

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0100-04

基于光反馈的双波长光纤环形激光器有源传感

赵毅 王鸣 周俊萍

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

摘要 提出了一种基于光反馈的双波长光纤环形激光器有源传感的模型。通过光纤光栅对激光器的波长进行选择, 输出不同波长的两路光反馈信号, 实现光纤环形激光器的波分复用。根据光纤环形激光器的超越方程, 理论上得出系统的输出变化。系统的输出信号与自混合干涉有着相同的灵敏度, 同时可根据条纹的倾斜情况辨别物体的运动方向。系统中的激光器不仅作为传感光源, 同时也作为传感敏感元件, 实现光纤环形激光器的有源传感。模拟分析了两路不同波长信号之间的变化关系, 考虑外部靶面位移大小对系统输出的影响。实验观测的结果与模拟结果相一致。

关键词 光纤光学; 有源传感; 光反馈; 光纤环形激光器

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0100

Dual-Wavelength Fiber Ring Laser for Active Sensing Based on Optical Feedback

Zhao Yi Wang Ming Zhou Junping

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097, China)

Abstract Dual-wavelength fiber ring laser for active sensing based on optical feedback is presented. The dual wavelengths of the fiber ring laser are selected by two fiber Bragg gratings (FBGs). The output of each channel carries its own signal of optical feedback at each wavelength. Based on the transcendental equation of fiber ring laser, the output power expression of dual-wavelength fiber ring laser with optical feedback is theoretically deduced. The system has the same sensitivity compared with self-mixing interference. The direction of the movement can be distinguished from the inclination of fringe. Laser is not only a light source, but also a sensitive element. The relationship of the two channels is analyzed. The change of the target is also considered. The output is observed in experiment. The experimental results show a good agreement with the simulation ones.

Key words fiber optics; active sensing; optical feedback; fiber ring laser

1 引言

近年来, 有源传感引起了越来越多的关注^[1~3]。在有源传感系统中, 激光器不仅仅作为系统的光源, 同时作为传感敏感元件。这一应用使得传感系统更加简单紧凑, 节省元器件, 降低了系统的成本。基于光反馈的有源传感系统类似于自混合干涉系统^[4~6], 与其有着相同的相位灵敏度, 可实现非接触速度、振动和位移的测量等^[7~9], 能满足传感器的微小化和光纤询问功能的要求, 易于实现新型的光纤传感测量网络。

本文提出了一种基于光反馈的双波长光纤环形激光器有源传感的模型, 系统的输出表达式由光纤

环形激光器的超越方程^[10]推导得出。根据光纤环形激光器的超越方程, 通过两环路内部增益的变化关系, 得到了两路信号的输出, 在数值模拟中进行了分析比较, 并模拟分析了不同参数对系统输出的影响。对搭建的实验系统的输出进行了观测。两路输出信号, 一路增加另一路减小。同时, 改变目标靶的驱动电压, 靶面驱动电压越大, 输出条纹数越多。实验观测与数值模拟的结果相同。

2 理论分析

图 1 为光纤环形激光器双路光反馈的理论模型。980 nm 的抽运光通过波分复用器(WDM)耦合

基金项目: 国家自然科学基金(60578006)和高等学校博士学科点专项科研(20050319007)资助课题。

作者简介: 赵毅(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: yzy1984@163.com

导师简介: 王鸣(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电技术和微纳技术等方面的研究。

E-mail: wangming@njnu.edu.cn (通信联系人)

入环形腔内，环内沿顺时针方向传播的信号光通过

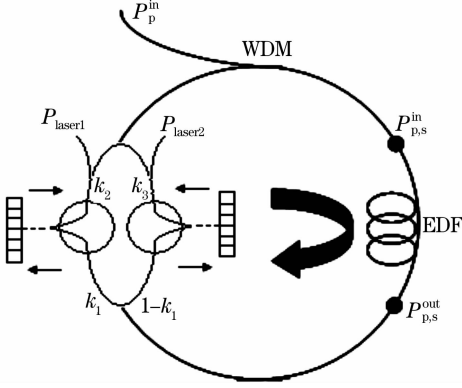


图1 光纤环形激光器双路光反馈模型

Fig.1 Illustration of fiber ring laser with optical feedback

掺铒光纤(EDF)放大,通过分光比为 k_1 的耦合器分为两路,每一环路中再经由耦合器的一端作为系统的输出。环内光反馈通过光环行器实现,每一路的信号光通过各自环路的光环行器出射,经由外部运动目标靶反射或者散射,通过光环行器另一端口反馈回环形腔内。反馈信号携带靶面信息,调制了环形激光器的输出功率,这一系统与激光自混合干涉有着相似之处,都是基于光反馈调制系统输出的原理;区别在于本系统中的传感敏感元件本身构成了环形激光器的一部分,无光反馈时系统无输出,为光纤有源传感系统,不同于激光自混合干涉的腔外传感。

系统中可以将反馈光的影响分别等效为两路光环行器端面反射率的变化

$$r'_{cl/2} = r_{cl/2} + (1 - r_{cl/2}^2) \cdot r_{t1/2} \cdot \exp\left(-j\omega_{1/2} \cdot \frac{2L_{ext1/2}}{c}\right), \quad (1)$$

式中 $1/2$ 表示环路 1 或环路 2。其中 $r_{cl/2}, r_{t1/2}$ 为光环行器和外部目标靶反射率, $\omega_{1/2}$ 为激光器输出频率, $L_{ext1/2}$ 为环行器端面与目标靶之间的距离,即反馈腔长, $r'_{cl/2}$ 为有光反馈时的环行器端面等效反射率。

根据光纤环形激光器的超越方程^[10]

$$P_s^S \cdot \left\{ \alpha_s L - \frac{(\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws} k - 1) P_s^{\text{out}} + \epsilon_2 \eta_{ws} (1 - k) P_{\text{seed}}}{P_s^S} - \ln \left[\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws} k + \frac{\epsilon_2 \eta_{ws} (1 - k) P_{\text{seed}}}{P_s^{\text{out}}} \right] \right\} = \eta_{wp} P_{\text{pump}} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\alpha_p L + \frac{P_s^S}{P_p^S} \cdot \alpha_s L - \frac{P_s^S}{P_p^S} \cdot \ln \left(\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws} k + \frac{\epsilon_2 \eta_{ws} (1 - k) P_{\text{seed}}}{P_s^{\text{out}}} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

考虑系统的注入信号 P_{seed} 近似为零,可以分别推导得出经过 EDF 放大以后的两路光输出信号 P_{s1}^{out} 和 P_{s2}^{out}

$$P_{s1}^{\text{out}} = \frac{1}{\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws1} k_1 k_2 \cdot \eta_{c11} \eta_{c31} |r'_{c1}|^2 - 1} \cdot \left\{ P_{s1}^S \cdot [\alpha_{s1} L - \ln(\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws1} k_1 k_2 \cdot \eta_{c11} \eta_{c31} |r'_{c1}|^2)] - \eta_{wp} P_{\text{pump}} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\alpha_p L + \frac{P_{s1}^S}{P_p^S} \cdot \alpha_{s1} L - \frac{P_{s1}^S}{P_p^S} \cdot \ln(\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws1} k_1 k_2 \cdot \eta_{c11} \eta_{c31} |r'_{c1}|^2) \right] \right\} \right\}, \quad (3)$$

$$P_{s2}^{\text{out}} = \frac{1}{\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws2} (1 - k_1) k_3 \cdot \eta_{c12} \eta_{c32} |r'_{c2}|^2 - 1} \cdot \left\{ P_{s2}^S \cdot [\alpha_{s2} L - \ln(\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws2} (1 - k_1) k_3 \cdot \eta_{c12} \eta_{c32} |r'_{c2}|^2)] - \eta_{wp} P_{\text{pump}} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\alpha_p L + \frac{P_{s2}^S}{P_p^S} \cdot \alpha_{s2} L - \frac{P_{s2}^S}{P_p^S} \cdot \ln(\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws2} (1 - k_1) k_3 \cdot \eta_{c12} \eta_{c32} |r'_{c2}|^2) \right] \right\} \right\}, \quad (4)$$

式中 $P_{s1/2}^S, P_p^S$ 为 EDF 中信号光的及抽运光饱和功率, P_{pump} 为系统的抽运光功率, $\alpha_{s1/2}, \alpha_p$ 为 EDF 的信号光及抽运光小信号吸收因子, L 为 EDF 长度, ϵ_1, ϵ_2 分别为 WDM 到耦合器的等效损耗系数以及耦合器到 WDM 的等效损耗系数, $\eta_{ws1/2}, \eta_{wp}$ 为 WDM 的信号光以及抽运光耦合效率, k_1, k_2, k_3 为耦合器分光比, $\eta_{c11/2}, \eta_{c31/2}$ 为环行器输入输出端的耦合效率。

根据光纤放大器增益 $G = 10 \lg(P_{\text{sout}}/P_{\text{sin}})$,可以得到两个环路的增益变化 Δg

$$\Delta g_1 = 10 \lg \frac{1}{\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws1} k_1 k_2 \cdot \eta_{c11} \eta_{c31} |r'_{c1}|^2}, \quad (5)$$

$$\Delta g_2 = 10 \lg \frac{1}{\epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{ws2} (1 - k_1) k_3 \cdot \eta_{c12} \eta_{c32} |r'_{c2}|^2}, \quad (6)$$

系统中,由于掺铒光纤对不同波长的信道增益不同,因此两环路中不同波长的信号光会产生增益竞争,增益较小的一路信号会受到增益较大的一路信号的调制。若环路 1 的增益较大,则环路 1 的信号光输出对环路 2 的信号光输出有影响。 Δg_2 此时等效为 $-\Delta g_1 \Delta g_2$ 。考虑 Δg 之间的关系,可以得到

$$P_{s1}^{\text{out}} = \frac{1}{\epsilon_a - 1} \cdot \{ P_{s1}^S \cdot [\alpha_{s1} L - \ln \epsilon_a] - \eta_{\text{wp}} P_{\text{pump}} \cdot \{1 - \exp[-\alpha_p L + \frac{P_{s1}^S}{P_p^S} \cdot \alpha_{s1} L - \frac{P_{s1}^S}{P_p^S} \cdot \ln \epsilon_a]\} \}, \quad (7)$$

$$P_{s2}^{\text{out}} = \frac{1}{10^{10 \lg \epsilon_a \lg \epsilon_b} - 1} \cdot \{ P_{s2}^S \cdot [\alpha_{s1/2} L - 10 \cdot \lg \epsilon_a \lg \epsilon_b \cdot \ln 10] - \eta_{\text{wp}} P_{\text{pump}} \cdot \{1 - \exp[-\alpha_p L + \frac{P_{s2}^S}{P_p^S} \cdot \alpha_{s2} L - \frac{P_{s2}^S}{P_p^S} \cdot 10 \cdot \lg \epsilon_a \lg \epsilon_b \cdot \ln 10]\} \}, \quad (8)$$

式中

$$\epsilon_a = \epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{\text{ws1}} k_2 \cdot \eta_{c11} \eta_{c31} |r'_{c1}|^2, \quad (9)$$

$$\epsilon_b = \epsilon_1 \epsilon_2 \eta_{\text{ws2}} (1 - k_1) k_3 \cdot \eta_{c12} \eta_{c32} |r'_{c2}|^2. \quad (10)$$

根据双路光反馈的模型,可以得到系统的两路输出信号

$$P_{\text{laser1}} = \epsilon_1 k_1 (1 - k_2) P_{s1}^{\text{out}}, \quad (11)$$

$$P_{\text{laser2}} = \epsilon_1 (1 - k_1) (1 - k_3) P_{s2}^{\text{out}}. \quad (12)$$

图2显示了两靶面在相同运动的情况下,两路光反馈输出信号随时间变化的关系。反射靶面呈余弦变化, $\lambda/2$ 的位移对应着系统一个输出条纹的变化,输出条纹的不规则处为外部靶面运动的转向时刻。两路输出之间存在竞争,由模拟结果可以看出,环路2的输出 P_{laser1} 呈增长趋势的同时,环路2的输出 P_{laser2} 呈衰减的趋势,两者呈互补关系。

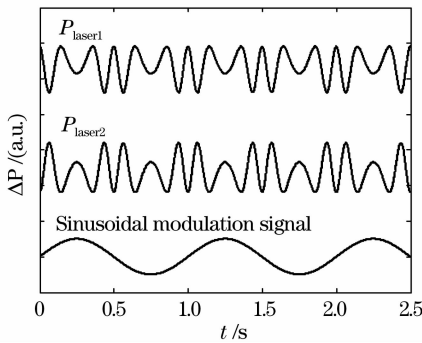


图2 相同靶面运动时系统输出的模拟

Fig. 2 Simulation result of system output with the same targets movement

在数值模拟中,对不同参数的影响进行了讨论。图3中实线表示的是环路1的输出,虚线表示的是环路2的输出。靶面受调制信号的控制,影响激光器的反馈腔长。从波形可以看出,随着调制信号强度的增大,即靶面位移的增加,系统输出条纹数增多。同时 P_{laser1} 输出的增加伴随着 P_{laser2} 输出的减小。

图4是两个靶面在不同运动的情况下,两路输出的模拟。可以看出,在调制信号1的作用下, P_{laser1} 输出了两个条纹;调制信号2的作用下, P_{laser2} 输出了四个条纹。 a 点和 b 点分别表征了靶面1和靶面2的转向时刻。另外从两路信号的关系出发,可以看出 P_{laser2} 除了受自身光反馈作用的影响外,还

受到 P_{laser1} 信号的调制。

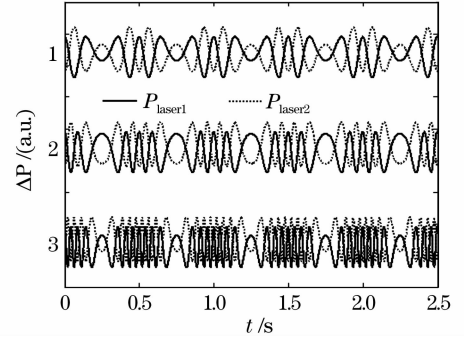


图3 不同调制信号下系统输出的模拟

Fig. 3 Simulation result of system output with different modulation signals

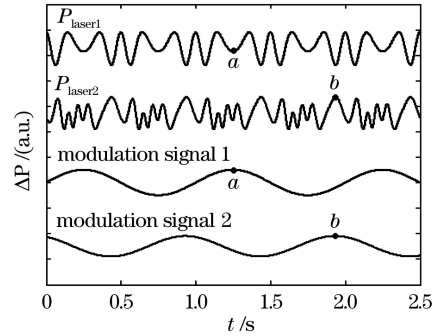


图4 不同靶面运动时系统输出的模拟

Fig. 4 Simulation result of system output with different targets movements

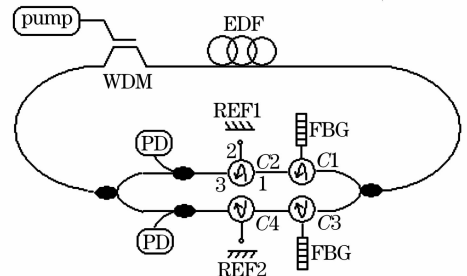


图5 实验系统

Fig. 5 Experimental system

3 实验结果

图5为实验系统光路结构。输出功率为208 mW的980 nm抽运光源通过波分复用器耦合入光纤环

形腔内,通过 50:50 的耦合器分为两路。光路中共有 4 个光环行器 C1~C4,每一环路接有 2 个,其中一个光环行器接光纤光栅用于选择激光器的振荡波长,并确定环形腔内的光沿顺时针循环放大,用于选择波长的两个 FBG 分别为 1560.5 nm 和 1562 nm;另外一个光环行器则接入了光反馈,2 端的输出光经由靶面 REF 反射或者散射后反射回环形腔内。两环路分别通过耦合器,经由 PD 作为系统输出。最后两环路一同耦合入 WDM,构成闭环的光纤环形激光器。

图 6 为两靶面做相同运动时,光反馈情况下系统输出条纹数的变化。实验中给反射靶面分别加以 20 mV,40 mV,60 mV 的驱动电压。由于加在反射靶面的电压与靶面的位移成正比,系统的输出条纹随驱动电压的增大而增多,分别为两个、三个、四个条纹。靶面 $\lambda/2$ 的位移对应一个输出条纹的变化,信号不规则处为靶面运动转向的时刻。靶面运动方向改变,条纹的倾斜方向也随之改变。这一结果与自混合干涉效应相似,具有相同的相位灵敏度,可根据系统输出的条纹倾斜情况辨别物体的运动方向。同时可以观测到两路输出信号之间的变化关系:一路的输出呈增长趋势,另一路则呈衰减的趋势。实验观测的结果与图 2 及图 3 的模拟结果一致。

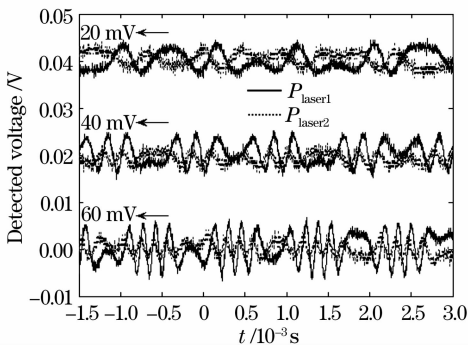


图 6 调整驱动电压时系统输出的实验结果
Fig. 6 Experimental result of system output with different drive voltages

模拟中,还讨论了两环路的两个靶面做不同运动时的情况。实验中,对两个靶面加以频率相同、振幅不同的驱动电压。系统输出两个不同波长的光反馈信号,每一路的输出信号携带本环路靶面物体的运动信息。图 7 为实验输出的结果,两路输出不同条纹数,反映了系统可以同时实现对两路物体运动的探测;两路输出之间此消彼长的关系,反映了两路不同波长的光在系统中相互竞争的情况。实验结果与图 4 的模拟分析结果相吻合。

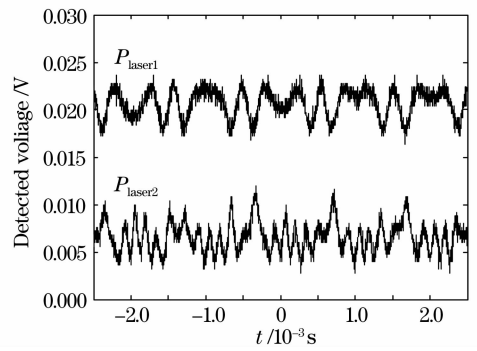


图 7 不同靶面运动时系统输出的实验结果
Fig. 7 Experimental result of system output with different targets movements

4 结 论

理论上分析了基于光反馈的双波长光纤环形激光器有源传感的应用,模拟了不同条件下系统的输出,以及两路信号之间的关系,并且通过实验进行了观测,实验得到的结果与模拟分析的结果相一致。激光器的有源传感输出每个条纹的变化对应待测靶面半个波长的位移,同时可根据条纹倾斜方向辨别运动方向。通过搭建的实验系统,两环路同时输出各自的光反馈信号,通过波分复用实现了对双路运动物体的探测。

参 考 文 献

- 1 Mukai T, Ishikawa M. An active sensing method using estimated errors for multisensor fusion systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, **43**(3): 380~386
- 2 P. C. Beard, T. N. Mills. Miniature optical fibre ultrasonic hydrophone using a Fabry-Perot polymer film interferometer[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(9): 801~803
- 3 H. Sohn, G. Park, J. R. Wait *et al.*. Wavelet-based active sensing for delamination detection in composite structures[J]. *Smart. Mater. Struct.*, 2004, **13**(1): 153~160
- 4 G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati *et al.*. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2002, **4**(6): 283~294
- 5 W. M. Wang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer *et al.*. Self-mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1577~1587
- 6 J. Zhou, M. Wang, D. Han. Experiment observation of self-mixing interference in distributed feedback laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5301~5306
- 7 S. K. Ozdemir, S. Takamiya, S. Ito *et al.*. Self-mixing laser speckle velocimeter for blood flow measurement [J]. *IEEE Trans. Instrum. Measure.*, 2000, **49**(5): 1029~1035
- 8 L. Scalise, Y. Yu, G. Giuliani *et al.*. Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement [J]. *IEEE Trans. Instrum. Measure.*, 2004, **53**(1): 223~232
- 9 S. Donati, G. Giuliani, S. Merlo. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(1): 113~119
- 10 P. D. Dragic. Analytical model for injection-seeded erbium-doped fiber ring lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1629~1631