

利用高频返回散射技术探测电离层行波扰动

娄 鹏,王世凯,凡俊梅,焦培南

(中国电波传播研究所,山东青岛 266107)

摘 要: 电离层行波扰动(TIDs, Traveling Ionospheric Disturbances)是电离层一种周期性的电子浓度波动结构,它与上层大气内的声重力波运动有关.在前人的工作基础上,提出了利用高频返回散射技术判别 TIDs 的方法,建立了 TIDs 特征参数的理论研究方法.并通过分析多方位返回散射试验数据,研究定频返回散射回波信号群距离和跳距随时间、方位角的变化特征,提取了 TIDs 的运动周期、运动方向、波长等特征参数信息,从而实现对宽空间、大区域电离层波动特性的研究.

关键词: 行波扰动; 返回散射探测; 电离层

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012)09-1900-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.032

The Detection of Traveling Ionospheric Disturbances by High-Frequency Backscatter Sounding Technique

LOU Peng, WANG Shi-kai, FAN Jun-mei, JIAO Pei-nan

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, Shandong 266107, China)

Abstract: Traveling ionospheric disturbances (TIDs) are periodic electron density fluctuating structures. It is associated with the movement of gravity waves in the upper atmosphere. On the basis of the previous research of the pundit, the method used to identify the TIDs by the high frequency backscatter sounding data is presented, and the technique to obtain the TIDs character parameters is established. Via analyzing the mutibeam-direction backscatter data, the variation character of group path and skip distance with the time and azimuth is researched. And the TIDs parameters including movement period, direction, wavelength, et cetera are obtained. Finally, the research of ionospheric fluctuating characteristic in large areas is achieved.

Key words: traveling ionospheric disturbances; backscatter sounding; ionosphere

1 引言

电离层行波扰动 (TIDs, Traveling Ionospheric Disturbances) 是电离层 F 区一种类似波浪运动的大尺度不均匀结构. 上个世纪中期, Munro 认为 TIDs 和大气层内部重力波有关, 并随后发展了大气网格状行波理论^[1], 并认为 F 层扰动的致因是低空湍流. Chan 通过对不同电路、不同探测频率的同时观测, 判定行波扰动运动方向在北半球是从北向南, 并得出结论: 突发地磁扰动可以产生大尺度 TIDs^[2]. 九十年代, 焦培南^[3] 利用返回散射探测手段在研究日食期间日环食带电离层状态时发现, 日食过后, 见食电离层区在较长时间处于大尺度波动状态, 主要呈现为上千公里水平尺度的 TIDs.

近期的研究表明, 尤其是在平静地磁条件下, F 层高度上的 TIDs 会产生一个准正弦周期变化的电子浓度波动, 这与上层大气的声重力波运动有关^[4]. 近年来, 国

外学者们利用非相干散射雷达结合电离层常规探测手段开展了对电离层 TIDs 的观测研究, 获得了区域电离层电子浓度的长期连续变化结果^[5].

大量的研究报道集中在电离层波状电子浓度剖面的观测、形成机制和其对电离层探测回波信号影响等各项研究上. 按照扰动的幅度和尺度等参数把 TIDs 分为 3 类: (1) 极大尺度: 常伴随着大的磁暴而出现, 通常从高纬度区域向赤道方向移动, 周期在 30 至 90min, 运动速度在 1450 ~ 2750km/h, 水平方向波长在 1000km 量级; (2) 大尺度: 在较低频率上可以观测到大尺度 TIDs, 运动速度在 250 ~ 600km/h, 水平方向波长在几百公里量级; (3) 小尺度: 水平方向波长在 100km 量级.

2 返回散射探测技术

返回散射探测技术是宽空间大区域覆盖的电离层探测技术. 返回散射探测技术的原理是: 高频无线电波

斜向投射到电离层,经电离层反射到远方地面,地面的起伏不平及电特性不均匀性使电波向四面八方散射,而有一部分电波将沿着原来的(或其它可能的)路径再次经电离层反射回到发射点,被那里的接收机接收.通过获得回波信号群距离(时延与光速的乘积)随工作频率的分布,实现对电离层特性的分析.

电离层返回散射探测技术具有探测距离远、覆盖范围广的特点,因此被广泛应用于无线电电路的监视和预报、海洋状态的监视^[6]、电离层结构的探测与诊断等方面.

返回散射探测的收发天线采取阵列式结构,能实时探测大范围电离层参数,确定不同频率电波信号在不同覆盖区域的电波传播模式和回波信号强度分布.因此,通过分析多波束指向返回散射试验数据,研究返回散射回波信号群距离和跳距随探测时间、波束指向的变化特征,从而获取 TIDs 运动方向、波动周期和波长等特征参数.

利用返回散射试验平台,开展了返回散射连续探测试验.发射和接收天线采用阵列形式,且根据不同方向,发射和接收分为 5 个波束.系统工作方式分扫频探测方式和定频探测方式,由于固定频率探测时的积累时间较长,这对于探测 TIDs 的运动特性、获取其特征参数具有一定的优势.因此,在之后的实测数据分析时,采用经过干扰滤除^[7]的返回散射定频探测结果.

2.1 理论模型

无论 TIDs 成因是什么,均假设这种扰动为椭圆形,存在于 F 层高度,并在运动过程中产生二次电离^[8].通常采用波状起伏模型来研究 TIDs,电波经 TIDs 的传播路径如图 1 所示.

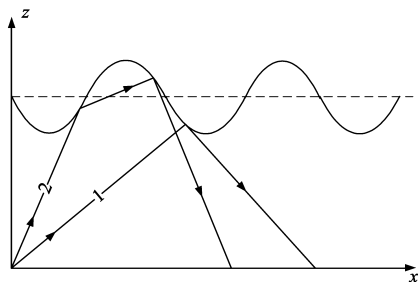


图1 TIDs背景下电波传播示意图

根据大气内部重力波理论和电离层模型,包含 TIDs 的电离层电子浓度解析表达式^[9]如下:

$$N = N_0(\mathbf{r}, \theta, \phi) \times (1 + \Delta)$$

$$\Delta = A \times \exp\left[-\left(\frac{\mathbf{r} - R_0 - Z_0}{H'}\right)^2\right]$$

$$\times \cos\left[2\pi \times \left(t' + \frac{\boldsymbol{\eta} \times R_0}{\lambda_x} + \frac{\mathbf{r} - R_0}{\lambda_z}\right)\right] \quad (1)$$

其中, N_0 是电离层电子浓度背景模型; \mathbf{r} 是距地心

的距离; $\boldsymbol{\eta}$ 是极角 ($\boldsymbol{\eta} = \pi/2 - \theta$); R_0 是地球半径; Z_0 是最大波幅度对应高度; H' 是波幅度标高; A 是波扰动幅度; λ_x 和 λ_z 是水平和垂直方向的波长; t' 是波动周期.

基于典型的准抛物电离层电子浓度背景模型,采用式(1)所示的 TIDs 模型和表 1 中的极大尺度 TIDs 参数的典型值,对电离层 F 层高度上存在 TIDs 时的等离子体频率进行仿真,结果如图 2 所示.其中,表 1 中 v_p 表示 TIDs 的运动速度,图 2 中的数字表示的是电离层等离子体频率的大小,单位: MHz.

参数名称	数值	参数名称	数值
Z_0 (km)	200	λ_x (km)	1000
H' (km)	50	v_p (km/h)	1088
λ_z (km)	1000	A	0.3

极大尺度 TIDs 参数的典型值,对电离层 F 层高度上存在 TIDs 时的等离子体频率进行仿真,结果如图 2 所示.其中,表 1 中 v_p 表示 TIDs 的运动速度,图 2 中的数字表示的是电离层等离子体频率的大小,单位: MHz.

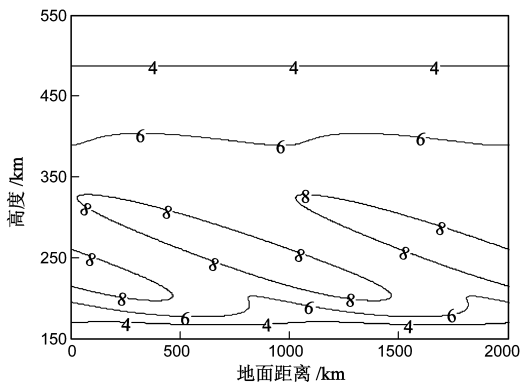


图2 存在TIDs的电离层等离子体频率的仿真结果

2.2 射线追踪算法

假设条件:(1)不考虑地磁场的影响和电子碰撞;(2)只考虑返回散射一跳传播路径情况;(3)只考虑射线在电离层 F 层的传播模式;(4)采用解析电离层仿真模型;(5)每条射线携带能量相同,所有地面距离上的地面反射系数相同,且不考虑电离层吸收效应,用射线落在给定地面距离单元的数目 N_{ray} ,即射线的密度来表示返回散射回波信号的能量,得到能量相对值 $A(P)$.如式(2)所示:

$$A(P) \propto N_{ray}^2 \quad (2)$$

仿真方法:利用射线追踪算法,通过遍历波动周期内的相位,得到返回散射信号群距离随时间的变化特征.结果如图 3 所示.用颜色的深浅来表示返回散射回波信号的能量大小,颜色越深表示能量越大.

为了能够准确表述 TIDs 初始相位在波动周期中的分布,采用初始相位与波动周期比值的百分比来表征,0% 和 100% 分别表示初始相位位于 TIDs 波动周期的起始和结束,由于 TIDs 模型的周期性,0% 和 100% 对应的最小群距离相同.

从图 3 中可以看出,返回散射定频探测时,由于返回散射的前沿聚焦效应,返回散射信号对应的最小群距离的能量最大,且随着初始相位与波动周期比值不

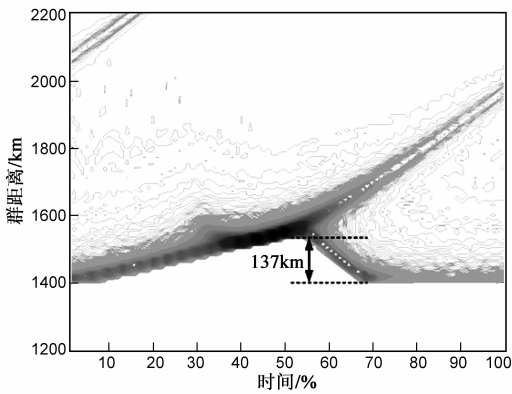


图3 信号群距离-相对时间比值的分布图

同,返回散射信号最小群距离在不断发生变化,其最大值与最小值相差约 137km.

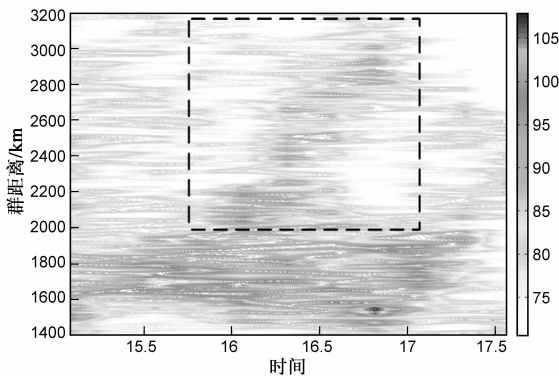


图4 信号幅度-群距离-探测时间分布图

图4为2009年1月9日本地时间15:00至18:00、探测区域内的返回散射探测数据.可以看出:固定频率19.24MHz上探测信号幅度随群距离和探测时间的变化关系.当电离层存在TIDs时,返回散射回波信号幅度随时间出现一个较强的虚线框所示窄带区,本文称为“行扰条”,与图3的仿真结果一致.这是因为TIDs电子浓度波动引起电离层反射区附近下凹^[10],形成“腔”壁效应从而造成新传播模式形成(如图1中射线“2”所示的传播形式).仿真时是以单元距离内射线数目的多少来表示信号幅度,没有考虑天线的方向性,因此与实测结果的幅度值有所差别.

3 TIDs特征参数的获取方法

本文仅对电离层F层的波动特性进行分析,从返回散射试验平台的扫频探测结果可知,而定频工作频率19.24MHz对应的是F层的回波,因此,选用19.24MHz对应的返回散射定频探测数据来分析TIDs的特征参数.

利用电离层返回散射技术可以获取的TIDs的特征参数主要是:运动方向、波动周期和水平波长.

3.1 运动方向

对连续多个探测周期的返回散射探测数据进行采

样,获得返回散射定频回波信号的最小跳距.通过建立最小跳距变化量随时间和随方位角的分布,从而获取TIDs的运动方向(方位角 α_{TIDs}).

$$\begin{cases} \sin(\alpha') = \frac{D_2 \times \sin(\alpha_S - \alpha_N)}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2 \times D_1 \times D_2 \times \cos(\alpha_S - \alpha_N)}} \\ \alpha_{TIDs} = \pi + (\alpha_N - \alpha') \end{cases} \quad (3)$$

其中,首个出现TIDs的返回散射波束的方位角和地面距离分别是 α_N 和 D_1 ,最后一个出现TIDs的返回散射波束的方位角和地面距离分别是 α_S 和 D_2 .如下图5所示.

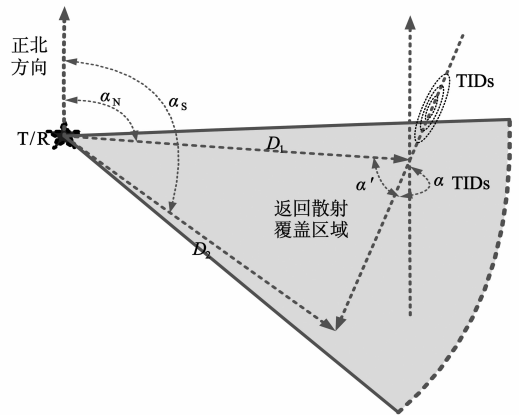


图5 TIDs运动方向的示意图

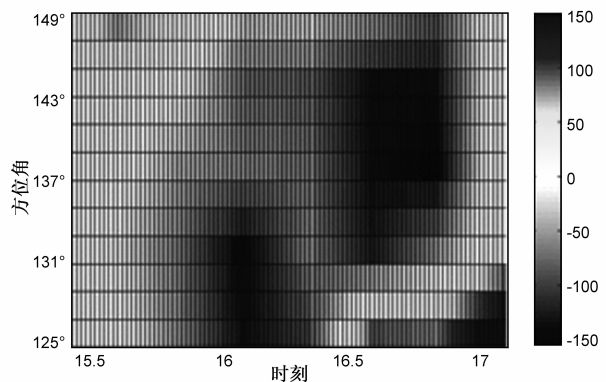


图6 信号跳距差随方位角和时间的变化

以第一个探测周期的各个方位上返回散射回波信号的最小跳距为标准值,取之后每个探测周期各方位上回波信号的跳距与此标准的差值,得到图6所示的19.24MHz频率上对应不同方位角的最小跳距差随时间的变化.从分析结果可以看出,16:00开始出现明显的TIDs,在方位角131°附近,跳距差值出现最大谷值,约为150km.随着探测时间的变化,16:45方位角137°附近出现跳距差值的最大谷值.这种跳距变化量随方位角和探测时间的移动,表明了TIDs由北向南传播,采用式(3)计算的传播方向为182.7°.

3.2 波动周期和水平波长

根据最小跳距随时间的变化,获取TIDs的波动周

期的量级.基于波动周期(t')和运动速度(v_p)的关系,获取 TIDs 的水平波长,如式(4)所示.

$$\lambda_x = v_p \times t' \quad (4)$$

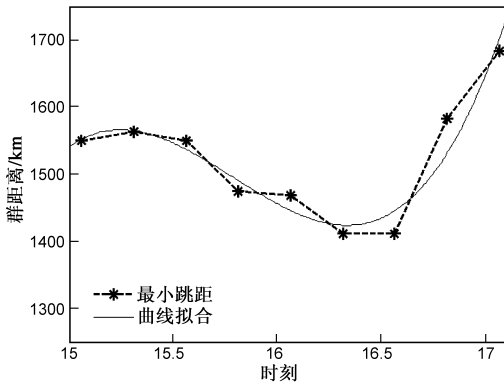


图7 最小跳距随探测时间的变化

图7显示了19.24MHz频率上最小跳距随时间的变化关系:从15:15的1563km减小到16:30的1411km,并在16:45又增加到1582km,这是TIDs随时间变化的特征表现.表明电离层存在TIDs时,电离层F2层回波信号最小跳距会随时间发生周期性变化^[11],波动周期约1.5h,采用TIDs运动速度的典型值,利用式(4)计算可以得到水平波长.

4 结论

本文对TIDs的理论模型进行了仿真研究,通过对比模型仿真结果与试验数据处理结果,获得TIDs的特征参数信息:扫频探测时的“空洞”区和定频探测时的“行扰条”是判断TIDs是否出现的最明显标识;固定频率的回波信号最小跳距随时间的变化可以获得TIDs的波动周期,跳距的相对差值随时间和方位角的变化可以获得TIDs的运动方向.显示出多波束返回散射电离层探测系统探测TIDs的优势,提供了一种直观的TIDs观测手段.

TIDs会影响短波探测信号的距离和多普勒频移等参数,如果能根据返回散射探测回波信号确定出在哪些频率上存在TIDs,在探测系统工作时有意地避开这些频率,就有希望消除TIDs带来的影响.

参考文献

- [1] Martyn D F. Large-scale movements of ionization in the ionosphere[J]. J Geo Research, 1959, 64(2): 2178 - 2179.
- [2] Chan K L, Villard O G, et al. Observation of Correlated Frequency Fluctuations of WWV-20 and PR-17 as Received at Stanford University, Palo Alto, California, and University of Washington, Seattle, Washington[R]. USA: Stanford University, Stanford Electronics Laboratories, 1961.

- [3] 焦培南. 1987年9月23日日食的电离层波动现象[J]. 地球物理学报, 1990, 33(4): 391-398.
- [4] Ahmadov R R, Kunitsyn V E. Simulation of generation and propagation of acoustic gravity waves in the atmosphere during a rocket flight[J]. Int J Geomag Aeronomy, 2004, 5: 1 - 12.
- [5] Ratovsky K G, Medvedev A V, et al. Case studies of height structure of TID propagation characteristics using cross correlation analysis of incoherent scatter radar and DPS-4 ionosonde data[J]. Adv Space Res, 2008, 41(9): 1454-1458.
- [6] 孙广俊, 齐东玉, 李铁成. 利用返回散射系统监测海洋回波[J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1334 - 1337.
SUN Guang jun, QI Dong yu, LI Tie cheng. Sea echo detection with the system of ionospheric backscatter sounding[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1334 - 1337. (in Chinese).
- [7] 蔚娜, 李铁成, 柳文, 凡俊梅. 高频返回散射系统中一种非长干扰的抑制方法[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 620 - 625.
WEI Na, LI Tie cheng, LIU Wen, FAN Jun mei. An approach of suppressing non-long interference in HF backscatter system [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 620 - 625. (in Chinese).
- [8] Chan K L, Villard O G. Observation of large-scale traveling ionospheric disturbance by spaced-path high frequency instantaneous-frequency measurements [J]. J Geo Research, 1962, 67(3): 973 - 988.
- [9] Georges T M, Judith J S. HF radar signatures of traveling ionospheric irregularities, 3D ray-tracing simulation [J]. Radio Sci, 1969, 4(8): 679 - 696.
- [10] Fritts D C, Vadas S L, et al. Gravity wave and tidal influences on equatorial spread F based on observations during the Spread F Experiment (SpreadFEX) [J]. Ann Geophys, 2008, 26(4): 3235 - 3252.
- [11] Stocker A J, Arnold N F, Jones T B. The synthesis of travelling ionospheric disturbance (TID) signatures in HF radar observations using ray tracing [J]. Ann Geophysicae, 2000, 18(1): 56 - 64.

作者简介

娄 鹏 男, 1982 出生, 河南人, 硕士, 目前主要从事电离层传播特性的研究工作.

E-mail: loupeng3386@163.com

王世凯 男, 1979 出生, 河北人, 硕士, 主要从事电离层物理及电波传播工程应用等方面的研究工作.

凡俊梅 女, 1964 出生, 河南人, 研究员, 在刊物和会议上发表论文多篇, 主要研究方向: 高频超视距雷达、系统集成、雷达信号处理等.

焦培南 男, 1939 出生, 广东人, 研究员, 国家有突出贡献专家, 博士生导师. 1962 年毕业于武汉大学物理系. 目前主要研究方向: 电离层及其电波传播、高频超视距雷达、特殊介质波传播和散射等.