



双光梳非线性异步光学采样测距中关键参数的数值分析

夏文泽 刘洋 赫明钊 曹士英 杨伟雷 张福民 缪东晶 李建双

Numerical analyses of key parameters of nonlinear asynchronous optical sampling using dual-comb system

Xia Wen-Ze Liu Yang He Ming-Zhao Cao Shi-Ying Yang Wei-Lei Zhang Fu-Min Miao Dong-Jing
Li Jian-Shuang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 180601 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210565

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210565>

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

一种基于电光调制光频梳光谱干涉的绝对测距方法

Method of measuring absolute distance based on spectral interferometry using an electro-optic comb

物理学报. 2020, 69(9): 090601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200081>

飞秒脉冲非对称互相关绝对测距

Absolute distance measurement based on asymmetric cross-correlation of femtosecond pulse

物理学报. 2018, 67(21): 210601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181274>

光频梳频域干涉测距主要参数分析及一种改进的数据处理方法

Analysis of main parameters of spectral interferometry ranging using optical frequency comb and an improved data processing method

物理学报. 2019, 68(19): 190602 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190836>

光频链接的双光梳气体吸收光谱测量

Optical frequency linked dual-comb absorption spectrum measurement

物理学报. 2018, 67(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180150>

基于光学频率梳的超低噪声微波频率产生

Ultra-low noise microwave frequency generation based on optical frequency comb

物理学报. 2021, 70(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201925>

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

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

物理学报. 2021, 70(4): 040601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201225>

双光梳非线性异步光学采样测距中 关键参数的数值分析*

夏文泽¹⁾²⁾ 刘洋^{2)†} 赫明钊²⁾ 曹士英²⁾ 杨伟雷²⁾³⁾
张福民¹⁾ 缪东晶²⁾ 李建双²⁾

1) (天津大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

2) (中国计量科学研究院, 北京 100029)

3) (浙江理工大学, 纳米测量技术实验室, 杭州 310018)

(2021年3月25日收到; 2021年4月27日收到修改稿)

双光梳异步光学采样的绝对测距方法具有量程大、测速快和精度高等特点, 在几何量精密测量领域具有广泛的应用前景. 特别地, 结合异步光学采样和非线性强度互相关的倍频信号时域探测方法, 可以有效避免测量过程中载波包络偏移频率对测距精度的影响. 本文针对双光梳非线性异步光学采样绝对测距系统, 对影响其测距精度的理论模型和关键参数进行数值模拟研究. 对双光梳异步光学采样的理论模型进行分析后, 分别研究了双光梳光源参数(重复频率和重复频率差)、倍频信号精细拟合及脉冲时间抖动对测距精度的影响. 数值分析结果表明: 选择合理的重复频率和重复频率差有利于提升测距精度, 此外适当提高测量速度可以有效降低脉冲时间抖动对测距误差的影响.

关键词: 绝对测距, 光学频率梳, 异步光学采样, 数值分析

PACS: 06.30.Bp, 78.20.Bh, 42.62.Eh, 06.60.Jn

DOI: 10.7498/aps.70.20210565

1 引言

大尺寸几何量精密测量的尺寸通常在一米到几百米的范围, 涉及长度、角度和空间坐标等工业测量中关键的几何参量^[1], 广泛应用于空天技术、尖端科技和装备制造等各个领域, 特别是在精密制造与机械装配、空间遥感测绘和引力波探测等场景中发挥了至关重要的作用^[2,3]. 近年来, 我国在高端制造领域快速发展, 对精密测量技术的要求不断提升. 其中, 大尺寸高精度绝对距离测量作为待测核心几何量的重要观测手段, 对基础科学研究和先进制造技术均具有重大意义.

自1887年迈克尔逊首次提出使用光学干涉仪进行长度测量以来, 光学长度测量得以逐步发展. 其中激光干涉方法测量精度高, 但只能进行增量式的连续位移测量, 断光后无法续接, 这在一定程度上限制了其应用前景^[4]. 2005年, 瑞士皇家科学院将诺贝尔物理学奖授予 H \ddot{a} nisch^[5] 和 Hall^[6], 以表彰他们为光学频率梳的出现所做出的杰出贡献. 光学频率梳是由锁模激光器产生的, 时域上表现为一系列宽度在飞秒(10^{-15} s)量级的光脉冲, 频域上表现为一系列等间隔且光谱范围较宽的频率纵模. 飞秒光学频率梳的出现实现了微波频率标准与光学频率标准的直接连接, 极大地提升了与频率相关的物理量的精密测量能力^[7,8], 也为高精度长度测量

* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFF0200405, 2019YFB2006103)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuyang1@nim.ac.cn

提供了新思路. 二十年来, 飞秒光源的不断发展, 对精密测量领域产生变革, 使得具有量程大、测速快和精度高的绝对测距方法成为现实^[9-11].

2000年, 日本的 Minoshima 团队^[12]首次提出利用飞秒激光合成波长法进行绝对距离测量的方案, 并在地下隧道进行了 240 m 的绝对距离测量实验验证, 随后基于光学频率梳进行绝对距离测量的多种方法不断发展^[13-18], 特别是双光梳测距法, 以其精度高、速度快、量程大的优势, 极具发展前景. 2009年, 美国的 Coddington 等^[19]首次提出了利用两台具有微小重复频率差的光学频率梳系统采用条纹干涉的方法进行绝对距离测量, 但该方法对两台光梳光源的相干性有很高的要求. 2011年, 美国的 Liu 等^[20]基于两台自由运转的飞秒光纤激光器构成的测距系统, 通过希尔伯特变换提取干涉信号的载波包络进行飞行时间解算, 不需要对本振光梳和信号光梳的重复频率和载波包络偏移频率进行精密锁定, 简化了系统. 2013年, 韩国的 Lee 团队^[21]利用平衡互相关技术实现双光梳测距, 将信号脉冲中偏振态相互正交的参考脉冲和测量脉冲分别与本振光梳进行干涉, 消除测量过程中的测量盲区, 并提出了一种拓展测量非模糊范围的方法. 2014年, 清华大学的 Zhang 等^[22]提出一种基于非线性倍频晶体的二阶强度互相关双光梳异步光学采样测距方法, 该方法通过拟合倍频后的强度相干信号并计算峰值间隔得到待测距离, 数据处理过程简单. 2015年, 天津大学的 Shi 等^[23]研究了量子噪声对基于平衡互相关的双光梳测距法测量精度的影响, 并进行了实验验证.

基于非线性强度互相关的双光梳异步光学采样测距方法无需本振光梳与信号光梳发生干涉, 避

免了载波包络偏移频率对测距精度的影响, 直接拟合采样信号进行距离解算, 简化了数据处理过程. 然而, 实际测距精度与异步光学采样步长相关, 该过程取决于双光梳重复频率和重频差的选择; 此外, 倍频信号的拟合方法及脉冲的时间抖动也是影响测距精度的重要因素. 本文基于双光梳非线性异步光学采样的理论模型, 对影响其测距精度的关键参数进行数值仿真研究, 分析了双光梳的重复频率和重频差、倍频信号精细拟合及脉冲时间抖动对测距精度的影响, 为后续的双光梳非线性异步光学采样测距实验提供了理论支撑和参考.

2 双光梳测距原理及理论模型

2.1 异步光学采样测距原理

基于非线性二阶强度互相关的双光梳异步光学采样测距方法的测量原理如图 1 所示, 将两台具有微小重频差 Δf_{rep} 的光梳锁定至铷钟, 其中信号光梳的重复频率为 $f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}$, 本振光梳的重复频率为 f_{rep} . 信号脉冲经过分光棱镜 1 后分别入射至参考镜和测量镜, 分为参考脉冲和测量脉冲. 经两个靶镜反射后在分光棱镜 1 处再进行合光, 此时, 参考脉冲所经过的距离为 L_R , 测量脉冲所经过的距离为 L_M , 所以待测距离为 $L = (L_M - L_R)/2$, 参考脉冲与测量脉冲的光程差以合光后相邻脉冲的时间延迟 τ 记录下来. 本振脉冲在分光棱镜 2 中分别与参考脉冲和测量脉冲合光进入倍频晶体 (如偏硼酸钡晶体) 中进行非线性强度互相关, 利用光电探测器和数字化仪对倍频信号进行探测和处理, 可以精确解算时间延迟 τ .

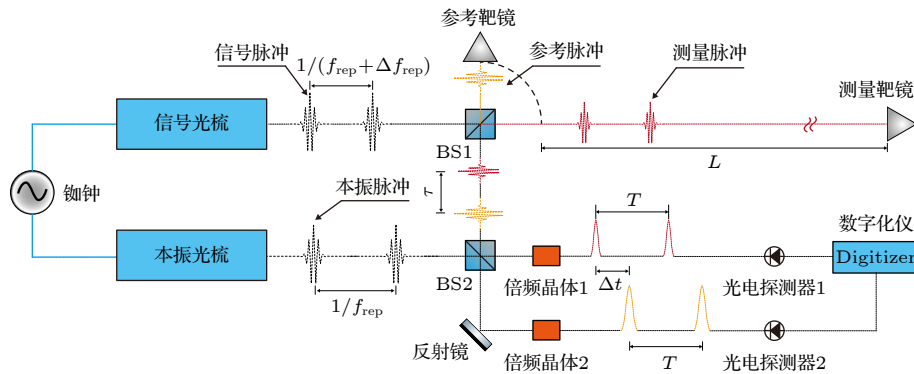


图 1 强度互相关的双光梳非线性异步光学采样测量原理示意图

Fig. 1. Schematic of dual-comb nonlinear asynchronous optical sampling for distance measurement based on intensity cross-correlation method.

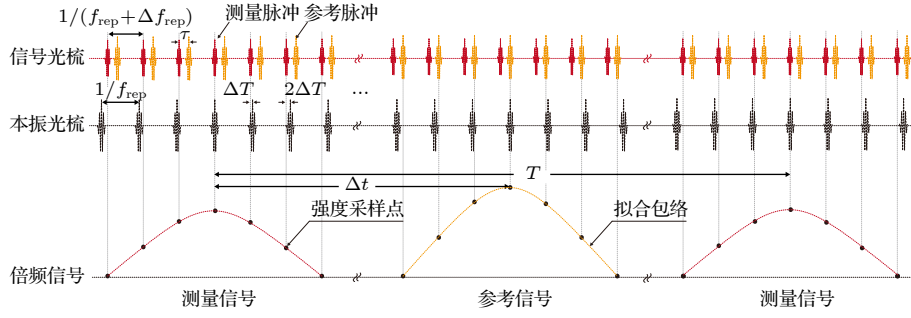


图 2 非线性异步光学采样的时域强度相干过程

Fig. 2. Time domain intensity coherence process of nonlinear asynchronous optical sampling.

基于非线性强度互相关的异步光学采样在时域上的过程如图 2 所示, 两列时间延迟为 τ 的信号脉冲经本振脉冲异步光学采样, 采样步长为

$$\Delta T = \frac{1}{f_{\text{rep}}} - \frac{1}{f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}} = \frac{\Delta f_{\text{rep}}}{f_{\text{rep}}(f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}})}. \quad (1)$$

由于信号光梳与本振光梳存在固定重频差 Δf_{rep} , 因此本振脉冲会分别与参考脉冲和测量脉冲以固定步长 ΔT 逐渐接近再分开, 当本振脉冲与信号脉冲重合时会产生倍频信号, 即产生周期性的参考倍频信号和测量倍频信号, 二者周期均为 $T_{\text{SH}} = 1/\Delta f_{\text{rep}}$, 后续将采集到的倍频信号强度采样点进行精细曲线拟合再解算距离值. 时间延迟 τ 经异步光学采样后被放大为曲线拟合后的倍频信号峰值间隔 Δt , 此时有

$$\tau = \Delta t \cdot f_{\text{rep}} \cdot \Delta T. \quad (2)$$

获得测量脉冲与参考脉冲的时间延迟 τ 后, 根据飞行时间法, 可求得待测距离 L 为

$$L = \frac{c}{2n_g} \cdot \tau = \frac{c}{2n_g} \cdot \Delta t \cdot \frac{\Delta f_{\text{rep}}}{f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}}, \quad (3)$$

其中, c 为真空中的光速, n_g 为空气群折射率.

当待测距离超过非模糊范围 (non-ambiguous range) 时, 待测距离 L_{mea} 可表示为

$$\begin{aligned} L_{\text{mea}} &= M \cdot L_{\text{NAR}} + m_0 \cdot L_{\text{NAR}} \\ &= M \cdot \frac{c}{2n_g \cdot (f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}})} + \frac{c}{2n_g} \cdot \Delta t \cdot \frac{\Delta f_{\text{rep}}}{f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 L_{NAR} 为非模糊范围, $L_{\text{NAR}} = \frac{c}{2n_g \cdot (f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}})}$; M 为正整数. (4) 式右侧第一项称为待测距离的整数部分, 第二项称为待测距离的小数部分, 表示待测距离由整数 M 个脉冲重复间隔和一个小数部分 m_0 的非模糊范围组成, 通过双光梳量程拓展方法解算 M , 可以使该方法具有大尺寸测量能力 [24,25].

同时, 在测距过程中也需要考虑到倍频过程中探测功率、光路损耗和倍频效率的影响.

2.2 理论模型

为研究不同参数对双光梳测距精度的影响, 需要建立其理论模型. 光梳在时域内的电场形式可表示为

$$\begin{aligned} E(t) &= A(t) \exp[i\omega_c t + i(\varphi_0 + \Delta\varphi_{\text{ceo}}t)] \\ &\otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(t - mT), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $A(t)$ 为脉冲的包络函数, 其形状为高斯脉冲, $A(t) = a_0 \exp[-(t/c_0)^2]$; a_0 和 c_0 由真实脉冲的幅值和脉宽决定; ω_c 为光梳中心波长的角频率; φ_0 是光梳脉冲的任意初始相位; $\Delta\varphi_{\text{ceo}}$ 为载波包络相移的变化率, 由腔内色散导致脉冲群速度和载波相速度差异所引起; T 为脉冲周期, 且 $T = 1/f_{\text{rep}}$; m 为光梳脉冲序数.

由上述公式, 参考脉冲 $E_R(t)$ 、测量脉冲 $E_M(t)$ 和本振脉冲 $E_{\text{LO}}(t)$ 的电场形式分别为

$$\begin{aligned} E_R(t) &= \alpha A_{\text{sig}}(t) \exp[i\omega_c t + i(\varphi_{0,\text{sig}} + \Delta\varphi_{\text{ceo,sig}}t)] \\ &\otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(t - m_R T_{\text{sig}}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E_M(t) &= \beta A_{\text{sig}}(t - \tau) \exp\{i\omega_c(t - \tau) \\ &\quad + i[\varphi_{0,\text{sig}} + \Delta\varphi_{\text{ceo,sig}}(t - \tau)]\} \\ &\otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(t - \tau - m_M T_{\text{sig}}), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{LO}}(t) &= A_{\text{LO}}(t) \exp[i\omega_c t + i(\varphi_{0,\text{LO}} + \Delta\varphi_{\text{ceo,LO}}t)] \\ &\otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(t - m_{\text{LO}} T_{\text{LO}}), \end{aligned} \quad (8)$$

其中, α 和 β 为参考脉冲和测量脉冲的幅值系数, 有 $\alpha + \beta = 1$; $A_{\text{sig}}(t)$, $A_{\text{LO}}(t)$ 分别为信号脉冲和本振脉冲的包络函数; φ_{0_sig} , φ_{0_LO} 分别为信号脉冲和本振脉冲的任意初始相位; $\Delta\varphi_{\text{ceo_sig}}$, $\Delta\varphi_{\text{ceo_LO}}$ 分别为信号脉冲和本振脉冲的载波包络相移的变化率; T_{sig} , T_{LO} 分别为信号脉冲和本振脉冲的脉冲周期, 分别有 $T_{\text{sig}} = 1/(f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}})$, $T_{\text{LO}} = 1/f_{\text{rep}}$; m_{R} , m_{M} , m_{LO} 分别为参考脉冲、测量脉冲和本振脉冲的脉冲序号.

光梳脉冲的强度与电场的平方成正比, 其脉冲强度可表示为

$$I(t) = E(t) \cdot E^*(t). \quad (9)$$

本振脉冲分别与参考脉冲和测量脉冲进行强度互相关, 可得到参考脉冲的倍频信号 $I_{2\omega_R}$ 和测量脉冲的倍频信号 $I_{2\omega_M}$ 为

$$\begin{aligned} I_{2\omega_R} &= \int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{R}}(t) \cdot I_{\text{LO}}(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} [E_{\text{R}}(t) \cdot E_{\text{R}}^*(t)] \\ &\quad \cdot [E_{\text{LO}}(t) \cdot E_{\text{LO}}^*(t)] dt, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} I_{2\omega_M} &= \int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{M}}(t) \cdot I_{\text{LO}}(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} [E_{\text{M}}(t) \cdot E_{\text{M}}^*(t)] \\ &\quad \cdot [E_{\text{LO}}(t) \cdot E_{\text{LO}}^*(t)] dt. \end{aligned} \quad (11)$$

根据 (10) 式和 (11) 式, 可采用数值模拟的方法来探究不同参数对双光梳非线性异步光学采样测距精度的影响.

3 双光梳测距参数仿真

根据上述模型分析, 采用数值模拟方法仿真基于强度互相关的双光梳非线性异步光学采样过程. 参考常见双光梳系统性能参数, 现将光梳参数设置如下: 两台光梳的中心波长均为 1560 nm, 锁定后的载波包络偏移频率 (f_{ceo}) 均为 20 MHz, 飞秒脉冲的脉宽为 200 fs, 本振光梳的重复频率 (f_{rep}) 为 200 MHz, 信号光梳的重复频率 ($f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}$) 为 200.005 MHz, 即重频差 (Δf_{rep}) 为 5 kHz, 待测距离为 0.5 m. 图 3 为通过数值模拟生成的基于强度互相关的双光梳异步光学采样图样, 其中参考信号

由参考脉冲与本振脉冲进行强度互相关获得, 测量信号由测量脉冲与本振脉冲进行强度互相关获得, 通过精细拟合参考信号和测量信号的采样点并提取峰值, 可得到倍频信号的时间间隔 Δt 和周期 T . 仿真结果表明, 两次测量信号出现的时间间隔为 0.2 ms, 对应重频差 $\Delta f_{\text{rep}} = 5$ kHz.

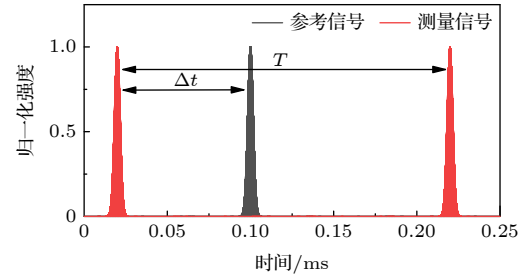


图 3 双光梳强度互相关仿真图

Fig. 3. Simulated pattern of the dual-comb intensity coherence.

为探究重复频率和重频差对双光梳测距精度的影响, 忽略空气群折射率对测距结果的影响, 简化数值分析过程, 取 $n_g = 1$. 该过程中, 测量结果源于倍频信号的时间间隔, 倍频信号强度正比于相互作用的两个基频脉冲的强度, 而光梳载波包络偏移频率是由脉冲群速度和载波相速度差异所引起, 该过程表征基频脉冲包络峰值与载波峰值的相位差, 因此载波包络偏移频率不会对测距结果产生影响. 后续讨论中为方便结果表达, 测量误差为数值仿真测量结果与初始待测距离之间差值的绝对值.

3.1 重频差对测距精度的影响

由 (4) 式可知, 实际测量情况中影响大尺寸绝对距离测量精度的主要因素为空气群折射率 n_g 和信号光梳重复频率 $f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}$, 在理想情况下, 待测距离整数部分的求解精度与测量方法无关, 此时测距精度主要取决于一个非模糊范围内的飞行时间解算过程, 该过程中主要影响因素是双光梳的重复频率和重频差. 因此本文在研究双光梳关键参数对测距精度影响时, 只对待测距离的小数部分进行讨论. 为简化表达, 后续待测距离均代表待测距离的小数部分.

对 (3) 式进行不确定度分析, 求解各项误差源对测量结果的影响, 合成不确定度 u_L 为

$$\begin{aligned}
 u_L^2 &= c_1^2 u^2(n_g) + c_2^2 u^2(f_{\text{rep}}) + c_3^2 u^2(\Delta f_{\text{rep}}) + c_4^2 u^2(t) \\
 &= \left(\frac{\partial L}{\partial n_g}\right)^2 u^2(n_g) + \left(\frac{\partial L}{\partial f_{\text{rep}}}\right)^2 u^2(f_{\text{rep}}) + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta f_{\text{rep}}}\right)^2 u^2(\Delta f_{\text{rep}}) + \left(\frac{\partial L}{\partial t}\right)^2 u^2(t) \\
 &= \left(\frac{L}{n_g}\right)^2 u^2(n_g) + \left(\frac{L}{f_{\text{rep}}}\right)^2 u^2(f_{\text{rep}}) + \left(\frac{ct}{2n_g f_{\text{rep}}}\right)^2 u^2(\Delta f_{\text{rep}}) + \left(\frac{c\Delta f_{\text{rep}}}{2n_g f_{\text{rep}}}\right)^2 u^2(t), \quad (12)
 \end{aligned}$$

其中, 重频差的不确定度 $u(\Delta f_{\text{rep}})$ 为本振光梳的重复频率和信号光梳的重复频率所合成的不确定度, 有: $u(\Delta f_{\text{rep}}) = \sqrt{2} \cdot u(f_{\text{rep}}) = \sqrt{2} \cdot u(f_{\text{rep}})$, $u(t)$ 为拟合倍频信号后所引入的时间不确定度, 该过程中重点考虑重复频率和重频差的影响, 取 $u(t) = 100 \text{ ps}$, $u(f_{\text{rep}}) = 1 \text{ mHz}$, 比较 (12) 式右侧四项不确定度的量级, (12) 式可简化为

$$u_c(L) = \left[\left(\frac{\sqrt{2}L}{\Delta f_{\text{rep}}} \right)^2 \cdot u^2(f_{\text{rep}}) + \left(\frac{c\Delta f_{\text{rep}}}{2n_g f_{\text{rep}}} \right)^2 \cdot u^2(t) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

根据 (13) 式可知, 当 Δf_{rep} 较大时, 会减小由重频差引入的不确定度 $\sqrt{2} \cdot u(f_{\text{rep}})$, 但会增大由拟合时间引入的不确定度 $u(t)$. 因此合理选择两台光梳之间的重频差对提升测距精度具有指导意义.

为探究重频差对测距精度的影响, 设置系统重复频率为 200 MHz, 待测距离为 0.5 m, 重频差以 10 Hz 为增量从 10 Hz 增加至 10 kHz, 数值模拟结果如图 4 所示. 结果表明, 当待测距离和重复频率一定时, 重频差较小时更容易获得较高的测距精度; 随着重频差的增加, 测距精度存在波动的现象. 根据 (1) 式可知, 异步光学采样的步长由系统的重复频率和重频差所决定, 当重复频率确定时, 重频差越小则采样步长越精细, 采集到倍频信号所拟合出的时间间隔越准确, 因此测距精度越高. 由于测距精度存在波动现象, 因此当待测距离和重复频率一定时, 在某一重频差区间将存在一个使测距精度最高的最优值.

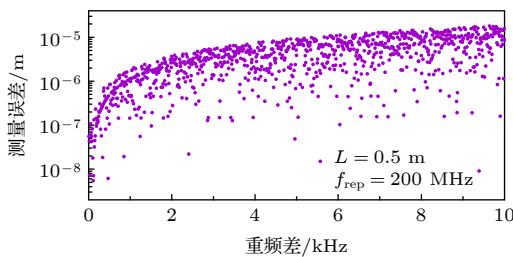


图 4 重频差对仿真测距精度的影响

Fig. 4. Effect of repetition frequency difference on the simulated ranging accuracy.

为更详细探究重频差与测距精度之间的关系, 随机选取某个重频差区间, 通过更小的重频差增量来观察测距精度的变化. 此处选取重频差范围为 4.98 kHz 至 5.02 kHz, 增量为 0.2 Hz, 数值模拟结果如图 5(a) 所示. 结果表明, 在较小的重频差调节范围内, 测距精度的变化非常大且具有周期性. 原因为异步光学采样出现倍频信号峰值时, 采样步长的选择会导致本振光梳与信号光梳的时域位置并非精准重合, 当重合较差时, 拟合倍频信号的峰值将产生较大时间误差.

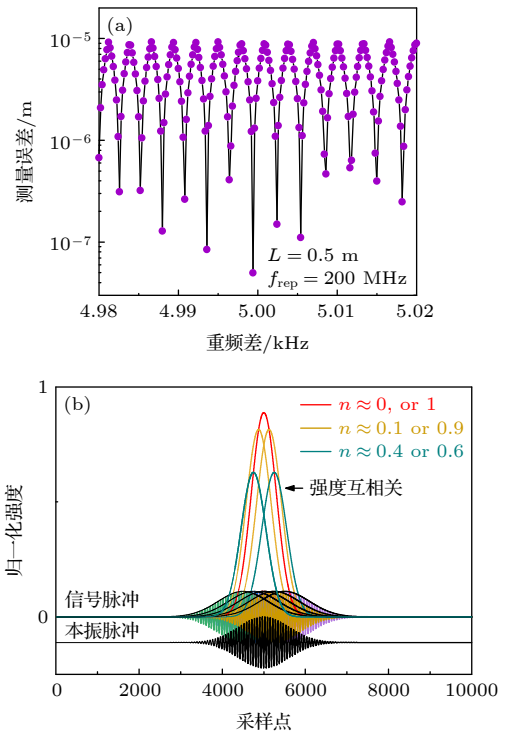


图 5 重频差对仿真测距精度的影响及其现象解释 (a) 微调重频差对仿真测距精度的影响; (b) 脉冲重合示意图

Fig. 5. Effect of repetition frequency difference on the simulated ranging accuracy and its phenomenon explanation; (a) Effect of fine-tuning the repetition frequency difference on the simulated ranging accuracy; (b) schematic of pulse overlap.

根据 (1) 式和 (2) 式可知, 异步光学采样的本质是利用固定采样步长 ΔT 对时间延迟 τ 进行等间

隔采样, 经过 N_0 个采样步长后可得到完整的 τ , N_0 不一定为整数, 因此有

$$N_0 = \frac{\tau}{\Delta T}. \quad (14)$$

理论上可知, 当 N_0 越接近整数, 则异步采样后测得的 τ 越准确. 设 n 为 N_0 的小数部分, 称 n 为本振光梳与信号光梳的重合因子, 表示在异步光学采样出现倍频信号峰值时二者的重合程度. 当重合因子 n 越接近 0 或 1, 二者重合位置越好, 测距精度越高; 当 n 越接近 0.5, 二者重合位置越差, 测距精度越低. 如图 5(b) 所示, 分别给出了本振光梳与信号光梳在最优重合位置 ($n \approx 0$ 或 1)、较好重合位置 ($n \approx 0.9$ 或 0.1) 和较差重合位置 ($n \approx 0.4-0.6$) 的示意图, 以及强度互相关后的倍频信号. 当重复频率不变时, 一些特殊取值的重频差能使倍频信号峰值位置的本振光梳与信号光梳较好地重合, 获得较高的测距精度; 当重频差发生变化时, 信号光梳在时域上将发生偏移, 此时倍频信号峰值处本振光梳和信号光梳的重合程度将发生改变, 从而导致测距精度变化非常明显. 选择图 5(a) 的部分点检验重频差、测距精度与重合因子三者的关系, 结果如表 1 所列, 符合上述推论.

表 1 重频差、测距精度与重合因子的关系
Table 1. Relationships among repetition frequency difference, ranging accuracy and overlap factor.

重频差/Hz	测量误差/ μm	重合因子 n
4981.2	9.163	0.5095
4983.2	4.497	0.7591
4990.8	0.263	0.9859
4999.4	0.052	0.9973
5001.2	7.343	0.3919
5005.4	0.112	0.0059

3.2 重复频率对测距精度的影响

根据 3.1 节分析可知, 异步光学采样的步长会影响系统的测距精度, 而采样步长由系统的重复频率和重频差共同决定, 因此, 探究重复频率对测距精度的影响是非常有必要的. 此处, 设置系统的重复频率分别为 50, 100, 150, 200, 250 MHz, 其余参数保持不变, 测距精度与重复频率的数值模拟结果如图 6 所示. 结果表明, 重复频率的增加有利于测距精度的提升; 随着重复频率的增大, 对测距精度的提升逐渐变小. 当重复频率从 50 MHz 增加

到 200 MHz 时, 测距精度的提升优于一个数量级. 根据 3.1 节分析, 当重频差确定时, 重复频率越大采样步长越精细, 采集到倍频信号所拟合出的时间间隔越准确, 因此测距精度越高. 当重复频率逐渐变大时, 重复频率的增加对采样步长的影响逐渐变小, 故测距精度的上升趋势趋于平缓.

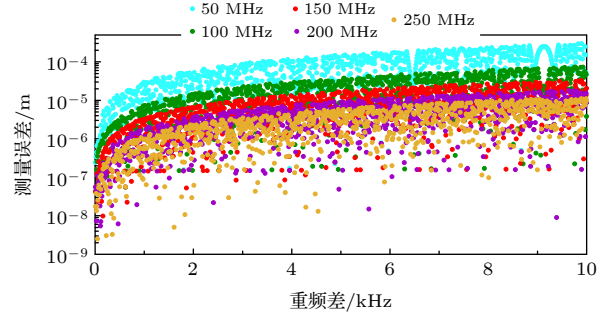


图 6 重频差对不同重复频率仿真测距精度的影响
Fig. 6. Effect of repetition frequency difference on the simulated ranging accuracy with different repetition frequency.

为更详细探究重复频率与测距精度的关系, 随机选取某个重复频率区间, 通过更小的重复频率增量来观察测距精度的变化. 此处选取重复频率范围为 199.990 MHz 至 200.010 MHz, 增量为 5 Hz, 数值模拟结果如图 7 所示. 结果表明, 在一些离散的重复频率处具有较高的测距精度; 随着重复频率的改变, 测距精度的变化具有一定的周期性. 当测距距离和重频差一定时, 在某一重复频率区间将存在一个使测距精度最高的最优值.

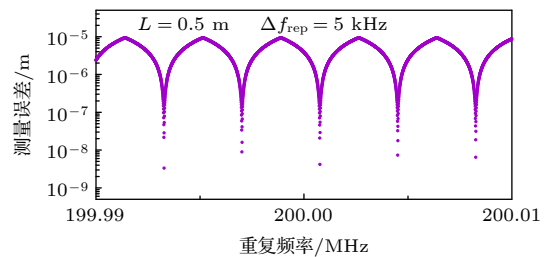


图 7 微调重复频率对仿真测距精度的影响
Fig. 7. Effect of fine-tuning the repetition frequency on the simulated ranging accuracy.

重复频率也是影响采样步长的关键因素, 因此重复频率的选择会影响倍频信号峰值处本振光梳与信号光梳的重合程度. 选择图 7 中部分点检验重复频率、测距精度与重合因子三者的关系, 结果如表 2 所列, 可知重复频率的选择引起脉冲重合程度的改变是测距精度周期性变化的主要原因.

表 2 重复频率、测距精度与重合因子的关系
Table 2. Relationships among repetition frequency difference, ranging accuracy and overlap factor.

重复频率/MHz	测量误差/ μm	重合因子 n
199.993275	0.003	0.0002
199.995125	9.254	0.4938
199.996665	0.183	0.9048
199.997020	0.009	0.9995
200.001665	4.482	0.2390
200.007320	4.724	0.7482

4 倍频信号精细拟合

光源参数可以控制采样步长, 当采样步长一定时, 可以通过精细曲线拟合的插值方法求取飞行时间, 进一步提升测距精度. 强度互相关的本振脉冲和信号脉冲的脉宽为 200 fs, 因此有效重叠时间约为 400 fs. 由 (1) 式可知, 对于重复频率为 200 MHz 的本振光梳, 5 kHz 的重频差对应的单周期扫描步长约为 125 fs. 因此倍频信号的宽度可表示为

$$T_w \approx \frac{400}{125} \times \frac{1}{200 \times 10^6} = 16 \text{ ns}. \quad (15)$$

利用光电探测器进行倍频信号探测时需要考虑探测器响应的上升时间 (rise time) 与倍频信号的脉冲宽度之间的匹配, 由于探测器响应的上升时间至少应为被探测信号宽度的 1/3, 因此选择探测器响应的上升时间应小于 5.3 ns. 此处选择常用光电探测器参数用于对倍频信号进行采样仿真, 其光电响应的上升时间为 2 ns, 输出信号电压值为 0—1 V. 设信号的采样间隔为 2 ns, 若倍频信号采样后不进行拟合, 两个倍频信号之间可引入最大时间间隔误差 Δt_{\max} 为 2 ns, 此时的测距误差为

$$\delta_L = \frac{c \cdot \Delta t_{\max} \cdot f_{\text{rep}} \cdot \Delta T}{2} \approx 7.5 \times 10^{-6} \text{ m}. \quad (16)$$

因此, 进行倍频信号的包络拟合是非常有必要的. 通常情况下, 两种非相干光的超短脉冲进行非线性强度相关后的倍频信号为 sech^2 型脉冲^[26], 因此在进行信号拟合时, 可选取峰值附近的多个采样点按照 sech^2 函数进行曲线精细拟合, 用于寻找倍频脉冲的位置.

sech^2 函数模型可表示为

$$P(t) = A \cdot \text{sech}^2(t/T_0), \quad (17)$$

其中, A 为脉冲的幅值, 根据探测器的输出电压取 $A = 1 \text{ V}$; T_0 为 $P(t)$ 的脉冲持续时间, 脉宽为 $1.763T_0$ ^[27], 则此处 T_0 为 9.08 ns.

根据双光梳异步光学采样的原理, 若参考倍频信号为 $P_R(t)$, 测量倍频信号为 $P_M(t)$, 二者可分别表示为

$$P_R(t) = \text{sech}^2(t/T_0) \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - n_R T_{\text{SH}}), \quad (18)$$

$$P_M(t) = \text{sech}^2[(t - \Delta t)/T_0] \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta[(t - \Delta t) - n_M T_{\text{SH}}], \quad (19)$$

其中, n_R 和 n_M 分别为参考倍频信号和测量倍频信号的序列值.

理想情况下, 信号拟合后的测距误差主要源于信号采样精度不够而出现的曲线拟合误差, 信号采样精度选取常用示波器的参数作为参考, 假设其采样精度为 14 位, 当输入电压为 1 V 时, 误差为 $\pm (0.65\% \text{ 输入电压} + 1.2 \text{ mV})$, 此时最大电压误差为 7.7 mV, 取其分辨率为 0.061 mV. 先设置倍频信号峰值时间间隔 Δt , 根据 (18) 式和 (19) 式生成理想的参考倍频信号和测量倍频信号, 其信号幅值为 1 V; 随机选取采样起点对倍频信号进行采样, 采样间隔为 2 ns, 求出两组倍频信号采样点的峰值时间间隔 Δt_1 ; 再根据采样点拟合出倍频信号并提取信号峰值, 求出拟合后的两组倍频信号峰值时间间隔 Δt_2 . 则未拟合的倍频信号时间间隔误差为 $|\Delta t_1 - \Delta t|$, 拟合后的倍频信号时间间隔误差 $|\Delta t_2 - \Delta t|$, 可根据 (16) 式分别求出拟合前后的测距误差. 选取光梳参数为 $f_{\text{rep}} = 200 \text{ MHz}$, $\Delta f_{\text{rep}} = 5 \text{ kHz}$, 待测距离为 0.5 m, 代入 (18) 式和 (19) 式进行仿真. 随机选取采样起点进行 100 次倍频信号的数值模拟采样, 倍频信号拟合前后的测距精度如图 8 所示, 其中甚至有些信号点的拟合后误差为 0 (图 8 三角形点), 可知信号拟合对测距精度的提高是非常有效的.

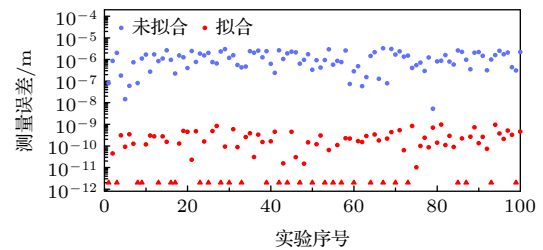


图 8 理想情况下信号拟合对仿真测距精度的影响

Fig. 8. Effect of signal fitting on simulated ranging accuracy under ideal conditions.

5 时间抖动对测距精度的影响

在实际测距中, 飞秒脉冲在产生和传播的过程中, 由于量子噪声 (如增益介质中的放大自发辐射和线性损耗) 和经典噪声 (如泵浦的激光噪声和腔体长度的变化) 的影响, 导致脉冲之间的时间间隔并不是固定的, 即脉冲的位置相对于其理想周期性位置会有微小的时间偏差, 称为脉冲的时间抖动^[28]. 双光梳测距是建立在本振脉冲对信号脉冲采样的基础上, 所以单个光梳脉冲之间的时间抖动必然会影响到异步采样后倍频信号在时域上的位置, 从而影响到测距精度. 脉冲的时间抖动和倍频信号的时间误差如图 9 所示, 其中 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m, \delta_n$ 表示信号脉冲和本振脉冲相对于理想位置的时间抖动, δ_{rt} 和 δ_{rr} 为异步采样放大后的定时抖动.

δ_{rt} 为同一信号脉冲分成的测量脉冲与参考脉冲经本振光梳异步采样生成倍频信号过程中所累积的时间误差, δ_{rr} 为相邻参考脉冲经本振光梳异步采样生成的倍频信号过程中所累积的时间误差, 则有

$$\delta_{rr} = \frac{f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}}{\Delta f_{\text{rep}}} \cdot \sum_{m=1}^N \delta^m, \quad N = \frac{T_{\text{SH}}}{\Delta T}, \quad (20)$$

$$\delta_{rt} = \frac{f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}}{\Delta f_{\text{rep}}} \cdot \sum_{m=1}^q \delta^m, \quad q = \frac{\Delta t}{\Delta T}. \quad (21)$$

根据 (2) 式和 (3) 式, 时间抖动所引入的测距误差为

$$L_{\text{error}} = \frac{c}{2n_g} \cdot \Delta t_{\text{TOF}} = \frac{c}{2n_g} \cdot \left(\frac{\Delta t + \delta_{rt}}{T_{\text{SH}} + \delta_{rr}} - \frac{\Delta t}{T_{\text{SH}}} \right) \times T_{\text{SH}} \cdot \frac{\Delta f_{\text{rep}}}{f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}}. \quad (22)$$

时间抖动由伪随机数生成器生成, 遵循均值为

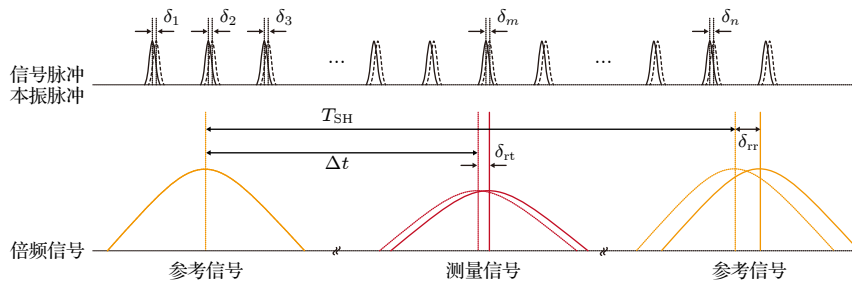


图 9 脉冲的时间抖动和倍频信号的时间误差

Fig. 9. Timing jitter of pulse and time error of second harmonic signal.

δ , 特定方差为 σ^2 的标准正态分布模型. 为探究脉冲的时间抖动对不同距离测距精度的影响, 此处选取均值 $\delta = 0$ fs, 标准差 $\sigma = 1$ fs 的时间抖动模型, 采用 10000 次测距误差的标准差来表征时间抖动对测距系统的影响.

当光梳参数为 $f_{\text{rep}} = 200$ MHz, $\Delta f_{\text{rep}} = 5$ kHz, 即每次测距周期为 $1/\Delta f_{\text{rep}} = 0.2$ ms, 待测距离由 0 增加至 0.75 m (约为一个非模糊范围), 增量为 0.01 m, 仿真结果如图 10 所示. 可见测距精度与待测距离呈弧形的相关性, 在 0 m 和 0.75 m 的附近测距精度最高. 在此还仿真了时间抖动在不同测距速度下对测距精度的影响, 当测距周期从 0.5 ms ($\Delta f_{\text{rep}} = 2$ kHz) 降低至 0.125 ms ($\Delta f_{\text{rep}} = 8$ kHz) 时, 测距误差的标准差最大值由 6.296 μm 降低至 2.431 μm .

根据 (22) 式可知, 当待测距离为 0 m 时, 有 $\Delta t = 0$, $\delta_{rt} = 0$, 此时 $L_{\text{error}} = 0$; 当待测距离为一个非模糊范围 L_{NAR} 时, 有 $\Delta t = T_{\text{SH}}$, $\delta_{rt} = \delta_{rr}$, 此时 $L_{\text{error}} = 0$, 因此在 0 和 L_{NAR} 处测距精度最高. 根据 (20) 式和 (21) 式, 时间抖动对测距精度的影响是具有累积性的, 因此提高系统的测距速度可以有效降低时间抖动对测距精度的影响. 但是不同光源的时间抖动大小有所区别, 引入的测距误差也不同, 时间抖动越大将导致系统测距精度越低. 在此分别选取时间抖动为 10 fs^[29] 和 0.013 fs^[30] 的光源参数进行上述仿真, 仿真结果如表 3 所列, 可知引入的误差与时间抖动的大小成正比.

结合 3.1 节, 在提升测量精度的过程中, 减小采样步长和降低时间抖动影响之间具有明显的参数选择制约关系. 根据 (13) 式的不确定度分析, 当期望的合成不确定度优于 7×10^{-7} 时, 为减小采样步长, Δf_{rep} 的取值应大于 1 kHz; 为降低时间抖动影响, Δf_{rep} 的取值应小于 9 kHz, 该情况下系统重

频差可调节范围为 1—9 kHz. 当选取某一特定重频差, 当采样步长引入的误差与时间抖动引入的误差均较小且相等时, 系统的测距精度最高. 取系统时间抖动为 1 fs, 当重频差为 2—3 kHz 时, 系统测距精度最高. 综上所述, 对于时间抖动影响明显时, 需重点考虑时间抖动所引入的测距误差, 此时应在系统不确定度允许的范围内选择较大的重频差, 通过提高系统测距速度降低时间抖动引入的累积测距误差; 反之, 则需要在系统不确定度允许范围内选择较小的重频差, 通过使采样步长更精细以提高系统测距精度.

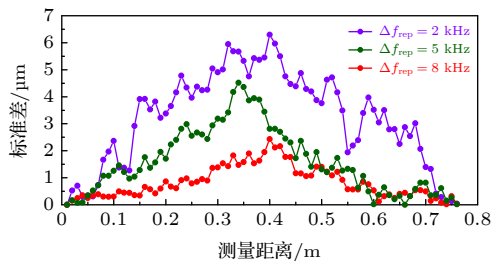


图 10 时间抖动在不同测距速度下对仿真测距精度的影响
Fig. 10. Effect of timing jitter on simulated ranging accuracy under different ranging speeds.

表 3 不同时间抖动对仿真测距精度的影响
Table 3. Effect of different timing jitter on simulated ranging accuracy.

时间抖动/fs	测量周期/ms	最大标准差/μm
10	0.500	71.252
	0.200	48.116
	0.125	29.148
1	0.500	6.296
	0.200	4.517
	0.125	2.431
0.013	0.500	0.069
	0.200	0.039
	0.125	0.023

6 结 论

本文基于非线性强度互相关的双光梳异步光学采样绝对距离测量的基本原理建立了相关理论模型, 并提出了与测距指标相互关联的关键参数数值仿真方法, 通过对测距结果的影响分析总结了相关参数的最优区间选择策略. 其中, 重复频率和重频差是影响异步采样步长的关键参数, 仿真结果表明, 选择合适重频差和重复频率有利于提升系统测

距精度. 当系统采样步长一定时, 可以通过精细曲线拟合的插值方法求取飞行时间, 进一步提升测距精度. 脉冲时间抖动也是影响测距精度的重要因素, 通过改变重频差提升系统的测距速度可以减少由时间抖动引入的累积测距误差. 因此, 在使用双光梳非线性异步光学采样方法进行绝对距离测量时, 应综合考虑脉冲时间抖动的影响, 选择合理的重复频率和重频差确定采样步长, 选择合适的曲线模型对倍频信号进行精细拟合, 通过对关键参数的数值优化为提升测距精度提供参考.

参考文献

- [1] Schmitt R H, Peterek M, Morse E, Knapp W, Galetto M, Härtig F, Goch G, Hughes B, Forbes A, Estler W T 2016 *CIRP Ann. -Manuf. Technol.* **65** 643
- [2] Tan J B 2020 *China Ind. Inf. Technol.* **6** 18 (in Chinese) [谭久彬 2020 *中国工业和信息化* **6** 18]
- [3] Zheng L Y, Zhu X S, Jiang L P 2013 *Aeron. Manuf. Technol.* **7** 38 (in Chinese) [郑联语, 朱绪胜, 姜丽萍 2013 *航空制造技术* **7** 38]
- [4] Hua Q, Zhou W H, Xu Y 2012 *Metrol. Meas. Technol.* **32** 1 (in Chinese) [华卿, 周维虎, 许艳 2012 *计测技术* **32** 1]
- [5] Hansch T W 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1297
- [6] Hall J L 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1279
- [7] Zhang W P, Yang H L, Chen X Y, Yu H Y, Li Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 090701 (in Chinese) [张伟鹏, 杨宏雷, 陈馨怡, 尉昊赞, 李岩 2018 *物理学报* **67** 090701]
- [8] Zhang R, Zhu Z, Wu G 2019 *Opt. Express* **27** 34269
- [9] Liu Y, Lin J, Yang L, Wang Y, Zhu J 2018 *Opt. Express* **26** 26618
- [10] Wang G C, Yan S H, Yang J, Lin C B, Yang D X, Zou P F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 070601 (in Chinese) [王国超, 颜树华, 杨俊, 林存宝, 杨东兴, 邹鹏飞 2013 *物理学报* **62** 070601]
- [11] Xing S J, Zhang F M, Cao S Y, Wang G W, Qu X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 170603 (in Chinese) [邢书剑, 张福民, 曹士英, 王高文, 曲兴华 2013 *物理学报* **62** 170603]
- [12] Minoshima K, Matsumoto H 2000 *Appl. Optics* **39** 5512
- [13] Ye J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1153
- [14] Nam J K, Woo K S 2006 *Opt. Express* **14** 5954
- [15] Lee J, Kim Y J, Lee K, Lee S, Kim S W 2010 *Nat. Photonics* **4** 716
- [16] Wu H Z, Cao S Y, Zhang F M, Xing S J, Qu X H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 100601 (in Chinese) [吴翰钟, 曹士英, 张福民, 邢书剑, 曲兴华 2014 *物理学报* **63** 100601]
- [17] Liu T Y, Zhang F M, Wu H Z, Li J S, Shi Y Q, Qu X H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 020601 (in Chinese) [刘亭洋, 张福民, 吴翰钟, 李建双, 石永强, 曲兴华 2016 *物理学报* **65** 020601]
- [18] Wang G C, Li X H, Yan S H, Tan L L, Guan W L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 040601 (in Chinese) [王国超, 李星辉, 颜树华, 谭立龙, 管文良 2021 *物理学报* **70** 040601]
- [19] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photonics* **3** 351
- [20] Liu T A, Newbury N R, Coddington I 2011 *Opt. Express* **19** 18501
- [21] Lee J, Han S, Lee K, Bae E, Kim S, Lee S, Kim S W, Kim Y J 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 45201
- [22] Zhang H Y, Wei H Y, Wu X J, Yang H L, Li Y 2014 *Opt. Express* **22** 6597
- [23] Shi H S, Song Y J, Liang F, Xu L M, Hu M L, Wang C Y 2015 *Opt. Express* **23** 14057

- [24] Lin B, Zhao X, He M, Pan Y, Chen J, Cao S, Lin Y, Wang Q, Zheng Z, Fang Z 2017 *IEEE Photonics J* **9** 1
- [25] Li Y, Cai Y, Li R, Shi H, Tian H, He M, Song Y, Hu M 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 091202
- [26] Shiraki E, Nishizawa N 2011 *Proceedings of the International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim* Sydney, Australia, August 28–September 1, 2011 p894
- [27] Lazaridis P, Debarge G, Gallion P 1995 *Opt. Lett.* **20** 1160
- [28] Paschotta R 2004 *Appl. Phys. B* **79** 153
- [29] Wang Y, Tian H, Ma Y, Song Y, Zhang Z 2018 *Opt. Lett.* **43** 4382
- [30] Benedick A J, Fujimoto J G, Kärtner F X 2012 *Nat. Photonics* **6** 97

Numerical analyses of key parameters of nonlinear asynchronous optical sampling using dual-comb system*

Xia Wen-Ze¹⁾²⁾ Liu Yang^{2)†} He Ming-Zhao²⁾ Cao Shi-Ying²⁾
 Yang Wei-Lei²⁾³⁾ Zhang Fu-Min¹⁾ Miao Dong-Jing²⁾ Li Jian-Shuang²⁾

1) (*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China*)

3) (*Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China*)

(Received 25 March 2021; revised manuscript received 27 April 2021)

Abstract

Absolute distance measurement based on the asynchronous optical sampling with using a dual-comb system has the characteristics of large range, fast measurement speed, and high accuracy, which has wide application prospects in the field of precision measurement of geometric quantities, such as the space technology, equipment manufacturing, etc. Recently, the invention of the femtosecond frequency comb is a milestone in the field of precision length measurement. Many approaches to the absolute distance measurement have been proposed. Among them, the dual-comb system with asynchronous optical sampling can realize a length measurement with fast speed, high accuracy, and long range. Especially, the temporal method combining the asynchronous optical sampling with nonlinear intensity cross-correlation can effectively avoid influencing of the carrier-envelope offset frequency on the ranging accuracy in the measurement process. The time-of-flight information can be obtained by the time interval between the reference pattern and the measurement pattern. Even so, the selection of the repetition rate and the difference of repetition rates will strongly influence the temporal sampling interval of the measurements. Therefore, the theoretical model and key parameters for the ranging are numerically studied for the non-linear asynchronous optical sampling by using a dual-comb system of absolute distance measurement. After analysis, the effects of source parameters (repetition frequency and repetition frequency difference), fine fitting of second harmonic signal, and timing jitter on ranging accuracy are studied respectively. The numerical analysis results show that the method of choosing a reasonable repetition frequency and repetition frequency difference is beneficial to the improvement of the ranging accuracy. When the sampling interval of the dual-comb system is a constant, the time value between the reference and measurement patterns can be obtained by the interpolation method of fine curve fitting, and it will further improve the ranging accuracy. In addition, the time jitter of the femtosecond pulses is also an important factor that can affect the ranging accuracy. By changing the difference in the repetition rate, the measurement speed can also be improved. After that, the cumulative ranging error caused by time jitter can be reduced. Therefore, the appropriate increasing of measurement speed can effectively reduce the influence of timing jitter on ranging.

Keywords: absolute distance measurement, optical frequency comb, asynchronous optical sampling, numerical analysis

PACS: 06.30.Bp, 78.20.Bh, 42.62.Eh, 06.60.Jn

DOI: 10.7498/aps.70.20210565

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2016YFF0200405, 2019YFB2006103).

† Corresponding author. E-mail: liuyang1@nim.ac.cn