



重复频率倍增光频梳时域互相关绝对测距

梁旭 林嘉睿 吴腾飞 赵晖 郝继贵

Absolute distance measurement using cross correlation interferometer with a repetition rate multiplication frequency comb

Liang Xu Lin Jia-Rui Wu Teng-Fei Zhao Hui Zhu Ji-Gui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 090602 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212073

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212073>

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

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>

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>

双光梳非线性异步光学采样测距中关键参数的数值分析

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

物理学报. 2021, 70(18): 180601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210565>

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>

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>

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>

重复频率倍增光频梳时域互相关绝对测距*

梁旭 林嘉睿[†] 吴腾飞 赵晖 郝继贵

(天津大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2021 年 11 月 8 日收到; 2022 年 1 月 4 日收到修改稿)

利用法布里-珀罗标准具对光纤光频梳的重复频率(重频)进行倍增,使光频梳重频从最初的 250 MHz 提升至 10 GHz,对应的脉冲间距从 1200 mm 缩减至 30 mm,极大地降低了脉冲互相关测距方法对参考臂扫描范围的需求.建立了重频倍增光频梳的时域互相关干涉信号数学模型,通过数值模拟分析了光源参数(重频、起始偏移频率)和法布里-珀罗标准具参数(色散、腔长、中心波长)对滤出光谱形状以及互相关信号的影响.在实验中,使用重频倍增后的光频梳进行脉冲互相关干涉绝对测距,与参考干涉仪对比,在 210 mm 范围内获得优于 4 μm 的测距精度.

关键词: 光学频率梳, 重复频率倍增, 绝对测距, 脉冲互相关干涉

PACS: 06.30.Bp, 06.60.Jn, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.71.20212073

1 引言

高精度绝对距离测量是科学研究和工业应用的先导和基础,直接影响着先进装备制造(大飞机、大型科学装置)和空天探测技术(卫星编队、引力波探测)等前沿科学领域的发展^[1-3].非相干脉冲飞行时间测距法,受光电探测器响应速度限制,测距分辨力仅在毫米量级,无法满足上述测量场景下的高精度测量需求^[4].基于单波长激光的零差、外差干涉方法,可在几十米范围内达到微米级测距精度,但受限于干涉条纹 2π 相位模糊问题,在大空间测量场景下存在测量光束连续引导、断光续接等应用问题,因此测量效率较低、灵活性较差^[5].传统多波长干涉^[6]、合成波长干涉^[7]和光频扫描干涉^[8]可通过构建合成波长的方式扩大非模糊范围,实现高精度绝对测距.然而,多波长方法需搭建多路稳频激光,使得光路系统整体结构复杂,测量实时性差且实施难度较大.光频扫描干涉测距可实现无非

模糊范围高精度绝对测距,但该方法存在光频扫描非线性、振动误差放大效应,以及干涉信号数据处理量大等问题.

近二十年来,飞秒光频梳的出现为长度计量带来了全新的测量原理和解决思路^[9].光频梳本质上可看作上百万个具有固定频率间隔单波长激光的相干叠加,在频域上表现为在宽光谱范围内,众多离散的、均匀分布的光学纵模,时域上对应为脉冲间距极其稳定的超短脉冲序列^[10].光频梳本身作为可溯源频率源,当为其他测距光源提供高稳定度频率参考时,其测距结果可直接溯源至时间频率基准^[11,12];光频梳本身亦可作为多波长光源,通过此单光源就可直接构建多级微波合成波长进行相位干涉测距^[13,14];光频梳梳齿状离散宽光谱特性革新了传统白光光谱干涉测距方法,将原本白光光谱干涉的最大测距范围拓展定义为非模糊距离,在光频梳的相干长度范围内,实现大非模糊范围下的快速高精度绝对测距^[15,16].此外,基于其脉冲相干特性,创新性地将其脉冲飞行时间测距方法与干涉相干测

* 国家自然科学基金(批准号: 51835007, 51775380, 51721003)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: linjr@tju.edu.cn

距结合,以脉冲间距为刻尺(几十毫米至几米),依靠光学采样来降低对光电探测器带宽的需求,提高脉冲飞行时间的分辨力,理论上可达到优于半波长的测距精度.为实现参考脉冲扫描范围覆盖脉冲间距,依据实施采样方式的不同,衍生出机械扫描参考臂的脉冲互相关法^[17]、腔长调节光学采样法^[18,19]、双光梳异步光学采样法^[20,21]、腔长调节光学采样法:在参考臂中引入长光纤作为脉冲存储器,在调节光频梳重复频率(重频)时,利用倍数放大效应实现测量脉冲对参考脉冲的大范围扫描采样,参考长光纤作为敏感器件,极易受到温度、压力、振动的影响而产生光程漂移,长光纤锁定技术虽能在一定程度上解决此问题,但锁定系统较为复杂(需额外的外差干涉仪、锁相环、可变光纤拉伸器等),锁定时间较短等问题使得该测量方法应用受限.双光梳异步光学采样法:由两台具有微小重频差的光频梳作为测距光源,系统无需任何移动部件便可自动完成极快的光学采样,实现快速、高精度任意测距,但双光梳作为多参数系统,重频、重频差、中心波长、光谱带宽的选择与优化,双光频梳的同步锁定与噪声抑制,使得构建稳定的双光梳系统难度较大且成本高昂.

直接使用高重频光频梳进行脉冲互相关测距,是最简单、直接且有效的时域互相关测量方法,光电调制频率梳、微腔光频梳的不断发展,使得应用高重频光频梳测距成为可能^[22,23].但如今较为成熟的商用化钛宝石光频梳和光纤锁模光频梳,受激光器腔长的物理长度限制,重频一般较低,通常在几十 MHz 至 1 GHz 之间,对应脉冲间距为百毫米至几米之间.以德国公司 Menlosystems 的超低相位噪声光频梳 FC1500-250-ULN 为例,重频仅为 250 MHz,对于脉冲互相关测距方法而言,这就要求机械扫描导轨范围长达 600 mm,才能确保参考脉冲与测量脉冲在任意位置重合,实现无测量盲区测距.长距离的位移扫描将直接影响测量效率,扫描位移台的性能也将影响干涉条纹质量.针对此问题,科研人员提出借助外部设备来对低重频光源的重频进行扩增,将原本几百 MHz 的重频提升至几十 GHz,从而压缩脉冲间距,降低对参考臂扫描范围的需求.现已证实的重频倍增方法包括:法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)标准具法^[24]、Mach-Zehnder干涉仪法^[25]、光纤谐振腔法^[26].光纤谐振腔和 Mach-Zehnder干涉仪均需依靠多级串联的方式实

现高倍数的重频倍增,这使得系统整体结构复杂,稳定性较差.FP标准具作为一种光学滤波器,基于多光束干涉原理,可对光频梳的精密光谱进行选频,单腔即可完成高倍数重频倍增.但在使用FP标准具滤除光频梳梳齿过程中,光频梳光源与FP标准具的匹配程度,从根本上影响着滤除光谱的形状和强度,就脉冲互相关测距方法而言,光频梳光谱分布将直接决定互相关条纹的质量^[27],并影响最终的测距精度.

本文分析了FP标准具对光频梳进行重频倍增的原理,通过数值模拟详细讨论了光源参数(重频、起始偏移频率(偏频))和FP标准具参数(腔长、中心波长、色散)对滤除光谱(形状、强度)的影响,并建立了较为全面的重频倍增光频梳时域干涉数学模型,分析了在不同透射光谱情况下的互相关干涉条纹.实验中,利用FP标准具将250 MHz重频的光频梳倍增至10 GHz,将脉冲间距由原先的1200 mm压缩至30 mm,并以10 GHz的重频倍增光源进行脉冲互相关绝对测距实验.在210 mm范围内,与条纹计数干涉仪进行比对,最终测距结果与参考真值的一致性优于4 μm .

2 测量原理

2.1 脉冲互相关测距基本原理

如图1所示,由光频梳发出的超短脉冲序列(红色脉冲)射入非等臂 Michelson 干涉光路时,参考脉冲序列(绿色脉冲) $E_{\text{ref}} = \sum A_N \exp[i(2\pi f_N t)]$ 射向扫描参考镜,测量脉冲序列(蓝色脉冲) $E_{\text{mea}} = \sum A_N \exp[i(2\pi f_N (t - \tau))]$ 射向目标镜,两束光在

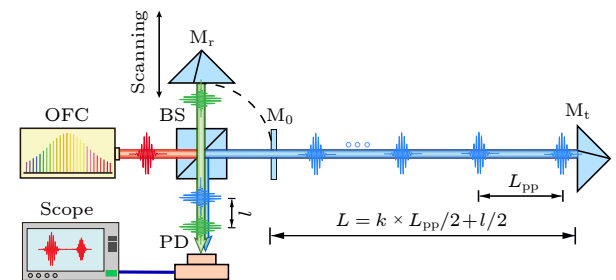


图1 脉冲互相关测距原理示意图(OFC,光频梳;BS,分束镜; M_r ,参考镜; M_t ,目标镜; M_0 ,零点参考镜;PD,光电探测器;Scope,示波器)

Fig. 1. Schematic of the pulse cross-correlation ranging principle. OFC, optical frequency comb; BS, beam splitter; M_r , reference mirror; M_t , target mirror; PD, photodetector; Scope, oscilloscope.

分束镜位置汇合并发生干涉, 由光电探测器采集、示波器进行显示. 为了简化分析, 在此认为两臂测量脉冲光强相等, A_N 为第 N 根梳齿的光强幅值, f_N 为第 N 根梳齿的光频, 可表示为 $f_N = N \cdot f_r + f_0$. 这里, N 为正整数, 对应光源光谱范围, 通常取值区间为几万至几十万; f_r 为重频, 表示相邻纵模的频率间隔; f_0 为偏频; $\tau = 2nL/c$ 为测量脉冲相对于参考脉冲的延迟时间, 其中 n 为空气的折射率, L 为测量脉冲相对参考脉冲的几何路径差, c 为光在真空中的传播速度. 在光电探测器的响应周期 T 内, 由其测得的干涉信号可表示为

$$\begin{aligned} I &= \left\langle [E_{\text{ref}} + E_{\text{mea}}]^2 \right\rangle_T \\ &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} [E_{\text{ref}}^2 + E_{\text{mea}}^2] dT + \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} [E_{\text{ref}} \cdot E_{\text{mea}}] dT \\ &= I_{\text{DC}} + I_{\text{AC}}. \end{aligned} \quad (1)$$

由 (1) 可知, 互相关干涉信号由直流分量 I_{DC} 和交流分量 $I_{\text{AC}} = 2 \sum_{N=N_i}^{N=N_f} A_N^2 \exp[i(2\pi f_N \tau)]$ 两部分组成, 其中 $N \in [N_i, N_f]$, N_i 和 N_f 分别表示光谱范围内第一根梳齿和最后一根梳齿所对应的整数 N . 为了便于后续分析, 将 I_{AC} 表示为功率谱密度与余弦函数的形式

$$I_{\text{AC}} \propto \sum_{N=N_i}^{N=N_f} S(f_N) \cdot \exp[i(2\pi f_N \tau)]. \quad (2)$$

由 (2) 式可知, 交流信号的强度主要由光源的功率谱密度 $S(f_N)$ 和两臂光程延迟 τ 所决定. 根据 Wiener-Khinchine 定理, 自相关函数 $\Gamma(\tau)$ 和 $S(f_N)$ 互为傅里叶变换关系, 因此 I_{AC} 可进一步表示为

$$\begin{aligned} I_{\text{AC}} &= \Gamma(\tau) \cdot \exp[i(2\pi f_c \tau + k \cdot \Delta\phi_{\text{ceo}})] \\ &\otimes \sum_{N=-\infty}^{N=+\infty} \delta(\tau - N \cdot T), \end{aligned} \quad (3)$$

其中, f_c 为光频梳的中心载波光频; k 为测量脉冲相对参考脉冲的序数差; $\Delta\phi_{\text{ceo}}$ 为载波包络偏移相位, $\Delta\phi_{\text{ceo}} = 2\pi f_0/f_r$; \otimes 和 δ 分别表示卷积函数和冲击函数; T 为互相关干涉信号的重复周期, $T = 1/f_r$. 对于任意的被测距离 L 可表示为

$$L = (k \times L_{\text{pp}} + l)/2, \quad (4)$$

L_{pp} 为脉冲间距, 决定互相关测距的非模糊范围, $L_{\text{pp}} = c/(f_r \cdot n_g)$, 其中 n_g 为空气的群折射率; l 表示测量脉冲相对参考脉冲的非整数脉冲间距部分, $l = 2L - kL_{\text{pp}}$. (3) 式中 $\Gamma(\tau)$ 的定义域为 $[-\tau_w/2, +\tau_w/2]$,

其中 τ_w 表示飞秒脉冲的宽度. 所以在目标移动过程中, 只有测量脉冲与参考脉冲在空间重合位置的几十微米范围内才会出现高对比度的干涉条纹, 其他位置几乎均为直流分量. 为实现测量脉冲与参考脉冲在任意位置重合, 这就要求参考位移台的扫描范围覆盖 $L_{\text{pp}}/2$, 提高光频梳的重频可间接缩短脉冲间距, 降低对位移台扫描范围的需求.

2.2 FP 标准具滤梳齿仿真分析

FP 标准具可看作一种基于多光束干涉原理的光学滤波器, 可对光频梳的光谱进行操控和选频. 如图 2 所示, FP 标准具通常由两片高反射率的镜片组成, 一般情况下, FP 标准具的透过函数可表示为

$$T(f, R, L_c) = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(2\pi f \cdot n_c L_c / c)}, \quad (5)$$

式中 R 是反射镜的镜面反射率, f 为输入光频的大小, L_c 为 FP 标准具的腔长, n_c 为 FP 标准具的折射率. FP 标准具的自由光谱范围 $f_{\text{FSR}} = c/(2n_c L_c)$, 决定了透射光谱峰之间的频率间隔; 精细度 $F_a = \pi \sqrt{R}/(1-R) = f_{\text{FSR}}/f_{\text{FWHM}}$, 决定了透射光谱峰的宽度, F_a 主要由镜面反射率 R 所决定, f_{FWHM} 表示透射光谱峰值信号的半高全宽. 当 FP 标准具的精细度较高时, 上述 FP 标准具的透过函数 $T(f)$ 可看作是洛伦兹函数 $p(f)$ 与梳齿函数的卷积:

$$T(f) = p(f) \otimes \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \delta(f - q \cdot f_{\text{FSR}}). \quad (6)$$

当光频梳入射至 FP 标准具时, 透射光谱可表示为

$$\begin{aligned} E_{\text{FP}}(f) &= \sqrt{S(f)} \cdot T(f) \\ &= E(f) \cdot \sum_{N=N_i}^{N=N_f} \delta(f - N \cdot f_r - f_0) \cdot T(f), \end{aligned} \quad (7)$$

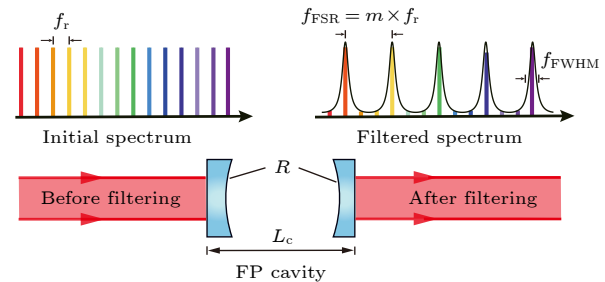


图 2 FP 标准具滤梳齿示意图

Fig. 2. Schematic of filtered frequency comb using a FP etalon.

透射光谱 $E_{FP}(f)$ 表现为光谱形状为 $E(f)$ 、受 $T(f)$ 调制的梳状谱. 接下来仿真分析光源参数 (重频 f_r 、偏频 f_0)、FP 标准具参数 (腔长、色散、中心波长) 对透射光谱的影响. 仿真中, 光频梳参数以 Menlosystem 的超低相位噪声光频梳 FC1500-250-ULN 为原型, 光频梳的中心波长为 1560 nm, 光谱全宽约为 100 nm, 重频 $f_r = 250$ MHz, 为简化分析, 偏频 $f_0 = 0$ MHz, 光频梳的光谱形状设置为理想高斯型光谱, 时域脉冲半高全宽为 120 fs. FP 标准具的参数为: 腔镜的反射率 $R = 99\%$, 对应精细度为 312 左右, 腔长 $L_c = 15$ mm, 对应 $f_{FSR} = 10$ GHz.

首先分析光源参数对透过光谱的影响. 在 $f_r = 250$ MHz, $f_0 = 0$ MHz, $f_{FSR} = 10$ GHz 情况下, 光频梳的梳齿光频与 FP 标准具透过函数满足如下关系: $f_N = N \cdot f_r + f_0 = q \cdot f_{FSR}$, $40f_r = f_{FSR}$, 即光频梳第一根梳齿对应的光频等于整数倍的自由光谱范围, 同时自由光谱范围等于 40 倍的重频. 如图 3(a) 和 3(b) 所示, 在初始光谱的基础上每隔 40 根梳齿滤出一根梳齿, 滤出后单根梳齿的强度并未发生明显变化, 光谱形状仍为严格的高斯型. 图 3(c) 和 3(d) 则表示 $f_r = 250.001$ MHz 情况下的透射光谱, 标准具的 f_{FSR} 与 f_r 的基础频率匹

配偏差为 $\delta f = (40f_r - f_{FSR}) = 0.4$ MHz. 可以看出, 随着光频逐渐的增大, 基于游标倍增效应, 频率匹配偏差 $q \times \delta f$ 变大, 但仍处在 $[-\Delta f/2, \Delta f/2]$ 之内, 始终被涵盖在标准具的单透射峰内 (Δf 为 FP 标准具透射峰的宽度), 透射光谱整体仍可保持高斯型, 但透射梳齿的强度整体变低. 图 3(e) 和图 3(f) 表示 $f_r = 250.1$ MHz 情况下的透射光谱. 可以看出, 在光频较小的情况下, 频率匹配偏差 $q \times \delta f \in [-\Delta f/2, \Delta f/2]$, 但随着频率的增加, 透射梳齿幅值越来越低, 当 $q \times \delta f \notin [-\Delta f/2, \Delta f/2]$, 梳齿光强全部被抑制掉. 随着光频进一步的增大, 频率匹配偏差将落在下一个 FP 标准具透射峰内, 即 $q \times \delta f \in [f_{FSR} - \Delta f/2, f_{FSR} + \Delta f/2]$, 部分梳齿信号重新落在 FP 标准具的透射峰内. 因此当 f_r 与 f_{FSR} 的匹配偏差较大时, 透射光谱将出现周期性、间断性的局部模式匹配, 滤出后的光谱遭受严重调制.

接下来分析偏频变化对透射光谱的影响, 图 4(a) 分别表示 $f_0 = 0, 5, 15, 25, 35$ MHz 情况下透射光谱整体的变化, 光谱形状并未遭受较大的调制, 仍保持高斯型, 但偏频的变化使得整体梳齿信号相对 FP 标准具透过函数进行平移, 整体强度变低. 图 4(b) 表示不同偏频下, 局部透射光谱单梳齿强度的变化, 随着偏频不断增大, 透射梳齿强度越来越

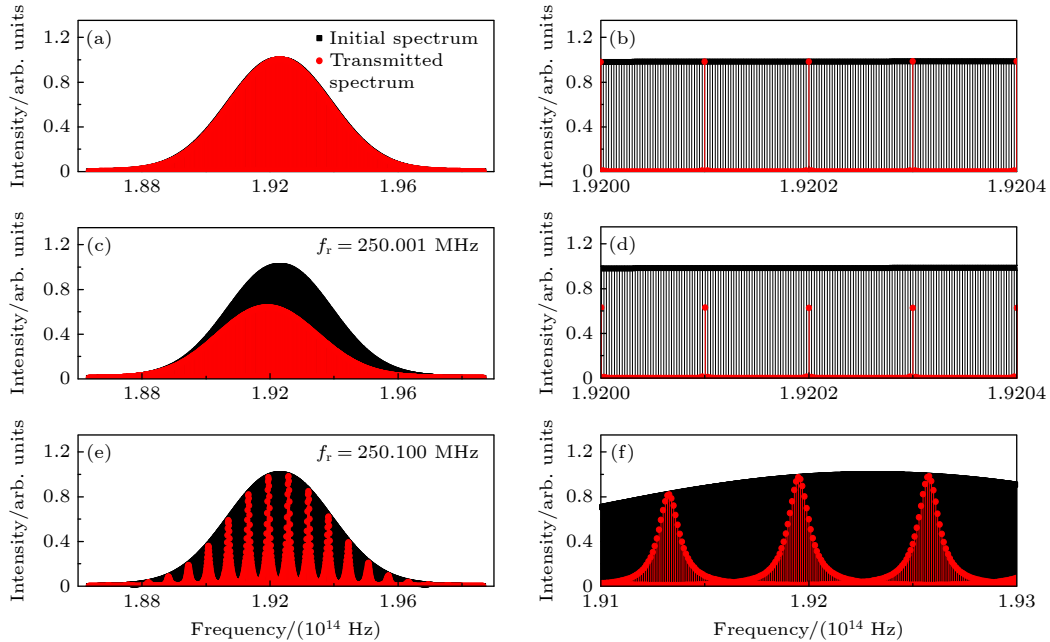


图 3 光频梳重频对透射光谱的影响 (a) 理想透射谱; (c) $f_r = 250.001$ MHz 时的透射谱; (e) $f_r = 250.1$ MHz 时的透射谱; (b), (d), (f) 分别为 (a), (c), (e) 的局部放大图

Fig. 3. Influence of frequency comb repetition rate on transmission spectrum: (a) Ideal transmission spectrum; (c) the transmission spectrum at $f_r = 250.001$ MHz; (e) the transmission spectrum at $f_r = 250.1$ MHz; (b), (d), (f) partial enlarged views of (a), (c), (e).

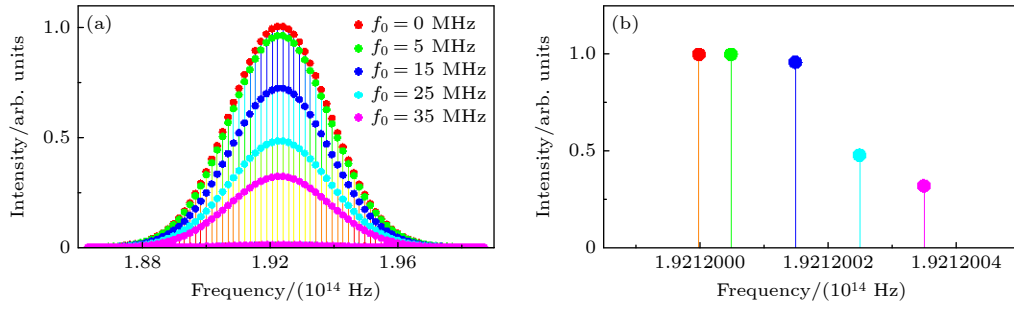


图 4 光频梳偏频对透射光谱的影响, 其中 (b) 为 (a) 的局部放大图

Fig. 4. Influence of frequency comb offset frequency on transmission spectrum. (b) is partial enlarged view of (a).

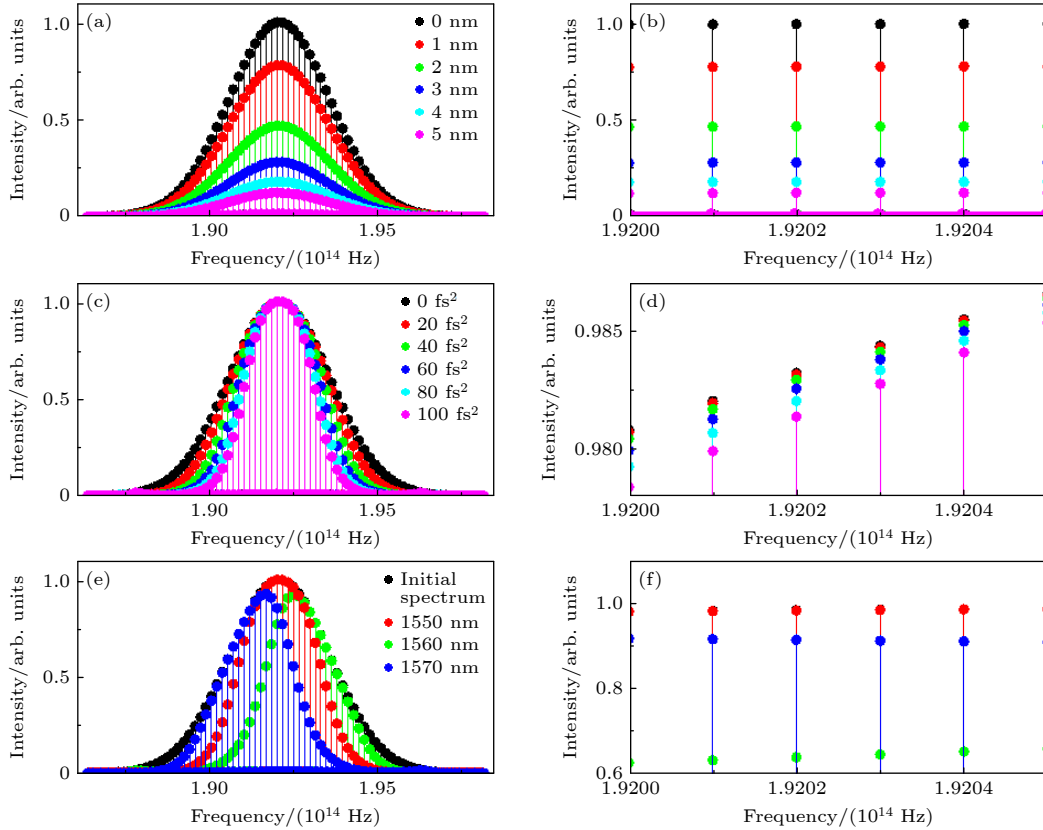


图 5 FP 标准具参数对透射光谱的影响 (a) 不同腔长偏差; (c) 不同群延迟色散, (e) 不同中心波长; (b), (d), (f) 分别为 (a), (c), (e) 的局部放大图

Fig. 5. Influence of FP etalon parameter on the transmission spectrum: (a) Different cavity length deviations; (c) different group delay dispersions; (e) different center wavelengths; (b), (d), (f) partial enlarged views of (a), (c), (e).

越低. 但总的来说, 光频梳偏频变化对透射光谱的影响较小.

紧接着分析 FP 标准具参数对滤出光谱的影响. 由公式 $\delta f = (40f_T - f_{FSR})$ 可知, 腔长变化引起的频率匹配偏差与重频变化引入的匹配偏差变化规律近似. 图 5(a) 和图 5(b) 表示 FP 标准具存在不同腔长误差 (0—5 nm, 以 1 nm 为增量) 下的透射光谱, 透射光谱对腔长变化十分敏感, 5 nm 腔长偏差下透射光谱强度已经降低很多. 实际上, 因光

频梳包含众多频率成分, FP 标准具器件本身的色散将导致自由光谱范围 $f_{FSR} = c/(2n_c L_c)$ 不再是一固定的常数, 其将会随着光频的变化而变化, 这在一定程度上限制透射光谱的带宽. 为方便理解, 将 (5) 式中的干涉相位重新表示为

$$\delta = \frac{2L_c w}{c} + \phi(w). \quad (8)$$

公式 (8) 中的第一项, 干涉相位与光频保持线性关系, 第二项中的 $\phi(w)$ 为因色散引入的非线性相位,

将其在 FP 标准具的中心角频率 w_d 处以泰勒级数展开为

$$\phi(w) = \phi_0 + \phi_1(w - w_d) + \frac{1}{2}\phi_2(w - w_d)^2 + \text{higher orders.} \quad (9)$$

其中, 常数相位项 ϕ_0 所带来的影响相当于对整体标准具透射函数进行平移, 可通过适当调节光频梳光源的偏频 f_0 来修正; 线性相位项 ϕ_1 的影响相当于均匀地改变了标准具的 f_{FSR} , 可通过适当调整光频梳的重频进行匹配; 但后两项由二阶项群延迟色散 (group delay dispersion, GDD) 和高阶色散引入的额外相位则无法进行补偿, 这将导致随着梳齿频率的增加, 光频梳梳齿与 FP 标准具 f_{FSR} 的匹配程度越来越差, 限制透射光谱的带宽. 图 5(c) 和图 5(d) 表示 FP 标准具中心波长为 1560 nm, 干涉相位中添加不同程度 GDD 时的透射光谱. 可以看出随着 GDD 的不断增大, 在远离腔镜中心波长的位置, 频率匹配偏差越来越明显, 透射梳齿信号的幅值不断变低, 导致透射光谱宽度变窄. 图 5(e) 和图 5(f) 表示 GDD 为 60 fs^2 , 中心波长分别在 1550, 1560, 1570 nm 情况下的透射光谱. 因 FP 标准具中心波长与光频梳中心波长不同, 透射光谱峰值点位置发生偏移, 频率匹配偏差将以 FP 标准具中心波长位置向两边递增, 导致透射光谱的形状扭

曲, 呈现出非对称的形状.

图 6 模拟了光源参数 (重频、频偏) 和 FP 标准具参数 (腔长、群延迟色散) 对透射光谱强度的影响. 图 6(a) 表示 f_r 在 $250 \text{ MHz} \pm 30 \text{ kHz}$ 范围内, 以 10 Hz 为步长递增时, 透射光谱整体强度的变化情况. 可以看出, 重频在大范围变化过程中, 光频梳重频与透射函数的匹配变化剧烈, 透射光谱强度展现出振荡式的变化, 当光频梳梳齿与 f_{FSR} 匹配程度较差时, 透射光强仅为入射光强的 0.2%. 因此, 若要实现光频梳重频与 FP 标准具自由光谱范围的严格匹配, 应确保腔长匹配精度达到纳米级的水平. 图 6(b) 表示 f_0 在 $\pm 35 \text{ MHz}$ 范围内, 以 10 kHz 为步长变化时透过光谱强度的变化情况. 偏频变化相当于光频梳相对 FP 标准具透射函数进行平移, 强度变化趋势比较平缓有规律, 当 $f_0 = 35 \text{ MHz}$ 时, 透射光强为入射光强的 0.8%. 图 6(c) 表示 FP 标准具腔长 L_c 在 $15 \text{ mm} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 范围内, 以 1 nm 为步长变化过程中, 透射光谱强度的变化情况. 由公式 $\delta f = [40f_r - c/(2L_c)]$ 可知, 频率匹配偏差由 f_r 和 L_c 共同决定, 因此腔长变化过程中透过光谱强度的变化规律与重频变化规律相同. 图 6(d) 表示 FP 标准具 GDD 在 $\pm 100 \text{ fs}^2$ 范围内, 以 1 fs^2 为增量时的透射强度变化规律. 随着 GDD 的不断增大, 透射光谱不断变窄, 透射强度也随之降低.

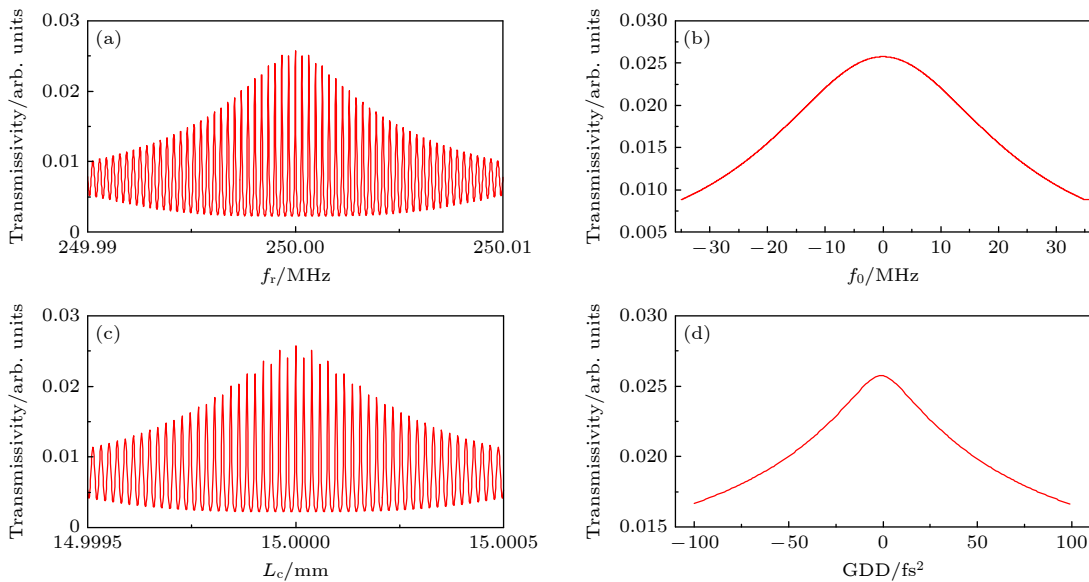


图 6 光源参数对透射光谱强度的影响 (a) 重频; (b) 偏频; (c) 腔长; (d) 群延迟色散

Fig. 6. Influence of light source parameter on the transmission intensity: (a) Repetition rate; (b) offset frequency; (c) cavity length; (d) group delay dispersion.

2.3 重频倍增光频梳时域互相关干涉

在确定光源参数、FP 标准具参数对透射光谱的影响后, 仿真分析对应透射光谱下的时域互相关干涉信号. 经过 FP 标准具调制后的光频梳, 时域互相关干涉信号交流部分可表示为

$$\begin{aligned}
 I_{AC} &= \sum E_{FP}^2(f_N) \cdot \exp[i(2\pi f_N \tau)] \\
 &= \sum_N [S(f) \cdot \delta(f - N \cdot f_r - f_0)] \\
 &\quad \times \left[p^2(f) \otimes \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \delta(f - q \cdot f_{FSR}) \right] \\
 &\quad \times \exp[i(2\pi f_N \tau)] \\
 &\propto I_{FP}(\tau) \cdot \exp[i(2\pi f_c \tau + k \cdot \Delta\phi_{ceo})] \\
 &\quad \otimes \sum \delta(\tau - N \cdot T) \cdot \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \delta(\tau - q/f_{FSR}). \quad (10)
 \end{aligned}$$

由 (10) 式可知, 经 FP 标准具后的互相关信号周期由光频梳的重频 f_r 以及自由光谱范围 f_{FSR} 共同决定. 当 $f_{FSR} = m \cdot f_r$, 且 $f_N = N \cdot f_r + f_0 = q \cdot f_{FSR}$ 时, 互相关信号周期可缩减 m 倍. 接下来, 在绝对距离为 12 m 位置附近分析光频梳重频、偏频、FP 标准具色散、精细度, 对脉冲互相关干涉信号的影响. 仿真中在 $12 \text{ m} \pm 50 \mu\text{m}$ 范围内, 以 30 nm 为增

量扫描参考臂, 图 7(a) 和图 7(b) 为 $f_r = 250 \text{ MHz} + 20 \text{ Hz}$, $250 \text{ MHz} + 60 \text{ Hz}$, 以及 $250 \text{ MHz} + 100 \text{ Hz}$ 情况下的互相关条纹, 重频微小的变化便使得互相关条纹幅值迅速降低, 条纹对比度变差; 图 7(c) 和图 7(d) 为 $f_0 = 5, 20, 35 \text{ MHz}$ 情况下的互相关条纹, 因偏频对透射光谱形状和强度的影响较小, 较大偏频的变化对互相关干涉条纹的影响也较弱.

由图 6(a) 和图 6(c) 的仿真可知, 标准具腔长变化与重频变化对透射光谱影响近似, 在此省略了标准具腔长变化对互相关信号的影响. 图 8(a) 和图 8(b) 表示标准具 GDD 分别为 20, 60, 100 fs^2 情况下的互相关条纹, 结合图 5(c) 中的仿真结果容易理解, 色散导致滤出光谱宽度变窄, 基于光谱宽度与脉冲宽度的反比关系, 对应时域信号的脉冲宽度变宽, 互相关条纹也随之展宽; 图 8(c) 和图 8(d) 表示标准具精细度 $F_a = 210, 520, 1050$ 情况下的互相关条纹, 条纹质量和对比度均未发生明显变化. 基于上述四种因素的分析, 单纯重频变化对互相关信号的影响最为明显. 然而在实际实验中, 基于 FP 标准具的重频倍增脉冲互相关系统, 上述多种因素将同时作用于脉冲互相关信号, 实际情况要比上述分析复杂得多.

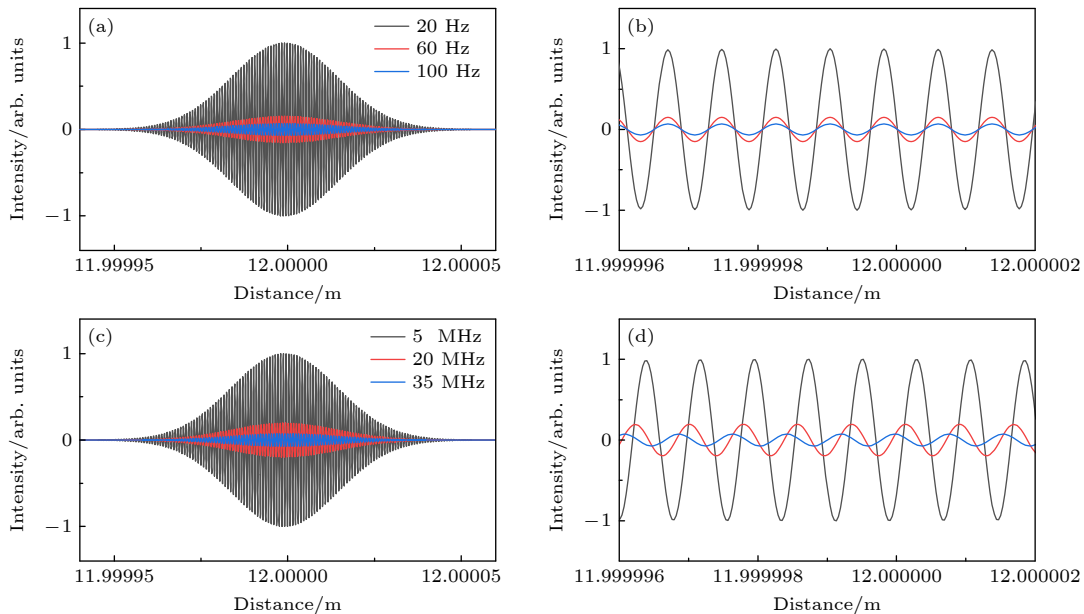


图 7 光源参数对互相关信号的影响 (a) 不同重频偏差下的干涉条纹; (c) 不同偏频偏差下的干涉条纹; (b), (d) 分别为 (a), (c) 的局部放大图

Fig. 7. Influence of light source parameter on cross-correlation signal: (a) Interference fringe under different repetition rate; (c) interference fringe under different offset frequency; (b), (d) partial enlarged views of (a), (c).

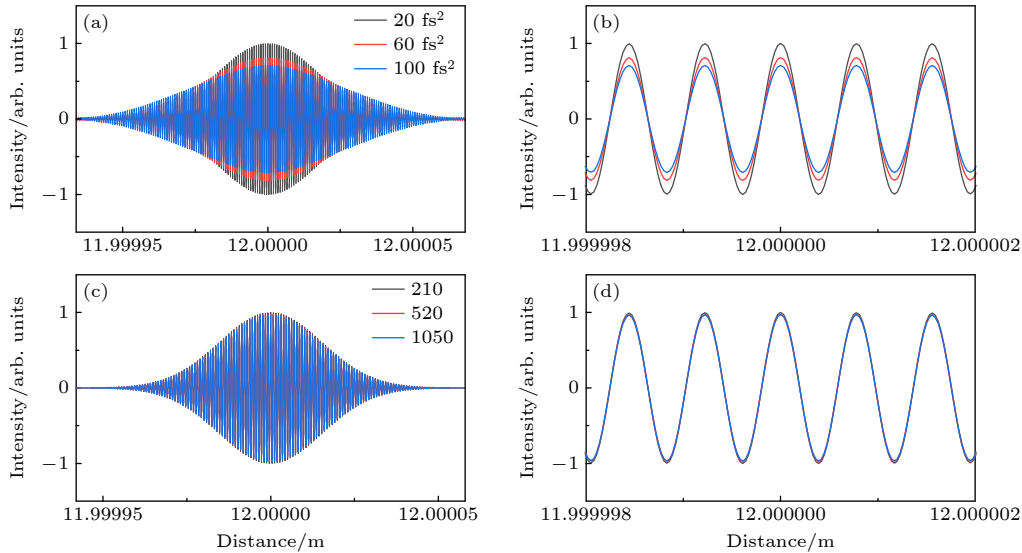


图 8 FP 标准具参数对互相关信号的影响 (a) 不同群延迟色散下的干涉条纹; (c) 不同精细度下的干涉条纹; (b), (d) 分别为 (a), (c) 的局部放大图

Fig. 8. Influence of FP etalon parameter on cross-correlation signal: (a) Interference fringe under different group delay dispersion; (c) interference fringe under different finesse; (b), (d) partial enlarged views of (a), (c).

3 实验及分析

测距系统如图 9 所示, 共由两部分组成, 分别是重频倍增光频梳光源和互相关绝对测距光路. 重频倍增光源部分: 由德国 MenloSystem 公司的超低相位噪声光频梳 FC1500-250-ULN 作为种子光源, $f_r = 250$ MHz (可调范围 ± 2.5 MHz), $f_0 = 35$ MHz (可调范围 ± 5 MHz), 两参数均被锁定至原子钟频率基准 (Symmetricom, 8040 C), 由其发出的脉冲序列经准直器 CL1 (Thorlabs, RC02APC-P01) 准直后射入重频倍增透镜组, 经过模式匹配透镜 1 ($f = 100$ mm)、FP 标准具 (Thorlabs, SA210-B)、模式匹配透镜 2 ($f = 100$ mm) 扩展为 $f_r = 10$ GHz 的光频梳光源. 在 FP 标准具的滤梳齿作用下, 透射后的光强遭到极大地缩减, 在此将透射光经铟镱共掺光纤放大器 (TOP Photonics, EYDFA) 放大至 16 dBm. 绝对测距部分共由三组 Michelson 光路组成, 首先经倍增后的光频梳光源射入到第一组非等臂 Michelson 干涉光路中, 测量光路中的半反半透薄膜 SRM (Thorlabs, BP145B3) 作为测距的绝对零位参考, 将扫描参考镜 CR1 放置到高精度扫描位移台 (PI, M-521.DD.1) 上, 由目标镜 CR2、绝对零位参考镜反射的光与扫描参考镜反射的光在 BS1 位置合束并发生干涉, 由光电探测器 (Thorlabs, PDB470C) 接收. 搭建的第二路干涉仪

主要用来确定第一路干涉仪中两干涉峰之间的距离, 所用光源为 RIO ORION Laser Module, 波长为 1550.12 nm、输出功率约为 20 mW, 所使用的光电探测器为 Thorlabs 的 PDA10CS-EC, 为尽可能地减小阿贝误差, 目标镜 CR4 和扫描参考镜 CR1 背靠背放置在扫描位移台上. 第三路干涉仪为雷尼绍干涉仪 XL-80, 其目标镜 CR6 与互相关干涉光路中的目标镜 CR1 背靠背摆放, XL-80 的输出值作为测量真值来验证系统的测距精度. 雷尼绍的环境参数传感器 XC-80 来记录实验过程中的温度、湿度、气压, 用以计算空气折射率并修正空气中的波长 [28]. 最终两光电探测器采集到的干涉信号由示波器 (Tektronix, MDO4050C) 进行显示.

图 10(a) 和图 10(b) 为光频梳经 FP 标准具前后, 由光谱仪 (Yokogawa, AQ6370D) 采集的光谱. 起始状态下, 光频梳光谱全带宽约为 100 nm, 经 FP 标准具滤除后的光谱明显变窄, 主要原因在于光频梳经 FP 标准具后光强遭到了极大的缩减. 在使用 EYDFA 进行功率放大时, 实验中所使用的 EYDFA 的放大波段为 1530—1570 nm, 因此透射光谱变窄许多. 图 10(c) 和图 10(d) 为光频梳经 FP 标准具前后, 由 30 GHz 带宽高速光电探测器 (Alphas, UPD-15-IR2-FC) 搭配 26.5 GHz 带宽信号分析仪 (Agilent, N9020A) 获取的射频谱. 可以看出, 滤出光频梳射频谱的边模抑制比优于 20 dB.

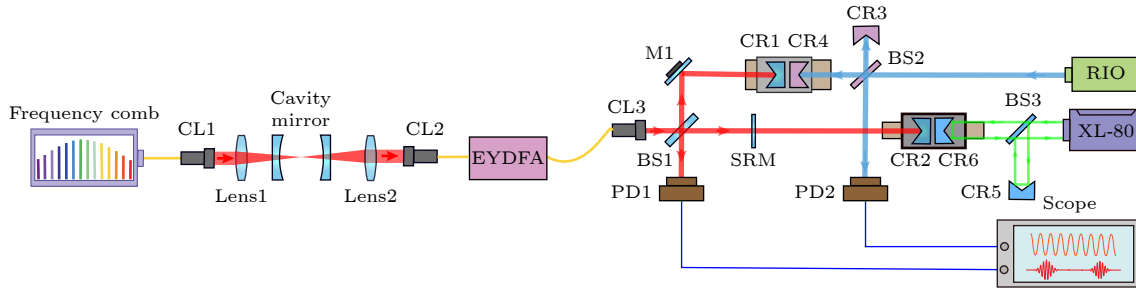


图 9 重频倍增光频梳时域互相关绝对测距原理示意图 (Frequency comb, 光频梳; CL1—3, 准直器; Lens1 和 Lens2, 模式匹配透镜; Cavity mirror, FP 标准具的腔镜; EYDFA, 铒镱共掺光纤放大器; M1, 平面反射镜; BS1—3, 光学分束器; CR1—6, 角锥棱镜; PD1 和 PD2, 光电探测器; SRM, 半反半透薄膜; RIO, 单频激光器; XL-80, 雷尼绍干涉仪; Scope, 示波器; 黄色线, 单模光纤; 深蓝色线, 电学线缆; 红色线, 光频梳出射的激光光束; 浅蓝色线, RIO 单频激光器出射的激光光束; 绿色线, 雷尼绍干涉仪出射的激光光束)

Fig. 9. Schematic of cross-correlation ranging based on repetition rate multiplying optical frequency comb. OFC, optical frequency comb; CL1—3, collimator; Lens1 and Lens2, mode matching lens; EYDFA, erbium ytterbium doped fiber amplifier; M1, plane mirror; BS1—3, beam splitter; CR1—6, retroreflector; PD1 and PD2, photodetector; SRM, semi-reflective film; RIO, RIO single wavelength laser; XL-80, Renishaw commercial interferometer; Scope, oscilloscope; yellow line, single-mode fiber; dark blue line, the electrical cable; red line, the laser beam emitted by the optical frequency comb; light blue line, the laser beam emitted by the RIO single wavelength laser; green line, the laser beam emitted by the Renishaw interferometer.

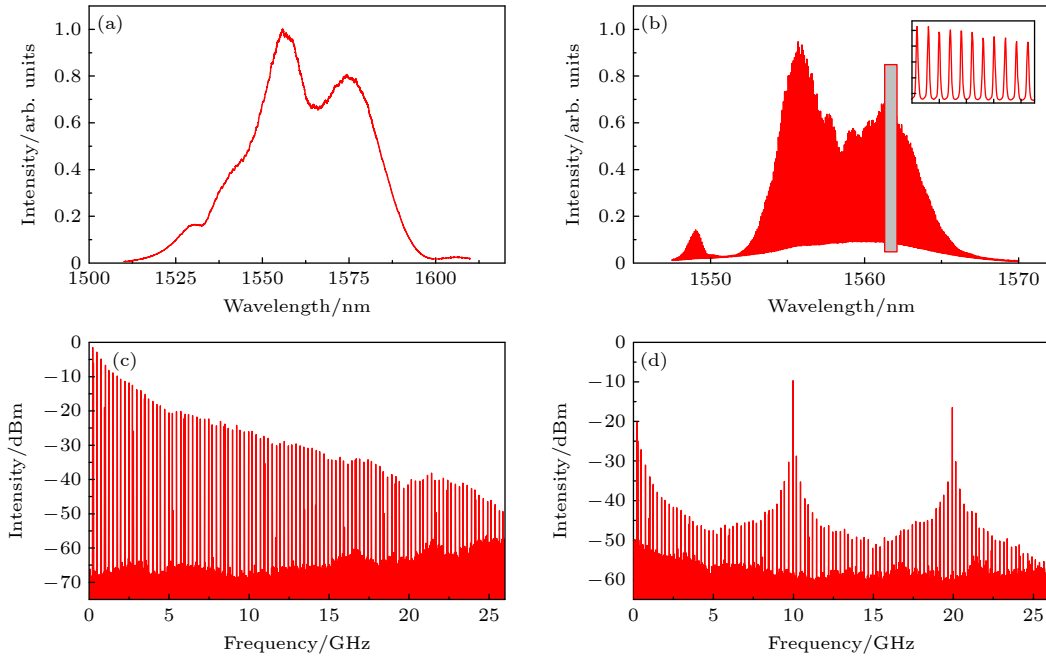


图 10 光频梳经过 FP 标准具前后的光谱和射频谱 (a) 未经 FP 标准具的光谱; (b) 经过 FP 标准具后的光谱; (c) 未经 FP 标准具的射频谱; (d) 经过 FP 标准具后的射频谱.

Fig. 10. Optical spectrum and the radio frequency spectrum of the optical frequency comb before and after passing through the FP cavity: (a) Optical spectrum before FP cavity; (b) optical spectrum after FP cavity; (c) radio frequency spectrum before FP cavity; (d) radio frequency spectrum after FP cavity.

图 11(a) 为经 FP 标准具后的透射光谱结合 (10) 式仿真获得的脉冲互相关干涉信号. 仿真中, 位移步长设置为 50 nm, 扫描范围为 $\pm 100 \mu\text{m}$. 图 11(b) 为实验中在等臂位置附近, 扫描位移台获取的脉冲互相关干涉信号. 从结果易知, 实验获得干涉图样与仿真结果具有较好的一致性. 图 11(c)

则为在等臂位置附近 60 mm 范围内连续扫描参考臂获得的四组脉冲互相关干涉条纹.

图 12(a) 为测距实验获得的互相关干涉图样, 其中峰值较低的互相关信号由零位镜产生, 而峰值较高的互相关信号由目标镜所产生, 紫色干涉条纹由单波长激光所产生. 图 12(b) 为目标镜互相关信

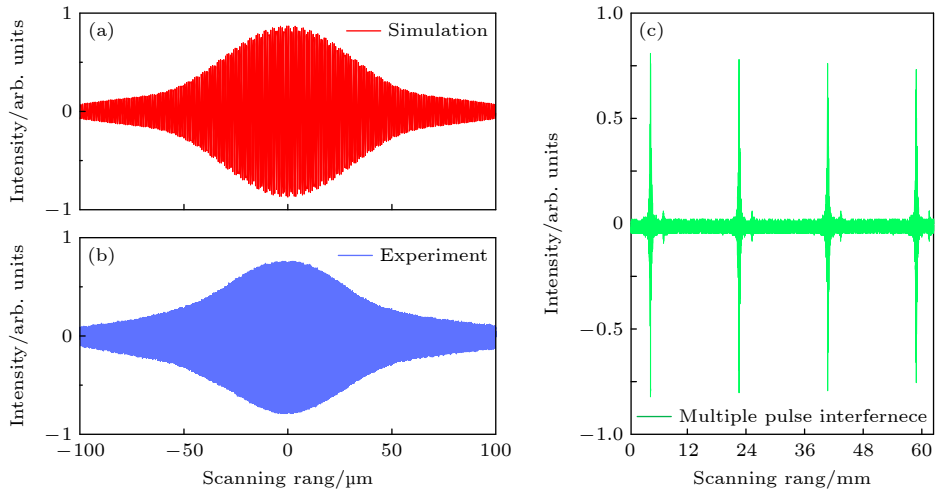


图 11 重频倍增光频梳互相关干涉信号 (a) 仿真结果; (b) 实验结果; (c) 多脉冲序列干涉图样

Fig. 11. Cross-correlation interference signal with a repetition rate multiplication frequency comb: (a) Simulation result; (b) experimental result; (c) multi-pulse train interference pattern.

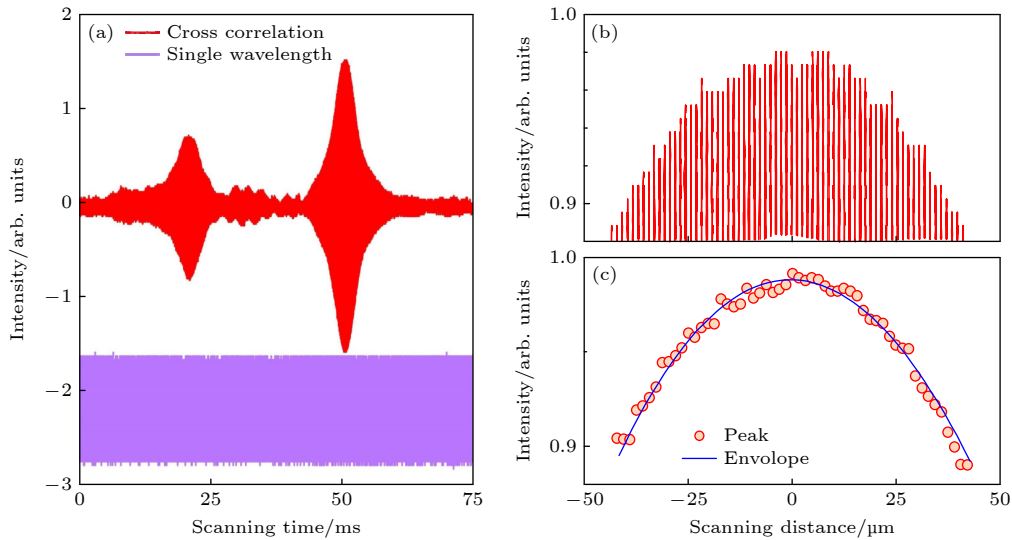


图 12 重频倍增光频梳脉冲互相关测距图样 (a) 互相关干涉信号; (b) 互相关干涉信号峰值附近位置放大图样; (c) 包络峰值信号提取

Fig. 12. Cross correlation pattern based on repetition rate multiplying frequency comb: (a) Cross correlation signal; (b) magnified view of the horizontal axis near the envelope peak for (a); (c) extracted envelope and the Gaussian fitting results.

号峰值位置附近的放大图样, 因经过 FP 标准具, 光源光谱变窄、对应时域信号脉冲宽度变宽, 峰值位置附近的多个载波信号幅值接近. 如图 12(c) 先获取载波信号多个峰值点位置, 再通过高斯曲线拟合的方式来确定互相关信号包络峰值位置. 在测量臂与参考臂等臂位置附近的 210 mm 范围内, 以 30 mm 为步长, 连续对 8 个位置进行测量, 单点快速采集 5 组数据. 图 13 为长度比对实验结果, 与 XL-80 的最大残差优于 4 μm , 单点重复性优于 1.5 μm .

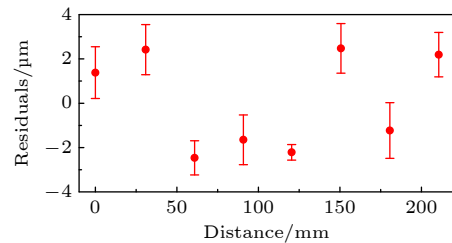


图 13 长度比对实验结果 (红色圆圈表示五次测量结果的平均值; 误差棒表示测量结果的标准差)

Fig. 13. Length comparison experiment result. The red circle represents the average result of five repeated measurements. Error bar indicates the standard deviation of the measurement result.

对影响测距精度的因素进行分析,误差主要来源于以下四个方面:首先,因FP标准具腔长并未锁定至光频梳的重频上,FP标准具的自由光谱范围与光频梳匹配较差且不够稳定,温度变化、微小机械振动、光机件的蠕变,都将影响互相关干涉条纹的质量,使得在利用高斯拟合算法提取干涉包络峰值位置时,存在一定的峰值拟合误差,影响脉冲重合位置的判读精度;其次,在FP标准具和EYDFA的共同作用下,滤出光谱宽度变窄、光谱形状不规则,对应时域脉冲宽度展宽,在进行峰值提取时,多个载波条纹峰值强度近似,峰值提取精度很难达到半波长;此外,由辅助干涉仪确定零位镜和目标镜所产生两干涉峰之间的距离时,辅助干涉仪条纹计数也会存在半波长的截取误差;最后,因放置目标镜的滑轨存在一定的漂移和蠕动,在单点数据采集过程中,会因与参考干涉仪数据采集不同步而引入一定的误差.针对上述提及的问题,后续将对光路进行优化,将FP标准具的腔长严格锁定至光频梳重频上,以尽可能地保证系统的稳定性和干涉条纹质量,将测距精度提升至半波长以内,之后也将在长距离下来验证该方法的测距精度.

4 结 论

就飞秒脉冲互相关绝对测距方法而言,光频梳的重频直接决定非模糊距离的大小,针对现有商用光纤光频梳重频较小、脉冲间距过大的问题.本文应用FP标准具对光梳重频实施倍增,对标准具滤梳齿的原理进行了详细分析,建立了较为全面的重频倍增光频梳脉冲互相关干涉模型,分析了光源参数(重频、偏频)、标准具参数(腔长、色散、中心波长)对滤出光谱(形状、强度)和脉冲互相关信号的影响.在实验中,使用FP标准具将光纤光频梳的重频从250 MHz倍增至10 GHz,对应脉冲间距从1200 mm压缩至30 mm,并利用倍增后的光源进行脉冲互相关绝对测距实验,在210 mm测量范围内与条纹计数干涉仪进行精度比对,测量结果与参考真值的一致性优于4 μm .

参考文献

- [1] Gao W, Kim S W, Bosse H, Haitjema H, Chen Y L, Lu X D, Knapp W, Weckenmann, Estler W T, Kunzmann H A 2015 *CIRP Annals – Manuf. Techn.* **64** 773
- [2] Schmitt R H, Peterek M, Morse E, Knapp W, Galetto M, Härtig F, Goch G, Ben H, Forbes A 2016 *CIRP Annals–Manuf. Techn.* **65** 643
- [3] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, Zweizig J 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102
- [4] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, Wallace A M, Cova S 2000 *Meas. Sci. Technol.* **11** 712
- [5] Bobroff N 1993 *Meas. Sci. Technol.* **4** 907
- [6] Falaggis K, Towers D P, Towers C E 2009 *Opt. Lett.* **34** 950
- [7] Lu S, Lee C 2002 *Meas. Sci. Technol.* **13** 1382
- [8] John D, Ben H, Andrew J L, Andrew J L, Armin J H R, Matthew S W 2014 *Opt. Express* **22** 24869
- [9] Kim S W 2009 *Nat. Photonics* **3** 313
- [10] Diddams S A, Vahala K, Udem T 2020 *Science* **369** 267
- [11] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, Sinclair L C, Knabe K, Swann W C, Newbury N R 2013 *Opt. Lett.* **38** 2026
- [12] Wang G C, Jang Y S, Hyun S, Chun B J, Kang H J, Yan S H, Kim S W, Kim Y J 2015 *Opt. Express* **23** 9121
- [13] Minoshima K, Matsumoto H 2000 *Appl. Opt.* **39** 5512
- [14] Zhang X S, Yi W M, Hu M H, Yang Z H, Wu G H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 080602 (in Chinese) [张晓声, 易旺民, 胡明皓, 杨再华, 吴冠豪 2016 物理学报 **65** 080602]
- [15] Joo K N, Kim S W 2006 *Opt. Express* **14** 5954
- [16] Lesundak A, Voigt D, Cip O, Van den Berg S A 2017 *Opt. Express* **25** 32570
- [17] Ye J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1153
- [18] Nakajima Y, Minoshima K 2015 *Opt. Express* **23** 25979
- [19] Wu G H, Zhang F M, Liu T L, Balling P, Li J S, Qu X H 2016 *Opt. Lett.* **41** 2366
- [20] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photonics* **3** 351
- [21] Xia W Z, Liu Y, He M Z, Cao S Y, Yang W L, Zhang F M, Miao D J, Li J S 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 180601 (in Chinese) [夏文泽, 刘洋, 赫明钊, 曹士英, 杨伟雷, 张福民, 缪东晶, 李建双 2021 物理学报 **70** 180601]
- [22] Zhao X Y, Qu X H, Chen J W, Zheng J H, Wang J D, Zhang F M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 090601 (in Chinese) [赵显宇, 曲兴华, 陈嘉伟, 郑继辉, 王金栋, 张福民 2020 物理学报 **69** 090601]
- [23] Suh M G, Vahala K J 2018 *Science* **359** 6378
- [24] Chen J, Sickler J W, Fendel P, Ippen E P, Kärtner F X, Wilken T, Holzwarth R, Hänsch T W 2008 *Opt. Lett.* **33** 959
- [25] Haboucha A, Zhang W, Li T, Lours M, Luiten A N, Coq Y L, Santarelli G 2011 *Opt. Lett.* **36** 3654
- [26] Lee J, Kim S W, Kim Y J 2015 *Opt. Express* **23** 10117
- [27] Zeitouny M, Cui M, Bhattacharya N 2010 *Phys. Rev. A* **82** 23808
- [28] Bonsch G, Potulski E 1998 *Metrologia* **35** 133

Absolute distance measurement using cross correlation interferometer with a repetition rate multiplication frequency comb*

Liang Xu Lin Jia-Rui[†] Wu Teng-Fei Zhao Hui Zhu Ji-Gui

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

(Received 8 November 2021; revised manuscript received 4 January 2022)

Abstract

In this paper, the Fabry-Perot etalon is used to multiply the repetition rate of the fiber optical frequency comb. The repetition rate is amplified from 250 MHz to 10 GHz, and the corresponding pulse interval is reduced from 1200 mm to 30 mm. For the pulse cross correlation ranging method, the repetition rate multiplication can greatly reduce the length requirement of the scanning reference arm. We analyze in detail the principle of cross correlation interferometry based on repetition rate multiplication frequency comb. A numerical mode of the function is comprehensively established. The basic parameters of optical source and Fabry-Perot cavity for the influence of filtered optical spectrum and cross correlation fringe are analyzed through the numerical simulation. The multiplied frequency comb is utilized for absolute ranging with the help of a pulse cross correlation method. By comparison, our result differs from the result obtained by a conventional counting interferometer only by 4 μm for distances up to 210 mm.

Keywords: optical frequency comb, repetition rate multiplication, absolute distance measurement, cross correlation interferometry

PACS: 06.30.Bp, 06.60.Jn, 42.25.Hz

DOI: [10.7498/aps.71.20212073](https://doi.org/10.7498/aps.71.20212073)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51835007, 51775380, 51721003).

[†] Corresponding author. E-mail: linjr@tju.edu.cn