Fabry-Perot干涉仪非全干涉圆环反演中高层大气风场方法研究

王后茂^{1*}, 王冲², 王咏梅¹, 张效信³, 黄聪³, 梁少林¹

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 上海卫星工程研究所, 上海 201109;

3. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

* E-mail: hmwang@nssc.ac.cn

收稿日期: 2017-01-21; 接受日期: 2017-04-25; 网络版发表日期: 2017-06-12

北京市科技委员会项目(编号: Z151100003615001)资助

摘要 Fabry-Perot干涉仪(FPI)被广泛的应用于中高层大气风场的观测. 目前, 地基FPI监测中高层大气风场大都基于全干涉圆环, 其观测一组风场数据需要15~25min, 且由于全干涉圆环不利于多个观测方向同时成像在同一CCD(Charge-Coupled Device)上, 因此限制了观测时间分辨率的进一步提高. 而非全干涉圆环可以提供足够的空间将多个观测方向同时成像在同一CCD上, 从而实现地基观测时间分辨率的提高. 因此, 本文结合FPI干涉环的特点, 基于Taubin计算方法利用迭代法进行非全干涉圆环的圆心确定, 然后基于圆心进行圆周积分, 并进行半径拟合计算, 进而进行大气风速的反演. 基于该方法, 本文利用2013年4月9日至5月6日28天的山西岢岚(38.71°N, 111.58°E)的地基FPI气辉观测数据进行了风速反演验证, 包括892.0、630.0和557.7nm气辉. 将岢岚地基FPI非全干涉圆环的反演结果与全干涉圆环(傅里叶法)的风速进行了比较和分析, 三种气辉的平均反演偏差分别为5.38、5.81和3.03m s⁻¹. 同时, 将兴隆(40.40°N, 117.59°E)地基FPI非全干涉圆环和全干涉圆环的风速结果与十三陵站点(40.3°N, 116.2°E)的流星雷达风场数据进行了比较, 风速变化趋势一致.

关键词 Fabry-Perot干涉仪(FPI), 风场反演, 非全干涉圆环

1 引言

中高层大气风场是该层大气的基本参量之一, 风场不仅对中高层大气、上下层之间能量的传输起着重要作用, 还对航天器的安全及运行轨道都有很大影响, 是重要的空间环境参量. 因此, 风场测量结果既可以作为大气模式建立的重要基础数据, 同时又

为大气动力学与光化学耦合过程的研究提供重要的探测资料. 目前, 用于风场测量的被动式光学仪器主要有Fabry-Perot干涉仪(Hays等, 1981, 1993; Killeen等, 2006)、迈克尔逊干涉仪(Shepherd等, 1993)和非对称空间外差干涉仪(Englert等, 2007). 其中, FPI具有高灵敏度、高光谱分辨率以及结构简单等优点, 其光路上没有移动部件, 属于静态干涉成像光谱技术, 稳定性较

中文引用格式: 王后茂, 王冲, 王咏梅, 张效信, 黄聪, 梁少林. 2017. Fabry-Perot干涉仪非全干涉圆环反演中高层大气风场方法研究. 中国科学: 地球科学, 47: 985-991, doi: [10.1360/N072016-00345](https://doi.org/10.1360/N072016-00345)
英文引用格式: Wang H M, Wang C, Wang Y M, Zhang X X, Huang C, Liang S L. 2017. Retrieval of middle and upper atmospheric wind based on non-full circular fringe recorded by Fabry-Perot Interferometer. Science China Earth Sciences, doi: [10.1007/s11430-016-9048-1](https://doi.org/10.1007/s11430-016-9048-1)

高, 抗震干扰能力较强, 具有较高的能量利用率和探测灵敏度, 因此, FPI被广泛的应用于中高层大气风速的地基和星上测量(Yu等, 2014).

国际上, 基于FPI的中高层大气风场的星载探测研究始于20世纪70年代. 1982年DE-2卫星上搭载的Fabry-Perot干涉仪(DE-FPI)首次实现了高层大气风场的星载观测(Killeen等, 1983; Killeen和Hays, 1984). 1991年9月, 搭载在UARS卫星上的FPI实现了对大气中间层和低热层的风速、温度及体发射速率等信息的观测(Skinner等, 1987; Abreu等, 1991; Hays等, 1993). 在地基探测方面, 美国、日本等国学者分别研制了FPI用于中高层大气风场和温度的观测(Hernandez等, 1982; Meriwether等, 1984, 1986; Niciejewski等, 1994; Shiokawa等, 2001, 2003; Wu等, 2004, 2012; Gerrard和Meriwether, 2011). 这些地基FPI是基于全干涉圆环进行的观测, 其观测方向为东、西、南、北(天顶角均为45°)和天顶五个方向, 五个方向依次进行观测获得一组风场数据. 但全干涉圆环在保证获得足够的信噪比时很难同时成像多个观测方向的气辉, 这限制了其观测时间分辨率的提高, 而目前的观测时间分辨率不能更好的满足地磁活动等异常时中高层大气现象的观测和分析要求, 同时也不能更好的应用于风场和温度对航天器和军事武器的影响分析.

20世纪90年代, 环转线系统(Circle-to-line interferometer optical system, CLIO)开始被用于FPI, 其可以将全干涉圆环转变为线干涉条纹成像在CCD探测器上, 以便进行多个方向的同时观测, 从而提高观测的时间分辨率. 2001年, 搭载在TIMED卫星上的TIDI多普勒成像仪采用这种技术完成了对中高层大气风场和温度的观测(Killeen等, 2006). 同时, 环转线系统也曾被应用于FPI的地基观测(Fisher等, 1999). 但这种技术需要高精度的仪器打磨技术和高难度的仪器装调过程, 从而大大增加了仪器的研制成本、研制复杂度以及产品的反演难度. 因此, 国际上后续的地基观测仍以全干涉圆环为主, FPI的数据处理和反演方法也主要面向全干涉圆环(Shiokawa等, 2001; Killeen和Hays, 1984; Harding等, 2014). 在国内, 中国科学院国家空间科学中心(Wang和Wang, 2015; 王后茂等, 2014; Liu等, 2014, 2015)、武汉大学(赵正启等, 2006)、中国科学院西安光学精密机械研究所(汪丽等, 2011)等都进行了FPI风场和温度数据处理和反演算法的研究, 也主要面向全

干涉圆环.

由于全干涉圆环不能实际有效的提高地基FPI的观测时间分辨率, 而非全干涉圆环可以提供足够的CCD空间以进行多个方向的同时观测, 从而使FPI观测时间分辨率可以提高数倍(4~5倍). 但目前针对非全干涉圆环的数据处理和反演方法较少, 仅有中国科学院国家空间科学中心(韩威华等, 2011; 王后茂等, 2013)进行了相关研究. 韩威华等(2011)对非全干涉圆环进行细化, 并在细化的干涉环上均匀的采样, 然后基于采样点两两做连线的法线, 以此来获得干涉环的圆心, 然后利用圆心与多个采样点进行半径的直接求解, 这种方法中的干涉环细化和半径求解较容易受噪声的干扰. 王后茂等(2013)基于模拟的数据利用迭代的方法对非全干涉圆环的圆心和半径进行同时求解, 即当达到迭代停止条件时(圆心差值<0.3 pixel)可以同时获得圆心和半径, 这种方法由于圆心的精度要求与半径精度要求不一致, 因此导致半径求解具有较大的不稳定性, 尤其是在气辉辐射较弱(或杂散光较强)时, 因而很容易引起较大的风速和温度反演误差. 本文基于Taubin圆计算方法, 首先进行圆心确定, 然后再进行圆周积分, 并在圆周积分的基础上再进行峰值半径拟合, 从而提高气辉辐射较弱(或杂散光较强)时的风速反演精度, 因此更适合于实际的业务观测.

2 原理及方法

FPI的等倾干涉在CCD探测器上可以成像为全干涉圆环(图1)和非全干涉圆环(图2a). 全干涉圆环的圆

图1 FPI全干涉圆环分布

图2 FPI非全干涉圆环(a)及 n 条横剖面(b)

心可以利用圆环的对称性进行确定,而非全干涉圆环则不具有对称性,因此全干涉圆环的数据处理方法不适用于非全干涉圆环.本章节将对非全干涉圆环的反演方法进行描述,具体步骤如下.

2.1 数据预处理

由于气辉的辐射强度一般较弱,实际测量的FPI干涉图像对比度较低,极易受到噪声的影响和干扰,表现为局部光强发生突变或者存在奇异值.这些噪声除来自宇宙射线的干扰外,还来自杂散光的影响,包括仪器本身和周围环境的扰动,会直接影响圆心和条纹峰值位置的确定.因此,进行风速反演前,首先需要对FPI干涉图进行噪声去除:包括中值滤波和均值滤波.

2.2 圆心确定

干涉环圆心的确定步骤如下:

(1) 初步估计干涉环圆心坐标;

(2) 以干涉环圆心初始坐标为中心建立 n 条等角度间隔射线,得到 n 条干涉环横剖面(图2b);

(3) 由于干涉条纹在峰值附近的强度符合高斯分布,因此分别沿 n 条射线方向对干涉条纹峰值附近强度进行高斯函数拟合,获得条纹峰值半径,再结合中心点坐标和横剖面与水平方向的夹角,获得峰值的位置坐标;

(4) 基于所有峰值位置坐标,利用Taubin法(Taubin, 1991)获得新的圆心位置:

$$F = \frac{\sum [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2]^2}{4n^{-1} \sum (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2}, \quad (1)$$

式中, a 为圆心 x 轴坐标, b 为圆心 y 轴坐标, R 为圆环的半径, (x_i, y_i) 代表各个峰值点的位置坐标, n 为参与的峰值点个数;

(5) 设置迭代停止条件,重复步骤(2)~(4),直到收敛.

2.3 圆周积分

为了减小噪声对风速反演的影响,需对二维干涉环进行圆周积分.以干涉环圆心为中心,将 256×256 个像素的CCD分为200个等面积的圆环,对每个圆环里的像素进行积分,获得一维干涉曲线,然后利用高斯拟合获得每个干涉条纹的峰值半径.

2.4 风速计算

基于获得的干涉条纹半径,利用数据处理法(Shiokawa等, 2001)进行风速计算.

$$V_N = \frac{c}{\sin\theta} \frac{r_S^2 - r_N^2}{4f^2 - (r_S^2 + r_N^2)}, \quad (2)$$

$$V_E = \frac{c}{\sin\theta} \frac{r_W^2 - r_E^2}{4f^2 - (r_W^2 + r_E^2)}, \quad (3)$$

式中, V_N 为纬向风速(北为正), V_E 为经向风速(东为正), θ 为观测天顶角(45°), c 为光速($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$), r 为干涉环半径, f 为焦距(兴隆FPI: 240mm),下标 E 、 W 、 S 和 N 分别代表东向、西向、南向和北向.

3 反演结果比较与分析

目前,崂山地基FPI(Yu等, 2014)是由中国气象局国家卫星气象中心从美国大气研究中心(NCAR)引进的,其CCD探测器大小为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,像元个数为 256×256 .由于崂山FPI以全干涉圆环的形式进行气辉观测,本文需要将其裁切为非全干涉圆环以进行反演研究.我们利用FPI在2013年4月9日至5月6日28天的892.0、630.0和557.7nm气辉观测数据进行了数据处理,获得28天的非全干涉圆环的圆心,并将其与全干涉圆环的位置进行了比较(图3).

由图3可得,非全干涉圆环所得圆心的横坐标与全干涉圆环的圆心的平均偏差为0.148个像元,纵坐标的平均偏差为0.137个像元,且每个圆心偏差均在0.3个像元以内,这完全满足风速的反演要求(王英鉴等,

图3 全干涉圆环圆心(菱形实线和正方形点线)与非全干涉圆环(三角形虚线)的圆心比较
(a) 圆心横坐标; (b) 圆心纵坐标

2014; 王后茂等, 2014), 同时也满足温度的反演要求 (Harding等, 2014).

基于圆心, 对干涉环进行圆周积分、半径拟合, 进而进行风速计算, 最后将反演结果与全干涉圆环的反演结果进行了比较(图4). 岢岚FPI全干涉圆环数据是基于傅里叶分解的方法建立正演模型进而进行风速反演的, 其是有美国大气研究中心提供的反演软件, 因此本文中全干涉圆环的风速产品被标记为A-NCAR.

如图4所示, 非全干涉圆环的风速反演结果与全干涉圆环获得的风速产品具有很好的一致性. 图4中, 892.0nm气辉的平均反演偏差为 5.38 m s^{-1} ; 630.0nm气辉的平均反演偏差为 5.81 m s^{-1} ; 557.7nm气辉的平均反演偏差为 3.03 m s^{-1} . 而三种气辉反演偏差的标准差分别为8.15、8.56和 4.58 m s^{-1} . 由此可得, 557.7nm气辉反演结果的一致性明显好于892.0和630.0nm气辉的反演结果, 这是由于557.7nm气辉的辐射强度远远大于其他两种气辉(王后茂和王咏梅, 2015). 而630.0nm气辉平均辐射强度大于892.0nm气辉的, 但其风速偏差(平均偏差和标准偏差)却略大于892.0nm气辉, 这是岢岚地区630.0nm夜气辉的辐射强度随时间的变化较大引起的: 630.0nm气辉辐射一般在午夜(UTC 15:00~19:00)期间辐射很微弱, 这增加了非全干涉圆环和全干涉圆环风速反演结果的随机误差, 同时也增加了它们的不稳定性.

相对于岢岚, 兴隆站点与北京十三陵的距离更近 (~110km), 因此我们将兴隆FPI(袁伟等, 2010)全干涉圆环和非全干涉圆环反演结果与北京十三陵的流星雷达(Yu等, 2013)数据进行了比较, 比较结果如图5和6所示.

图5和6中, 892.0nm气辉的中心高度选为87km, 辐

图4 非全干涉圆环风速反演结果(横坐标)与全干涉圆环结果(纵坐标)的比较分析

(a) 892.0nm气辉; (b) 630.0nm气辉; (c) 557.7nm气辉

射高度范围选取为80~94km, 557.7nm气辉的中心波长为97km, 辐射高度范围选取为92~102km. 由图5和6可知, FPI风速与流星雷达观测的风速趋势较为一致. 其中, 其变化趋势与流星雷达的平均风速(气辉高度范围

图5 FPI 892.0nm气辉和流星雷达观测的纬向风((a), (b))和经向风((a'), (b'))的比较

黑色菱形代表FPI非全干涉圆环反演结果, 红色方形代表FPI全干涉圆环反演结果, 蓝色三角形代表流星雷达87km处的风速, 绿色圆形代表流星雷达80~94km的平均风速结果. (a)和(a')为2010年5月12日结果比较; (b)和(b')为2010年5月13日结果比较

图6 FPI 557.7nm气辉和流星雷达观测的纬向风((a), (b))和经向风((a'), (b'))的比较

黑色菱形代表FPI非全干涉圆环反演结果, 红色方形代表FPI全干涉圆环反演结果, 蓝色三角形代表流星雷达97km处的风速, 绿色圆形代表流星雷达92~102km的平均风速结果. (a)和(a')为2010年5月12日结果比较; (b)和(b')为2010年5月13日结果比较

内)的变化趋势更为一致, 这是由于FPI观测的气辉辐射在某一高度上具有一定的厚度造成的. 但在某些时刻, FPI与流星雷达反演结果存在较大的差别, 比如UTC 15~18(图5a)、UTC 16~18(图5b)和UTC 15~20(图6b).

图5b'中UTC 16~18时间内, FPI南向的原始数据中出现一薄层的背景辐射, 这可能会影响FPI的反演结果, 使得其与流星雷达之间的差异相对较大. 图5a'中UTC 15~18和图6b'中UTC 15~20时间段内, 虽然FPI与流星

雷达的风速观测趋势一致,但两者点对点的结果差异相对较大,造成这种现象的原因可能有多种,如气辉辐射峰值实际高度与假设高度(832.0nm: 87km; 557.7nm: 97km)不同、气辉辐射厚度(或半高宽)与假设厚度不同、不同采样时间范围(FPI: 15min; 流星雷达: 1h)受重力波的影响不同以及1h内地磁场对流星尾迹的影响等(Yu等, 2016).

目前实际测量获得的数据均为全干涉圆环,因此本文中的非全干涉圆环均是由全干涉圆环直接裁切得到的,使得其参与反演的气辉辐射能量约是全干涉圆环的1/4,这将增加每次风速反演的随机误差(图5和6中误差棒). 对于辐射气辉较强时,它们的反演稳定性和精度均较好,如557.7nm气辉. 但当气辉辐射比较弱时,全干涉圆环和非全干涉圆环的反演稳定性受到较大的噪声影响,这会增大它们之间的反演偏差. 例如,图4中892.0和630.0nm结果的离散度(或者标准差)明显大于557.7nm气辉的离散度;图5中的892.0nm气辉非全干涉圆环和全干涉圆环间的偏差明显大于图6中557.7nm气辉的.

在今后的实际观测中,相对于全干涉圆环,非全干涉圆环占用的CCD探测器的面积大大减小,剩余的CCD面积可以直接用于其他方向的气辉干涉成像,这使得其有足够的空间将多个观测方向的气辉同时成像在同一CCD上,同时保证足够的圆环数量用于风场的反演. 为了获得与全干涉圆环相等的气辉辐射能量,首先我们基于光纤将各个方向视场内的气辉辐射全部收集到光学系统并形成扇形分布,进而引入标准具形成干涉圆环,最后同时成像在CCD上;其次,曝光时间将与全干涉圆环一个方向的曝光时间保持一致,从而获得足够的气辉辐射能量,进而保证有效的风场反演数据.

4 结论

本文利用FPI非全干涉圆环进行了中高层大气风场反演方法的研究,实现了弱气辉(或较大噪声)时非全干涉圆环风速的计算,目的是为地基FPI多个方向的同时观测提供准确的理论反演方法,最终使地基FPI观测时间分辨率提高数倍(4~5倍). 为了验证算法,本文利用28天的地基FPI(岢岚)气辉观测数据进行了反演研究,包括892.0、630.0和557.7nm气辉数据. 将地基FPI反演结果与全干涉圆环的风速结果进行了比较

和分析,三种气辉的平均反演偏差分别为5.38、5.81和3.03m s⁻¹,反演偏差的标准差分别为8.15、8.56和4.58m s⁻¹. 此外,将兴隆地基FPI非全干涉圆环和全干涉圆环的风速结果与十三陵站点的流星雷达风速数据也进行了比较分析,风速变化趋势一致.

致谢 中国科学院国家空间科学中心提供兴隆FPI地基观测数据及风速产品,中国科学院地质与地球物理研究所提供十三陵站点流星雷达风速数据,在此一并致谢.

参考文献

- 韩威华, 吕建工, 王咏梅, 杜述松. 2011. Fabry-Perot测风干涉仪数据处理. 空间科学学报, 31: 784–788
- 王后茂, 王咏梅, 王英鉴. 2013. 基于Fabry-Perot的中高层大气风速反演数据处理研究. 地球物理学报, 56: 1095–1101
- 王后茂, 王咏梅, 王英鉴, 李勇志. 2014. 地基Fabry-Perot中高层大气风速反演及误差分析. 空间科学学报, 34: 415–425
- 王后茂, 王咏梅. 2015. 基于紫外辐射传输模型AURIC-2012的气辉辐射模拟. 中国科学: 地球科学, 45: 1768–1780
- 汪丽, 周毅, 华灯鑫, 王萌. 2011. 基于法布里-珀罗干涉仪的大气风场及温度场探测理论研究及仿真. 光学学报, 31: 1001001–1–1001001–6
- 王英鉴, 王咏梅, 王后茂. 2014. 高层大气测风用地基F-P干涉仪的数值模拟. 地球物理学报, 57: 1732–1739
- 袁伟, 徐寄遥, 马瑞平, 吴谦, 姜国英, 高红, 刘晓, 陈孙征. 2010. 我国光学干涉仪对中高层大气风场的首次观测. 科学通报, 55: 3378–3383
- 赵正启, 周小珊, 艾勇. 2006. 扫描式法布里-珀罗干涉仪测量高空大气风速. 应用光学, 27: 558–562
- Abreu V J, Hays P B, Skinner W R. 1991. The high resolution Doppler imager. Opt Photon News, 2: 28–30
- Englert C R, Babcock D D, Harlander J M. 2007. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): Concept and experimental demonstration. Appl Optics, 46: 7297–7307
- Fisher G M, Killeen T L, Wu Q, Hays P B, Reeves J M. 1999. Tidal variability of the geomagnetic polar cap mesopause above Resolute Bay. Geophys Res Lett, 26: 573–576
- Gerrard A J, Meriwether J W. 2011. Initial daytime and nighttime SOFDI observations of thermospheric winds from Fabry-Perot Doppler shift measurements of the 630-nm OI line-shape profile. Ann Geophys, 29: 1529–1536
- Harding B J, Gehrels T W, Makela J J. 2014. Nonlinear regression method for estimating neutral wind and temperature from Fabry-Perot interferometer data. Appl Optics, 53: 666–673

- Hays P B, Killeen T L, Kennedy B C. 1981. The Fabry-Perot interferometer on Dynamics Explorer. *Space Sci Instrum*, 5: 395–416
- Hays P B, Abreu V J, Dobbs M E, Gell D A, Grassl H J, Skinner W R. 1993. The high-resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite. *J Geophys Res*, 98: 10713–10723
- Hernandez G, Roble R G, Ridley E C, Allen J H. 1982. Thermospheric response observed over Fritz Peak, Colorado, during two large geomagnetic storms near solar cycle maximum. *J Geophys Res*, 87: 9181–9192
- Killeen T L, Kennedy B C, Hays P B, Symanow D A, Ceckowski D H. 1983. Image plane detector for the dynamics explorer Fabry-Perot interferometer. *Appl Optics*, 22: 3503–3513
- Killeen T L, Hays P B. 1984. Doppler line profile analysis for a multi-channel Fabry-Perot interferometer. *Appl Optics*, 23: 612–620
- Killeen T L, Kennedy B C, Hays P B, Symanow D A, Ceckowski D H. 1983. Image plane detector for the dynamics explorer Fabry-Perot interferometer. *Appl Optics*, 22: 3503–3513
- Killeen T L, Wu Q, Solomon S C, Ortland D A, Skinner W R, Niciejewski R J, Gell D A. 2006. TIMED Doppler interferometer: Overview and recent results. *J Geophys Res*, 111: A10S01
- Liu X, Xu J, Zhang S, Jiang G, Zhou Q, Yuan W, Noto J, Kerr R. 2014. Thermospheric planetary wave-type oscillations observed by FPIs over Xinglong and Millstone Hill. *J Geophys Res-Space Phys*, 119: 6891–6901
- Liu X, Xu J, Zhang S R, Zhou Q, Yuan W. 2015. Solar activity dependency of multiday oscillations in the nighttime thermospheric winds observed by Fabry-Perot interferometer. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 5871–5881
- Meriwether J W, Shih P, Killeen T L, Wickwar V B, Roble R G. 1984. Nighttime thermospheric winds over Sondre Stromfjord, Greenland. *Geophys Res Lett*, 11: 931–934
- Meriwether J W, Moody J W, Biondi M A, Roble R G. 1986. Optical interferometric measurements of nighttime equatorial thermospheric winds at Arequipa, Peru. *J Geophys Res*, 91: 5557–5566
- Niciejewski R J, Killeen T L, Turnbull M. 1994. Ground-based Fabry-Perot interferometry of the terrestrial nightglow with a bare charge-coupled device: Remote field site deployment. *Opt Eng*, 33: 457–465
- Shepherd G G, Thuillier G, Gault W A, Solheim B H, Hersom C, Alunni J M, Brun J F, Brune S, Charlot P, Cogger L L, Desaulniers D L, Evans W F J, Gattinger R L, Girod F, Harvie D, Hum R H, Kendall D J W, Llewellyn E J, Lowe R P, Ohrt J, Pasternak F, Peillet O, Powell I, Rochon Y, Ward W E, Wiens R H, Wimperis J. 1993. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite. *J Geophys Res*, 98: 10725–10750
- Shiokawa K, Kadota T, Ejiri M K, Otsuka Y, Katoh Y, Satoh M, Ogawa T. 2001. Three-channel imaging Fabry-Perot interferometer for measurement of mid-latitude airglow. *Appl Optics*, 40: 4286–4296
- Shiokawa K, Kadota T, Otsuka Y, Ogawa T, Nakamura T, Fukao S. 2003. A two-channel Fabry-Perot interferometer with thermoelectric-cooled CCD detectors for neutral wind measurement in the upper atmosphere. *Earth Planets Space*, 55: 271–275
- Skinner W R, Hays P B, Abreu V J. 1987. High Resolution Doppler Imager. Ann Arbor: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 673–676
- Taubin G. 1991. Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 13: 1115–1138
- Wang H, Wang Y. 2015. Error calculation and analysis for an improved wind retrieval method based on the ground-based Fabry-Perot interferometer measurements. *Adv Space Res*, 56: 1815–1821
- Wu Q, Gablehouse R D, Solomon S C, Killeen T L, She C Y. 2004. A New Fabry-Perot Interferometer for Upper Atmosphere Research. In: Fourth International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium 2004: Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space. International Society for Optics and Photonics. 218–227
- Wu Q, Wang W, Roble R G, Häggström I, Strømme A. 2012. First daytime thermospheric wind observation from a balloon-borne Fabry-Perot interferometer over Kiruna (68°N). *Geophys Res Lett*, 39: L14104
- Yu T, Huang C, Zhao G, Mao T, Wang Y, Zeng Z, Wang J, Xia C. 2014. A preliminary study of thermosphere and mesosphere wind observed by Fabry-Perot over Kelan, China. *J Geophys Res-Space Phys*, 119: 4981–4997
- Yu T, Xia C, Zuo X, Huang C, Mao T, Liu L, Liu Z. 2016. A comparison of mesospheric and low-thermospheric winds measured by Fabry-Perot interferometer and meteor radar over central China. *J Geophys Res-Space Phys*, 121: 10,037–10,051
- Yu Y, Wan W, Ning B, Liu L, Wang Z, Hu L H, Ren Z. 2013. Tidal wind mapping from observations of a meteor radar chain in December 2011. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 2321–2332