

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.01.03

激光回馈精密测量技术及应用

谈宜东, 彭程

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器全国重点实验室, 北京 100084)

摘要: 介绍了激光回馈干涉的理论模型, 阐述了激光回馈测量灵敏度高、装置结构简单、可自准直、能够对非合作目标进行精密测量的技术特点。分析了激光回馈测量相较传统干涉测量的优势, 探讨了激光回馈测量技术在工业和科研领域中的应用方向, 包括位移、角度、振动、绝对距离测量等, 指出利用频率复用、偏振复用、(准)共路等技术可提高回馈测量的实际应用性能。最后展望了激光回馈技术的发展前景, 为推动回馈技术的广泛应用提供借鉴。

关键词: 精密测量; 激光回馈; 自混合干涉; 高灵敏度

中图分类号: TB96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 01-0030-13

Laser feedback precision measurement and applications

TAN Yidong, PENG Cheng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Introduced the theoretical model of laser feedback interferometry, explaining the technical characteristics such as high sensitivity, simple device structure, self-aligning, and the ability to achieve precise measurements of non-cooperative targets. The advantages of laser feedback measurement and traditional interferometric measurement methods were discussed. Explored various applications of laser feedback measurement in industrial and research domains, including displacement measurement, angle measurement, vibration measurement, and absolute distance measurement. It is pointed out that the use of structures like harmonic reuse, frequency reuse, polarization reuse, and full-path coherent combining can enhance the application performance of feedback measurement. Finally, the future development direction of laser feedback technology is discussed, providing reference for promoting the widespread application of feedback technology.

Key words: precision measurement; laser feedback; self-mixing interferometry; high sensitivity

0 引言

激光回馈效应也称激光自混合干涉, 是指激光器输出的光线被目标表面反射或散射后, 一部分再次回到激光器谐振腔内与原光场发生干涉, 导致激光器的输出光强、频率、相位、偏振态等

特性发生变化的物理现象^[1-2]。激光回馈现象于1963年由KING P J等人发现并首次报导^[3], 由于回馈光会影响激光器的稳定性甚至使系统不能工作, 早期研究中激光回馈效应被视作亟需消除的不利因素。随着对激光回馈效应研究的深入, 科研人员发现回馈光会受到腔内光场作用而放大,

收稿日期: 2024-02-15; 修回日期: 2024-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC2200204, 2020YFC2200101)

引用格式: 谈宜东, 彭程. 激光回馈精密测量技术及应用[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 30-42.

Citation: TAN Y D, PENG C. Laser feedback precision measurement and applications[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 30-42.



具有非常高的灵敏度。自此国内外研究人员开始将激光回馈效应作为一种新型的光学精密测量手段,并探索其在位移^[4-5]、速度^[6-7]、振动^[8-9]测量以及成像^[10-11]等领域中的应用。

相较传统的迈克尔逊干涉测量方法,回馈干涉测量最大的优势在于其高灵敏度。对固体微片激光器而言,腔内光场衰减速率与反转粒子数衰减速率之比可达 10^6 ,因此发生回馈效应时,由于谐振腔内的光场放大作用,即使目标表面的反射率低至 10^{-12} ,也可以不安装靶镜而直接进行测量^[12]。传统的干涉测量方法必须使用靶镜,无法对黑色、粗糙、圆柱面、小尺寸、液体等难以安装靶镜的目标进行测量^[13-14]。此外,激光回馈干涉系统的测量信号与参考信号共路,具有结构简单、自准直的特点。早期的激光回馈干涉测量系统主要采用气体激光器、半导体激光器、固体激光器等,近几十年,国内外学者不断尝试研究各种新型激光器的回馈效应以拓展其应用场景,如光纤激光器^[15]、垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)^[16]、太赫兹激光器^[17]、微腔激光器^[18]等。

本课题组专注于激光回馈效应的机理和应用研究,经过十几年不懈的努力和创新,解决了激光回馈技术在精密测量实际应用场景中的多个关键技术问题,如空程补偿、频率稳定、寄生噪声抑制等,取得了一系列重要成果。本文阐述激光回馈的理论模型,结合本课题组的研究成果,介绍激光回馈在位移测量、角度测量、振动测量、绝对距离测量、生化传感等领域的应用概况,展望激光回馈技术未来的发展前景,为相关领域的科研工作者提供参考。

1 激光回馈理论模型

早期研究者们发现运动的腔外物体散射回谐振腔内的光能够引起激光功率周期性波动,并基于此现象提出了不同的测量方案。然而,当时大多数研究采用零差干涉方案,测量结果易受激光功率波动和环境扰动影响,难以实现稳定的高精度测量。

1979年,OTSUKA K等人采用LNP(LiNdP₄O₁₂)固体微片激光器作为光源,并在光路中增加了移

频器件,在实验中观察到了弛豫振荡对回馈干涉信号的增强作用,当调整移频器件的频率,使干涉的拍频信号频率接近弛豫振荡频率时,拍频信号的调制对比度明显增强,即使在回馈光很弱的情况下,也可实现较高的信噪比^[19]。该实验现象为利用移频回馈进行高精度测量奠定了基础。

1980年,LANG R和KOBAYASHI K构建了基于半导体激光器回馈效应的动力学模型^[20],他们以激光速率方程为基础,采用稳态-微扰的分析方法,在弱回馈条件下求解速率方程,得出单模运转激光器回馈效应的演化规律,并通过实验证明了半导体激光器的动态特性依赖于外腔回馈,得出了回馈光和谐振腔之间的干涉条件。1988年,DE GROOT P J等人在L-K方程的基础上,提出用三镜腔模型结构来等效回馈干涉系统^[21],并推导出回馈干涉系统输出光强的数学表达式,进一步深化了对激光回馈效应的理解。

激光回馈系统的复合腔模型如图1所示,激光器的两个腔镜M₁和M₂的反射系数分别为r₁和r₂,目标表面的反射系数为κ,谐振腔长度为L。当目标表面将激光器输出的一部分光反射回谐振腔内时,相当于改变了激光器输出镜的有效反射率,因此可以将激光器的两个腔镜和目标物表面等效为一个复合腔,M₁和M₂等效为腔镜M'₂,其等效反射系数为r_{eff}。

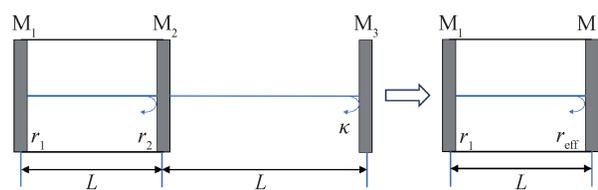


图1 激光回馈系统的复合腔模型

Fig.1 Compound cavity model of laser feedback

M₂到M₃的距离为回馈系统的外腔长,设其长度为L_{ex},则被M₃反射回到激光器的光场E_{ex}(t-τ)为

$$E_{\text{ex}}(t-\tau) = E_1(t-\tau)\kappa\sqrt{1-r_2^2}\exp(-i2\pi v\tau) \quad (1)$$

式中:E₁(t)为腔镜M₁处出射的光场,v为激光频率,τ为激光在外腔中的行进时间(τ=2n₀L_{ex}/c,其中,n₀为外腔介质折射率,c为光在真空中的速度)。腔镜M₂处的反射光场E₂(t)=E₁(t)r₂,等效腔镜M'₂反射回谐振腔的光场可表示为E_{ex}(t)和E₂(t)的总和。经M₂和外腔反射回谐振腔的总光场E_{eff}(t)为

$$E_{\text{eff}}(t) = E_{\text{ex}}(t) + E_2(t) \approx E_1(t) [r_2 + (1 - r_2^2)\kappa \exp(-i2\pi\nu\tau)] \quad (2)$$

等效腔镜的反射系数 r_{eff} 为

$$r_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}(t)}{E_1(t)} = r_2 + (1 - r_2^2)\kappa \exp(-i2\pi\nu\tau) \quad (3)$$

由于谐振腔反射系数的变化会对腔内光场的损耗速率 γ_c 产生影响, 使用等效反射系数 r_{eff} 代替原光场 r_2 , 从而获得微片激光器回馈条件下的等效

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \gamma(N_0 - N(t)) - BN(t)|E(t)|^2 \\ \frac{dE(t)}{dt} = [i(\omega_c - \omega) + \frac{1}{2}(BN(t) - \gamma_c)]E(t) + \gamma_c\kappa \exp(-i2\pi\nu\tau)E(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $N(t)$ 为上能级的反转粒子数, N_0 为小信号反转粒子数, B 为爱因斯坦受激辐射系数, ω_c 为谐振腔的共振频率, ω 为实际激光频率, $E(t)$ 为谐振腔内的激光电场, γ 为反转粒子数衰减速率。将公式(5)与经典速率方程对比可以看出, 激光回馈的本质是在光场的表达式中增加了调制项 $\gamma_c\kappa \exp(-i2\pi\nu\tau)E(t)$ 。

以上分析为零频回馈时的情况, 若激光器输出光频率为 f , 在外腔中增加频率为 Ω 的移频器

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \gamma(N_0 - N(t)) - BN(t)|E(t)|^2 \\ \frac{dE(t)}{dt} = [i(\omega_c - \omega) + \frac{1}{2}(BN(t) - \gamma_c)]E(t) + \gamma_c\kappa \exp(i2\Omega t) \exp(-i(2\pi\nu + 2\Omega)\tau)E(t) \end{cases} \quad (6)$$

此时, $\gamma_c\kappa \exp(i2\Omega t) \exp(-i(2\pi\nu + 2\Omega)\tau)E(t)$ 为光场表达式中增加的调制项。在弱回馈情况下, 可以获得激光器移频回馈的输出光强关系式

$$\frac{\Delta I(2\Omega)}{I_s} = \kappa G(2\Omega) \cos(2\Omega t - 2\pi\nu\tau + \phi) \quad (7)$$

式中: $\Delta I(2\Omega)$ 为移频光回馈下激光输出的光强变化, I_s 为系统在稳态下的光强, ϕ 为固定附加相位, $G(2\Omega)$ 为增益系数, 可表示为

$$G(2\Omega) = 2\gamma_c \frac{(\eta^2\gamma^2 + (2\Omega)^2)^{1/2}}{[\eta^2\gamma^2(2\Omega)^2 + (\omega_r - (2\Omega))^2]^{1/2}} \quad (8)$$

式中: η 为相对泵浦水平(即激光器实际工作泵浦功率与阈值泵浦功率的比值), ω_r 为激光器弛豫振荡频率。由式(8)可以看出, $G(2\Omega)$ 的大小取决于移频频率 2Ω 和弛豫振荡频率的关系, 当 $2\Omega = \omega_r$ 时, $G(2\Omega)$ 取得最大值, 即

$$G(2\Omega)_{\text{max}} \approx \frac{2}{\eta} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma} \quad (9)$$

光场损耗速率 γ_{eff} , 即

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{eff}} &= \frac{c}{2nL} \ln \left(\frac{1}{|r_1|^2 \cdot |r_{\text{eff}}|^2} \right) \\ &\approx \frac{c}{2nL} (1 - |r_{\text{eff}}|^2) \\ &\approx \gamma_c - 2\gamma_c\kappa \exp(-i2\pi\nu\tau) \end{aligned} \quad (4)$$

用式(4) γ_{eff} 的结果替代经典速率方程中的 γ_c , 推导得到回馈系统的速率方程

件, 经目标反射后回到谐振腔的移频频率为 2Ω 。移频回馈的光路结构如图2所示。

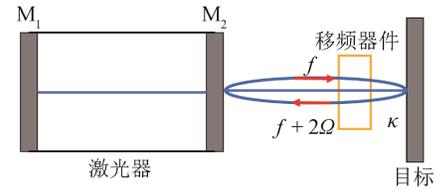


图2 激光移频回馈系统结构图

Fig.2 Diagram of laser frequency shift feedback system

移频回馈的速率方程为

移频量 2Ω 与增益系数 G 的关系如图3所示。在实际应用中, 通过调整移频量 2Ω 可以改变回馈系统的增益系数, 从而实现增益可控。固体微片激光器的 γ_c/γ 可达 10^6 量级, 因此理论上固体微片激光器移频回馈可具有极高的灵敏度, 比传统干涉高 4 ~ 5 个数量级, 即使目标的反射率较低也可

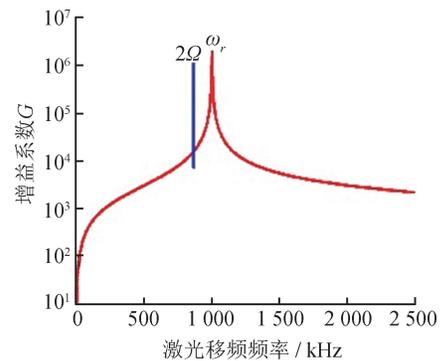


图3 调制移频量 2Ω 与增益系数 G 的关系

Fig.3 Relationship between modulation frequency shift 2Ω and the gain coefficient G

进行有效测量，从理论上解释了移频回馈技术能够对非合作目标测量的原因。

2 激光回馈测量典型应用

2.1 位移测量

由激光回馈的原理可知，当外腔长每变化半个波长，对应的激光调制强度变化一个周期，因此可以通过计算调制的总周期数量来测量目标的位移量^[22-23]。但是在实际环境下，激光器和移频器件的热蠕动会造成明显的光程波动，难以实现高精度的位移测量。本课题组提出了倍频复用的回馈干涉位移测量系统^[24]，该系统采用共光路结构补偿激光器到声光调制器之间的光程扰动误差，将测量分辨力提升至纳米量级，原理结构如图4所示。

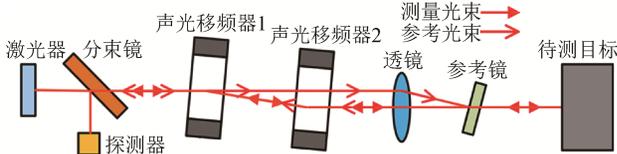


图4 激光移频回馈位移测量系统

Fig.4 Schematic diagram of laser frequency-shift feedback displacement measurement

系统中，参考镜为一反射率已知的镜面，声光移频器组产生的频移量为 Ω 。通过声光移频器组的移频光穿过参考镜，再入射到目标表面，散射光沿原路返回到激光腔形成测量光束，移频量为 2Ω ；通过声光移频器组的零频光，被参考镜面反射，沿测量光束的路径返回至激光腔内，形成参考光束，移频量为 Ω 。可分别得到测量光和参考光的输出光功率 ΔI 的表达式

$$\begin{cases} \frac{\Delta I(\Omega)}{I} = G(\Omega)\kappa_1 \cos(2\pi\Omega t - \varphi_r + \varphi_{i0}) \\ \frac{\Delta I(2\Omega)}{I} = G(2\Omega)\kappa_2 \cos(4\pi\Omega t - \varphi_m + \varphi_{m0}) \end{cases} \quad (10)$$

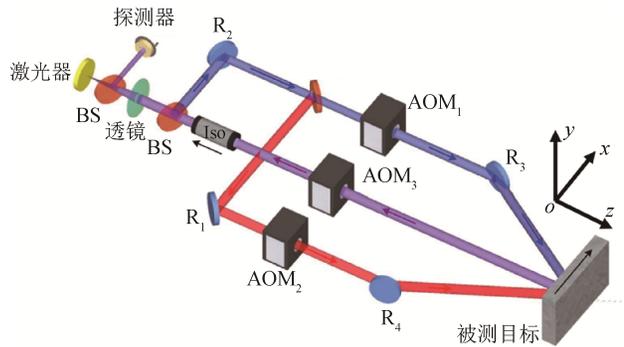
式中： φ_{i0} 、 φ_{m0} 分别为参考信号和测量信号的固定相位偏移，与目标位置无关； φ_r 、 φ_m 分别为参考信号和测量信号的回馈相位，反映目标的位移信息。分别对参考光信号和测量光信号解调，求得其相位变化量 $\Delta\varphi_r$ 和 $\Delta\varphi_m$ ，则位移变化量 ΔL 可表示为

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot (\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_r) \quad (11)$$

由于测量光路和参考光路在空间上非常接近，通过式(11)的差动相减，能够有效地消除有源光

学器件的热漂移并减少环境干扰对测量光相位的影响，显著提升非配合目标回馈干涉位移测量的准确性。经试验测试，补偿后系统的位移分辨力优于2 nm。

除了一维位移测量外，本课题组还提出了一种基于激光移频回馈的单点二维位移测量方法^[25]，系统结构如图5所示。该系统使用3个声光移频器和若干反射镜产生两路不同入射夹角的测量光束，入射到测量目标的同一点上。



注：AOM为声光移频器；R为反射镜；BS为分光镜。

图5 基于激光移频回馈的单点二维位移测量系统^[25]

Fig.5 Single point two-dimensional displacement measurement system based on laser frequency-shift feedback^[25]

设两束入射光与目标的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ，3个声光移频器可控制两束光产生不同的移频量，解调得到双通道移频信号相位变化量 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ ，计算获得被测目标的面内位移 S_{in} (x 方向)和离面位移 S_{off} (z 方向)，即

$$\begin{aligned} S_{in} &= \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_1(1 + \cos\theta_2) - \Delta\varphi_2(1 + \cos\theta_1)}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2 + \sin(\theta_1 + \theta_2)} \\ S_{off} &= \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_1 \sin\theta_2 + \Delta\varphi_2 \sin\theta_1}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2 + \sin(\theta_1 + \theta_2)} \end{aligned} \quad (12)$$

该系统的测量结果如图6所示，在测量范围500 μm 内，面内位移分辨力和离面位移分辨力均优于5 nm，测量误差不超过 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。这种测量方法可应用于需要精密测量物体表面形变的场合。

2.2 角度测量

在工业和科研领域，需要对物体转动角度变化进行测量。传统的光学非接触测量方法如激光自准直仪测量法、激光干涉仪测量法等均需要使用靶镜，实际应用受到限制^[26]。本课题组提出了一种双路平行激光回馈干涉的测量方案^[27]，原理如图7所示。

该系统使用两束泵浦光聚焦在Nd:YAG晶体

上,产生两束平行激光,分别经过移频入射测量目标表面,并沿同样路径返回到激光腔中,形成两束测量光束。分别使用光电探测器PD1和PD2进行检测,之后对信号进行解调,计算获得目标转动的角度 θ ,即

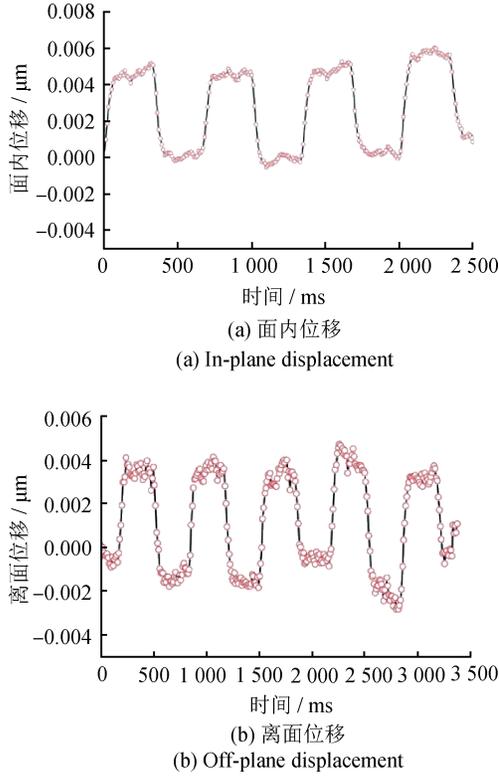
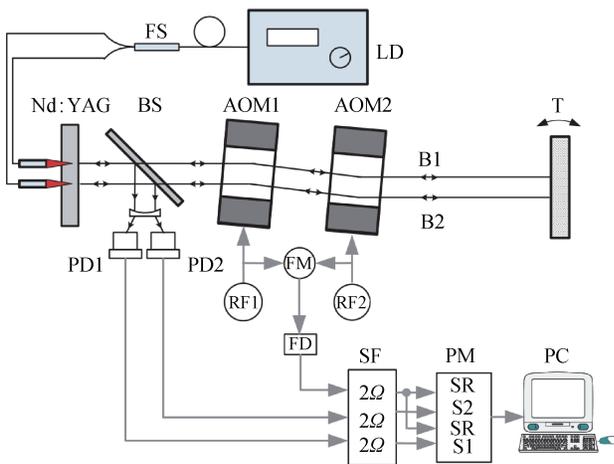


图6 单点二维位移测量系统的实验结果^[25]
Fig.6 Resolution of single point two-dimensional displacement measurement^[25]



注: LD为泵浦半导体激光器; FS为光纤分束器; BS为分光镜; AOM为声光移频器; PD为光电探测器; RF为AOM驱动; FM为混频器; PD为倍频器; SF为三通滤波与放大; PM为相位计; T为待测目标。

图7 双路平行激光回馈测角系统^[27]

Fig.7 Dual parallel laser feedback angle measurement system^[27]

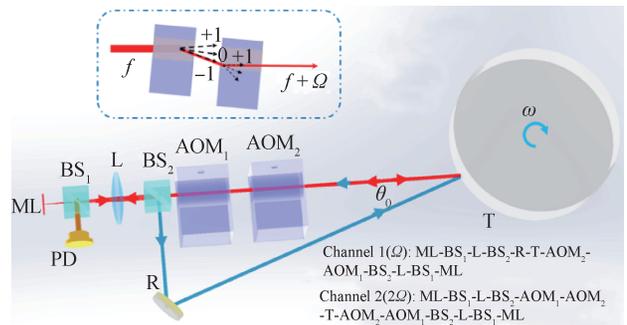
$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta L}{d}\right) = \arctan\left(\frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{d}\right) \quad (13)$$

式中: $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 分别为两束平行光的相位变化量, d 为两光束的间距, λ 为所用激光的波长。由于两束光在空间上非常接近,受到的环境扰动基本相同,因此采用该空间复用的结构可有效消除死程误差,具有较强的抗干扰能力。该系统角度测量分辨力为485 nrad,测量范围为6.8 mrad。

2021年,本课题组在双光束角度测量的基础上提出了双光束单点的角度测量方法,实现了更高分辨力的角度测量^[28],系统如图8所示。采用Nd:YVO₄微片激光器作为光源,激光经分束器BS2分为两束,一束通过声光移频器入射目标表面,散射光沿原路返回至激光腔中,移频量为 2Ω ;另一束通过反射镜以预先校准的角度 θ_0 照射目标表面,散射光沿测量光的路径返回至激光腔中,移频量为 Ω 。由于目标的旋转会改变两光束的相位,通过信号解调得到各自相位变化量 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$,通过计算获得被测目标的转动角度 θ ,即

$$\theta = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{\{[2\Delta\varphi_1 - (1 + \cos\theta_0)\Delta\varphi_2]/2\sin\theta_0\}^2 + (\Delta\varphi_2/2)^2}}{R} \quad (14)$$

式中: R 为物体的旋转半径, λ 为激光波长。该系统的角度测量分辨力优于100 nrad,并可对目标全周角测量,大大扩展了测量范围。



注: ML为激光器; PD为探测器。
图8 双光束单点的角度测量系统^[28]

Fig.8 Dual beam single-point angle measurement system^[28]

本课题组还提出了一种双光束回馈干涉的平动转动测量方案^[29],不仅可测量目标转动的角度变化,同时还可测量其平动的位移变化,系统原理如图9所示。该系统采用3个声光移频器,产生

两束带有不同移频量的测量光束，平行入射至待测目标表面，被测量目标散射或反射的光沿原路

返回激光器中与内部光场发生作用，经解调后获得两测量光束的相位变化量 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 。

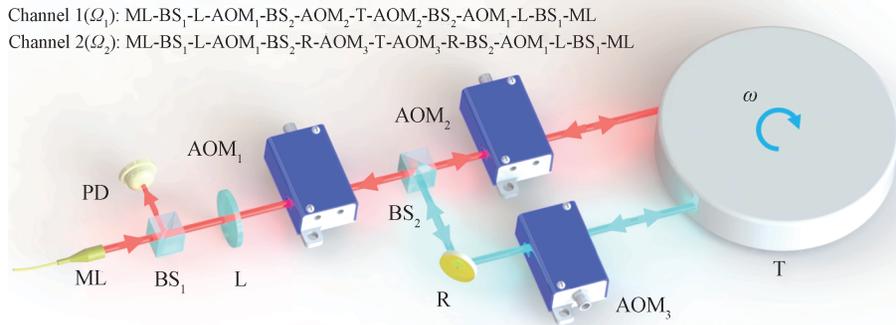


图9 双光束回馈干涉的平动转动测量系统^[29]

Fig.9 Dual-beam feedback interference for translation and rotation measurement^[29]

平动位移和角度变化的传感原理如图10所示。当目标发生平动时，测量光入射至平动目标表面，移频回馈光会叠加目标平动引起的多普勒频移，其相位变化反映测量目标平动信息，与照射至固定目标的参考光移频回馈的相位差乘以波长系数即可获得物体平动信息；当目标发生转动时，转动角度即为转动角速度对时间的积分，利用双光束测量的位移差与双光束间距即可推导得到物体的转动角度。物体的平动变化量 ΔL 和转动变化量

$\Delta\theta$ 可表示为

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \tag{15}$$

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{R \cos \theta_2 - R \cos \theta_1}$$

式中： R 为物体的旋转半径， θ_1 、 θ_2 为光束与目标切线的夹角， λ 为激光波长。该系统测得的角度分辨力优于100 nrad，平动分辨力优于1 nm，可进行全周角测量。相比于其他光学式或者电学式角度测量技术，激光移频回馈角度测量方法具有测量精度高、非接触、无需靶镜和转动测量范围大等优点。

2.3 振动测量

振动是物体的基本运动之一，在日常生活中广泛存在，包括人心脏的搏动、说话时声带的振动、桥梁和建筑物在阵风或地震激励下的振动、飞机和船舶在航行中的振动等。对目标振动特性的测量具有重要意义，在工业上可用于检验机器运转是否正常，在科研中有助于深入理解物理现象和材料特性，在军事上可用于远距离语音侦听和目标特征识别。2014年，OTSUKA K等人搭建了基于微片LNP激光器移频回馈的微振动测量系统，并使用该系统测量了扬声器膜片的振动。通过调制移频器的移频频率，使回馈光的移频量接近弛豫振荡频率，获得了极高的回馈灵敏度。通过扬声器施加20 dB以下的微小声压信号，该系统仍然能够完成解调并获得清晰的声音^[30]。

2020年，本课题组搭建了以Nd:YVO₄微片激光器为光源的移频回馈远距离测振系统^[31]，该系

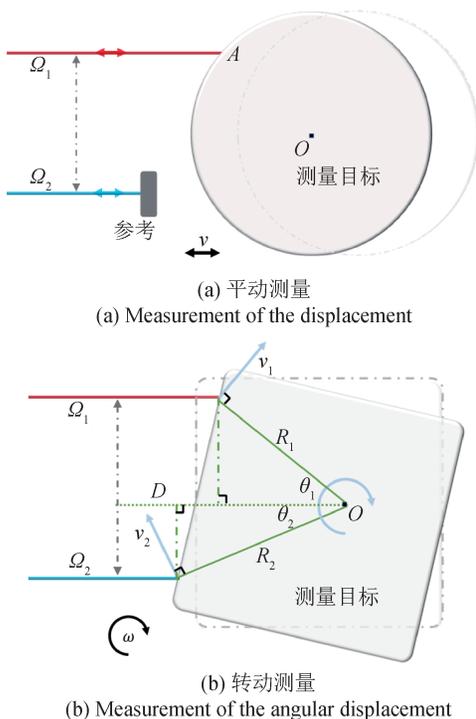


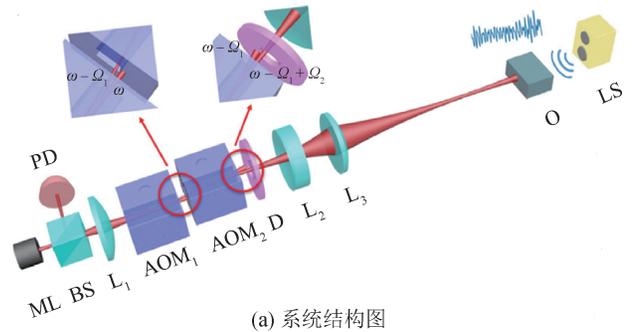
图10 平动转动测量原理图^[29]

Fig.10 Sensing principle illustration of displacement and angular displacement^[29]

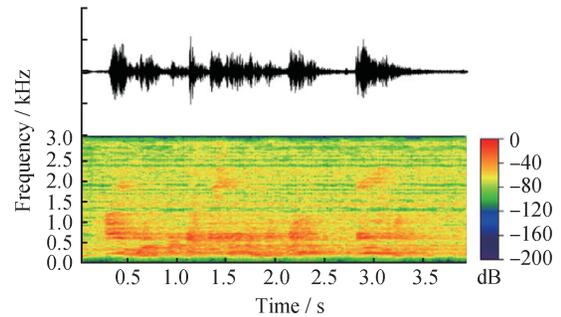
统利用声源周围物体在声源的带动下产生频率等同或近似于声源频率的受迫振动这一特性，通过测量声源附近物体的振动反演声源信息，可应用于激光侦听、危险环境远距离监测等场合。系统结构如图11(a)所示，在出射端采用透镜 L_2 和 L_3 实现远距离下光束的准直和聚焦。该系统可以清晰还原距离200 m处的声音信号，频率恢复相对误差不超过3.5%。

在回馈测量系统中，透镜、分光镜、调制器等器件的表面均会返回少量的光信号，这部分杂散光信号也会在谐振腔中放大，从而降低探测的准确性，该现象被称为寄生回馈。为了消除寄生回馈带来的不良影响，本课题组提出了利用偏振复用的改进方案^[32]，在光路系统中增加了一个法拉第旋转器(Faraday Rotator, FR)、一个1/2波片(Half Wave Plate, HWP)和一个1/4波片(Quarter Wave Plate, QWP)，如图12所示。测量光在往返过程中会两次穿过法拉第旋转器、1/2波片和1/4波片，返回法拉第旋转器时偏振方向与出射时一致，信号光传输不受影响；回馈噪声信号在往返过程中两次穿过法拉第旋转器、1/2波片，而不通过1/4波片，返回法拉第旋转器时偏振方向与出射时正交，因此寄生噪声会被抑制。

寄生噪声抑制前后的信号强度对比效果如图13所示。未抑制寄生噪声前信号强度和寄生噪声强度均为35 dB，严重影响了解调准确度；抑制寄生噪声后信号强度不变，寄生噪声仅为5 dB，证明偏振复用方法可有效提高回馈测量系统远距离工作的性能。



(a) 系统结构图
(a) Schematic diagram of system structure



(b) 语音信号恢复结果
(b) Voice signal restoration

注：L为透镜；O为目标；LS为扬声器；D为光阑。

图11 基于微片激光器的远距离声音恢复系统^[31]

Fig.11 Long-distance sound restoration system based on microchip laser^[31]

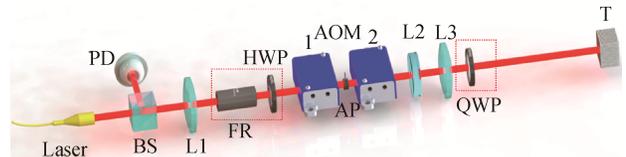


图12 寄生噪声抑制远距离声音恢复系统原理图

Fig.12 Structure diagram of long-distance sound restoration system with parasitic noise suppression

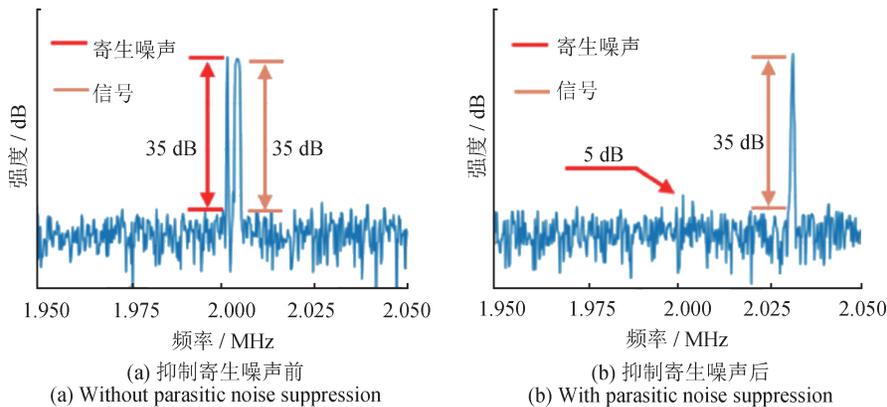


图13 寄生噪声抑制前后的信号强度对比^[32]

Fig.13 Comparison of signal intensity before and after parasitic noise suppression^[32]

2.4 绝对距离测量

1992年, SHINOHARA S等人根据半导体激光器输出光频与注入电流呈线性关系的特性, 提出了以半导体激光器为光源的调频连续波法绝对测距方案^[33]。激光器输出的激光频率随时间线性扫描, 设扫频速率为 α , 激光照射到目标并返回谐振腔的时间延迟为 τ , 光在介质中的速度为 c 。信号光与激光腔内本振光的频差恒定, 干涉后会产生频率为 $f_b = \alpha\tau$ 的拍频, 从而可以得出激光器与被测目标之间的绝对距离 L 为

$$L = \frac{\tau}{2} \cdot c = \frac{cf_b}{2\alpha} \quad (16)$$

近年来, 随着光纤器件的飞速发展, 可调谐光纤激光器因其线宽窄、调谐范围大的优点受到广泛关注。本课题组搭建了以掺铒光纤激光器为光源的回馈调频绝对距离测量系统^[34], 结构如图14所示。

该系统中, 使用光纤准直镜将测量光从光纤耦合到空间中, 并保持较小的发散角。测量光经过被测目标散射后沿原路返回, 被准直镜收集后耦合进入光纤, 与谐振腔内光场发生干涉, 产生拍频信号, 进而计算得到被测目标的距离。

由于扫频光源的输出光频率可能存在非线性, 导致拍频信号发生频谱展宽, 影响测量精度, 因此设计了辅助干涉系统进行抑制。辅助干涉系统是一个不等臂的马赫-曾德干涉仪, 两臂的光程差为一段已知长度的延时光纤(长度需大于待测距离的两倍), 通过分析辅助干涉信号拍频的频率变化, 可以反推出激光器输出光的频率变化。以辅助干涉仪的干涉信号作为触发信号, 对测量光路的干涉信号重采样, 可以抑制光源调频非线性带来的误差。辅助干涉信号对测量信号重采样如图15所示。

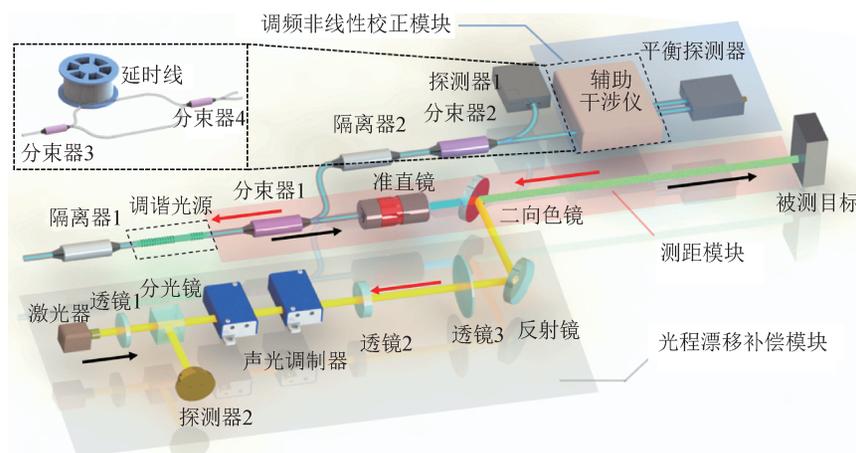


图14 激光回馈调频绝对测距系统^[34]

Fig.14 Laser feedback frequency modulation absolute distance measurement system^[34]

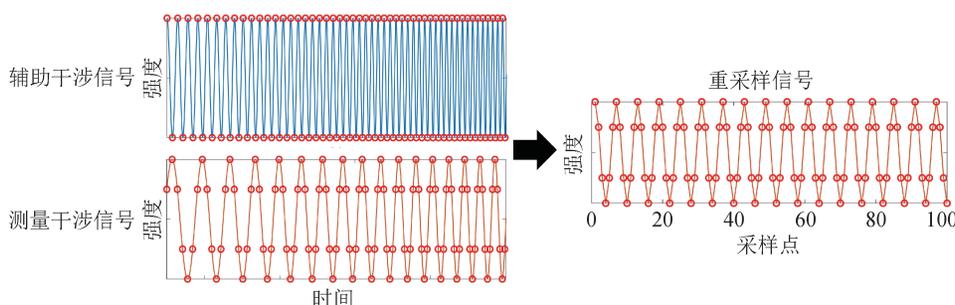


图15 辅助干涉信号对测量信号重采样

Fig.15 Resampling of measurement signals by auxiliary interference signals

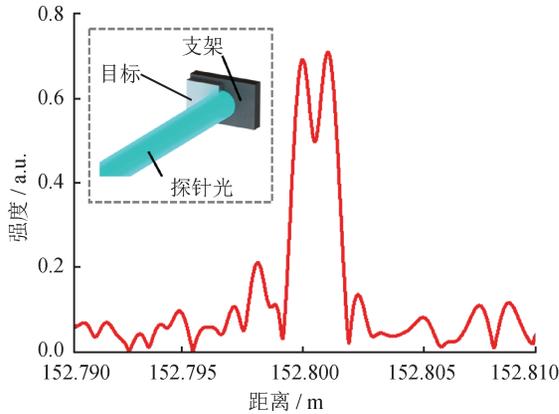
利用该系统测量152 m距离处的铝块目标, 结果如图16(a)、(b)所示, 绝对距离测量分辨力优

于1 mm, 多次测量标准差小于70 μm 。图16(c)为激光回馈调频测距系统的灵敏度测试结果, 在测

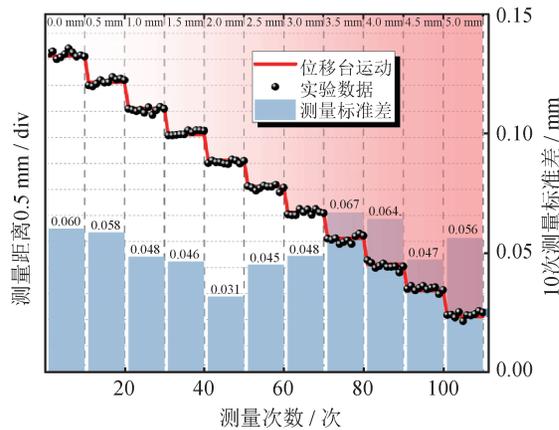
量光路中插入可调衰减器，测量系统在不同衰减率下的信噪比。由拟合结果估算系统的极限为-127.33 dB，同时激光器输出光功率为230 μW，因此系统可响应的回波功率为0.042 5 fW。基于回馈的高灵敏特性，激光回馈调频绝对测距系统可

实现数百米距离内的非合作目标绝对距离测量。

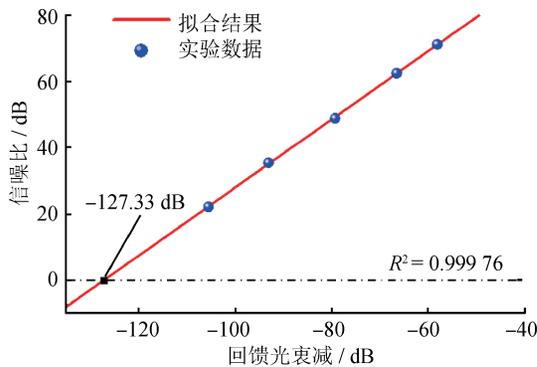
将激光回馈调频测距系统与扫描器件结合，对被测目标的表面扫描测距，可实现物体的表面成像^[35]。以距离70 m处的人体模特为目标进行绝对测距成像实验，结果如图17所示，可以清晰地看见衣物的皱褶，证明回馈测距成像系统具有较高的分辨力，有望制成激光雷达，应用于大型设备装配、目标绝对定位等场景。



(a) 分辨力测量
(a) Resolution measurement



(b) 相对精度测量
(b) Measurement of accuracy



(c) 灵敏度探测结果
(c) Sensitivity measurement

图16 激光回馈调频测距系统性能^[34]

Fig.16 Resolution and accuracy of laser feedback frequency modulation absolute distance measurement system^[34]

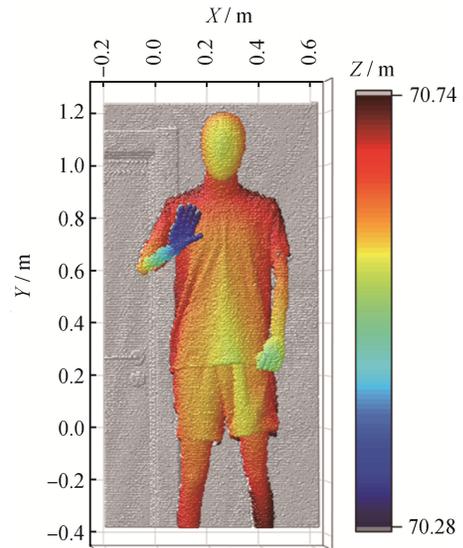


图17 对人体模特的回馈调频测距扫描成像^[35]

Fig.17 Scanning imaging of laser feedback frequency modulation absolute distance measurement to a human body model^[35]

2.5 其他应用

表面等离子共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)是一种检测介质折射率变化的光学传感技术，由于其具有实时检测、免样本标记和高灵敏等优势，在病毒检测、环境监控、药物筛选等领域具有广泛应用价值。传统强度调制型SPR的折射率分辨力只能达到 10^{-5} RIU量级。本课题组将激光移频回馈与SPR技术相结合^[36-37]，搭建了激光移频回馈的SPR测量系统，利用回馈效应的高灵敏度特性提高SPR系统的最小光强灵敏度，该系统测得折射率分辨力为 5.88×10^{-8} RIU，相较传统SPR系统的灵敏度高2~3个数量级，同时该系统采用了频率复用的补偿方法，具有长期稳定性。系统结构如图18所示。

利用该系统开展新型冠状病毒特征蛋白检测实验，结果如图19所示，系统对新冠病毒刺突蛋

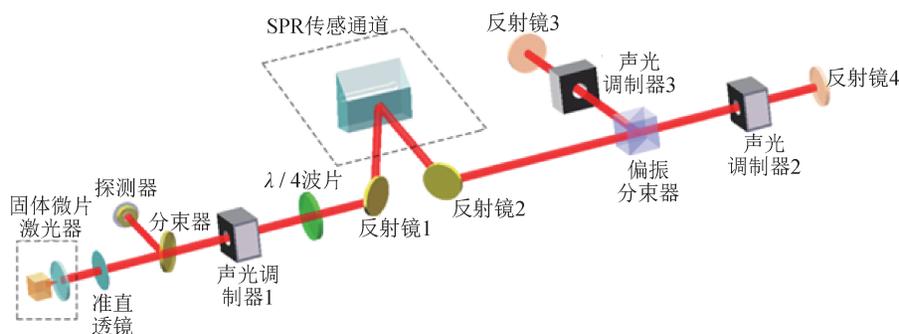
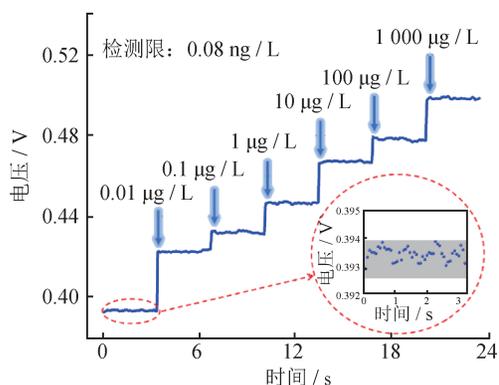


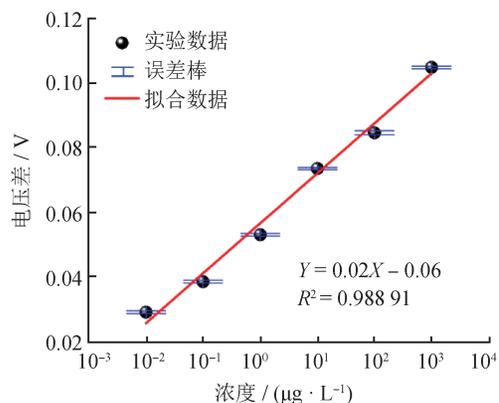
图 18 结合激光移频回馈的 SPR 测量系统

Fig.18 SPR measurement system combined with laser frequency shift feedback



(a) 不同浓度新冠刺突抗原对应的 SPR 传感器电压强度信号

(a) Voltage intensity signal of SPR sensor corresponding to different concentrations of SARS-CoV-2 spike antigen



(b) 响应电压随溶液浓度的拟合

(b) Response voltage changes as a function of solution concentrations and the fitting

图 19 基于激光回馈 SPR 的新冠病毒刺突蛋白检测^[36]

Fig.19 Covid-19 spike protein detection based on laser feedback surface plasmon resonance^[36]

白抗原的检测限为 0.08 ng/L，且响应电压随溶液浓度变化的线性度良好。应用于多靶标生化传感研究，对微囊藻毒素、汞离子和雌激素进行检测，检测限分别达到 3.9、70、0.7 ng/L^[38]，展示了系统

在多靶标生化传感中的通用性和应用潜力。在对雌激素的检测中，应用金标二抗增敏策略将系统的检测能力提高了 2 个数量级，证明了生化增敏策略与激光移频回馈 SPR 传感系统的兼容性。

本课题组还开展了微腔激光器中的激光回馈效应研究^[39-40]，搭建了基于回馈增益的微流道微腔激光传感系统，系统如图 20 所示。泵浦光通过锥形光纤耦合到微腔中，激发拉曼激光后，被耦合至同一根光纤中进行传输。使用一对声光调制器对微腔拉曼激光进行频移调制，调制光通过环形器返回到微腔中并调制激光器的输出特性，并产生回馈信号增益。微管腔内部的样品特性变化会导致激光弛豫频率的变化以及回馈干涉信号强度的变化。通过对移频信号解调分析，可以得出待测目标的变化信息。

使用该微流道微腔激光传感系统开展了折射率传感测量实验。实验测量了不同浓度 NaCl 溶液的实时响应强度，结果如图 21 所示，浓度变化的台阶清晰可见，且具有较好的线性响应。利用拟合曲线得到响应灵敏度为 1.246×10^5 mV/RIU，计算得出系统的折射率分辨力为 8.18×10^{-7} RIU。这一结果优于大多数报导的基于微腔的传感系统，证明了激光移频回馈增益对微流道微腔激光传感系统的有效性，能够检测出样本的微小折射率变化过程。

3 激光回馈技术研究总结

本课题组对激光回馈效应的机理和应用进行了长期研究，针对回馈测量系统空程补偿、寄生噪声、热蠕动等问题，先后提出了频率复用、偏振复用、(准)共路等解决方法，最终实现了多个

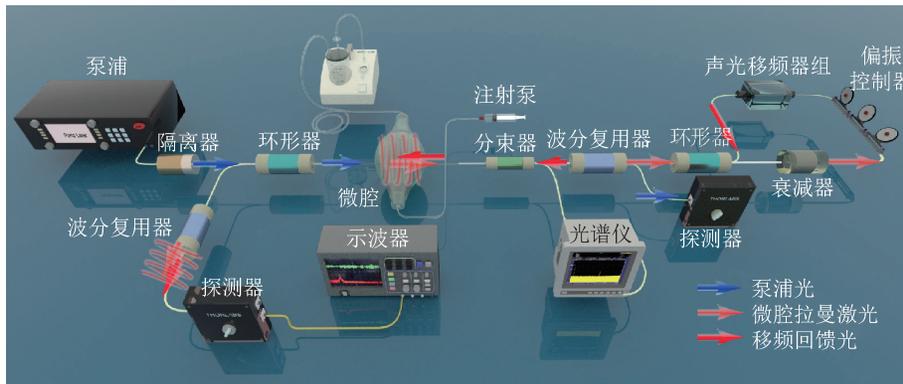


图20 基于反馈增益的微流道微腔激光传感系统

Fig.20 Microchannel microcavity laser sensing system based on laser feedback

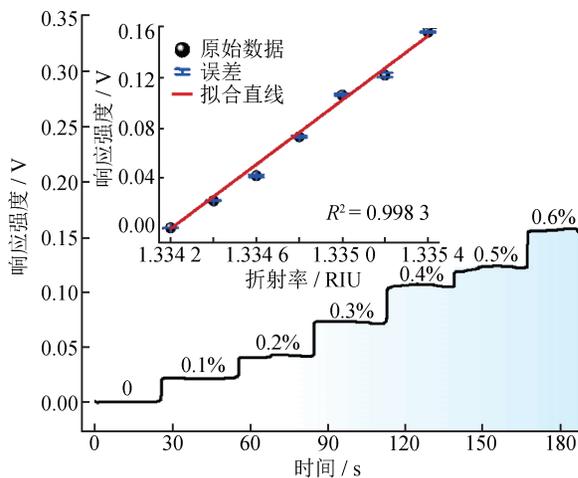


图21 折射率传感测量结果

Fig.21 Measurement of refractive index

回馈精密测量系统的仪器化。除了激光回馈干涉仪外，激光回馈全周角测量、调频连续波绝对测距等系统均已实现仪器化，主要性能指标达到行业内领先水平，正在努力推广应用。同时，本课题组还积极开展医工交叉研究，实现了基于激光回馈的生物组织大纵深成像和高灵敏折射率生化检测技术，为公共卫生、环境保护和食品安全领域提供了高精度检测的新方法。

国内外对激光回馈效应开展研究的课题组较多，已发表了大量的研究成果。国内除本课题组外，其他研究激光回馈效应的课题组包括南京师范大学的王鸣课题组、安徽大学的吕亮课题组、东北石油大学的高丙坤课题组、郑州大学的叶会英课题组、哈尔滨工业大学的李成伟课题组等，国外的课题组包括日本的 OTSUKA K 课题组、意大利的 DONATI S 课题组、澳大利亚的 RAKIĆ A D 课题组、法国的 BOSCH T 课题组等。近年来较新颖

的研究方向有基于 VCSEL 激光器和太赫兹激光器的回馈效应研究等。VCSEL 激光器具有低阈值电流受激发射、易于片上集成、低成本制造等优点，与激光回馈效应的高灵敏度特性相结合，有望研制出新型小型化低功耗传感器件。太赫兹波因其对非金属材料良好的穿透能力，常用于对物体内部成像，应用激光回馈技术可增强其成像的分辨力和深度，在医疗诊断、危险物检测等领域具有较大应用前景。

4 结束语

综上所述，激光回馈干涉测量技术因其高灵敏度、不依赖靶镜等优点备受关注。在测量分辨力和量程方面，回馈干涉仪与迈克尔逊干涉仪基本持平，而在光路结构方面，回馈干涉仪更为简单，且具有自准直的特性，可以预见未来激光回馈干涉将作为一种先进的测量手段，为众多精密测量应用提供新的解决方案。

“没有测量就没有科学”，随着科学研究和工程技术的不断进步，对精密测量的标准也越来越高，如何实现更高的分辨力、更大的测量范围、更快的测量速度是精密计量领域的迫切需求与持久目标。本课题组将在现有研究成果的基础上，不断探索和创新，提出新的测量原理和技术，进一步提升激光回馈干涉测量仪器的性能指标，为推动精密测量技术发展做出更重要的贡献。

参考文献

[1] TAIMRE T, NIKOLIC M, BERGLING K, et al. Laser feedback interferometry: a tutorial on the self-mixing effect for coherent sensing[J]. Adv. in Opt. and Photon.

- 2015, 7(3): 570-631.
- [2] LI J, NIU H, NIU Y X. Laser feedback interferometry and applications: a review[J]. *Opt. Engin.*, 2017, 56(5).
- [3] KING P G, STEWARD G J. Metrology with an optical maser[J]. *New Sci.*, 1963, 17(180): 14.
- [4] DONATI S, GIULIANI G, MERLO S. Laser - diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(1): 113-119.
- [5] 禹延光, 强锡富, 魏振禄, 等. 差动型激光自混合干涉式位移测量系统[J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1269-1273.
- YU Y G, QIANG X F, WEI Z L, et al. A differential displacement system using laser self-mixing interference effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1269-1273. (in Chinese)
- [6] ROOS P A, STEPHENS M, WIEMAN C E. Laser vibrometer based on optical-feedback-induced frequency modulation of a single - mode laser diode [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(34): 6754-6761.
- [7] GAO Y, YU Y, XI J, et al. Simultaneous measurement of vibration and parameters of a semiconductor laser using self-mixing interferometry [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(19): 4256-4263.
- [8] SHINOHARA S, MOCHIZUKI A, YOSHIDA H, et al. Laser Doppler-velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor-laser diode[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(9): 1417-1419.
- [9] ALEXANDROVA A S, TZOGANIS V, WELSCH C P. Laser diode self - mixing interferometry for velocity measurements[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3).
- [10] SUZUKI T, SASAKI O, MARUYAMA T. Phase-locked laser diode interferometry for surface profile measurement [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(20): 4407-4410.
- [11] MOWLA A, DU B W, TAIMRE T, et al. Confocal laser feedback tomography for skin cancer detection [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(9): 4037-4048.
- [12] TIAN M W, LI M F, XU X, et al. A coherent detection method with 10^6 higher intensity response sensitivity than normal heterodyne interferometry [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(14): 4649-4654.
- [13] 李强, 任冬梅, 朱镇宇, 等. 激光干涉仪在纳米测量中的典型应用[J]. *计测技术*, 2023, 43(1): 91-101.
- LI Q, REN D M, ZHU Z Y, et al. Typical applications of laser interferometer in nanometer measurement [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(1): 91-101. (in Chinese)
- [14] 张书练, 谈宜东. 第三代激光干涉仪[J]. *计测技术*, 2018, 38(3): 43-59.
- ZHANG S L, TAN Y D. Third - generation laser interferometer[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(3): 43-59. (in Chinese)
- [15] HAO H, GUO D M, WANG M, et al. Micro-displace sensor based on self-mixing interference of the fiber laser with phase modulation [J]. *Photonics Sensors*, 2014, 4(4): 379-384.
- [16] 夏梵华, 王慧鹏, 夏巍, 等. 基于VCSEL结电压的自混合干涉位移测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 171-175.
- XIA F H, WANG H P, XIA W, et al. Self - mixing interference displacement measurement based on Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser junction voltage[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 171-175. (in Chinese)
- [17] KASHYAP M, TORNIAINEN J, BERTLING K, et al. Coherent terahertz laser feedback interferometry for hydration sensing in leaves [J]. *Optics Express*, 2003, 31(15): 23877-23888.
- [18] GELENS L, MASHAL L, BERI S, et al. Excitability in semiconductor microring lasers: experimental and theoretical pulse characterization [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(6).
- [19] OTSUKA K. Effects of external perturbations on LiNdP₄O₁₂ lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979, 15(7): 655-663.
- [20] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection - laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [21] DE GROOT P J, GALLATIN G M, MACOMBER S H. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter - modulated laser diode [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(21): 4475-4480.
- [22] TAN Y D, ZHANG S L, ZHANG S, et al. Response of microchip solid-state laser to external frequency - shifted feedback and its applications [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3.
- [23] TAIMRE T, NIKOLIC M, BERTLING K, et al. Laser feedback interferometry: a tutorial on the self-mixing effect for coherent sensing[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(3): 570-631.
- [24] WAN X J, LI D, ZHANG S L. Quasi-common-path laser feedback interferometry based on frequency shifting and multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 367-369.

- [25] ZHU K Y, GUO B, LU Y Y, et al. Single-spot two-dimensional displacement measurement based on self-mixing interferometry [J]. *Optica*, 2017, 4 (7) : 729-735.
- [26] CHATTERJEE S, KUMAR Y P. Measurement of two-dimensional small angle deviation with a prism interferometer [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(27): 4900-4906.
- [27] ZHANG S, TAN Y D, ZHANG S L. Non-contact angle measurement based on parallel multiplex laser feedback interferometry[J]. *Chinese Physics B*, 2014. 23(11).
- [28] XU X, DAI Z R, WANG Y F, et al. High sensitivity and full-circle optical rotary sensor for non-cooperatively tracing wrist tremor with nanoradian resolution [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 69 (9) : 9605-9612.
- [29] XU X, DAI Z R, TAN Y D. A dual-beam differential method based on feedback interferometry for noncontact measurement of linear and angular displacement [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70 (6): 6405-6413.
- [30] OTSUKA K. Long-haul self-mixing interference and remote sensing of a distant moving target with a thin-slice solid-state laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 1069-1072.
- [31] XU Z, LI J Y, ZHANG S L, et al. Remote eavesdropping at 200 meters distance based on laser feedback interferometry with single-photon sensitivity[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141.
- [32] TIAN M W, LI M F, TAN Y D. A polarization-modulated laser frequency-shifted feedback system reducing the parasitic noise intensity by about three orders of magnitude [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41 (18) : 6102-6107.
- [33] SHINOHARA S, YOSHIDAC H, IKEDA H, et al. Compact and high-precision range finder with wide dynamic-range and its application[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1992, 41(1): 40-44.
- [34] WANG Y F, XU X, DAI Z R, et al. Frequency-swept feedback interferometry for noncooperative-target ranging with a stand-off distance of several hundred meters [J]. *Photonix*, 2022, 3: 1-20.
- [35] WANG Y F, HUA Z Y, SHI J C, et al. Laser feedback frequency-modulated continuous-wave LiDAR and 3-D imaging [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-9.
- [36] DAI Z R, XU X, WANG Y F, et al. Surface plasmon resonance biosensor with laser heterodyne feedback for highly-sensitive and rapid detection of COVID-19 spike antigen[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2022, 206.
- [37] TAN J S, DAI Z R, ZHOU K M, et al. Ultrasensitive screening of endocrine-disrupting chemicals using a surface plasmon resonance biosensor with polarization-compensated laser heterodyne feedback [J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 95(22): 8687-8695.
- [38] TAN J S, DAI Z R, ZHOU K M, et al. An ultrasensitive and universal surface plasmonic biosensor for detection of micropollutants in aquatic environments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023 57(22): 8313-8322.
- [39] LI M F, WANG Y F, DAI Z R, et al. Dynamic evolution of microcavity raman laser subjected to frequency-shifted feedback and its application in laser spectrum encoding thermal sensing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2023, 29(1): 1-8.
- [40] LI M F, DAI Z R, TIAN M W, et al. Intracavity dynamics-based gain-assisted sensing with microtubule Raman microlaser[J]. *APL Photonics*, 2023, 8(8).

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 谈宜东(1980—), 男, 清华大学精密仪器系系长聘教授、博士生导师。国家级人才计划入选者(2023), 教育部创新团队负责人(2021), 英国皇家学会“牛顿高级学者”(2019), 基金委优青(2017)。主要从事激光技术和精密测量方面的教学科研工作。曾在美国加州理工学院做访问学者。

所在课题组团队长期从事精密测量用新型激光器件、技术及其应用基础研究。提出了内雕应力双频产生原理, 研制成新原理双频激光器, 解决了大频差和高功率无法兼得的难题, 研制成超精密激光干涉仪, 攻克了工件台纳米精度定位测量的卡脖子技术, 实现了超精密激光干涉仪的自主可控; 针对航空航天和前沿科学领域的非合作目标测量难题, 提出激光回馈超高灵敏测量原理并研制了仪器, 应用于国家重大工程, 解决了无靶镜纳米测量的难题; 进一步开展医工交叉研究, 实现了生物组织的大纵深成像和高灵敏折射率生化检测, 为公共卫生、环境保护和食品安全领域提供了新原理的高精度测试技术及仪器。