

光纤长度对基于光电振荡器距离测量的影响

张 涛 郝继贵* 郭庭航 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 光电振荡器的振荡频率与环路延时密切相关,同时其光学谐振腔由超长的光纤构成,因此有潜力实现大尺寸高精度的距离测量。光纤作为光电振荡器的核心元件之一,其长度不但影响振荡信号的谱纯度,还决定着距离测量的灵敏度。通过分析光电振荡器的工作原理及其进行距离测量的方法,分别得到了光纤长度与光电振荡器的谱纯度以及距离测量灵敏度之间的关系,并使用不同长度的光纤进行实验,验证了分析结果。在振荡频率的测量分辨力为 1 Hz 时,综合考虑距离测量时对测量灵敏度、振荡信号谱纯度、测量范围的要求以及环境扰动引入的误差,光电振荡器的光纤长度应该在 1 km 左右。

关键词 测量; 光电振荡器; 光纤长度; 测量灵敏度

中图分类号 TH711; TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0908003

Effect of Fiber Length on Distance Measurement Based on Optoelectronic Oscillator

Zhang Tao Zhu Jigui Guo Tinghang Ye Shenghua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The extra-long optical cavity of optoelectronic oscillator (OEO) and the relationship between oscillation frequency shift and the variation of cavity length open the possibility for high-accuracy distance measurements at long range. Optical fiber not only affects the spectrum purity of the output microwave, but also determines the sensitivity of distance measurement. Based on the theory of optoelectronic oscillator and the distance measurement method, the effects of optical fiber length on spectral purity of OEO and measurement sensitivity are analyzed respectively. Fiber loops with different lengths are used in experiments in order to verify the results of analysis. Considering the demands of the measurement sensitivity, the spectral purity and the measurement range, as well as the error introduced by the environment, the fiber length of OEO will be about 1 km when the resolution of frequency measurement is 1 Hz.

Key words measurement; optoelectronic oscillator; fiber length; measurement sensitivity

OCIS codes 280.3400; 140.3510; 230.4910

1 引 言

大尺寸空间中的长度测量是现代先进制造工业中的关键技术之一。随着飞机、船舶、风力叶片等大型装备制造过程向着精密数字化方向发展,对外型尺寸要求也越加严格,在加工和装配过程中不仅要

求长度测量的精度在几十米到上百米的范围内达到微米量级,还需要测量效率高、灵活性好、能适应恶劣的测量条件^[1-3]。基于激光的距离测量方法一直以来都是研究热点,但以光学干涉法和相位法为代表的传统方法越来越难以满足工业测量中的要

收稿日期: 2013-03-28; 收到修改稿日期: 2013-05-03

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51225505)、国家支撑项目(2011BA13B00)

作者简介: 张 涛(1985—),男,博士研究生,主要从事激光测距方面的研究。E-mail: taozhang@tju.edu.cn

导师简介: 叶声华(1934—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事激光及光电测试技术方面的研究。

E-mail: shhuaye@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jiguzhu@tju.edu.cn

求^[4]。光学干涉法的测量精度能够达到纳米量级,但这种方法属于增量测量,在测量时需要目标不间断地连续移动,灵活性受到限制,难以直接应用在大尺寸测量。相位法是一种绝对距离测量方法^[5],测量精度能够达到微米量级^[6]。这种方法的非模糊距离会随着测量分辨力的提高而下降,同时测量精度会受到调制频率、回波信号的变形以及串扰引起的非线性误差的限制。近年来随着光学频率梳技术的发展,激光测距的精度得到了显著提高,测量方法也更加丰富^[7-10]。借助光学频率梳,在 100 m 处的距离测量精度优于 10 μm^[11]。然而光学频率梳现阶段对工作环境的苛刻要求使其难以应用在环境复杂的工业现场。

基于光电振荡器的距离测量方法将待测距离转化为振荡频率进行测量,该方法借助光电振荡器超长的光学谐振腔和高频率、高品质的微波信号,有潜力实现在大尺寸范围微米量级的绝对距离测量^[12]。在测量距离时光信号从光学谐振腔中出射到空间光路,由待测目标反射后再次耦合回谐振腔内。光电振荡器的振荡频率与其环路延时密切相关,通过测量振荡频率变化计算出光信号在空间光路中的传播时间,从而得到待测距离。光纤构成的光学谐振腔是光电振荡器的核心组成部分之一,其长度直接决定了环路延时。环路延时首先影响微波信号的谱纯度,决定着频率测量所能达到的精度。其次,环路延时与振荡频率变化呈反比例关系,延时变化所引起的振荡频率变化与光纤的延时有关,因此光纤长度还是距离测量灵敏度的决定因素之一。此外,环境扰动带来的误差大小也与光纤长度有关。

本文从光电振荡器的相关理论出发,通过分析光纤长度在距离测量中的影响,得到测量灵敏度的估算公式和谱纯度的变化趋势,并使用长度不同的光纤进行实验以验证分析结果。综合分析和实验结果,当振荡频率分辨力为 1 Hz 时,为了使距离测量的灵敏度、振荡信号的谱纯度、测量范围和环境误差影响达到最优,光电振荡器的光纤长度应为 1 km 左右。

2 光纤长度在距离测量中的影响

2.1 光电振荡器测距原理

光电振荡器(OEO)以激光作为光源,出射的光经过光电强度调制器和延时光纤后,由光电探测器将光信号转化为电信号。这些电信号经过滤波和放大后作为调制器的输入信号,形成一个完整的反馈回路。具有增益的反馈回路同时还具有选频的作

用,电路中本身的噪声通过多次循环放大后就能建立起稳定的振荡。光电振荡器的输出为谱纯度高的微波信号,其振荡频率只受到电学器件的响应速度影响,振荡频率能够达到几十吉赫兹。基于光电振荡器的距离测量结构如图 1 所示^[12]。利用一对光纤准直器,使光学谐振腔中的光信号出射到自由空间中,经过反射后并再次耦合回光纤,从而在光电振荡器的反馈环路中插入一段空间光路,输出的高谱纯度高频率的微波信号由频谱仪分析和测量。如图 1 虚线框中所示。

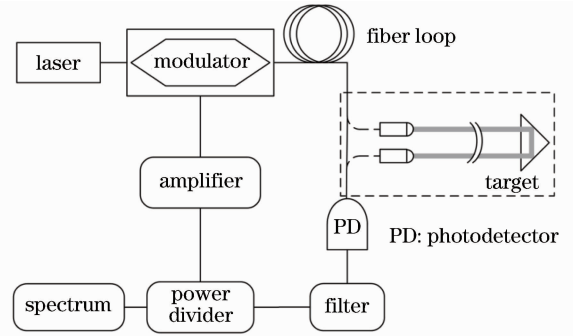


图 1 基于光电振荡器的距离测量结构
Fig. 1 Scheme of distance measurement based on optoelectronic oscillator

环路延时是光信号和电信号在反馈环路中传播和处理所需要的时间。环路延时与光电振荡器的振荡频率之间的关系为

$$f = Nf_b = \frac{N}{\tau}, \quad (1)$$

式中 f 为振荡频率, f_b 为基频, τ 为环路延时, N 为振荡级次。光信号在空间光路中传播带来的环路延时变化为 $\Delta\tau$, 相应的振荡频率变化为

$$\Delta f = f' - f = Nf'_b - Nf_b = N\left(\frac{1}{\tau + \Delta\tau} - \frac{1}{\tau}\right), \quad (2)$$

式中 f 和 f' 分别为空间光路耦合前后的振荡频率。由(1)式和(2)式可得,空间光路的长度与振荡频率变化之间的关系为

$$\Delta L = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n} \Delta\tau = \frac{Nc}{2n} \left(\frac{1}{f'} - \frac{1}{f}\right), \quad (3)$$

式中 c 为真空中光速, n 为空气折射率, 系数 $\frac{1}{2}$ 表示光路的折叠。测量中,振荡级次通过对振荡频率和振荡模式间距之间的比值取整得到,而这两个值都由频谱仪直接测量得到。这种测量方法是一种绝对距离测量方法;超长的光学谐振腔使得测量范围扩展潜力大;待测距离耦合在正反馈回路中,增强了测

量时的抗干扰能力。

2.2 微波信号的频谱纯度

高精度的距离测量需要准确确定并测量振荡信号的中心频率,首先要求光电振荡器输出微波信号的谱纯度高。图2为光电振荡器输出信号的频谱。其中功率密度最大的模式为主振荡模式,其他振荡模式的功率密度受到抑制。由于所有振荡模式均为基频的高次谐波,因此其模间隔与基频值相等。

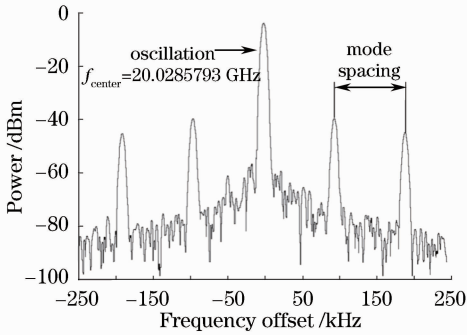


图2 使用频谱仪观察光电振荡器的输出信号
Fig.2 Output signal of optoelectronic oscillator observed by spectral analyzer

光电振荡器振荡模式频谱的半峰全宽为^[13]

$$\Delta f_{\text{FWHM}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta}{\tau^2}, \quad (4)$$

式中 δ 为光电振荡器的信噪比,是反馈环路中器件的噪声功率与振荡信号功率的比值。半峰全宽的值可以作为谱纯度的评价指标,从(4)式中可以看出,光电振荡器环路延时越长,振荡模式的半峰全宽就越窄,相应的频谱纯度也会更高。

2.3 距离测量的灵敏度

测量中,振荡频率的变化与距离变化的比值为测量灵敏度,是距离测量中的重要参数。光电振荡器本身的参数决定着其测量的灵敏度。由(1)式及(3)式得到测量灵敏度为

$$\frac{\Delta f}{\Delta L} = \frac{2nc}{n_i^2} \cdot \frac{N}{L^2}, \quad (5)$$

式中 n_i 为光纤折射率, L 为光电振荡器中光纤长度。分析(5)式可知,提高微波信号的振荡级次是提高测量灵敏度直接且有效的方法。微波信号的谱纯度并不会随着振荡频率的提高而变差^[14-15],因此为了提高测量灵敏度要尽量提高振荡频率的振荡级次。除此之外,测量灵敏度与光纤长度的平方成反比。当光纤长度增加时,测量灵敏度会明显下降。根据(5)式可以粗略计算光纤长度对灵敏度的影响。假设振荡频率约为20 GHz,光电振荡器环路中的延时光纤从10 m增加到2000 m,并同时考虑起振级次的相

应变化,光电振荡器测距系统的灵敏度从1400 Hz/ μm 下降到7 Hz/ μm ,如图3所示。

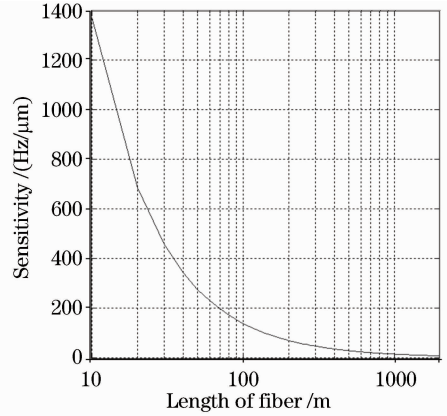


图3 不同光纤长度的灵敏度

Fig.3 Sensitivities with different fiber lengths

2.4 测量误差

在使用光电振荡器测量距离的过程中,被测距离是通过环路延时的变化计算得到的。机械振动和温度变化也会使光纤延时发生变化,而光纤产生的延时变化与空间光路带来的延时变化叠加在一起难以区分,引入额外的测量误差。通过良好的固定可以显著减小机械振动带来的影响,但是环境温度却难以精确测量和控制。普通单模光纤的折射率和长度随温度变化的典型值约为 8.11×10^{-6} 和 1×10^{-6} ^[16]。显然超长的光纤会进一步放大温度变化带来的影响。

3 实验装置及结果

为了验证分析结果,分别使用长度为20、1025、2128、4169 m的单模光纤完成距离测量实验,光纤长度由制造商给出,实验框图如图1所示。可调光延时线(OZoptics, ODL-650)调整精度高且使用方便,在实验中作为待测的空间光路。光源使用波长为1550 nm的连续激光器,反馈环路中强度调制器(Photline, MX-LN-40)的最高调制频率和光电探测器(u2t, XPRV2022)的3 dB带宽都在20 GHz以上,滤波器的通带范围为 $20 \text{ GHz} \pm 30 \text{ MHz}$ 和 $1 \text{ GHz} \pm 5 \text{ MHz}$,使用频谱仪(Angilent, N9020)观察和测量光电振荡器产生的微波信号。

首先观察光电振荡器的振荡频率随环境温度的变化。光电振荡器中光纤长度为2 km,在没有温度控制措施的情况下连续记录振荡频率变化。环境温度由布置在光纤周围的温度传感器测量,以初始频率为零点,得到结果如图4所示。

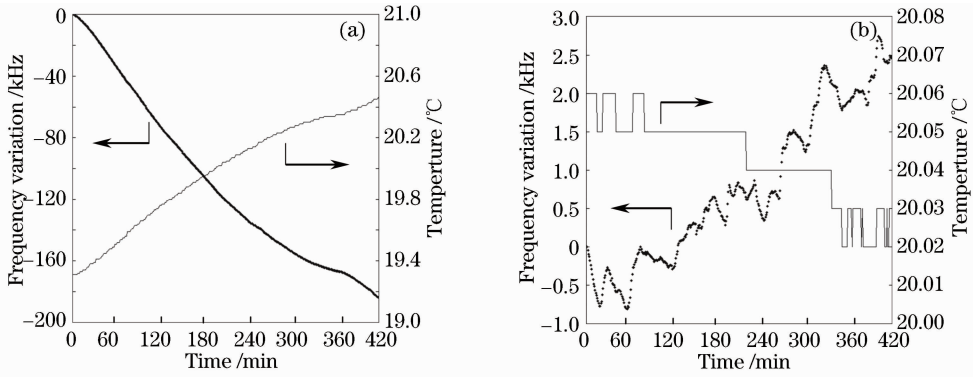


图 4 光电振荡器的频率随温度的变化。(a) 白天 7 h 观测;(b) 夜晚 7 h 观测
Fig. 4 Oscillation frequency drifts versus temperature variation. (a) 7 hours measurement in daytime;
(b) 7 hours measurement in midnight

随着环境温度的升高(降低),振荡频率会相应的降低(升高)。由于温度传感器测量的是光纤周围的空气温度,而空气与光纤之间的热交换与空气流动速度、接触面积、温度变化速度等许多因素有关,变化过程关系复杂。为了使振荡频率稳定,可以使用温度控制、负温度系数的光纤等方法^[17-18]。这里利用保温箱控制光纤温度并将使用的器件固定在光学平台上,由于在实验过程中温度变化缓慢,而测量间隔小于 1 s,通过这种处理可以将温度变化对实验的影响暂时忽略^[19]。

在光电振荡器中使用长度不同的光纤,由频谱仪观察输出的微波信号,如图 5 所示。频谱仪分辨率带宽为 9.1 Hz 测量,此时其分辨力可以达到 1 Hz。

调整光延时线,并测量振荡频率变化,计算得到测量灵敏度。改变光纤长度和振荡级次,将 60 次实

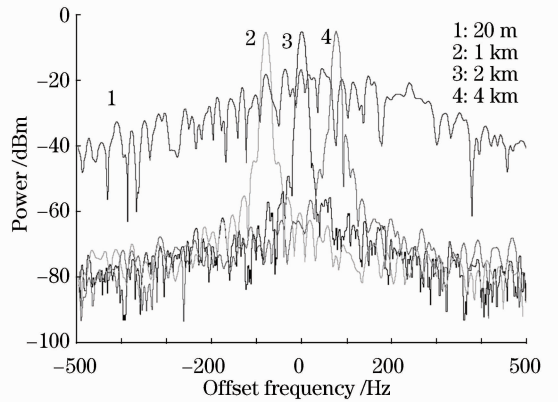


图 5 不同光纤长度时光电振荡器振荡信号的频谱
Fig. 5 Spectra of optoelectronic oscillator oscillation signals with different fiber lengths
实验结果的平均值与通过(5)式计算得到的理论值进行比较。测量灵敏度实验结果如表 1 中所示。

表 1 实验结果与计算值对比

Table 1 Comparison of experimental results with calculations

Fiber length /m	Harmonic number	Sensitivity (calculated) / (Hz/ μm)	Sensitivity (measured) / (Hz/ μm)	Difference / (Hz/ μm)
20	1883	1310.7	1377.4	66.7
1025	106473	28.26	28.06	0.20
2128	212995	13.1	12.84	0.26
2128	10423	0.64	0.60	0.04
4169	409992	6.57	6.56	0.01

4 讨论

为了在距离测量中获得高分辨力,需要同时兼顾频率测量的精度以及测量灵敏度。通过调整频谱仪的设置,其频率分辨力能够达到 1 Hz。而从图 5 中可以看出,只有当振荡信号的谱纯度足够高时(频谱 2,3,4),才能准确测量振荡信号的中心频率值;而当环路延时短,信号谱纯度低时(频谱 1),中心频

率位置难以分辨,也无法获得高精度的振荡频率值。由(4)式可知,频谱的半峰全宽与环路延时的平方成反比。从图 5 中可以看出,当光纤长度大于 1 km 时,振荡信号的谱纯度足够高,使中心频率的测量分辨力能够达到 1 Hz。由于频谱仪的分辨能力有限,随着光纤长度增长,振荡信号的半峰全宽进一步缩短时,频谱仪已经不能分辨。同时频率测量测量的

精度有限,当谱纯度达到一定的水平后,只依靠提高谱纯度也难以改善中心频率的测量精度。

谱纯度和频率分辨力一定时,测量灵敏度也影响着距离测量的分辨力。对比表 1 中的理论计算值与实际测量值,最大偏差在光纤长度为 20 m 时为 5%,而当光纤长度达到千米量级以后,理论与实验的偏差均小于 2%。在光纤较短时,灵敏度计算中对光纤长度的误差更敏感,因此与理论值与实测值之间的偏差也相对较大。首先可以看出,随着光纤长度的增加,测量灵敏度不断地下降,这与理论分析的结果一致。此外,由(5)式可以看出,测量灵敏度也与振荡信号的起振级次呈线性关系。当 OEO 环路中的光纤长度不变,滤波器的通带不同时,振荡级次会相应地改变。如表 1 中实验结果可以看出,当起振级次增大 20 倍时,实验得到的测量灵敏度也增大了约 20 倍。对比其他课题组的实验中^[12]得到的灵敏度(光纤长度 19.4 m,振荡频率 2.13 GHz,模间距 10.58 MHz 时,测量灵敏度为 75.1 Hz/ μm),其实验结果也与使用(5)式得到的计算值(75.164 Hz/ μm)吻合,进一步验证了灵敏度的计算公式。由于测量灵敏度随着光纤长度的增加而下降,而频率测量精度有限,为了保证距离测量具有足够的测量精度,光纤长度应该小于 2 km。

在频率测量分辨力为 1 Hz 时,为了同时保证谱纯度和测量灵敏度,需要光纤长度在 1~2 km 之间。考虑到测量时光信号在空间光路中产生的延时,光纤长度范围的上限还需要根据情况缩短。而考虑到光纤受到的扰动与光纤长度大致呈正比例关系,因此在测量距离时光电振荡器的光纤长度在 1 km 左右为宜。

5 结 论

本文研究了光电振荡器应用于距离测量时,其光纤长度对距离测量产生的影响。通过分析光电振荡器的工作原理及测量距离方法,得到了光纤长度对测量灵敏度和谱纯度的影响,并通过实验验证了分析结果。综合分析结果,当频率分辨力为 1 Hz 时,光纤长度在 1 km 左右时能够保证振荡信号的谱纯度、测量灵敏度和量程能够满足工业测量需要,同时由环境变化引入的噪声最小。实际上,谱纯度、频率测量分辨力和测量灵敏度之间是相互关联的。在未来的实验中,如果频率测量分辨力小于 1 Hz,需要根据情况进一步提高谱纯度,同时降低测量灵敏度以扩大测量范围。

参 考 文 献

- 1 J P Wallerand, A Abou-Zeid, T Badr, *et al.*. Towards new absolute long-distance measurement in air [C]. Orlando: International Workshop and Symposium, 2008.
- 2 Zhu Jigui, Guo Lei, Lin Jiarui, *et al.*. Non-intrusive precise measuring method of large complex surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3524—3529.
郝继贵, 郭 磊, 林嘉睿, 等. 大型空间复杂曲面无干扰精密测量方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3524—3529.
- 3 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1872—1876.
郝继贵, 郭 磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1872—1876.
- 4 Markus-Christian Amann, Thierry Bosch, Marc Lescure, *et al.*. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement [J]. *Opt Eng*, 2001, 40(1): 10—19.
- 5 Liu Miao, Yang Xueyou, Liu Changjie. Phase shift laser range finding with a novel quadrature modulation method and system implementation [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0208004.
刘 邈, 杨学友, 刘常杰. 正交混频相位式激光测距方法与系统实现[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0208004.
- 6 I Fujima, S Iwasaki, K Seta. High-resolution distance meter using optical intensity modulation at 28 GHz [J]. *Meas Sci & Technol*, 1998, 9(7): 1049—1052.
- 7 Kaoru Minoshima, Hirokazu Matsumoto. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(30): 5512—5517.
- 8 I Coddington, W C Swann, L Nenadovic, *et al.*. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. *Nat Photon*, 2009, 3(6): 351—356.
- 9 A Pesatori, M Norgia, C Svelto, *et al.*. High-resolution mode-locked laser rangefinder with harmonic downconversion [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(5): 1536—1542.
- 10 M Cui, M G Zeitouny, N Bhattacharya, *et al.*. Long distance measurement with femtosecond pulses using a dispersive interferometer [J]. *Opt Express*, 2011, 19(7): 6549—6562.
- 11 Nicolae R Doloca, Karl Meiners-Hagen, Martin Wedde, *et al.*. Absolute distance measurement system using a femtosecond laser as a modulator [J]. *Meas Sci & Technol*, 2010, 21(11): 115302.
- 12 Nguyen Lam Duy, Bernard Journet, Isabelle Ledoux-Rak, *et al.*. Opto-electronic oscillator: applications to sensors [C]. *IEEE*, 2008. 131—134.
- 13 X Steve Yao, Lute Maleki. Converting light into spectrally pure microwave oscillation [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(7): 483—485.
- 14 X Steve Yao, Lute Maleki. Optoelectronic microwave oscillator [J]. *J Opt Soc Am B*, 1996, 13(8): 1725—1735.
- 15 Kirill Volyanskiy, Patrice Salzenstein, Hervé Tavernier, *et al.*. Compact optoelectronic microwave oscillators using ultra-high Q whispering gallery mode disk-resonators and phase modulation [J]. *Opt Express*, 2010, 18(21): 22358—22363.
- 16 Yuan Libo. Effect of temperature and strain on fiber optic refractive index [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(12): 1713—1717.
苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响 [J]. *光学学报*, 1997, 17(12): 1713—1717.
- 17 D Eliyahu, K Sariri, A Kamran, *et al.*. Improving short and long term frequency stability of the opto-electronic oscillator [C]. *IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition*, 2002. 580—583.
- 18 Afshin S Daryoush. Thermal sensitivity of photonic crystal fibers in opto-electronic oscillators [J]. *The J China Universities of*

全光纤结构 2 kW 准单模光纤激光器

基于大模场(LMA)双包层增益光纤的光纤激光器在数千瓦量级依然可基模输出,或者基模占主导地位(准单模),得到近衍射极限的光束质量($M^2 < 1.5$)。准单模全光纤激光器的输出功率代表着大功率光纤激光器的发展水平。2010年 IPG 公司实现了 10 kW 的单模输出,为目前国际最高水平。2013

年1月,国防科技大学高能激光技术研究所成功实现全光纤结构2 kW准单模连续输出,并于2013年4月11日进行了技术鉴定。激光器采用振荡器结合一级放大器的 MOPA 方案,结构示意图如图1所示。

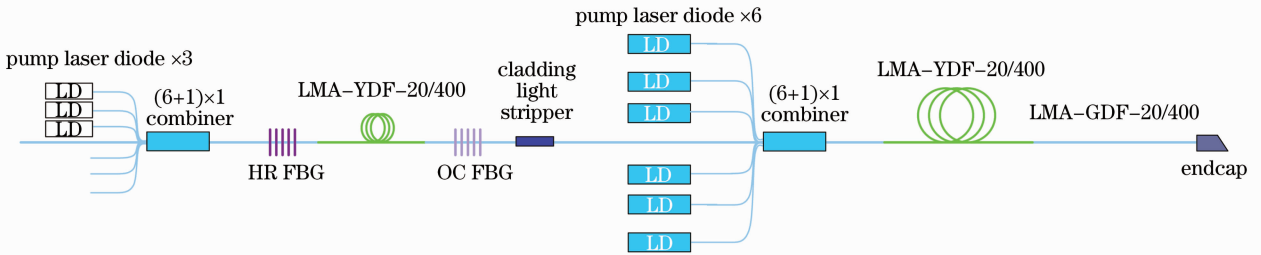


图1 全光纤结构 2 kW 准单模光纤激光器

Fig. 1 Schematic of the all-fiber 2 kW near-single-mode fiber laser

振荡器由 20/400 μm 双包层掺镱光纤(YDF)、3台工作波长为 976 nm 的抽运激光器(LD)及一对中心波长为1080 nm的光纤布拉格光栅(FBG)构成。振荡器的输出功率为 131 W。放大器仍采用 20/400 μm 掺镱双包层光纤作为增益介质,抽运源使用了 6台高功率的抽运激光器,其中两台的最大输出功率为 460 W,其余 4台为 360 W。振荡器的输出激光和抽运激光经过(6+1) \times 1抽运/信号合束器注入到放大器的增益光纤中。在放大器增益光纤的末端熔接了一段传能光纤(GDF),并在其末端制作了端帽(end cap),且进行了切斜角处理。放大器输出功率随抽运功率的变化及最高功率时的输出光谱如图2所示,激光器最高输出功率为 2040 W、中心波长为 1080.1 nm。利用德国 PRIMES 公司的 LQM-HP 型光束质量分析仪,对输出激光的光束质量进行了测量。激光器最高功率时输出激光的光斑形状及 M^2 因子测试结果如图3所示。光束质量为 $M^2 = 1.37$,其中 $M_x^2 = 1.335$, $M_y^2 = 1.314$,激光器实现了准单模输出。激光器的光束质量在功率 100~2040 W 范围内基本保持不变。激光器实现在最高功率水平下连续 100 s 安全、稳定出光,进一步增加抽运功率有望获得更大的输出功率。

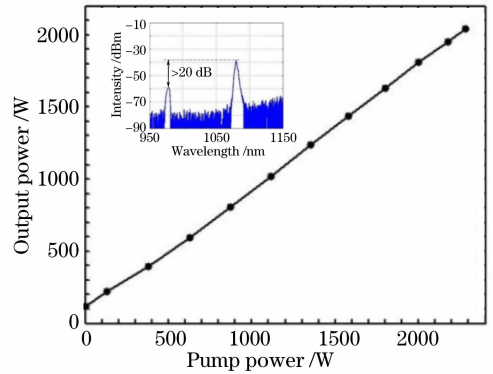


图2 放大器输出功率随抽运功率的变化及最高功率时的输出光谱

Fig. 2 Output power versus pump power in the amplifier stage and the spectrum at the highest output power

致谢: 感谢中国科学院上海光机所何兵副研究员和何晶博士研究生为光束质量测量工作提供的帮助。

刘泽金 冷进勇 郭少锋 王文亮 黄良金
曹润秋 司磊 许晓军 陈金宝

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,
湖南长沙 410073)

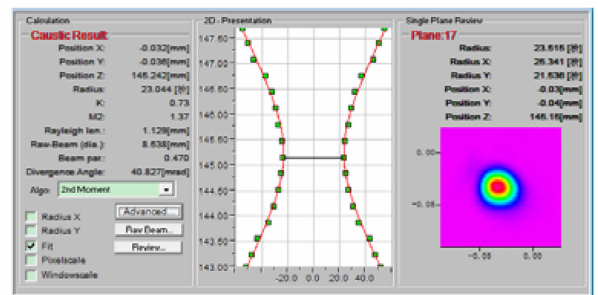


图3 最高功率时光束质量测量结果

Fig. 3 Beam quality measurement results at the highest output power

* E-mail: zejiniu@vip.sina.com, lengjy@sina.com

收稿日期: 2013-05-10; 收到修改稿日期: 2013-07-01