

线形腔光纤激光器的光反馈效应研究

周俊萍¹ 葛益娴¹ 陈苏婷¹

摘要

提出了一种基于线形腔光纤激光器结构的光学反馈系统,对系统输出功率变化表达式进行了推导,建立模型分析了光反馈对系统的影响,得出其与激光自混合干涉具有相同的相位灵敏度.实验中首先对系统进行了信号观测,同时改变实验条件,对不同参数的影响进行了讨论,实验结果与模拟分析相一致.结果表明:线形腔光纤激光器光反馈系统的输出条纹变化对应着待测物半个波长的位移;条纹不同的倾斜方向可实现对移动方向的辨别;通过适当调节反馈腔腔长与目标靶反射率可优化系统反馈信号的灵敏度.根据以上特性,该系统可应用于光学测量领域,例如位移、距离、速度测量等.

关键词

光纤光学;有源传感;光反馈

中图分类号 TN249;TN201

文献标志码 A

收稿日期 2010-07-09

资助项目 南京信息工程大学科研基金(20080255)

作者简介

周俊萍,女,博士,讲师,主要研究方向为激光传感与应用. jpzhou_irene@163.com

¹ 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京,210044

0 引言

Introduction

线形腔光纤激光器的光反馈效应类似于激光自混合干涉^[1-4],与其有着相同的相位灵敏度,即目标靶半个波长的位移对应系统输出一个条纹的变化.系统可实现非接触速度、振动和位移等的测量^[5-7].不同的是自混合干涉系统是在激光器腔外实现光反馈,而线形腔光纤激光器系统中的光反馈是在激光器腔内完成,此时的激光器不仅作为传感光源,同时可作为传感敏感元件.这一应用使得传感系统更加简单紧凑,可节省元器件,降低系统成本,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.

本文根据光纤激光器的放大方程对线形腔光纤激光器光反馈效应系统的输出变化进行了推导,并对系统建立模型进行了数值模拟.在实验验证中得出与数值模拟相一致的结论,并对不同参数的影响进行了讨论.

1 理论分析

Theoretical analysis

线形腔光纤激光器本身由 980 nm 泵浦光源、980 nm/1 550 nm 波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)、掺铒光纤(Er-doped Fiber, EDF)以及两个中心波长为 1 550 nm 的光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)构成,如图 1 所示.泵浦光源功率用 P_p^{in} 表示;两光纤光栅反射率分别用 R_1 和 R_2 表示;光纤光栅与掺铒光纤的连接等带来的衰减因子分别用 ε_1 和 ε_2 表示; $P_s^{\text{in}1}$ 、 $P_s^{\text{out}1}$ 分别表示前向输入和输出掺铒光纤的信号光功率; $P_s^{\text{in}2}$ 和 $P_s^{\text{out}2}$ 分别表示后向输入和输出掺铒光纤的信号光功率; k 为耦合器分光比; r_f 为光纤端面反射率; r_t 为目标靶反射率;激光器输出光功率为 P_{Laser} .图 1 中虚线框内表示引入反馈后的结构, ε_{21} 和 ε_{21} 表示在系统接入反馈处的连接衰减因子.

未接入光反馈部分时,根据速率方程^[8]推导可得系统输出信号在掺铒光纤中循环一周期的输出功率:

$$P_s^{\text{out}1} = \frac{1}{T_{\text{eff}}} \cdot \langle P_p^{\text{in}} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{P_s^{\text{S}}}{P_p^{\text{S}}} (\alpha_s L - \ln(\varepsilon_1 \varepsilon_2 \sqrt{R_1 R_2})) - \alpha_p L \right] \right\} - P_s^{\text{S}} \cdot [\alpha_s L - \ln(\varepsilon_1 \varepsilon_2 \sqrt{R_1 R_2})] \rangle. \quad (1)$$

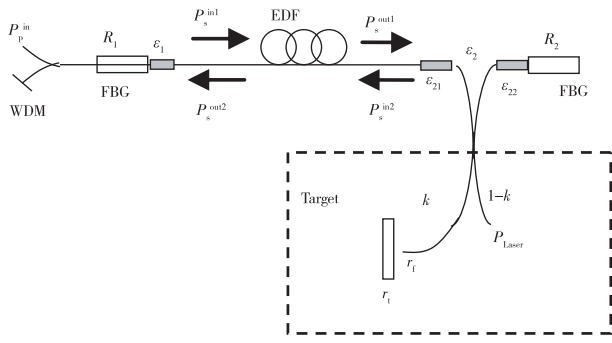


图1 线性腔光纤激光器光反馈原理示意

Fig. 1 Optical feedback system based on fiber linear laser

式中： α_s 、 α_p 为掺铒光纤的信号光及泵浦光小信号吸收因子； P_s^S 、 P_p^S 为掺铒光纤信号光及泵浦光饱和功率； L 为掺铒光纤长度； T_{eff} 为

$$T_{\text{eff}} = (1 - \varepsilon_2^2 R_2) + (1 - \varepsilon_1^2 R_1) \varepsilon_2^2 R_2 \exp\left(-\alpha_s L + \frac{P_s^{\text{abs}}}{P_s^S} + \frac{P_p^{\text{abs}}}{P_p^S}\right), \quad (2)$$

其中， P_p^{abs} 、 P_s^{abs} 分别为泵浦光及信号光在掺铒光纤两侧的透射量差值。

光反馈模型是在激光器线形腔内引入了光反馈部分，光反馈部分通过光耦合器实现。信号光经由掺铒光纤放大后，在作为右端谐振镜的光纤光栅反射之前，由光耦合器一端出射，经由外部运动目标靶反射或散射，通过光耦合器反馈回线形腔内，即光反馈部分在光纤激光器线形腔内部完成。反馈光携带靶面信息，调制了掺铒光纤对信号光的放大，从而引起激光器输出变化。这一系统与激光自混合干涉有着相似之处，即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光纤激光器的一部分。

为得到引入反馈后的激光器输出 P_{Laser} 的变化，可将光反馈部分的影响叠加为光纤光栅与掺铒光纤连接等带来的衰减因子 ε_2 的变化^[9]，用 ε_2' 表示：

$$\varepsilon_2' = \left\{ \varepsilon_{21}^2 k^2 \left[|r_t + \eta(1 - r_t^2)r_t e^{-i\omega\tau}| \cdot \frac{L_{\text{ext}0}}{L_{\text{ext}}} \right]^2 / R_2 + \varepsilon_{21}^2 \varepsilon_{22}^2 k^2 (1 - k)^2 \left[|r_t + \eta(1 - r_t^2)r_t e^{-i\omega\tau}| \cdot \frac{L_{\text{ext}0}}{L_{\text{ext}}} \right]^4 \right\}^{0.5}. \quad (3)$$

式中： η 为光纤端面的信号耦合效率； $\tau = 2L_{\text{ext}}/c$ 为光纤端面与目标靶之间的时间延迟； c 为真空中光速； L_{ext} 表示耦合器距反射面的距离； $L_{\text{ext}0}$ 表示初始耦合器与反射面之间距离。

将式(3)带入表达式(1)中，可得线形腔光纤激

光器光反馈系统信号输出功率为

$$P_{\text{Laser}} = \frac{(1 - k) \varepsilon_{21}}{T_{\text{eff}}}. \quad (4)$$

$$\langle P_p^{\text{in}} \cdot \left\{ 1 - \exp\left[\frac{P_s^S}{P_p^S} \cdot [\alpha_s L - \ln(\varepsilon_1 \varepsilon_2' \sqrt{R_1 R_2})] - \alpha_p L\right] \right\} - P_s^S \cdot [\alpha_s L - \ln(\varepsilon_1 \varepsilon_2' \sqrt{R_1 R_2})] \rangle.$$

2 数值模拟

Numerical simulation

建立线形腔光纤激光器光反馈系统的模型，进行数值模拟，参数取值如下： $R_1 = 0.95$ ， $R_2 = 0.85$ ， $\varepsilon_1 = 0.9$ ， $\varepsilon_{21} = 0.9$ ， $\varepsilon_{22} = 0.9$ ， $\alpha_s = 0.611$ ， $\alpha_p = 0.42$ ， $L_{\text{ext}0} = 0.1 \text{ mm}$ ， $P_p^S = 0.42 \text{ mW}$ ， $P_s^S = 0.103 \text{ mW}$ ， $P_p^{\text{in}} = 200 \text{ mW}$ ， $k = 0.5$ ， $r_t = 0.04$ ， $\lambda = 1.55 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。

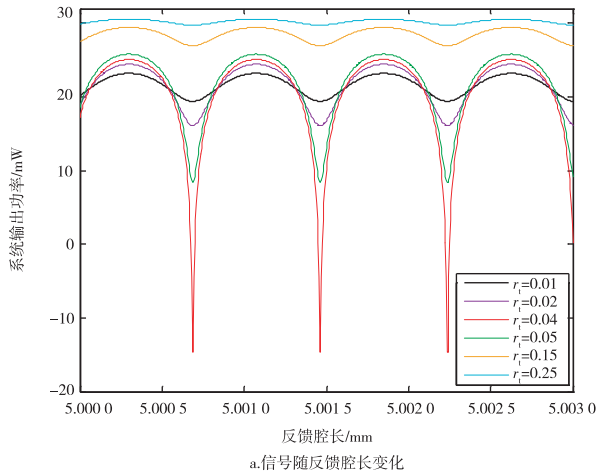
图2为线形腔光纤激光器光反馈系统的模拟结果，取“交流”变化量进行分析。图2a为对应反馈腔相位变化的系统输出功率。系统输出信号随外腔长度变化呈类余弦信号，一个条纹变化对应着外腔反馈目标靶位移 $\lambda/2$ 。系统输出峰峰值在 $r_t = 0.02 \sim 0.04$ 间逐渐增大。当目标靶反射率等于光纤端面反射率即 $r_t = 0.04$ 时，峰峰值出现了一个极大值，且信号尖端为负；当目标靶反射率越接近光纤端面反射率时，其尖端越明显；当 $r_t > 0.04$ 的情况时系统输出峰峰值逐渐减小。图2b为根据实验数据分析得到的目标靶反射率变化的系统输出功率，实线为系统输出峰峰值，虚线对应系统输出平均功率，更加直观地表现系统输出与反馈端面反射率之间的关系。同样，系统输出峰峰值与平均功率在 $r_t = 0.04$ 时分别出现了极大值和极小值；当 r_t 大于 r_t 反射率，系统输出的峰峰值随 r_t 的增大而减小，而系统输出的平均功率随其增大而增大。

图3为光反馈系统对应不同初始外腔长度的模拟结果。图3a为对应反馈腔相位变化的系统输出功率，可以看出系统输出峰峰值变化随初始外腔长度 $L_{\text{ext}0}$ 的增大而逐渐增大，并存在一定相位差关系，相位差值与初始腔长之差有关。图3b为初始外腔长度变化的系统输出功率峰峰值，同样随初始外腔长度的增大而增大，与图3a相吻合。

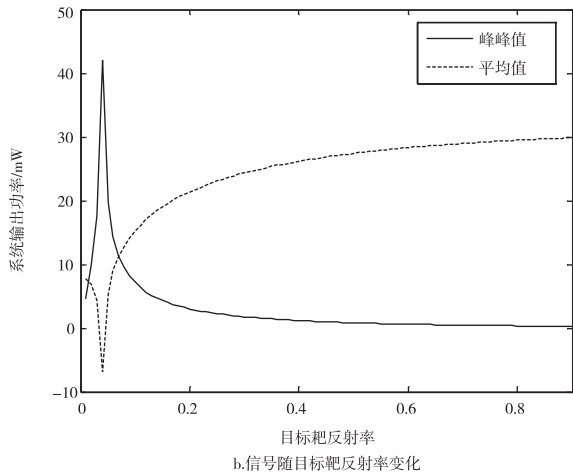
3 实验观测

Experimental Observation

在实验系统中，光反馈由粘附在压电晶体(PZT)上的一反射器获得。压电晶体由余弦信号驱



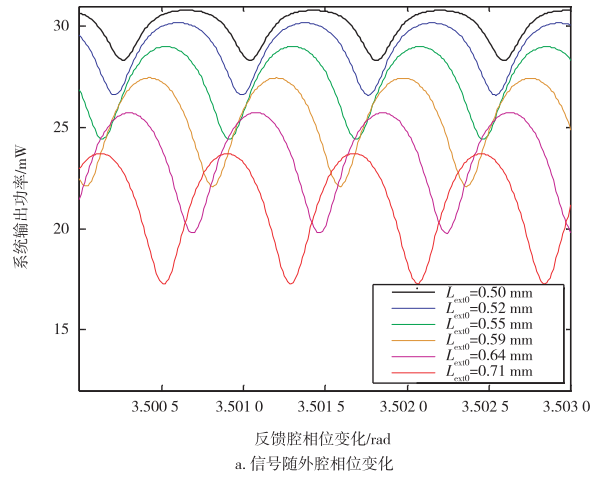
a. 信号随反馈腔长变化



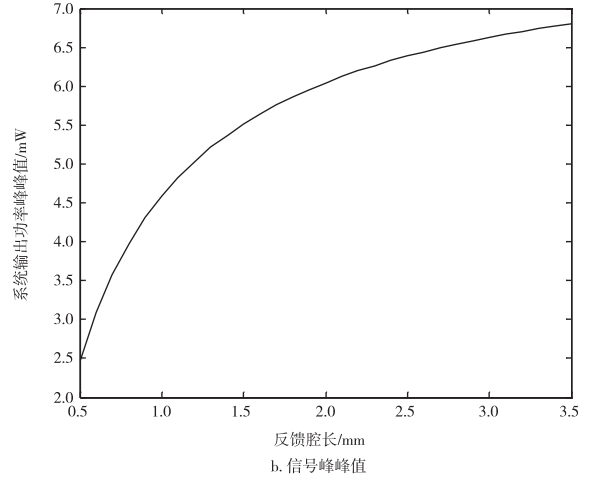
b. 信号随目标靶反射率变化

图2 光反馈模拟结果

Fig.2 Simulation results of the system output signal changes



a. 信号随外腔相位变化



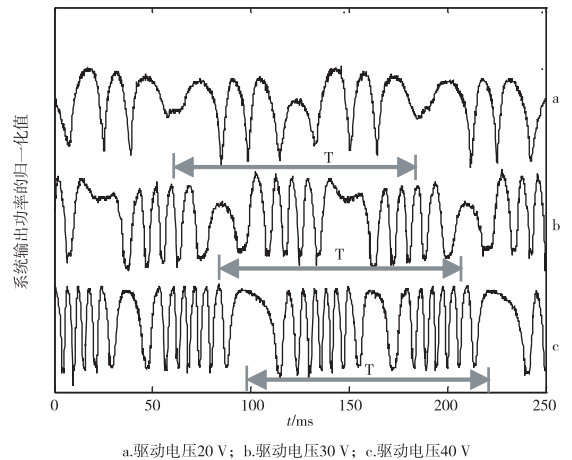
b. 信号峰峰值

图3 光反馈系统对应不同初始外腔长度模拟结果

Fig.3 Simulation result of the system output signal the variation of initial external cavity length

动. 实验结果如图4, 轨迹 a、b、c 为腔内光反馈条件下系统输出, 驱动电压分别对应为 20, 30, 40 V. 加载在 PZT 上的电压与 PZT 的端面位移成正比, 即与粘附在 PZT 上的待测靶面位移成正比. 系统输出类余弦条纹随电压的增大而增多, 对应靶面 $\lambda/2$ 的位移有一个条纹输出的变化. 系统输出峰峰值均为 980 mV, 半个周期内分别为 2、4、6 个条纹, 分别对应位移约为 1.55, 3.10, 4.65 μm , 即实验中 PZT 驱动电压对应振动振幅. 由图4 可看出条纹有一定程度的倾斜, 并且其方向与目标靶运动方向相对应. 结合条纹数对应位移量, 条纹倾斜对应运动方向, 可用于物体微位移的测量.

图4 中信号不规则处为靶面运动转向时刻, 对应靶面运动方向改变, 可见每3个条纹变形对应着待测物振动的一个周期变化, 求其时间间隔即可测振动频率; 而半个周期内的条纹数即对应振动振幅, 由此可进行振动测量的应用. 图4 结果显示3组振



a. 驱动电压20 V; b. 驱动电压30 V; c. 驱动电压40 V

图4 调制驱动电压以及环内光反馈的实验结果

Fig.4 Experiment result of the optical feedback signal under different driving voltages

动频率相同, 振幅依次增大.

图5为对应不同目标靶反射率 r_t 系统输出的变化,轨迹a、b、c对应反射率逐渐减小.由图5可知,系统输出随目标靶反射率的减小而降低,分别为9.03, 8.58, -2.4 mV,条纹峰峰值则随之加深分别为144, 392, 1.30 mV,因此协调峰峰值及系统输出平均值大小可优化系统反馈信号.当标靶反射率进一步减小时,条纹出现尖峰,系统输出迅速减小,说明此时标靶反射率接近光纤端面反射率,引起条纹深度及输出陡峭变化,即对应模拟结果图2中的尖峰现象.在自混合干涉系统中并没有发现类似的情况,自混合干涉中系统输出平均值及其峰峰值均随着反射率的降低而减小^[10-11],这一点揭示了光纤激光器光反馈效应与激光自混合干涉的区别.

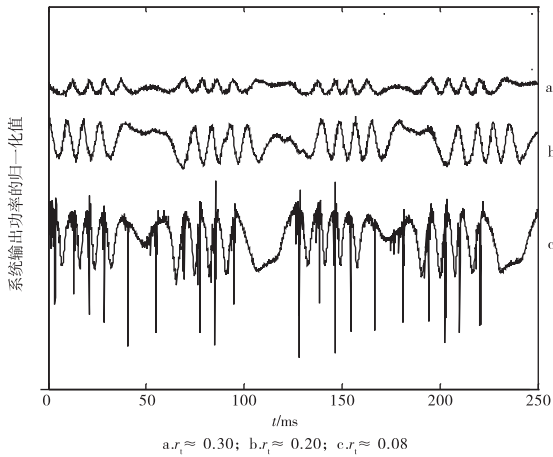


图5 实验结果:信号随目标靶反射率降低变化
Fig. 5 Output signal changes with the variation of target reflectivity

图6为对应不同反馈腔腔长 L_{ext0} 系统输出的变化,轨迹a、b、c分别表示增大 L_{ext0} 对应系统的不同输出.随着 L_{ext0} 的增大,条纹有所加深,峰峰值为240, 416, 584 mV;但系统输出平均值有所减小,分别为4.08, 3.96, 3.90 mV,与模拟结果图3相吻合.可通过协调峰峰值及系统输出平均值大小优化系统反馈信号.利用峰峰值及输出平均值对应反馈腔长度可进行目标靶绝对距离的测量应用.

4 结论

Conclusion

光纤激光器的光反馈干涉效应类似于自混合干涉系统,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.由于光纤激光器其自身易于集成微小化,单模工作稳定,传输方便,易于形成新

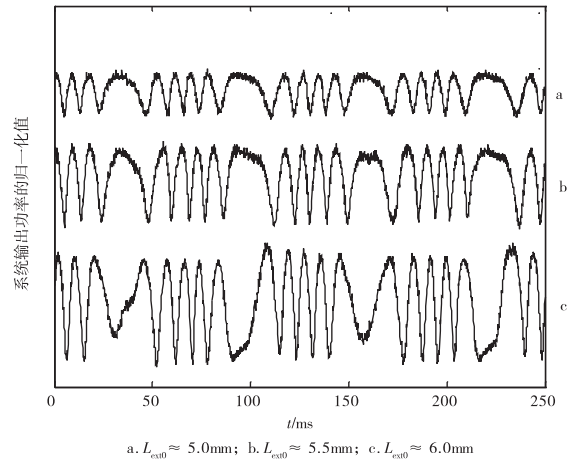


图6 实验结果:信号随外腔长变化

Fig. 6 Output signal changes with the variation of initial external cavity length

型光传感网络,能满足传感器的微型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.对光纤激光器反馈干涉系统的研究为基于光反馈有源传感网络的建立提供了理论基础和实验依据.

参考文献

References

- [1] Shimizu E T. Directional discrimination in the self-mixing type laser Doppler velocimeter[J]. Applied Optics, 1987, 26(21): 4541-4544
- [2] Wang W M, Boyle W J, Grattan K T, et al. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis [J]. Applied Optics, 1993, 32(9): 1551-1558
- [3] Giuliani G, Norgia M. Laser diode linewidth measurement by means of self-mixing interferometry[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(8): 1028-1030
- [4] 裴世鑫, 崔芬萍, 宋标, 等. 基于腔增强吸收光谱技术的气体探测研究[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2009, 1(3): 193-198.
PEI Shixin, CUI Fenping, SONG Biao, et al. The study of gas detection based on the cavity enhanced absorption spectroscopy technology[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 1(3): 193-198
- [5] Koelink M H, Slot M, de Mul F F M, et al. In-vivo blood flow velocity measurements using the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser[C] // Proceedings of Soc Photo-Opt Instrum Eng, 1991, 1511: 120-128
- [6] Bavogui J, Niwayama M, Shinohara S. A numerical investigation into the influence of Langevin noise on vibration measurement using self-mixing laser diode[C] // Proceedings of International Joint Conference on SICE-ICASE, 2006: 1664-1667
- [7] Smith J A, Rathe U W, Burger C P. Lasers with optical feedback as displacement sensors[J]. Optical Engineering, 1995, 34(9): 2802-2810
- [8] Barnard C, Myslinski P, Chrostowski J, et al. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(8): 1817-1830

- [9] Zhao Y, Wang M, Zhou J P, et al. Self-mixing interference in fiber ring laser with parallel dual-channel[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(13): 863-865
- [10] Zhou J P, Wang M, Han D F. Optical feedback effect in DFB lasers for remote reflectivity detecting[J]. Optics Express, 2007, 15(19): 12183-12188
- [11] Giuliani G, Norgia M, Donati S, et al. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, 4(6): 283-294

The optical feedback effect on the fiber linear laser

ZHOU Junping¹ GE Yixian¹ CHEN Suting¹

1 School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract In this paper, an optical feedback system based on fiber linear lasers is presented. The effects of optical feedback could be equivalent to the variation of laser cavity loss, and the output expression of the optical feedback system is deduced. A model is built to analyze the feedback influence on the system. The internal optical feedback effect on fiber linear lasers is similar to self-mixing interference, and the former has same phase sensitivity with the later. The influence from different parameters is analyzed in simulation. The system output is detected in experiment, and the influence of different parameters is also discussed by changing the experimental conditions. The experimental results show a good agreement with the simulated results. The conclusion can be summarized as follows: One fringe shifting of the system output corresponds to a target displacement of $\lambda/2$; the different inclination refers to different movement direction; the better sensitivity of optical feedback system can be obtained by choosing appropriate feedback cavity length and target reflectivity. Consequently, this system can be applied to optical survey, such as displacement, distance, velocity measurement, etc.

Key words fiber optics; active sensing; optical feedback