

引用格式: XU Peiyuan, ZHENG Bolun, PAN Zhen, et al. Distance Measurement Method Based on Optical Carrier-based Microwave Interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0812002

徐培源, 郑博伦, 潘震, 等. 基于光载微波干涉的距离测量方法[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0812002

基于光载微波干涉的距离测量方法

徐培源^{1,2}, 郑博伦^{1,3}, 潘震^{1,3}, 周次明^{1,2,3}

(1 武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 武汉 430070)

(2 武汉理工大学 理学院, 武汉 4300700)

(3 武汉理工大学 信息工程学院, 武汉 4300700)

摘要:提出了一种基于光载微波干涉的测距方法,通过电光调制器将微波调制到宽谱激光上,光纤光栅反射部分载波波长的微波调制光实现分光,FBG的反射光与待测目标反射光在环形器中发生非相干叠加,由于两者光程不同,经过光电转换后探测到微波干涉信号,通过分析微波的频域干涉谱计算出光程差,进而得到待测距离。本文进行了多组测距实验验证该方法的可行性,结果表明,该测距系统具有较高的稳定性和精度,在150~450 mm的测距范围内,测距结果的稳定性为 $\pm 2.7 \mu\text{m}$,测距精度为 $\pm 1.6 \mu\text{m}$,为高精度测量领域提供了一种新的方法。

关键词:光载微波干涉;光纤布拉格光栅;频域干涉;距离测量;微波光子学

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235208.0812002

0 引言

长度测量在科技发展具有重要作用,从工业制造的三维坐标测量系统,到微纳尺度的显微系统,高精度距离测量都扮演着基础且至关重要的角色^[1-3]。由于激光独有的高准直、高相干性等多重特性,激光测距技术在距离测量领域得到了非常广泛的应用。

常见的激光测距方式为时间飞行法,即光源发射激光脉冲信号,通过计算脉冲光在空间中传播的时间进行测距,该方法有极大的测距范围,但测距精度不高^[4]。高精度的空间测距通常利用光的干涉实现,其中以扫频干涉(Frequency Scanning Interferometry, FSI)和光频梳光谱干涉为代表的频域干涉测距方法实现了亚微米级精度的绝对测距。FSI通过可调谐激光器进行线性扫频,测量干涉信号的相位进行测距,该方式对可调谐光源的扫频线性度有极高的线性度要求,光频非线性扫描会引起不可忽略的二阶相位误差^[5];光频梳光谱干涉测距利用光频梳的光谱特性,通过测量不同纵模的光强分布计算得到光程差,由于光频梳的周期性,测距受到最大非模糊距离的限制,且最大非模糊距离一般不超过1 m^[6-7]。为解决光频梳的非模糊距离小的问题,出现了双光频梳或三光频梳测距^[8-9],使用粗细结合的外差合成波长测距方案实现100 m以上范围的高精度测距。但多光频梳的成本相对单光频梳更高,数据处理也更为复杂。

与光波相比,微波可以实现更为精准的频率控制以及频率测量,因此出现了将微波调制到宽谱光上,利用调制光的包络进行参量测量的方式,即光载微波干涉(Optical Carrier-based Microwave Interferometry, OCMI)^[10]。OCMI与光频域干涉类似,都是通过信号源向干涉系统输入扫频信号,获得干涉系统的频域干涉谱,进而计算得到光程差,因此OCMI也具有测量精度高的优势。由于微波频谱仪的频率分辨能力强于光谱仪,OCMI测距的非模糊距离大于光频域干涉的测距。此外充当载波的宽谱光对传输模式和色散不敏感,OCMI可以避免模间干涉以及偏振对测距的影响。OCMI在光纤分布式传感以及光纤时延测量中得到

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 52071245, 62275204, 61975157),国家重点研发计划(No. 2021YFB3202901)

第一作者:徐培源, xupeiyuan@whut.edu.cn

通讯作者:周次明, zcm@whut.edu.cn

收稿日期:2023-02-24;录用日期:2023-04-12

<http://www.photon.ac.cn>

了广泛的应用^[11-14]。将光纤的有效折射率看作常数,可以通过长度与时延的关系式计算出光纤的长度。2018年, HUANG Xinxin等^[12]通过探测相位的方式测量40 km长度光纤的时间延迟,结果表明测量具有良好的稳定性,但由于缺少参考信号,系统的精度不高(± 4 ps)。2021年, LI Shupeng等^[13]将扫频微波调制到两束不同波长的激光上,分别在马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometry, MZI)的两臂传播,实验结果表明测量系统的测量范围超过500 m,具有较好的稳定性(± 0.02 ps)和精度(± 0.07 ps)。该方法利用MZI的一臂作为参考路径,提高了系统的测量精度,但系统需要使用光解复用器分离不同载波波长的光载微波,提高了测量系统的成本。同年DING Aiqi等^[14]应用放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)充当载波,对MZI两臂的光程差进行测量,得到了相对测量偏差为 10^{-5} 的测量结果。

本文提出一种基于OCMI的空间测距方式,该方法采用菲索干涉光路,应用FBG充当光路中的半透镜形成参考信号与测量信号,并通过理论分析和实验验证可行性。实验结果表明,测距系统在150~450 mm的测量范围内实现了 ± 2.7 μm 的系统稳定性、 ± 1.6 μm 的精度。

1 基本原理

基于光载微波干涉的测距方法原理如图1所示,蓝线表示电缆,黑线表示光纤。微波源输出的扫频微波与光源输出的宽谱光在电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)处耦合,以强度调制的形式调制成光载微波信号。调制光通过光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)分成两部分,一部分被FBG反射形成参考信号,另一部分通过FBG后被待测目标反射形成测量信号;测量信号通过准直器返回光纤,与参考信号叠加,由于参考信号与测量信号具有不同的光程,经过光电探测器(Photo Detector, PD)后将转化为两个具有不同相位的微波信号并发生干涉。微波信号源完成扫频过程后,分析微波干涉谱以计算待测目标的距离。光路中FBG与待测目标构成菲索干涉光路,FBG充当菲索干涉光路中的半透半反面。在菲索干涉结构中,参考光和信号光在干涉发生部分(半透面与测量面之间的区域)以外都是共光路的,弥补了传统干涉结构中参考光与信号光不共光路的缺陷,因此外界影响对菲索干涉仪的影响较小,进而提高了系统对光程差测量结果的稳定性。

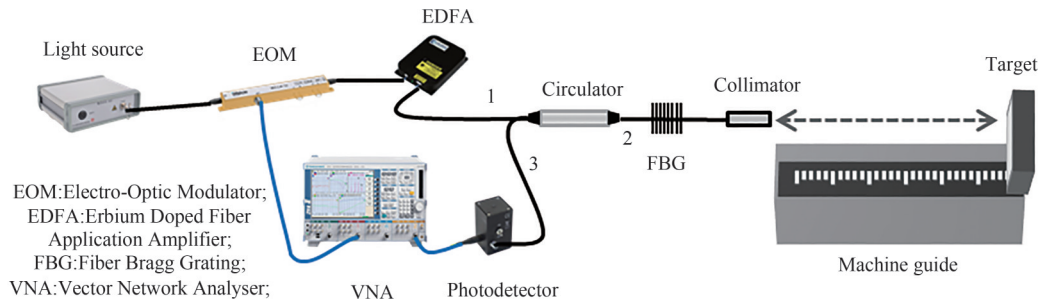


图1 测距系统原理的示意图

Fig.1 Schematic diagram of distance measurement system

经强度调制和掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,进入环形器1端口的的光载微波的光功率为^[15]

$$P(t) = (1 + m \cos \omega_e t) P_0 \quad (1)$$

式中, m 为调制系数, ω_e 为微波信号的角频率, P_0 表示经EDFA放大后宽谱光的功率。光载微波经过FBG后分为两束,叠加后的光载微波表示为

$$P_{\text{total}}(t) = (1 + m \cos \omega_e t) P_F + \alpha R_M [1 + m \cos \omega_e (t - t_0 - \tau)] (P_O - P_F) \quad (2)$$

式中, τ 表示光在空气中的传输时间, P_F 表示FBG反射光的功率, t_0 表示光在FBG与准直器之间的光纤中传输的时间, α 为光在空气中的传输损耗, R_M 为待测目标反射率。光电转换后探测器的输出光电流表示为

$$I_{\text{PD}}(t) = \eta P_{\text{total}} = \eta \left\{ (1 + m \cos \omega_e t) P_F + \alpha R_M [1 + m \cos \omega_e (t - \Delta t)] (P_O - P_F) + I_c \right\} \quad (3)$$

式中, η 为光电探测器的响应度, $\Delta t = t_0 + \tau$ 表示FBG与待测目标之间的时延差。 I_c 为载波干涉项,由于参考

信号通过FBG切割入射光光谱产生,因此参考信号与测量信号的载波频率在FBG反射光带宽范围内有重叠部分, I_c 表示为

$$I_c(t) = \frac{\alpha R_M [R_f(1 - R_f)] \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} I(\nu) \cos(2\pi\nu\Delta t) d\nu}{\nu_{\max} - \nu_{\min}} \quad (4)$$

式中, ν_{\max} 和 ν_{\min} 分别为FBG反射光带宽的最大频率和最小频率, ν 为光载波的频率, $I(\nu)$ 为宽谱光的能谱函数。 R_f 为FBG的反射率。FBG反射率为100%时,由(4)得 $I_c=0$,此时认为参考信号和测量信号在经过光电探测器前仅发生非相干叠加;FBG反射率小于100%时,由于FBG反射带宽具有一定的宽度,载波干涉仅在参考信号与测量信号的光程差小于相干长度 $L_c = \lambda^2/\Delta\lambda$ 时可以被检测到,但对本文测距系统而言,光程差远远超过相干长度, $I_c \approx 0$,因此参考信号与测量信号的载波不会发生干涉,参考信号和测量信号在光电转换为微波信号前仅发生非相干叠加。微波干涉信号存在于光电转化后形成的光电流中,通过微波源扫频可得到干涉信号随频率变化的干涉谱。光电流的幅值为

$$A(\omega_e) = \eta m \sqrt{P_O^2 + \alpha^2(P_O - P_F)^2 + 2\alpha P_O(P_O - P_F) \cos \omega_e \Delta t} \quad (5)$$

干涉系统频谱的获取方式为矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)扫频获取 S_{21} 参数,该参数表示干涉系统在微波域的频率响应 $H(\omega_e) = P_F + \alpha(P_O - P_F) \exp(-j\omega_e \Delta t)$,在扫频信号强度恒定时,系统频率响应的幅值 $|H(\omega_e)|$ 与光电流的幅值 $A(\omega_e)$ 成正比。由于微波在VNA与电光调制器之间的电缆传输,调制为光载微波后在光纤中传输都会产生时间延迟,VNA测得的频率响应包括微波在测量臂(FBG与待测目标之间)以外的传输线上传输产生的相位变化 $\omega_e t_1$,即 $H_m(\omega_e) = H(\omega_e) \exp(-j\omega_e t_1)$ 。 $H_m(\omega_e)$ 直接进行FFT变换后,得到的时域响应

$$H_m(t) = P_F \delta(t - t_1) + \alpha(P_O - P_F) \delta(t - t_1 - \Delta t) \quad (6)$$

式中, $\delta(\)$ 表示冲激函数。时域响应谱上会出现 $t = t_1$ 和 $t = t_1 + \Delta t$ 两个峰值,在 t_0 已知时待测长度

$$L = c\tau/2n = c(\Delta t - t_0)/2n \quad (7)$$

式中, c 表示真空中的光速, n 为折射率,对 L 的测量与对 Δt 的测量等价。

2 实验结果与讨论

为了验证该方法的有效性,根据图1搭建了相应的实验验证系统。宽谱光由ASE光源提供,波长范围为1 530~1 600 nm;VNA(R&S ZVA67)提供微波扫频信号并通过电光调制器(iXblue MXER-LN-10)调制到宽谱光上,电光调制器的偏置电压保持在正交点;光电探测器(Newport 818-bb-35f)和VNA获取参考信号和测量信号的包络信息。由米尺测得FBG与准直器之间的光纤长度为35 cm,因此 $t_0 \approx 1.7$ ns;准直器固定在五维调整架上,调整准直器的方向来确保反射光能够返回准直器。待测目标为前反射镀银反射镜,反射率在90%左右,固定在水平导轨的滑块上,通过移动滑块的方式来改变反射镜与准直器之间的距离;使用的FBG的透射光谱如图2所示,FBG中心波长为1 556.62 nm,中心波长处透射光的插入损耗为-15 dB,即

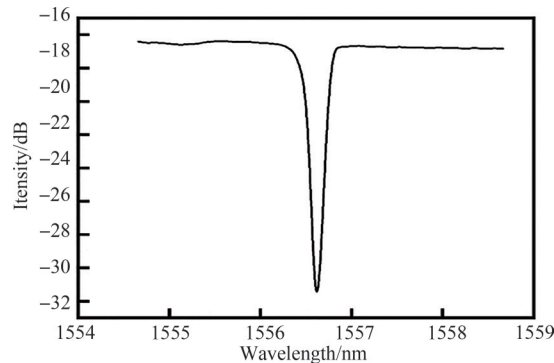


图2 FBG的透射光谱

Fig.2 Transmission spectrum of FBG

透射率为3%,可得反射率为97%。反射谱的带宽为0.22 nm,由相干长度公式计算得FBG反射光的相干长度约为10.92 mm,远小于FBG与准直器之间的距离,因此实验过程中不考虑载波干涉对测距频谱的影响。

实验过程中使用步进扫频的方式进行微波域的频率扫描,微波频率会随着时间而发生周期性的变化。扫频信号的频谱表现为一系列等频率间隔的脉冲信号,即 $E(f) = \sum_{n=0} \delta(f_c - n\Delta f)$,其中 f_c 为扫频信号的起始频率, Δf 为频率间隔。扫频信号的频率与光频梳类似,测距系统同样受最大非模糊距离的限制。根据奈奎斯特采样定律,最大非模糊距离为

$$L_{\max} = \frac{c}{4\Delta f} - \frac{ct_0}{2} \quad (8)$$

实际测量过程中,受光线在空气中衰减,待测目标反射率等因素的影响,最大非模糊距离不等于实际可测量的最大距离。在最大非模糊距离范围内,系统可以通过IFFT变换准确的分析出待测目标的位置。

由于扫频信号的扫频范围有限,测距系统可测量的最小距离受分辨率限制。最小可测量距离为

$$L_{\min} = \frac{c}{2B} - \frac{ct_0}{2} \quad (9)$$

式中, B 为微波扫频信号的频率扫描带宽。 L_{\min} 可以为负值,负值表示测距系统的最小可测量距离为0,不受分辨率的限制。

实验过程中扫频带宽设置为1 GHz,中心频率为7.6 GHz,扫频点数为50 001,中频带宽为1 kHz。由式(9)可知 $L_{\min} < 0$,因此测距系统可以分辨反射光和测量光,不需要考虑混叠的影响。由式(8)可知,测距系统的最大非模糊距离 $L_{\max} \approx 3.75$ km,远大于准直器与反射镜之间的距离,因此在测距过程中不需要考虑非模糊距离的影响。

由于微波扫频信号的带宽有限,FFT变换的分辨率受带宽限制,同时由式(5)可得微波干涉谱的幅值呈周期为 Δt 的周期性变化,因此可以通过 $|H_m(\omega_e)|$ 极小值点即谷值频率 f_k 计算待测距离 L ,此时 L 的测量结果不受FFT的分辨率的影响。由于 $|H_m(\omega_e)| = |H(\omega_e)|$, t_1 不会影响干涉谱的幅值。 f_k 的分布为

$$f_k = \left(k - \frac{1}{2}\right) \frac{1}{\tau + t_0} \quad (10)$$

式中, k 为正整数,表示从0频率开始干涉谱谷值出现的次数。结合式(7)和式(10)得

$$L = \left(k - \frac{1}{2}\right) \frac{c}{2nf_k} - \frac{ct_0}{2n} \quad (11)$$

L 的测量结果与 f_k 的测量结果有关。分析干涉谱时,对于干涉插值拟合可提高 f_k 测量结果的精度,此时测距系统能分辨的最小距离为

$$L_{\text{res}} = \left| \frac{dL}{df_k} \right| \Delta F = \left(k - \frac{1}{2}\right) \frac{c\Delta F}{2nf_k^2} \quad (12)$$

式中, ΔF 表示插值拟合后干涉谱相邻两点的频率间隔。

微波干涉的频谱和时域谱如图3所示。当导轨上的反射镜位置移动时,图3(a)中相邻谷值的频率差即自由频谱范围会相应的发生改变,随着在距离增大的情况下自由频谱范围将减小。由于使用的准直器的发散角较大,只有部分反射光能够返回准直器,因此在反射镜接近准直器时,测量光强度会显著增大,在图3(a)中表现为干涉谱的直流分量增大,同时对对比度减小。由于充当参考面的均匀FBG的反射谱仅有0.2 nm,远远小于ASE的光谱范围,因此反射光的能量较小,在待测距离小于200 mm时,参考光与测量光的光强差距过大,频谱曲线在谷值附近的过于平缓,难以确定 f_k ,因此没有距离为0~100 mm的测距结果。图3(b)表示矢量网络分析仪对干涉系统的 S_{21} 参数进行FFT逆变换得到的时域谱,可见在反射镜位置变化时,光纤栅的位置以及参考光的强度没有变化,测量光的强度会随反射镜与准直器之间距离的增大而减小。在距离小于400 mm时,影响频谱对比度的主要因素是测量光的强度。由于水平导轨的长度只有500 mm,因此没有进行待测距离大于500 mm时的测距实验。

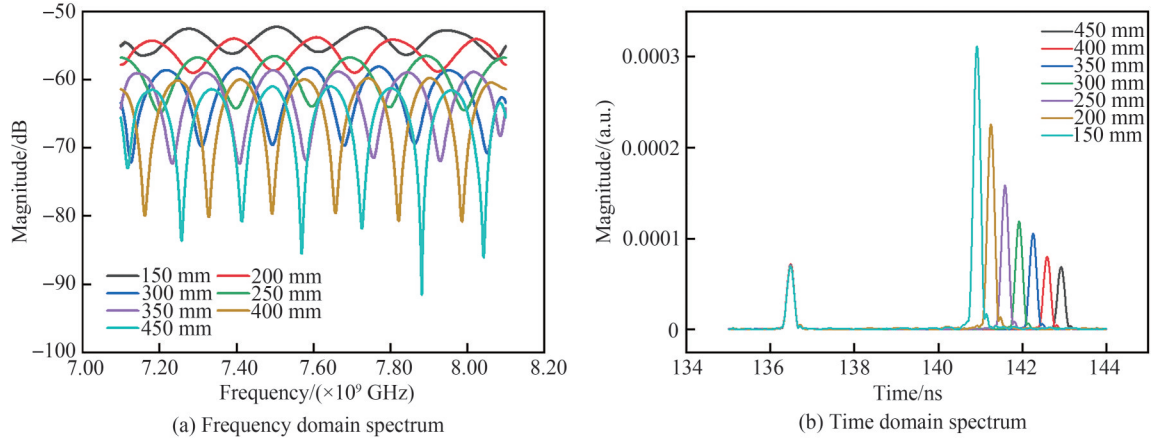


图3 微波干涉的频谱和时域谱。

Fig.3 Microwave interference spectrum.

进行实验时,反射镜移动范围为150~450 mm,每隔50 mm测量一组数据,每个点测量6次,每组的测距结果取平均值。由于 t_0 未知,因此测量结果 $L_m = (k - 0.5)c/2nf_k = L + ct_0/2n$,通过对不同距离下的 L_m 测量结果作拟合直线的方式求解 t_0 。 k 的确定方式为:通过时域谱求出 Δt ,此时 $k = \text{INT}(f_k \Delta t + 0.5)$,其中 $\text{INT}()$ 为取整函数。测量结果如图4所示,距离测量结果与位移距离基本保持线性关系,斜率为1.003,线性度为 $R^2 = 0.9998$,测量结果的拟合直线的纵截距为518.023 mm,由 L_m 与 L 得关系可得 $t_0 = 1.72901$ ns。由式(9)得 $L_{\min} = -417.977$ mm,测距系统的最小可测量距离不受分辨率的限制,但实验装置的参考信号光强过小限制了测距系统的最小可测量距离。此外测距结果表明测距系统具有至少30 cm的动态测距范围,在测距范围内可以给出稳定的测距结果。

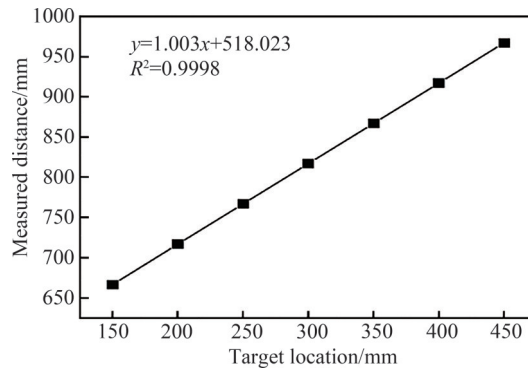


图4 距离测量结果

Fig.4 Measurement result

为测试测距系统的稳定性,将反射镜固定在400 mm刻度处,测量20次,通过测距结果的标准差分析测距系统的稳定性。微波扫频范围为7.35~7.85 GHz,扫频点数为50 001,中频带宽为1 kHz。谷值频率的级数 k 的计算方式为:通过计算相邻谷值频率的间隔得到自由频谱范围的测量值 $F_s = f_k - f_{k-1}$,由式(10)得级数表示为谷值频率与自由频谱的比值即 $k = \text{INT}[(f_k/F_s) + 0.5]$ 。微波干涉条纹如图5所示,自由频谱范围约为163.1 MHz,计算得7.6 GHz附近的谷值频率的级数 $k = 47$,由式(11)可知测量距离 $L \approx 400.010$ mm,与图7的测量结果几乎相同。重复测量时谷值频率的变化幅度不超过80 kHz,因此谷值频率波动不会影响级数的计算。对频谱进行插值拟合可以提高距离测量的精度,处理数据过程中对频谱数据进行三次样条插值插入350 000点,由式(12)得系统的理论分辨率为 $0.3 \mu\text{m}$,即测距系统可以分辨 $0.3 \mu\text{m}$ 的位置变化。

400 mm处稳定性测量结果如图6所示,测距结果的平均值为400.011 mm,所有测量结果都在平均值的 $\pm 3.5 \mu\text{m}$ 范围内,标准差为 $2.2 \mu\text{m}$ 。

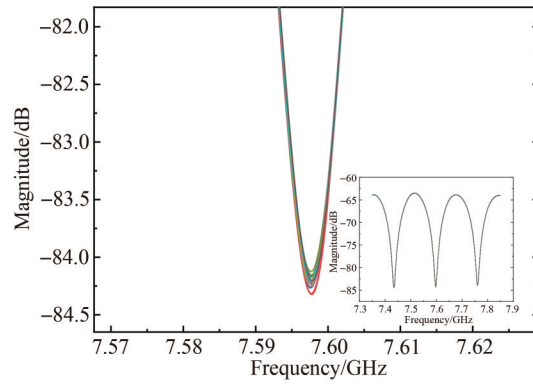


图5 目标在 400 mm 处频谱图
Fig.5 Spectrum of measurement when target at 400 mm

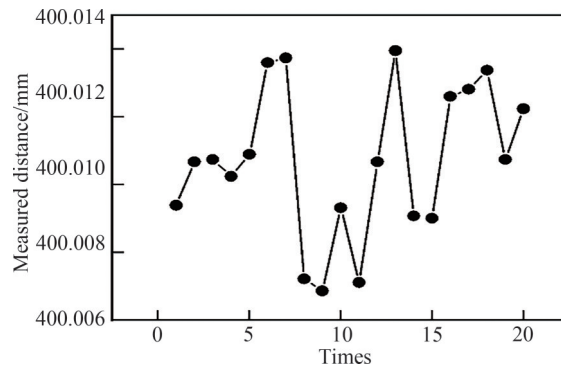
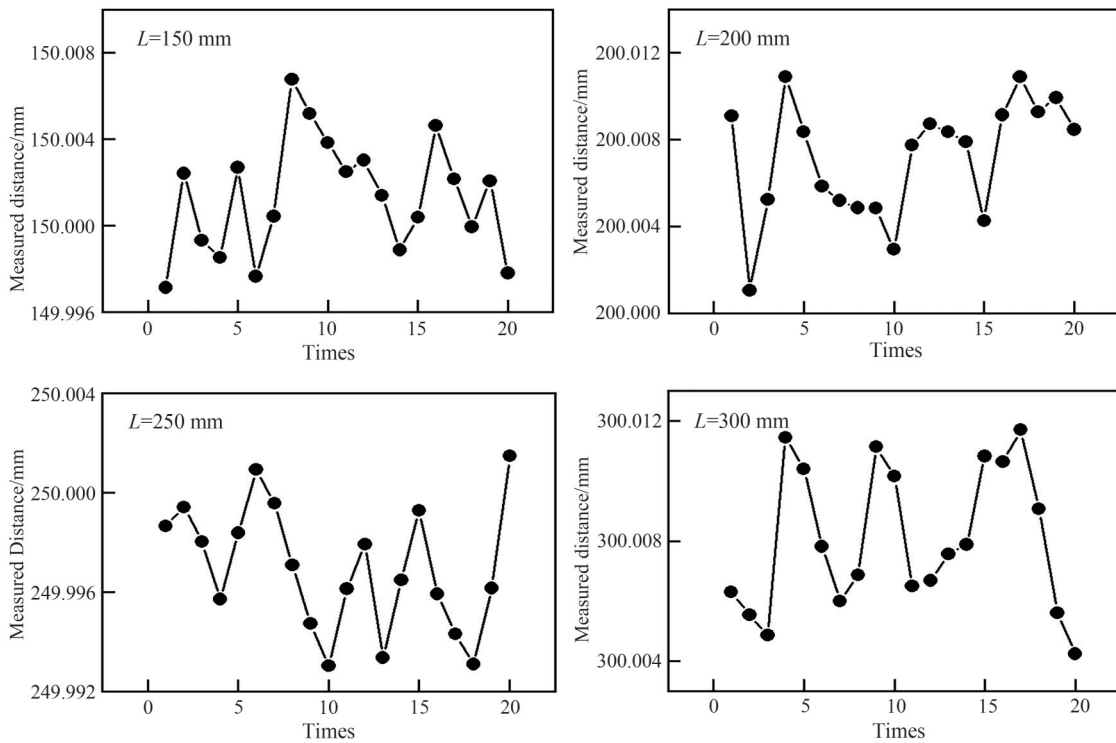


图6 目标在 400 mm 处的稳定性测量结果
Fig.6 Result of measurement stability when target at 400 mm

待测距离在 150 mm、200 mm、250 mm、300 mm、350 mm、450 mm 左右时,稳定性测量结果如图 7 所示,测距结果的标准差在 150 mm 处最大,为 $2.7 \mu\text{m}$,在 450 mm 处最小,为 $2.2 \mu\text{m}$ 。目标在 150 mm 和 200 mm 处



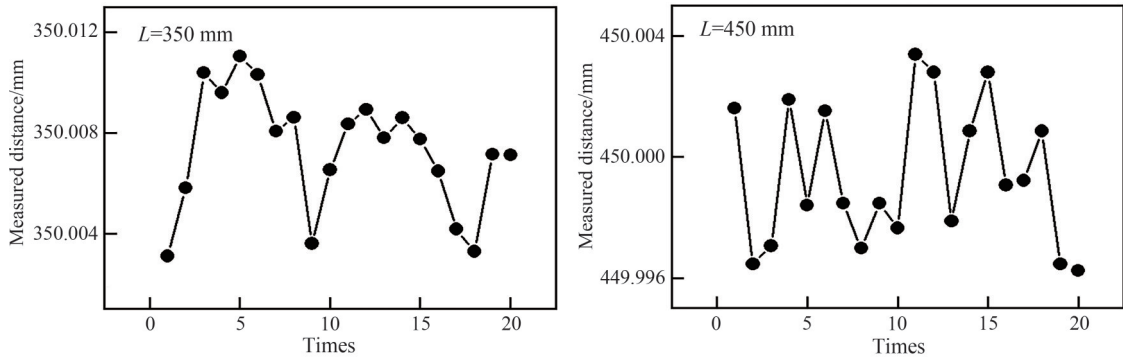


图7 稳定性测量结果

Fig.7 Result of measurement stability

时测距结果的标准差均为 $2.7 \mu\text{m}$,待测距离大于 250 mm 时测距结果的标准差均小于 $2.5 \mu\text{m}$,说明参考信号与测量信号强度差异会影响测距结果的稳定性,参考信号与测量信号差异过大会导致测距结果的标准差变大。固定位置目标的测距结果表明,测距系统可以获得一个稳定的测距结果,对于 $150 \sim 450 \text{ mm}$ 范围的测距,测距系统的稳定性为 $\pm 2.7 \mu\text{m}$ 。

为测试测距系统的精度,使用了用于固定准直器的五位调整仪上最小量程为 0.01 mm 的螺旋测微器对待测目标的位置进行调整,反射镜固定在水平导轨的 450 mm 刻度处,从测微器的 0 刻度开始逐渐增大测量距离,每隔 0.05 mm 进行一组测量,每组测量 5 次,测量结果取每组的平均值。测量范围为 $0 \sim 5 \text{ mm}$ 。微波扫频范围为 $7.35 \sim 7.85 \text{ GHz}$,扫频点数为 50001 ,中频带宽为 1 kHz 。

微波干涉谱如图8所示,谷值频率的变化规律为

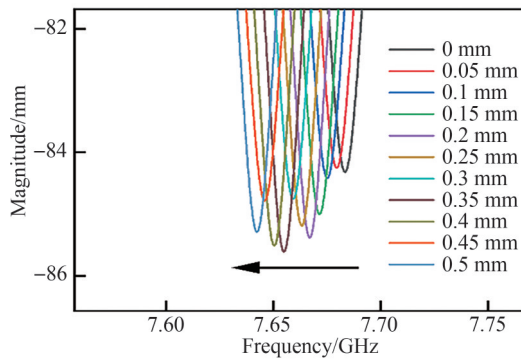


图8 精度测量的频谱

Fig.8 Frequency spectrum of measurement stability.

$$f_{\text{step}} = -\frac{2nf_k^2}{(k-0.5)c} L_{\text{step}} \quad (13)$$

式中, L_{step} 表示螺旋测微器的步进,负号表示随着测微器的位移逐渐增大,反射镜远离准直器,谷值的频率向低频移动。由式(13)可知,测微器的位移每增大 0.050 mm ,第 47 级谷值频率减小 420 kHz 。将测量结果如图9所示,黑线代表测距结果,红色点表示根据测距结果计算的位移与测微器读数的误差,误差棒表示每组测量结果的标准偏差。可见对于给定的位移,测距系统能够准确地识别,测量误差最大为 $-1.6 \mu\text{m}$,即测距系统的精度为 $\pm 1.6 \mu\text{m}$ 。测量结果的标准差最大为 $1.5 \mu\text{m}$,最小为 $0.4 \mu\text{m}$,表示在待测目标位置变化时测量结果仍具有较高的稳定性。

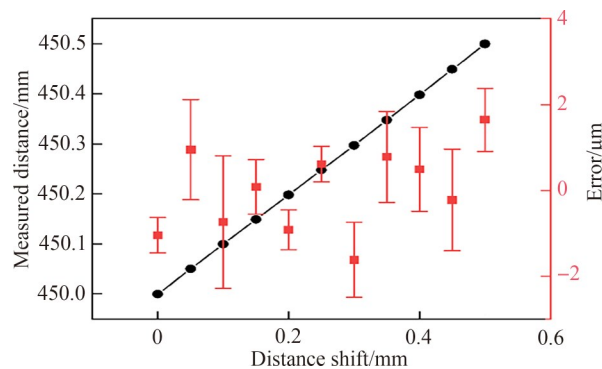


图9 精度测量结果及测量偏差

Fig.9 Result and deviation of measurement accuracy

3 结论

提出了一种基于光载微波干涉的空间距离测量方案,应用均匀光纤光栅作为参考反射面,通过反射宽谱光的部分波长分量实现光载微波的部分反射,并通过测距实验验证了该方法的可行性。150~450 mm的测距范围内测距系统实现了 $-1.6\ \mu\text{m}$ 的最大测量误差和 $2.7\ \mu\text{m}$ 的最大标准差,表明测距系统具有较高的测距精度以及稳定性。此外测距系统可以在150~450 mm的范围内实现任意测距。该测距方案的光路与MZI相比,不需要给参考信号提供专用的参考光路,光路结构更为简单。目前应用的微波源来自矢量网络分析仪,其扫频速率不高,仅能实现对静态目标的测距,未来可以采用高速率采集卡和信号采集器来代替矢量网络分析仪,提高频率扫描速度。

参考文献

- [1] DONG W, TAKAHASHI S, KIYOSHI T, et al. Analysis of the temporal coherence function of a femtosecond optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9):7011-7018.
- [2] ZHANG Hongying, YU Xiaofen, WANG Biao. Onsite and timely calibration of the large scale coordinate measuring network[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(1): 1-5.
张红英,余晓芬,王标.大空间坐标测量网络的现场实时标定方法[J]. *计量学报*, 2018, 39(1):1-5.
- [3] SPENCER D T, TARA D, BRILES T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics[J]. *Nature*, 2018, 557 (7703):81-85.
- [4] HUANG Minshuang. Time-of-flight laser ranging technique of single transmitted pulse [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12):120007.
黄民双.单发脉冲飞行时间激光测距技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12):120007.
- [5] JOO K N, KIM S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(13):5954-5960.
- [6] ZHAO Yuhang, QU Xinghua, ZHANG Fumin, et al. Theoretical analysis and application of absolute distance measurements based on electro-optic modulation and optical frequency comb[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12):1204002.
赵宇航,曲兴华,张福民,等.基于电光调制光频梳绝对测距的理论及实验分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(12):1204002.
- [7] BALLING P, KREN P, MASIKA P, et al. Femtosecond frequency comb based distance measurement in air[J]. *Optics Express*, 2009, 17(11):9300-9313.
- [8] ZHU Zebin, XU Guangyao, NI Kai, et al. Synthetic-wavelength-based dual-comb interferometry for fast and precise absolute distance measurement[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5):5747-5757.
- [9] ZHAO Xianyu, QU Xinghua, ZHANG Fuming, et al. Absolute distance measurement by multi-heterodyne interferometry using an electro-optic triple comb[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4):807-810.
- [10] HUANG Jie, LAN Xinwei, WANG Hanzheng, et al. Optical carrier-based microwave interferometers for sensing application[C]. *Fiber Optic Sensors & Applications XI*, International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [11] HUANG Jie, LAN Xinwei, LUO Ming, et al. Spatially continuous distributed fiber optic sensing using optical carrier based microwave interferometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15):18757-18769.
- [12] HUANG Xinxin, YIN Feifei, LI Jianqiang, et al. Time delay measurement in optical fibers based on phase detection[C]. 2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC), IEEE, 2018.
- [13] LI Shupeng, QING Ting, FU Jianbing, et al. High-accuracy optical fiber transfer delay measurement using fiber-optic microwave interferometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(2):627-632.

- [14] DING Aiqi, WU Bing, HOU Yibing, et al. Ranging system based on optical carrier-based microwave interferometry[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(29):9095-9100.

Distance Measurement Method Based on Optical Carrier-based Microwave Interferometry

XU Peiyuan^{1,2}, ZHENG Bolun^{1,3}, PAN Zhen^{1,3}, ZHOU Ciming^{1,2,3}

(1 *National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

(2 *School of Physics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

(3 *School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

Abstract: Length measurement plays an important role in science and technology. From the three-dimensional coordinate measurement system of industrial manufacturing to the micro-scale and nano-scale microsystem, high-precision distance measurement plays a fundamental and crucial role. Due to the multiple characteristics of laser, such as high collimation and high coherence, laser ranging technology has been widely used in distance measurement. Some measurement methods based on frequency domain interferometry have been widely used in high-precision measurement. Compared with light wave, microwave can achieve more accurate frequency control and frequency measurement. A method called Optical Carrier-Based Microwave Interferometry (OCMI) has come out for high precision sensing. OCMI is similar to optical frequency domain interference. This method uses microwave modulated on broadband light, and then calculates the optical path difference with microwave phase difference, therefore OCMI also has the advantage of high measurement accuracy. Because the frequency resolution of the microwave spectrometer is stronger than that of the spectrometer, the non-ambiguity distance of OCMI is greater than that of optical frequency domain interference. In addition, the broad-spectrum light acting as a carrier is not sensitive to transmission mode and dispersion. OCMI can avoid the influence of inter-mode interference and polarization on ranging. OCMI has been widely used in fiber distributed sensing and fiber delay measurement. Taking the effective refractive index of the fiber as a constant, the length of the fiber can be calculated by the relationship between the length and the time delay.

This paper proposes a ranging method based on optical carrier-based microwave interferometry. The microwave is modulated to broadband laser by electro-optic modulator. The Fiber Bragg Grating (FBG) reflects part of the carrier wavelength of microwave modulated light to realize the light splitting. The reflected light from FBG and the light reflected by the target are incoherently superimposed in the circulator. Due to the optical path difference between FBG and target, the microwave interference occurs after photoelectric conversion. The optical path difference is calculated by analyzing the frequency domain interference spectrum of microwave, and then the distance to be measured is obtained. In this paper, several sets of ranging experiments have been carried out to verify the feasibility of the method. This paper has carried out multiple sets of ranging experiments to verify the feasibility, the results show that a system stability of $\pm 2.7 \mu\text{m}$ and accuracy of $\pm 2.5 \mu\text{m}$ in 150~450 mm measurement range is achieved. The ranging system has high measurement stability and accuracy, which provides a new method for high-precision measurement.

Key words: Optical carrier-based microwave interferometry; Fiber Bragg grating; Spectral interferometry; Distance measurement; Microwave photonics

OCIS Codes: 120.1880; 110.7440; 350.3950; 350.2770; 280.4788