

激光与光电子学进展

大频差双腔双频 Nd:YAG 激光器合成波绝对距离干涉测量系统设计

焦明星^{1*}, 江飞¹, 苏娟², 邢俊红¹, 刘芸¹, 连天虹¹, 刘健宁¹, 王晔¹, 李鹤群¹¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;²西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要 为了实现高精度绝对距离测量,提出了双腔双频 Nd:YAG 激光器(TCDFL)合成波绝对距离干涉测量方案。以正交解调 Pound-Drever-Hall 稳频的大频差 TCDFL 作光源,采用马赫-曾德尔干涉仪结构,设计了双频激光合成波绝对距离外差干涉测量系统,获得了两路同频外差干涉信号,对其进行比相测量,得到合成波干涉条纹的小数级次;对被测距离进行粗测,可唯一确定合成波干涉条纹的整数级次,从而实现绝对距离测量。建立了频差为 24 GHz 的二极管泵浦 1064 nm 正交线偏振 TCDFL 合成波长标定与绝对距离干涉测量实验系统,实验结果表明:空气中的合成波长标定值为 12.4614 mm,其标准差为 0.13 μm ;当被测绝对距离为 900 mm 时,其重复测量平均值为 899.3851 mm,标准差和测量不确定度分别为 1.36 μm 和 4.08 μm 。该实验研究为今后研究开发超精密绝对距离干涉测量仪奠定了坚实基础。

关键词 大频差双腔双频 Nd:YAG 激光器; 正交解调 Pound-Drever-Hall 稳频; 绝对距离干涉测量; 合成波长; 马赫-曾德尔干涉仪; 光外差

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222685

Design of Synthetic-Wave Absolute-Distance Interferometric System Using Two-Cavity Dual-Frequency Nd:YAG Laser with Large Frequency-Difference

Jiao Mingxing^{1*}, Jiang Fei¹, Su Juan², Xing Junhong¹, Liu Yun¹, Lian Tianhong¹,
Liu Jianning¹, Wang Xian¹, Li Hequn¹¹School of Mechanical and Precision Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, Shaanxi, China;²Key Laboratory of Photoelectric Logging and Detecting of Oil and Gas, Ministry of Education, Xi'an Shiyou
University, Xi'an 710065, Shaanxi, China

Abstract A synthetic-wave absolute-distance interferometry system is proposed to achieve high-accuracy absolute-distance measurements. In this system, the light source is a quadrature-demodulated Pound-Drever-Hall frequency-stabilized two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser (TCDFL) with a significant frequency difference. A Mach-Zehnder interferometry structure is employed, and a synthetic-wave absolute-distance heterodyne interferometric system is designed; hence, two heterodyne interference signals with the same frequency can be obtained. The phase-difference of both heterodyne interference signals is measured to determine the fractional order of the synthetic-wave interference fringes. In addition, the integer order of the synthetic-wave interference fringes can be uniquely determined by preliminarily estimating the measured distance. Thus, absolute-distance measurements can be achieved. An experimental system of synthetic-wavelength calibration and absolute-distance interferometric measurement is established using the diode-pumped orthogonally and linearly polarized TCDFL with a frequency-difference of 24 GHz at 1064 nm. The experimental results show that the synthetic-wavelength in the air is 12.4614 mm with a standard deviation of 0.13 μm . A repeated measurement average of 899.3851 mm is obtained at a measured absolute-distance of 900 mm. Correspondingly,

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2022-11-18; 录用日期: 2022-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(51875455, 62075180, 52004213, 52205067)、西安市科技计划项目(22GXFW0089)

通信作者: *2237663196@qq.com

the standard deviation and measurement uncertainty are estimated to be $1.36 \mu\text{m}$ and $4.08 \mu\text{m}$, respectively. This experimental study lays a solid foundation for future research and development of high-precision absolute-distance interferometers.

Key words two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser with large frequency-difference; quadrature-demodulated Pound-Drever-Hall frequency stabilization; absolute-distance interferometric measurement; synthetic-wavelength; Mach-Zehnder interferometer; optical heterodyne

1 引言

绝对距离测量是一种无导轨测距技术,广泛应用于航空、航天、航海、智能制造、水力发电和大地测量等领域,为解决大尺寸精密测量和超精密测量难题提供了有效的技术支撑。目前,常用的绝对距离测量方法主要包括脉冲飞行时间法、相位法、合成波干涉法、调频波干涉法和光频梳法等^[1-7],其中合成波干涉法是一种以小波重合法为基础的高精度无导轨绝对测距方法,引起国内外专家学者的极大关注和浓厚的研究兴趣。2014年,哈尔滨工业大学谭久彬院士科研团队^[8]报道了一种采用双频梳作光源的绝对距离外差干涉测量系统,在 10 m 测量范围内,绝对距离测量精度优于 $15 \mu\text{m}$;2015年,他们又开展了 20 m 测量范围的绝对距离测量技术研究^[9],相对测距精度达到了 5.3×10^{-7} 。2016年,浙江理工大学陈本永教授等^[10]研制了一种激光合成波长纳米位移测量干涉仪,实现了毫米量程和纳米精度位移测量;2020年,他们发明了一种锁定至动态边带的可变合成波长绝对距离测量装置与方法^[11],以解决绝对距离测量中难以从大到小连续精确构建多级合成波长的问题。2018年,清华大学吴冠豪教授等^[12]报道了一种基于合成波长的光学频率梳外差干涉绝对距离测量系统,在连续测量 350 mm 范围内,绝对距离测量精度达到了 75 nm。2020年,天津大学曲兴华教授等^[13]提出了一种基于电光调制光频梳的光谱干涉测距方法,在测量范围 1 m 内,实现了优于 $\pm 15 \mu\text{m}$ 的绝对测距精度。

合成波绝对距离干涉测量技术研究内容主要包括激光光源技术、合成波干涉条纹小数级次测量技术和空气折射率修正技术等,其中激光光源技术是该领域的研究难点。目前,用于合成波绝对距离干涉测量的双频激光器主要是双纵模 He-Ne 激光器^[14],受 Ne 原子增益线宽的限制,双频激光频差较小(600 MHz~1 GHz),相应的合成波长较长(约为 500 mm~300 mm),在测相精度有限的情况下,测距精度难以提高。与气体激光器相比,固体激光器具有很宽的出光带宽,可以产生频差从几吉赫兹到几百吉赫兹甚至几太赫兹的大频差可调谐双频激光输出,因此,大频差可调谐双频固体激光器在高精度绝对距离干涉测量领域具有光明的应用前景。

2006年,焦明星教授^[15]发明了基于双折射滤光片选模原理的激光二极管(LD)泵浦共增益大频差双腔

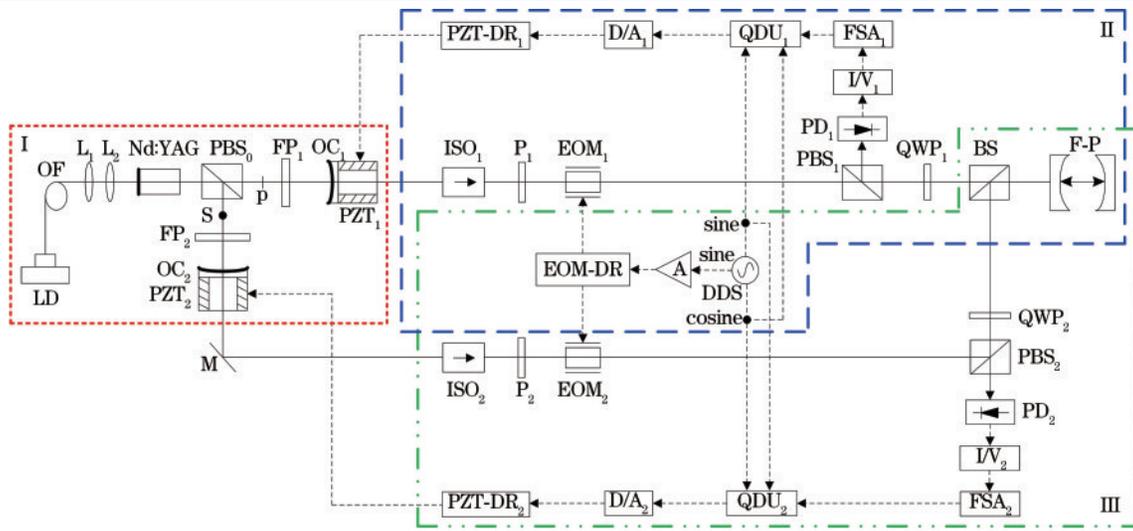
双频 Nd:YAG 激光器(TCDFL),并带领研究组成员相继开展了用于绝对距离干涉测量的共增益大频差 TCDFL 振荡理论与关键技术等方面的研究,主要包括双频激光产生、频差调谐、频差稳定等理论与技术研究^[16-19]。特别是近几年,本研究组在双腔双频全固态激光器样机研制及其正交解调 Pound-Drever-Hall(QD-PDH)稳频技术研究工作中取得了重要进展^[20-22],并应用 QD-PDH 稳频技术,将频差为 24 GHz 的 1064 nm 正交线偏振 TCDFL 直线腔和直角腔的谐振频率同时稳定在同一台 Fabry-Perot(F-P)参考腔的 2 个不同谐振频率处,实现了双频激光频率和频差的稳定^[23]。本文采用这种 QD-PDH 稳频的 LD 泵浦 1064 nm 正交线偏振 TCDFL 作光源,设计了双频激光合成波绝对距离干涉测量系统,并开展了合成波长标定与绝对距离测量技术实验研究。

2 QD-PDH 稳频 TCDFL 系统

QD-PDH 稳频 TCDFL 系统如图 1 所示,该系统由 3 部分组成:LD 泵浦 1064 nm 正交线偏振 TCDFL(I)、直线腔 p 偏振单频激光 QD-PDH 稳频子系统(II)、直角腔 s 偏振单频激光 QD-PDH 稳频子系统(III)。为了将 TCDFL 直线腔和直角腔输出激光频率同时锁定在 F-P 参考腔的两个不同谐振频率上,要求 TCDFL 的频差值等于 F-P 参考腔自由光谱范围的整数倍。

2.1 TCDFL 系统组成及主要特性^[20]

在图 1 第 I 部分中,从 LD 尾纤 OF 出射的 808 nm 泵浦光经透镜组 L_1 、 L_2 会聚到 Nd:YAG 晶体左端面,该端面镀有对 1064 nm 振荡激光高反、同时对 LD 泵浦光增透的双色介质膜,Nd:YAG 晶体右端面镀 1064 nm 增透膜;沿透镜组 L_1 、 L_2 光轴并在 Nd:YAG 晶体的右侧依次放置偏振分光棱镜 PBS_0 、F-P 标准具 FP_1 和球面输出耦合镜 OC_1 , OC_1 镀 1064 nm 部分透射介质膜(透射率为 2.2%),Nd:YAG 晶体双色介质膜与 OC_1 部分透射介质膜构成直线腔;沿垂直透镜组光轴方向并在 PBS_0 对应位置处依次放置 F-P 标准具 FP_2 和球面输出耦合镜 OC_2 , OC_2 镀膜与 OC_1 相同,Nd:YAG 晶体双色介质膜与 OC_2 部分透射介质膜构成直角腔。2 个谐振腔共用相同的 Nd:YAG 晶体,分别包含激光纵模选择元件 F-P 标准具 FP_1 和 FP_2 ,实现 1064 nm 激光 p 分量和 s 分量分别在直线腔和直角腔内同时以单纵模振荡,从而获得 1064 nm 正交线偏振双频激光输出。压



LD: laser diode; OF: optical fiber; L: lens; PBS: polarizing beam splitter; FP: Fabry-Perot etalon; OC: output coupler; PZT: piezoelectric transducer; ISO: optical isolator; P: polarizer; EOM: electro-optic modulator; DDS: direct digital synthesizer; EOM-DR: EOM driver; QWP: quarter wave-plate; BS: beam splitter; F-P: Fabry-Perot reference cavity; PD: photodetector; I/V: current-to-voltage; FSA: frequency-selective amplifier; QDU: quadrature-demodulated unit; D/A: digital-to-analog; PZT-DR: PZT driver

图 1 QD-PDH 稳频 TCDL 频差稳定系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the frequency-difference stabilizing system for the TCDL using QD-PDH frequency stabilizing method

电陶瓷管 PZT₁和 PZT₂分别粘结在输出耦合镜 OC₁和 OC₂上,通过微调直线腔和直角腔的腔长可实现双频 Nd:YAG 激光器输出激光频率的稳定,并且激光器的频差主要由腔内 F-P 标准具 FP₁和 FP₂的倾斜角度决定。

采用熔融石英制作 F-P 标准具,FP₁和 FP₂基片直径、厚度分别为 8 mm、0.5 mm,两通光面上所镀介质膜在 1064 nm 波长处的反射率均为 90%。建立了 LD 泵浦 1064 nm 共增益 TCDL 实验系统,并分别研究了激光单纵模选择、双频激光振荡、频差调谐、振荡阈值和输出功率以及偏振态等特性。研究表明:通过合理设计

F-P 标准具 FP₁和 FP₂的结构参数,并微调腔内 F-P 标准具的倾斜角度,可以实现 p 偏振和 s 偏振 1064 nm 激光同时以单纵模振荡,从而获得频差可调谐的正交线偏振双频激光输出;当 LD 泵浦功率为 4 W 时,用激光光谱分析仪 (Thorlabs, LSA-2121)测得的 24 GHz 频差 1064 nm 双频激光的振荡光谱如图 2 所示;对频差为 24 GHz 的 LD 泵浦 1064 nm 正交线偏振 TCDL,直线腔和直角腔输出功率与 LD 泵浦功率的变化关系如图 3 所示,可以看出,直线腔和直角腔的阈值泵浦功率分别为 1.9 W 和 2 W,当 LD 泵浦功率为 6.1 W 时,直线腔和直角腔的输出功率分别为 229 mW 和 190 mW。

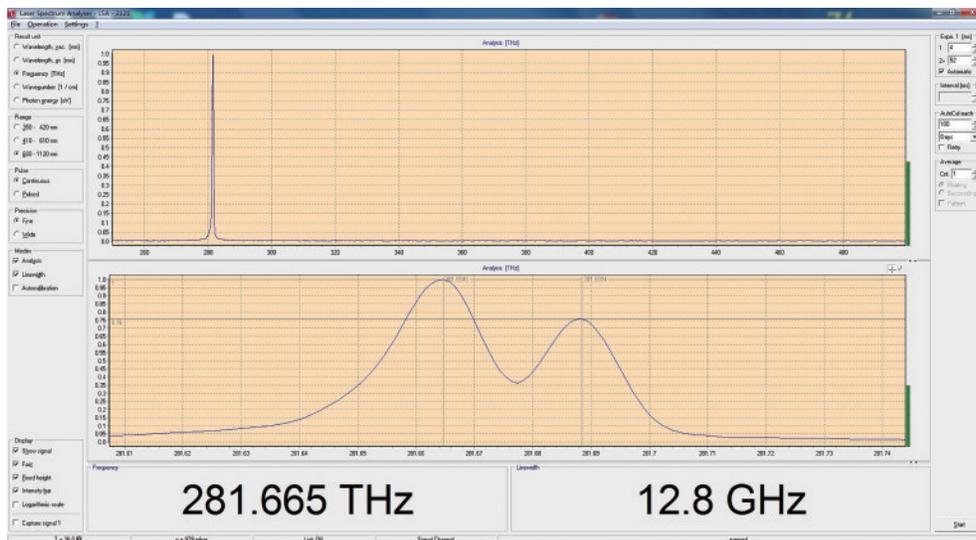


图 2 频差为 24 GHz 的双频激光振荡光谱

Fig. 2 Oscillating spectra of dual-frequency laser with a frequency-difference of 24 GHz

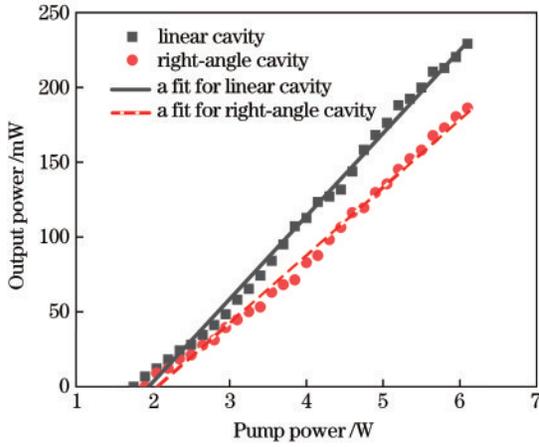


图 3 激光输出功率与 LD 泵浦功率的关系

Fig. 3 Relationship between the laser output power and LD pump power

2.2 QD-PDH 稳频系统与鉴频、稳频特性^[23]

在图 1 第 II 部分,从直线腔输出的 p 偏振光依次通过光隔离器 ISO₁ 和起偏器 P₁ 后进入电光相位调制器 EOM₁ 中进行相位调制。直接数字频率合成器 DDS 产生三路同频正弦和余弦信号,其中一路正弦信号经过功率放大后作为两个稳频单元的相位调制信号,另两路正弦和余弦信号作为 2 个稳频单元的解调参考信号。调制后的激光束经过 PBS₁、1/4 波片 QWP₁ 和分光棱镜 BS 后垂直入射至 F-P 参考腔,由 F-P 参考腔反射后再次经过 QWP₁ 和 PBS₁ 并在光电探测器 PD₁ 处进行光外差干涉。干涉信号经过流压转换 I/V₁ 和选频放大器 FSA₁ 对 10 MHz 信号进行放大和选频处理,然后与两路参考信号在正交解调单元 QDU₁ 中进行同步模拟解调,得到直线腔频率漂移误差信号的同相分量和正交分量。

在图 1 第 III 部分,从直角腔输出的 s 偏振光经反射镜 M 后依次通过 ISO₂ 和 P₂, 然后进入 EOM₂ 中进行相位调制。调制后的激光束经过 PBS₂、QWP₂ 和 BS 后垂直入射至 F-P 参考腔,由 F-P 腔反射后再次经过 QWP₂ 和 PBS₂ 并在 PD₂ 处进行光外差干涉。干涉信号经过 I/V₂ 和 FSA₂ 对 10 MHz 信号进行放大和选频处理,然后与两路参考信号在正交解调单元 QDU₂ 中进行同步模拟解调,得到直角腔频率漂移误差信号的同相分量和正交分量。

采用同一个模数转换器 A/D 同步采集直线腔和直角腔获得的四路频率漂移误差信号分量,并传输至上位机 HC 中进行数字相敏检波运算和比例积分控制运算得到两路频率纠偏信号。该信号经数模转换器 D/A₁ 和 D/A₂ 转换为模拟信号,并输入至压电陶瓷驱动 PZT-DR 单元进行信号放大和叠加处理,然后将两路控制信号传输至粘结在直线腔和直角腔输出镜上的 PZT 中,反馈调节直线腔和直角腔的腔长,将双频激光频率同时锁定到同一台 F-P 参考腔的两个不同谐振频率上,从而实现双频激光频率差稳定。

以频差为 24 GHz 的 LD 泵浦 1064 nm 正交线偏振 TCDL 作为稳频对象,采用自由光谱范围为 375 MHz、精细度为 421 的 F-P 参考腔作为稳频基准,建立了 TCDL 直线腔和直角腔 QD-PDH 稳频实验系统,并分别研究了鉴频特性和稳频特性。直线腔和直角腔 QD-PDH 稳频子系统的鉴频曲线如图 4 所示,由图 4(a) 可以计算得到直线腔稳频子系统误差信号的线性动态范围为 5.08 MHz,鉴频灵敏度为 222.72 mV/MHz;由图 4(b) 可以计算得到直角腔稳频子系统误差信号的线性动态范围为 4.87 MHz,鉴频灵敏度为 208.98 mV/MHz。

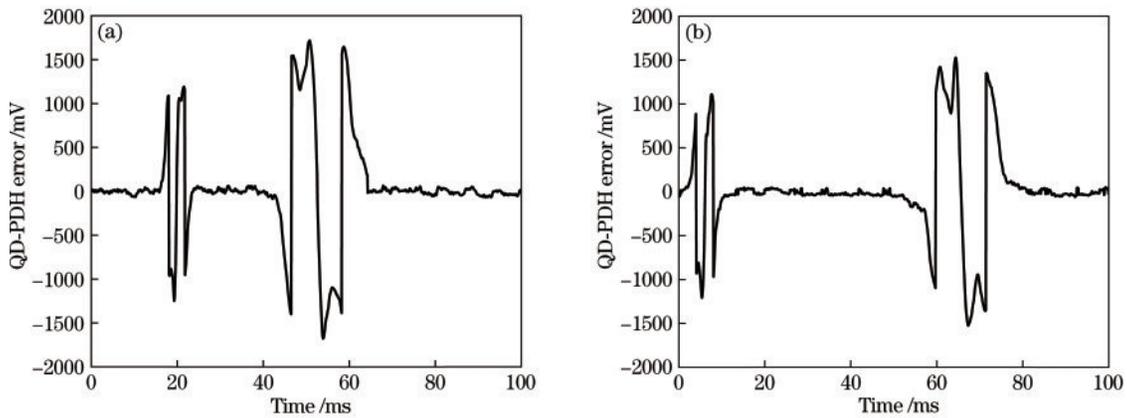


图 4 QD-PDH 稳频子系统鉴频曲线。(a) 直线腔;(b) 直角腔

Fig. 4 Frequency discriminating curves of the QD-PDH. (a) Linear cavity; (b) right-angle cavity

将直线腔和直角腔激光频率分别锁定 F-P 参考腔的不同谐振频率上,锁频时长为 1 h,锁频后双腔 QD-PDH 稳频子系统的误差信号变化如图 5 所示。由图 5 可知,当误差信号分别取图 5 中最大偏移电压值 77 mV 和 74.2 mV 时,得到直线腔和直角腔激光频率

的最大漂移量分别不超过 0.35 MHz 和 0.36 MHz。当激光器直线腔和直角腔分别锁频后,双频激光频率差的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,最大频差变化量为 0.55 MHz,根据阿伦方差计算可得,直线腔和直角腔激光频率稳定性分别优于 2.3×10^{-11} 和 2.7×10^{-11} ,

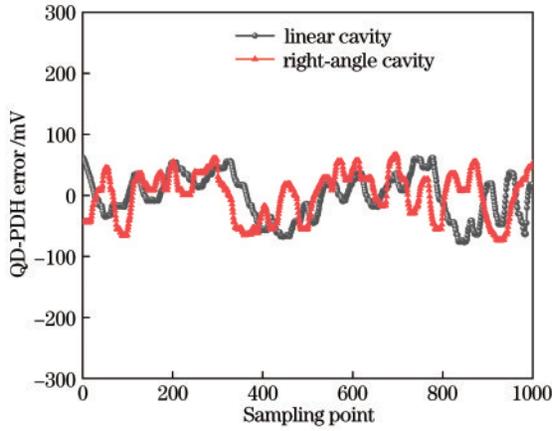


图5 QD-PDH 稳频子系统误差信号
Fig. 5 Error signals of the frequency-locked QD-PDH subsystems

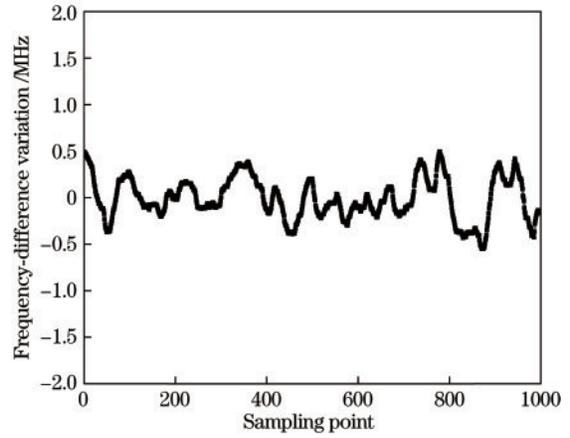


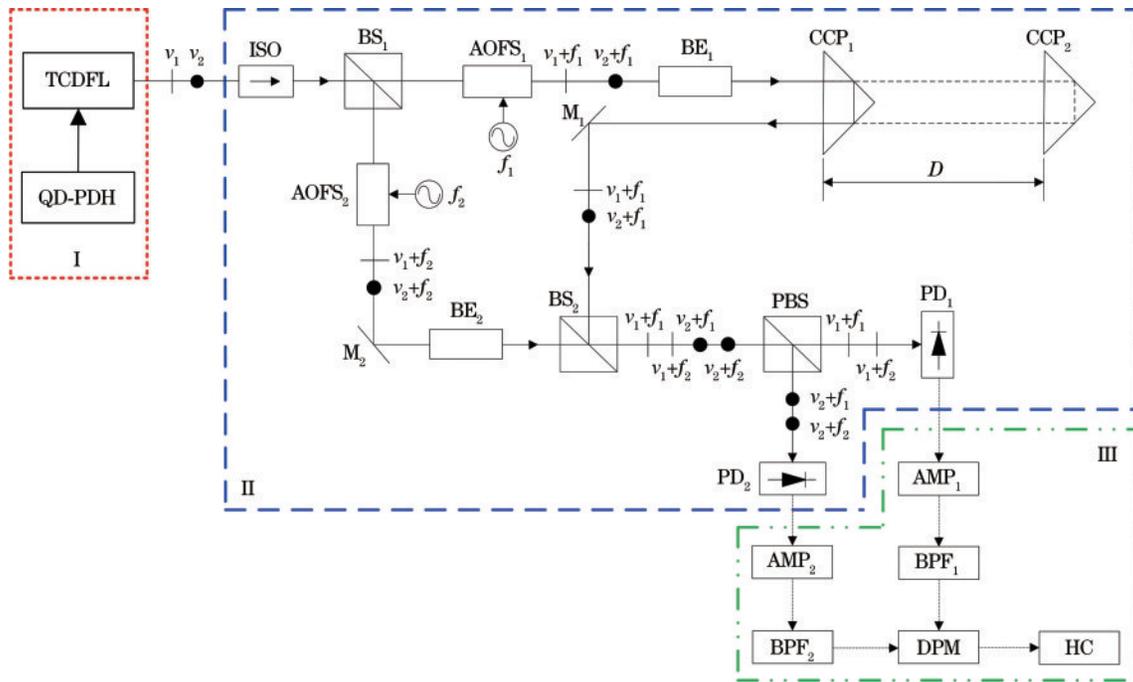
图6 锁频后双频激光器的频差变化曲线
Fig. 6 Frequency-difference variation curve of the frequency-locked dual-frequency Nd : YAG laser

相应的频差稳定性优于 4.2×10^{-7} 。

3 绝对距离干涉测量系统组成及原理

TCDFL 绝对距离干涉测量系统如图 7 所示, 该系

统以 QD-PDH 稳频的 1064 nm 正交线偏振 TCDFL (第 I 部分) 作光源, 在马赫-曾德尔干涉仪基础上构成绝对距离测量光学系统 (第 II 部分), 第三部分为干涉信号处理单元。



TCDFL: two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser; QD-PDH: quadrature-demodulated Pound-Drever-Hall frequency stabilization; ISO: optical isolator; BS: beam splitter; AOFS: acousto-optic frequency shifter; BE: beam expander; CCP: cube corner prism; M: mirror; PBS: polarizing beam splitter; PD: photodetector; AMP: amplifier; BPF: band-pass filter; DPM: digital phase meter; HC: host computer

图7 双频激光合成波绝对距离干涉测量系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of dual-frequency laser synthetic-wave absolute distance interferometric system

稳频后的 TCDFL 输出一束频率分别为 ν_1 和 ν_2 的同轴传输正交线偏振双频激光, 该双频激光束通过 ISO 后入射到分光棱镜 BS_1 中被均分成两束激光, 其中一束透过 BS_1 , 为测量光束, 另一束被 BS_1 反射, 为参考光束。测量光束通过驱动频率为 f_1 的声光移频器 $AOFS_1$ 后, 产生频率分别为 $\nu_1 + f_1$ 和 $\nu_2 + f_1$ 的双频

p 偏振光和 s 偏振光, 参考光束经过驱动频率为 f_2 的声光移频器 $AOFS_2$ 后, 产生频率分别为 $\nu_1 + f_2$ 和 $\nu_2 + f_2$ 的双频 p 偏振光和 s 偏振光, 且两台 AOFS 采用同源双路输出声光驱动器进行驱动。移频后的测量光束通过扩束镜 BE_1 后入射到角锥棱镜 CCP_1 上, 由 CCP_1 反射后再通过反射镜 M_1 将双频激光反射到分光棱镜

BS₂上;同时移频后的参考光束由反射镜 M₂反射并经过扩束镜 BE₂后将参考光束输入至分光棱镜 BS₂上,参考光束与测量光束在 BS₂处合光,输出一束频率分别为 $\nu_1 + f_1$ 、 $\nu_2 + f_1$ 、 $\nu_1 + f_2$ 、 $\nu_2 + f_2$ 的同轴传输 4 频激光。该激光束进入 PBS 中分为偏振态正交的双频激光,其中频率分别为 $\nu_1 + f_1$ 和 $\nu_1 + f_2$ 的双频 p 偏振光进入光电探测器 PD₁ 中,频率分别为 $\nu_2 + f_1$ 和 $\nu_2 + f_2$ 的双频 s 偏振光进入光电探测器 PD₂ 中,从而获得两路频率均为 $f_2 - f_1$ 的外差干涉信号。这两路同频外差干涉信号分别经过放大器 AMP 和带通滤波器 BPF 后,共同输入至数字相位计 DPM 中,通过 HC 控制并采集绝对距离起点和终点位置的相位差,计算得到合成波干涉条纹的小数级次;然后对被测距离进行粗测,可唯一确定合成波干涉条纹的整数级次,从而实现绝对距离测量。

通过 DPM 可以测得两路外差干涉信号的相位差 $\Delta\varphi$,该相位差与干涉仪的臂长差 L 的关系可表示为

$$\Delta\varphi = (4\pi L)/\lambda_s, \quad (1)$$

式中: λ_s 为合成波长,其大小可表示为

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{c}{\Delta\nu}, \quad (2)$$

式中: λ_1 、 λ_2 分别为频率为 ν_1 、 ν_2 的单频激光对应波长; c 为真空中的光速; $\Delta\nu$ 为双频激光频差。因此,被测距离 D 可表示为

$$D = (N + \epsilon)\lambda_s/2, \quad (3)$$

式中: N 、 ϵ 分别为合成波干涉条纹的整数级次和小数级次。小数级次 ϵ 可由干涉仪测得,整数级次 N 需要对被测距离进行粗测得到绝对距离粗测值 D_e ,且满足粗测误差不超过合成波长的 1/4,即

$$\Delta D_e < \lambda_s/4, \quad (4)$$

式中: ΔD_e 为粗测方法的测量误差。整数级次 N (经取整)即可唯一确定,即

$$N = \lfloor 2D_e/\lambda_s \rfloor. \quad (5)$$

4 实验结果及分析

建立了如图 7 所示的 TCDFL 合成波绝对距离干涉测量实验系统,合成波长标定过程与绝对距离测量过程相反,因此其实验系统基本相同。光源采用频差为 24 GHz 的 1064 nm 正交线偏振 TCDFL,其直线腔和直角腔的输出功率分别为 229 mW 和 190 mW,双频激光的频差稳定度优于 4.2×10^{-7} 。系统选用两套同源 AOFS (中国电子科技集团第 26 研究所, YSGMN-2/Q 型),其驱动频率分别为 70.04 MHz 和 70 MHz。PD (DH-GDT 系列, D020N) 的最短响应时间可达 2 ns,其最高带宽为 1 GHz。CCP 固定在高精密电控直线位移台 (卓立汉光公司, KA400-12-X 型) 上,其最大位移范围为 900 mm,重复定位精度为 $3 \mu\text{m}$ 。DPM (美国 Clarke-Hess 公司, 6000A 型) 的测相分辨率为

0.001°,测相精度为 0.1°。

4.1 合成波长标定

绝对距离测量是以两列光波的合成波长作为测量的基本单位,合成波长的表达式如式(2)所示,式(2)表示真空中的合成波长。双频激光在空气中产生的拍波合成波长与其频差及空气折射率之间存在如下关系:

$$\lambda_s = c/(n \cdot \Delta\nu), \quad (6)$$

式中: n 为测量环境的空气折射率。在此实验室环境中,为了减小绝对距离测量误差,开展绝对距离测量实验之前,需进行合成波长标定实验。

4.1.1 合成波长标定方法

在合成波长标定实验中,将 CCP 固定在电控直线位移台上,且采用位移台控制器进行驱动控制,以给定 CCP 一个已知标准位移 D_s 。LD 泵浦功率为 6.1 W,从 TCDFL 输出的一束正交线偏振双频激光进入合成波长标定系统中,具体实验步骤如下:首先,将 CCP 放置在位移台的起点位置(位移台的原点,以保证每次标定过程的起始位置相同),采用 DPM 测量 PD 输出的两路外差干涉信号的相位差;其次,设置 CCP 从起点出发连续移动 100 mm,并采用 DPM 观察连续移动过程中两路外差干涉信号相位差的变化规律并实时采集相位差信息;然后,当 CCP 移动至 100 mm 位移处时,同样采用 DPM 测量此时外差干涉信号的相位信息;最后,重复进行合成波长标定实验,求取合成波长平均值。同时由绝对距离表达式可知,当 CCP 移动距离为半个合成波长大小时,外差干涉信号的相位差恰好变化一个周期即 360°,相应的合成波干涉条纹整数级次变化 1,因此根据连续移动过程中外差干涉信号相位差的变化周期数确定合成波干涉条纹的整数级次。

4.1.2 合成波长标定实验结果与分析

实验所得起点和终点位置处的两路外差干涉信号的相位差信息分别如图 8(a)、图 8(b)所示。由图 8 可知,起点位置处的平均相位差 $\Delta\varphi_1 = 218.561^\circ$,终点位置处的平均相位差 $\Delta\varphi_2 = 200.696^\circ$ 。

CCP 连续移动过程中两路外差干涉信号的相位差信息如图 9 所示。由图 9 可知,相位差呈周期性变化,且变化了 16 个周期,因此可确定合成波长标定的整数级次 $N = 16$ 。

由以上实验结果可得,当 CCP 移动标准位移 $D_s = 100 \text{ mm}$ 时,合成波干涉条纹的整数级次 $N = 16$,由起点和终点位置处的平均相位差 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 计算求得小数级次 $\epsilon = 0.049625$,因此,根据式(3)计算得到合成波长的标定值为 12.4614 mm。

对 100 mm 标定距离进行 10 次重复标定,所得合成波长标定实验数据及处理结果见表 1。可以看出,合成波长的平均值 $\lambda_{\text{sav}} = 12.4614 \text{ mm}$ 。根据贝塞尔公式^[24],计算得到合成波长标定的标准差为 $0.13 \mu\text{m}$ 。

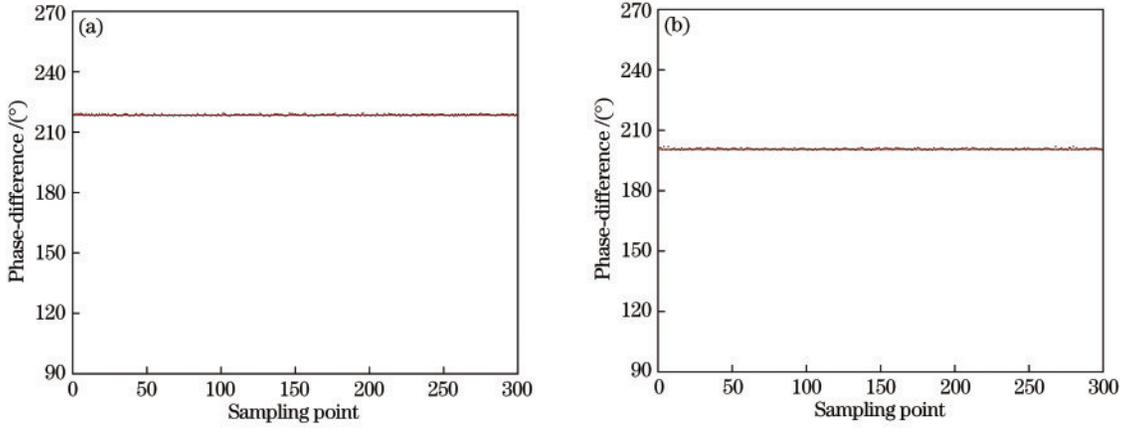


图 8 外差干涉信号的相位差。(a)起始位置;(b)终点位置

Fig. 8 Phase-difference of heterodyne interference signals. (a) Starting position; (b) ending position

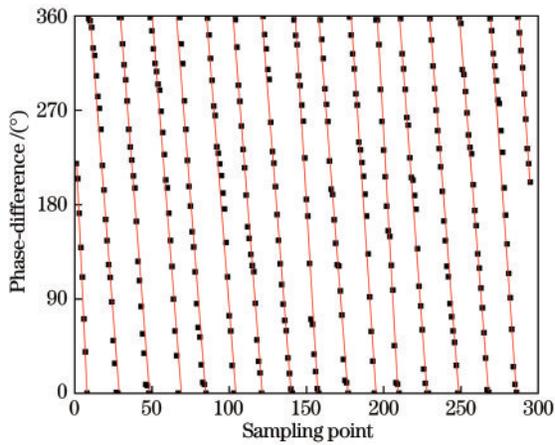


图 9 CCP连续移动过程中相位差的变化

Fig. 9 Phase-difference variation during continuous movement of CCP

4.2 绝对距离测量

4.2.1 绝对距离干涉测量实验方法

在绝对距离测量实验中,CCP继续固定在电控直线位移台上,此时位移台具有 2 个用途:1) 对被测距离进行粗测,粗测误差(由位移台的重复定位精度决定)小于四分之一合成波长(3.1154 mm),满足粗测要求;2) 重复进行绝对距离测量,评价测量精度。

LD 泵浦功率为 6.1 W,从 TCDLF 输出的一束正交线偏振双频激光进入绝对距离干涉测量系统中,具体实验步骤如下:首先,采用 DPM 分别测量绝对距离起点和终点位置处 PD 输出的两路外差干涉信号的相位差;然后,采用直线位移台对被测距离进行粗测;最后重复进行绝对距离测量实验,求取绝对距离测量平均值及其标准差。

4.2.2 绝对距离干涉测量实验结果与分析

实验所得起点和终点位置处的两路外差干涉信号的相位差信息分别如图 10(a)、图 10(b)所示。

表 1 合成波长标定实验数据及处理结果

Table 1 Experimental data and processing results of synthetic-wavelength calibration

i	$\Delta\varphi_1 / (^\circ)$	$\Delta\varphi_2 / (^\circ)$	$[\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2] / (^\circ)$	ϵ_i	λ_{si} / mm
1	218.561	200.696	17.865	0.049625	12.4614
2	218.457	200.569	17.888	0.049689	12.4613
3	218.680	200.824	17.856	0.049600	12.4614
4	218.556	200.730	17.826	0.049517	12.4614
5	218.491	200.698	17.793	0.049425	12.4615
6	218.354	200.670	17.684	0.049122	12.4617
7	218.576	200.695	17.881	0.049669	12.4613
8	218.462	200.677	17.785	0.049403	12.4615
9	218.621	200.759	17.862	0.049617	12.4614
10	218.504	200.633	17.871	0.049642	12.4613
$\lambda_{sav} / \text{mm}$					12.4614

由图 10 可知,起点位置处的平均相位差 $\Delta\varphi_1=218.755^\circ$,终点位置处的平均相位差 $\Delta\varphi_2=93.684^\circ$ 。绝对距离粗测值 $D_e=900 \text{ mm}$,将 D_e 和 λ_{sav} 代入式(5)中,计算得到干涉条纹的整数级次 $N=144$,根据起点和终点位置处的平均相位差 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 计算求得小数级次 $\epsilon=0.347419$,因此,由式(3)求得绝对距离的测量值为 899.3855 mm。

对 900 mm 被测距离进行 10 次重复测量,所得绝对距离测量实验数据及处理结果见表 2。由表 2 可知,绝对距离测量的平均值 $D_{av}=899.3851 \text{ mm}$ 。根据贝塞尔公式可计算得到绝对距离测量的标准差 $\sigma=1.36 \mu\text{m}$,其测量不确定度 $\delta D=3\sigma=4.08 \mu\text{m}$,相对测量不确定度 $\delta D/D_{av}=4.54 \times 10^{-6}$ 。

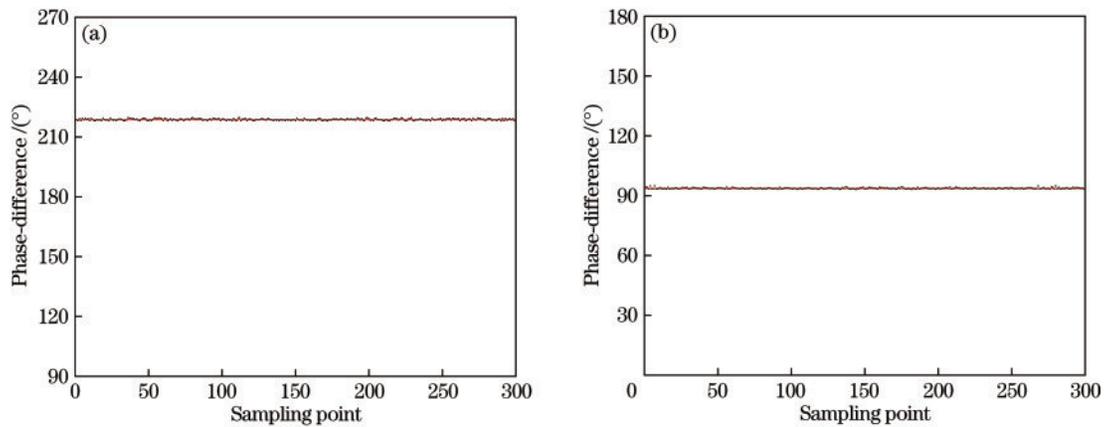


图 10 外差干涉信号的相位差。(a)起始位置;(b)终点位置。

Fig. 10 Phase-difference of heterodyne interference signals. (a) Starting position; (b) ending position

表 2 绝对距离测量实验数据及处理结果

Table 2 Experimental data and processing results of absolute-distance measurement

i	$\Delta\varphi_1 / (^\circ)$	$\Delta\varphi_2 / (^\circ)$	$[\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2] / (^\circ)$	ϵ_i	D_i / mm
1	218.755	93.684	125.071	0.347419	899.3855
2	218.626	93.544	125.082	0.347450	899.3857
3	218.504	93.625	124.879	0.346886	899.3821
4	218.788	93.676	125.112	0.347533	899.3862
5	218.638	93.614	125.024	0.347289	899.3847
6	218.509	93.563	124.946	0.347072	899.3833
7	218.695	93.533	125.162	0.347672	899.3870
8	218.569	93.466	125.103	0.347508	899.3860
9	218.774	93.712	125.062	0.347394	899.3853
10	218.419	93.345	125.074	0.347428	899.3855
$D_{\text{av}} / \text{mm}$					899.3851

5 结 论

对实验结果进行分析可知,合成波长标定的不确定度与直线位移台的定位精度直接相关,选用精度更高的直线位移台可减小合成波长的标定误差。绝对距离测量不确定度受双频激光的频差不稳定度、相位测量不确定度和空气折射率变化等因素的影响,通过进一步改善 TCDFL 的特性,获得频差为 30~120 GHz 的大频差可调谐正交线偏振双频激光输出,并对 QD-PDH 稳频系统进行优化以提高双频激光的频差稳定性,从而形成稳定的多级合成波长;另外,选用测量精度更高的 DPM 实现测相,并对空气折射率进行补偿,可以实现超精密绝对距离测量。

设计了基于马赫-曾德尔干涉仪结构的 1064 nm TCDFL 合成波绝对距离干涉测量系统,以 QD-PDH 稳频的 TCDFL 作光源,建立了合成波长标定和绝对距离干涉测量实验系统。实验获得了两路同频外差干涉信号,实验结果表明,空气中的合成波长标定值为

12.4614 mm,其标准差为 0.13 μm ;当被测绝对距离为 900 mm 时,其重复测量平均值为 899.3851 mm,测量不确定度优于 4.1 μm 。实验研究结果验证了所设计的双频激光合成波绝对距离干涉测量系统是确实可行的,为今后开展超精密绝对距离干涉测量技术研究奠定了坚实基础。

参 考 文 献

- [1] Lee J, Kim Y J, Lee K, et al. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses[J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 716-720.
- [2] Hyun S, Kim Y J, Kim Y, et al. Absolute distance measurement using the frequency comb of a femtosecond laser[J]. CIRP Annals, 2010, 59(1): 555-558.
- [3] Shi H S, Song Y J, Li R M, et al. Review of low timing jitter mode-locked fiber lasers and applications in dual-comb absolute distance measurement[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2018, 1(4): 205-217.
- [4] 刘河山, 高瑞弘, 罗子人, 等. 空间引力波探测中的绝对距离测量及通讯技术[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 486-492.
Liu H S, Gao R H, Luo Z R, et al. Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection [J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 486-492.
- [5] Masuda S, Kadoya S, Michihata M, et al. Absolute distance measurement in water by optical comb for in-process measurement of water-guided laser processing[J]. Measurement: Sensors, 2021, 18: 100221.
- [6] 王国超, 李星辉, 颜树华, 等. 基于飞秒光梳多路同步锁相的多波长干涉实时绝对测距及其非模糊度量程分析[J]. 物理学报, 2021, 70(4): 040601.
Wang G C, Li X H, Yan S H, et al. Real-time absolute distance measurement by multi-wavelength interferometry synchronously multi-channel phase-locked to frequency comb and analysis for the potential non-ambiguity range [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(4): 040601.
- [7] 吴腾飞, 周强, 林嘉睿, 等. 光频扫描干涉绝对距离测量[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1918002.
Wu T F, Zhou Q, Lin J R, et al. Frequency scanning

- interferometry absolute distance measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1918002.
- [8] Yang R T, Pollinger F, Meiners-Hagen K, et al. Heterodyne multi-wavelength absolute interferometry based on cavity-enhanced electro-optic frequency comb pair[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5834-5837.
- [9] Yang R T, Pollinger F, Meiners H K, et al. Absolute distance measurement by dual-comb interferometry with multi-channel digital lock-in phase detection[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(8): 084001.
- [10] 严利平, 陈本永. 激光合成波长纳米位移测量干涉仪的研制[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 135.
Yan L P, Chen B Y. Development of laser nanometer displacement measuring interferometer with synthetic wavelength[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(3): 135.
- [11] 严利平, 谢建东, 陈本永. 锁至动态边带的可变合成波长绝对距离测量装置与方法: CN111609798 [P]. 2020-09-01.
Yan L P, Xie J D, Chen B Y. Device and method for measuring variable synthetic wavelength absolute-distance from lock to dynamic sideband: CN111609798A[P]. 2020-09-01.
- [12] Wu G H, Liao L, Xiong S L, et al. Synthetic wavelength interferometry of an optical frequency comb for absolute distance measurement[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4362.
- [13] 赵显宇, 曲兴华, 陈嘉伟, 等. 一种基于电光调制光频梳光谱干涉的绝对测距方法[J]. 物理学报, 2020, 69(9): 090601.
Zhao X Y, Qu X H, Chen J W, et al. Method of measuring absolute distance based on spectral interferometry using an electro-optic comb[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(9): 090601.
- [14] 周肇飞, 张涛, 朱目成, 等. 双纵模激光拍频干涉仪的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 101-104.
Zhou Z F, Zhang T, Zhu M C, et al. Research on the laser beat-wave interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(1): 101-104.
- [15] 焦明星. LD 抽运共增益双腔超大频差双频 Nd: YAG 激光器: CN1905294[P]. 2007-01-31.
Jiao M X. LD-pumped cogain two-cavity dual-frequency Nd: YAG laser with very large frequency-difference: CN1905294[P]. 2007-01-31.
- [16] 焦明星, 邢俊红, 刘芸, 等. 双腔大频差双频全固态激光器设计与实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2784-2789.
Jiao M X, Xing J H, Liu Y, et al. Design and experimental study of two-cavity dual-frequency all-solid-state laser with large frequency difference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2784-2789.
- [17] Xing J H, Jiao M X, Liu Y. T-shaped cavity dual-frequency Nd: YAG laser with electro-optical modulation [J]. Optical Engineering, 2016, 55(5): 056115.
- [18] 周叶, 焦明星, 连天虹, 等. 被动调 Q 双腔双频 Nd: YAG 激光器设计及实验[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201008.
Zhou Y, Jiao M X, Lian T H, et al. Design and experimental investigation of passively Q-switched two-cavity dual-frequency Nd: YAG laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201008.
- [19] 邢俊红, 张訥洁, 焦明星, 等. 失谐扭转模腔双频 Nd: YAG 激光器[J]. 光子学报, 2018, 47(10): 1014001.
Xing J H, Zhang N J, Jiao M X, et al. Dual-frequency Nd: YAG laser with a detuning twisted-mode cavity[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(10): 1014001.
- [20] Jiang F, Jiao M X, Wang Y D, et al. Two-cavity dual-frequency Nd: YAG laser based on the principle of longitudinal mode selection by Fabry-Perot etalon[J]. Optical Engineering, 2022, 61(4): 046110.
- [21] 苏娟, 焦明星. 无移相器 Pound-Drever-Hall 激光稳频系统: CN103579896B[P]. 2016-06-29.
Su J, Jiao M X. Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization system without phase shifter: CN103579896 B[P]. 2016-06-29.
- [22] 苏娟, 焦明星, 马源源, 等. 正交解调 Pound-Drever-Hall 激光稳频系统设计[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0316001.
Su J, Jiao M X, Ma Y Y, et al. Design of Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization system using the quadrature demodulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0316001.
- [23] Jiang F, Jiao M X, Su J, et al. Design of frequency-difference stabilizing system for two-cavity dual-frequency Nd: YAG laser using quadrature-demodulated Pound-Drever-Hall method[J]. Optical Engineering, 2022, 61(4): 046109.
- [24] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 9-26.
Fei Y T. Error theory and data processing[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2004: 9-26.