

激光回馈传感应用研究进展

傅杨颖 肖光宗* 张斌

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 介绍了激光回馈的概念及其两种主要的理论研究模型:三镜腔模型和注入锁定模型。激光回馈干涉仪相位灵敏度与传统双光束干涉仪相当,且具有结构简单、紧凑、易准直、对激光器无特殊要求等突出优势。重点介绍了激光回馈干涉仪在位移、速度等参量测量及生物传感领域的发展应用。当被测表面为漫反射表面时,散斑的存在将导致自混合信号的振幅衰减,并引入随机相位误差。总结了自混合干涉系统中的散斑效应及改良技术手段,介绍了散斑效应在传感测量领域的发展应用。

关键词 测量;传感测量;激光回馈;自混合干涉;位移测量;速度测量;散斑效应

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.060001

Study of Optical Feedback and Its Application Progress

Fu Yangying Xiao Guangzong Zhang Bin

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The concept of optical feedback and a theoretical analysis of two models are introduced, including Fabry-Perot cavity and the injection model. Compared with traditional two-beams interferometer, self-mixing interferometer not only has similar phase sensitivity, but also has inherent simplicity, compactness and robustness, as well as the self-aligning capability. Applications in interferometry are presented, such as displacement sensor, velocimeter sensor, as well as biomedical sensor. Speckle effect occurs when a coherent light is back-reflected from a rough surface, the self-mixing signal can be affected. The amplitude fading as well as the speckle phase error of the self-mixing signal due to the speckle effect are analyzed. The methods to alleviate the amplitude fading of the self-mixing signal are reviewed, yet the applications of speckle self-mixing interferometer are summarized.

Key words measurement; sensing measurement; laser feedback; self-mixing interference; displacement measurement; velocity measurement; speckle effect

OCIS codes 140.3410; 120.2230; 130.6010; 120.6165

1 引言

激光回馈,是指激光器输出光部分被物体反射或散射后进入激光器内与腔内光场发生相互作用,引起激光器输出光强、频率等发生变化的现象。光回馈因影响激光器及应用系统稳定性而一度成为被消除的对象,通常在激光器输出端紧接隔离器以消除光回馈对激光器的影响。

1963年,King等^[1]首次报道了外部光学回馈将引起气体激光器输出光强的变化,报道指出外部腔镜的移动对激光器输出光强的调制作用与传统光学干涉仪类似,外腔镜每移动 $\lambda/2$,激光器输出光强波形移动一个条纹,且光强调制深度与传统光学干涉仪相当。该发现得到广大学者的普遍关注,对光回馈效应的研究自此从“消除”走向“利用”。

激光技术的迅猛发展有效推动了光回馈效应的研究,基于激光回馈效应的自回馈干涉仪可实现对位移^[2-4]、速度^[5-6]、距离^[7]、振动^[8-9]、表面形貌^[10]等参量的测量,其相位灵敏度与传统双光束干涉仪相当。激光回馈

收稿日期: 2014-12-17; 收到修改稿日期: 2015-01-07; 网络出版日期: 2015-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61308058)

作者简介: 傅杨颖(1991—),女,硕士研究生,主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: fuyangying09@126.com

导师简介: 张斌(1970—),男,教授,主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: kd208zb@sina.com

*通信联系人。E-mail: xiaoguangzong@163.com

测量系统较之传统干涉仪,还具有结构简单、紧凑、易准直、成本低,对激光器无特殊要求等独特优势,激光回馈效应及其应用成为国内外学者研究的热点内容。

在激光回馈效应理论研究方面,已经建立并发展了法布里-珀罗(F-P)腔模型、注入锁定模型等常用的模型,但仍不够完善^[2,11]。在激光回馈应用研究方面,多集中在位移、速度测量等领域,对激光回馈效应在生物医疗传感领域^[12-14]的研究相对薄弱。同时,已有的大量激光回馈研究中未考虑系统中激光散斑对测量的影响,散斑效应影响激光回馈信号振幅及形状^[15-16],导致测量误差甚至错误。近年来,对激光回馈系统中散斑效应研究逐渐增多,出现了多种克服散斑误差的技术手段^[17-19]。

本文首先介绍激光回馈效应的两种理论研究模型,再全面介绍激光回馈效应在位移、速度、距离、振动、表面形貌、角度测量及生物医疗领域的发展与应用。最后针对激光回馈系统中的散斑问题,总结了激光回馈干涉系统中的散斑误差,克服散斑效应的技术方案,以及散斑激光回馈干涉仪在传感领域的应用研究现状。

2 激光回馈理论研究

为解释激光回馈干涉中出现的各种现象,人们建立了激光回馈效应的理论研究模型,常用的理论研究模型主要有两种:F-P腔模型(三镜腔模型)、注入锁定模型。

2.1 F-P腔模型

1988年,Groot等^[2]提出了基于三镜F-P腔的结构模型用于解释激光回馈测速仪和位移测量仪中信号的产生。三镜F-P腔模型基本结构如图1所示,激光器谐振腔作为内腔,激光器主输出端 F_2 与反射体 F_3 构成系统外腔, r_1, r_2, r_3 分别表示 F_1, F_2, F_3 3个腔镜面的振幅反射系数,内腔长度为 d ,折射率为 n ,外腔长度为 L , F_1 为激光器尾光输出端。三腔镜模型可成功解释激光回馈条纹中出现的类锯齿波现象。

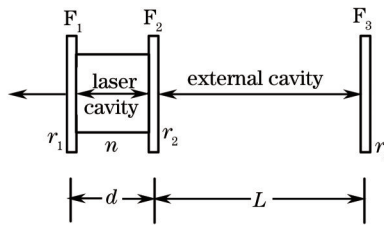


图1 激光回馈效应的三镜F-P腔模型结构图

Fig.1 Scheme of the optical feedback interferometer in Fabry-Perot cavity model

激光器输出光部分经物体反射或散射后返回激光器内,反馈光改变了激光器谐振条件。通过建立新的谐振方程,可得到光回馈条件下系统输出光强表达式。

通常情况下, r_3 远小于 r_2 ,故可不考虑激光在外腔镜的多次反射。假设腔内激光初始电矢量为 $E_0(t)$,经历一个往返后电矢量变为 $E(t)$,表示为

$$E(t) = r_1 r_2 \exp\left[-j4\pi v \frac{nd}{c} + (g - \gamma)d\right] E_0(t) + r_2 (1 - R_2) r_3 \exp\left[-j4\pi v \frac{nd + L}{c} + (g - \gamma)d\right] E_0(t), \quad (1)$$

式中 g 为存在光回馈时系统线性增益系数, γ 为损耗系数, c 为光在真空中传播速度, v 为光回馈情况下激光的频率,其中 $R_2 = |r_2|^2$ 。

系统达到稳定时,增益与损耗平衡,初始电矢量与往返一周后电矢量相等,即 $E_0(t) = E(t)$,则有:

$$r_1 \left[r_2 + (1 - R_2) r_2 \exp\left(-j4\pi v \frac{nd}{c}\right) \right] \cdot \exp\left[-j4\pi v \frac{nd}{c} + (g - \gamma)d\right] = 1, \quad (2)$$

由(2)式得到系统增益增量和回馈引起的附加相位:

$$\Delta g = g - g_0 = -\frac{\xi}{d} \cos \phi_{\text{ext}}, \quad (3)$$

$$\phi_a(v) = \xi \sin \phi_{\text{ext}}, \quad (4)$$

式中 ξ 为光从外腔反馈到激光器内腔的耦合系数, ϕ_{ext} 为回馈引起的附加相位。(3)和(4)式常用于描述光回馈情况下激光器的基本特征。为表征系统激光回馈强度,定义回馈系数 C , $C = \frac{\tau_L}{\tau_d} \xi \sqrt{1 + \alpha^2}$,其中 α 为线宽

增长因子, $\tau_L = 2L/c$ 为反馈光在外腔的时延, $\tau_d = 2d/c$ 为光在内腔的时延。

进一步得到系统光谱展宽 δv 和激光器输出光强 I :

$$\delta v = \frac{\delta v_0}{\left[1 + C \cos(2\pi v \tau_L + \arctan \alpha)\right]^2}, \quad (5)$$

$$I = I_0 \left[1 + m \cos\left(2\pi v \frac{2L}{c}\right)\right], \quad (6)$$

式中 δv_0 为无光回馈情况下的线宽, I_0 为无光回馈情况下的激光功率, m 为调制系数。

2.2 注入锁定模型

通过求解 Lang 等^[11]建立的速率方程的稳态解(未考虑系统的非线性增益、激光器自发辐射、外腔的多次反射),得到激光回馈系统频率及光强表达式。

$$\frac{d}{dt} E_0(t) = \frac{1}{2} \left\{ G_N [N(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right\} E_0(t) + \frac{\kappa}{\tau_L} E_0(t - \tau) \times \cos[\omega_0 \tau + \phi(t) - \phi(t - \tau)], \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \phi(t) = \frac{1}{2} \alpha G_N [N(t) - N_T] - \frac{\kappa}{\tau_L} \frac{E_0(t - \tau)}{E_0(t)} \sin[\omega_0 \tau + \phi(t) - \phi(t - \tau)], \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} N(t) = R_p - \frac{N(t)}{\tau_s} - G_N [N(t) - N_0] E_0^2(t), \quad (9)$$

式中 $E_0(t)$ 为激光器电场强度, ω_0 为系统角频率, G_N 为模式增益系数, $N(t)$ 为增益介质区的平均载流子浓度, N_T 为载流子浓度阈值, τ_p 为内腔往返一周时间, τ_L 为外腔往返一周时间, τ 为载流子寿命, R_p 为电泵浦抽运因子, α 为谱线线宽展宽因子, κ 为光反馈因子, τ_s 为载流子寿命, $\phi(t), \phi(t - \tau)$ 分别表示时刻 $t, t - \tau$ 对应的回馈相位。

系统达到稳态时,初始电场矢量 $E_0(t)$ 与末态电场矢量 E_F 相等,载流子数量 $N(t), N_F$ 亦相等,即 $E_0(t) = E_F = \text{const}$, $N(t) = N_F = \text{const}$, 则有 $\frac{d}{dt} E_0(t) = 0$, $\frac{d}{dt} N(t) = 0$, 式中 const 为常量。

系统输出功率变化量为 ΔP :

$$\Delta P \propto E_F^2 - E_{NF}^2 = \tau_p (R_p - N_0 / \tau_s) \frac{2\kappa \tau_p}{\tau_L} \cos \omega_F \tau, \quad (10)$$

式中 ω_F 为光回馈系统中谐振频率, $E_{NF}^2 = \tau_p [R_p - (N_T / \tau_s)]$ 为无光回馈情况下激光器输出功率。

Spencer 和 Lamb 推动了注入锁定模型的发展,证明了注入还将引起系统输出频率的调制以及双稳态的出现^[20]。

F-P 腔模型形象直观、便于理解,从三腔镜的角度对激光回馈系统展开研究,采用等效模型法,将组成激光回馈系统外腔的两腔镜等效为一面反射腔镜,根据激光器稳态激发条件建立方程求解系统中光场,F-P 腔模型可成功解释激光回馈条纹中出现的类锯齿波现象。较之 F-P 腔模型,注入锁定模型相对复杂,注入锁定模型将激光的回馈视为一个注入锁定过程,目标的运动引起激光振幅和相位变化,目标运动信息通过速率方程体现,通过求解速率方程的稳态解得到系统中光场。注入锁定模型更加详细全面,可成功解释激光回馈系统中出现的多稳态、迟滞、跳模等现象,但实验研究表明,注入锁定模型不适用于强光回馈的情形。两种模型实质是等效的,F-P 腔模型着重于物理机制上对激光回馈系统的直观理解和掌握,注入锁定模型则更加强理论分析的完整性和严谨性。

3 激光回馈效应在测量领域应用

激光回馈干涉仪自问世以来,受到国内外学者的普遍关注,大量光回馈应用研究被开展。目前,已成功实现了基于半导体激光器、微片激光器、普通 He-Ne 激光器光回馈效应的位移、速度等参量的测量。清华大学张书练教授等^[21]对激光回馈干涉仪在对位移、速度、振动、距离、表面形貌测量等应用方面做了综述,近年来,激光回馈干涉仪开始在生物传感测量及医疗领域崭露头角,具有现有医疗仪器不可替代的独特优势,成为广大学者争先研究的内容。下面将系统总结激光回馈干涉仪在测量领域的应用,其中将重点介绍在生物传感测量方面的应用。

3.1 位移测量

位移测量一直是传感测量领域的重点研究内容,工件厚度变化、机械梁的偏折等均可转换为对位移进行测量。高精度、高分辨率、大测量范围的微位移传感技术一直是国内外位移测量研究的重点。

1963年 King 等^[1]首次发现可移动的外部反射镜能引起激光强度的周期性波动,类似于传统双光束干涉现象。1964年, Cluniep 等^[2]首次研究了用 He-Ne 激光器构成的激光回馈系统在长度测量中的可能性,其长度测量范围可达 0~50cm,测量分辨率为 $\lambda/2$ 。激光回馈位移测量的关键是从系统输出光强变化中提取出位移信息,光回馈位移测量方法^[3]主要包括条纹计数法、模跳测量法、合成波长测量法、拍频测量法、光回馈水平差异测量法、分区细分法等。

进入 20 世纪 80 年代后,激光回馈效应的研究集中在半导体激光器上,但是对物体位移方向的判别这一难题阻碍了激光回馈位移测量技术的发展。1994年, Wang 等^[23]发现在中等回馈水平下,半导体激光器激光回馈系统输出光强信号为非对称的类锯齿波形状,且波形的倾斜方向与物体的位移方向有关,基于该现象可实现位移的矢量测量。另一方面,为提高激光回馈干涉系统测量分辨率,通常利用电路实现光回馈条纹细分,然而细分电路系统复杂、成本高,故另辟蹊径实现高分辨率位移测量则十分必要。

2008年,清华大学张书练等^[24]利用 He-Ne 激光器与高反射率的倾斜回馈镜组成的非准直外腔激光回馈系统,对激光输出强度与偏振态变化进行了研究。研究表明,系统中偏振跳变是由于回馈镜运动方向的改变所致,且回馈镜移动方向对激光偏振态的控制不受回馈镜准直状态的影响,只与回馈镜的反射率有关。利用该现象,搭建了具有纳米量级分辨率的激光回馈干涉仪^[29],实现了反射物体运动方向对激光偏振态的控制。较之常规的半波长的分辨率,系统干涉条纹的密度提高了 40 倍,对波长为 632.8nm 的 He-Ne 激光器,其分辨率达到 7.91nm,且还有进一步提高的潜力。

非准直外腔激光回馈系统摆脱了常规激光回馈高精度位移测量方法的束缚,对大幅度提高激光回馈传感系统的分辨率并进行方向识别具有重要意义,使直接、简单并具有判向能力的纳米级位移测量成为可能,而无需传统干涉相位细分等复杂的激光与电子系统,在传感测量领域具有广泛的应用前景。

3.2 速度测量

多普勒测速技术已广泛应用于航空、航天、机械、化工等领域,1968年 Rudd 等^[5]首次提出了利用 He-Ne 激光器中的激光回馈效应进行多普勒测速的相关研究,实现了对运动目标多普勒速度的测量。1987年, Shimizu 等^[25]发现,外腔镜向不同方向运动时,激光强度输出波形倾斜方向发生变化^[31]。1989年, Shinohara 等^[26]基于上述特性利用半导体激光器光回馈效应实现了物体的多普勒速度测量,其速度测量范围可覆盖 23 mm/s 到 23 m/s,且具有方向识别功能。2005年,清华大学张书练等^[27]提出了一种正交偏振双频激光器光回馈多普勒测速系统,最大响应频率为 12.2 MHz 时,其最大可测速度达到 3.86 m/s;改用半导体激光器或微片激光器,系统最大测速可提高 1~2 个量级。

激光回馈多普勒测速系统的基本依据是多普勒频移定律,清华大学张书练课题组提出的正交偏振双频激光器光回馈多普勒测速系统^[27]结构如图中所示。

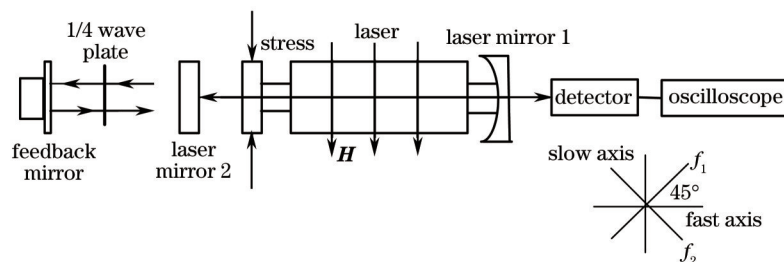


图2 基于正交双频激光器的激光回馈多普勒测速原理图

Fig.2 Self-mixing velocity interferometer with orthogonally polarized laser

激光器在应力双折射效应作用下发生频率分裂,输出正交偏振光,增益介质受横向磁场作用减小了正交偏振光之间的模竞争。双频激光器输出正交偏振光频率为分别 f_1, f_2 , 设 $f_2 > f_1$ 。激光器与被测物体间放置 1/4 波片,波片的快慢轴与正交偏振的两个频率的偏振方向分别成 45° 夹角。激光两次通过 1/4 波片,偏振方向改变 90° ,两正交偏振光频率分量的偏振方向互换。

系统利用频域实现对速度方向判别,对信号波形要求较低,易于实现,亦无需声光调制器,结构更加紧

凑,在测速范围上有望进一步提高。

目前,激光回馈多普勒测速技术在测速上限、测量精度、抗干扰能力方面还存在不足,未来新型激光回馈多普勒测速技术朝着高精度、大测速范围、高稳定性、强抗干扰能力等方向发展。

3.3 生物传感测量

激光回馈干涉测量技术作为一种非接触测量方法可用于对血压、血流速度、耳膜振动等生物信号的测量,而不会对病者造成损伤。近年来,广大学者开展了激光回馈效应在生物传感领域的应用研究,已基于激光回馈效应实现了人体血压、心脑血管疾病等的测量与诊断,激光回馈干涉测量技术开辟了生物光子学的突破性应用。

激光回馈干涉技术在生物信号测量方面的应用机制主要包括机动性测量、回声检测等。1977年,Donati等^[12]利用双通道He-Ne激光回馈干涉系统对病者的呼吸声进行了测量。1998年,Counteville等^[35]利用激光回馈干涉测量系统测量了人体肌肉振动,有助于对神经肌肉疾病的研究,对运动医学的发展起到了助推作用。2002年,Hast等^[13]利用单通道激光回馈干涉振动测量仪测量了前臂桡动脉中的心脑血管脉动的多普勒信号,实验结果证实了激光回馈干涉技术在医疗诊断应用中的有效性。2011年,Dan等^[28]将激光回馈干涉测量技术应用于THz波的测量中,该系统可用作光学雷达作用于生物组织目标,在检测皮肤癌等方面具有应用前景。同年,Capelli等^[29]利用激光回馈干涉技术测量了眼睛的转动速度,其测量范围在0~500°/s。下面重点介绍激光回馈干涉技术在人体呼吸系统功能性检测以及心率测量方面的应用。

目前常用于诊断人体呼吸系统机械性能的是一种称为强迫震荡技术的微创方法,该系统较为复杂,且需要依靠价格昂贵的体积扫描计来获得精确的测量信号。2011年,Norgia等^[30]利用单通道激光回馈干涉系统测量了人体呼吸系统的传输阻抗,传输阻抗包含了人体组织和呼吸道的相关信息,有助于对人体肺部的机械性能和机能紊乱进行评估。较之强迫震荡技术,该方法在灵敏度和信噪比方面均有所提高,同时具有结构简单,成本低,可实现多点精确测量,重复测量等优势。

临床医疗中为正确诊断患者病症,观测病人心跳及心脏活动状态是必不可少的。常用的诸如心脏导管术等检测技术不可避免的会在一定程度上对人体造成损伤,现普遍采用心电图这种无损检测方法。2011年,Capelli等^[14]基于激光回馈效应提出了一种可实现对患者心率、动脉血管变形等参量进行实时、无损测量的光学系统。图3所示为测量人体手腕桡动脉的系统结构,通过测量颈动脉扩张运动所引起的皮肤振动,可获得患者的心跳信息。现有研究证实,该技术不仅适用于临床医疗诊断,而且应用在医学研究领域。研究颈动脉的组织扩张运动有助于评估和预防脑缺血问题,对糖尿病患者而言,对于足背动脉运动的研究更是至关重要。

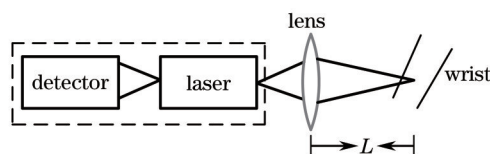


图3 自混合干涉技术用于测量人体手腕桡动脉

Fig.3 Sketch of the experimental setup used for measurements of radial artery of wrist

目前激光回馈干涉技术在生物测量领域的发展还尚未成熟,激光回馈干涉测量技术作为一种非接触无损测量方法可满足临床医疗检测的要求,在未来的临床医疗诊断中,激光回馈干涉测量技术必将占据越来越重要的地位。

4 激光回馈散斑效应研究

激光器输出光经粗糙表面反射或通过折射率无规则涨落的媒质传播时,根据光束传播的惠更斯-菲涅耳原理,粗糙物体表面的散射光会在传播过程中相干叠加,在空间形成随机无规则强度分布,即散斑图。散斑是由被随机表面各个散射元散射回的光波之间的干涉形成的,因而是随机表面某些信息的携带者,借助于散斑可研究粗糙表面本身及其形状和位置的变化等^[31]。随机散射平面移动时,散射场的空间分布将随之迅速变化,出现动态散斑。

在对粗糙目标散斑特性的研究和应用中,最典型的是Shirley所领导的激光散斑实验室。散斑问题的理论研究方法较多,主要有基尔霍夫近似理论^[32]、微扰法^[33]、小斜率近似^[34]等。

当激光回馈干涉系统中目标表面为漫反射表面时,激光散斑的存在将引起自混合干涉信号的变化。一方面对自混合信号振幅进行调制,另一方面,散斑的存在还将引起光回馈强度 C 的改变。下面将从克服散斑效应和利用散斑效应两方面进行介绍,首先介绍为克服散斑所致测量误差所提出的各种改善措施,再介绍利用散斑效应所实现的传感测量。

4.1 散斑误差及改善措施

激光回馈干涉测量系统中,当漫反射目标位移量远小于散斑尺寸时,散斑对自混合信号的影响并不明显^[44];随着目标位移量的增大,散斑将对自混合干涉信号进行振幅调制,当目标位移量大于散斑尺寸时,自混合信号将出现振幅衰减现象;另外,散斑效应还将为自混合信号带来随机相位误差^[15]。自混合信号的振幅衰减将导致测量误差甚至是错误测量,进一步研究表明,散斑对自混合信号振幅调制作用受目标表面粗糙度、激光光斑尺寸等因素影响^[16]。基于上述研究,出现了多种克服自混合信号振幅衰减的方法,诸如散斑追踪技术(BLT)^[17]、自适应调节技术^[18]、传感器多样性技术^[18]等。

4.1.1 散斑追踪技术

经漫反射目标反射后进入激光器谐振腔内的光功率大小与光斑作用于目标表面的位置有关。基于该特点,2001年,Michele等^[17]提出了散斑追踪技术,研究表明,该方案可有效消除散斑引起的自混合信号振幅衰减。散斑追踪系统基本结构如图4中所示,半导体激光器(LD)发出激光经透镜准直聚焦后照射漫反射目标表面,回馈光返回激光器谐振腔内与腔内光场发生相互作用,光电探测器(PD)探测激光器输出光强,控制系统根据激光器输出光强的变化调整激光光束的偏折量,以改变作用在目标表面的位置。

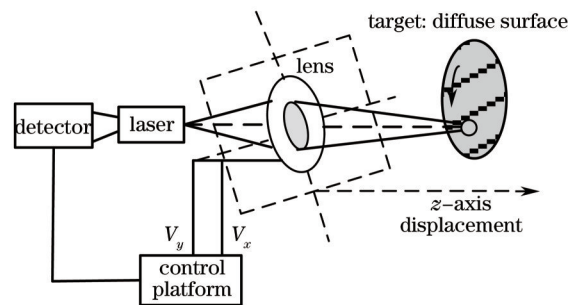


图4 散斑追踪技术在自混合干涉测量系统中的应用

Fig.4 Block diagram of the speckle tracking technique in self-mixing interferometer

通过激光束的偏折使激光照射在目标表面不同位置以将信号锁定在振幅最大值处,即所谓的散斑追踪技术。理论与实验研究均表明,散斑追踪技术可有效地消除散斑引起的自混合信号的振幅衰减,同时显著降低散斑所致随机相位误差。

4.1.2 自适应调节技术

散斑对自混合信号振幅的调制作用受激光光斑尺寸的影响,基于此,2013年,Reza Atashkhooei等^[18]提出了一种自适应调节技术用以消除自混合信号的振幅衰减。

在光回馈自混合干涉系统中加入自适应调节光学元件(如电压可编程液体透镜),液体透镜的焦距可变,通过改变液体透镜焦距,使作用在目标表面激光光斑尺寸发生变化,进而实现对自混合信号振幅的调整。

因受到液体透镜焦距改变速度的限制,该方案仅适用于目标位移缓慢变化的情形。自适应技术可有效避免自混合信号的振幅衰减,但不能消除散斑所致随机相位误差。

4.1.3 传感器多样性技术

自适应调节技术仅适用于位移缓慢变化情形,参照无线电通信中多样性技术^[19],Reza Atashkhooei等^[18]又提出了一种传感器多样性技术用于克服散斑所致自混合信号振幅衰减。

系统由两个半导体激光器组成,其波长分别为 λ_1 , λ_2 , 且 $\lambda_1 \neq \lambda_2$, 两激光器出射激光光束照射在目标表面不同位置,两束激光光斑尺寸分别为 D_1 , D_2 , 且 $D_1 \neq D_2$ 。该方案同时利用了激光器的空间多样性和光谱多样性,可有效减小散斑对位移等参量测量造成的误差。

4.2 散斑激光回馈干涉测量

一方面,散斑导致激光回馈干涉系统测量误差;另一方面,激光回馈干涉系统中动态散斑携带了被测物

体信息,通过散斑统计特性可获得物体位移、速度等信息。

1996年,Shibata等^[35]基于激光回馈半导体激光器提出了一种新的激光散斑测速仪,实验研究表明,当激光光束直径保持恒定,且大于0.36 mm时,散斑信号的平均频率与待测物体的运动速度呈正比,其比例系数取决于被测物体表面的粗糙度。散斑信号波形仅依赖于激光光束扫描路径,与物体运动速度无关。实验测量装置图如5中所示,激光器出射光经透镜聚焦后照射目标表面,光电探测器探测系统输出散斑信号,比较回路将散斑信号转换为脉冲序列,将脉冲序列与门脉冲信号逻辑相乘得到计数脉冲串,送入计数回路得到脉冲数 N ,利用计算机对数据进行处理。

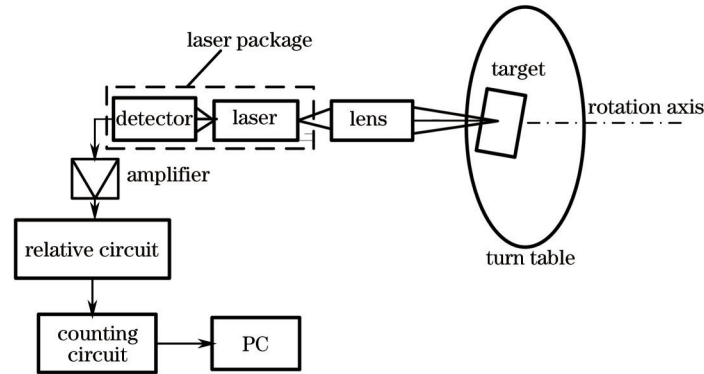


图5 散斑激光回馈干涉速度测量系统

Fig.5 Setup of speckle self-mixing interferometer to measure velocity

常用自混合散斑测速系统通过计数测量时间 t 内散斑光强变化次数 N 得到散斑信号平均频率 f_{mean} ($f_{\text{mean}} = N/t$),进而获得目标运动速度大小 v 。利用计数法测量物体运动速度存在一个临界速度值 f_c ,当目标运动速度低于 f_c 时,散斑信号平均频率 f_{mean} 与目标运动速度 v 之间不再保持线性关系, f_c 的值一般为 70 mm/s 左右^[36]。1999年,Özdemir等^[37]提出了利用自相关算法实现对目标运动速度的测量,通过对探测器接收到的散斑信号进行自相关运算,得到自相关长度 τ_c 。研究表明, $1/\tau_c$ 正比于物体运动速度 v ,根据这一特征可实现对运动物体速度的测量。较之计数法,自相关法的测量范围更大,可对 2 mm/s 甚至更低的速度进行测量。

2000年,Sahin等^[38]将激光回馈散斑速度测量仪应用于人体血液流动速度测量中,该方案可实现无损伤测量。激光回馈散斑测速仪为实现血液流动测量系统的小型化、简洁化和低成本开辟了新道路,在临床医疗诊断等领域具有广泛的应用前景。

激光回馈散斑测量技术可对物体表面粗糙度、被测物体位移、振动、变形等进行测量,在散斑所致测量误差可忽略的条件下,与传统激光回馈测量技术相比,激光回馈散斑测量技术具有全场、灵敏度高、易于实现等优点。

5 结 论

介绍了激光回馈的基本概念及光回馈效应的两种理论研究模型。鉴于光回馈效应在传感测量方面的优势,着重讲述了激光回馈干涉仪在位移、速度和生物传感领域的应用及发展。针对目标表面为粗糙表面的情况,分析了散斑对自混合干涉信号振幅影响,自混合干涉信号振幅衰减将导致测量误差甚至错误,为克服振幅衰减问题,总结了目前采用较多的散斑追踪技术、自适应调节技术、传感器多样性技术,最后介绍了散斑激光回馈干涉系统在人体血液流速测量等方面的应用。

参 考 文 献

- 1 P G R King, G J Steward. Metrology with an optical maser[J]. New Sci, 1963, 17(180): 14.
 - 2 P J De Groot, G M Gallatin, S H Macomber. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter-modulated laser diode[J]. Appl Opt, 1988, 27(21): 4475-4480.
 - 3 Zhang Shulian, Liu Gang, Zhu Jun, *et al.*. Self-mixing interference effect and its progress of the applications in displacement measurement[J]. Advances in Natural Sciences, 2005, 15(7): 788-798.
- 张书练, 刘 钢, 朱 钧, 等. 自混合干涉效应及其在位移测量应用中的进展[J]. 自然科学进展, 2005, 15(7): 788-798.

- 4 Zhang Li, Zhou Lufei, Tan Yidong, *et al.*. Dual-frequency laser optical feedback displacement measurement system with nanometer resolution[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2009, 23(4): 7-12.
张立, 周鲁飞, 谈宜东, 等. 纳米级分辨率双频激光回馈位移测量系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(4): 7-12.
- 5 Rudd M J. A laser Doppler velocimeter employing the laser as a mixer-oscillator[J]. *J Phys E: Sci Instrum*, 1968, 1(7): 723-726.
- 6 Zhang Peng, Zhang Shulian, Zeng Zhaoli. Laser Doppler velocimeter measurement based on the feedback effect of dual-frequency microchip laser[J]. *Metrology & Measurement Technology (Theory and Practice)*, 2012, 32(3): 12-16.
张鹏, 张书练, 曾召利. 基于双频微片激光器回馈效应的多普勒测速技术研究[J]. *计测技术(理论与实践)*, 2012, 32(3): 12-16.
- 7 Gouaux F, Servagent N, Bosch T. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(28): 6684-6689.
- 8 Scalise L, Yu Y, Giuliani G, *et al.*. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement[J]. *IEEE T Instrum Meas*, 2004, 53(1): 223-232.
- 9 Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 8(27):1430-1434.
禹延光, 郭常盈, 叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量[J]. *光学学报*, 2007, 8(27):1430-1434.
- 10 Lu C, Wang J, Deng K. Imaging and profiling surface microstructures with noninterferometric confocal laser feedback [J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 66(16): 2022-2024.
- 11 R Lang, K Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1980,16(3): 347-355.
- 12 S Donati, V Speziali. Laser interferometry for sensing of respiratory sounds[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1977, 13(9): 899-899.
- 13 J Hast, R Myllylä, H Sorvoja, *et al.*. Arterial pulse shape measurement using self-mixing effect in a diode laser[J]. *Quantum Electron*, 2002, 32(11): 975-980.
- 14 G Capelli, C Bollati, G. Giuliani. Non-contact monitoring of heart beat using optical laser diode vibrocardiography[C]. *Proc Biophoto*, Parma, Italy, 2011, 6: 1-3.
- 15 L Lu, K Zhang, J Dai, *et al.*. Study of speckle pattern effect for self-mixing laser diodes in vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Opt Eng*, 2010, 49(9): 094301.
- 16 W Wang, P L Wong, J B Luo, *et al.*. A new optical technique for roughness measurement on moving surface[J]. *Tribol Int*, 1998, 31(5): 281-287.
- 17 Michele Norgia, Silvano Donate, Davide D'alessandro. Interferometric measurements of displacement on a diffusing target by a speckle tracking technique[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(6):800-806.
- 18 A Rezai, R Santiago, J A Francisco. Dealing with speckle effects in self-mixing interferometry measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013,13(5): 1641-1647.
- 19 A V Raisanern, A Lehto. *Radio Engineering for Wireless Communication and Sensor Applications*[M]. London: Artech House, 2003.
- 20 M B Spencer, W E L Jr. Laser with a transmitting window[J]. *Phys Rev A*, 1972, 5(2): 884-892.
- 21 Zhang Shulian. Optical feedback technology and its development[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(11): 65-76.
张书练. 激光回馈技术及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(11): 65-76.
- 22 Cluniep M, Rock N H. The laser feedback interferometer[J]. *Rev Sci Instr*, 1964, 41: 489-496.
- 23 Wang W M, Grattan K T V, Pulmer A W, *et al.*. Self-mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications[J]. *J Lightwave Technol*, 1994, 12: 1577-1587.
- 24 Zhang Shulian, Fei Ligang, Liu Weixin. Laser feedback nanoscale width fringes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 208-211.
张书练, 费力刚, 刘维新. 激光回馈纳米级宽度干涉条纹[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 208-211.
- 25 S Shinohara, E T Shimizu, H Yoshida, *et al.*. Directional laser Doppler velocimetry using self-mixing effect of semiconductor laser diode[J]. *Trans IEICE*, 1987, 70(2): 100-103.
- 26 Shigenobu Shinohara, Hideaki Naito, Hirofumi Yoshida, *et al.*. Compact and versatile self-mixing type semiconductor

- laser Doppler velocimeters with direction- discrimination circuit[J]. IEEE Transactions on, Instrumentation and Measurement, 1989, 38(2): 574-577.
- 27 Liu Gang, Zhang Shulian. Self-mixing laser Doppler velocimeter based on dual frequency lasers[C]. SPIE, 2005, 5633: 363-370.
- 28 P Dean, L Y Leng, A Valavanis, *et al.*. Terahertz imaging through self-mixing in a quantum cascade laser[J]. Opt Lett, 2011, 36(13): 2587-2589.
- 29 G Capelli, G Giuliani. Laser velocimeter for the measurement of eye movements[C]. Biophotonics, 2011 Internal Workshop on IEEE, 2011: 1-3.
- 30 M Norgia, A Pesatori, I Milesi, *et al.*. Self-mixing interferometer for direct vibration measurement on human skin[J]. Biophotonics, 2011 International, Workshop on, IEEE, 2011.
- 31 Sun Hong, Liu Ying, Ma Shining. The dynamic characteristic of double scattering speckle fielding longitudinal motion [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(2): 181-185.
孙虹, 刘迎, 马世宁. 纵向运动双散射散斑场的动态特性研究[J]. 光学学报, 1999, 19(2): 181-185.
- 32 P Beckmann, A Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces[M]. London Artech House, 1987.
- 33 F Bass, I Fuks. Wave scattering from statistically rough surfaces[M]. London: Pergamon Press, 1979.
- 34 M A Demir, J T Johnson. Fourth- and higher- order small-perturbation solution for scattering from dielectric rough surfaces[J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(12): 2330-2337.
- 35 Takaaki Shibata, Shigenobu Shinohara, Hiroaki Ikeda, *et al.*. Laser speckle velocimeter using self-mixing laser diode [J]. IEEE Transactions on, Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 499-503.
- 36 T Shibata, S Shinohara, H Ikeda, *et al.*. Automatic measurement of velocity and length of moving plate using self-mixing laser diode[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE, Transaction on, 1999, 48(6): 1062-1067.
- 37 Sahin Kaya Özdemir, Satoshi Ito, Sotetsu Takamiya, *et al.*. Velocity measurement by a self-mixing laser diode using speckle correlation[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, Poceeding of 16th IEEE, 1999, 3: 1756-1760.
- 38 Sahin Kaya Özdemir, Sotetsu Takamiya, Satoshi Ito, *et al.*. Self-mixng laser speckle welocimeter for blood flow measurement[J]. IEEE Transactions on Instrucmentation and Measurement, 2000, 49(5): 1029-1035.

栏目编辑: 宋梅梅