

基于双驱动马赫-曾德尔调制器的激光测距研究

张博峰^{1,2}, 赵刚^{1,2*}, 闫晓娟^{1,2}, 马维光^{1,2**}¹山西大学激光光谱研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;²山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 提出了一种基于双驱动马赫-曾德尔调制器(DD-MZM)的激光测距技术。通过对 DD-MZM 的单路进行调制可产生测距用的类双频光源, DD-MZM 中两路光的时间延迟差很小, 可有效抑制两路光拍频信号的强度噪声。为了进一步抑制由温度变化造成的两路光的相位差噪声, 通过实时反馈控制 DD-MZM 的直流输入端, 补偿了两路的相位差。首先基于光场传输函数建立了测距理论模型, 分析了相位反馈控制的机理; 然后基于理论模型搭建了测距系统, 采用降频法采样信号; 最后利用相位法反演出距离值。结果显示, 在动态控制相位差后, 系统相位差的长期漂移抑制比可达 11 dB, 距离测量的稳定度达到 0.4 μm 。该方案有利于提高激光测距系统的稳定性和集成度。

关键词 测量; 激光测距; 双驱动马赫-曾德尔调制器; 双频光; 激光频率调制

中图分类号 TB96 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220632

1 引言

长度是国际单位制中的七个基本物理量之一, 大动态范围、高精度、高稳定的长度测量在大到宇宙空间探测、卫星编队飞行, 小到装备制造、光刻机定位等众多领域中都有重要的应用。激光具有相干性好、亮度高等特点, 当其被应用到长度测量中后, 迅速促进了多种绝对或相对距离测量技术的发展^[1]。传统的激光测距技术主要包括干涉法^[2-3]、飞行时间法^[4-5]和三角法^[6]等, 其中飞行时间法又分为脉冲法^[7]、相位法^[8]和激光调频法^[9-10]等。

双频激光测距技术结合了多波长干涉法和相位法, 其利用两个频率激光的干涉产生中频信号, 然后测量回波光场与参考光场的相对相位差并反演绝对距离值^[11]。该技术的核心之一是获得一束双频激光, 最直接的方式是将两个不同频率的激光进行合束, 然而由于两激光的相对相位噪声对干涉的影响很大, 需要对两激光的频率及相位进行锁定以获得高稳定的测距结果, 这大大增加了系统的复杂性。另外, 通过塞曼-双折射等非线性效应可以在一个激光器内部产生两个频率激光的输出, 但其结构仍然较为复杂。一种简单有效的方式是将一束激光分成两路, 其中一路使用外部移频器[通常为声光调制器(AOM)]改变激光频率, 之后再与另一路激光合束以产生双频激光^[12-14]。双激光来源于同一光源, 其本质上具有良好的频率和相位相关性。双频激光测距的稳定度依赖于其频率差, 差值

越大稳定度越高。然而, AOM 的调制频率范围有限, 最大仅有一百多 MHz, 其限制了可获得的测距稳定度, 测距稳定度一般在几百微米量级。姜成昊等^[15]提出一种使用电光调制器(EOM)取代 AOM 的方法, 对激光相位进行调制产生边带, 再与未调制光合束, 从而输出“类双频”激光。EOM 的输入射频频率范围很宽, 从 0 到几十 GHz, 因此可以获得更高的测距稳定度, 结合多测尺切换, 测量非模糊距离得到提升^[16]。然而, 对于此类双频光源, 分路之前的相对相位噪声接近零, 两路通过不同的光学元件后相对相位噪声会显著增加, 使得拍频后出现相对强度噪声, 引入距离测量误差^[17]。理论显示, 当两路光的相位差远小于激光的相干时间时, 相对强度噪声正比于两路光延时差的平方^[18]。因此, 减小这一延时差可以有效提升距离测量的灵敏度。

双驱动马赫-曾德尔调制器(DD-MZM)作为一个外部强度调制器, 可以对激光功率进行调制, 然后基于相位法可反演距离值^[19]。然而, 强度调制中存在的非线性效应以及光电探测器对光强的微弱非线性响应会在测距结果中引入误差。为了解决这些问题, 我们调整了 DD-MZM 在激光测距中应用的方式。在 DD-MZM 中, 输入的激光被分为两路后, 分别经过两个相位独立可控的调制器, 然后再合束输出。如果只对其中一路进行射频相位调制, 且调制幅度远小于 1, DD-MZM 的输出可近似为三频激光, 且相位相关, 主要包括调制路激光的载频及其边带以及未调制路激光, 未调制路激光与调制路激光的相位不同且可控。

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-04-02; 录用日期: 2022-04-14; 网络首发日期: 2022-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0304203)、国家自然科学基金(61875107, 61905136, 61905134, 62175139)

通信作者: *gangzhao@sxu.edu.cn; **mwig@sxu.edu.cn

当将该类型激光应用到测距中时,调制路激光的载频和左右边带拍频后为零且与待测距离无关,因此忽略该载频的贡献。未调制路激光的载频与调制路激光存在可设定的相位差,其与调制路的双边带形成两组双频激光,测距过程中采用的是同一频率的拍频信号,因此本文称其为测距用“类双频”激光。

DD-MZM 中两路光通过相近的光程,因此相对相位差较小,能够有效抑制相对强度噪声,获得更好的测距稳定度。实验中发现,外界环境温度变化会导致 DD-MZM 测距结果的漂移,限制了测距的稳定性。这主要是因为温度会改变电光晶体的折射率,从而调制路边带与未调制路激光的相位差不稳定。因此,为了提高测量的长期稳定性以及抑制相对相位噪声,同时避免光电探测器对激光强度的非线性响应,实验采用反馈控制 DD-MZM 的 DC 相位控制端口以实时补偿相位。本文先给出了 DD-MZM 激光测距的工作原理,

建立了拍频信号与距离的理论模型,分析了反馈控制的机理;之后通过实验验证了测距原理的有效性,对比了有、无相位反馈控制的测距结果;最后对测距稳定度进行了分析。

2 基本原理

2.1 DD-MZM 的使用原理

本实验中 DD-MZM 的使用方式如图 1 所示。激光送入 DD-MZM 后分成两束,一路为 a 光,另一路为 b 光,光场分别表示为

$$\begin{cases} E_a = E_1 \exp[i(\omega_0 t)] \\ E_b = E_2 \exp[i(\omega_0 t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_1 和 E_2 分别为两路光的振幅; ω_0 为激光角频率; t 为时间。DD-MZM 的两条支路都有一个独立的调制驱动口,当我们使用角频率为 ω_m 的射频信号对 a 路进行调制时,该路光场可以表示为

$$E'_a = E_1 \exp\{i[\omega_0 t + \beta \sin(\omega_m t)]\} \approx J_0(\beta) E_1 \exp[i(\omega_0 t)] + J_1(\beta) E_1 \exp[i(\omega_0 + \omega_m)t] - J_1(\beta) E_1 \exp[i(\omega_0 - \omega_m)t], \quad (2)$$

式中: J_0 和 J_1 为贝塞尔函数; β 为调制系数。当 $\beta \ll 1$ 时可以忽略高阶边带,如式(2)所示,经过相位调制后,光场可近似为一个载波(频率为激光频率)和两个边带之

和。由于载波和两个边带的相位差分别为 0 和 π , 经过相同的相移后,探测器测量到的拍频信号在角频率 ω_m 处始终为 0。

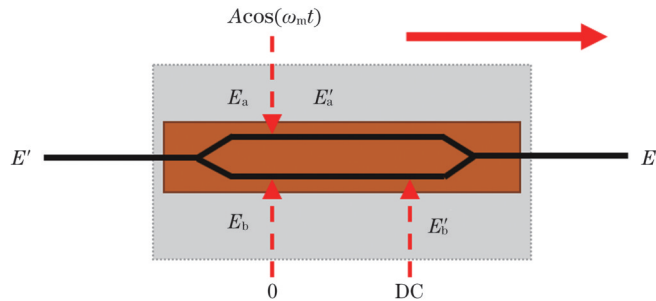


图 1 DD-MZM 产生类双频激光的原理

Fig. 1 Principle of DD-MZM to generate dual-frequency laser

对于 b 路光场,其射频输入口处不加任何调制信号,其光场可以表示为

$$E'_b = E_2 \exp[i(\omega_0 t + \varphi_n + \varphi_{DC})] = E_2 \exp[i(\omega_0 t + \varphi)], \quad (3)$$

式中: φ_n 是两条光路固有的相位差,其值随着温度、湿度等环境条件的变化而变化; φ_{DC} 是低频电压驱动 b 路引入的相位差; $\varphi = \varphi_n + \varphi_{DC}$ 。

两路光在 DD-MZM 出口处合束,光场变为

$$E'' = E'_a + E'_b \approx E_1 J_0(\beta) \exp[i(\omega_0 t)] + E_1 J_1(\beta) \exp[i(\omega_0 + \omega_m)t] - E_1 J_1(\beta) \exp[i(\omega_0 - \omega_m)t] + E_2 \exp[i(\omega_0 t + \varphi)]. \quad (4)$$

此时, a 路的两个边带和 b 路激光类似于两对双频激光,它们的拍频信号在 ω_m 频率处的幅度不为零,在测距时可用于提取距离信息,我们称其为“类双频”激光。

2.2 绝对距离的测量原理

采用上述“类双频”激光进行绝对距离测量的实验原理如图 2 所示。激光出射到自由空间后分为两路,设定两束光到两探测器的光程分别为 z_1 和 z_2 , 待测绝

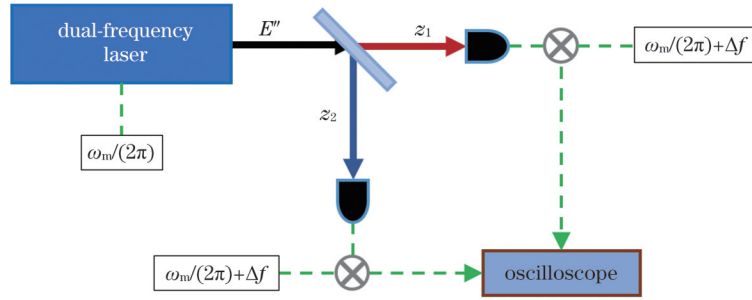


图 2 绝对距离测量原理

Fig. 2 Principle for absolute distance measurement

对距离即为 $d = z_2 - z_1$ 。此时,两探测器探测到的光强分别为

$$\begin{cases} I_1 \approx J_0^2 E_1^2 + 2J_1^2 E_1^2 + E_2^2 + 2J_0 E_1 E_2 \cos \varphi + 4J_1 E_1 E_2 \sin \varphi \sin \left(\omega_m t + \frac{\omega_m}{c} z_1 \right) - 2J_1^2 E_1^2 \cos \left(2\omega_m t + \frac{2\omega_m}{c} z_1 \right) \\ I_2 \approx J_0^2 E_1^2 + 2J_1^2 E_1^2 + E_2^2 + 2J_0 E_1 E_2 \cos \varphi + 4J_1 E_1 E_2 \sin \varphi \sin \left(\omega_m t + \frac{\omega_m}{c} z_2 \right) - 2J_1^2 E_1^2 \cos \left(2\omega_m t + \frac{2\omega_m}{c} z_2 \right) \end{cases}, (5)$$

式中: c 为光速。从式(5)可见,由于 φ 为固定值,通过提取信号在角频率 ω_m 处的相位信息即可反演出距离 d 。为了简化相位探测过程,我们通过外差技术将高

频降为低频,即使用调制频率为 $\omega_m/(2\pi) + \Delta f$ [其中 $\Delta f \ll \omega_m/(2\pi)$]的射频信号,对两路探测信号进行解调,得到两路解调信号分别为

$$\begin{cases} I'_1 = 2J_1 E_1 E_2 \sin \varphi \left[\cos \left(2\pi \Delta f t - \frac{\omega_m}{c} z_1 \right) - \cos \left(2\omega_m t + 2\pi \Delta f t + \frac{\omega_m}{c} z_1 \right) \right] \\ I'_2 = 2J_1 E_1 E_2 \sin \varphi \left[\cos \left(2\pi \Delta f t - \frac{\omega_m}{c} z_2 \right) - \cos \left(2\omega_m t + 2\pi \Delta f t + \frac{\omega_m}{c} z_2 \right) \right] \end{cases} (6)$$

将包含 $2\omega_m$ 的高频项滤掉后得到包含距离信息的低频 Δf 项。使用正弦函数对两路解调信号进行拟合并提取相位,得到两臂相位差 $\Delta\Phi$,根据合成波长测距原理,最终待测距离 D 表示为

$$D = \frac{\pi c}{\omega_m} \left(N + \frac{\Delta\Phi}{2\pi} \right), (7)$$

式中: N 为未知整数,称为整周模糊度。 $\lambda = 2\pi c/\omega_m$ 为合成波长, $\lambda/2 = \pi c/\omega_m$ 为非模糊距离。

由于DD-MZM的调制频率可以进行快速的大范围调节,因此可以很容易实现多测尺的切换。为了扩大非模糊距离,我们将调制频率切换为与 ω_m 略微不同的 ω'_m 。设原先根据调制频率为 ω_m 时测得的相位差 $\Delta\Phi$ 计算出测距结果为 d ,改成 ω'_m 后测距结果为 d' ,那么待测距离可表示为

$$D = d + \frac{\lambda}{2} N = d' + \frac{\lambda'}{2} N', (8)$$

式中: $\lambda' = 2\pi c/\omega'_m$ 为调制频率 ω'_m 对应的合成波长; N' 为切换调制频率后的整周模糊度。当 $D < \pi c/(\omega_m - \omega'_m)$ 时, $N = N'$ 。可以通过实际测量值 d 和 d' ,计算出整数 N ,进而求出待测距离 D 。此时对应的

非模糊距离被大幅度扩展,从原先的 $\pi c/\omega_m$ 增长为 $\pi c/(\omega_m - \omega'_m)$ 。在该距离范围内,根据式(6),整周模糊度 N 可表示为

$$N = \left\lfloor \frac{2(d'_1 - d_1)}{\lambda - \lambda'} + \frac{1}{2} \right\rfloor, (9)$$

而待测距离可以表示为

$$D = d + \frac{\pi c}{\omega_m} \left\lfloor \frac{2(d'_1 - d_1)}{\lambda - \lambda'} + \frac{1}{2} \right\rfloor, (10)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

3 实验装置及结果分析

基于上述原理进行绝对距离测量的实验装置如图3所示。我们使用窄线宽光纤激光器作为光源,输入波长为 $1.57 \mu\text{m}$,线宽约为 1 kHz 。激光送入DD-MZM,使用频率为 1 GHz 的射频信号驱动MZM中的a路光场,其中调制系数约为 0.1 。实验中,为了避免温度变化在DD-MZM中引入噪声,我们将DD-MZM放入一个温控模块中,对其温度进行实时控制,温控精度达到 $0.001 \text{ }^\circ\text{C}$ 。DD-MZM输出的激光通过准直透镜后变为空间光,之后通过一个消偏振分光镜被分为

两路:一路直接入射到探测器(PD 1),作为长度固定的参考臂;另一路激光经一个放置在导轨上的反射镜 M_2 反射后原路返回,再次通过分光镜后进入探测器(PD 2),作为测量臂。两路探测信号分别经过功率放

大器(PA)、混频器(mixer)和低通滤波器(LP)后进行处理和分析。用于降频的射频源(RF 2)与 DD-MZM 的调制源(RF 1)由同一个 Rb 钟触发,实验中取 $\Delta f = 10$ kHz。

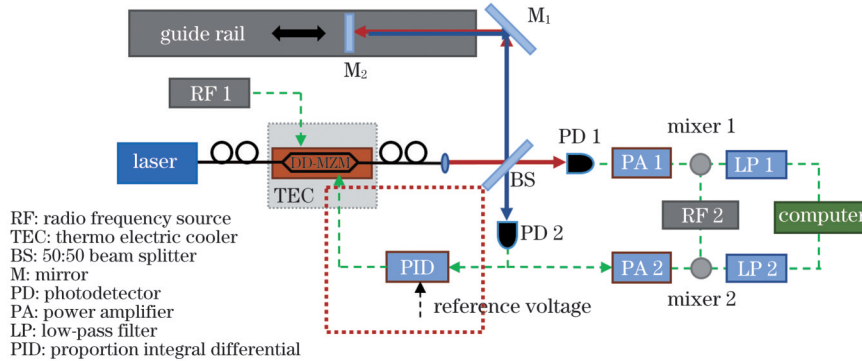


图 3 实验系统简图

Fig. 3 Schematic of experimental system

对采集到的解调信号进行归一化处理,结果如图 4 所示。使用正弦函数对两路解调信号进行拟合,得到两臂相位差 $\Delta\Phi = 0.35\pi$,根据式(7),在一个非模糊距离内的测距结果 $D = 26.25$ mm。

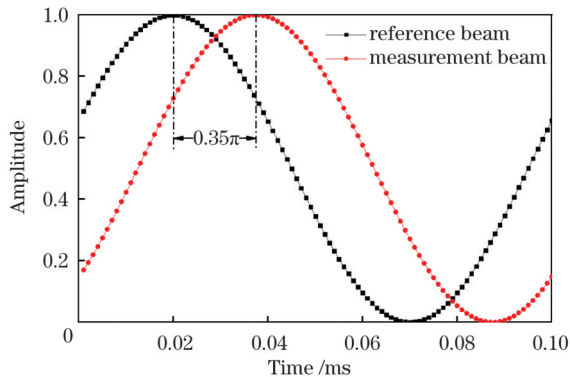


图 4 解调信号的归一化处理及拟合简图

Fig. 4 Schematic of normalization processing and fitting of demodulated signal

从式(6)可以看出,最终送入计算机进行拟合的解调信号包含 φ 项, φ 的起伏会在拍频信号中引入相对强度噪声,导致拟合结果不准确。同时,实验结果显示,探测器对光的拍频强度变化产生非线性响应,这会引入微小的相位噪声,导致测距结果产生误差。而从式(5)还可以看出, φ 除了影响解调信号外,还会影响两个探测器的直流输出项。因此,基于此理论,实验中我们增加了实时反馈回路(如图 3 中 PID 部分的虚线框所示)以稳定 φ 值,其过程如下:实时监测 PD 2 的直流输出,与参考外部电压相减获得误差信号,再通过一个比例积分微分(PID)系统,反馈控制 DD-MZM 的直流端,从而长期稳定 φ 值。其中,PID 的积分时间常数设置为 10^{-4} s $^{-1}$ 。

实验中,我们首先对 φ 的锁定性能进行了评估。

图 5(a)所示为测量半个小时得到的 PD 2 直流输出信号,采样率为 1 s,其中两条曲线分别对应锁定前、后的结果。锁定前,由于外部温度等因素的变化引起相位噪声 φ_n 值的变化,PD 2 的直流输出信号从 7.95 V 漂移到 7.35 V,幅度变化率达到了 8%,并且随着观测时间的增长,漂移将进一步增加。而锁定后,直流输出信号的漂移被大大抑制,数值被稳定在设置点 8.1 V。为了更好地评估锁定带宽,我们将采样率调节到 1 MHz,对锁定前、后数据进行了 0.1 s 的采集,并对采集数据进行噪声功率谱密度分析,得到的结果如图 5(b)所示,其中两条曲线分别对应锁定前、后的结果。可以看出,锁定后的幅度噪声被大幅度抑制,在低频处(小于 20 Hz)噪声抑制比大于 30 dB,而当频率小于 20 kHz 时,噪声的抑制比可以达到 20 dB 以上。并且可以看到,锁定后噪声谱在 120 kHz 处出现一个隆起,因此我们判断系统的锁定带宽可以达到 120 kHz,这个带宽远大于光纤激光器的线宽(1 kHz),因此锁定 φ 值可以大幅抑制两路激光的相对相位噪声。

为了评估相对相位锁定对测距结果的影响,我们固定被测反射镜的距离,然后对距离结果进行了半小时的连续监测,结果如图 6 所示,其中两条曲线分别为锁定前、后根据两臂相位差 $\Delta\Phi$ 反演得到的距离结果。可以看出,当不对 Φ 进行锁定时, $\Delta\Phi$ 反演得到的距离结果会产生漂移,其值从 144.04 mm 变化到 144.33 mm,变化范围达到 0.27 mm。而锁定之后, $\Delta\Phi$ 的漂移被大幅度抑制,半小时的相位差漂移从 0.004π 变为 0.0003π ,抑制比达到了 11 dB,数据整体呈现为白噪声响应,反演得到的距离保持在 144.32 mm 附近。

为了分析测距系统的稳定度,我们对图 6 中的结果进行阿伦方差分析,得到的结果如图 7 所示,其中两条虚线为对应的白噪声响应曲线。可以看出,当没有对相位进行锁定时,短期内的距离反演稳定度为

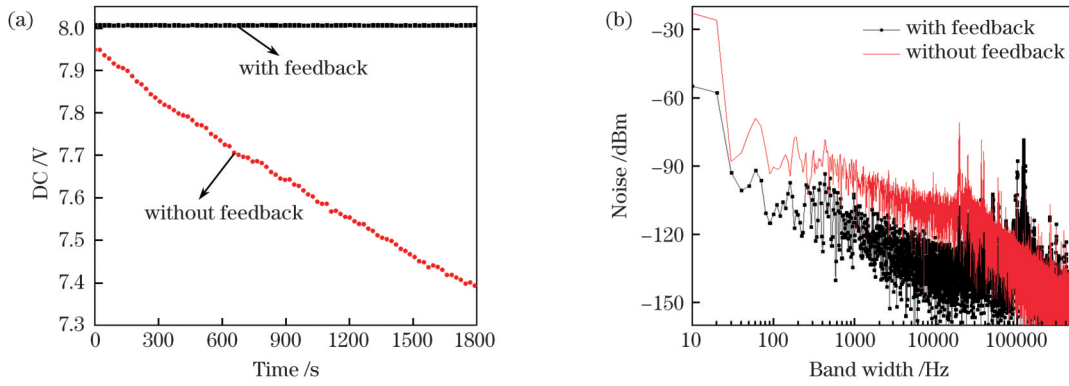


图 5 锁定前、后的对比。(a)激光拍频强度;(b)噪声功率谱密度

Fig. 5 Comparison before and after locking. (a) Laser beat-note intensity; (b) noise power spectral density

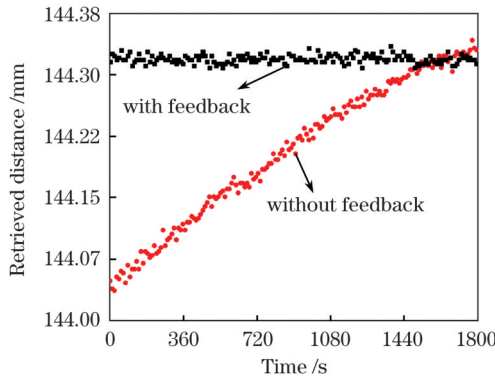


图 6 锁定前、后反演得到的距离结果

Fig. 6 Retrieved distance results before and after locking

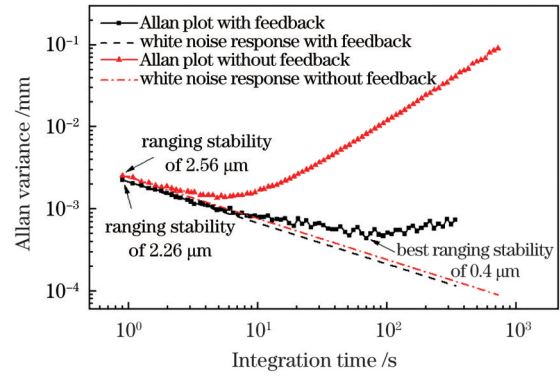


图 7 阿伦方差图

Fig. 7 Allan variance plot

2.56 μm ,但是由于长期漂移的影响,阿伦方差结果在积分时间达到 5 s 之后迅速增大。当对相对相位进行锁定后,系统的白噪声和长期漂移都得到了抑制,在不平均条件下,距离测量稳定度达到了 2.26 μm 。当积分时间增加时,系统的白噪声被进一步抑制,测距稳定度也得到了进一步的提升,并且当积分时间达到 100 s 时,系统达到最佳探测稳定度,为 0.4 μm 。通过在不同距离下进行实验研究,我们发现,当测量距离为 200 ~ 1800 mm 时,检相精度优于 0.00032π ,测距稳定度小于 0.42 μm 。由于实验中采用的调制频率 ω_m 等于 1 GHz,对应的非模糊距离仅为 150 mm,这个量程在很多领域中不满足应用条件。我们基于多测尺原理,根据所得稳定度(采用非平均值 2.26 μm)可知,只要满足 $\delta N = \frac{2\delta|d'_1 - d_1|}{\lambda - \lambda'} < \frac{1}{2}$,可将调制频率切换为 $\omega'_m = 999.957 \text{ MHz}$,此时非模糊距离被大幅度扩展,从原先的 0.15 m 增大为 3488 m。

4 结 论

提出了一种基于 DD-MZM 的激光测距技术。通过只对 DD-MZM 中的一路信号进行调制,产生了测距用的类双频激光,利用降频法分析信号,通过相位法反演测距结果。相较于传统的结合光纤分束器、光纤合束器和声光调制器或者电光调制器产生双频的方式,

该方案结构更加紧凑,两路光的延迟差更小,因此相对相位噪声小,测距稳定性也更好。另外,为了更好地抑制由温度变化造成的两路光的相对相位噪声,以探测器的直流输出信号作为评判依据,产生修正信号,对 DD-MZM 一路的直流输入端进行实时动态控制,稳定了两路光的相对相位差。结果显示,锁定后测距结果的长期漂移被大幅抑制,相位差漂移的抑制比达到了 11 dB,距离测量的稳定度可以达到 0.4 μm 。该方案有利于实现长期稳定、小型化、集成度高的激光测距系统。

参 考 文 献

- [1] Amann M C, Bosch T M, Lescure M, et al. Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement[J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 10-19.
- [2] 王一帆, 徐欣, 谈宜东. 激光精密测距技术进展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(6): 22-33.
Wang Y F, Xu X, Tan Y D. Laser precision ranging technology [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(6): 22-33.
- [3] 姚鑫, 李嘉敏, 王国永, 等. 面向星间激光干涉测距的高精度小型化验证系统[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 0915001.
Yao X, Li J M, Wang G Y, et al. High-precision miniaturized demonstration system for inter-satellite laser interferometric ranging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0915001.
- [4] Smullin L D, Fiocco G. Optical echoes from the moon[J]. Nature, 1962, 194(4835): 1267.
- [5] 赵旭, 苏中, 李连鹏, 等. 脉冲激光飞行时间测距误差补偿技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2300001.
Zhao X, Su Z, Li L P, et al. Research progress of error

- compensation technology for pulsed laser time-of-flight ranging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2300001.
- [6] Wang Y H, Su P, Parks R E, et al. Swing arm optical coordinate-measuring machine: high precision measuring ground aspheric surfaces using a laser triangulation probe[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 073603.
- [7] 陈千颂, 赵大龙, 杨成伟, 等. 自触发脉冲飞行时间激光测距技术研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(6): 745-748.
Chen Q S, Zhao D L, Yang C W, et al. Study on self-triggering pulsed time-of-flight laser ranging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(6): 745-748.
- [8] 赵天鹏, 缪伟嘉, 何德勇, 等. 一种明显提高相位测距分辨率的方法[J]. *光电工程*, 2007, 34(5): 43-47.
Zhao T P, Miao W J, He D Y, et al. Method for improving phase ranging resolution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(5): 43-47.
- [9] Guo D M, Wang M. Self-mixing interferometry based on a double-modulation technique for absolute distance measurement[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(9): 1486-1491.
- [10] 傅勤毅, 周遵梅, 金鼎沸, 等. 三角波调制在激光测距中的应用研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304006.
Fu Q Y, Zhou Z M, Jin D F, et al. Triangular-wave modulation in a laser ranging system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304006.
- [11] 王国超, 谭立龙, 颜树华, 等. 基于光梳多波长干涉实时绝对测距的同步相位解调[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0112003.
Wang G C, Tan L L, Yan S H, et al. Synchronous phase demodulation for real-time absolute distance measurement based on optical comb multi-wavelength interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112003.
- [12] Eberhard W L, Schotland R M. Dual-frequency Doppler-lidar method of wind measurement[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(17): 2967-2976.
- [13] 邹峰, 张官扬, 郑天雄, 等. 基于红外双频光拍频的绝对距离测量方法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2020(7): 110-117.
Zou F, Zhang G Y, Zheng T X, et al. Research on absolute distance measurement method based on infrared dual frequency optical beat frequency[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(7): 110-117.
- [14] 李艳辉, 吴振森. 基于双频脉冲激光器的距离多普勒探测[J]. *西安电子科技大学学报*, 2011, 38(3): 159-163.
Li Y H, Wu Z S. Range Doppler detection based on the pulsed two-frequency laser[J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(3): 159-163.
- [15] 姜成昊, 杨进华, 张丽娟, 等. 基于激光拍频高精度相位式测距方法[J]. *光子学报*, 2014, 43(9): 0912006.
Jiang C H, Yang J H, Zhang L J, et al. High-precision phase-shift laser range finder system based on laser beat-frequency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0912006.
- [16] 赵显宇, 曲兴华, 陈嘉伟, 等. 一种基于光电调制光梳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.
- [17] 单慧洁, 杨宏志, 杨苏辉, 等. 激光强度起伏及相位噪声对光学双频探测的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1212005.
Shan H J, Yang H Z, Yang S H, et al. Effects of laser intensity fluctuation and phase noise on dual-frequency laser detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1212005.
- [18] Salehi M R, Cabon B. Theoretical and experimental analysis of influence of phase-to-intensity noise conversion in interferometric systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(6): 1510-1518.
- [19] 刘玉周, 朱国力, 赵斌. 基于马赫增德尔调制器的相位式激光测距[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(21): 99-104.
Liu Y Z, Zhu G L, Zhao B. Phase-shift range finder based on Mach-Zehnder modulator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(21): 99-104.

Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator-Based Laser Ranging Technology

Zhang Bofeng^{1,2}, Zhao Gang^{1,2*}, Yan Xiaojuan^{1,2}, Ma Weiguang^{1,2***}

¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;

²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China

Abstract

Objective Ranging technology has important applications in many fields. Lasers have excellent coherence and high brightness, and therefore, their employment in ranging has rapidly promoted the development of various absolute or relative distance measurement technologies. Among them, dual-frequency laser ranging technology, which combines multi-wavelength interferometry and the phase method, has been demonstrated to be a powerful ranging tool. The distance is deduced by the relative phase difference between two beat frequencies generated in the echo light and reference light, each of which is composed of two lasers with different frequencies. However, the application and generalization of the traditional dual-frequency laser ranging technology are impeded by its complexity, limited measuring range, low phase detection stability, large phase noise, and low sensitivity.

Methods We propose a novel dual-frequency laser ranging technology based on a dual-drive Mach-Zehnder modulator (DD-MZM). Only the light in one of the two phase modulators inside the DD-MZM is modulated by a radio frequency and then is combined with that within the other phase modulator. Consequently, a light source analogous to a dual-frequency laser is generated in the output of the DD-MZM. The noise intensity induced by the phase difference is significantly suppressed due to the tiny difference in the phase shifts between the two light paths inside the DD-MZM. In addition, to further restrict the phase difference noise, a real-time phase shift control is implemented in one path of the DD-MZM using a feedback loop. The error signal of the feedback is generated from the direct current (DC) output of one detector monitoring the beat note relative to the phase noise. In this paper, the theoretical model for

laser ranging is first presented using the electromagnetic transfer function. Subsequently, the principle of feedback control is analyzed. Based on the model, the experimental setup is established. The signal is acquired using frequency down-conversion and the distance information is retrieved using the phase method.

Results and Discussions First, we evaluate the locking performance for the control of the phase difference between the two optical paths in the DD-MZM. Fig. 5(a) shows the DC output signal of photodetector 2 (PD 2) after measurement for half an hour. The figure shows that, without locking, the DC signal changes with a relative proportion of 8%, and this drift increases further as the observation time increases. However, with locking, the drift of the DC output signal is significantly suppressed, and the value is stabilized at the setpoint, which is 8.1 V in the current system. To further evaluate the locking bandwidth, we perform noise power spectral density analysis on the acquired data, and the results are shown in Fig. 5(b). It is clear that the locking bandwidth can reach 120 kHz, which is much larger than the linewidth of the fiber laser (1 kHz). Consequently, the relative phase noise of the two lasers can be greatly suppressed, and the coherence of the two lasers is improved. To evaluate the effect of phase locking on the ranging results, the distance of the target mirror is fixed. The distance results are continuously monitored for half an hour and are shown in Fig. 6. It is clear that when the phase difference of the two optical paths in the DD-MZM is unlocked, the obtained distance value drifts from 144.04 mm to 144.33 mm over a range of 0.27 mm. With locking, the drift of the phase measurement results is greatly suppressed from 0.004π to 0.0003π , and the suppression ratio reaches 11 dB. The remaining noise exhibits a white noise behavior. The retrieved distance with locking remains at approximately 144.32 mm. To analyze the stability of the ranging system and to assess its sensitivity, we perform Allan variance analysis based on the results shown in Fig. 6, and the obtained results are shown in Fig. 7. It can be seen that when the phase is unlocked, the uncertainty of ranging is $2.56\ \mu\text{m}$ in the short term, and due to the influence of long-term drift, the Allan variance rapidly increases when the integration time exceeds 5 s. However, with locking, both the white noise and long-term drift of the system are suppressed, and the uncertainty of the distance measurement reaches $2.26\ \mu\text{m}$ in the short term. When the integration time increases, the white noise of the system is further restrained. Further, the system achieves an optimal uncertainty of $0.4\ \mu\text{m}$ when the integration time is 100 s. When repeating the experiments with different distances, the phase detection accuracy is found to be better than 0.00032π , and the ranging stability can be less than $0.42\ \mu\text{m}$ when the measurement distance is 200–1800 mm.

Conclusions In this paper, we propose a novel laser ranging technology based on a DD-MZM. A dual-frequency laser for ranging is generated by modulating one light path inside the DD-MZM. To facilitate the detection system, the beat note is analyzed by the down-frequency method, and the ranging result is deduced using the phase method. Compared with the traditional method of generating dual-frequency lasers, which is based on the combination of fiber beam splitters, fiber beam combiners, and acousto-optic modulators or electro-optic modulators, the system has a more compact structure and a much smaller path difference between the two light paths. Therefore, its relative phase noise is smaller, and the ranging stability is better. In addition, to further suppress the relative phase noise of the two light paths, we use the DC output signal to generate a correction signal to perform real-time dynamic control of the DC input of one path of the DD-MZM. The results demonstrate that the long-term drift of the ranging results with locking is greatly suppressed with a suppression ratio of 11 dB, and the distance measurement stability can reach $0.4\ \mu\text{m}$. This novel scheme is conducive to realizing a long-term stable, miniaturized, and highly integrated laser ranging system.

Key words measurements; laser ranging; dual-drive Mach-Zehnder modulator; dual frequency laser; laser frequency modulation