

# 基于四波混频的调频连续波测距振动抑制方法\*

朱志忠<sup>1)2)</sup> 王正<sup>2)</sup> 肖子行<sup>2)</sup> 董登峰<sup>2)†</sup> 甄雪芝<sup>2)</sup> 周维虎<sup>1)2)</sup>

1) (南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

2) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2025年10月17日收到; 2025年11月22日收到修改稿)

调频连续波测距技术在工业制造领域应用广泛, 尤其被广泛用于大型高端装备尺寸测量与系统装配等. 但测量现场由于存在微小振动, 振动产生的多普勒频移导致拍频信号展宽, 无法实现准确测量, 从而影响测距系统的测量精度. 本文采用一种基于四波混频效应的振动抑制方法, 单频激光器发出的单频激光和可调谐激光器出射的调频光经过高非线性光纤, 产生四波混频效应形成转换光, 调频光与转换光形成了完全同步的对称扫频光源, 可以抑制振动引起的多普勒频移. 基于马赫-曾德干涉测量原理构建了一套四波混频效应的调频连续波测量系统, 利用该系统对 6.9 m 处静态目标进行测量, 测距峰峰值由抑制前的 199.8  $\mu\text{m}$  降低到 16  $\mu\text{m}$ , 提升 12.4 倍; 在 6—7.2 m 范围内的测距精度比对实验结果高于 9.4  $\mu\text{m}$ . 实验结果表明, 基于四波混频效应的振动抑制方法能够有效提高调频连续波测距的测量精度, 对解决工业测量现场振动干扰导致的测距精度遇到的应用问题具有重要意义.

**关键词:** 调频连续波, 四波混频, 振动抑制, 多普勒频移

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251416

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251416

## 1 引言

调频连续波技术 (frequency modulated continuous wave, FMCW) 是一种非接触、高精度、快速、无需合作目标的绝对距离测量方法<sup>[1-3]</sup>. 可调谐激光器发射频率连续变化的光波, 经过光纤光路后入射光与反射光在光电探测器表面叠加形成拍频信号, 降为可以测量的中频信号, 通过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 计算中频数值从而得到距离值. FMCW 测距技术相对于脉冲和相位法激光测距技术, 信号信噪比要求低, 而测量精度更高. 高精度 FMCW 测距技术在工业制造领域如飞机/船舶制造、核电工程、汽车生产及大型零部件装配等应用广泛<sup>[4,5]</sup>. 由于应用现场空间布局大、机电设备多、操作人员走动频繁, 隔振条件

差, 造成被测目标伴随着空气扰动、机械抖动等环境因素存在不可避免的振动. 振动会严重影响 FMCW 拍频信号质量, 导致很大的测量误差, 因此抑制振动是 FMCW 测距系统亟需解决的关键难题之一.

国内外学者针对调频连续波测距系统的振动抑制方法做了大量的研究工作. 2007年, Yang 等<sup>[6]</sup>采用波长为 665.1—675.2 nm 和 669.2—679.3 nm 的两台可调谐激光器对 41 cm 处的目标进行测量, 振动抑制前后的测量精度分别为 5.7  $\mu\text{m}$  和 0.2  $\mu\text{m}$ ; 2012年, Kakuma 和 Katase<sup>[7]</sup>采用两个扫频方向相反的半导体调谐激光器对目标进行测量, 通过相位偏移平均消除目标的微小振动, 振动抑制前后的测量精度分别为 0.69 mm 和 0.018 mm; 2016年, 刘国栋等<sup>[8]</sup>在色散补偿的基础上采用卡尔曼滤波与交叠分时 Chirp Z 变换结合方法对测

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFF0717900) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongdengfeng@ime.ac.cn

量结果进行状态估计, 有效地降低了环境振动对测量结果的影响, 测量标准差由  $185.4 \mu\text{m}$  降低到  $9 \mu\text{m}$ ; 2019 年, 李雅婷等<sup>[9]</sup> 采用四波混频效应研究了调频连续波测距系统振动补偿方法, 对  $5 \text{ m}$  处的振动目标进行测量, 测量标准差由补偿前的  $1.062 \text{ mm}$  减小为  $29 \mu\text{m}$ , 但只是进行了仿真研究; 2020 年, Shang 等<sup>[10]</sup> 采用单频激光器和波分复用器构建了一种外差干涉仪以检测振动量的变化, 利用声光调制器对扫频和固定频率做频移, 用于消除目标振动引起的频偏, 在  $10 \text{ m}$  范围测距精度为  $4.26 \mu\text{m}$ . 本文采用一种基于四波混频 (four wave mixing, FWM) 效应的对称扫频光源 FMCW 测距系统, 相对其他测距方法无需两台可调谐激光器和其他光学器件, 光路复杂度低、研制成本低; 通过非线性光纤波长转换技术解决了对称扫频光源完全同步的问题; 最后数据处理速度快, 减少硬件资源占用量, 无需增加卡尔曼滤波等算法. 本文首先分析了振动对测量精度影响的原理, 搭建了 FMCW 测距系统和实验验证装置, 并利用对称扫频光源测距系统对  $6.9 \text{ m}$  处的目标进行测量, 实验结果表明 FWM 效应对于提升调频连续波测距系统应用效果具有重要意义.

## 2 理论分析

### 2.1 FMCW 基本原理

FMCW 测距系统采用可调谐激光器作为光源, 出射光经分束器分为两路, 一路作为参考光, 一路作为测量光经光纤环形器和光学透镜射向被测目标, 反射光原路返回到光学透镜和环形器, 携带距离信息的反射光与参考光经光纤耦合器在平衡探测器处叠加产生拍频, 通过嵌入式数据处理系统解算拍频信号求得距离值<sup>[11-14]</sup>, 如图 1 所示.

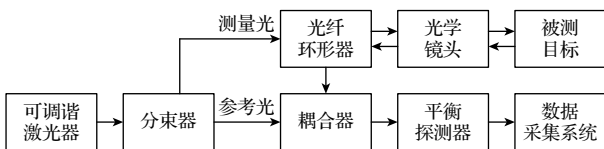


图 1 FMCW 测距系统原理框图

Fig. 1. Principle block diagram of FMCW ranging system.

可调谐激光器的瞬时调制频率  $f_{\text{TL}}(t)$  表示为

$$f_{\text{TL}}(t) = f_0 + \beta t, \quad (1)$$

式中,  $f_0$  是初始频率;  $\beta$  是频率调制速度;  $t$  是调频时间.

经平衡探测器探测的光信号强度  $I(t)$  可表示为

$$I(t) = A_1 A_2 \cos(2\pi\beta\tau_m t + 2\pi f_0 \tau_m - \pi\beta\tau_m^2), \quad (2)$$

式中,  $A_1$  表示测量光的信号强度;  $A_2$  表示参考光的信号强度;  $\tau_m$  表示测量光路的延迟时间.

对 (2) 式进行 FFT, 即可将时域信号变换为频域信号, 求得单一频率的拍频信号为

$$f_B(t) = \beta\tau_m = \frac{B}{T} \frac{2nR_m}{c}, \quad (3)$$

式中,  $B$  表示可调激光器的调谐带宽;  $T$  表示调谐周期;  $R_m$  表示待测距离;  $n$  表示空气折射率.

通过 (3) 式即可求得测量距离  $R_m$ :

$$R_m = \frac{cT}{2nB} f_B. \quad (4)$$

由 (4) 式可知, 拍频频率  $f_B$  的测量精度直接影响测距精度.

### 2.2 目标振动对 FMCW 测距精度影响的模型分析

FMCW 测距系统测量的目标为静止目标, 其拍频频率固定不变, 距离值很容易求得. 但是测量现场工况复杂多样, 即使被测目标被固定的情况下也会存在微小的振动, 振动影响测量光光程差的变化, 光程差与测量光路的时间延迟  $\tau_m$  直接相关, 则 (2) 式变为与微小振动时间  $t$  相关的相位调制, 从而影响拍频信号稳定性, 造成频谱曲线展宽. 被测目标的振动使得测量拍频信号中引入多普勒频移, 从而导致测量精度下降. 振动引起的具体模型分析如下.

假设被测目标振动速度为  $v$ , 则振动引起的位移  $R(t)$  为

$$R(t) = \int_0^t v(t) dt, \quad (5)$$

式中,  $t$  表示微小振动时间, 则测量光路时间延迟可表示为:

$$\tau(t) = \frac{2n[R_m + R(t)]}{c} = \tau_m + \frac{1}{c} \left[ 2n \int_0^t v(t) dt \right]. \quad (6)$$

假设时间  $t$  内, 振动速度  $v$  为定值, 将 (6) 式代入 (2) 式可得

$$I(t) = A_1 A_2 \cos \left[ 2\pi \left( f_0 \tau_m + \beta \tau_m t - \frac{2\nu\beta}{c} t^2 - \frac{2\nu f_0}{c} t \right) \right]. \quad (7)$$

参考光与测量光产生的拍频信号可表示为

$$f_B = \beta\tau_m - \frac{2\nu f_0}{c} - \frac{4\nu\beta}{c}t. \quad (8)$$

由(8)式可以看出,拍频信号是与振动速度和时间密切相关的函数<sup>[17]</sup>.由于扫频周期很短,第三项可以忽略不计.则拍频信号可近似为

$$f_B = \beta\tau_m - \frac{2\nu f_0}{c} = \beta\tau_m - f_D, \quad (9)$$

式中,  $f_D$  为被测目标振动引入的多普勒频移,测量距离可以表示为

$$R = \frac{f_B c}{2\beta} = R_m \pm \frac{2\nu f_0}{2\beta} = R_m \pm \frac{f_0}{B}R(t). \quad (10)$$

微小位移量  $R(t)$  的正负与调频激光的扫频方向相关,由(10)式可以看出,由于目标振动位移量  $R(t)$  引起测距偏差可以放大数倍至几百倍.因此采用 FMCW 系统对工业现场目标测距时,需要对被测目标存在的微小振动进行抑制,以提高 FMCW 测距精度.

### 2.3 基于四波混频效应的 FMCW 测距系统

为了减小被测目标振动对 FMCW 测距系统的影响,本文采用单频激光器作为泵浦光,可调谐激光器作为信号光,利用高非线性光纤产生的 FWM 效应产生转换光,转换光与可调谐激光器的信号光形成扫频方向完全相反的对称光源,通过相同的光路出射到被测目标进行测距,对称光源经测量光路后叠加形成的拍频信号进行混频,抑制目标微小振动对测距精度的影响<sup>[15,16]</sup>.

FWM 效应主要利用非线性介质中存在的三阶参量过程,当强激光入射到非线性介质中时,会与介质产生相互作用.当两束或两束以上的激光同

时入射到非线性介质中,除了原有的频率分量外,会在原有频率两侧生成新的频率成分<sup>[17]</sup>.在高非线性光纤中输入频率为  $f_p$  的泵浦光和频率为  $f_s$  的信号光,两束光经过偏振控制器,使得泵浦光与信号光偏振态保持一致,可以获得最大 FWM 效应.两束光在非线性光纤三阶参量过程作用下产生频率为  $2f_p - f_s$  和  $2f_s - f_p$  的两束新信号光<sup>[18]</sup>,如图 2(a) 所示.由于泵浦光源光强大于调谐激光器信号光光强,所以频率为  $2f_s - f_p$  的新信号光强度较弱,通过滤波片可以滤除,只保留频率为  $2f_p - f_s$  的转换光<sup>[19]</sup>,转换光与可调谐激光器出射光  $f_s$  形成关于泵浦光  $f_p$  对称的同步扫频光源,如图 2(b) 所示.

基于四波混频效应搭建的 FMCW 测距系统示意图如图 3 所示,可调谐激光器发射激光经分束器分为 3 路,第 1 路光与单频激光器出射光经过高非线性光纤基于 FWM 效应产生两束新信号光,经滤光片滤除较弱信号光后出射转换光,转换光与可调谐激光器的第 2 路光经掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行功率放大在耦合器处耦合形成对称扫频光源.对称扫频光源经过分束器分为参考光和测量光两路,测量光射向待测目标后反射光经环形器与参考光耦合形成拍频.为了将转换光两个频率的光分开,增加了波分复用器 (WDM),通过两个光电探测器检测拍频信号被数据处理系统采集接收.可调谐激光器同步出射的第 3 路光进入辅助光路经延时光纤,经过平衡探测器 (BPD) 形成拍频信号作为数据处理板的外部时钟对测量光拍频信号进行二次采样,由于测量光和辅助光来源于同一个可调谐激光器,具有相同的时频特性,二次采样可对扫频光源的非线性进行校正.最后利用数据处理系统内嵌算法有效抑制微小振动.

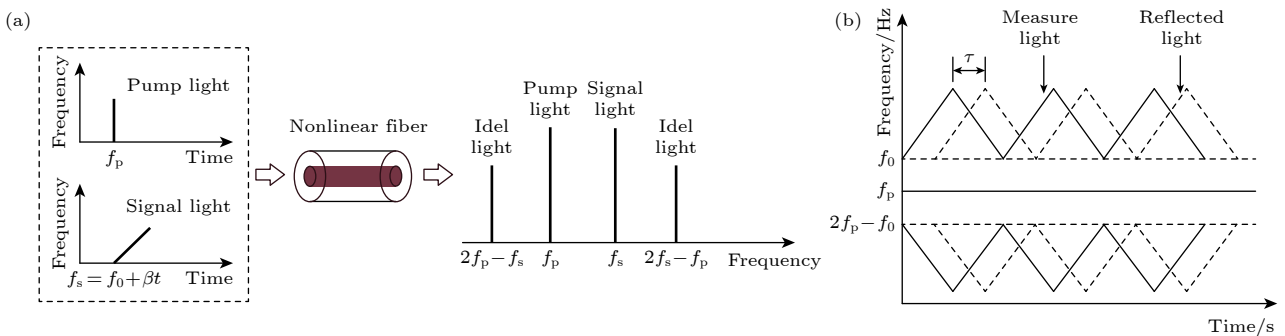


图 2 FMCW 测距光源系统图 (a) FWM 效应原理图; (b) 对称扫频光源示意图

Fig. 2. FMCW ranging light source system diagram: (a) Principle diagram of FWM effect; (b) symmetric frequency sweeping light source diagram.

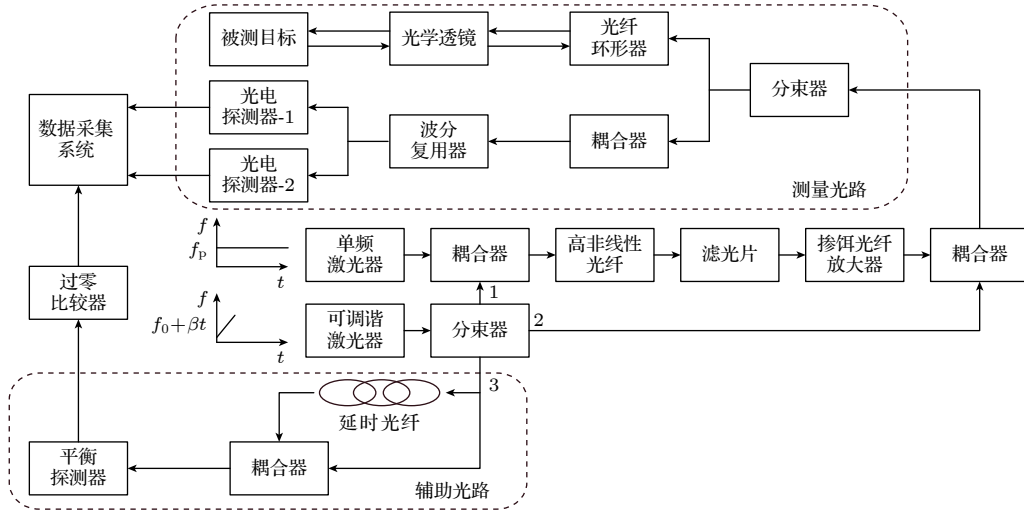


图 3 基于四波混频效应的对称扫频光源 FMCW 测距系统示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the FMCW ranging system based on the symmetric frequency sweeping light source with FWM effect.

当被测目标存在振动时, 测量光路上扫频模式拍频信号可表示为<sup>[20]</sup>

$$I_{\text{up}} = A_{\text{up}} \cos[2\pi(f_B + f_D)t], \quad (11)$$

式中,  $I_{\text{up}}$  表示上扫频拍频信号;  $A_{\text{up}}$  表示上扫频拍频后的合成光强;  $f_B$  表示测量光拍频频率;  $f_D$  表示待测目标微小振动引起的多普勒频移.

测量光路下扫频模式拍频信号可表示为

$$I_{\text{down}} = A_{\text{down}} \cos[2\pi(f_B - f_D)t], \quad (12)$$

式中,  $I_{\text{down}}$  表示下扫频拍频信号;  $A_{\text{down}}$  表示下扫频拍频后的合成光强.

上扫频和下扫频叠加之后可表示为<sup>[21]</sup>

$$I = I_{\text{down}} I_{\text{up}} = \frac{A_{\text{up}} A_{\text{down}}}{2} \cos(4\pi f_B t) + \frac{A_{\text{up}} A_{\text{down}}}{2} \cos(4\pi f_D t). \quad (13)$$

由于  $f_D$  具有较低的频率, (13) 式第二项可以通过高通滤波器滤掉, 多普勒频移对 FMCW 测量系统的影响就可以得到抑制.

### 3 实验结果与分析

为了验证基于四波混频效应抑制微小振动的调频连续波测距方法, 本文以珠海映讯芯光科技有限公司的 TL-3 N 型激光器为单频激光, 输出线宽为 45 kHz, 以 New Focus 的 TL-8800 型激光器为可调谐激光, 输出线宽为 25 kHz, 频率稳定性 < 5 Hz, 高非线性光纤采用长飞光纤光缆股份有限公司的

NL-1550-Zero 型光纤, 非线性系数  $\geq 10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^{-1}$  @1550 nm. 单频光与可调谐光经耦合器同时输入到高非线性光纤当中, 两束激光在非线性光纤介质作用下, 产生 FWM 效应, 如图 2(a) 所示. 具体实验参数如表 1 所列.

表 1 FMCW 测距实验装置相关参数

Table 1. The related parameters of the experimental device of FMCW ranging.

关键部件	参数	参数设置
可调谐激光器	输出功率/mW	10
	调谐范围/nm	1560—1555
	调谐速度/nm/s	1000
单频激光器	输出波长/nm	1551.14
	输出功率/mW	100
转换光	输出波长/nm	1542—1547
	输出功率/ $\mu\text{W}$	20
	转换效率/%	0.2
数据采集系统	触发方式	外触发
	时钟类型	外部时钟
延时光纤	长度/m	183.27495
被测目标	铝板	—

为了验证本文提出的 FMCW 测距系统振动抑制前后测距稳定性, 分别采用上扫频光和下扫频光对 6.9 m 处的铝板进行了测距, 数据采集系统分别采集 30 组数据进行分析, 上扫频测距峰峰值为 199.8  $\mu\text{m}$ , 下扫频测距峰峰值为 199.2  $\mu\text{m}$ , 采用四波混频抑制后的测距峰峰值为 16  $\mu\text{m}$ , 提升了 12.4 倍, 如表 2 所列.

表 2 不同扫频方式下测距峰峰值

Table 2. Peak-to-bottom distance by different scanning methods.

扫频方式	极大值/m	极小值/m	峰峰值/ $\mu\text{m}$
上扫频	6.9167156	6.9165158	199.8
下扫频	6.9171857	6.9169865	199.2
四波混频	6.9168570	6.9168410	16.0

对 30 组测量数据进行进一步分析, 上扫频和下扫频测量数据波动较大, 抑制后测量数据波动很小, 如图 4 所示, 可以看出抑制前后测距稳定性提升效果显著提高. 实验结果表明, 抑制前后测距峰峰值提升了 12 倍之多, 与理论分析结果基本一致, 基于四波混频效应的 FMCW 测距系统对振动抑制具有重要作用.

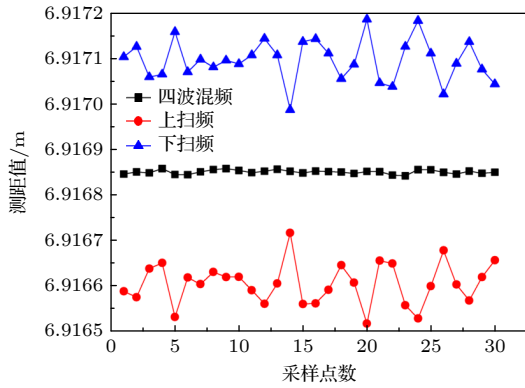


图 4 振动抑制前后测距峰峰值对比

Fig. 4. Peak-to-bottom distance comparison before and after vibration suppression.

前面实验验证了采用四波混频效应的调频连续波测距系统在相同测量距离时稳定性优于未进行振动抑制的测量结果, 为了验证不同距离条件下振动抑制后的测距效果, 对多点距离值的稳定性以及整个测距系统的精度进行了实验, 并与双频激光干涉仪测距方法进行了对比, 测量装置如图 5 所示. 将 FMCW 测距系统和双频激光干涉仪分别放置在两个无隔振的光学平台上, 控制直线导轨每隔 100 mm 移动一次改变铝板和靶球的距离, 记录 10 个不同位置 FMCW 测距值 (每个位置记录 10 组数据) 和双频激光干涉仪的测距值. 在 6 至 7.2 m 范围内, FMCW 测距峰峰值最大为 28.8  $\mu\text{m}$ , 最小为 17  $\mu\text{m}$ , 如图 6 所示, 最大标准差为 6.7  $\mu\text{m}$ , 最小为 3.9  $\mu\text{m}$ , 如图 7 所示, 测量精度最大为 9.4  $\mu\text{m}$ , 最小为 1.2  $\mu\text{m}$ , 如图 8 所示. 说明基于四波混频的 FMCW 测距系统可以达到较高测量精度, 能够为工业制造测量现场提供重要帮助.

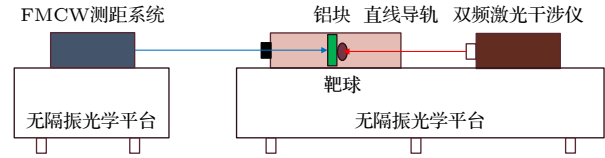


图 5 测距精度对比实验示意图

Fig. 5. Schematic diagram of ranging accuracy comparison experiment.

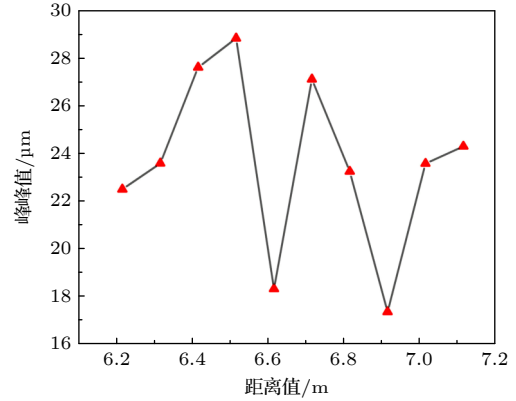


图 6 6—7.2 m 范围内测距峰峰值

Fig. 6. Peak-to-bottom distance in the range of 6–7.2 m.

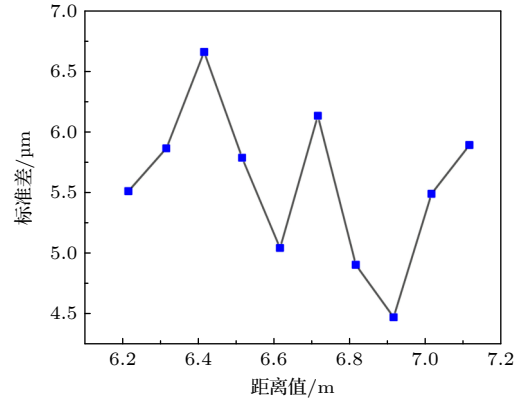


图 7 6—7.2 m 范围内测距标准差

Fig. 7. Standard deviation of distance measurement in the range of 6–7.2 m.

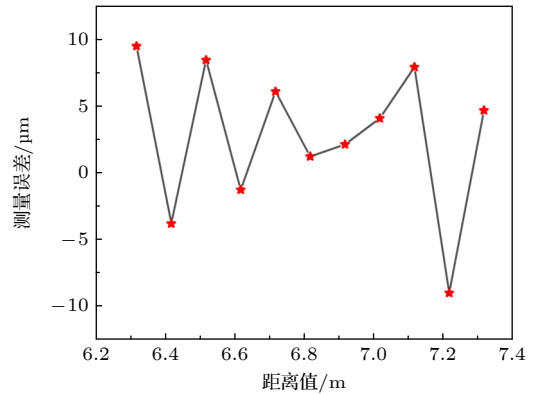


图 8 6—7.2 m 范围内测距系统测量精度

Fig. 8. Measurement accuracy of ranging system within the range of 6–7.2 m.

## 4 结 论

本文基于 FMCW 测距基本原理, 对现场环境中目标微小振动对测量精度的影响进行了理论分析, 采用了一种基于四波混频效应的振动抑制方法, 并进行了实验验证. 实验结果表明, 四波混频效应可以实现完全同步扫频光源, 相对其他振动抑制方法信噪比要求低, 测量精度更高, 且无需增加可调谐激光器, 就可以实现反向同步扫频, 解决了振动在高精度 FMCW 测距系统中的关键难题之一. 本文为改善 FMCW 测距系统性能提供了理论参考, 受限于现有实验条件, 还要在大量程和高带宽等方面进一步验证实验效果.

## 参考文献

- [1] Schneider R, Thürmel P, Stockmann M 2001 *Opt. Eng.* **40** 33
- [2] Miller M E, Lefsky M, Pang Y 2011 *Remote Sens. Environ.* **115** 298
- [3] Li G, Wang R, Song Z, Zhang K, Wu Y, Pan J 2017 *Appl. Opt.* **56** 3257
- [4] Zeb W B, Wm R B, Brant K, Randy R R, Peter A R 2010 *Appl. Opt.* **49** 213
- [5] Masayuki O, Changho C 2020 *Opt. Express.* **28** 23898
- [6] Yang H J, Sven N, Keith R 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* **575** 395
- [7] Kakuma S, Katase Y 2012 *Opt. Rev.* **19** 376
- [8] Liu G D, Xu X K, Liu B G, Chen F D, Hu T, Lu C, Gan Y 2016 *Acta Phys.* **65** 209501 (in Chinese) [刘国栋, 许新科, 刘炳国, 陈凤东, 胡涛, 路程, 甘雨 2016 *物理学报* **65** 209501]
- [9] Li Y T, Zhang F M, Pan H, Shi C Z, Xu X H 2019 *Chin. J. Lasers.* **46** 0104001 (in Chinese) [李雅婷, 张福民, 潘浩, 史春钊, 曲兴华 2019 *中国激光* **46** 0104001]
- [10] Shang Y, Lin J, Yang L H, Liu Y, Wu T F, Zhou Q, Zhu J G 2020 *Opt. Express* **28** 5822
- [11] Yao Y N, Zhang F M, Qu X H 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 1212003 (in Chinese) [姚艳南, 张福民, 曲兴华 2016 *光学学报* **36** 1212003]
- [12] Zhang F M, Yi L, Qu X H 2020 *Opt. Commun.* **474** 126066
- [13] Tao L, Liu Z G, Lü T, Deng Z W, Gong H 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0212002 (in Chinese) [陶龙, 刘志刚, 吕涛, 邓忠文, 龚海 2014 *光学学报* **34** 0212002]
- [14] Feng J, Zhao X Y, Qiu Y, Zhong Q, Dong Y, Zheng S N, Hu T 2025 *Opt. Lett.* **50** 1389
- [15] Krzczanowicz L, Connelly M J 2013 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25** 2439
- [16] Porzi C, Bogoni A, Contestabile G 2013 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25** 175
- [17] Chen X L, Wang X C, Pan S L 2017 *Opt. Eng.* **56** 036114
- [18] Lamminger P, Hakert H, Lotz S, Kolb J P, Kutscher T, Karpf S, Huber R 2023 *Opt. Lett.* **48** 3713
- [19] Shao X J, Yang D X, Geng D 2009 *Acta Photonica Sin.* **38** 652 (in Chinese) [邵潇杰, 杨冬晓, 耿丹 2009 *光子学报* **38** 652]
- [20] Lin C, Wang Y, Tan Y 2023 *J. Lightwave Technol.* **41** 2846
- [21] Li P, Zhang Y, Yao J 2022 *Opt. Commun.* **525** 128860

# Vibration suppression method for frequency-modulated continuous wave ranging based on four wave mixing\*

ZHU Zhizhong<sup>1)2)</sup> WANG Zheng<sup>2)</sup> XIAO Zihang<sup>2)</sup> DONG Dengfeng<sup>2)†</sup>  
ZHEN Xuezhi<sup>2)</sup> ZHOU Weihu<sup>1)2)</sup>

1) (*College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

2) (*Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

( Received 17 October 2025; revised manuscript received 22 November 2025 )

## Abstract

Frequency-modulated continuous wave ranging technology is widely used in industrial manufacturing. Because the on-site working environments are complex, the measured target may have slight vibration. The Doppler frequency shift caused by vibration leads to the broadening of the beat frequency signal generated by the superposition of the reference light wave and the measuring light wave in the continuous wave ranging system, which reduces the measurement accuracy of the ranging system. In this paper, we analyze the measurement principle of frequency modulation continuous wave ranging technology and the influence of target vibration on the range measurement accuracy. The analysis results indicate that the target vibration displacement can amplify the measurement error by dozens to hundreds of times. To address the above measurement error caused by tiny vibration displacement, in this paper we propose a vibration suppression method for the frequency modulation continuous wave ranging based on the four-wave mixing effect. Firstly, the generation principle of four-wave mixing is introduced. The single-frequency laser is used as the pump light, and the tunable laser is used as the signal light. These two lights are simultaneously incident into the highly nonlinear fiber. The converted light is generated by the third-order parametric process of the nonlinear medium of the fiber. The converted light and the signal light from the tunable laser form a symmetrical light source with scanning directions that are completely opposite. When the superimposed upper and lower scanning lights are filtered by high-pass filtering, the influence of vibration on the measurement signal is suppressed. Secondly, an experimental system of the four-wave mixing frequency modulation continuous wave is built, and the single-point measurement stability is verified. Based on the Mach-Zehnder interferometric measurement principle, a four-wave mixing effect frequency modulation continuous wave range measurement system is constructed. The static target at 6.9 m away is measured by this constructed ranging system. The distance of peak-to-bottom range is reduced from 199.8  $\mu\text{m}$  before vibration suppression to 16 $\mu\text{m}$ , which represents an improvement of more than 12 times. A ranging accuracy comparison experiment is also carried out in a range of 6–7.2 m, and the ranging accuracy is lower than 9.4  $\mu\text{m}$ . Experimental results demonstrate that the vibration suppression method utilizing the four-wave mixing effect can effectively improve the measurement accuracy of frequency modulation continuous wave ranging, which holds significant importance in industrial applications.

**Keywords:** frequency-modulated continuous wave, four-wave mixing, vibration suppression, doppler shift

DOI: [10.7498/aps.75.20251416](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251416)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251416](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251416)

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFF0717900).

† Corresponding author. E-mail: [dongdengfeng@ime.ac.cn](mailto:dongdengfeng@ime.ac.cn)

## 基于四波混频的调频连续波测距振动抑制方法

朱志忠 王正 肖子行 董登峰 甄雪芝 周维虎

## Vibration suppression method for frequency-modulated continuous wave ranging based on four wave mixing

ZHU Zhizhong WANG Zheng XIAO Zihang DONG Dengfeng ZHEN Xuezhi ZHOU Weihu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050403 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251416

CSTR: 32037.14.aps.75.20251416

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251416>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于级联四波混频过程产生四模簇态

Generation of four-mode cluster states based on cascade four-wave mixing process

物理学报. 2022, 71(16): 160304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220433>

#### 基于四波混频过程的纠缠光放大

Amplification of entangled beam based on four-wave mixing process

物理学报. 2022, 71(5): 050301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211324>

#### 双层石墨烯薄膜体系中的四波混频特性

Four-wave mixing properties in bilayer graphene nanosystem

物理学报. 2023, 72(12): 126801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230012>

#### 基于室温里德伯原子四波混频的微波-光波转换特性

Microwave-to-optics conversion characteristics based on four-wave mixing of Rydberg atoms at room temperature

物理学报. 2025, 74(16): 164209 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250706>

#### 基于半导体量子阱中四波混频效应的高效光学非互易

Efficient optical nonreciprocity based on four-wave mixing effect in semiconductor quantum well

物理学报. 2024, 73(1): 014201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231212>

#### 基于四波混频过程产生介于锥形探针光和锥形共轭光之间的多模量子关联

Experimental generation of multimode quantum correlations between a conical probe and a conical conjugate based on a four-wave mixing process

物理学报. 2022, 71(16): 160306 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220081>