

光梳多波长绝对测距的波长选择及非模糊度量程分析

王国超 魏春华 颜树华

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 飞秒光学频率梳作为精密光学频率标尺,可以用来产生频率稳定度极高的单波长连续激光,利用其多个梳模制备理想的多波长光源用于绝对距离测量具有测量速度快、实时性强、非模糊度量程大、精度高等优点。以多波长测距的基本理论和光梳高频率稳定度为基础,提出了二次合成波长的方法,不仅扩展了非模糊度量程,同时为干涉信号的多波长解调创造了足够的波长间隔条件。结合光梳的波长特点,分析了基于光梳的多波长选择与非模糊度量程的关系,并阐述了具体的选择步骤及波长组合结构。利用小数重合解调算法,在0.01的小数相位测量精度条件下,仿真验证了四波长干涉测距的非模糊度量程为35.636 mm,五波长干涉系统可以达到几百毫米的非模糊度量程,后者相对分辨力的动态量程达到 10^9 量级。

关键词 测量;绝对距离测量;多波长干涉;非模糊度量程;光学频率梳;合成波长

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.0412002

Wavelength Selection and Non-Ambiguity Range Analysis for Optical-Comb-Referenced Multi-Wavelength Absolute Distance Measurement

Wang Guochao Wei Chunhua Yan Shuhua

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract As a precise optical frequency ruler, femtosecond optical frequency comb can be used to generate continuous-wave laser with ultrahigh frequency stability. Absolute distance measurement by multi-wavelength interferometry, making use of multiple wavelengths referenced to comb modes, has advantages of fast measuring speed, real time, large non-ambiguity range and high precision. Based on the theory of multi-wavelength interferometry and high frequency stability of optical comb, the second-order synthetic wavelength method is proposed to extend the non-ambiguity range and keep an enough wavelength gap for the wavelength demultiplexing of interference signals. Combined with characteristics of wavelengths in the optical comb, relationship between non-ambiguity range and wavelengths is analyzed, and selection procedure is elaborated. Simulation is performed with a fractional coincidence demodulation algorithm. The result shows that four wavelengths interferometry can achieve a non-ambiguity range of 35.636 mm with fractional phase accuracy of 0.01, and in the case of five wavelengths that range can be up to several hundred millimeters. The latter range corresponds to a dynamic range of 10^9 level, relative to measurement resolution.

Key words measurement; absolute distance measurement; multi-wavelength interferometry; non-ambiguity range; optical frequency comb; synthetic wavelength

OCIS codes 120.3180; 120.3930; 140.3600; 280.3400

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(51275523)、湖南省研究生科研创新项目(CX2012B015)、国防科学技术大学优秀研究生创新项目(B120305)

作者简介: 王国超(1985—),男,博士研究生,主要从事光电传感及光学精密测量方面的研究。

E-mail: wgc.19850414@163.com

导师简介: 颜树华(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光电传感及光学精密测量方面的研究。

E-mail: yanshuhua996@163.com(通信联系人)

1 引 言

利用光学干涉技术实现长度和距离的精密测量已成为工业制造和纳米科学研究领域不可或缺的一项重要手段。尽管基于外差和零差干涉理论的激光干涉仪已发展成熟并得到了广泛的应用,但由于其仅仅具备半波长的非模糊度量程(NAR)而只能用于导轨引导下的增量式位移测量,难以实现绝对距离测量,这在很大程度上制约了激光干涉仪的应用空间^[1-2]。如何利用激光干涉仪进行绝对测距一直以来都是精密测量领域的研究热点,比较早的研究是在单波长激光干涉仪基础上,利用双波长干涉来扩展其 NAR,从而使绝对测距的范围增加到几十微米甚至上百微米^[3-4];之后,随着激光光源技术的发展,产生了扫描频率干涉法、合成波长法、参考干涉仪法及色散干涉法等光学干涉方法来实现绝对距离测量^[5-9]。这些方法尽管满足了一定程度的绝对测距要求,但由于高频率稳定度的多波长光源不易制备以及频率扫描带来非实时测量等限制,均难以同时达到理想的量程、精度和快速测量的要求。直到 21 世纪初,飞秒光学频率梳(简称光梳)的出现,不仅实现了微波频标与光学频率的直接连接,极大地促进了时间频率及其相关物理量的精密测量^[10-12],同时也为大尺寸绝对距离测量提供了一系列新的技术手段和解决途径,例如基于光梳的多波长干涉测距法^[13-14]、光谱干涉法^[15-16]、基于时间飞行原理的非干涉测距法^[17-18]、合成波长的测距法^[19]和双光梳干涉法等^[20-21]。以上各种方法都有自己的优势和潜在的应用价值,基于光梳的绝对测距技术创新性地解决了大量程和高精度的突出矛盾,在大尺寸装备制造和空间精密测距任务等领域具有重要的应用前景^[22]。

利用基于光梳稳频的多波长干涉技术进行绝对测距不仅保留了单波长干涉测距的分辨力和精度,而且在满足较大 NAR 的前提下,可以实现快速、动态、实时测量,而不需要进行频率或光路扫描^[13-14,23-25]。然而,要利用多波长进行大量程绝对测距,首先需要解决波长的频率稳定度问题,这是通过组成合成波长链来拓展 NAR 的前提。利用光梳作为频率参考将多波长激光锁定在目标梳齿频率上,最终能将每一个连续激光波长的相对频率稳定度提高到 10^{-12} 量级,能很好地满足多波长干涉的光源要求^[26-27]。如何围绕多波长干涉方法选择波长,以最少的波长组合高效地满足测距要求是实现多波长绝对测距的另一关键问题。文献^[28-29]提出了

级数合成波长链的方法来扩展 NAR,并在考虑相位测量精度的同时得到了整数干涉条纹的一般表达式,但因为其只用到一次合成波长,得到的量程有限,此外也没有具体涉及到波长解调等问题。本文从基于光梳的多波长光源出发,提出了利用二次合成波长的方法来扩展 NAR 和保证多波长解调的波长间隔,根据实际情况分析和阐述了波长选择的非唯一性、波长选择具体过程及其与 NAR 的关系,并在选定的波长组合下仿真验证了多波长干涉测距的可行性。

2 多波长测距基本理论

多波长干涉法测距是在双波长干涉的理论基础上,进一步将合成波长的思想扩展到多波长的情况,进而组成多级合成波长链,并根据各级合成波长对应的小数条纹,从最高级合成波长(对应各自的 NAR)开始,利用各波长的小数条纹信息逐级求解被测长度使之逼近真值。每增加一个测量波长,整个测距系统的 NAR 将有希望提高 $1\sim 2$ 个数量级。图 1 为多波长干涉绝对测距 NAR 与波长的关系示意图,图中 Δe_{sw} 为合成小数相位。

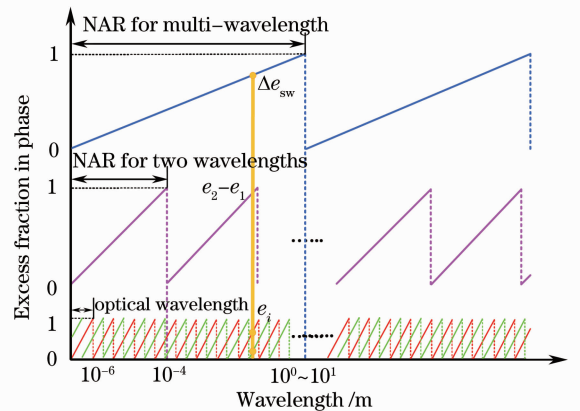


图 1 多波长干涉 NAR 拓展示意图

Fig. 1 Schematic diagram of extending NAR of multi-wavelength interferometry

多波长干涉测距条纹解调是在小数同余的代数理论上发展起来的,也可称作小数重合法。该方法由贝诺瓦首次干涉度量学中使用,紧接着 Tilford^[30]对此作了进一步的发展,即在测量相位获取各波长干涉条纹小数的前提下,并结合已知波长,通过数学反演计算获取干涉波长的整数条纹信息。假设利用 n 个已知波长进行干涉测距,由光学干涉测距基本理论可以建立方程组:

$$\begin{cases} L = \frac{\lambda_1}{2}(m_1 + e_1) \\ L = \frac{\lambda_2}{2}(m_2 + e_2) \\ \vdots \\ L = \frac{\lambda_n}{2}(m_n + e_n) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 L 为几何长度, λ_i 为各个波长, m_i 为整数条纹, e_i 为相位计探测到的各个波长的小数条纹信息。为了便于描述问题, 方程组中用到真空波长, 而非空气波长, 在实际的测距过程中需要用到 Ciddor 或 Edlen 公式进行转化。由于(1)式的方程组中未知数的个数始终比方程式的个数多 1, 所以在已知波长和小数相位的情况下, 依然无法唯一地确定长度 L 。但是, 如果考虑到 m_i 必须取整数, 在一定的量程范围和允许的小数相位测量精度内, 求出整数条纹的唯一解是有可能的, 求解示意图如图 2 所示。并且如果方程组存在解, 那么它的解必有无穷多个。这无穷多个解组成长度坐标上的一个等差序列, 其公差代表各波长干涉条纹相位重合的最小空间周期, 该最小空间周期等效为最长合成波长, 也决定了多波长干涉测距 NAR 的大小。这就是小数重合法多波长干涉测距的基本思想。

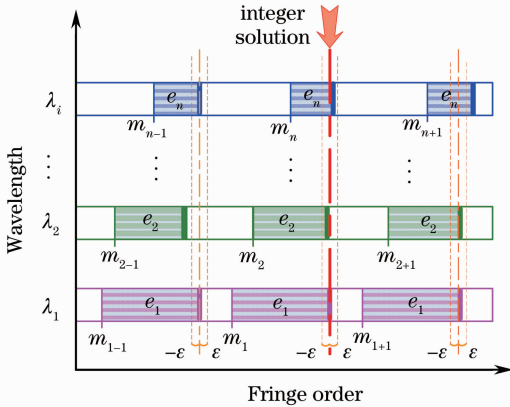


图 2 多波长干涉测距条纹解调原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fringe demodulation for multi-wavelength interferometry

3 多波长的选择

3.1 基于光梳的多波长介绍

利用光梳作为主激光参考光源产生频率稳定度相当的单频激光光源, 是光梳可作为精密光学频率标尺的应用之一。利用拍频锁相法或光束注入锁定法将可调谐激光器的频率锁定到光梳某一根梳模谱线上, 这样所产生的连续波激光可以达到与光梳重复

频率相当的频率稳定度, 平均时间为 10 s 的相对 Allan 标准差达到 10^{-12} 量级^[27,31]。已知光梳的重复频率 f_r , 载波包络频移 f_o , 谱线频率表达式为 $f_k = kf_r + f_o$, 那么通过波长计就能确定可调谐激光器所对应的光梳谱线的准确值^[32]。为了达到米量级的 NAR, 基于光梳的多波长干涉必须利用 5 个波长, 其波长示意图如图 3 所示。图中波长 λ_i 对应的频率为 $f_{\lambda_i} = k_i f_r + f_o$, 同时波长与频率通过关系式 $\lambda_i f_{\lambda_i} = c$ 联系起来, 因此有 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4 < \lambda_5$ 。

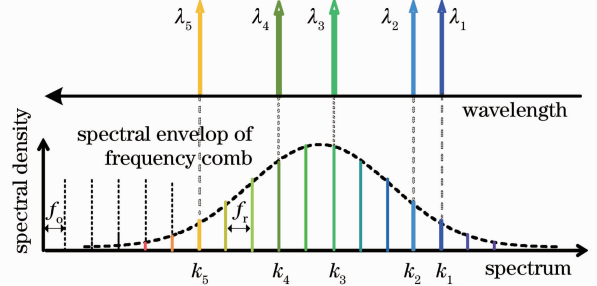


图 3 基于光梳的多波长示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multiple wavelengths based on optical comb

以双波长干涉 λ_1 、 λ_2 为例, 其组成的合成波长 λ_{12} 为一次合成波长, 可表示为

$$\lambda_{12} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| = c / |f_{\lambda_2} - f_{\lambda_1}| = c / [(k_2 - k_1) f_r]. \quad (2)$$

那么对应的小数合成相位为 $e_1 - e_2$, 双波长的测距 NAR 为 $\lambda_{12}/2$ 。将上式拓展到光梳多波长的情况, 则有

$$\lambda_{\Lambda} = c / \left| \sum \alpha_i f_{\lambda_i} \right| = c / \left[\left| \sum \alpha_i k_i \right| f_r \right], \quad (3)$$

式中 λ_{Λ} 为合成波长, $\left| \sum \alpha_i k_i \right|$ 为被锁定到的光梳梳模的线性组合, α_i 为整数系数, 此时的小数相位 $\Delta e_{sw} = \sum \alpha_i e_i$ 。因此, 一旦多波长各个波长频率锁定后, 不管是一次合成波长, 还是多次合成波长的波长不确定度理论上只与光梳的重复频率的频率稳定度相关, 因此具有与光梳同量级的相对频率稳定度。

3.2 多波长干涉的级间融合

为了根据实际的测量条件进行波长选择, 必须利用等效合成波长的方法组成合成波长链, 并对各级合成波长进行合理分配。需要注意的是, 这里的级次主要是从在组成合成波长链中的位次角度说的。合成波长链的组合方式和逐级精化的选择很多, 但总的原则是在实现各级过渡和融合的前提下, 提高测量精度和绝对测距的 NAR。图 1 给出了多波长干涉绝对测距 NAR 与波长的关系示意图, 实

际上也可以用在合成波长链的分析上,图 1 中的 NAR 对应各级合成波长的 1/2。在此比较上,不妨假设第 i 级的 NAR 为 R_i ,该级小数条纹精度对应的测量不确定度为 δ_{R_i} ,其下一级的 NAR 和 NAR 不确定度分别为 R_{i-1} 、 $U_{R_{i-1}}$,可以建立如下关系:

$$m_{i-1} = \begin{cases} \text{int} \left[\frac{L + \delta_{R_i}}{R_{i-1} - U_{R_{i-1}}} \right] = m_{i-1_max} \\ \text{int} \left[\frac{L - \delta_{R_i}}{R_{i-1} + U_{R_{i-1}}} \right] = m_{i-1_min} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $\text{int}[\]$ 为取整函数, L 为第 i 级测量结果, m_{i-1} 为下一级 NAR 的整数级次, δ_{R_i} 、 $U_{R_{i-1}}$ 均为正数。为了建立级间过渡关系,必须唯一地确定 m_{i-1} 的取值,那么必须满足

$$\frac{L + \delta_{R_i}}{R_{i-1} - U_{R_{i-1}}} - \frac{L - \delta_{R_i}}{R_{i-1} + U_{R_{i-1}}} = \frac{2LU_{R_{i-1}} + 2R_{i-1}\delta_{R_i}}{R_{i-1}^2 - U_{R_{i-1}}^2} < 1. \quad (5)$$

由于基于光梳的多波长系统的波长频率稳定度能达到 10^{-12} 量级,因此其合成波长的不确定度 $U_{R_{i-1}}$ 与 NAR 的比值 $U_{R_{i-1}}/R_{i-1}$ 也具有相当的数量级,因此(5)式可以简化为

$$\delta_{R_i} < \frac{1}{2}R_{i-1}. \quad (6)$$

这便是基于光梳多波长干涉的级间融合条件,相比于之前的多波长光源系统,基于光梳系统的多波长级间融合更加稳定可靠,且(6)式是级间融合的唯一条件。

3.3 多波长选择的步骤

进行多波长选择需要考虑光梳波长带宽、干涉后的波长可解调间距和小数条纹解调(相位测量)精度:光梳波长带宽决定了能实现的最小合成波长;干涉后波长解调带宽决定了所选波长之间的最小间隔;相位测量精度决定了级间融合能否顺利实行。如果要实现多波长干涉的最大 NAR,以上三个要素又会紧密联系在一起。

1) 最小和最大波长的选择

进行波长选择首先要确定的两个波长是最小波长 λ_1 和最大波长 λ_5 ,由光梳波长带宽和相位测量精度综合决定。首先讨论波长带宽,由于所用光梳的波长范围为 1520~1570 nm,因此锁定到光梳的波长的最大间隔为 50 nm。这里定义第 i 级合成波长相对上一级波长的缩放因子为 β_i ,则由带宽决定的最小合成波长为

$$\lambda_{15} = \lambda_1 \lambda_5 / |\lambda_1 - \lambda_5| = \beta_1 \lambda_1, \quad (7)$$

此时的缩放因子为 $\beta_1 = \lambda_5 / |\lambda_1 - \lambda_5|$ 。相位测量精

度同时也决定了第一级合成波长满足与单波长融合的最小间隔。假设每个波长具有相同的相位测量精度 δ_p ,则由级间融合公式可得到

$$\delta_{R_1} = \frac{\lambda_1 \lambda_5}{2|\lambda_1 - \lambda_5|} U_p < \frac{1}{2} \frac{\lambda_1}{2}, \quad (8)$$

式中 U_p 为相位不确定度,考虑正态分布 $\pm 3\delta$ 置信区间则

$$U_p = 6 \sqrt{U_{e_1}^2 + U_{e_5}^2} = 6\sqrt{2}\delta_p. \quad (9)$$

则(9)式可改写为

$$\beta_1 \delta_p < \frac{\sqrt{2}}{24}. \quad (10)$$

考虑 δ_p 以外差相位测量 1/1000 测量精度为参考,根据(10)式缩放因子 β_1 不能超过 58.925,该缩放因子限定对应的波长最小间隔约为 26.40 nm,因此光梳带宽和相位测量精度决定的最短和最长波长的间隔区间为(26.4 nm, 40 nm),为保证测量的可靠性和足够的 NAR,应尽量选用中间值,选择 $\Delta\lambda_{15} \approx 34$ nm,此时的缩放因子 $\beta_1 \approx 46$,合成波长为 $(70 \pm 1.5) \mu\text{m}$ 。这样的波长间隔在光梳带宽范围内有很大的自由选择空间,考虑到可调谐激光器的波长范围,系统将最大和最小波长分别选定在 1564 nm 和 1530 nm 附近。实际上,由于已经考虑了阈值空间,因此增加或减少波长间隔 1~2 nm 不会对系统造成大的影响。

2) 第三波长的选择

在第一级合成波长的基础上,第二级合成波长可以采用相同的缩放因子,即选择 $\beta_2 = \beta_1$,如果采用双波长 λ_1 和 λ_2 ,首先根据公式,其级间融合条件肯定是满足的,但此时由于需要得到大的合成波长,波长间隔会变窄。所选波长间隔是否利于实现波长解调成为考虑从的重点。此时的合成波长 λ_{12} 可表示为

$$\lambda_{12} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| = \beta_2 \lambda_1 \lambda_5 / |\lambda_1 - \lambda_5| = \beta_2^2 \lambda_1. \quad (11)$$

由此得到的波长间隔约为 0.727 nm,对应频率间隔为 90~100 GHz,这个波长间隔是完全可以光学滤波从而分别解调出单波长 λ_1 和 λ_2 的干涉成分的。通过第三个波长的选择,此时的合成波长约为 3.2 mm,测距 NAR 约为 1.6 mm。

3) 第四波长的选择

如果按照选择波长 λ_1 的方法来选择第四波长,此时要求波长间隔约为 0.016 nm,因此利用光学滤波的方法是难以波长解调。采用偏振光学是实现波长解调的另一个手段,但是线偏振光的偏振混叠又会带来相位测量的非线性误差,这个误差对于多波

长干涉对相位测量精度要求高的背景下是不容忽视的。因此,这里提出二次合成波长的方法得到第三级合成波长:通过两个一次合成波长进行再次合成,实质是采取三个波长或四个波长来二次组成合成波长。如图4所示,第四波长的位置有四种选择,且分别具有比较窄的可选范围: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4$ 和 λ_5 ; λ_1, λ_2 和 λ_4 ; λ_2, λ_4 和 λ_5 ; λ_1, λ_4 和 λ_5 。不管选择哪一种组合,都会降低小数合成相位的测量精度,理论上讲它们具有相同的小数测量精度。因此,为了讨论方便,也为了便于波长解调,这里只介绍 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4$ 和 λ_5 的组合情况。

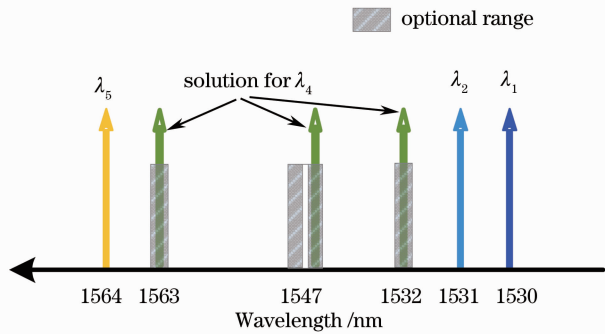


图4 第四波长的选择区间

Fig. 4 Optional section for the fourth wavelength

此时的第三级合成波长实际上是由两个一次合成波长 λ_{12} 和 λ_{45} 来再次合成:

$$\lambda_{1245} = \frac{\lambda_{12}\lambda_{45}}{|\lambda_{12} - \lambda_{45}|}, \quad (12)$$

因此考虑到级间融合条件和小数相位测量精度的降低,则有

$$\frac{\lambda_{12}\lambda_{45}}{2|\lambda_{12} - \lambda_{45}|} U_p < \frac{1}{2} \frac{\lambda_{12}}{2}. \quad (13)$$

由于小数合成相位可表示为 $\Delta e_{sw} = e_1 - e_2 - e_4 + e_5$, 此时 U_p 的相位不确定度增加到原来的2倍,那么缩放因子 β_3 也必须降低才能满足级间融合条件。选择缩放因子相应降低了一半, $\beta_3 = \beta_1/2$, 显然是可以满足条件的。那么此时的波长关系满足

$$\frac{\beta_1}{2} = \frac{\lambda_{45}}{|\lambda_{12} - \lambda_{45}|}, \quad (14)$$

前面已经确立了缩放因子的范围,取 $\beta_1 \approx 46$, 则 $\lambda_{45} \approx \lambda_{12} 23/24$ 或 $\lambda_{45} \approx \lambda_{12} 23/22$, 意味着 λ_4 与 λ_5 之间的间隔非常接近 λ_1 与 λ_2 的间隔,此时才能合成所需要的目标波长。由合成波长公式计算可得此时的波长位置在 1563 nm 附近,与距离最近的波长 λ_5 距离约为 0.758 nm 或 0.696 nm,完全符合波长解调的间隔要求。

4) 波长选择的组合结构

通过四个波长的组合,一般而言,多波长干涉系统的 NAR 可以达到几十毫米甚至上百毫米,配合其他的粗测手段,基本已经能满足大多数精密测量的需求。如果再增加一个波长,利用五波长就能将测量 NAR 扩展到米量级,再结合微波测距,可以很好地应用于大量程空间精密测距场合。与第四波长选择类似,第五波长的选择也必须利用多个波长进行二次合成,而且根据前四个波长的位置,其可选的区间更多,这里不再详细说明。图5就多波长选择的基本规律和结构进行了概括和总结,并给出了系统采取的具体波长选择方案及所对应的每一级合成波长数值(斜体)。需要说明的是,利用基于光梳多波长进行干涉测距,由(3)式可知,这些多波长的理论最大合成波长为 c/f_r , 以 100 MHz 的重复频率计算,多波长最大实时测距接近 3 m。因此,当多波长测距量程接近该值时,系统不能通过产生更多的波长来扩大测量的 NAR,而可以考虑利用声光调制或电光调制等手段去合成微波波长,从而达到更大量程的目的。

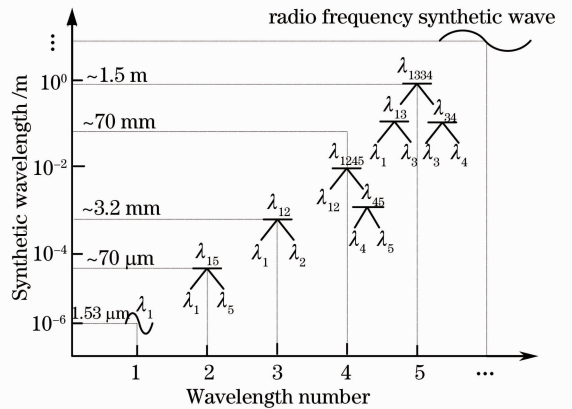


图5 合成波长链结构图

Fig. 5 Structure diagram of synthetic wavelength chain

4 数值仿真结果

在上述理论分析的基础上,利用数值工具进行仿真分析。首先选定最小波长 1530.4 nm,然后以 $\pm 3\delta$ 置信区间的相位测量水平所确定的级间缩放因子为 46,由一次合成波长公式依次选定第二波长(最长波长)和第三波长,那么第四波长的选择区域仿真结果如图6所示:第四波长拥有多个可选择的位置区间,并且这些区域在组成合成波长上是等效的,图中根据其所选位置也给出了对应的第三级合成波长大小,考虑相位测量精度的合成波长一般在 10~100 mm 范围内。

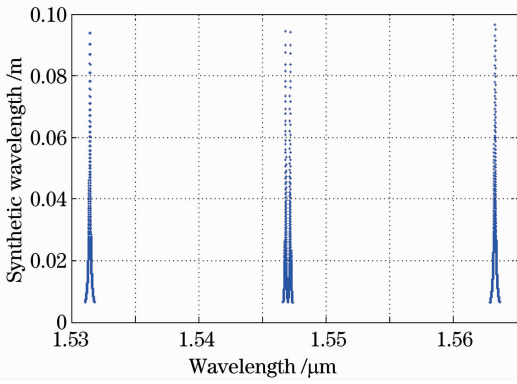


图 6 第四波长可选区域的仿真结果

Fig. 6 Simulation result of selection for the fourth wavelength

基于具体的四波长组合 1530.33414、1531.09069、1563.84464、1564.66900 nm, 通过仿真程序, 设定目标距离, 并考虑大气折射率扰动及相位噪声, 在设定相位不确定阈值为 0.01 的条件下, 利用小数重合算法解调四波长整数干涉条纹, 计算得到的绝对距离结果如图 7 所示, 横坐标为设定距离, 纵坐标为仿真结果, 在 0.001 的相位分辨力条件下, 测距分辨率和残余误差都达到了纳米量级。当距离设定值为 36 mm 时, 由于此时目标距离大于四波长 NAR, 此时的仿真反演结果为 0.3640612 mm, 假如不考虑此时的残余误差, 那么此时的 NAR 为 $(36 - 0.3640612)$ mm。图中右边纵坐标为仿真结果的残余误差, 主要是由相位噪声和解调算法的相位设定阈值带来的, 横坐标为 36 mm 的残余误差假设为零, 后面测量点的残余误差是以 3 mm 的给定步进距离为参考而得到的。

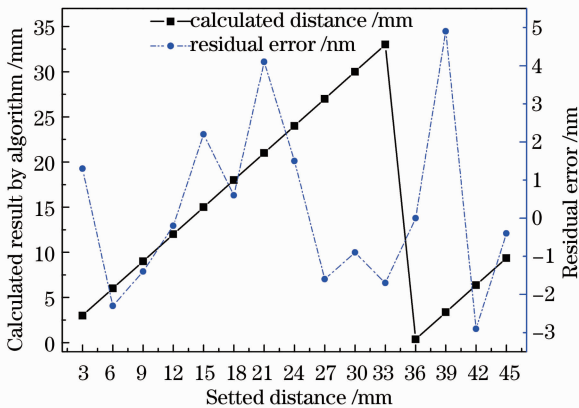


图 7 四波长绝对测距仿真结果

Fig. 7 Simulation result for absolute distance measurement with four wavelengths

在上述四波长干涉基础上, 选取 1547.31351 nm 附近的光梳梳模作为第五个波长 λ_5 , 由 λ_1 、 λ_3 和 λ_5 组成第四级合成波长。通过与得到四波长 NAR 类似

的相同仿真过程得到五波长 NAR 的结果如图 8 所示, 横坐标对应的是 λ_5 锁定到的光梳梳模。从图中可知, 此时能用于合成波长的光梳梳模个数有十几个, 但是由于相位测量精度的限制, 具体情况下的有效合成波长最大值只能为 1.6 m, 对应 0.8 m NAR, 考虑到纳米量级的测距分辨力, 测距量程和分辨力的比值这一动态量程达到 10^9 量级。而且中间梳模 1937506 对应的 NAR 相比其他梳模可视为无穷大, 要想进一步使 NAR 达到 1.5 m 或更大, 须再增加一个波长或利用微波频率技术获取更长的合成波长。

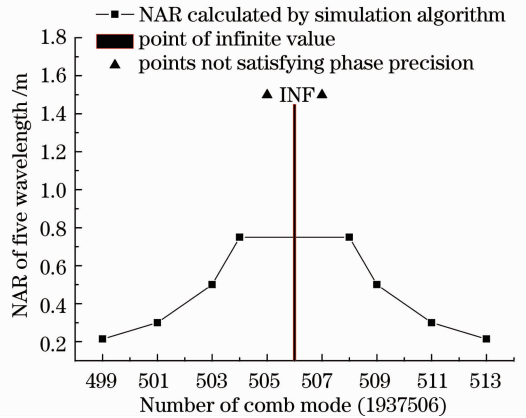


图 8 λ_5 锁定到的梳模对应的测距 NAR

Fig. 8 Distance NAR for different comb modes that λ_5 is locked to

5 结 论

在利用光梳特殊的频域特性能制备高频率稳定性的多波长连续波基础上, 综合考虑了光梳带宽、波长可解调间距和相位测量精度等因素来进行波长选择和组合, 从而实现可靠的合成波长链, 扩展绝对测距的非模糊度量程。本文在阐述波长选择过程的同时, 分析了波长选择和非模糊度量程的关系。在相位测量不确定度为 0.01 (对应 $\pm 3\delta$ 置信区间) 的情况下, 通过选择合适缩放因子, 分析得到了可行的波长组合及其可选择区间, 实验仿真结果说明了波长选择及组合的非唯一性。由所选波长组合, 结合小数重合解调算法, 仿真验证四波长干涉的非模糊度量程能达到 35.636 mm, 五波长干涉的非模糊度量程能达到几百毫米, 此时相对距离分辨力的动态量程达到 10^9 量级。值得一提的是, 上述波长选择是以真空波长为背景, 而实际的非模糊度量程是由空气波长决定的, 那么空气折射率的变化势必会对非模糊度量程大小产生影响, 其大小需要结合影响空

气折射率变化的具体参数的变化程度来进行全面分析。经初步计算,在一般的实验室条件下,折射率变化对四波长干涉的非模糊度量程的改变在 10^{-7} m 量级范围内,因此不会给测量系统造成大的影响。

参 考 文 献

- 1 N Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry [J]. *Meas Sci & Technol*, 1993, 4(9): 907—926.
- 2 G N Peggs, A Yacoot. A review of recent work in sub-nanometre displacement measurement using optical and X-ray interferometry [J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2002, 360(1794): 953—968.
- 3 R Dandliker, R Thalmann, D Prongue. Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection [J]. *Opt Lett*, 1988, 13(5): 339—341.
- 4 Zhao Yang, Zhou Ting, Li Dachen. Study on a dual-wavelength absolute distance heterodyne interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(4): 1274—1278.
赵洋,周挺,李达成.双波长绝对距离外差干涉仪的研究[J].*光学学报*, 1999, 19(4): 1274—1278.
- 5 X Dai, K Seta. High-accuracy absolute distance measurement by means of wavelength scanning heterodyne interferometry [J]. *Meas Sci & Technol*, 1998, 9(7): 1031—1035.
- 6 K H Bechstein, W Fuchs. Absolute interferometric distance measurement applying a variable synthetic wavelength [J]. *J Opt*, 1998, 29(3): 179—182.
- 7 Li Zhidong, Jiang Yuesong, Sang Feng, *et al.*. Interferometry for absolute distance measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0314001.
李志栋,江月松,桑峰,等.频率扫描干涉法绝对测距中运动误差的补偿研究[J].*光学学报*, 2011, 31(3): 0314001.
- 8 J Thiel, T Pfeifer, M Hartmann. Interferometric measurement of absolute distances of up to 40 m [J]. *Measurement*, 1995, 16(1): 1—6.
- 9 Petr Hlubina. Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements [J]. *Opt Commun*, 2002, 212(1—3): 65—70.
- 10 John L Hall. Learning from the time and length redefinitions, and the metre demotion [J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2011, 369(1953): 4090—4108.
- 11 Wei Zhiyi. The 2005 Nobel prize in physics and optical frequency comb techniques [J]. *Physics*, 2006, 35(3): 213—217.
魏志义. 2005年诺贝尔物理学奖与光学频率梳[J].*物理*, 2006, 35(3): 213—217.
- 12 Wu Xuejian, Li Yanwei, Hao Yun, *et al.*. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001.
吴学健,李岩尉,吴赞,等.飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J].*激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030001.
- 13 Yves Salvadé, Nicolas Schuhler, Samuel Lévêque, *et al.*. High-accuracy absolute distance measurement using frequency comb referenced multiwavelength source [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(14): 2715—2720.
- 14 Sangwon Hyun, Young-Jin Kim, Yunseok Kim, *et al.*. Absolute length measurement with the frequency comb of a femtosecond laser [J]. *Meas Sci & Technol*, 2009, 20(9): 095302.
- 15 Ki-Nam Joo, Seung-Woo Kim. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. *Opt Express*, 2006, 14(13): 5954—5960.
- 16 S A van den Berg, S T Persijn, G J P Kok, *et al.*. Many-wavelength interferometry with thousands of lasers for absolute distance measurement [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108(18): 183901.
- 17 J Ye. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(10): 1153—1155.
- 18 J Lee, Y Kim, K Lee, *et al.*. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses [J]. *Nat Photon*, 2010, 4(10): 716—720.
- 19 K Minoshima, H Matsumoto. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(30): 5512—5517.
- 20 I Coddington, W C Swann, L Nenadovic, *et al.*. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. *Nat Photon*, 2009, 3(6): 351—356.
- 21 Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.*. Analysis of an innovative method for large-scale high-precision absolute distance measurement based on multi-heterodyne interference of dual optical frequency combs [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(7): 070601.
王国超,颜树华,杨俊,等.一种双光梳多外差大尺寸高精度绝对测距新方法的理论分析[J].*物理学报*, 2013, 62(7): 070601.
- 22 Seung-Woo Kim. Combs rule [J]. *Nat Photon*, 2009, 3(6): 313—314.
- 23 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin. Study on a new kind of multi-wavelength absolute distance interferometer [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(5): 681—683.
梁晶,龙兴武,张斌.一种新型多波长绝对距离干涉测量系统的研究[J].*光学技术*, 2008, 34(5): 681—683.
- 24 K Meiners-Hagen, R Schödel, F Pollinger, *et al.*. Multi-wavelength interferometry for length measurements using diode lasers [J]. *Meas Sci Rev*, 2009, 9(1): 16—26.
- 25 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin. Absolute distance measurement by using 117 μm synthetic wavelength [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2947—2951.
梁晶,龙兴武,张斌.用117 μm 合成波长实现绝对距离干涉测量[J].*光学学报*, 2010, 30(10): 2947—2951.
- 26 Zhang Jitao, Wu Xuejian, Li Yan, *et al.*. Method for improving the accuracy of step height measurement based on optical frequency comb [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(10): 100601.
张继涛,吴学健,李岩,等.利用光频梳提高台阶高度测量准确度的方法[J].*物理学报*, 2012, 61(10): 100601.
- 27 Young-Jin Kim, Yunseok Kim, Byung Jae Chun, *et al.*. All-fiber-based optical frequency generation from an Er-doped fiber femtosecond laser [J]. *Opt Express*, 2009, 17(13): 10939—10945.
- 28 C E Towers, D P Towers, J D C Jones. Optimum frequency selection in multi-frequency interferometry [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(11): 887—889.
- 29 F Konstantinos, David P Towers, Catherine E Towers. Multiwavelength interferometry: extended range metrology [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(7): 950—952.
- 30 C R Tilford. Analytical procedure for determining lengths from fractional fringes [J]. *Appl Opt*, 1977, 16(7): 1857—1860.
- 31 Erik Benkler, Felix Rohde, Harald R Telle. Robust interferometric frequency lock between cw lasers and optical frequency combs [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 555—557.
- 32 Jun Ye, Steven T Cundiff. *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications* [M]. Norwell: Springer, 2005. 24—30.