

文章编号: 1001-3806(2016)05-0629-04

## 基于光学多普勒频移的低空速测量方法研究

王晓维, 梁应剑, 李翔, 龙彦志, 梅运桥

(中国航空工业集团公司 成都凯天电子股份有限公司, 成都 610091)

**摘要:** 为了解决传统大气数据系统低空速测量不准确的问题, 采用了以光学多普勒频移为基本原理的低空速测量方法, 并以快速傅里叶变换为数据处理框架构建了一套实验样机, 通过标准风洞实验验证, 得出系统能稳定测量的最小风速为 0.22m/s。结果表明, 该系统在不同风速下, 均具有较高的分辨率和稳定性。

**关键词:** 遥感; 低空速测量; 快速傅里叶变换; 高分辨率

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.005

## Research of low-airspeed measurement based on optical Doppler frequency shift

WANG Xiaowei, LIANG Yingjian, LI Xiang, LONG Yanzhi, MEI Yunqiao

(Chengdu CAIC Electronics Co. Ltd., Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610091, China)

**Abstract:** In order to solve the incorrect low-airspeed detection of traditional air data system, a low-airspeed detection method based on optical Doppler frequency shift was founded. An experimental prototype was built by using fast Fourier transform as data processing framework. By the experiment of standard wind tunnel, the system can measure minimum wind speed of 0.22m/s. The results show that the system has high resolution and stability at different wind speeds.

**Key words:** remote sensing; low-airspeed detection; fast Fourier transform; high precision

### 引言

空速是飞机飞行过程中最重要的测量参量之一<sup>[1]</sup>。到目前为止, 飞机空速测量先后经历了空速管、分布式探头、多功能探头、嵌入式大气等系统的改进和优化, 但仍然是以皮托管为基本原理, 通过解算动压进而解算出速度<sup>[2]</sup>。这是一种被动测量方式。在低速时, 由于外界气流<sup>[3]</sup>以及探头表面易结冰<sup>[4]</sup>等多种因素的影响, 动压测量误差大, 会导致速度测量不准确。这一缺陷在直升机上表现得尤为明显。由于这种测量误差是压力测量方式本身局限性造成的, 因此要解决飞机低速测量问题就需要另辟蹊径。

凭借激光技术、雷达技术以及光学元器件的发展, 本文中提出一种利用红外激光的飞机低空速测量系统。与传统空速测量系统相比, 其具有很高的速度分辨率, 测量速率可低至 0.22m/s, 且测量精度高、无需校正、维护方便等。与传统机载大气数据系统相比, 其

具有体积小、重量轻、稳定性高、可靠性好等优点, 符合机载电子产品的应用要求<sup>[5]</sup>。

### 1 系统描述

基于激光原理的机载空速测量系统(简称机载激光测速)的基本原理是: 利用激光外差法测量飞机与大气气溶胶之间相对运动引起的多普勒频移, 从而测得相对速度<sup>[6]</sup>。总体结构示意图如图 1 所示。

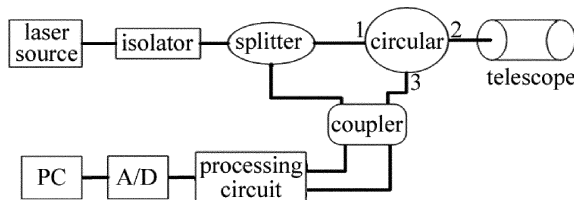


Fig. 1 Schematic diagram of low airspeed detection systems

为了减小重量体积、增加效率、提高可靠性<sup>[7]</sup>, 整个系统采用全光纤结构。激光器发出 1.55μm 激光经过隔离器、分束器以后, 分成本振光和信号光。信号光从环形器(1→2)到镜头, 最后聚焦在离机身一定距离的大气中(避开机身产生的紊流<sup>[8]</sup>), 被激光照射的大气气溶胶粒子会产生一定能量的后向散射光<sup>[9]</sup>, 镜头接收到的散射光从环形器(2→3)进入, 在 2×2 耦合器中与本振光发生相干混频, 混频后的差分信号进入处理电路经过差分<sup>[10]</sup>、平滑滤波和放大以后, 再经过

基金项目: 中航工业技术创新基金资助项目 (2012D16132)

作者简介: 王晓维(1988-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光遥测研究。

E-mail: xwwang25@hotmail.com

收稿日期: 2015-07-19; 收到修改稿日期: 2015-09-22

A/D 转换将模拟信号转换为数字信号。通过上位机进行数据处理和分析,最终解算出相对速度信号。

## 2 空速提取算法

空速解算主要以多普勒频移为基本原理,解算公式如下:

$$v = \frac{\Delta f \lambda}{2 \cos \theta} \quad (1)$$

式中,  $\Delta f$  为相对速度引起的多普勒频移,  $\theta$  为飞行器空速与激光出射方向的夹角,  $\lambda$  为出射激光的波长。所以从公式可以看出,只要能解算出频移  $\Delta f$ ,即可解算出速度值。

由于采集的数据量大并且信号微弱,为了分析处理数据,将采集到的数据按照一定的点数进行加窗分段处理<sup>[11]</sup>。在数字信号处理领域,最常用的频谱获取方法是快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),它并不是一种新的变换方法,而是离散傅里叶变换(discrete Fourier transformation, DFT)的一种快速算法,旨在解决 DFT 运算量大、增加计算机处理难度、实时性差等的缺点<sup>[12]</sup>。因此,将采集到的信号分成  $n$  段子信号,对每一段子信号  $i$  采用 FFT 得到复频谱,取模后再将所有子频谱进行累加、平均,得到稳定的信号频谱,流程图如图 2 所示。

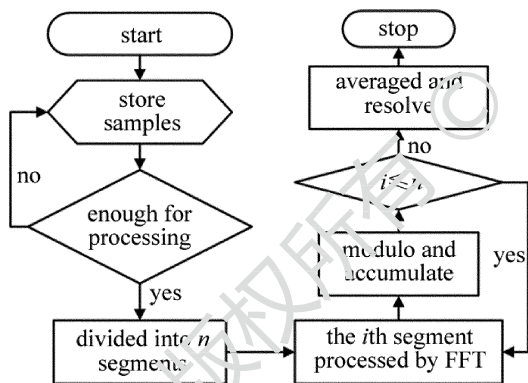


Fig. 2 Flow diagram of data process

在信号处理的过程中,需要着重考虑以下两个方面的内容。

(1) 采样频率足够高,满足 Shannon-Nyquist 采样定律。假设被测速率为 100m/s,根据(1)式可知,对应的多普勒频移约为 130MHz,因此采样频率就至少需要在 260MHz 以上。在本系统中测量的最高速率为 24m/s,对应的最大激光多普勒频移为 31.2MHz,采用的 A/D 采样频率为 100MHz,满足实际应用中采样频率是模拟信号中最高频率的 3 倍~4 倍要求,测试数据可靠。

(2) 空速信号微弱,采样点数要满足足够的频谱累加次数。机载激光测速是利用大气中气溶胶的后向

散射信号得到多普勒频移,这种靠微粒得到的散射信号强度本身就很小,尤其是高空或高海拔地区,气溶胶密度则更低<sup>[13]</sup>,因此接收到的信号光会更加微弱,信噪比也相对较低。虽然在滤波放大过程中能去除部分噪声,但是由于大气运动,在局部风场中存在很多不稳定的相对运动,从而造成频谱中会出现与实际空速引起的频移在同一个数量级的其它频率分量。为了减小这些噪声对系统的影响,可以通过频谱累加来凸显众多频率中较稳定的一个分量(空速引起的多普勒频移),降低不稳定的频率分量(其它局部风场引起的频移)对信噪比的影响<sup>[14]</sup>。具体要累加多少次,需要经过大量实验验证才能得出结论,这是由于信号强度跟光出射功率、聚焦距离、实际飞行环境(气溶胶类型、海拔高度、天气等)有关。

另外,根据频谱分析原理可知,采样频率  $f_s$  和 FFT 取的点数  $N$  将影响频率分辨率  $F$ ,即表示频谱中能够分辨出的两个频率分量之间的最小间隔,如下式所示:

$$F = \frac{f_s}{N} \quad (2)$$

假定分割后的子信号点数为 512,频率分辨率约为 0.2MHz,对应的速度分辨率为 0.15m/s,根据栅栏效应,若峰值频率恰好在两条“栅栏”之间,将引起较大的误差<sup>[15]</sup>。

对于机载大气数据系统的精度和运算速度要求而言,0.15m/s 的速度分辨率足以满足需求。但由于本系统尚处于验证阶段,希望尽可能发挥系统的测速性能。因此,在数据处理时,分割段采用 1024 个点,相应的频率和速度分辨率分别为 0.1MHz 和 0.08m/s。

## 3 实验验证

### 3.1 实验条件及方案

为了产生较理想的稳定风场,采用开环小型风洞进行实验。风洞能产生的最高风速约 35m/s,以传统的皮托管及其风速解调仪作为参考测风装置。

搭建的原理样机如图 3 所示,将收发镜头置于出

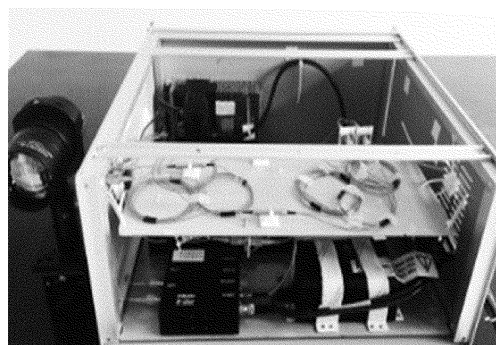


Fig. 3 Picture of prototype

风口正前方约 3m 处,并将激光聚焦在风口附近。调节激光出射功率,启动系统采集模式。

### 3.2 实验结果及分析

3.2.1 不同累加次数实验 当参考风速为 10.04m/s 时,采集足够多的数据,分别取 1024 个、102400 个和 3072000 个点进行处理,以 1024 个点作为分隔子信号点数,即算法处理时不累加、累加 100 次和累加 3000 次,得到的频谱如图 4 所示。

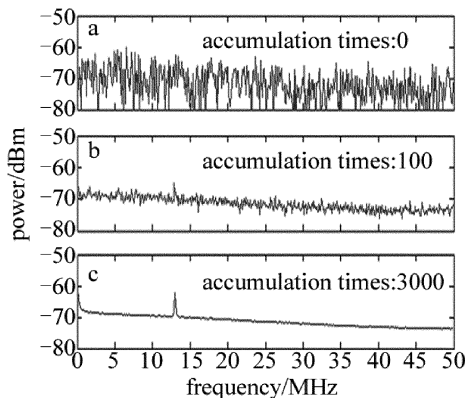


Fig. 4 Result of different accumulation times

从运算结果看,在不进行信号累加时,信噪比非常低,无法分辨出峰值频率。当累加到 100 次时,风速引起的多普勒频移逐渐显现出来,但是信噪比也相对较小。当累加到 3000 次时,频谱曲线基本上已趋于光滑,多普勒频移信号信噪比非常高,可以稳定的解算出相应的风速。此时,多普勒频移为 12.99MHz,对应的风速是 9.99m/s。

光学大气系统在实际测空速时 由于环境相对复杂,所以往往要累加数千次、甚至上万次才能逐渐分辨出多普勒频移。但是考虑到实时性要求,累加次数增多会消耗大量的时间,所以必须降低 FFT 处理点数,因此还需要在光路系统、算法等方面做进一步的研究。

3.2.2 风洞风速实验 实验中所用的小型风洞是靠调节控制箱中的变频器来产生不同风速的风场。在不同风速下,不同时刻采集两次数据,对测试数据都做

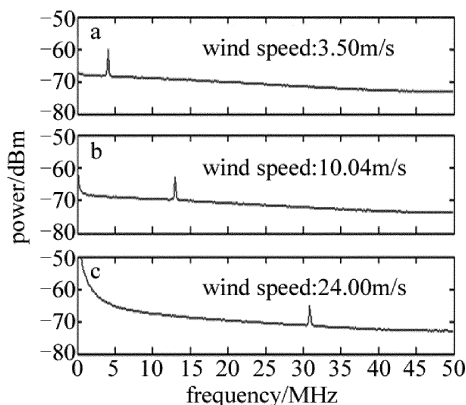


Fig. 5 Spectrogram of frequency at different wind speeds

Table 1 Detection results at different wind speeds

reference wind speed/ (m · s <sup>-1</sup> )	test 1		test 2	
	frequency/ MHz	wind speed/ (m · s <sup>-1</sup> )	frequency/ MHz	wind speed/ (m · s <sup>-1</sup> )
0.30	0.29	0.22	0.29	0.22
0.70	0.59	0.45	0.68	0.52
1.20	1.46	1.12	1.46	1.12
1.80	2.34	1.80	2.34	1.80
3.20	4.10	3.15	4.10	3.15
6.60	8.50	6.54	8.50	6.54
10.04	12.99	9.99	12.99	9.99
13.60	17.38	13.37	17.48	13.45
17.00	21.88	16.83	21.88	16.83
20.20	26.37	20.28	26.37	20.28
24.00	30.86	23.74	30.86	23.74

3000 次 FFT 累加,处理结果如表 1 所示。图 5 中给出了其中 3 种速率下的频谱图,可以明显地看到,多普勒频移随着风速的增加而增大。

从测量结果看,机载激光测速系统在低速(小于 2m/s)时有较好的稳定性。由于在实验过程中由皮托管测量出来的参考风速一直处于抖动状态,故没有客观真实的参考风速,所以在实验结果中并没有给出绝对误差。但是,可以预测偏差的来源存在两个原因:(1)小型开环风洞的风场品质存在一定的偏差,一般来说,风通道中,越朝风口,风速越偏大;(2)激光光束与风场并不严格共线,而是存在一个微小的夹角,从而测得的风速实际上是真实风速的一个分量。

## 4 结 论

通过试验结果可以看出,系统能稳定测量到的最小风速为 0.22m/s,并拥有很高的速度分辨率,因此,本文中提出的方法可以很好解决目前飞机低速无法测量或测量不准确的问题。但目前该系统还处于原理样机研究阶段,后续还需要做大量的工作,包括对自然风速的测量、不同气溶胶密度情况下的测量,以及对系统体积、重量、可靠性等性能进行改进和优化,这些将为开发满足机载低速测量系统奠定坚实基础。

### 参 考 文 献

- [1] LI G W. Aircraft's flight velocity [J]. Air Traffic Management, 2002(5):25 (in Chinese).
- [2] WANG Y, YAO K M. Study on output characteristics of pitot tube for civil aircraft [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013 (3):17-20 (in Chinese).
- [3] WANG M, ZHOU S D, WANG Y J, et al. Influencing factors on measurement of wind speed using pitot tube [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(3): 35-37 (in Chinese).
- [4] ZHOU L, XU H J, GONG S K, et al. Research of aircraft icing characteristics and antiicing and deicing technology [J]. China Safety



- Science Journal, 2010, 20(6): 105-109 (in Chinese).
- [5] LÜ W T, LUO C, HUANG J X. Study for effects on reliability of manufacturing cost of avionics system[J]. Electronic Science & Technology, 2015, 3(2):291-294 (in Chinese).
- [6] SPULER S M. Optical fiber-based laser remote sensor for airborne measurement of wind velocity and turbulence [J]. Applied Optics, 2011, 50(6):842-851.
- [7] XIONG X M, ZHU J F, WANG L. All optical fiber interferometer system with anti-disturbance and its application[J]. Laser Technology, 2013,37(6): 795-798 (in Chinese).
- [8] WATKINS C B, RICHEY C J, TCHORYK P, *et al.* Molecular optical air data system (MOADS) flight experiment [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 5086:236-245.
- [9] YAO M, ZHANG L, XU C W, *et al.* Modeling and simulation of slant path scattering of 1.064 $\mu\text{m}$  laser in atmosphere [J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 394-397 (in Chinese).
- [10] LIU B, TAO W, KE Z G, *et al.* Balance coherent detection technology of coherent lidar[J]. Laser Technology, 2015, 39(1): 46-49 (in Chinese).
- [11] REN Z H. The harmonic parameter estimation algorithm based on the FFT window functions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(5): 8-12(in Chinese).
- [12] ALAN V. Oppenheim signal and system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 254-257 (in Chinese).
- [13] FAN X H, CHEN H B, XIA X A. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2):477-498(in Chinese).
- [14] KARLSSON C J, OLSSON F A, LETALICK D, *et al.* All-fiber multifunction continuous-wave coherent laserradar at 1.55 $\mu\text{m}$  for range, speed, vibration, and wind measurements[J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3716-3726.
- [15] QI G Q. Accuracy analysis and comparison of some FFT based frequency estimators[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(1): 86-92 (in Chinese).