

基于全天空 FPI 的临近空间中性风场研究

吴鹏举, 张燕革, 艾勇, 覃明辉

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: **目的** 对临近空间大气中性风场进行监测与分析。**方法** 借助法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer, FPI) 观测临近空间顶层的大气中性风场。针对北极黄河站 (78.92°N, 11.93°E) 临近空间顶层的大气中性风场, 介绍全天空 FPI 测风的基本原理, 通过对 2016 年 11 月 25 日全天空 FPI 设备观测的 OI557.7 nm 气辉干涉图进行分析, 反演得到极光亚暴期间的内 5 级环的水平风场和视线风场。**结果** 极地地区临近空间顶层的水平风速基本保持在 -200~200 m/s 之间, 极光亚暴使得中性风场呈现出一定的方向性, 并且风场增大的方向垂直于极光弧。**结论** 利用全天空 FPI 设备可以对临近空间顶层的大气中性风场进行探测和分析, 有助于认识和理解临近空间大气环境。

关键词: 临近空间; 全天空 FPI; 中性风场

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.07.020

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)07-0093-04

Near-space Neutral Wind Field from All-sky FPI Measurements

WU Peng-ju, ZHANG Yan-ge, AI Yong, QIN Ming-hui

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

ABSTRACT: **Objective** To monitor and analyze near-space neutral atmospheric wind field. **Methods** Fabry-Perot Interferometer (FPI) was used to observe the atmospheric neutral wind field of near space. For neutral wind field at the top of near space over the Yellow River station (78.92°N, 11.93°E), the basic principle of FPI has been introduced. OI557.7 nm airglow interferograms on November 25, 2016 were analyzed through the observation of all-sky FPI equipment. Horizontal wind field and visual wind field within 5 rings during auroral substorm were obtained through inversion. **Result** The wind speed of near space was kept between -200 m/s. and 200 m/s. Auroral substorms made neutral wind have certain direction. The wind field increased in the direction perpendicular to the aurora of arc. **Conclusion** All-sky FPI can be used to detect and analyze the near-space neutral atmospheric wind field, which helps to understand the near-space atmosphere.

KEY WORDS: near space; all-sky FPI; neutral wind field

临近空间是指介于普通航空飞行器最高飞行高度和天基卫星最低轨道高度之间的空域。大多数临近空间飞行器的主要活动区域都在 100 km 以下, 故一般定义临近空间为离地球表面 20~100 km。临近空间大气是地球中高层大气的重要组成部分^[1-3], 包括大气平流层、中间层和低热层, 其大气活动直接影响临

近空间飞行器安全、航空航天活动和无线信息传输等。其中, 临近空间的大气风场直接影响临近空间飞行器的飞行状态, 因此对其风场的探测显得尤为重要。

近年来, 国外已经研制和建立了不同体制的雷达系统来监测临近空间的大气环境, 成功发展了多个高

收稿日期: 2018-05-23; 修订日期: 2018-06-24

作者简介: 吴鹏举 (1994—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要研究方向为光电探测。

通讯作者: 张燕革 (1962—), 男, 湖北人, 博士, 副教授, 主要研究方向为光电探测技术。

层大气风场模式。国内测量临近空间（中间层和低热层）大气风场和垂直风廓线的主要地基设备有中频（MF）雷达、甚高频（VHF）雷达、激光雷达等。如中国科学院武汉物理与数学研究所建立了测风中频雷达和流星雷达，研制的双波长高空激光雷达可实现对距地表 30~110 km 中高层大气和低电离层段的探测^[4-5]。

法布里-珀罗干涉仪（FPI）作为光谱分辨率极高的被动风场探测设备，已经被广泛应用于中高层大气风场探测，国内外都作过许多研究^[6-10]。OI557.7 nm 气辉产生于海拔约 95 km 的临近空间顶层的低热层，气辉随着大气的运动产生多普勒频移，频移量代表着大气的风速信息。利用高灵敏度的法布里-珀罗干涉仪（FPI）测量 OI557.7 nm 气辉的谱线频移，可以有效获得临近空间顶层的大气风场信息。2010 年底，武汉大学激光通信实验室自主研制了一台的全天空探测设备，并在北极黄河站（78.92°N，11.93°E）进行了越冬观测，之后对亚暴期间的热层风场进行了初步分析^[11-12]。2014 年底，新一代的全天空 FPI 设备在黄河站调试完毕，并开始执行远程越冬观测任务。文中选取了 2016 年远程越冬观测所获得的亚暴期间全天空 FPI 的 OI557.7 nm 气辉干涉数据，反演得到黄河站上空的临近空间低热层风场信息，并对风场行为和影响风场的因素进行了初步分析，对于更好地理解认识和认识北极地区临近空间低热层空间环境具有重要意义。

1 全天空 FPI 及测风原理

全天空 FPI 设备可以划分为四个主要组成部分，依次为光学接收系统、滤波片控制系统、干涉系统以及数据采集与存储系统。全天空 FPI 的结构及实物如图 1 所示。

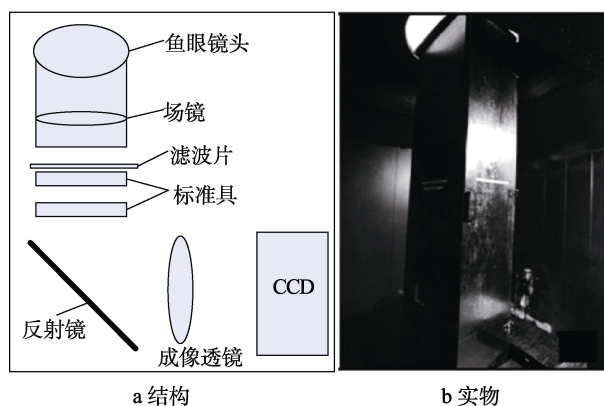


图 1 全天空 FPI 设备

光学接收系统采用大视场鱼镜头，理论视场角可达 180°，其前端由一高透光率的 Dome 罩与外界隔开，减小外界干扰的同时不影响光学成像。滤波片控制系统选择性透过 557.7 nm 和 630.0 nm 波段，干涉

系统为 F-P 标准具，间距为 15 mm，有效通光孔径为 40 mm，面板反射率大于 90%。文中采用的是 ANDOR 公司生产的科学级制冷 CCD 进行数据采集，可以有效地抑制量子噪声的干扰，有助于微弱气辉的探测。

产生气辉辐射的分子或原子随着大气运动，相对于固定地基观测点产生多普勒频移。通过测量频移量就可得出辐射源沿观测视线方向的速度，即视线风速。进一步反演可以获得辐射源处的风场。

扩展光源经过法布里珀罗标准具（F-P）的成像光路如图 2 所示。光源 S 在 L_1 的前焦面，S 上一点发出的光经过 L_1 后变成一组平行光，以倾斜角 θ 入射到 F-P 上，多光束干涉后经过透镜 L_2 在像点 P 处加强，最终在像面上表现为一组等倾干涉环。

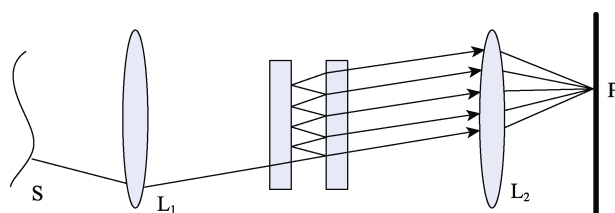


图 2 F-P 成像原理

假设光源在真空中的波长为 λ ，F-P 标准具腔长为 h ，折射率为 n ，干涉级次 m ，光束入射角为 θ 。干涉加强形成干涉环时，F-P 标准具内的相邻光束满足：

$$m\lambda = 2nh \cos \theta \quad (1)$$

由式（1）可得，当风速为 0 时，入射角为 θ 的入射光通过 F-P 干涉仪形成第 m 级干涉条纹：

$$m = \frac{2nh}{\lambda_0} \cos \theta = \frac{2nh}{\lambda_0} \left(1 - \frac{r_0^2}{2f^2} \right) \quad (2)$$

式中： λ_0 为零风速（无多普勒频移）时的波长； f 为成像物镜的焦距； r_0 为第 m 级干涉环的半径。

当视线风速为 v （朝向观测点方向为正）时，由于多普勒效应，波长变为 $\lambda = \lambda_0 (1 - v/c)$ ，则相同干涉级次的情况下有：

$$m = \frac{2nh}{\lambda_0 (1 - v/c)} \left(1 - \frac{r^2}{2f^2} \right) \quad (3)$$

由式（2）和（3）可得视线风速表达式为：

$$v = \frac{c(r^2 - r_0^2)}{2f^2 - r_0^2} \quad (4)$$

全天空 FPI 系统的成像物镜焦距 f 已知，只需要知道假设零风速参考半径 r_0 和发生多普勒频移后对应干涉级次的半径 r ，就可以求出相应的辐射源的视线风速信息，这就是全天空 FPI 测风的基本原理。

2 临近空间顶层风场分析

OI557.7 nm 气辉的辐射峰值高度约为 95 km，位

于临近空间顶层的低热层，因此选取了全天空 FPI 设备 OI557.7 nm 波段的干涉数据来反演临近空间顶层的风场分布。将对单个周期 UT 时间 2016 年 11 月 25 日 04:00 到 2016 年 11 月 25 日 24:00 时段的观测数据的经纬向风进行分析，期间发生过极光亚暴现象。由于北极风场的不均匀性，选择地理北向风代表经向风（以北正方向），地理东向代表纬向风（以东为正方向）。

极光弧是极光亚暴的表现形式。地磁活动剧烈的时候，极区天空中会出现明显的极光现象，黄河站的全天空 FPI 设备观测到的干涉环图像中有明显的局部光强增大。AE 指数为描述极区地磁扰动强度的指数，Dst 指数主要描述的是地磁环电流的强度。图 3 为世界地磁数据中心（World Data Center for Geomagnetism, Kyoto）公布的地磁活动参数，AE 指数在 2016 年 11 月 25 日前后出现极大值，而环电流强度 Dst 指数为极小值。京都地磁学中心也将该天划分为扰动期，此时全天空 FPI 设备观测到了较强的极光亚暴现象。

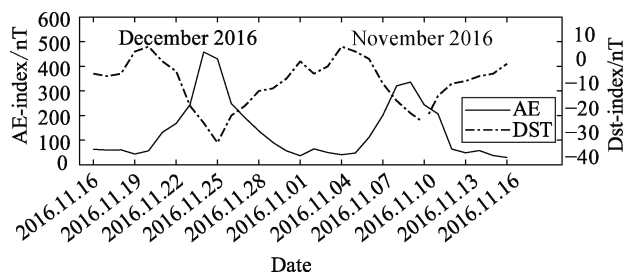


图 3 日平均 AE 指数和 Dst 指数变化情况

由于全天空 FPI 设备使用鱼镜头，视场边缘存在较大的畸变，会对风场计算产生较大的误差，因此选取干涉环的内 5 级环进行计算。11 月 25 日，1 到 5 级环的纬向风绝对值的平均值为 144.0, 93.8, 98.8, 85.9, 97.6 m/s，经向风绝对值的平均值分别为 148.7, 123.7, 94.6, 99.0, 119.1 m/s。北向和东向水平风速的变化情况如图 4 所示。

由图 4 可以看出，每一级环的风速在一天内都是不断变化的，甚至有时会出现风切变的现象。这是由于受到太阳辐射、重力波等能量的影响，极地地区中高层大气风场往往变化不定。整体上，北向风和东向风在早上 05:00 前后，风速均出现极大值，甚至超过了 200 m/s。说明在 FPI 设备观测视场内，北侧和东侧的风速较大，大气活动较为剧烈。之后风场呈现出无规律性，但整体风速值保持在 200 m/s 以内，这和当地 EISCAT 雷达观测到 100 km 高度处的风速值相近。到了傍晚 18:00 前后，风速迅速较小，并保持在 50 m/s 以内，到了接近 21:00 时，风速值有缓慢增大，之后继续呈现出随机变化的特性。对比 FPI 原始干涉环数据后发现，大约在 18:00—21:00 时间段内，出现了较为明显的极光亚暴现象，干涉环上有明显的极光

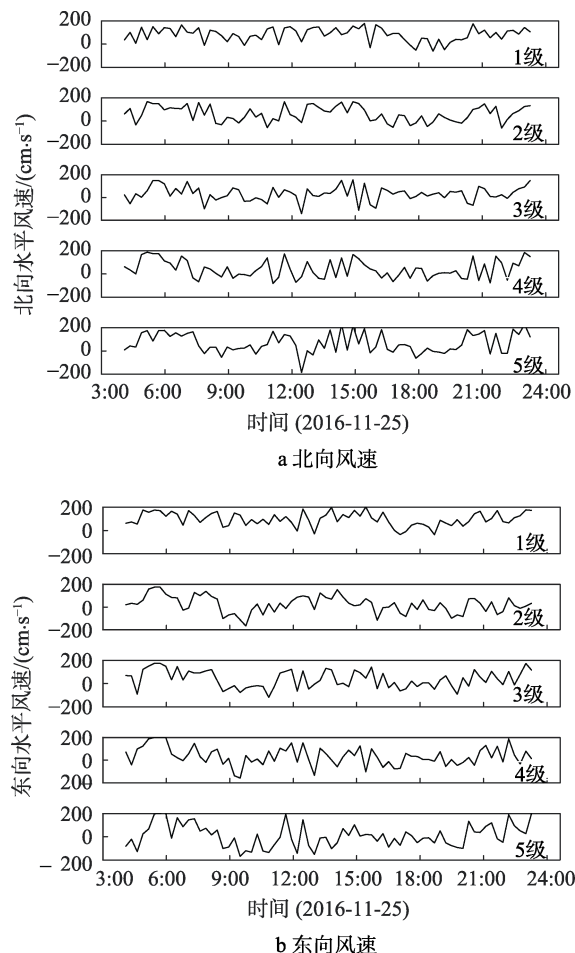


图 4 2016 年 11 月 25 日 04:00—24:00 北向和东向水平风变化情况

弧。说明极光亚暴有效地抑制了低热层大气风场，但也存在风速值很大的情况下出现极光弧的现象。这是由于低热层风场并不是由单一的极光亚暴决定的，还受到大气活动其他能量（如大气潮汐等）的影响，极光亚暴既有可能减小风场也有可能增大风场风速值。

临近空间顶层（低热层）亚暴期间的 557.5 nm 干涉图和对应高度的视线风速图如图 5 所示。浅色为朝向观测点方向 100 m/s 视线风，深色为远离观测点 100 m/s 视线风。可以看出，干涉图上加强的部分和视线风场存在一定的联系。在 18:00 到 21:00 时间段内出现了明显的极光亚暴现象，极光弧由东南方向慢慢向西北扩张，最后整个视场内都观测到极光现象。此时视线风以东南风为主，之后逐渐变为西北风。当极光弧扩大到整个视场，又变成以西南风为主，整体视线风速值都在 -100~100 m/s，少数会达到 150 m/s。干涉图上无极光弧或者较弱时，风场表现为变化不定，分布上规律性不大，且风速较大。说明极光亚暴一定程度上削弱了临近空间顶层的视线风场，并且使其风向呈现出一定的规律性，风场加强的方向大致上垂直于极光弧，而在极光弧方向上风速较小。这和 Zhang 等^[13-14]对 2011 年底风场数据分析的结论基本相同。

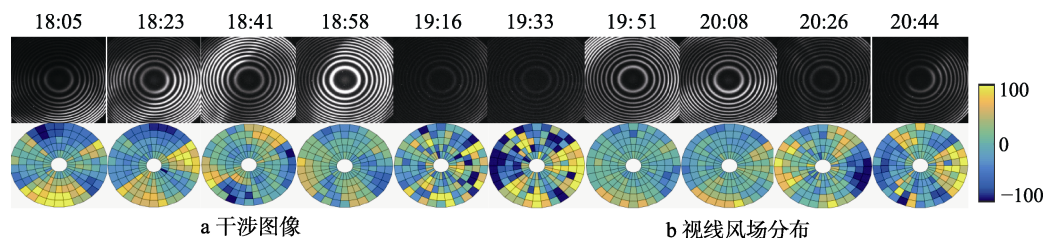


图5 UT 2016年11月25日18:00-21:00极光下的全天空视线风

图4中, 18:00到21:00的水平风速较小, 基本都在50 m/s以内, 此时段东向和北向视线风速均出现了超过100 m/s的情况。这是因为极地地区风场较为复杂, 存在较大的垂直风场^[14], 其在视线方向也有贡献。它是极地地区热层大气对各个动力能量的响应运动, 并改变着热层的结构和成分, 同时又反过来影响着动力能量的响应作用。因此研究极地地区临近空间顶层的垂直风场也具有十分重要的意义。

3 结语

OI557.7 nm气辉对应的辐射高度约为95 km, 以中性风场为主, 受到地球电场影响并不大。在极光亚暴期间, 地磁场活动加剧, 可能会引起极光区域粒子沉降, 电离层区离子密度急剧增大, 进一步导致离子拖拽和焦耳加热等能量变化, 引导着中性粒子的运动, 并使其趋向一个方向运动。在2016年11月25日18:00—21:00时间段内, 极光一定程度上减弱了中性风场, 使得风速值有一定程度的减小。

根据2016年冬季的557.7 nm观测数据, 分析了极光亚暴期间临近空间顶层的大气风场行为。结合亚暴期间的地磁活动发现, 在极地地区, 临近空间顶层的大气中性风场受到地磁活动的影响很大。经过对水平风和视线风的分析, 发现极光的出现既可能减弱中性风场, 也可能增大中性风场, 但会使其风向上呈现出一定的规律性, 其风场增大的方向一般垂直于极光弧。全天空FPI适合极地地区复杂风场的研究, 由于中低纬度地区垂直风场可以忽略不计, 风场模式较为简单, 其风场测量更为准确, 因此FPI可以广泛应用于临近空间顶层大气风场探测, 对认识临近空间环境具有重要意义。

致谢 地磁指数数据由日本京都地磁中心公布

参考文献:

[1] 康士峰. 临近空间大气环境特性监测与研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(1): 20-23.

- [2] 童靖宇, 向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1-4.
- [3] 陈凤贵, 陈光明, 刘克华. 临近空间环境及其影响分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 71-75.
- [4] 吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 等. 临近空间大气环境研究现状[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 674-682.
- [5] 肖存英. 临近空间大气动力学特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2009.
- [6] KOSITSKY M, KARNIEL A, ALFORD S, et al. First E-region Observations of Meso-scale Neutral Wind Interaction with Auroral Arcs[J]. Journal of Geophysical Research Space Physics, 2010, 115(A2): 155-159.
- [7] GERRARD A J, MERIWETHER J W. Initial Daytime and Nighttime SOFDI Observations of Thermospheric Winds from Fabry-perot Doppler Shift Measurements of the 630-nm OI Line-shape Profile[J]. Annales Geophysicae, 2011, 29(9): 1529-1536.
- [8] 石大莲. 中高层大气风场探测 F-P 干涉仪的数据反演算法与定标方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [9] WU Q, WANG W, ROBLE R G, et al. First Daytime Thermospheric wind Observation from a Balloon - borne Fabry - perot Interferometer over Kiruna (68N)[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(14): 14104.
- [10] 王后茂, 王咏梅, 王英鉴. 基于Fabry-Perot的中高层大气风速反演数据处理研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1095-1101.
- [11] 熊波, 张燕革, 艾勇, 等. 北极黄河站极光亚暴期间低热层大气中性风研究[J]. 空间科学学报, 2013, 33(6): 629-636.
- [12] 陈瑶, 张燕革, 艾勇, 等. 北极黄河站上空低热层中性风场对行星际激波的响应[J]. 极地研究, 2015, 27(2): 132-139.
- [13] 张虹. 全天空 Fabry-Perot 干涉仪对热层大气风场的探测[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [14] ZHANG H, YONG A I, ZHANG Y G, et al. First Observation of Thermospheric Neutral wind at Chinese Yellow River Station in Ny-lesund, Svalbard[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(11): 1310-1315.
- [15] 胡国元, 艾勇, 张燕革, 等. 基于全天空 F-P 干涉仪反演热层垂直中性风[J]. 地球物理学报, 2014, 57(11): 3695-3702.