由观察点的几何关系，可以推算出这个 TID 的等效特征参数如下：主波的水平波长 2164.8km 水平运动速度为 451m/s，运动方向为 193.3°(沿着南偏西 13.3° 传播) LSTID 波的振幅为 93km，等效反射面平均高度约为 320km．LSTID 波动形态是正弦折皱状，其主波为

$$Z = 320 + 93\cos\left(\frac{2\pi x}{2164.8}\right).$$

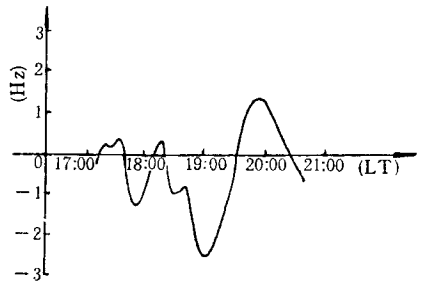


图 6 1983 年 1 月 5 日,17:00—20:00LT

Fig. 6 Jan.5, 1983, 17:00—20:00LT

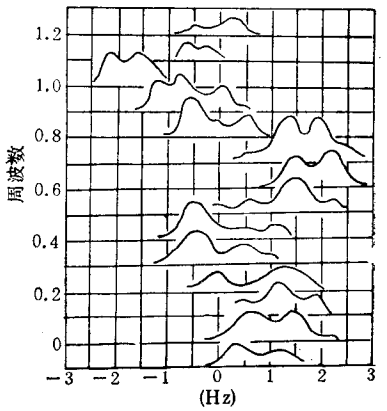


图 7 1983 年 1 月 5 日,17:00—20:00 LT, $f = 14.5$MHz

Fig. 7 Jan.5, 1983, 17:00—20:00LT, $f = 14.5$MHz

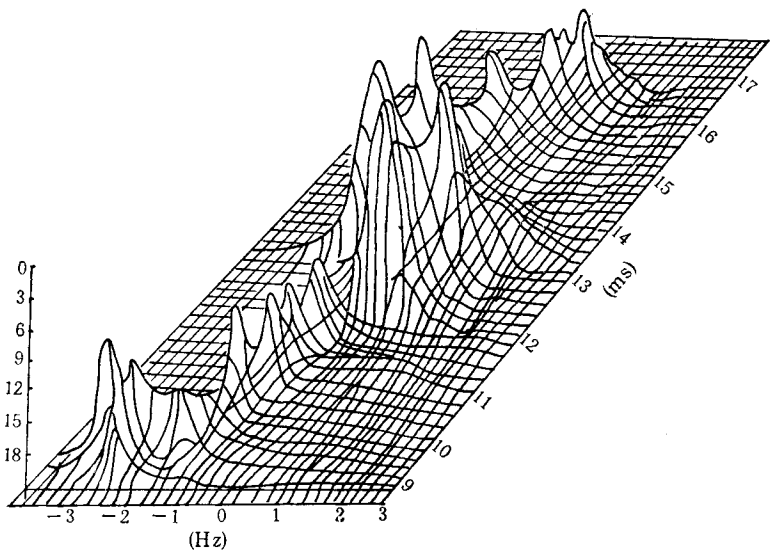


图 8 1983 年 1 月 5 日,19:00LT, $f = 14.5$MHz

Fig. 8 Jan.5,1983, 19:00LT, $f = 14.5$MHz

同样,用以上方法计算了 1984 年 4 月 25 日 21:00—24:00LT 观测到的大尺度扰动,参量为: 水平速度 386.7m/s,水平波长是 1345.7km,平均高度 340km,幅度 38.3km,传播方向 171.5°(南偏东 8.5°) 1984 年 4 月 24 日和 25 日的大尺度扰动都伴随磁暴发生 24 日的磁暴指数 $K = 5$, 25 日的磁指数为 $K = 8$.

1983 年 1 月 5 日 17:00—20:00 用 14.5 MHz 频率观测到的大尺度扰动, 图 6 给出了方位为 328° 时 9.6ms 处回波谱主峰-多普勒频移随经历时间的变化. 它也呈现出近

似正弦状的周期变化，图 7 给出了该处不同周波数(相应于经历时间)的频谱形状变化.它显示了频谱扩展的情况. 图 8 是 19:30 时刻扰动的三维多普勒谱图，它显示了不同时延的回波多谱勒频谱十分不同这表明了在大面积上电离层有波动.

由于这次测量没有进行不同方位的取样，因此，仅给出在方位 328° 上的分量：水平速度为 277.8m/s，水平波长为 1000km，幅度 43.5km.

四、结 束 语

本文给出了利用高频返回散射探测系统研究 TID 的探测方法，和实验资料地处理方法及分析方法. 结果表明，高频返回散射技术是研究和探测 TID 的一种有力手段，它具有能准实时地获得天线波束覆盖(或电扫)的广大空域的电离层的扰动情况.

利用频谱分析，相关处理技术，由高频返回散射探测数据可以推算 TID 参数，水平波长，水平速度，波动幅度，运动方向等.

近几年我们多次观测到大尺度扰动，如 1978 年 6 月 2 日 20:30—24:00LT，它的谱图见文献[4]，当时发生的磁暴 $K=8$，本文提到的 1983 年 1 月 5 日、1984 年 4 月 24 日和 25 日等大尺度扰动伴随严重的环境事件出现，有准周期性、持续时间几十分钟至数小时，它们的空间尺寸：水平波长 600—2500km，水平速度 200—500m/s，多普勒频移 1.5—5 Hz，多普勒展宽 2—5Hz，运动方向向南(有一个向东或向西的偏角).

参 考 文 献

[1] Hung, R. J. and T. Phan, *J. A. T. P.*, Vol. **40**, p. 831, 1978.
[2] Lyon, G. F., *J. A. T. P.*, Vol. **41**, p. 5, 1979.
[3] Tedd, B. L., *J. A. T. P.*, Vol. **2**, p. 109, 1984.
[4] 焦培南和张秀菊，空间科学学报，第 **5** 卷，第 191 页，1985.

LSTID Measured by the Technique of the HF Backscattering Sounder

Zhang Xiu-ju Jiao Pei-nan Jiang Bing-wu

(China Research Institute of Radio-wave Propagation)

Abstract

In this paper, large-scale traveling ionospheric disturbances (LSTID) measured by the technique of the pulse Doppler phase array rader are described and a method for the analysis of LSTID are given, which are used to calculate the typical events of LSTID and to obtain their characteristic parameters.

In the investigation, some morphological features of LSTID are shown by the corrugated model.