

激光与光电子学进展

双光学频率梳的多波长外差干涉测距方法的
距离不确定度影响因素研究谭振坤^{1*}, 李瑶¹, 孔英秀¹, 吴鹏飞², 夏方圆^{3,4}¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;²西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;³北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;⁴西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710000

摘要 装备精密制造、空间导航定位和卫星编队等领域要求激光干涉仪的测距精度在几千米到几百公里范围内达到 pm 量级, 这是传统激光测距技术无法达到的。因此, 利用等间隔多光谱光频梳特性, 基于多波长激光干涉测量原理和双光学频率梳外差干涉测距数学模型, 研究相位测量不确定度、空气折射率不确定度和信号重复频率引起的不确定度等因素对距离测量不确定度的影响。结果表明: 距离测量不确定度会随温度的增加、压强的增大、二氧化碳体积分数的升高而减小; 相比传统光学频率梳干涉测距法, 温度越高、压强越大, 双光学频率梳外差干涉测距法的距离测量不确定度下降越明显, 当二氧化碳每立方米的体积分数在 0.75%~0.80% 范围内时, 两种方法的距离测量不确定度趋于一致。

关键词 光纤光学; 光频梳; 多波长; 外差干涉测距; 距离测量不确定度

中图分类号 TN98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1906002

Research on Influencing Factors of Distance Uncertainty in Multiwavelength Heterodyne Interferometric Distance Measurement Method Based on Dual-Optical Frequency Comb

Tan Zhenkun^{1*}, Li Yao¹, Kong Yingxiu¹, Wu Pengfei², Xia Fangyuan^{3,4}¹Faculty of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;²Faculty of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, Shaanxi, China;³Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;⁴Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710000, Shaanxi, China

Abstract In the fields of equipment precision manufacturing, space navigation, positioning, and satellite formation, the accuracy of the laser interferometer measurement system is required to reach the pm level in the measurement range of thousands of meters to hundreds of kilometers, which is a requirement that cannot be achieved by traditional laser ranging technology. To solve the above issues based on the characteristics of equally spaced multispectral optical frequency combs, classic principle of multiwavelength laser interferometry, and theoretical mathematical model of the heterodyne interferometric distance measurement method of the dual-optical frequency comb, the effects of phase measurement uncertainty, air refractive index, and the uncertainty caused by signal repetition frequency on distance measurement are investigated in this paper. The results show that the uncertainty of distance measurement decreases with the increase in temperature, pressure, and carbon dioxide volume fraction. In addition, compared to the traditional optical frequency comb interferometric ranging method, the higher the temperature and pressure, the more obvious the decrease of the measurement distance uncertainty of the dual-optical frequency comb heterodyne interferometric ranging method; when the volume fraction of carbon dioxide per cubic meter is in the

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-10-19; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(62001363, 62001364)、陕西省自然科学基金(2020JQ-818)、陕西省科技成果转移与推广计划(2020CGXNG-041)、陕西省教育厅服务地方专项科学研究计划(20JC027)、陕西省教育厅专项科研计划(20JK0690, 20JK0665)、西安市科技计划(2020KJRC0038, 2020KJRC0085)、碑林区 2020 科技计划(GX2009)

通信作者: *luka_tan@163.com

range of 0.75%–0.80%, the distance measurement uncertainty of the two methods tends to be consistent.

Key words fiber optics; optical frequency comb; multiwavelength; heterodyne interferometric distance measurement; uncertainty of distance measurement

1 引言

精准测距在量子力学^[1-2]、广义相对论、卫星编队飞行等空间工程和国防科技技术领域有着广泛应用^[3-6]。经典的绝对距离激光测距方法可分为激光干涉测距法和激光非干涉测距法。而应用于激光非干涉测距法的飞行时间(TOF)测距法,测量分辨率只能达到 mm 量级^[7],应用范围受到极大限制。激光干涉测距法分为扫频干涉(FSI)测距法^[8]和多波长干涉(MWI)测距法^[9]。其中:FSI测距法在扫描激光器频率的同时还需进行连续监测,从原理上限制了其测量速度;MWI测距法需要多台激光光源发出多个激光波长,大量的合成波长可以扩大测量范围,但每台激光器的稳频装置和高精度光束合成装置会使整套激光测量系统结构繁冗复杂,从而影响其可靠性和测量精度。

光学频率梳的提出给绝对距离测量技术带来革命性的进展^[10-12]。光学频率梳可以发射出具有离散、均匀间隔的宽频谱和均匀模距的窄线宽超短脉冲序列,当其模态达到标准频率时,就可以实现空间、时间和频域的超精确测量^[13]。Minoshima 等^[14]用频率梳齿间干涉相位测距法构建了用光学频率梳作为激光光源的绝对距离测量系统。Doloca 等^[15]对基于光学频率梳齿间间隔特性的干涉相位绝对距离测距法进行改进。Balling 等^[16]建立了空气介质中光频梳脉冲展宽模型,并在空气环境中进行了绝对距离测量的实验研究。Coddington 等^[17]提出了基于双光学频率梳的互相关干涉条纹与飞行时间辨析测距法。秦鹏等^[18]利用平衡光学互相关技术使激光测距仪在 52 m 范围内的测量精度达到 12 nm。杨睿韬^[19]提出了基于外差双光学频率

梳多波长干涉测距方法的完整理论模型,且该方法可实现大范围、高精度距离测量。赵显宇等^[20]提出了使用电光调制光学频率梳的光谱干涉测距方法,实验结果表明,在 1 m 的测量范围内,该方法的绝对测距精度可达到 $\pm 15 \mu\text{m}$ 以内。目前,光学频率梳凭借等间隔、梳齿状、多光谱特点已成为基于多波长外差干涉的绝对距离测量系统中的理想光源,但绝对距离测量精度主要受外差干涉信号信噪比和光频梳强度的影响,且测距系统中外差干涉信号的提取易受实验平台装置安装精度的影响。

针对上述问题,本文选用两个光学频率梳分别作为绝对距离测量系统中的信号光与本振光,并基于多波长外差干涉测距原理和双光频梳的多波长外差干涉测距数学模型进行仿真分析,研究相位测量不确定度、空气折射率不确定度和信号重复频率引起的不确定度等因素对距离测量不确定度的影响。

2 基于双光学频率梳外差干涉测距的数学模型

光学频率梳具有中心梳齿频偏恒定且梳齿间距不同的特点,将其作为外差干涉测距系统中的光源时,依据多波长外差干涉测距原理,最终使不同波长干涉信号处于不同外差频率处,从而对多波长对应的外差干涉信号进行分离与提取。基于双光学频率梳的多波长外差干涉测距原理如图 1 所示。选用两束光学频率梳分别作为多波长激光光源的信号光频率梳(S)和本振光频率梳(L)。设信号光频率梳中心梳齿的频率为 ν_s ,源激光频率为 ν_0 ,中心梳齿频率与源激光频率的频率间隔为 f_{s0} ,梳齿间隔频率为 f_{sr} ,则第 i 阶梳齿的频率

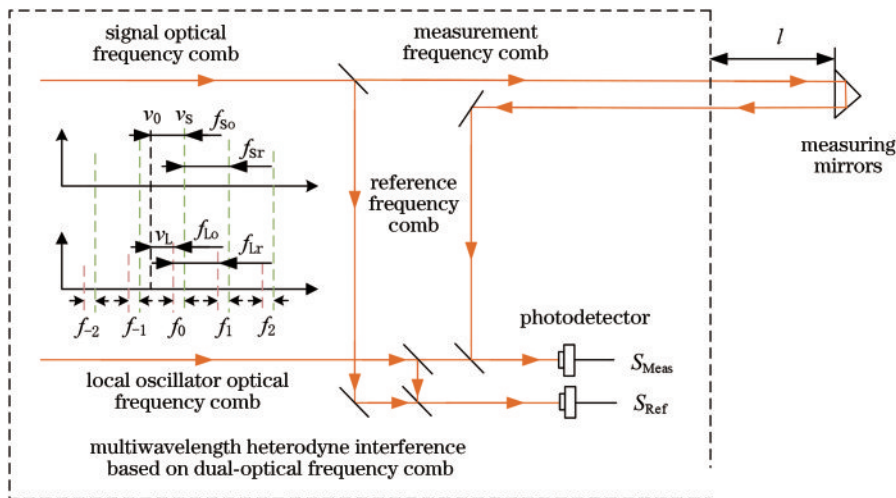


图 1 基于双光学频率梳的多波长外差干涉测距原理^[19]

Fig. 1 Principle of distance measurement of multi wavelength heterodyne interference based on dual-optical frequency comb^[19]

$f_{Sr} = \nu_s + if_{Sr}$ 。信号光经频率梳分光后可得到测量信号的光频率梳 (Meas) 和参考信号的光频率梳 (Ref), 一束光用来获取待测距离信息, 另一束光用来保留参考距离与相位信息。本振光的中心梳齿频率为 ν_L , 相对于源激光的频率 ν_0 , 本振光频率梳中心梳齿的频偏值为 f_{Lo} , 本振光频率梳的梳齿间隔为 f_{Lr} , 第 i 阶本振光频率梳梳齿的频率 $f_{Lr} = \nu_L + if_{Lr}$ 。本振光学频率梳为信号光学频率梳提供解调光信号, 用于产生外差干涉信号, 本振光频率梳经过分光棱镜后, 两束光分别与测量信号频率梳和参考信号频率梳进行外差干涉。信号光频率梳与本振光频率梳的中心梳齿偏置频率 $f_o = \nu_s - \nu_L$, 梳齿间距频率差 $f_r = f_{Sr} - f_{Lr}$ 。最后, 通过光电探测器将上述两种外差光信号转换为电信号, 即外差干涉测量电信号 S_{Meas} 和外差干涉参考电信号 S_{Ref} 。

双光学频率梳的光谱与多波长外差干涉的频谱如图 2 所示。信号光频率梳 $E_S(t)$ 和本振光频率梳 $E_L(t)$ 的电场强度可表示为

$$E_S(t) = \sum_i A_{Si} \cos[2\pi(\nu_s + if_{Sr})t], \quad (1)$$

$$E_L(t) = \sum_i A_{Li} \cos[2\pi(\nu_L + if_{Lr})t], \quad (2)$$

式中, A 为振幅。

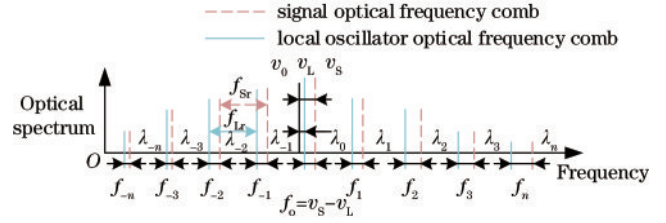


图 2 外差双光学频率梳的光谱示意图^[19]

Fig. 2 Schematic diagram of the spectrum of a heterodyne dual-optical frequency comb^[19]

测量信号光频率梳经测量距离 l_{Meas} 和参考信号光频率梳经参考距离 l_{Ref} 到达光电探测器后的激光电场强度可分别表示为

$$E_{Meas}(t) = \sum_i \cos[2\pi(\nu_s + if_{Sr})t + \phi_{Mi}] + \sum_i \cos[2\pi(\nu_L + if_{Lr})t] = 2 \sum_i A_{Si} A_{Li} \cos\left[\frac{2\pi(f_o + if_r)t + \phi_{Mi}}{2}\right] \times \cos\left\{\frac{2\pi[(\nu_s + \nu_L) + i(f_{Sr} + f_{Lr})]t + \phi_{Mi}}{2}\right\}, \quad (3)$$

$$E_{Ref}(t) = \sum_i \cos[2\pi(\nu_s + if_{Sr})t + \phi_{Ri}] + \sum_i \cos[2\pi(\nu_L + if_{Lr})t] = 2 \sum_i A_{Si} A_{Li} \cos\left[\frac{2\pi(f_o + if_r)t + \phi_{Ri}}{2}\right] \times \cos\left\{\frac{2\pi[(\nu_s + \nu_L) + i(f_{Sr} + f_{Lr})]t + \phi_{Ri}}{2}\right\}, \quad (4)$$

式中, ϕ_{Mi} 和 ϕ_{Ri} 分别为测量距离和参考距离引入的光学相位延迟^[19], 可表示为

$$\phi_{Mi} = \frac{4\pi n_i l_{Meas}}{\lambda_i} = \frac{4\pi n_i (\nu_s + if_{Sr}) l_{Meas}}{c}, \quad (5)$$

$$\phi_{Ri} = \frac{4\pi n_i l_{Ref}}{\lambda_i} = \frac{4\pi n_i (\nu_s + if_{Sr}) l_{Ref}}{c}, \quad (6)$$

式中: λ_i 为第 i 阶梳齿对应的真空波长; n_i 为第 i 阶梳齿

对应的空气折射率。第 i 阶光学频率梳梳齿的测距相位延迟 ϕ_i 与待测距离的关系^[19]可表示为

$$\phi_i = \phi_{Mi} - \phi_{Ri} = \frac{4\pi n_i l}{\lambda_i} = \frac{4\pi n_i (\nu_s + if_{Sr}) l}{c}. \quad (7)$$

式(3)和式(4)中, 本振光学频率梳的光学相位延迟被忽略, 则光强 $I_{Meas}(t)$ 可表示为

$$I_{Meas}(t) = |E_{Meas}(t)|^2 = \left| A_{Si} \sum_i \cos[2\pi(\nu_s + if_{Sr})t + \phi_{Mi}] + \sum_i A_{Li} \cos[2\pi(\nu_L + if_{Lr})t + \phi_{Mi}] \right|^2 = \left| 2 \sum_i A_{Si} A_{Li} \cos\left[\frac{2\pi(f_o + if_r)t + \phi_{Mi}}{2}\right] \times \cos\left\{\frac{2\pi[(\nu_s + \nu_L) + i(f_{Sr} + f_{Lr})]t + \phi_{Mi}}{2}\right\} \right|^2 = 2 \left\{ \sum_i A_{Si}^2 A_{Li}^2 \cos[2\pi(f_o + if_r)t + \phi_{Mi}] \times \cos^2\left\{\frac{2\pi[(\nu_s + \nu_L) + i(f_{Sr} + f_{Lr})]t + \phi_{Mi}}{2}\right\} + \sum_{i, j (i \neq j)} \left\{ \cos\left[\frac{2\pi(i-j)f_r t + (\phi_{Mi} - \phi_{Mj})}{2}\right] + \cos\left[\frac{2\pi[2f_o + (i+j)f_r]t + \phi_{Mi} + \phi_{Mj}}{2}\right] \right\} \times \cos\left\{\frac{2\pi[(\nu_s + \nu_L) + i(f_{Sr} + f_{Lr})]t + \phi_{Mi}}{2}\right\} \times \cos\left\{\frac{2\pi[(\nu_s + \nu_L) + j(f_{Sr} + f_{Lr})]t + \phi_{Mj}}{2}\right\} \right\}. \quad (8)$$

现有光电探测器无法对式(8)中的高频项产生响应,因此,将其转换为外差干涉电信号 $S_{\text{Meas}}(t)$,可表示为

$$S_{\text{Meas}}(t) = \sum_i A_{Si}^2 A_{Li}^2 \cos[2\pi(f_o + if_i)t + \phi_{Mi}] + \sum_{i,j(i \neq j)} \cos \frac{1}{2} [2\pi(i-j)f_i t + (\phi_{Mi} - \phi_{Mj})] + \sum_{i,j(i \neq j)} \cos \frac{1}{2} \{2\pi[2f_o + (i+j)f_i]t + \phi_{Mi} + \phi_{Mj}\} \quad (9)$$

式(9)中,只有第一项只包含第 i 阶频率梳梳齿的测距相位信息,在实际探测过程中,式(9)中的后两项不能被响应,因此,仅保留第一项,最终外差干涉信号可以简化为

$$S_{\text{Meas}}(t) = \sum_i A_{Si}^2 A_{Li}^2 \cos[2\pi(f_o + if_i)t + \phi_{Mi}], \quad (10)$$

外差干涉参考电信号可简化为

$$S_{\text{Ref}}(t) = \sum_i A_{Si}^2 A_{Li}^2 \cos[2\pi(f_o + if_i)t + \phi_{Ri}]. \quad (11)$$

光学频率梳具备多光谱特性,可提供许多用于合成波长的梳齿,且每个梳齿之间的间隔频率为 f_{Sr} 。若选择第 p 阶、第 q 阶 ($p > q$) 梳齿,其间距 $m = p - q$,则第 m 阶对应的合成波长 Λ_m ^[19]可表示为

$$\Lambda_m = \frac{\lambda_p \lambda_q}{\lambda_q - \lambda_p} = \frac{c}{(p - q)f_{Sr}} = \frac{c}{mf_{Sr}}, \quad (12)$$

利用第 m 阶合成波长 Λ_m 能测量的距离 l ^[19] 可表示为

$$l \approx l_m = N_m \frac{\Lambda_m}{2n_g} + \frac{\phi_p - \phi_q}{4\pi n_g} \Lambda_m = N_m \frac{\Lambda_m}{2n_g} + \frac{\phi_p - \phi_q}{4\pi n_g} \frac{c}{mf_{Sr}}, \quad (13)$$

其中

$$n_g = n_p - \lambda_p \frac{n_p - n_q}{\lambda_p - \lambda_q}, \quad (14)$$

式中, n_p 和 n_q 分别为光学频率梳第 p 阶和第 q 阶梳齿对应的空气折射率。

空气群折射率的计算过程:假设在指定标准大气环境温度 $T = 273.15$ K,大气压强 $p = 1013.25$ Pa,单位面积内二氧化碳的体积分数 $x = 0.0375\%$,水汽压 $e = 0$ hPa 时,空气群折射率^[19]可表示为

$$N_{sg} = (n_{sg} - 1) \times 10^6 = 287.6155 + \frac{4.88660}{\lambda^2} + \frac{0.06800}{\lambda^4}, \quad (15)$$

大气折射率可表示为

$$N_g = (n_g - 1) \times 10^6 = \left(\frac{273.15}{1.13.25} \cdot \frac{p}{T} \cdot N_{sg} \right) - 11.27 \frac{e}{T}. \quad (16)$$

假设某一种光频梳有 M 个数量的梳齿,可生成 $M - m$ 个合成波长 Λ_m 。光频梳中每两个梳齿都有相同的宽度 f_{Sr} ,当 m 取相同值时得到的合成波长特性相同。用 $M - m$ 个没有任何差异的合成波长进行测量时可视

为一个合成波长重复进行 $M - m$ 次测量。通过融合处理得到最终的测量结果^[19],可表示为

$$l_{\text{avg}} = \frac{1}{M - m} \sum_{i=1}^{M-m} \left(N_m \frac{\Lambda M i}{2n_g} + \frac{\phi_i + m - \phi_i}{4\pi n_g} \Lambda_{mi} \right), \quad (17)$$

式中, i 为第 m 阶合成波长序数。根据式(15)可以准确获取第 m 阶合成波长的测距整数倍 N_m ,因此,将式(17)简化为

$$l_{\text{avg}} = \frac{1}{M - m} \sum_{i=1}^{M-m} \frac{\phi_i + m - \phi_i}{4\pi n_g} \Lambda_m = \frac{c}{4\pi n_g (M - m) m f_{Sr}} \sum_{i=1}^{M-m} \Delta\phi_{mi}. \quad (18)$$

式(18)中,假设不同梳齿对空气群折射率的影响可近似不计,则合成波长 Λ_m 和距离 l_{avg} 满足 $u(\Delta\phi_{mi}) = u(\Delta\phi_m)$ 。由不确定度合成法则得到测量不确定度 $u(l_{\text{avg}})$

$$u^2(l_{\text{avg}}) = \left[\frac{\partial l_{\text{avg}}}{\partial \phi} u(\Delta\phi_m) \right]^2 + \left[\frac{\partial l_{\text{avg}}}{\partial n_g} u(n_g) \right]^2 + \left[\frac{\partial l_{\text{avg}}}{\partial f_{Sr}} u(f_{Sr}) \right]^2 = \frac{1}{M - m} \left(\frac{c}{4\pi n_g m f_{Sr}} \right)^2 u^2(\Delta\phi_m) + l_{\text{avg}}^2 \left\{ \left[\frac{u(n_g)}{n_g} \right]^2 + \left[\frac{u(f_{Sr})}{f_{Sr}} \right]^2 \right\}. \quad (19)$$

由式(19)可知,距离测量不确定度主要受信号光频梳重复频率不确定度 $u(f_{Sr})$ 、空气折射率不确定度 $u(n_g)$ 和相位不确定度 $u(\Delta\phi_m)$ 的影响。

3 基于双光学频率梳的外差干涉测距不确定度分析

设置用于外差干涉测距的双光学光频梳梳齿数量 $M = 15$,其中一个光频梳两个紧邻梳齿之间的宽度 $f_{Sr} = 1$ GHz,当相位测量不确定度 $u(\Delta\phi_m)$ 分别为 0.05° 、 0.10° 、 0.15° 时,距离测量不确定度 $u(l)$ 与第 m 阶合成波长序数的变化情况如图 3 所示。可以发现:

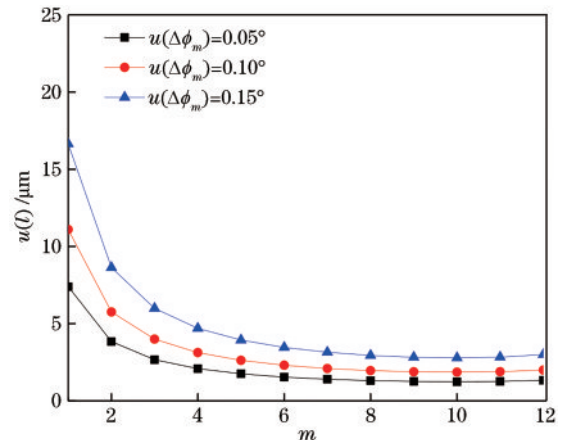


图 3 不同相位测量不确定度时距离测量不确定度随 m 的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of distance measurement uncertainty with m for different phase measurement uncertainty

距离测量不确定度随着合成波长阶数的增大而减小;在同一阶数的合成波长处,测量相位不确定度增大会导致距离测量不确定度增大,该结论与文献[18]中的结论一致。

假设测量相位不确定度 $u(\Delta\phi_m)$ 恒定为 0.10° , 双光频梳两个紧邻梳齿之间的宽度 $f_{sr}=0.5\text{ GHz}$ 、 1.0 GHz 、 1.5 GHz 时,距离测量不确定度与合成波长阶数 m 的变化曲线如图 4 所示。可以发现,随着合成波长阶数的增加,距离测量不确定度逐渐减小,在同一阶数的合成波长时,重复频率变小会导致距离测量不确定度增大。

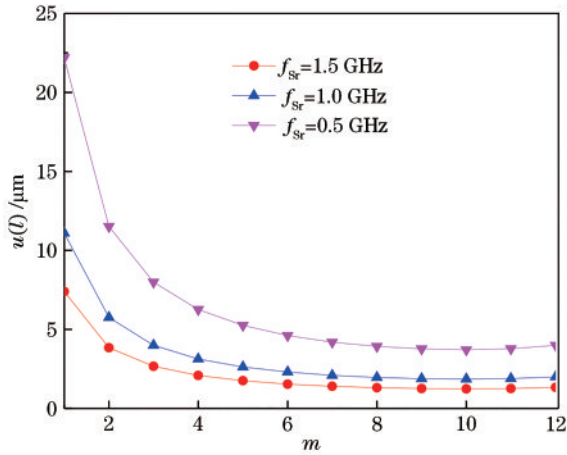


图 4 不同重复频率时距离测量不确定度随 m 的变化曲线
Fig. 4 Variation curve of distance measurement uncertainty with m at different repetition frequencies

将信号光频梳每两个紧邻梳齿之间的宽度 f_{sr} 设为 1.0 GHz , 不同待测距离下距离测量不确定度随信号光频率梳重复频率不确定度的变化关系如图 5 所示。可以发现,距离测量不确定度随着待测距离和重复频率相对不确定度的增加而增大。

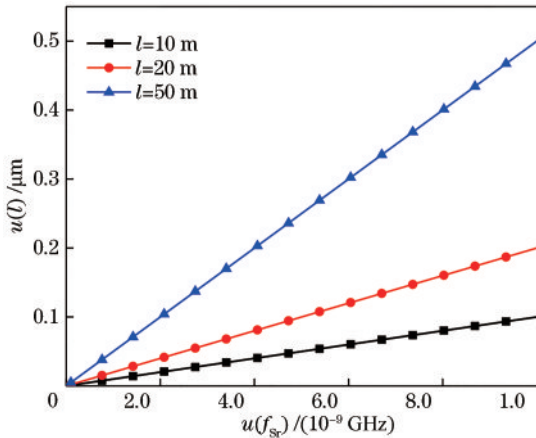


图 5 不同待测距离下距离测量不确定度随信号光频率梳重复频率不确定度的变化曲线
Fig. 5 Variation curve of uncertainty of distance measurement with uncertainty of repetition frequency of signal optical frequency comb under different distances to be measured

使用传统光学频率梳进行距离测量时,测量结果的干涉信号频率峰值和相位测量误差都会影响到绝对距离测量准确性。基于双频外差梳齿的激光干涉测量能在解决传统梳齿不能产生多尺度合成波长问题的同时提高测量精度。将双光频梳作为激光源时,中心频率不变,梳齿间距略有不同,从而将被测距离信息转换为高精度的可测梳状相位信息,同时从多个梳状光谱中产生粗测和精测的组合波长。将多梳测距信息进行融合,实现数十米范围内微尺度不确定度的测距。

图 6 为合成波长不同时,距离测量不确定度随相位测量不确定度的变化曲线。可以发现,距离测量不确定度会随相位测量不确定度的增大而增大,精测合成波长的增大也会导致距离测量不确定度的增大。此外,距离测量不确定度与相位测量不确定度、精测合成波长成正比。

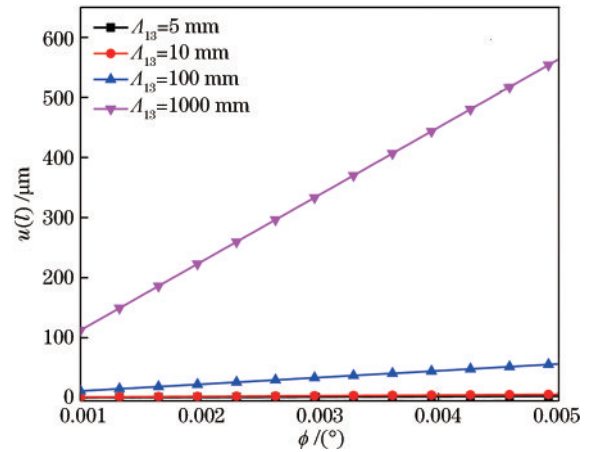


图 6 精细合成波长不同时距离测量不确定度随相位测量不确定度的变化曲线
Fig. 6 Variation curve of the distance measurement uncertainty with the phase measurement uncertainty when different fine synthetic wavelengths

传统光学频率梳的干涉测距法和双光学频率梳外差干涉测距法的距离测量不确定度如图 7 所示。可以发现:在同一合成波长阶数条件下,相比传统光学频率梳干涉测距法,双光学频率梳外差干涉测距法对距离测量不确定度敏感度较小;随着合成波长阶数的增加,传统频率梳干涉测距法在合成波长阶数为 12 时距离测量不确定度 $u(l)$ 最小可达 $2.65\text{ }\mu\text{m}$, 双光学频率梳外差干涉测距法在合成波长阶数为 10 时距离测量不确定度 $u(l)$ 最小可达 $1.85\text{ }\mu\text{m}$ 。这表明双光学频率梳外差干涉测距法能在一定程度上达到与传统频率梳干涉测距法一致的相位测量误差。

温度对两种方法距离测量不确定度的影响如图 8 所示。可以发现:随着温度的升高,两种方法的距离测量不确定度都表现出降低的趋势;在同一温度条件下,双光学频率梳外差干涉测距法比传统光学频率梳干涉测距法的距离测量不确定度略小,且温度越高,双光学

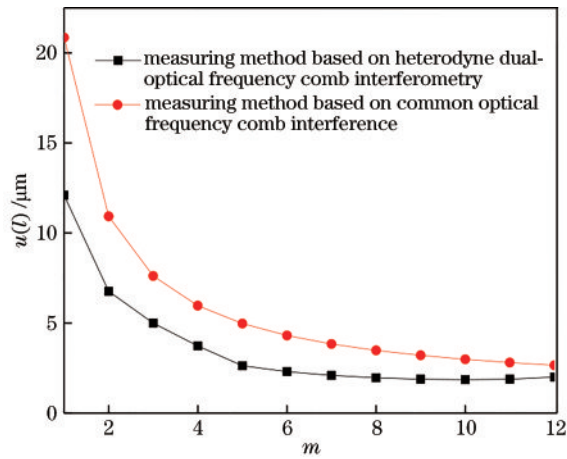


图 7 不同方法的距离测量不确定度随合成波长 m 的变化曲线
Fig. 7 Variation curve of distance measurement uncertainty with synthetic wavelength m for different methods

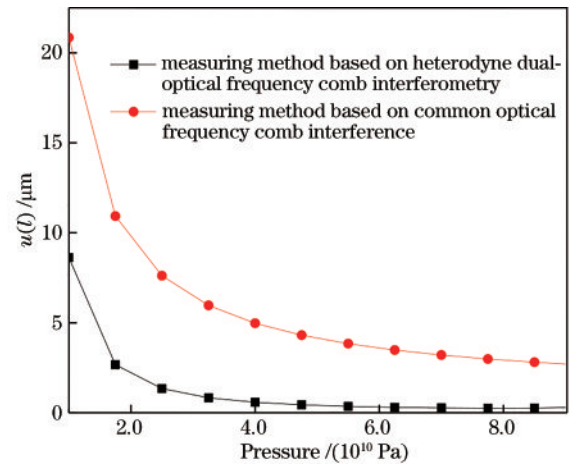


图 9 不同方法距离测量不确定度随压强的变化曲线
Fig. 9 Variation curve of distance measurement uncertainty with pressure for different methods

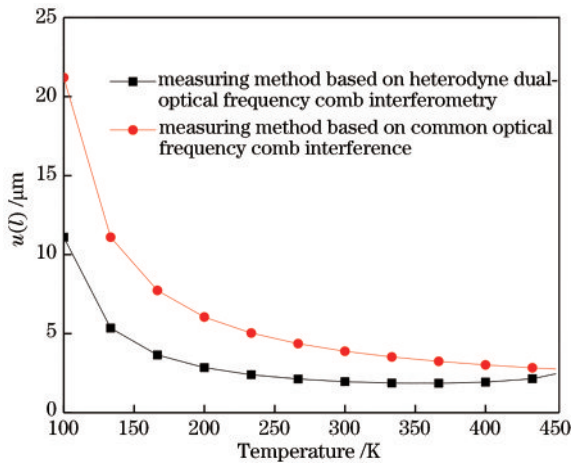


图 8 不同方法距离测量不确定度随温度的变化曲线
Fig. 8 Variation curve of distance measurement uncertainty with temperature for different methods

频率梳外差干涉测距法距离测量不确定度减小的趋势越明显。

压强对两种方法距离测量不确定度的影响如图 9 所示。可以发现:随着压强的增大,两种方法的距离测量不确定度都呈现出下降的趋势;在相同压强条件下,双光学频率梳外差干涉测距法的距离测量不确定度低于传统光学频率梳干涉测距法,且压强越大,双光学频率梳外差干涉测距法与传统光学频率梳干涉测距法距离测量不确定度的偏差越大。

二氧化碳体积分数对两种方法距离测量不确定度的影响如图 10 所示。可以发现:两种距离测量不确定度随着二氧化碳含量的增大都逐渐降低;在二氧化碳含量相同时,双光学频率梳外差干涉测距法的距离测量不确定度小于传统光学频率梳干涉测距法,当二氧化碳每立方米的体积分数增加到 0.75%~0.80% 时,两种方法的距离测量不确定度逐渐趋于一致。

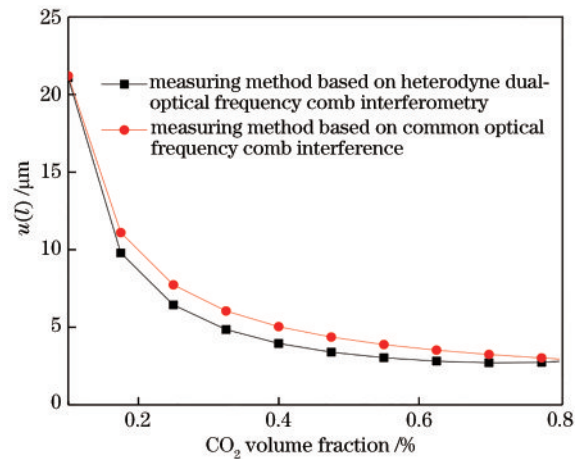


图 10 不同方法测量不确定度随二氧化碳体积分数的变化曲线
Fig. 10 Variation curve of measurement uncertainty with carbon dioxide volume fraction by different methods

4 结 论

基于目前光学频率梳多波长干涉测距方法存在测量精度易受干涉信号信噪比和光强波动影响等问题,分析了双光学频率梳的激光外差干涉测距法中使用的多波长合成和多梳齿信息融合以及影响距离测量不确定度的因素。实验结果表明:距离测量不确定度随合成波长阶数的增加而减小,待测距离的增大和信号光学频率梳重复频率相对不确定度的增大都会导致距离测量不确定度的增大;双光学频率梳外差干涉测距法对相位测量误差有一定的抑制能力;随着温度的增加,压强的增大、二氧化碳含量的升高,距离测量不确定度会随之减小。温度越高,压强越大,双光学频率梳外差干涉测距法与普通光学频率梳干涉测距法的距离测量不确定度偏差越大。二氧化碳每立方米的体积分数增加到 0.75%~0.80% 时,两种方法的距离测量不确定

度逐渐趋于一致。

参 考 文 献

- [1] 齐炜胤, 尤政, 张高飞, 等. 激光测距技术在空间的应用[J]. 中国航天, 2008(5): 38-42.
Qi W Y, You Z, Zhang G F, et al. Application of laser ranging technology in space[J]. Aerospace China, 2008 (5): 38-42.
- [2] 曹前进. 基于零差干涉相位测量的间距测量与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
Cao Q J. Distance measurement and control with phase measurement in homodyne interferometry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [3] 李伟, 赵黎平. 低轨编队卫星构形保持的模糊 PID 控制[J]. 计算机仿真, 2010, 27(4): 11-16.
Li W, Zhao L P. Fuzzy PID control applied to satellites formation configuration maintenance in low earth orbit[J]. Computer Simulation, 2010, 27(4): 11-16.
- [4] 吕建婷, 曹喜滨, 高岱. 卫星编队飞行的相对姿态控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 9-12.
Lü J T, Cao X B, Gao D. Relative attitude control of satellite formation flying[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 9-12.
- [5] 张赫, 乔川, 匡海鹏. 基于激光测距的机载光电成像系统目标定位[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 8-16.
Zhang H, Qiao C, Kuang H P. Target geo-location based on laser range finder for airborne electro-optical imaging systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 8-16.
- [6] 许贤泽, 翁名杰, 徐逢秋, 等. 正交调制降频相位式激光测距[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 1979-1986.
Xu X Z, Weng M J, Xu F Q, et al. Phase laser ranger based on quadrature modems and frequency reduction[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 1979-1986.
- [7] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(6): 712-716.
- [8] Nagano S, Yoshino T, Kunimori H, et al. Displacement measuring technique for satellite-to-satellite laser interferometer to determine Earth's gravity field[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(12): 2406-2411.
- [9] Pierce R, Leitch J, Stephens M, et al. Intersatellite range monitoring using optical interferometry[J]. Applied Optics, 2008, 47(27): 5007-5019.
- [10] 张新亮, 赵延菁. 微腔光频梳研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823014.
Zhang X L, Zhao Y J. Research progress of microresonator-based optical frequency combs[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823014.
- [11] 吴腾飞, 周强, 林嘉睿, 等. 光频扫描干涉绝对距离测量[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1918002.
Wu T F, Zhou Q, Lin J R, et al. Frequency scanning interferometry absolute distance measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1918002.
- [12] 饶瑞中. 月球激光测距中的关键物理与技术问题[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0112002.
Rao R Z. Discussion on some key physical and technical problems about lunar laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0112002.
- [13] 王国超, 魏春华, 颜树华. 光梳多波长绝对测距的波长选择及非模糊度量程分析[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 121-127.
Wang G C, Wei C H, Yan S H. Wavelength selection and non-ambiguity range analysis for optical comb-referenced multi-wavelength absolute distance measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 121-127.
- [14] Minoshima K, Matsumoto H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser[J]. Applied Optics, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [15] Doloca N R, Meiners-Hagen K, Wedde M, et al. Absolute distance measurement system using a femtosecond laser as a modulator[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(11): 115302.
- [16] Balling P, Kren P, Masika P, et al. Femtosecond frequency comb based distance measurement in air[J]. Optics Express, 2009, 17(11): 9300-9313.
- [17] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [18] 秦鹏, 陈伟, 宋有建, 等. 基于飞秒激光平衡光学互相关的任意长绝对距离测量[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 240601.
Qin P, Chen W, Song Y J, et al. Long range absolute distance measurement based on femtosecond laser balanced optical cross-correlation[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 240601.
- [19] 杨睿韬. 基于外差双光学频率梳的多波长干涉测距方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Yang R T. Study on the multi-wavelength absolute distance measurement based on the heterodyne dual optical frequency combs[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [20] 赵显宇, 曲兴华, 陈嘉伟, 等. 一种基于电光调制光频梳光谱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.