

激光多普勒测速雷达技术研究现状

白蕊霞,王斌永,童 鹏

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室,上海 200083)

摘要:多普勒频率提取算法是激光多普勒测速雷达的关键技术之一,它会直接影响测速精度、作用距离、动态响应范围。本文以一款典型激光多普勒测速雷达为例介绍了测速系统的组成与关键技术,对比分析了国内外典型激光多普勒测速雷达的性能指标及技术参数,重点研究了各种多普勒频率提取算法,并对各种算法的优缺点进行概括总结。最后对多普勒频率提取算法进行了展望。

关键词:激光多普勒测速雷达;多普勒效应;频谱分析;信号处理算法

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.03.001

Research status of laser Doppler velocity radar technology

BAI Rui-xia, WANG Bin-yong, TONG Peng

(Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences,
Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, CAS, Shanghai 200083, China)

Abstract: Doppler frequency extraction algorithm is one of the key technologies of laser Doppler velocity radar. It has a direct effect on the measurement precision, operating range and dynamic response range. Taking a typical laser Doppler velocity radar as an example, the composition and key technologies of the laser Doppler velocity radar system are introduced. Performance indexes and technological parameters of typical laser Doppler velocity radar systems at home and abroad are compared and analyzed. Furthermore, varieties of algorithms which are used to extract Doppler frequency are studied. Also, the merit and demerit of these algorithms are summarized. Finally, the Doppler frequency extraction algorithms are prospected.

Key words: laser Doppler velocity radar; Doppler effect; spectrum analysis; signal processing algorithm

1 引言

激光多普勒测速雷达具有响应速度快、测量精度高、测量动态范围宽、可测多维矢量速度等优点,被广泛应用于科研教育、工业测量、海洋测风和深空探测等领域。本文首先介绍激光多普勒测速雷达的系统框图及关键技术,着重分析了激光多普勒测速雷达的信号处理算法。

2 激光多普勒测速雷达系统组成

激光多普勒测速雷达是根据运动物体会产生多普勒频移的物理原理,采用光学、电子学和软件等技术手段,对多普勒频移进行检测,从而实现速度测量的一种精密光学仪器。

图1为典型激光多普勒测速雷达的系统组成框图。系统由全光纤光学系统、电子学系统和相关的

作者简介:白蕊霞(1989-),女,硕士研究生,主要从事激光多普勒测速雷达信号处理算法研究。

通讯作者:王斌永(1967-),男,高级工程师,主要研究方向为空间应用有效载荷的电子学系统研制。E-mail:bywang@mail.sitp.ac.cn

收稿日期:2015-06-19

结构件组成。光纤光学由光纤激光器、收发同轴的望远镜、环形器和平衡相干探测光路组成。电子学系统由电源电路、前放和自动增益控制电路、高速信号采集和处理电路组成。

光纤激光器由种子 LD 激光器、光纤放大器以及配套的光纤器件组成。线宽和相对强度噪声直接影响系统的探测能力,种子 LD 激光器输出的光信号经光纤放大器后,光信号一般会恶化,故激光多普勒测速雷达的本振光信号一般从种子源 LD 激光器获取。

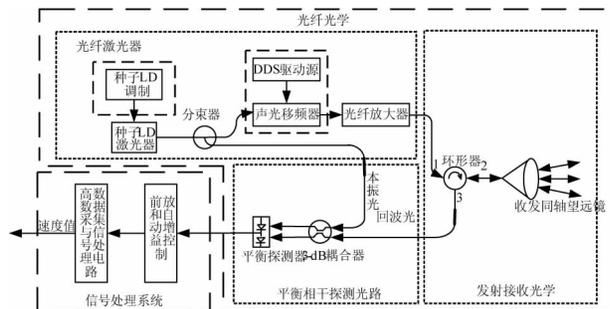


图1 激光多普勒测速雷达的基本结构

Fig. 1 Basic structure of Laser Doppler Velocity Radar

从光纤放大器输出的光信号通过环形器与望远镜之间进行耦合实现收发同轴,图2是收发同轴的光路示意图。环形器是一个3端单向器件,光纤激光器发射激光从环形器1端口进,从2端口出的激光经望远镜准直后输出,当探测到目标时,回波信号从环形器2端口进,3端口出。从3端口输出的回波信号与本振光信号经3dB耦合器完成相干混频,然后进入平衡探测器,完成光电转换。

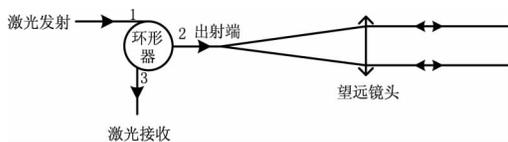


图2 收发同轴光路示意图

Fig. 2 Coaxial optical path schematic diagram

在图1中所示的光路中插入声光移频器或者直接对激光器种子源 LD 进行线性调频,改变激光器输出光频,是激光多普勒测速雷达进行方向判别的两种常用的方法。当速度不为零时,正频率混频后得到的差频为 $f_{upchirp}$, 负频率部分得到的差频为 $f_{downchirp}$, 测出 $f_{upchirp}$ 和 $f_{downchirp}$ 的大小,如满足 $f_{upchirp} < f_{downchirp}$, 判断速度方向为正,如图3(a)所示;如满足 $f_{upchirp} > f_{downchirp}$, 则判断速度方向为负,如图3(b)所示。

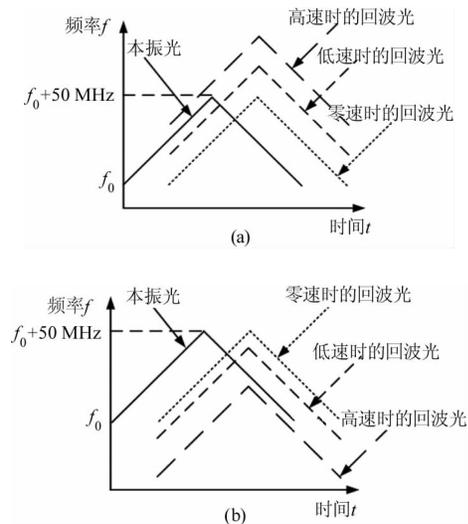


图3 线性调频方向判别示意图

Fig. 3 Linear frequency modulation direction discriminant diagram

3 激光多普勒测速仪国内外研究现状

激光多普勒测速技术经过 40 多年的发展,目前国外已经形成了一些代表性产品。美国 TSI 公司研制的 FSA-3P 型相位多普勒粒子测量仪,利用多普勒效应,可以同时测量流场中的球形粒子的速度和粒径大小,粒子大小的测量范围为 $1.6 \sim 1200 \mu\text{m}$, 粒径的动态范围为 $1:50$, 最大粒子浓度为 1000000 个/cc, 测速范围为 $-500 \sim 800 \text{ m/s}$, 测速精度可以达到 0.2% , 图4(a)为该产品的实物图。德国 Polytec公司生产的 LSV3000 型激光多普勒测速仪是专门为有色、钢铁、玻璃、造纸、塑料等工业应用领域设计的。测速仪采用非接触测量方式,可以连续地测量和控制运动物体的速度和长度。还采用激光外差技术,不管被测物处于向前、向后或静止状态,都能精确测量速度,其测速范围为 $0 \sim \pm 2500 \text{ m/min}$, 测速精度可以达到其测量的 0.1% , 首次检测信号时间 $\geq 5 \text{ ms}$, 输出刷新速率为 1024 次/s , 图4(b)为产品实物图。英国 proton 公司研发的激光多普勒测速仪 BT87-SL25100, 也采用非接触式测量方法,其测速范围为 $0.3 \sim 3000 \text{ m/min}$, 测速精度为其测量绝对值的 0.1% , 测量距离为 250 mm , 产品实物图如4(c)所示^[1]。丹麦 DANTEC 公司研发的相位式激光多普勒测速仪,可以对液体流动或气体流动中的一到三维速度场进行实时测量,可以测速近 500 m/s , 精度优于 2% , 粒径测量范围为 $0.5 \sim 10000 \mu\text{m}$, 精度优于 4% , 产品实物图如图4(d)所

示^[2]。表1给出了部分国外激光多普勒测速仪的相关参数。

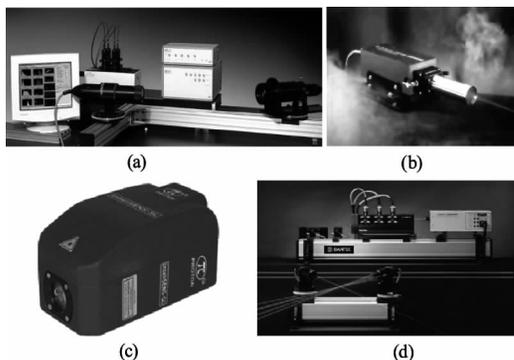


图4 四种激光多普勒测速仪的产品实物图

Fig. 4 Four kinds of products of Laser Doppler Velocimeter

国内目前从事激光多普勒技术研究的单位越来越多,清华大学、中国科学技术大学、大连理工大学、电子科技大学、国防科技大学、中国科学院上海技术

物理研究所等单位都展开了激光多普勒测速技术研究。清华大学的沈熊等人成功地研制了我国第一台一到三维频移激光多普勒测速系统,已成功地应用于小浪底水库泄洪洞模型实验和5 MW 低温供热核反应堆换热器模型的测试验证^[3]。中国科学技术大学何德勇等人实现了单模垂直腔表面发射激光器自混频激光多普勒测速仪的原理样机,成功地用于计算机表面跟踪输入^[4];大连理工大学的许祖茂、韩微微等人在实验室搭建了固体多普勒测速系统,能精确地测量出固体运动的速度,测速精度达到0.5%以上^[5-6];电子科技大学的胡海龙进行了高精度激光多普勒信号处理机的研制,其测速范围为0~50 m/s,测速精度可以达到2‰以上^[7]。国内激光多普勒测速雷达大部分都还停留在实验室阶段,实用化产品较少,与国外的差距仍较大。表2给出了部分国内激光多普勒测速仪的相关参数。

表1 国外激光多普勒测速仪性能

Tab. 1 Foreign Laser Doppler Velocimeter performances

国别和型号	测速范围	测速精度
TSI FSA - 3P(U. S.)	- 500 ~ 800 m/s	0. 2%
PL type laser velocimeter(U. S.)	8 ~ 321 km/s	± 2 km/h
Artium PDI - FP(U. S.)	- 100 ~ 300 m/s	1%
Polytec LSV3000(Germany)	0 ~ ± 2500 m/min	0. 1% of measured value
LaVison(Germany)	0 ~ 100m/s	0. 4% of measured value
BT87 - SL25100(Britain)	0. 3 ~ 3000m/min	0. 1% of measured value
Moduloc MSE - V1500(Britain)	0 ~ 45m/s	0. 05% of measured value
DISA55 - I(Denmark)	3mm/s ~ 300m/s	1%
DISA55 - II(Denmark)	3mm/s ~ 300m/s	1%
DISA55 - 90(Denmark)	2mm/s ~ 2000m/s	1% ~ 2. 5%
BBCGOesz LSE01(Austria)	5. 5mm/s ~ 333. 7m/s	1%
NASA Marshall Flight center(U. S.)	subsonic and supersonic gas	/

表2 国内激光多普勒测速仪性能

Tab. 2 Domestic Laser Doppler Velocimeter performances

单位	测速范围	测速精度
大连理工大学 ^[6]	1 ~ 70 m/s	More than 1%
电子科技大学 ^[7]	0 ~ 50 m/s	More than 2‰
浙江大学 ^[8]	/	0. 5%
重庆大学 ^[9]	0 ~ 20 m/s	2%
郑州大学 ^[10]	/	Better than 1%
湖南大学 ^[11]	4 ~ 90 m/s	1%
中南大学 ^[12]	0 ~ 111 m/s	Better than 1%
华中科技大学 ^[13]	0 ~ 167 m/s	Better than 1%
天津理工大学 ^[14]	3 ~ 69 m/s	Better than 0. 3%
国防科学技术大学 ^[15]	/	2. 4‰

4 国内外多普勒频率提取算法

运动物体产生的多普勒频移与其运动速度的关系为:

$$f_d = 2v/\lambda \tag{1}$$

式中, v 为运动物体沿光波束方向的速度; λ 为激光波长; f_d 为多普勒频移,当激光波长一定时,多普勒频移与运动物体沿光波束方向的速度成线性关系,因此检测出 f_d , 即可得到运动目标在该激光波束方向的速度值。

受光纤激光器光电转换效率、光纤器件能承受的最大光功率、环形器泄漏、激光后向散射、退相干效应等因素的影响,激光多普勒测速雷达的

信噪比一般都比较低,以探测距离为 3 km,光学口径为 50 mm,发射光功率为 2 W,本振光信号为 1 mW,目标反射率为 10%,前放增益 10^5 倍的激光多普勒测速雷达为例,经推算,系统信噪比在 -20 dB 左右。受重量、体积、功耗等设计因素

的制约,信噪比能更低。因此,在低信噪比条件下,精确提取多普勒频率信号,是激光多普勒测速雷达的关键技术之一,也是国内外研究的热点课题。国内外主要的多普勒频率提取算法如表 3 所示。

表 3 国内外多普勒频率提取算法

Tab.3 Doppler frequency extraction algorithm

算法	优点	缺点
M/T 全同步数字频率计	可以有效地消除 ± 1 技术误差,同时可以用于全频段测量	对噪声比较敏感,无法用于低信噪比信号的测量
快速傅里叶变换(FFT)	1) 能引入相关处理、频域累积、自适应滤波等处理算法,大幅度提高信噪比,使用这些信号处理算法后,能提取 -40dB 甚至更低信噪比的信号;2) 可以接受间断信号	1) 频率分辨率低,获取高的频率分辨率以成倍增加变换点数,增加系统软件、硬件复杂程度或者降低系统数据刷新率为代价 2) 由于 FFT 栅栏效应和时域截断效应的影响,使得到的多普勒频率会出现大的偏差
AR 模型 Burg 算法	频率分辨率较高	1) 谱估计的分辨率易受噪声的影响 2) 谱估计的质量易受阶次的影响 3) 如果 $x(n)$ 是含有噪声的正弦信号,谱峰的位置易受 $x(n)$ 的初始相位的影响,可能出现谱峰偏移和谱峰分裂现象
AR 模型修正协方差算法	频谱分辨率也比较高,谱估计对正弦信号的相位不敏感	计算复杂,计算量大,信号处理实时性差,无法满足数据刷新率高的应用场合
一种更实用的 AR 模型 Burg 算法	使得反射系数 $a_{1,1}$ 与初始相位 θ 无关且改进算法的运算量并没有增加,满足系统对实时性的要求	1) 谱估计的分辨率易受噪声的影响 2) 谱估计的质量易受阶次的影响
FFT + 能量重心算法	在一定信噪比条件下,能量重心算法频率校正精度较高,校正频率与实际频率更接近	校正精度易受信噪比影响,在低信噪比条件下,校正精度较差
FFT + 三角形	原理简单,计算量小,易于实现,对噪声不那么敏感,在低信噪比的情况下,校正效果比能量重心校正法好	三角形法无法像能量重心校正法那样,对离散频谱的相位进行校正
功率谱估计 + 频谱细化 + 频谱校正	频谱细化算法可以提高频谱分辨率,再加上频谱校正算法,减少信号处理的误差	计算量稍大

主流的信号处理算法均采用数字化,频域处理为主。AD、TI 和 E2V 等半导体公司能够提供几百兆赫兹到 2 GHz,位宽 8 ~ 14 bit 的高速 ADC 器件,该类 ADC 器件能提供高带宽、大动态范围的数字信号,使信号处理数字化成为可能。Altera、Xilinx 等公司能提供上千万门级,自带大量 DSP 运算资源、存储器资源、专用高速 I/O 接口等 FPGA 器件,该类 FPGA 器件能以高速并行处理的方式,实现实时复杂信号处理算法。高速 ADC 和大容量 FPGA 器件的出现,为激光多普勒测速雷达信号处理注入了新的活力。

5 展望

本文介绍了激光多普勒测速雷达的系统组成和国内外研究现状,对其中的关键技术 - 多普勒频率

提取算法进行了调研和总结。根据目前高速 ADC 器件和大容量 FPGA 器件的发展水平,频域信号处理算法将成为激光多普勒测速雷达信号处理的热点和研究方向。

参考文献:

- [1] CHENG Jianbin. Laser Doppler fiber optic speed sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004. (in Chinese)
成建兵. 多普勒光纤速度传感器[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [2] CHEN Bin. Laser Doppler technology and its application in aviation[J]. Laser Technology, 1987, 12(1): 48 - 53. (in Chinese)
陈斌. 激光多普勒技术及其在航空中的应用[J]. 激光

- 技术,1987,12(1):48-53.
- [3] SHEN Xiong. Laser doppler velocity technology & application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [4] HE Deyong, ZHAO Tianpeng, WANG Huanqin, et al. Accurate direction discrimination of single mode VCSEL self-mixing LDV with high accuracy and wide velocity range [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2008, 25(2):235-239. (in Chinese)
何德勇, 赵天鹏, 王焕钦, 等. 高精度宽测速范围精确方向判别单模 VCSEL 自混合 LDV [J]. 量子电子学报, 2008, 25(2):235-239.
- [5] XU Zumao. The study of laser doppler velocimeter for solid surface [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
许祖茂. 固体激光多普勒测速仪研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [6] HAN Weiwei. Design of laser doppler velocimeter based on DSP [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
韩薇薇. 基于 DSP 芯片的激光多普勒测速仪的设计 [D]. 大连:大连理工大学, 2007.
- [7] HU Hailong. Study on the application of high precision signal processing technology in laser doppler velocity measurement [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
胡海龙. 高精度信号处理技术在激光多普勒测速中的应用研究 [D]. 成都:电子科技大学, 2006.
- [8] SHEN Yue. Signal processing technology in doppler velocity measurement system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
申越. 多普勒测速系统的信号处理技术研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [9] YIAM Hong. The design of laser doppler velocimetry [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
袁红. 激光多普勒测速仪的设计 [D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [10] LI Zhiguo, ZHANG Yubo, REN Junxia. Design of traffic radar speed gun based on DSP [J]. Application of Electronic Technique, 2009(4):141-143. (in Chinese)
李子果, 张宇波, 任军霞. 基 DSP 的交通雷达测速仪设计 [J]. 电子技术应用, 2009(4):141.
- [11] ZHOU Gaobei. The research and design of police traffic radar and the spectral analysis of multiple mobile objects based on DSP [D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese)
周高杯. 多运动目标的频谱分析及基于 DSP 的雷达测速仪的设计 [D]. 长沙:湖南大学, 2005.
- [12] ZHANG Wujuan. Research and application of radar speed measurement in train operation [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
张武娟. 雷达测速在列车运行中的研究与应用 [D]. 长沙:中南大学, 2008.
- [13] HE Yanling. The research and software design on algorithm of radar speed measurement [D]. Wuhan: Science and Technology, 2012. (in Chinese)
何燕玲. 雷达测速算法研究与软件研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [14] LIU Fang. Study of radar speed measurement system based on DSP [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2010. (in Chinese)
刘芳. 基于 DSP 的雷达测速计量系统的研究 [D]. 天津:天津理工大学, 2010.
- [15] CAO Yanwei. Design of tracking controller of multiple frequency CW radar and research on related theory and algorithm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
曹延伟. 频连续波雷达跟踪控制器设计及相关理论和算法研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.
- [16] ZHANG Yanyan, GONG Ke, HE Shufang, et al. Progress in laser doppler velocity measurement techniques [J]. Laser & Infrared, 2010, 11(40):1157-1162. (in Chinese)
张艳艳, 巩柯, 何淑芳, 等. 激光多普勒测速技术进展 [J]. 激光与红外, 2010, 11(40):1157-1162.