

引用本文:张昕,李鹏伟,岳耀笠,等.一种基于3×3光纤耦合器的激光波长测量方法[J].光通信技术,2023,47(5):84-87.

一种基于3×3光纤耦合器的激光波长测量方法

张昕,李鹏伟,岳耀笠,农定鹏,眭明,覃波,王振

(中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林541004)

摘要:针对现有激光波长测量方法复杂、成本高、缺乏普遍适用性的问题,提出了一种基于3×3光纤耦合器的激光波长测量方法,理论推导了测量方法的基本原理,并搭建了激光波长实验测试验证系统。利用光纤延时线(FDL)改变干涉仪测量臂的传输时延,采用现场可编程逻辑门阵列(FPGA)采样得到该时延变化量对应的干涉信号条纹半周期数,根据半周期数与时延差之间的关系,计算出待测激光波长。实验测试结果表明:当用该测量方法测量出激光波长分别为1 310.84、1 550.78 nm时,使用光谱仪测得的激光波长分别为1 310.56、1 550.63 nm,两者结果几近一致。

关键词:条纹计数法;光纤耦合器;迈克尔逊光纤干涉仪;时延差;激光波长

中图分类号:TN29 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)05-0084-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Laser wavelength measurement method based on 3×3 fiber coupler

ZHANG Xin, LI Pengwei, YUE Yaoli, NONG Dingpeng, SUI Ming, QIN Bo, WANG Zhen

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problems of complexity, high cost and lack of universal applicability of existing laser wavelength measurement methods, a laser wavelength measurement method based on 3×3 fiber coupler is proposed. The basic principle of the measurement method is deduced theoretically, and the experimental testing system of laser wavelength is built. The fiber delay line(FDL) is used to change delay difference of the interferometer measuring arm, and the half-period number of the interference signal fringe corresponding to the delay change is obtained by using field programmable gate array(FPGA). According to the relationship between half-period number and delay difference, the laser wavelength to be measured is calculated. The experimental results show that the laser wavelength measured by this method is 1310.84 nm and 1550.78 nm respectively, and the laser wavelength measured by spectrograph are 1 310.56 nm and 1 550.63 nm respectively, and the results of the two are almost the same.

Key words: fringe counting method, fiber coupler, michelson fiber interferometer, delay difference, laser wavelength

0 引言

激光波长作为激光器重要的参数之一,是光频标研究、光通信、激光光谱、激光稳频、光纤传感等领域重要的测量参数^[1-6]。然而,由于环境条件、激光器工作温度和电流波动的影响,激光器波长会发生漂移。因此,激光器波长的实时测量显得尤为重要。

目前,测量激光波长的仪器主要有光谱仪和波长计2种。其中,光谱仪的测量精度高,波长测量范围广泛,但价格昂贵,体积较大,且使用条件和领域受到限制;波长计则由于其结构简单、成本相对较低、精度高等特点广泛应用于激光器的波长测量、监控和校准。激光波长测量方法分为2类:衍射测量法和干涉式测量法^[7]。

衍射测量法主要采用光栅衍射形成的光谱线间隔与已知波长之间的关系,来求取待测激光器的波长。该方法操作简便,但测量精度较低。安徽师范大学的汪千凯等人^[8]曾用此法进行测量,他们的测量精度仅达到 10^{-4} 量级。

干涉测量法主要有3种:斐索干涉法、法布里-珀罗干涉法、迈克尔逊干涉法^[9-10]。斐索干涉法测量精度

收稿日期:2023-05-08。

作者简介:张昕(1983—),男,硕士,高级工程师,中国电子科技集团公司第三十四研究所集团专家,主要从事光电子技术和光通信研发工作,主持和完成国家级项目10项,获省部级奖1项,曾荣获全国工人先锋号团队带头人称号。



最高可以达到 10^{-7} 量级^[11],其最佳测量波段覆盖可见光-近红外波段。它对被测激光的模式和线宽要求不高,但这种测试系统需要标准具,且测量时需要对温度等环境因素进行控制,这增加了系统复杂度。法布里-珀罗干涉法能够用于测量脉冲激光和连续激光的波长,其测量精度较高,可以达到 10^{-8} 量级^[12],其最佳测量波段同样覆盖可见光-近红外波段。然而,这种测量系统结构较为复杂,研制成本高;此外,法布里-珀罗干涉仪受温度和气压影响较大,需要将其安装在恒温气密容器中,并需要一台稳定的氦氖激光器来监测干涉仪的波长漂移。迈克尔逊干涉法的系统结构简单,其测量精度较高,最高可以达到 10^{-11} 量级^[13],最佳测量波段覆盖可见光-远红外波段。但这种测试系统需要已知波长的参考光源辅助,且研制成本高,只能用于测量连续激光波长。因此,虽然干涉测量法的测量精度高,但是系统复杂,需要波长已知的参考光源且价格昂贵,缺乏普遍适用性。

针对现有激光波长测量法存在的问题,本文提出一种基于 3×3 光纤耦合器(下文简称耦合器)的激光波长测量方法。这种方法不仅测量精度满足使用需求,而且结构简单、成本低。

1 理论推导

基于耦合器的激光波长测量的理论推导光路如图 1 所示。图中光纤耦合器端口 u 连接光纤延时线(FDL)的光纤链路为测量臂,端口 d 对应的光纤链路为参考臂。

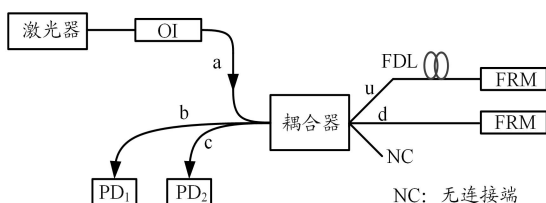


图 1 基于耦合器的激光波长测量方法光路图

从待测激光器发出的光,通过光隔离器(OI)从耦合器端口 a 注入光纤中,且不考虑偏振态的影响,入射光场的表达式为

$$E(r, t) = E_0 e^{i(\omega t - kr)} \quad (1)$$

其中, t 为光波传播时间, E_0 为光波的振幅, ω 为光波角频率($\omega = 2\pi f$), f 为频率, k 为光波在真空中传播时的波数($k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$), c 、 λ 分别为真空中的光速、波长; r 为光波传播过程中通过的光程($r = nl$), n 、 l 分别为光纤折射率和长度。

从式(1)可以得到入射到耦合器 a 端口的光强为

$$I_0 = E(r, t) E(r, t)^* = E_0^2 \quad (2)$$

在实际应用中,由于耦合器分光比不均匀,存在插入损耗,并且受到光纤偏振特性的影响,耦合器的 3 路输出信号间的相位差会偏离理想值($\frac{2\pi}{3}$)约 1° 。然而,这并不影响上位机对干涉条纹进行计数。因此,本文仍采用理想值($\frac{2\pi}{3}$)来表示耦合器的 3 路输出信号间的相位差。

假定耦合器耦合比均为 α ,测量臂和参考臂的光纤衰减系数均为 β 。由于交叉耦合作用,参考臂传输光产生了 $\frac{2\pi}{3}$ 的相位延迟,此时从测量臂和参考臂输出的光场^[14]分别为

$$E(r_1, t)_u = E_0 \sqrt{\alpha \beta} e^{i(\omega t - kr_1)} \quad (3)$$

$$E(r_2, t)_d = E_0 \sqrt{\alpha \beta} e^{i(\omega t - kr_2 + \frac{2\pi}{3})} \quad (4)$$

耦合器的反射端接法拉第反射镜(FRM),用于抵消由于偏振态(SOP)随机变化导致的信号衰落。假定耦合器互异且无反射,FRM 的衰减系数为 γ 。当端口 u 和端口 d 输出的光经过 FRM 反射后,会再次进入耦合器,并从端口 b 输出,然后进入光电探测器(PD₁)。此时,测量臂传输的光在交叉耦合时会产生 $\frac{2\pi}{3}$ 的相位延迟,所以测量臂和参考臂的光场为

$$E(r_1, t)_{u1} = E_0 \sqrt{\alpha^2 \beta^2 \gamma} e^{i(\omega t - 2kr_1 + \frac{2\pi}{3})} \quad (5)$$

$$E(r_2, t)_{d1} = E_0 \sqrt{\alpha^2 \beta^2 \gamma} e^{i(\omega t - 2kr_2 + \frac{2\pi}{3})} \quad (6)$$

从耦合器中发出的光产生双光束干涉,PD₁ 接收到的干涉光强度为

$$I_1 = [E(r_1, t)_{u1} + E(r_2, t)_{d1}] [E(r_1, t)_{u1} + E(r_2, t)_{d1}]^* = 2E_0^2 \alpha^2 \beta^2 \gamma (1 + \cos \Delta \phi) \quad (7)$$

其中, $\Delta \phi$ 为相位差, $\Delta \phi = 2k(r_1 - r_2) = 2kn(l_1 - l_2) = \frac{2\omega n \Delta l}{c} = 2\omega \Delta \tau$, r_1 、 r_2 分别为测量臂、参考臂光程, l_1 、 l_2 分别为测量臂、参考臂长度; Δl 为两光纤传输臂长度差, $\Delta l = l_1 - l_2$; $\Delta \tau$ 为两光纤传输臂时延差, $\Delta \tau = \frac{n \Delta l}{c}$ 。

当干涉光进入 PD₂ 时,交叉耦合使得参考臂和测量臂传输光均产生 $\frac{2\pi}{3}$ 的相位延迟。此时,测量臂和

张昕,李鹏伟,岳耀笠,等:一种基于3×3光纤耦合器的激光波长测量方法

参考臂的光场表示为

$$E(r_1, t)_{u2} = E_0 \sqrt{\alpha^2 \beta^2 \gamma} e^{i(\omega t - 2kr_1 + \frac{2\pi}{3})} \quad (8)$$

$$E(r_2, t)_{d2} = E_0 \sqrt{\alpha^2 \beta^2 \gamma} e^{i(\omega t - 2kr_2 + \frac{4\pi}{3})} \quad (9)$$

同理,PD₂接收到的干涉光强度为

$$I_2 = 2E_0^2 \alpha^2 \beta^2 \gamma (1 + \cos \Delta \phi') \quad (10)$$

其中, $\Delta \phi' = 2\omega \Delta \tau + \frac{2\pi}{3}$ 。

从式(7)、式(10)可知,干涉光强 I_1 、 I_2 是两光纤传输臂相位差 $\Delta \phi$ 的余弦函数,主要受到两光纤传输臂时延差 $\Delta \tau$ 和激光器角频率 ω 的影响。由于该波长测量方法用时较短,可以忽略激光器角频率 ω 的变化。因此,干涉光强度可以视为时延差 $\Delta \tau$ 的函数,而外界的温度变化和机械振动是导致干涉臂光纤传输时延差 $\Delta \tau$ 变化的主要因素。

温度变化是一个缓慢的过程,对于干涉臂光纤传输系统的影响主要体现在长期累积后反映到传输时延差 $\Delta \tau$ 的变化上。当光纤的外界温度变化了 dT 时,时延差 $\Delta \tau$ 变化用全微分可表示为

$$d(\Delta \tau) = \frac{1}{c} [\Delta l dn + n d(\Delta l)] = \frac{1}{c} \left[\Delta l \frac{\partial n}{\partial T} dT + n \frac{\partial(\Delta l)}{\partial T} dT \right] \quad (11)$$

其中, T 表示外界温度。式中右边两项分别为光纤折射率和光纤长度随外界温度变化产生的变化。

机械振动恰恰相反,它是一个瞬时发生的过程。当光纤经受的外界压力发生变化 dP 时,时延差 $\Delta \tau$ 变化用全微分可表示为

$$d(\Delta \tau) = \frac{1}{c} [\Delta l dn + n d(\Delta l)] = \frac{1}{c} \left[\Delta l \frac{\partial n}{\partial P} dP + n \frac{\partial(\Delta l)}{\partial P} dP \right] \quad (12)$$

式中右侧两项分别表示光纤折射率和光纤长度随外界压力变化而产生的变化。

对于标准单模光纤而言,当 $\Delta l=1$ m 时,光纤折射率、长度、光纤时延分别随温度变化的时延系数^[15]如式(13)~式(15)所示;光纤折射率、长度、光纤时延分别随压力变化的时延系数如式(16)~式(18)所示。

$$\frac{1}{c} \frac{\partial n}{\partial T} = 38 \text{ fs}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (13)$$

$$\frac{n}{c \Delta l} \frac{\partial(\Delta l)}{\partial T} = 2 \text{ fs}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (14)$$

$$\frac{d(\Delta \tau)}{dT} = 40 \text{ fs}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (15)$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial n}{\partial P} = -21.6 \text{ fs}/(\text{m} \cdot \text{MPa}) \quad (16)$$

$$\frac{n}{c \Delta l} \frac{\partial(\Delta l)}{\partial P} = 68.7 \text{ fs}/(\text{m} \cdot \text{MPa}) \quad (17)$$

$$\frac{d(\Delta \tau)}{dP} = 47.1 \text{ fs}/(\text{m} \cdot \text{MPa}) \quad (18)$$

由于两光纤传输臂较短,且 $\Delta l=1$ m,实验环境温度波动小于 0.2 $^\circ\text{C}$,外界环境对干涉臂引入时延差 $\Delta \tau$ 约为 8 fs(可以忽略不计),可认为可编程阵列逻辑(FPGA)采集的干涉条纹半周期数 N 只与驱动光纤延时线有关。时延差 $\Delta \tau$ 变化 $1/4f$,干涉信号条纹正向移动半个周期,FPGA采集条纹计数+1,反向移动则-1。因此,干涉信号条纹半周期数 N 与时延差 $\Delta \tau$ 的关系可表示为

$$N = \frac{4c}{\lambda} \Delta \tau \quad (19)$$

从而求得激光波长为

$$\lambda = \frac{4c}{N} \Delta \tau \quad (20)$$

2 实验及结果分析

为了验证所提激光波长测量方法的精确性,本文搭建了基于非平衡光纤干涉仪干涉信号条纹计数采集测试系统,如图2所示。待测激光器选择 1310 nm、 1550 nm 波段,待测激光器输出光经过 OI 进入耦合器,耦合器无连接端(NC)熔接光纤陶瓷芯,以防止菲涅尔反射影响干涉信号的波形;耦合器输出端经过光电探测器(PD)将光信号转换成电信号,经模/数转换器(ADC)

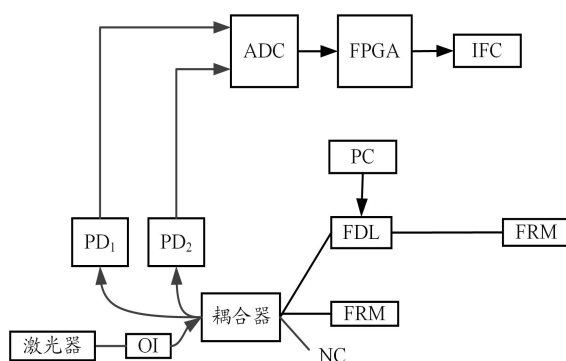


图2 实验测试系统

后输入FPGA;根据条纹计数法原理,FPGA采集得到干涉信号条纹半周期数 N 。

为了减少实验结果的误差,本文通过计算机(PC)的串口软件将FDL的 $\Delta \tau$ 分别设置为 10 、 20 、 30 、 40 、 50 、 60 、 70 、 80 、 90 、 100 ps,并记录了干涉信号条纹的半周期数 N 。从式(20)可知,待测激光波长由干涉信

号条纹半周期数 N 和时延差 $\Delta\tau$ 决定。考虑到测试时间较短,可以认为激光器波长的波动变化不大。因

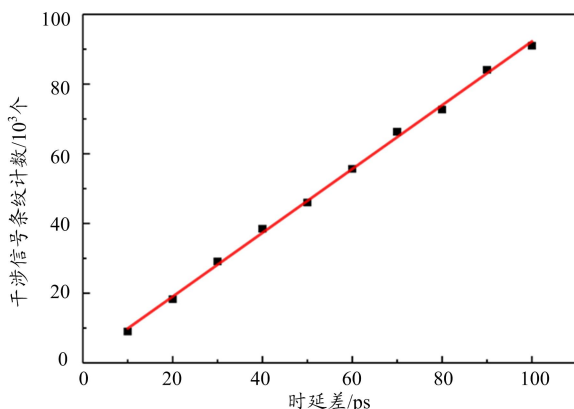


图3 1 310 nm 波段待测激光器波长拟合结果

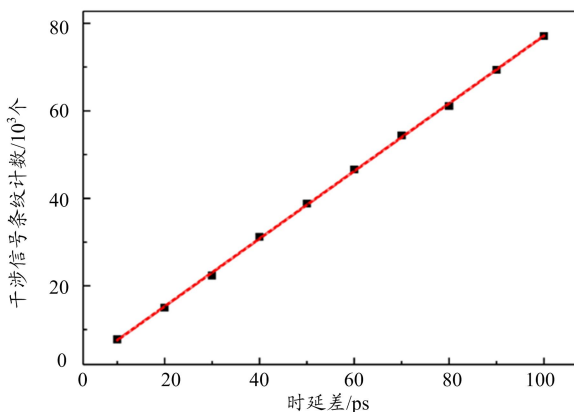


图4 1 550 nm 波段待测激光器波长拟合结果

此,本文采用 Origin 软件进行线性拟合以得到直线斜率,并据此求得待测激光波长,结果如图3、图4所示。

从图3、图4可知,干涉信号条纹计数与时延差呈线性关系,这与之前的理论推导结果保持一致。其中,1 310、1 550 nm 波段的线性拟合斜率分别为 914.81、773.27,据此求得待测激光器的波长分别为 1 310.84、1 550.78 nm。利用光谱仪测量待测激光器的波长,测得 1 310、1 550 nm 波段激光器的波长分别为 1 310.56、1 550.63 nm,这与测试系统计算出的数据基本吻合,验证了这种波长测量方法的有效性。

3 结束语

本文提出的激光波长测量方法,是在干涉仪传输臂光程差(时延差)变化已知的情况下,通过 FPGA 计数待测激光干涉条纹的数量,再根据理论推导公式来进行求解实现的。系统测量误差主要来源于以下 3 个

方面:1)测试环境温度波动会导致干涉条纹计数产生约 ± 8 个误差;2)当光程差变化一定时,激光干涉条纹会出现非整数倍半周期干涉条纹数量,然而条纹计数法只计算整数倍干涉条纹数量,因此小数部分会被取整,这种测试方法存在 ± 1 个误差;3)光纤延时线设置时延变化量本身也可能产生误差。

在测试过程中,本文采用光矢量分析仪进行标定,这可以进一步降低系统误差,系统测量的不确定度约为 10^{-4} 。本文所提的测量方法具有结构简单、成本低的优势,可满足一般波长精度要求,同时还具有较好的应用前景,可用于激光频率漂移和光纤传输时延变化量的测量。

参考文献:

- [1] 罗威,董文锋,杨华兵,等. 高功率激光器发展趋势[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 845–852.
- [2] OELKER E, HUTSON L R B, KENNEDY C J, et al. Demonstration of 4.8×10^{-17} stability at 1 s for two independent optical clocks [J]. Nature Photonics, 2019, 13(10): 714–719.
- [3] 杨洋,刘兵,赵勇,等. DWDM 技术在新型波长解调方法中的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 94–100.
- [4] LI P, LI Y, FENG G, et al. Effect of external magnetic field on the shift of resonant frequency in photoassociation of ultracold Cs atoms [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(1): 367–371.
- [5] 张超超,王建波,殷聪,等. 基于光学锁相环的高稳定度激光稳频方法研究[J]. 计量学报, 2022, 43(9): 1154–1160.
- [6] 王宇,孙德龙,杨佳沛,等. 基于多频相位生成载波的光纤振动传感技术研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(3): 367–372.
- [7] 许巧平. 基于声光衍射测激光波长的一种新方法[J]. 物理测试, 2022, 40(5): 28–31.
- [8] WANG Q K. Measuring light wavelength with plane transmission grating within wide spectral range [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(22): 3475–3476.
- [9] 沈新荣,贾宏志,杨曦靓,等. 基于 SIPM 的旋光色散波长测量方法[J]. 光学仪器, 2018, 40(3): 17–21.
- [10] 刘若男,王建波,殷聪,等. 便携式 633 nm 激光波长评价系统研究[J]. 光学技术, 2022, 48(5): 523–530.
- [11] 于占海,许凤明,陈方. 单片机控制的 Fizeau 激光数字波长计[J]. 光学精密工程, 1999, 7(2): 97–100.
- [12] MULLIGAN J F. Who were fabry and perot [J]. American Journal of Physics, 1998, 66(9): 797–802.
- [13] MANDAL P, MUKHERJEE M. A wavemeter for precision application [J]. Indian Journal Physics, 2010, 84(8): 1095–1100.
- [14] PIETZSCH J. Scattering matrix analysis of 3×3 fiber couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(2): 303–307.
- [15] HARTOG A H, CONDUIT A J, PAYNE D N. Variation of pulse delay