

光频梳的多脉冲光谱干涉绝对测距理论分析*

邢书剑† 王芙蓉 王翼昭 常孟斐

(中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300)

(2025 年 1 月 7 日收到; 2025 年 2 月 6 日收到修改稿)

在工业现场或室外长距离测距场景中, 空气折射率难以精确测量且修正过程复杂, 这是影响精密测距的关键因素. 为此, 本文提出了一种基于光频梳的多脉冲光谱干涉绝对测距方法, 建立了相应的数学模型, 分析了利用伪时域同步确定测量光路群折射率和被测距离的方法, 通过微调重复频率和差分计算, 将测距范围由传统光谱干涉测距的非模糊范围拓展至任意长度, 并进行了大量的数值模拟和分析. 模拟结果表明, 当参考间距为 0.1 m 时, 群折射率测量的绝对误差最大为 0.12×10^{-6} ; 在考虑空气折射率测量误差的情况下, 被测距离在 0—200 m 时的测距误差最大为 33 nm; 在大气条件发生改变时, 通过实时修正群折射率波动引入的测距误差, 最终测距误差最大为 38 nm, 保证了在大量程测距中亚微米级的测距精度. 研究结果表明, 该方法可以应用于大尺寸高精度的绝对距离测量.

关键词: 光频梳, 多脉冲光谱干涉, 绝对测距, 空气折射率**PACS:** 06.60.Jn, 06.30.Bp, 42.25.Hz, 42.62.Eh**DOI:** 10.7498/aps.74.20250024**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250024

1 引言

大尺寸精密测距技术在科学研究、航空航天和工业生产等领域具有重要应用价值. 光频梳凭借其短脉冲、宽光谱、多纵模及频率稳定可溯源等特性, 为解决传统激光测距中大量程与高精度的矛盾提供了创新方案. 因此, 基于光频梳的大尺寸绝对测距技术已成为当前激光测距领域的研究热点.

光频梳在时域上为飞秒量级脉宽的超短脉冲光, 在频域上为数百万条等间隔光谱线, 使其在绝对测距领域具有超强的优势, 近年来国内外学者围绕光频梳测距技术开展了深入研究^[1-5]. 在时域内, 飞行时间法通过脉冲互相关实现大尺寸测距, 但需要机械扫描位移平台或激光器腔长导致测量效率受限^[6-9]. 双光频梳测距技术通过互相关信号实现

无盲区测距且无需机械扫描, 提高了测量速度, 但双光源系统导致成本较高^[10-13]. 在频域内, 合成波长法通过参考光和测量光的相位差获取被测距离的粗测值和精测值, 经过测量值合成实现大范围高精度测距, 但构建多尺度合成波长链导致其测量系统相对复杂且成本较高^[14-16]. 光谱干涉法利用光谱仪采样频域干涉信号, 再通过傅里叶变换或小波变换解析相位, 系统简单但受限于商用光谱仪频率分辨力的限制导致其非模糊范围较小^[17-19]. 为了扩展光谱干涉测距的非模糊范围, 可以采用 VIPA 光谱仪进行采样但价格较为昂贵; 结合高速光电探测器的啁啾脉冲频域干涉法也是一种有效方法, 但需搭配额外的高精度光纤延迟线以消除测量盲区; 另外, 选用高重复频率的微腔孤子光频梳作为光源同样可以消除测量盲区, 但是其超高重复频率难以精确测量和控制, 对使用环境提出了较高要求^[20-24].

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 3122019054) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xingshujian521@163.com

因此, 鉴于工业现场及室外环境等应用场景的需求, 研究一种系统简单、量程大、精度高的任意长绝对测距技术显得尤为重要. 本文提出了一种基于光频梳的多脉冲光谱干涉绝对测距方法, 构建了相应的数学模型, 仅对多脉冲光谱干涉信号进行一次傅里叶变换, 即可利用伪时域同步确定测量光路的群折射率和被测长度; 进一步利用微调重复频率和差分计算的方法, 可将测距范围由传统光谱干涉测距的非模糊范围拓展至任意长度. 针对所提出的方法进行了大量的数值模拟分析, 结果表明, 本文提出的多脉冲光谱干涉测距方法能够实现大量程、高精度绝对测距.

2 测距原理

光频梳具有宽光谱且频率稳定的优势, 其包含的众多纵模能够相互干涉, 相比于其他测距方式, 光谱干涉测距系统简单且精度高, 展现出一定的优势. 因此, 本文设计了基于多脉冲光谱干涉的测距系统, 如图 1 所示. 利用光频梳 OFC 作为测距光源, 其发出的一系列脉冲光在分束器 BS 处被分为两束光, 一束进入参考臂被参考镜 MR 反射, 作为参考光, 另一束进入测量臂分别被两个测量镜反射, 作为两个测量光, 其中测量镜 M1 为半反半透镜, 测量镜 M2 和参考镜 MR 都为平面镜, 两个测量镜之间的距离为 d , 被测绝对距离为 L .

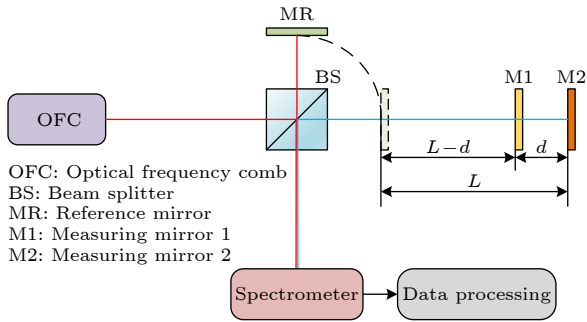


图 1 测距系统原理图

Fig. 1. Principle of distance measurement system.

由于两个测量脉冲的光程不同, 因此各自的光谱会分别携带与距离相关的相位信息. 假设光频梳的光谱为理想高斯光谱, 记为 $E(\omega)$, 则参考光、测量光 1、测量光 2 的光谱可分别表示为 $\alpha E(\omega)$, $\beta_1 E(\omega) \exp(-i\omega\tau_1)$ 和 $\beta_2 E(\omega) \exp(-i\omega\tau_2)$. 其中, α , β_1 和 β_2 分别为参考脉冲和两个测量脉冲的功率因

子, τ_1 和 τ_2 分别为两个测量脉冲相对于参考脉冲的时间延迟, 表示为

$$\tau_1 = 2(L-d) \cdot (n_g/c), \quad (1)$$

$$\tau_2 = 2L \cdot (n_g/c), \quad (2)$$

式中, n_g 为群折射率, c 为真空中光速.

参考光与两束测量光会在频域内同时发生光谱干涉, 因此由光谱仪记录到的信号为多脉冲光谱干涉条纹如图 2(a) 所示, 可表示为

$$\begin{aligned} I(\omega) &= [\alpha E(\omega) + \beta_1 E(\omega) \exp(-i\omega\tau_1) \\ &\quad + \beta_2 E(\omega) \exp(-i\omega\tau_2)]^2 \\ &= E^2(\omega) [\alpha^2 + \beta_1^2 + \beta_2^2 + 2\alpha\beta_1 \cos(\omega\tau_1) \\ &\quad + 2\alpha\beta_2 \cos(\omega\tau_2) + 2\beta_1\beta_2 \cos(\omega\Delta\tau)], \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\Delta\tau$ 表示两个测量脉冲之间的时间延迟, 其与两个测量镜之间的距离 d 有关, 即 $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = 2n_g d/c$.

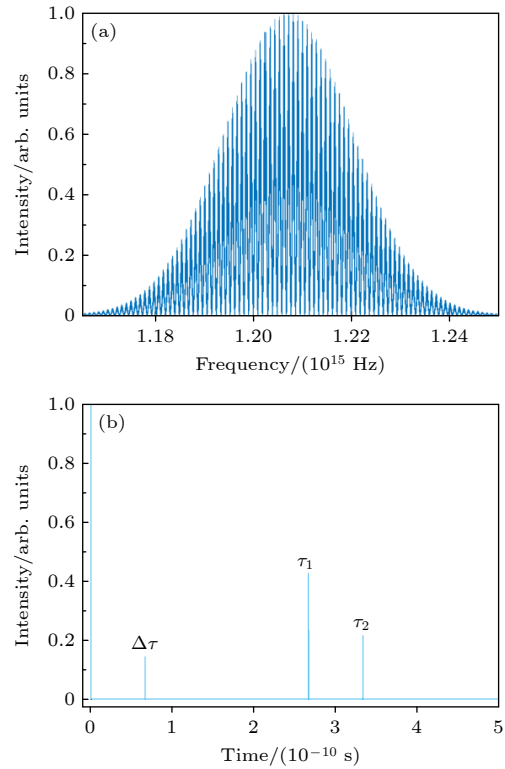


图 2 多脉冲光谱干涉条纹和时间延迟 (a) 频域; (b) 伪时域

Fig. 2. Multi-pulse spectral interferometry and time delay: (a) Frequency domain; (b) pseudo-time domain.

由 (3) 式可见, 多脉冲光谱干涉信号包含直流项和交流项两部分, 其中直流项为光谱干涉信号的背景项, 而交流项与时间延迟 τ_1 和 τ_2 有关. 对光谱

干涉信号进行傅里叶变换可得到伪时域谱, 表示为

$$I(t) = E^2(\omega) \otimes [2\alpha\beta_1\delta(t - \tau_1) + 2\alpha\beta_2\delta(t - \tau_2) + 2\beta_1\beta_2\delta(t - \Delta\tau) + (\alpha^2 + \beta_1^2 + \beta_2^2)\delta(t) + 2\alpha\beta_1\delta(t + \tau_1) + 2\alpha\beta_2\delta(t + \tau_2) + 2\beta_1\beta_2\delta(t + \Delta\tau)], \quad (4)$$

由(4)式可知, 伪时域谱的右侧(即 $t > 0$ 时)共包含 3 个脉冲, 分别对应 τ_1 , τ_2 和 $\Delta\tau$, 其强度依次为 $2\alpha\beta_1$, $2\alpha\beta_2$ 和 $2\beta_1\beta_2$, 只需保证 $\alpha \neq \beta_1 \neq \beta_2$, 即可通过峰值大小区分出 τ_1 , τ_2 , $\Delta\tau$ 的具体位置, 如图 2(b) 所示.

理论上将 τ_2 代入(2)式即可得到被测距离 L , 但是由于光频梳在时域内为周期性脉冲, 被测距离的变化导致了参考脉冲和测量脉冲的前后相对位置变化, 因此利用光谱干涉测距时, 被测距离 L 与非模糊范围 L_{NAR} 之间的关系呈周期性变化, 如图 3 所示. 光谱干涉测距的非模糊范围为

$$L_{\text{NAR}} = \frac{l_{\text{pp}}}{2} = \frac{c}{2n_g f_r}, \quad (5)$$

式中, l_{pp} 为脉冲间距, f_r 为重复频率.

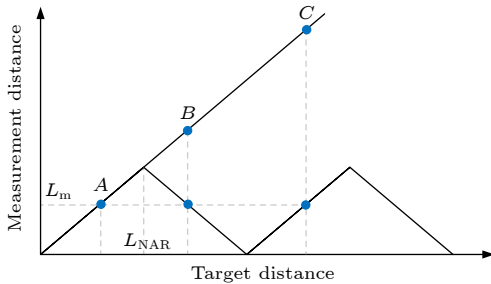


图 3 被测距离与非模糊范围的关系

Fig. 3. Target distance and non-ambiguous range.

当被测距离较小时, 即 $L < L_{\text{NAR}}$ 时, 如图 3 中的 A 点, 此时未出现混叠, 被测距离为 $L_m = c\tau_2/n_g$. 随着被测距离 L 逐渐增大, 如图 3 中的 B 点和 C 点, 此时测量发生混叠, 但光谱干涉信号对应的光程差与实际值之间仍有直接关系. 最终被测距离 L 可表示为

$$L = \begin{cases} (N \cdot L_{\text{NAR}} + L_m)/2, & N = 2k, \\ [(N + 1) \cdot L_{\text{NAR}} - L_m]/2, & N = 2k + 1, \end{cases} \quad (6)$$

其中, L 为被测距离, L_m 为伪时域法测距结果, N 为整数. 根据以上分析, 被测距离 L 通过 N , L_{NAR} 和 L_m 三个分量被拓展为任意长绝对距离. 由(6)式可见, 被测距离 L 包含小数和整数两部分,

小数部分为 L_m 或 $L_{\text{NAR}} - L_m$, 整数部分为 $N \cdot L_{\text{NAR}}$, 需要确定 N 值, 可以通过微调光频梳的重复频率由 f_r 变为 f'_r , 当小数部分处于图 3 中的递增阶段时, 被测距离可以表示为

$$L = \frac{1}{2} (N \cdot L_{\text{NAR}} + L_m) = \frac{1}{2} \left(N \cdot \frac{c}{2n_g f_r} + \frac{c}{n_g} \tau_2 \right) = \frac{1}{2} (N \cdot L'_{\text{NAR}} + L'_m) = \frac{1}{2} \left(N \cdot \frac{c}{2n_g f'_r} + \frac{c}{n_g} \tau'_2 \right). \quad (7)$$

通过差分方式计算可得整数 N 的表达式为

$$N = 2(\tau'_2 - \tau_2) \frac{f_r f'_r}{f'_r - f_r}. \quad (8)$$

同理, 当小数部分处于图 3 中的递减阶段时, 整数 N 的表达式为

$$N = 2(\tau_2 - \tau'_2) \frac{f_r f'_r}{f'_r - f_r} - 1. \quad (9)$$

另外, 本文采用两束测量光同时与参考光在频域内进行干涉, 其优点在于两束测量光共用同一个测量光路, 对于单次测量来说, 在忽略测量光路不均匀性的情况下可认为两束测量光都是在相同介质中传输的, 其在测量光路中的传输速度是一致的, 对应相同的群折射率 n_g . 合理选择两个测量镜之间的距离 d 作为参考间距并进行标定, 即可获得真空中两个测量脉冲之间的参考时间延迟 $\Delta\tau_0 = 2d/c$, 对比 $\Delta\tau_0$ 和 $\Delta\tau$ 可以直接计算出实际测量光路的群折射率 n_g , 即

$$n_g = \frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_0}. \quad (10)$$

综上所述, 通过测量群折射率 n_g , 整数 N 和时间延迟 τ_2 , 即可由(6)式计算出被测距离 L .

3 数值模拟

假设光频梳在真空中的中心波长为 1560 nm, 脉宽 90 fs, 对应的理想高斯光谱的半高宽为 4.9 THz, 重复频率为 5 GHz, 初始频率偏移为 0, 采样点数为 10^6 , 采样率为重复频率, 温度为 20 °C, 湿度为 50%, 大气压为 101.325 kPa, 二氧化碳的体积分数为 4.5×10^{-4} .

3.1 群折射率测量的仿真分析

由(6)式可以看出, 被测距离 L 由 N , L_{NAR} 和 L_m 组成, 其中 L_{NAR} 和 L_m 都与群折射率 n_g 有关,

可见群折射率 n_g 直接影响到被测距离 L 的测量精度,有必要对本文方法中群折射率 n_g 的测量精度进行分析. 由 (10) 式可知,群折射率 n_g 与两个测量镜之间的参考间距 d 有关,因此在标准大气环境条件下,以 0.01 m 的间隔改变参考间距 d 的大小,对群折射率 n_g 的测量结果进行模拟. 模拟时假设重复频率 $f_r = 5$ GHz,对应的非模糊范围 L_{NAR} 近似等于 0.03 m,此时伪时域谱横轴对应的最大值为 $1/(2 \times 5 \times 10^9) = 10^{-10}$ s,在参考间距 d 大于非模糊范围 L_{NAR} 时,利用伪时域谱求得两个测量脉冲之间的时间延迟 $\Delta\tau$ 会发生混叠,其与实际的时间延迟之间同样存在直接联系,实际时间延迟的计算公式如下:

$$\Delta\tau' = \begin{cases} m \frac{1}{2f_r} + \Delta\tau, & m = 2k \\ (m+1) \frac{1}{2f_r} - \Delta\tau, & m = 2k+1 \end{cases}$$

$$m = \text{floor}(2d/L_{\text{NAR}}), \quad (11)$$

式中, $\Delta\tau'$ 和 $\Delta\tau$ 分别表示两个测量脉冲之间实际的时间延迟和在伪时域中的时间延迟, m 为自然数,由参考间距 d 和 $L_{\text{NAR}}/2$ 的比值向下取整即可获得. 最终,将 $\Delta\tau'$ 代入 (10) 式就可以计算出实际测量光路中的群折射率 n_g .

结果如图 4 所示,随着参考间距 d 的增大,群折射率的测量误差逐渐收敛,当 $d \geq 0.1$ m 时,群折射率测量的绝对误差可以稳定在 $\pm 0.21 \times 10^{-6}$ 以内,当 $d = 0.12$ m 时,群折射率测量的绝对误差最大为 0.21×10^{-6} ,当 $d = 0.17$ m 时,群折射率测量的绝对误差最小为 0.02×10^{-6} ,当 $d = 0.1$ m 时,群折射率测量的绝对误差为 0.12×10^{-6} . 在理想仿真情况下,影响群折射率测量精度的主要因素是采样点

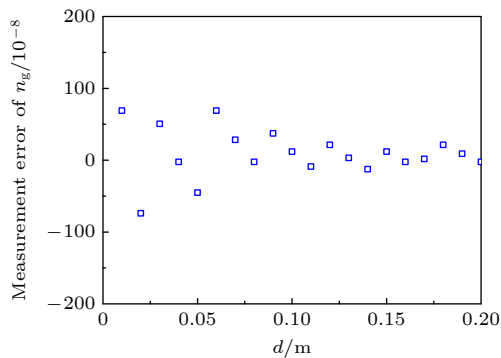


图 4 参考距离 d 与群折射率 n_g 之间的关系

Fig. 4. Measurement errors of n_g by different d .

数,在参考间距 $d = 0.1$ m 的情况下,当采样点为 4×10^6 时,群折射率的测量误差可以达到 0.5×10^{-8} . 因此,基于多脉冲光谱干涉测量群折射率的方法在理论上具有极高的精度,局限性在于实际应用中一方面对于光谱仪的性能要求极高,以确保能够采集到准确的光谱干涉信号,另一方面对于光谱干涉信号需要进行插值处理,增加了数据处理的复杂性和计算负担.

3.2 绝对距离测量的仿真分析

在绝对距离测量中测距精度是关键参数之一,传统的光谱干涉测距在实验室环境下可实现纳米量级的测距精度,但是在室外长距离测量情况下空气折射率难以准确测量,无法保证最终的测距精度. 本文在标准大气条件下对被测距离在 0—200 m 内的测距精度进行了数值模拟,仿真分析中取参考间距 $d = 0.1$ m,采样点数为 10^6 ,测距间隔为 10 m,对 20 个被测距离进行了测距仿真,模拟结果如图 5 所示,被测距离在 0—200 m 内,测距误差保持在 -33—29 nm 之间,测量误差的 PV 值为 62 nm,标准偏差为 18 nm. 结果表明,在考虑空气折射率测量不准确的影响下,当被测距离 $L = 120$ m 时,最大测距误差仅为 33 nm,多脉冲光谱干涉测距在 0—200 m 大量程内的测距精度可以达到 $0.1 \mu\text{m}$ 以内.

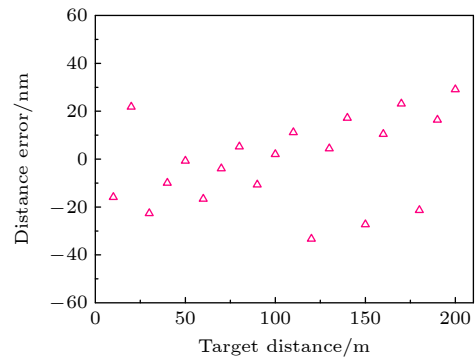


图 5 不同被测距离的测距误差

Fig. 5. Range errors by different target distances.

为了验证本文方法的测距分辨力,在被测距离 $L = 100$ m 时,每次增大 $0.1 \mu\text{m}$,移动 100 次,对测距结果进行仿真,仿真结果如图 6 所示,在 0—10 μm 范围内,测距误差保持在 -12—6 nm 之间,测量误差的 PV 值为 18 nm,标准偏差为 7 nm. 结果表明,多脉冲光谱干涉测距在大量程内的测距分辨力能够达到 $0.1 \mu\text{m}$ 以内.

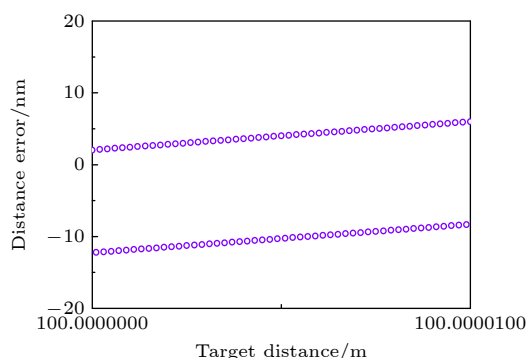


图6 测距分辨力实验结果

Fig. 6. Experimental results of ranging resolution.

3.3 大气条件改变的影响

由(5)式和(6)式可知,被测距离 L 由非模糊范围 L_{NAR} 和伪时域法测距结果 L_m 组成,并且这两者都与群折射率有关,在空气中群折射率可以表示为

$$n_g = n(f_c) + f \frac{\partial n}{\partial f}, \quad (12)$$

式中, f_c 为中心频率, $n(f_c)$ 为中心波长的空气折射率.

在实际应用场景中,温度、湿度、气压、二氧化碳含量等条件发生改变,都将影响光频梳各波长的

空气折射率,进而导致群折射率发生变化,而群折射率的波动是影响大尺寸测距精度的关键因素之一,因此有必要对本文提出的方法在大气条件变化下的测距精度进行分析.

在0—200 m范围内,以10 m的测量间距进行模拟,分别将温度提高1℃、湿度增加15%、气压提高100 Pa、二氧化碳的体积分数提高 10^{-4} 时,模拟出测距结果并与标准大气环境下的测距结果进行对比,结果如图7所示.

可以看出,当被测距离 $L = 0\text{--}200\text{ m}$ 时,标准环境时的测距误差在 $-33\text{--}29\text{ nm}$ 之间,测量误差的PV值为62 nm,标准偏差为18 nm;温度提高1℃时的测距误差在 $-34\text{--}32\text{ nm}$ 之间,测量误差的PV值为66 nm,标准偏差为19 nm;湿度增大15%时的测距误差在 $-31\text{--}36\text{ nm}$ 之间,测量误差的PV值为67 nm,标准偏差为21 nm;气压升高100 Pa时的测距误差在 $-38\text{--}32\text{ nm}$ 之间,测量误差的PV值为70 nm,标准偏差为19 nm;二氧化碳的体积分数增大 10^{-4} 时的测距误差在 $-35\text{--}32\text{ nm}$ 之间,测量误差的PV值为67 nm,标准偏差为18 nm.对比以上5种情况,多脉冲光谱干涉测距由于可以利用伪时域直接测量出测量光路中的群折射率 n_g ,并对被测距离 L 进行修正,所以

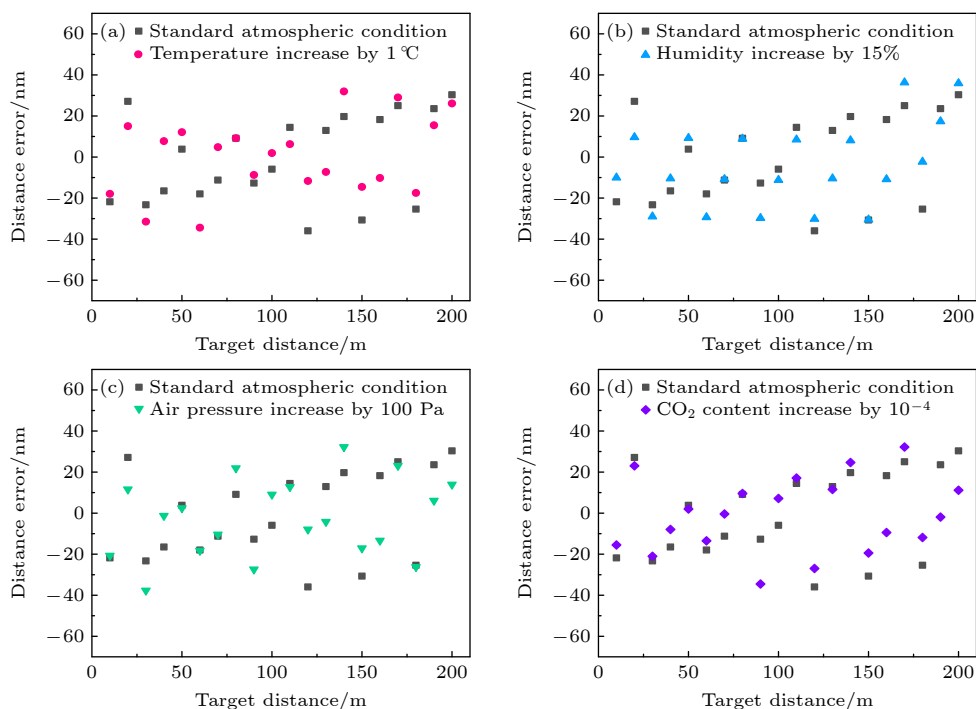
图7 大气环境条件改变时的测距误差 (a) 温度升高1℃; (b) 湿度增大15%; (c) 气压提高100 Pa; (d) CO_2 的体积分数增大 10^{-4}

Fig. 7. Range errors by different atmosphere conditions: (a) Temperature increase by 1℃; (b) humidity increase by 15%; (c) air pressure increase by 100 Pa; (d) CO_2 content increase by 10^{-4} .

温度、湿度、气压、CO₂ 含量等大气环境条件的改变对于本文测距方法的影响并不大, 在 0—200 m 的测距范围内其测距误差不超过 ± 40 nm, 依然可以在大量程范围内实现亚微米级的测距精度.

4 结 论

本文提出了一种基于光频梳的多脉冲光谱干涉绝对测距方法, 构建了相应的数学模型, 通过对多脉冲光谱干涉信号进行一次傅里叶变换, 即可同步确定测量光路中的群折射率和被测距离. 通过微调重复频率和差分计算, 可将测距范围从传统光谱干涉测距的非模糊范围拓展至任意长度, 解决了大量程与高精度测距之间的矛盾.

模拟结果表明: 两个测量镜之间的参考间距对于群折射率的测量精度具有重要影响, 当参考间距为 0.1 m 时, 群折射率测量的绝对误差最大为 0.12×10^{-6} , 另外增加采样点数可以进一步提高群折射率的测量精度. 在考虑空气折射率测量不准确引入测距误差的情况下, 在 0—200 m 的测量范围内, 测距误差可以保持在 -33 — 29 nm 之间. 在大气条件发生改变时, 通过实时修正群折射率波动引入的测距误差, 在 0—200 m 的测距范围内测距误差不超过 ± 40 nm, 所以温度、湿度、气压、二氧化碳含量等大气环境条件的改变对于测距精度的影响并不大. 理论分析和数值模拟表明, 本文提出的多脉冲光谱干涉测距方法可以实现大量程内亚微米量级的绝对测距.

参考文献

- [1] Jia L H, Zheng J H, Zhang F M, Qu X H 2023 *J. Mech. Eng.* **59** 244 (in Chinese) [贾琳华, 郑继辉, 张福民, 曲兴华 2023 机械工程学报 **59** 244]
- [2] Ahn C M, Na Y J, Kim J 2023 *Opt. Laser Eng.* **162** 107414
- [3] Yu D R, Chen Z Y, Yang X, Xu Y L, Jin Z Y, Ma P X, Zhang Y F, Yu S, Lo B, Guo H 2023 *Photon. Res.* **11** 2222
- [4] Ray P, Salido-Monzu D, Presl R, Butt J, Wieser A 2024 *Opt. Express* **32** 12667
- [5] Liang X, Wu T F, Lin J R, Yang L H, Zhu J G 2023 *Nanomanuf. Metrol.* **6** 6
- [6] Cui M, Zeitouny M G, Bhattacharya N, Van Den Berg S A, Urbach H P, Braat J J M 2009 *Opt. Lett.* **34** 1982
- [7] Wei D, Takahashi S, Uehara K, Minoshima K, Hong F L, Nakajima M, Nakamura K 2011 *Opt. Express* **19** 4881
- [8] Zheng J, Wang Y, Wang X, Zhang F, Zhang W 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 261106
- [9] Liang X, Lin J R, Wu T F, Zhao H, Zhu J G 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 090602 (in Chinese) [梁旭, 林嘉睿, 吴腾飞, 赵晖, 郝继贵 2022 物理学报 **71** 090602]
- [10] Zhou S Y, Xiong S L, Zhu Z B, Wu G H 2019 *Opt. Express* **27** 22868
- [11] Wright H, Sun J H, McKendrick D, Weston N, Reid D T 2021 *Opt. Express* **29** 37037
- [12] Zhou S Y, Jiang R L, Zhang R X, Shi L H, Zhang D, Wu G H 2023 *Opt. Lett.* **48** 1104
- [13] Han S M, Yang L H, Song Y J, Niu Q, Shi Y Q, Yu H Y, Hu X Y, Zhu J G 2024 *Rev. Sci. Instrum.* **95** 043703
- [14] Doloca N R, Meiners-Hagen K, Wedde M, Pollinger F, Abou-Zeid A 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 115302
- [15] Zhao X Y, Qu X H, Zhang F M, Zhao Y H, Tang G Q 2018 *Opt. Lett.* **43** 807
- [16] 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]
- [17] Wu H Z, Zhang F M, Meng F, Liu T Y, Li J S, Pan L, Qu X H 2016 *Meas. Sci. Technol.* **27** 015202
- [18] Gao H R, Huang L, Xu X, Wang D G, Ge P X, Zhao H N 2024 *Meas. Sci. Technol.* **35** 105009
- [19] Wang J D, Huang J S, Liu Q H, Du W, Zhang F M, Zhu T 2024 *Photon. Res.* **12** 313
- [20] Niu Q, Zheng J H, Cheng X R, Liu J C, Jia L H, Ni L M, Nian J, Zhang F M, Qu X H 2022 *Opt. Express* **30** 35029
- [21] Xia H Y, Zhang C X 2010 *Opt. Express* **18** 4118
- [22] Wang J D, Lu Z Z, Wang W Q, Zhang F M, Chen J W, Wang Y, Zheng J H, Chu S T, Zhao W, Brent E, Qu X H, Zhang W F 2020 *Photon. Res.* **8** 1964
- [23] Jang Y S, Liu H, Yang J H, Yu M B, Kwong D L, Wong C W 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 023903
- [24] Xu X Y, Zhao H H, Qian Z W, Liu C, Zhai J S, Wu H Z 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 220601 (in Chinese) [徐昕阳, 赵海涵, 钱治文, 刘超, 翟京生, 吴翰钟 2021 物理学报 **70** 220601]

Theoretical analysis of absolute distance measurement based on multi-pulse spectral interferometry by using optical frequency comb^{*}

XING Shujian[†] WANG Furong WANG Yizhao CHANG Mengfei

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(Received 7 January 2025; revised manuscript received 6 February 2025)

Abstract

In industrial sites and outdoor long-distance measurements, the difficulty in accurately measuring and correcting the refractive index of air is a critical factor affecting precise distance measurement. In order to develop a simple, long-range, and high-precision absolute distance measurement technique, in this work an absolute distance measurement method is presented based on multi-pulse spectral interferometry by using an optical frequency comb. This method can dynamically correct the measurement errors introduced by group refractive index fluctuations. Firstly, a mathematical model for multi-pulse spectral interferometry is established. By performing a single Fourier transform on the multi-pulse spectral interference signal, the time delay measured in the pseudo-time domain can be used to simultaneously determine the group refractive index of the measurement path and the measured distance. Secondly, by fine-tuning the repetition frequency and using difference computation, the measurement range can be extended from the non-ambiguity range of traditional spectral interferometry to arbitrary lengths. Finally, extensive numerical simulations and analyses are conducted to validate the performance of the proposed method. The simulation results demonstrate that with a reference distance of 0.1 m, the maximum absolute error in group refractive index measurement is 0.12×10^{-6} , and the maximum distance measurement error is 33 nm in a range of 0–200 m. In order to measure the group refractive index in real time under changing atmospheric conditions and compensate for ranging errors caused by changes in air refractive index, even under changing atmospheric conditions, the maximum distance measurement error is 38 nm, ensuring sub-micron-level measurement accuracy over long distances. The research results indicate that this method can be applied to large-scale and high-precision absolute distance measurement.

Keywords: optical frequency comb, multi-pulse spectral interferometry, absolute distance measurement, air refractive index

PACS: 06.60.Jn, 06.30.Bp, 42.25.Hz, 42.62.Eh

DOI: [10.7498/aps.74.20250024](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250024)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250024](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250024)

^{*} Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 3122019054).

[†] Corresponding author. E-mail: xingshujian521@163.com



光频梳的多脉冲光谱干涉绝对测距理论分析

邢书剑 王芙蓉 王翼昭 常孟斐

Theoretical analysis of absolute distance measurement based on multi-pulse spectral interferometry by using optical frequency comb

XING Shujian WANG Furong WANG Yizhao CHANG Mengfei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 070601 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250024

CSTR: 32037.14.aps.74.20250024

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250024>

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

重复频率倍增光频梳时域互相关绝对测距

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

物理学报. 2022, 71(9): 090602 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212073>

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

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>

基于双向吸收光谱精准标定的光频扫描干涉绝对测距

Absolute ranging of optical frequency scanning interferometry based on accurate calibration of bidirectional absorption spectroscopy

物理学报. 2024, 73(17): 170601 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240840>

氟化镁微瓶腔光频梳光谱分析及优化

Analysis and optimization of optical frequency comb spectra of magnesium fluoride microbottle resonator

物理学报. 2024, 73(3): 034202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231126>

动态啁啾脉冲干涉的快速绝对距离测量

Rapid absolute distance measurement by dynamic chirped pulse interferometry

物理学报. 2021, 70(22): 220601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202149>