

# 激光多普勒测速光纤光路\*

郝冬杰 王可宁

(西安工业大学 光电工程学院 西安 710021)

**摘要:**为了解决全光纤激光多普勒零差检测光路存在的光能量损耗大、干涉图对比度低、信噪比低等问题,比较了3种全光纤激光多普勒零差检测光路。分析并计算了3种光路中各光纤无源器件的光功率总损耗,设计了3种光路的对比性实验,采用光功率计和插回损仪实测了3种光路光的光功率;观测3种光路光电探测器输出的干涉波形,并且计算了干涉图对比度。结果表明,分析计算结果和实验实测结果吻合,光路中光能量损耗越低,输出的多普勒信号幅值越大,信号信噪比就越高,对比度越高。

**关键词:**激光多普勒零差检测;光功率损耗;信号对比度

**中图分类号:** TN2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 520.604

## Fiber optical path for laser Doppler velocity measurement

Hao Dongjie Wang Kening

(School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to solve the all fiber laser doppler homodyne detection optical path of the light energy loss, interference figure problem of low contrast and low signal-to-noise ratio, this paper compares three kinds of all-fiber laser Doppler homodyne detection optical path. Analysis of four light path and calculate the optical power of each optical fiber passive components in the total loss and the overall utilization rate of light path of light, some comparative experiments of three light path design, the optical power meter and plug-in return loss instrument measured for three kinds of optical path of light power; Through observing three kinds of interference of light path photodetector output waveform, and calculated the interference figure contrast. The measured results show that the calculation results and experiment results, the optical path of the light energy loss is lower, the output of the doppler signal amplitude greatly, signal the higher signal-to-noise ratio, the higher the contrast.

**Keywords:** laser doppler homodyne detection; light power loss; signal contrast

### 1 引言

激光多普勒测振(laser Doppler vibration, LDV)<sup>[1]</sup>是一种基于激光多普勒效应和光散射原理,根据激光的相干性,通过测量激光频率引起的多普勒频移去测量振动表面的瞬时速度。光纤多普勒差拍干涉测振技术是2000年才发展起来的新测振技术<sup>[2]</sup>,已经开拓了广泛的应用领域,例如声学、航空航天、武器、炸药爆轰性能、内弹道等众多研究领域。全光纤多普勒测振仪由光纤和光纤耦合器构成,因此全光纤测振仪的结构、简单、体积小、抗振动、可靠性高、调试简单,而且价格便宜<sup>[3]</sup>。所以,发展全光纤

多普勒差拍干涉测振技术是非常必要的,将对激光干涉测振技术的发展有很大的推动作用<sup>[4]</sup>。

目前 AFVISAR 的零差光路主要有4种基本结构,波兰弗罗茨瓦夫理工大学电信和声学研究院<sup>[5]</sup>报道了两种基于双光纤准直器的 AFVISAR 零差光路,其特点是采用双光纤准直器实现前向发射光束和后向散射光速的分离;美国 LLNL 实验室<sup>[6]</sup>报道了一种基于准环形器的零差光路,采用环形器实现前向发射光束和后向散射光速的分离,采用光纤准直器的后向发射光做为参考光;中国工程物理研究院对 AFVISAR 也开展了的深入的研究工作,报道了一种基于环形器和耦合器的零差光路,其特点是采用

收稿日期:2017-01

\* 基金项目:陕西省教育厅2016年度专项科学研究计划项目(16JK1370)资助

环形器分离光纤准直器的发射光束和信号光束,采用光纤耦合器分束得到参考光,容易控制多普勒信号的幅值、对比度和信噪比<sup>[7]</sup>。

本文设计了3种全光纤激光多普勒零差检测光路的对比性实验,分析并计算了3种光路中各光纤无源器件的光功率总损耗;通过观测3种光路光电探测器输出的干涉波形,并且计算了干涉图对比度<sup>[8]</sup>。

## 2 光零差检测原理

图1所示为光零差检测的基本原理。光零差检测是激光器的输出光束源照射到被测物体上,当被测物体向探头运动时,从物体表面反射回的信号光,激光器从探头发出的本征光,这两束相干光入射到探测器表面进行混频,形成相干光场<sup>[9]</sup>。经探测器变换后,输出信号中包含  $F_1 \pm \delta F - F_1$  的差频信号—多普勒频移。

$$\delta F = \frac{2v}{\lambda} \quad (1)$$

式中:  $v$  为多普勒振动速度,  $\lambda$  为激光器激光波长。

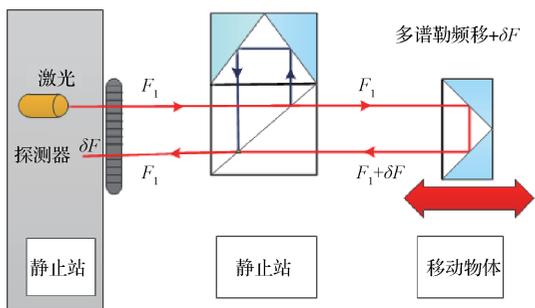


图1 光零差检测的基本原理

激光多普勒零差检测光路的参考光可以来自于激光器经光纤耦合分束器分出的小部分光功率,也可以来自于光纤准直器的回损光,参考光与信号光产生干涉后,干涉信号强度为:

$$I(t) = I_0 + I_s + 2\sqrt{I_0 I_s} \sin(\delta F + (\varphi_1 - \varphi_2)) \quad (2)$$

式中:  $I_0$  为参考光的光强(没有多普勒频移),  $I_s$  为信号光的光强(有多普勒频移),  $\varphi_1$  参考光的初相位,  $\varphi_2$  信号光的初相位,  $\delta F$  为参考光和信号光的相对相位差。可见,通过检测差频来计算信号光的频率、功率、相位、或者偏振方向等参数,对干涉信号进行时频分析,提取出多普勒频移,即可利用式(1)得到被测物体的运动速度。

## 3 零差检测光路系统分析

对于全光纤激光多普勒测振系统而言,其核心为系统的光路设计,而光路设计的关键为参考光和信号光的大小与比例分配。图2(a)~(c)为激光多普勒零差检测光路。

零差检测光路如图2(a)所示。其光路原理:激光先经过光纤隔离器,再经过 Coupler1 光纤耦合器、Coupler1 光纤耦合器 99% 的光再经过光纤隔离器进入到双光纤准直

器入射端后成为近平行光,照射在运动物体上反射光逆向射入双光纤准直器出射端,Coupler1 光纤耦合器 1% 的光作为参考光,信号光和参考光在 Coupler1 光纤耦合器合束后在探测器中实现混频。

零差检测光路如图2(b)所示。激光先经过光纤隔离器,再经过光纤耦合器1,光纤耦合器1的一部分光再经过光纤隔离器进入到双光纤准直器入射端后成为近平行光,照射在运动物体上,反射光逆向射入双光纤准直器出射端,成为信号光束,信号光通过光纤放大器(EDFA)进行放大,光纤耦合器1的另一部分光作为参考光,信号光和参考光在光纤耦合器2中合束后在探测器中实现混频。但通过理论计算与实验验证,在光纤耦合器1的分光比为 99:1 时,多普勒信号质量更好。

零差检测光路如图2(c)所示。其光路原理为激光先经过光纤隔离器进入到环形器的1端口,入射1端口的光将从环形器的2端口耦合进入到单光纤准直器后成为近平行光<sup>[10]</sup>,照射在运动物体上,反射光逆向射入准直器,成为信号光束,从环形器的3端口出射,而参考光由没有镀膜的单光纤准直器探头的 15 dB 回波损耗提供,信号光和参考光在探测器中实现混频<sup>[11]</sup>。

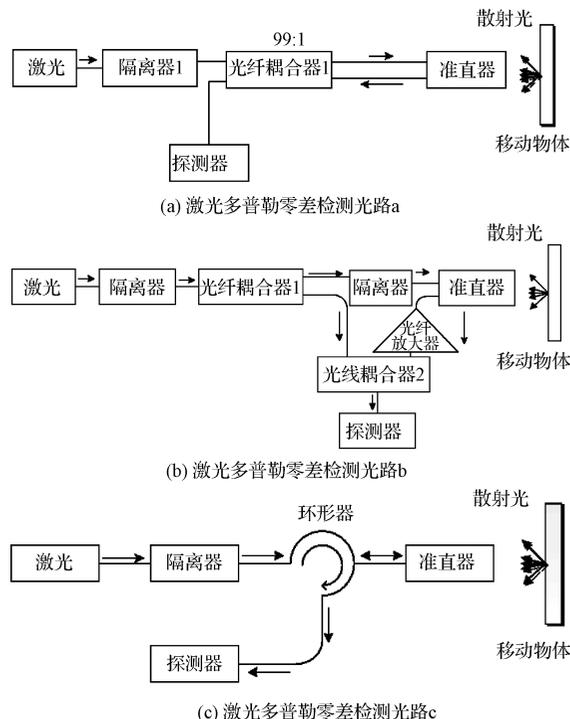


图2 激光多普勒零差检测光路

虽然全光纤激光多普勒零差检测光路都能产生多普勒信号,但是都存在光路中能量损耗、干涉图对比度和信噪比等问题,下面主要从光功率损耗和干涉图对比度分析3种光路的特点。

### 1) 光路的损耗

光路的损耗主要包含以下3个部份:(1)光纤对信号

光和参考光强度产生的衰减;(2)光路中各种接头、接点对信号光和参考光的衰减;(3)光路中各光纤无源器件对信号光和参考光产生的衰减<sup>[12]</sup>。根据光纤无源器件拟使用常规商业品,其典型参数可从相关产品资料中获取,表1所示为光纤无源器件损耗典型值表。

表1 光纤无源器件损耗典型值 (dB)

	接头损耗	插入损耗	附加损耗
光纤隔离器	0.5	0.6	0.1
光纤耦合分束器	0.5	0.5	0.1
环形器	0.5	0.7	0
光纤准直器	0.5	0.2	0

全光路系统光功率损耗可按照式(3)计算

$$A = aL - 10\lg k + A_c + A_f \quad (3)$$

式中: $A$ 为光路全程损耗, $aL$ 为光纤对所传输光信号的衰减, $a$ 为光衰减系数, $L$ 为光纤长度,当光信号波长为1550 nm时,可取 $a = 0.25$  dB/km(包括熔接损耗),由于搭建近距离实验,对光纤传输信号的衰减可以忽略。 $A_c$ 为插头损耗, $A_f$ 为光线耦合分束器的附加损耗。

#### 2)干涉图对比度

光电探测器接收干涉后的多普勒信号,光电探测器的光敏面垂直于光的传播方向,则光电探测器的光电流(多普勒信号)为:

$$i = RP = R(AI) =$$

$$R(P_L + P_S) + R\sqrt{P_L P_S} \cos(2\pi\delta F + \varphi_1 - \varphi_2) \quad (4)$$

式中: $R$ 为光电探测器的响应度, $P$ 为光电探测器接受到的光功率, $A$ 为光敏面面积, $P_L$ 为参考光功率, $P_S$ 为信号光功率。

提取多普勒信号的频率,进而得到反射光或散射光的多普勒频移,然后再根据式(1)就可以计算出发射面的瞬时速度。

根据式(4)可得多普勒信号的对比度为:

$$s = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}} = \frac{2\sqrt{P_L P_S}}{P_L + P_S} \quad (5)$$

当信号光功率和参考光功率越接近,多普勒信号的对比度越高,当信号光功率和参考光功率越相等时,多普勒信号的对比度得到最大值1。多普勒信号的对比度等于信号交流分量的幅值与信号直流偏置的比值,因此可以使用示波器对多普勒信号的对比度进行观测。

## 4 实验测试数据和分析

### 4.1 实验装置

搭建全光纤激光多普勒测试平台,本实验采用固定频率的音叉作为测试对象,实验选用1550 nm 半导体激光器(型号:OS-LD-1550-20-1-S-FA)作为光源,选用去直流偏置的光电探测器(型号:C30644E)进行光电信号转换,

选用G&H3000A型插回损仪进行插回损测量,使用的是索雷博PM20CH型光功率计3种光路分别进行光功率测试,并且检测各种光路的实时波形,分析3种光路的特点。

### 4.2 光路损耗测试

搭建同等近距离如图2(a)~(c)所示的激光多普勒零差检测光路。用插回损仪测量每个光纤器件头的插损和回损,测得光纤耦合分束器插头的插入损耗值为0.53 dB,光纤隔离器的插入损耗为0.6 dB,它的附加损耗为0.1 dB, $1 \times 2$  光纤耦合分束器的附加损耗值约为0.1 dB, $1 \times 2$  光纤耦合分束器的分光损耗为,环形器的插入损耗值约为0.7 dB,使用不同的光纤准直器的插入损耗值相同约为0.2 dB,光纤探头接收物体表面回光的接收效率 $\eta$ 约 $10^{-4}$ ,并且用光功率计检测各部分光路输出的光功率。采用1550 nm的半导体激光器的输出功率为20.8 mW,分别计算3种光路各部分的实际损耗和理论损耗。各光路的光功率损耗如表2所示。

表2 全光纤激光多普勒测振光路损耗 (dB)

	理论损耗	实际损耗	误差
光路 a	5.2	5.7	0.5
光路 b	6.8	7.4	0.4
光路 c	6.3	6.7	0.3

从表2可以验证,在激光多普勒零差检测光路中,光纤耦合分束器的分光比不同会产生不同的光损耗,零差检测光路b的损耗最大,零差检测光路a的损耗最小,光路的实际损耗比理论损耗偏大,原因是不同的光路结构插入损耗值不同,并且光纤内部对传输信号有少量的衰减。

### 4.3 信号对比度测试

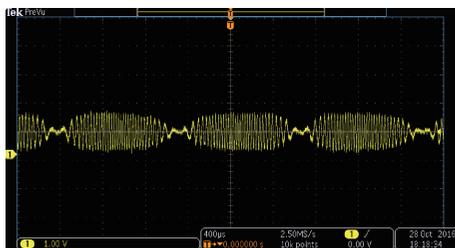
使用插回损仪,分别测试了3种光路信号光和参考光的损耗系数。3种光路的多普勒信号使用示波器进行记录,用信号交流分量的幅值除以信号的直流偏置,得到信号的对比度。3种光路的多普勒信号波形如图3(a)~(c)所示。

光路参数的实测对比度与理论对比度的误差如表3所示。

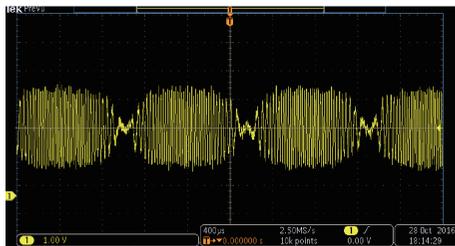
表3 全光纤激光多普勒测振光路对比度

	理论值	实际值	误差
光路 a	0.998	0.73	0.268
光路 b	0.336	0.53	0.194
光路 c	0.854	0.9	0.046

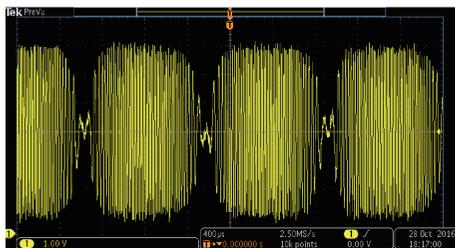
由表3可以看出,光路c的信号对比度实测值也与计算值接近,但是光路a和b的对比度实测值与计算值有较大差距。原因在于损耗系数的测试是静态测试,既音叉的反射面静止,光纤准直器的反射耦合损耗较小。对比度的



(a) 光路a多普勒信号输出波形



(b) 光路b多普勒信号输出波形



(c) 光路c多普勒信号输出波形

图3 多普勒信号输出波形

测试是动态测试,既音叉振动,反射面的位置交替变化,光纤准直器的径向失配变大,反射耦合损耗增大,光路的信号光损耗增大。双光纤准直器的反射耦合损耗对径向失配更敏感,在动态测试过程中信号光损耗系数的变化更大,导致对比度的明显变化。

## 5 结论

本文利用零差法搭建了3种激光多普勒零差检测光路系统,分析并计算了3种光路中各光纤无源器件的光功率总消耗,采用光功率计和插回损仪实测了3种光路光的光功率;通过观测3种光路光电探测器输出的干涉波形,而且计算干涉图对比度。结果表明,3种激光多普勒零差检测光路系统各有不同的适应环境,3种光路的在各自适应的环境下光损耗不同,干涉图对比度也不同,前两种光路采用双光纤准直器实现反射光耦合时,对反射面的位置以及角度要求较高,不适合大位移的速度检测相比之下,第2种光路加有EDFA,可以进行远距离测量,第3种光路采用单光纤准直器和环形器实现反射光耦合时,对反射面的位置以及角度要求较低,可以进行高速和大位移测量。

## 参考文献

- [1] MUHAMAD A A L B, IGARI B N, MIKAMI C O. Fiber-type laser doppler velocimeter using lensed thermally-diffused expanded core fiber for liquid flow measurement[C]. 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC), IEEE, 2010:806-807.
- [2] 王德田. 光纤多普勒差拍干涉测速技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2008.
- [3] 佚名. CAEP-IFP-DISAR-01 全光纤激光干涉测速仪[J]. 爆炸与冲击, 2009, 23(2):443-443.
- [4] 倪佳敏. 基于 LabVIEW 与 MATLAB 的实时在线光子多普勒测速系统的研制[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [5] LI R, MADAMPOULOS N, ZHU Z, et al. Performance comparison of an all-fiber-based laser Doppler vibrometer for remote acoustical signal detection using short and long coherence length lasers[J]. Applied Optics, 2012, 51(21): 5011-5018.
- [6] STRAND O T, GOOSMAN D R, MARTINEZ C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(8):083108.
- [7] 李秀明. 用于弹丸速度测量的激光多普勒测速技术研究[D]. 天津:天津大学,2014.
- [8] 余瑞兰,刘勇,王安. 光纤 Michelson 干涉仪干涉条纹对比度的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2007(3): 232-236.
- [9] 武敬力,刘京郊,邢忠宝,等. 光纤激光相干合成中的相位控制方法与实验[J]. 激光与红外, 2009, 39(6): 584-587.
- [10] 王德田,李泽仁,吴建荣,等. 光纤位移干涉仪在爆轰加载飞片速度测量中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1):105-108.
- [11] 孙杰,沈小燕,张良岳,等. OLCR 系统中滤除衰减直流分量的 BD 结构设计[J]. 光电子技术, 2015, 35(2):85-90.
- [12] 谢洪斌. 有线电视光网系统中光分路器的损耗计算[N]. 电子报, 2008(1):06012.

## 作者简介

郝冬杰,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为测控技术与仪器。

E-mail:434696194@qq.com