

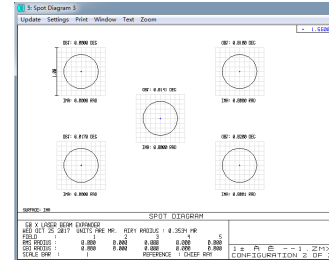


DOI: 10.12086/oe.2018.170621

用于光纤多普勒测振的远距离 光纤准直系统

刘杰, 王伟*, 陈海滨, 张雄星, 郭子龙

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021



摘要: 为了解决光纤多普勒测振仪远距离非接触测量物体振动时, 信号偏弱、过零点波形凌乱、难于解调的问题, 本文提出了一种新型光纤准直系统。本系统主要采用在小型 C-lens 光纤准直器后端增加整形系统并借助 ZEMAX 软件对高斯光束进行准直并优化, 通过对光纤准直系统成品进行耦合测试实验, 使用 C-lens 准直器与光纤准直系统进行信号耦合效率的测试对比。实验结果表明: 改进后的准直系统能够满足 2 m 的工作距离, 空间返回光耦合效率最大能达到 6.3%, 极大地提升了多普勒信号的对比度, 提高了远距离光纤多普勒测振仪对振动的测量精度。

关键词: 光纤准直器; 光纤多普勒测量系统; 耦合效率; EDFA

中图分类号: TH741

文献标志码: A

引用格式: 刘杰, 王伟, 陈海滨, 等. 用于光纤多普勒测振的远距离光纤准直系统[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 170621

Long-distance optical fiber collimation system for Doppler vibrometer

Liu Jie, Wang Wei*, Chen Haibin, Zhang Xiongxing, Guo Zilong

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

Abstract: In order to solve the problem of weak signal, messy waveform at zero-point and difficult demodulation, when the optical Doppler vibrometer in the long-distance non-contact measurement, in this paper, a new type of optical fiber collimation system is proposed. The system mainly uses an augmented beam shaping system at the end of a small C-lens optical fiber collimator and the Gaussian beam is collimated and optimized by ZEMAX software. Through the coupling test of finished product of optical fiber collimation system, and compared with the signal coupling efficiency of C-lens collimator. The experimental results show that the improved collimation system can meet the working distance of 2 meters, and the coupling efficiency of space return optical up to 6.3%, which greatly enhances the Doppler signal contrast and improves the long-distance optical fiber Doppler vibration measurement accuracy.

Keywords: fiber collimator; optical fiber Doppler measurement system; coupling efficiency; EDFA

Citation: Liu J, Wang W, Chen H B, et al. Long-distance optical fiber collimation system for Doppler vibrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170621

1 引言

1966年, Barker 等人首次将光学系统使用分立元

件搭载的激光干涉仪用于爆轰波物理研究, 测量铝在低压爆轰过程中的位移和粒子速度。但是, 条纹对比度差, 对反射表面要求高, 带宽要求高, 难以记录^[1-2]。

收稿日期: 2017-11-13; 收到修改稿日期: 2017-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(617041); 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室开放基金资助项目(2015SZSJ-60-3)

作者简介: 刘杰(1996-), 硕士, 主要从事光电测试与光纤传感的研究。E-mail: liujie.118@qq.com

通信作者: 王伟(1973-), 博士, 教授, 主要从事光电测试与光纤传感的研究。E-mail: wangwei@xatu.edu.cn

2005年,桑迪亚哥国家实验室(Sandia National Lab)基于迈克尔逊干涉仪原理,用光环行器代替分束镜,用1550 nm波长的激光发射到目标物体,再反射回输出端,输出端用1×2耦合器引出两路信号,一路直接输出,另一路加参考臂引出。两路信号到达输出端的时间会有间隔,产生差频信号,利用短时傅里叶求解频率,用多普勒效应原理求解速度^[3-4]。但是,该技术的低速测量误差较大,使用的光学准直透镜为最常用的光纤准直器,是由光纤头和0.23节距的自聚焦透镜(G-lens)或者折射率为常数的厚透镜(C-lens)组成,而普通光纤准直器的准直距离仅有约30 mm^[5-6]。2008年研制的三相PDV(path delay value),吸取了VISAR(visual inspection system for the analysis of reports)技术,引进全光纤光路,通过先求解位移(实验发现一个干涉条纹对应一个波长的一半)后求解速度的方法,在低速测量的试验中提高了测量精度,但未提及工作距离^[7-10]。综上所述,引用全光纤光路的准直系统能够简化系统装置,在测量方面,由于准直系统的工作距离短,对于高速运动的物体,易造成空气震动以及弹丸碎片对光学系统的抖动,对测量结果有一定的影响^[11]。本文提出了一种新型的光纤准直系统,主要采用在小型C-lens光纤准直器后端增加整形系统,通过整形系统对光纤准直器出射的1550 nm不可见光的光斑进行准直、圆化,准直出射到2 m远的运动物体表面,通过运动物体反射,再经过光学整形系统整形耦合到C-lens准直器中,实现高耦合效率的返回光信号。为提高长距离非接触测量振动物体得到的多普勒干涉信号对比度提供了参考。

2 设计原理

长距离光纤准直器是在原有的C-lens光纤准直器的基础上,在C-lens后端经过一个整形光学系统,对C-lens光纤准直器出射的1550 nm波长的光斑进行改

进,以期达到所需的工作距离。故此长距离光纤准直系统由两部分组成:光束整形系统和光纤耦合系统。光束整形系统对激光光信号进行处理,使其匹配耦合光学系统的参数;耦合系统主要用来将返回的光信号高效耦合进入光纤。

2.1 光纤耦合系统

G-lens 光纤准直器的后端面为平面,透镜折射率沿梯度变化,焦距可以通过改变透镜的长度来实现,一般采用0.23节距长度来实现准直效果^[12]。而C-lens准直器由我国自主研发,具有长距离工作性能良好、成本低等特点,其采用折射率为常数的厚透镜,后端面为球面,前端面为斜面^[13-14]。采用C-lens的光纤准直器的结构及其参数如图1所示。当斜面倾角 θ 为 8° 时,C-lens光线准直器的回波损耗值可大于60 dB,完全满足光纤通信的要求^[15]。因光纤头端面的 8° 斜角,造成输出光束与准直器轴线存在夹角 β ,称为点精度。准直器的工作距离为 W_D ,准直器输出的高斯光束的束腰距离其端面为 $W_D/2$,束腰半径为 ω ,高斯光束的发散角与束腰半径成反比关系。

2.2 光束整形系统设计

高斯光束的准直距离即实际的工作距离,对于准直器最大工作距离的定义,往往可理解为该准直器输出光斑的共焦参数 Z ,计算公式如式(1):

$$W_D = Z = \frac{\pi\omega^2}{\lambda} \quad (1)$$

长工作距离意味着在更长的传输距离里高斯光束仍近似成平行光,必然要把光斑做大。为达到激光的准直扩束目的,采用图2所示系统模型分析高斯光束的准直原理。式(2)、式(3)中 Z_{01} 、 Z_{02} 为共焦参数, ω_{01} 、 ω_{02} 分别为物方和像方的束腰半径。

透镜的共焦参数可以表示为

$$Z_{01} = \frac{\pi\omega_{01}^2}{\lambda} \quad (2)$$

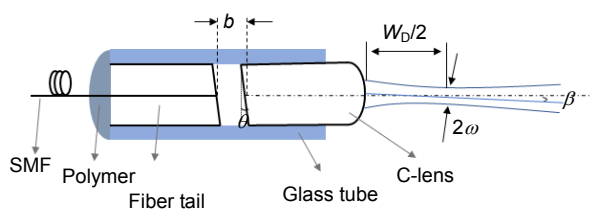


图1 光纤准直器结构图
Fig. 1 Fiber collimator structure

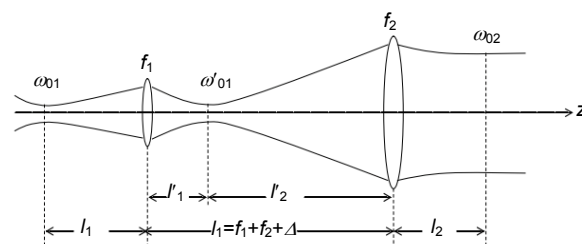


图2 高斯光束准直模型
Fig. 2 Gaussian beam collimation model

$$Z_{02} = \frac{\pi \omega_{02}^2}{\lambda} \quad (3)$$

设透镜均为薄透镜，根据薄透镜的高斯光束变换公式有：

$$\frac{1}{l'_1} = \frac{1}{f} - \frac{1}{l_1 + Z_{01}^2 / [l_1(l_1 - f)]} \quad (4)$$

$$\omega'_{01} = \frac{f \cdot \omega_{01}}{[(l_1 - f)^2 + Z_{01}^2]^{1/2}} \quad (5)$$

根据上面的计算，经望远镜系统变换后，光束的最大扩束比为

$$\left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} \right)_{\max} = |M_T| \cdot \sqrt{1 + \frac{(l_1 - f_1)^2}{Z_{01}^2}} \quad (6)$$

其中： $M_T = -\frac{f_2}{f_1}$ ，还可求得：

$$\begin{cases} l_2 = f_2 \\ l = f_1 + f_2 + \frac{f_1^2 \cdot (l_1 - f_1)}{(l_1 - f_1)^2 + Z_{01}^2} \end{cases} \quad (7)$$

在设计中必须有效地利用设计软件对透镜中高斯光束的变换进行优化和校正。本设计所使用的光线准直器工作距离为 30 mm，由式(1)可得其输出光束的束

腰半径为 0.12 mm，实际所需的光束束腰半径为 0.99 mm，以此为理论计算值，实际的设计应用中会存在偏差。在计算中忽略了透镜的厚度，计算结果具有近似性，根据上述公式可得此光学系统所需的设计指标如表 1。

3 设计仿真

本文从实用的角度出发，阐述 ZEMAX 在光无源器件—单模光纤准直器设计中的应用，通过建模来验证 ZEMAX 在单模光纤准直器设计中的可行性。

运用高斯光束经过望远镜系统的初始结构，平行光进入平行光出射的无焦系统，通过原理公式计算所得光斑尺寸大小进行仿真优化。在序列模式下，中心波长选择 1550 nm，优化函数选择 RMS+Wavefront，对透镜准直工作距离进行优化，优化后的参数如图 3 所示。

图 4 是通过优化函数选择 RMS+Wavefront，进行优化后所得的光束传输分布 2D 图，在整形系统出射的像面上的准直光斑能量分布图如图 5 所示。

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard		Infinity	3.595		0.449
2	Standard		-8.854 V	2.000	BK7	4.041
3	Standard		11.679 V	2.000		4.076
4	Standard		-15.718 V	2.000	BK7	4.168
5	Standard		10.000 V	12.886 V		4.257
6	Standard		-20.100 V	3.595	BK7	5.525
7	Standard		-12.229 V	5.386		5.866
8	Standard		Infinity	3.595	BK7	6.165
9	Standard		-25.492 V	14.379		6.287
IMA	Standard		Infinity	-		2.698

图 3 透镜组参数

Fig. 3 Lens group parameters

表 1 光学设计指标

Table 1 Optical design index

Parameter	Value
Work wavelength/nm	1550±30
Zoom ratio	9×
Length range/m	2
Total length/mm	<90

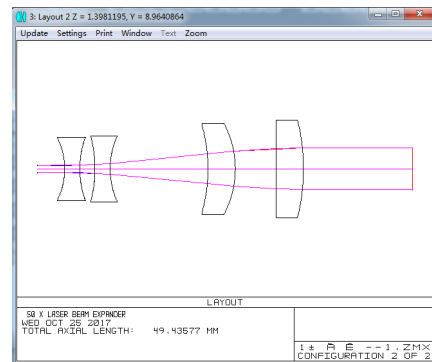


图 4 光束传输 2D 图

Fig. 4 Beam transmission 2D figure

图 6、图 7 为优化后的点列图和艾里斑点列图，可以看出模拟的光线弥散光斑都在规定的艾里斑内。

整形系统的波前差函数如图 8 所示。

通过 Zemax 光学设计软件仿真结果表明，设计的整形系统能够实现平行光束 2 m 的工作距离内平行准直。同时满足所需要的光斑半径，在像面处仿真得到的能量分析图，能量均匀性良好。优化后波前差远小于 0.25λ 的要求，得到了良好的准直度。

4 实验与结果分析

光纤准直系统的耦合效率的测试结构如图 9 所示，此测试方案是直接基于光纤多普勒测振系统完成，其主要由分布式反馈(distributed feedback laser, DFB)激光器、掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)、光纤环行器、C-lens 准直器、光束整形透镜组以及光功率计组成。

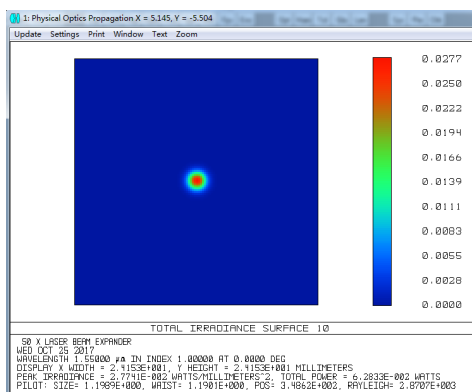


图 5 像面能量分布图

Fig. 5 Image surface energy distribution

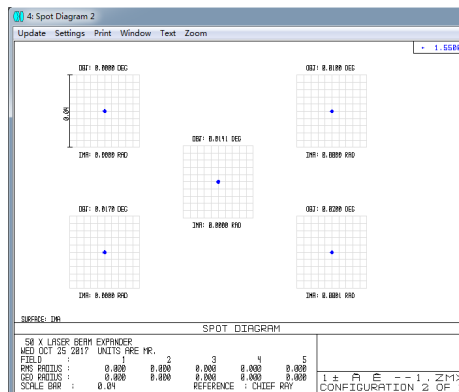


图 6 准直透镜的点列图

Fig. 6 Collimator lens point diagram

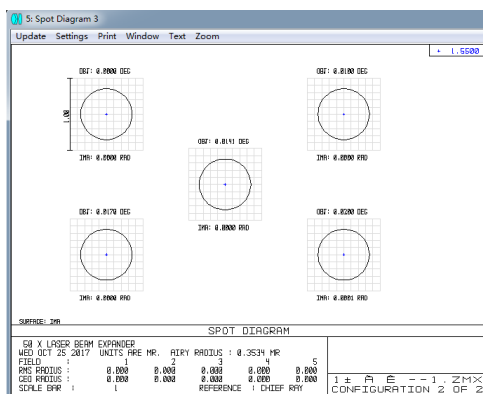


图 7 准直透镜优化后点列图

Fig. 7 Collimator lens optimization point diagram

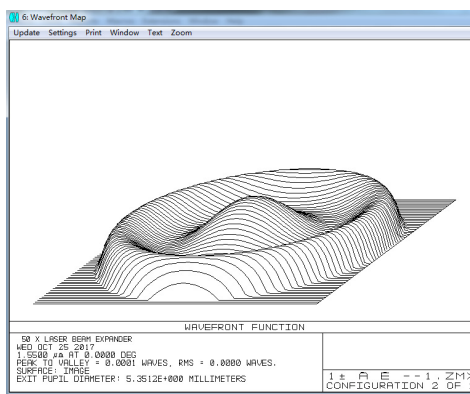


图 8 波前差函数图

Fig. 8 Wavefront difference function chart

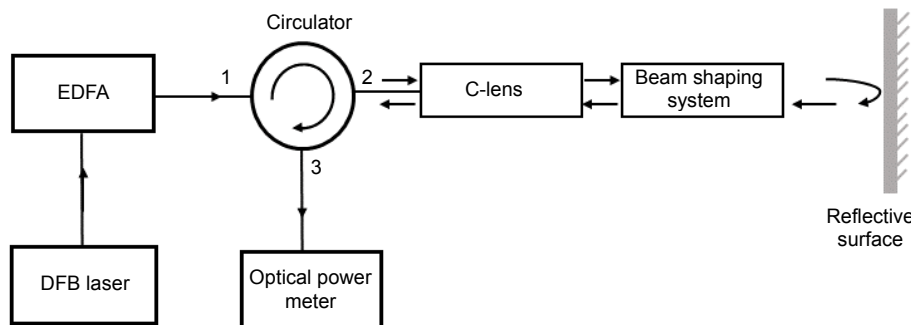


图 9 耦合效率测试方案图

Fig. 9 Coupling efficiency test scheme

图中 DFB 激光器的输出中心波长为 1550 nm(线宽<1 MHz), 功率为 0 mW ~ 20 mW 之间可调。光环行器的使用可以有效地使得返回光从 3 端口输出, 一方面可以保证 DFB 激光器波传输的单向性, 避免后续光路反射光以及杂散光对光源工作稳定性的干扰; 另一方面, 除了该器件引入的少量插入损耗外, 相比于常规的 2×2 光纤耦合器或者 1×2 光纤耦合器, 可以显著提高对光源发射光功率的利用率。为了实现长距离探测(2 m), 需要将激光器的输出功率放大, 可使用掺铒光纤放大器(EDFA, 即在信号通过的纤芯中掺入了铒离子 Er^{3+} 的光信号放大器)工作的中心波长为 1550 nm, 其具体参数见表 2。EDFA 的主要优点是增益高、带宽大、输出功率高、泵浦效率高、插入损耗低^[16]。

DFB 激光器输出光进入 EDFA 的输入端, EDFA 的输出端接入环行器的 1 端口, 经过环行器 2 端口出

射, 经过 C-lens 准直器和透镜组后, 垂直入射到物体表面, 物体表面贴有反光贴纸以提高反射效率, 反射光返回系统经环行器 2 端口, 并从 3 端口出射接入光功率计, 可测得返回光功率。 P_3 表示为环行器 3 端口出射所得的光功率, 为了提高系统的精确度, 减少环行器所产生的损耗量, 将环行器 2 端口的输出光功率定义为 P_2 。系统耦合效率测试时, 由于 1550 nm 的激光属于非可见光波段, 测试手段较困难。所以在耦合调校时, 测试过程中采用的是 632.8 nm 的红光进行对准。耦合效率 η 的定义为: $\eta = P_3/P_2$ 。 P_1 为半导体激光器设置的光功率(0 mW~20 mW), 测试过程中共分为 11 组, P_1 、 P_2 和 P_3 的测试数据记录如表 3, 表 4。表 3 为原始系统的 C-lens 准直器耦合效率测试结果, 表 4 为改进后的准直系统耦合效率测试数据。图 10 为 C-lens 光纤准直器与新型光纤准直仪的耦合测试曲线图。

根据图 10 可见, 通过实验测试得到的光纤耦合的耦合效率随着光功率的增加而增加, 最大耦合效率达到 6.3%, 比之前单独使用 C-lens 准直器时对返回光信号的耦合效率最大 0.06% 得到了明显的改善, 对后期信号的解调工作起到了良好的辅助。

5 结 论

为提高光纤多普勒测振系统测得的信号质量, 设计了一款在 C-lens 准直器后端加入整形系统, 通过 ZEMAX 软件对高斯光束经过整形系统的准直度与工

表 2 EDFA 主要参数
Table 2 EDFA main parameters

Parameter	Value
Work wavelength/nm	1530~1568
Input power/mW	0.25~2
Adjustable gain/mW	200
Noise index/mW	3.55
Power supply	DC+5 V (Working current: 350 mA)
Pigtail	FC/APC

表 3 C-lens 准直系统耦合效率测试数据
Table 3 C-lens collimation system coupling efficiency test data

Wave-length/nm	P_1 /mW	P_2 /mW	$P_3/\mu W$	Coupling efficiency (P_3/P_2)/%
	0	0	0	0
	2.1	1.670	0.2	0.01
	4.1	3.205	1	0.03
	6.1	4.767	3	0.06
	8.1	6.313	13	0.02
1550	10.1	7.816	16	0.02
	12.0	9.397	28	0.03
	14.0	10.86	33	0.03
	16.1	12.49	37	0.03
	18.1	13.96	52	0.037
	20.1	16.74	104	0.06

表 4 改进后准直系统耦合效率测试数据
Table 4 Improved collimation system coupling efficiency test data

Wave-length/nm	P_1 /mW	P_2 /mW	P_3 /mW	Coupling efficiency (P_3/P_2)/%
	0	0	0	0
	2.1	1.670	0.042	2.51
	4.1	3.205	0.096	3
	6.1	4.767	0.192	4.1
	8.1	6.313	0.308	4.88
1550	10.1	7.816	0.406	5.2
	12.0	9.397	0.523	5.55
	14.0	10.86	0.614	5.65
	16.1	12.49	0.727	5.8
	18.1	13.96	0.838	6
	20.1	16.74	1.05	6.3

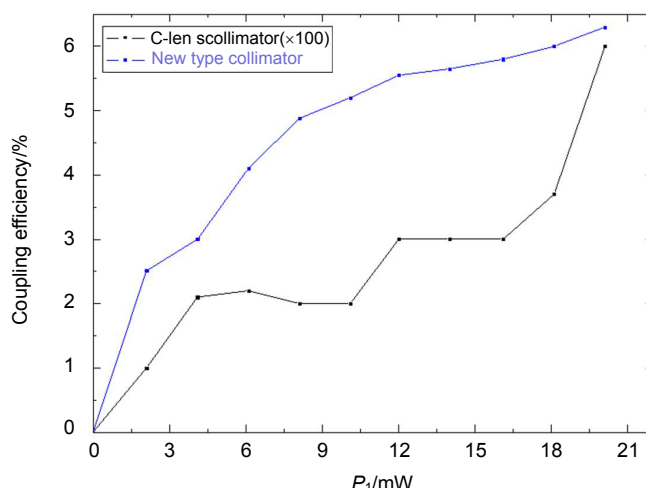


图 10 C-lens 准直器与新型光纤准直仪的耦合测试曲线图
Fig. 10 C-lens collimator and new fiber collimator coupling test curve

作距离进行分析并仿真，得到所需要的透镜参数，后期经过加工处理得到新型光纤准直仪。并与 C-lens 单独整形系统进行耦合测试实验进行对比，返回光耦合效率得到了极大的改善，同时降低了对准直器角度要求，调节方便，基本满足测振系统以下几点要求：

- 1) ZEMAX 设计的准直系统准直度良好；
- 2) 改进后的准直系统能够满足 2 m 的工作距离；
- 3) 空间返回光传输耦合效率最大能达到 6.3%。

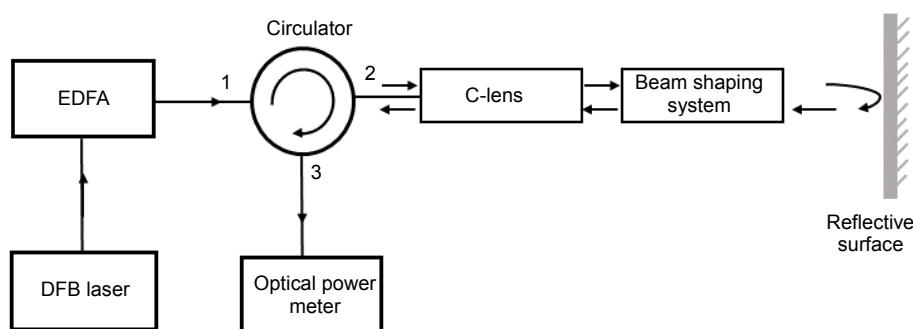
参考文献

- [1] Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, **43**(11): 4669–4675.
- [2] Wang Y Y, Fish P J. Comparison research of Doppler signal analysis techniques[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 1996, **35**(1): 53–61
汪源源, FISH P J. 多普勒信号分析技术的比较研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 1996, **35**(1): 53–61.
- [3] 毛士艺, 张瑞生, 许伟武, 等. 脉冲多普勒雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [4] Peng Q X, Meng J H, Wang D T, et al. Design and application of all-fiber velocity interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2008–2011.
彭其先, 蒙建华, 王德田, 等. 全光纤速度干涉仪设计及应用[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11): 2008–2011.
- [5] Zhu S L, Xu Q S, Liu D S, et al. The analysis of GRIN in optical fiber collimator[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, **29**(3): 379–382.
朱少丽, 徐秋霜, 刘德森. 自聚焦透镜在光纤准直器中的应用分析[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2004, **29**(3): 379–382.
- [6] Lu Y Q, Palais J C, Chen Y. Coupling efficiency of single-mode fiber components using GRIN-rod lenses[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 1988, **7**(2): 85–107.
- [7] Xiao Y N. Research on an laser Doppler velocimetry based on DSPs[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004: 6–8.
- [8] Wardell K, Jakobsson A, Nilsson G E. Laser Doppler perfusion imaging by dynamic light scattering[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1993, **40**(4): 309–316.
- [9] Talley D, Fortney D, Fiala N, et al. Gated laser Doppler flowmetry using a proximity – contact probe[C]//*Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1988, **4**: 1849–1850.
- [10] Özdemir S K, Takamiya S, Shinohara S, et al. A speckle velocimeter using a semiconductor laser with external optical feedback from a moving surface: effects of system parameters on the reproducibility and accuracy of measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, **11**(10): 1447–1455.
- [11] Shibata T, Shinohara S, Ikeda H, et al. Laser speckle velocimeter using self-mixing laser diode[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, **45**(2): 499–503.
- [12] Yang K T, Chen J. Design of automatic debugging and assembling system for optic fiber collimator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(2): 36–38, 52.
杨坤涛, 陈捷. 光纤准直器自动调试装配系统的设计[J]. *光电工程*, 2003, **30**(2): 36–38, 52.
- [13] Wang S Q, Ruan Y, Yin D L, et al. The calculation and analyzing of the RL of C-lens collimator[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2003, **16**(1): 24–28.
王素芹, 阮玉, 殷东亮, 等. C-lens 准直器回波损耗的理论计算与分析[J]. *光电子技术与信息*, 2003, **16**(1): 24–28.
- [14] 王巍, 丁东发, 夏君磊. 干涉型光纤传感用光电子器件技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [15] Jiang S, Liu S H, Fang L Z, et al. Return loss in single-mode fiber joints with bevelled endface[J]. *Study on Optical Communications*, 1994(3): 31–37.
江山, 刘水华, 方罗珍, 等. 单模光纤斜面连接的回波损耗[J]. *光通信研究*, 1994(3): 31–37.
- [16] Wang G F. Research in advanced erbium-doped fiber amplifier [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 27–28.
王冠飞. 新型掺铒光纤放大器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 27–28.

Long-distance optical fiber collimation system for Doppler vibrometer

Liu Jie, Wang Wei*, Chen Haibin, Zhang Xiongxing, Guo Zilong

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



Coupling efficiency test scheme

Overview: When an optical Doppler vibrometer with the C-lens or G-lens collimator is used in the long-distance non-contact measurement, there exists problems like weak signal, messy waveform at zero-point and difficulty of demodulation. The rear end of G-lens fiber collimator is plane. The refractive index of the lens along the gradient changes, and the focal length can be achieved by changing the length of the lens. Generally speaking, 0.23 cycle length is used to achieve the collimation effect. The C-lens collimator for our own research and development, with good long-distance performance and low cost, uses a constant refractive index of the thick lens. The rear end of the spherical surface of the front level 8°. In order to solve these problems, a new configuration type of collimation system is obtained by adding a beam shaping system at the end of a small C-lens fiber collimator and optimizing the Gaussian beam with ZEMAX software. The 1550 nm invisible laser beam emitted by the fiber collimator is collimated and optimized through the beam shaping system, and irradiate on the surface of the vibrating object at a distance of 2 m. The beam reflected by the vibrating object is coupled back to the C-lens collimator through the beam shaping system to achieve a return light signal with high coupling efficiency.

The experimental setup is built for the designed collimation system as shown in the figure. At first, the beam emitted by the DFB laser is amplified by the EDFA. The use of the optical circulator effectively enables the return light to be output from the 3-port, which introduces a small amount of insertion loss compared to the conventional 3 dB coupler, thereby significant improvement of the utilization of the light power is emitted by the light source. Then passing through the C-lens collimator and the beam shaping system and incident perpendicularly onto the surface of the object. The beam is finally reflected by the surface of the object and returned to the system and outputted through the circulator port 3. Lastly, the optical power of the output light can be measured by optical power meter.

The experimental results provide a reference for improving the contrast of the Doppler interference signals obtained by long-distance non-contact measurement of vibrating objects. The results show that the system can meet the working distance of 2 m and the space coupling efficiency of the return optical transmission reaches 6.3%, it greatly reduce the subsequent data processing work of vibration measurement experiment.

Citation: Liu J, Wang W, Chen H B, *et al.* Long-distance optical fiber collimation system for Doppler vibrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170621

Supported by National Natural Science Foundation of China (617041) and Shaanxi Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Testing and Instrumentation Technology Open Fund (2015SZSJ-60-3)

* E-mail: wangwei@xatu.edu.cn