

基于电光调制光频梳绝对测距的理论及实验分析

赵宇航¹, 曲兴华¹, 张福民^{1*}, 赵显宇¹, 汤国庆¹

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天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 为满足高精度、大尺寸、高动态的测量需求, 提出一种基于光学频率梳方法的绝对测量方案。采用级联相位调制器和强度调制器的电光调制方法生成平坦的光学频率梳, 可以实现频率的直接溯源, 成本低且易于复现。实现了对数学模型的建立及生成质量的评估, 并且将其应用于改进的多波长测距系统中。该系统实现了对传统的多波长测量系统的简化, 通过解算出合成波长的相位信息实现了对绝对距离的测量以及对测量过程中噪声和不确定度的分析。

关键词 测量; 激光测试; 光学计量仪器; 光电测距

中图分类号 O348.11; TH471; P225.2; TB921

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1204002

Theoretical Analysis and Application of Absolute Distance Measurements Based on Electro-Optic Modulation and Optical Frequency Comb

Zhao Yuhang¹, Qu Xinghua¹, Zhang Fumin^{1*}, Zhao Xianyu¹, Tang Guoqing¹

¹State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Optoelectronics Information Technique, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract To meet the requirements of high-precision, long-distance, and highly dynamic measurements, this article proposes a scheme for absolute distance measurement based on optical frequency combs. Cascaded phase modulators and intensity modulators are used to electro-optically generate a flat-top optical frequency comb. The system offers advantages, including direct traceability, cost efficiency, and reproducibility. Furthermore, a mathematical model is formulated and used to assess the quality of the optical frequency comb generated for use in a multi-heterodyne ranging system. The system is simpler than traditional multi-wavelength measurement systems, and realizes absolute distance measurements by extracting phase information from the synthesized wavelengths of the optical comb. The mathematical model presented herein is used to analyze the noise and uncertainty involved in the system.

Key words measurement; laser testing; optical metrology; photoelectric ranging

OCIS codes 140.3460; 120.4640; 060.2300; 120.3940

1 引 言

绝对距离测量, 是计量领域中一个重要的研究方向, 而光学频率梳(光频梳)技术的出现, 为提高测量量程、测量精度和测量速度等问题提供了一种新的解决思路。同时, 光频梳技术也在精密光谱学^[1-3]、大规模制造^[4-5]、空间宇航卫星编队飞行^[6]等

方面有着广泛的应用。光频梳在时域上表现为一系列等间隔的脉冲序列, 在频域上也是由一系列等频率间隔的纵模序列组成。由于在频域上像一把梳子, 因此称之为“频率梳”, 它就像是一个频率链, 连接了光学频率和微波频率, 从而使得光频可以溯源到原子钟上。

电光调制光频梳成本低且易于复现, 现在已经

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-07-27; 录用日期: 2018-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(51675380)、微光机电系统技术教育部重点实验室开放课题自主资助基金(MOMST 2016-01)

* E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

成为该领域研究的一个重要方向。该方法可以将光频梳的频率间隔直接溯源到微波源上,并通过改变驱动信号的频率对其进行精确、快速的调节,以使其满足测量分辨率、测量量程和动态测量等指标要求,进而与阵列信号处理、波分复用器件、光学信道化等应用条件相匹配^[7-9]。但这种方法引入了电学噪声,并且受限于非线性效应,最终生成的光谱覆盖宽度较小。1993年, Kourogi 等^[10]首次介绍了电光调制光频梳在绝对频率测量中的应用。近年来,美国普渡大学 Andrew M. Weiner 课题组的 Wu 等^[11-12]和日本 Sakamoto 课题组的 Morohashi 等^[13-14]也对电光调制光学频率梳的研制进行了深入研究,生成了在偏频 100 kHz 处为 $-110 \text{ dB}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 相位噪声的 80 fs 级的

超短脉冲,并应用于长距离测距实验中。

本文利用电光调制法,对其数学模型进行了理论推导,生成了宽光谱、窄脉宽、高功率的平坦光梳。针对其光谱宽度、噪声问题和不确定度进行了重点分析,最后将其应用于三光频梳多波长测量系统中。

2 电光调制光频梳的生成原理

2.1 电光调制生成原理

将 1550 nm 连续波激光器(RIO ORION)的中心波长与法布里-珀罗(FP)腔(Thorlabs SA200-12B)锁定,输出功率为 15 dBm,其输出的光经光纤进入级联的调制器和偏振控制器,级联电光调制光频梳生成原理图如图 1 所示。

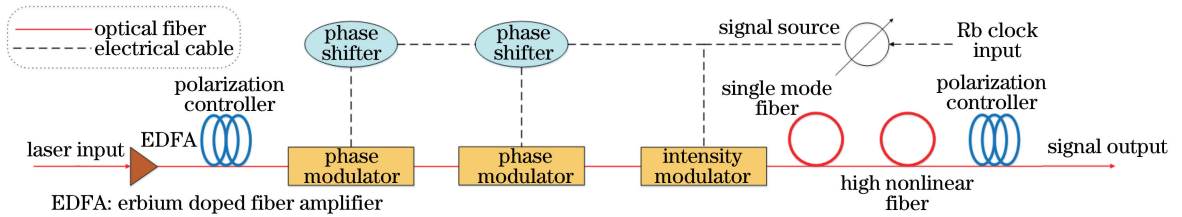


图 1 级联电光调制光频梳生成原理图

Fig. 1 Schematic of cascaded electro-optic modulator optical frequency comb generation

级联的调制器由两个相位调制器(EO space PM-5SE-10-SRF-2W)和一个强度调制器(EO space AX-0S5-10)组成,它们的作用是利用克尔电光效应给光学载波注入一个微波电学的调制信号,使得在中心频率两侧调制出很多边带,这些边带的频率间隔,即光频梳的重复频率,就是这个调制信号的频率。这个驱动的调制信号由可溯源到铷原子钟(SRS FS725)上的微波信号源提供,为满足调制器输入信号的强度要求,还需要增加相应的放大器和衰减器,以使得调制器可以在一个有足够调制深度但并未饱和的状态下工作。实验中,还采用偏振控制和光谱展宽的方法对生成的光频梳进行改善,以得到一个宽光谱、高功率的平坦光频梳,进而能够更好地应用于测量之中。

2.2 电光调制数学模型

利用电光调制的方法生成光学频率梳的数学模型主要分为两部分:一部分是经过级联相位调制器后的数学模型,另一部分是再经过一个强度调制器后的数学模型。最初始的连续波激光器的输出激光电场强度表达式为

$$E_0(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t), \quad (1)$$

式中: E_0 为光信号的电场强度; ω_0 为激光输出的中心频率; t 为时间变量。在通过了第一个相位调制

器后,激光电场强度表达式为

$$E_1(t) = E_0(t) \exp\{j[\chi_1 \sin(\omega_m t + \phi_1)]\}, \quad (2)$$

式中: χ_1 为第一个相位调制器的调制系数; ω_m 为调制信号的频率,即光频梳的两个梳齿间的频率间隔,也就是重复频率; ϕ_1 为输入的调制信号的相位,可由设置在微波电路中的移相器调节控制。将(2)式展开为贝塞尔级数,等效于对其进行傅里叶级数的展开,可得

$$E_1(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} [E_0 J_m(\chi_1) \exp(jm\phi_1)] \times \exp[j(\omega_0 + m\omega_m)t], \quad (3)$$

式中: $J_m(\chi_1)$ 为经贝塞尔转换后的调制信号幅度; m 为调制出的边带阶数,也即梳齿阶数。同理,当信号通过第二个级联的相位调制器后,表达式为

$$E_2(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} (A_{m,n} E_0) \times \exp\{j[\omega_0 + (m+n)\omega_m]t + j(m\phi_1 + n\phi_2)\}, \quad (4)$$

式中: n 、 χ_2 、 ϕ_2 为第二个相位调制器的阶数、调制系数和信号相位;而 $A_{m,n}$ 为此时的幅度值,且满足 $A_{m,n} = J_m(\chi_1) J_n(\chi_2)$ 。由此可见,经相位调制器后产生的光谱由等间隔的纵模组成,引入级联相位调制器是为了增加可调节的参数以增加调整的自由

度,通过改变级联相位调制器的调制系数和调制信号相位,可以得到更多的梳齿数和更好的平坦度。

强度调制器使光波导随调制信号变化改变时域信号包络的形状,根据 Kolner 的时间成像理论^[15],进一步影响频域信号的分布。因此,强度调制器在时域的调制会影响生成光频梳的平坦度等指标。在信号通过两个级联的相位调制器和一个强度调制器后,输出信号的电场强度表达式为

$$E_{\text{int}}(t) = E_2(t) \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\{j[\beta_1 + \chi_{\text{IM}} \sin(\omega_m t)]\} + \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[j\chi_{\text{IM}} \sin(\omega_m t + \pi)] \right\}, \quad (5)$$

式中: χ_{IM} 为强度调制系数; β_1 为强度调制器的直流偏置。经贝塞尔展开后可得

$$E_{\text{int}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_2(t) \sum_{h=-\infty}^{+\infty} J_h(\chi_{\text{IM}}) \times \exp(jh\omega_m t) [\exp(j\beta_1) + (-1)^h], \quad (6)$$

式中: h 为阶数; $J_h(\chi_{\text{IM}})$ 为经贝塞尔展开后的幅值。除了调制系数外,还可以通过直流偏置对强度调制

器进行调节,等效于相位调制器的信号相位调节。通过对电光调制光频梳生成的数学模型进行推导,可以分析得到光频梳生成质量的控制因素,对实验有着指导意义。

2.3 电光调制与偏振控制

实验中,两个偏振控制器分别用于提高光纤调制效率和输出的测量光信号的相干性。由于偏振器件铌酸锂晶体是电光调制器中的核心器件,存在最佳偏振方向,根据马吕斯定律,如果将入射到调制器的光信号的偏振态控制在这个方向上,将会得到更高的调制效率。根据上述数学模型,激光器出射的光信号偏振态可用琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{E}_0 = \frac{E_{\text{in}}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp[jf(t)] \\ \exp(j\Delta\theta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: $f(t)$ 为时间函数; E_{in} 为电信号电场强度的偏振分量; θ 为最高调制效率的偏振角度。当信号通过两个级联的相位调制器和一个强度调制器后,其偏振态表达式为

$$\mathbf{E}_2 = \frac{E_{\text{in}}}{\sqrt{2}} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} [E_0(t) J_m(\chi_1) J_n(\chi_2)] \exp\{j[(m+n)\omega_m t + (m\phi_1 + n\phi_2)]\} \right], \quad (8)$$

$$\mathbf{E}_{\text{int}} = \frac{\mathbf{E}_2}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp(j\beta_1) \sum_{h=-\infty}^{+\infty} J_h(\chi_{\text{IM}}) \exp(jh\omega_m t) \\ \exp(j\Delta\theta) \sum_{h=-\infty}^{+\infty} (-1)^h J_h(\chi_{\text{IM}}) \exp(jh\omega_m t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

光频梳生成光路中的第一个偏振控制器的作用是将输入信号调节到最佳方向以得到最高的调制效率。偏振态的改变不会增加光路中的噪声。因此,偏振并不是噪声的影响因素。偏振控制是为了改善光路的相干性。通过数学模型也可以看出,最佳偏振方向的确可使调制效率最高。

2.4 光谱展宽

实验中,为了改善电光调制光频梳光谱宽度不足的缺陷,提高峰值功率和梳齿数量,在光频梳生成的输出端添加了单模光纤和高非线性光纤(HNLF)。根据电光调制器中铌酸锂晶体的色散特性,利用单模光纤的色散作用对生成的光频梳进行色散补偿,以达到脉冲压缩的效果^[16],进而提高了脉冲的峰值功率。根据介质的极化率与光功率的关系,可以得知光功率的变化会导致介质有效折射率

的变化,从而影响到非线性作用的强度。因此,只有当脉冲被压缩到一定程度时,实验中所用的高非线性光纤才能发挥作用,而非线性作用的强度,将决定光谱展宽的宽度。

根据非线性薛定谔公式,脉冲的传输可以描述为

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A, \quad (10)$$

式中: A 为脉冲强度包络; z 为传输方向; \hat{D} 为关于线性介质的扩散和吸收的线性算子; \hat{N} 为有关光纤非线性效应的非线性算子,包括自相位调制、自陡峭效应、拉曼效应等。同时,光谱的展宽还具有饱和特性,也就是说,光谱展宽在一个有限的长度内就可基本完成,此时,延长光纤的长度并不会进一步提高光谱宽度,这与实验结果相符。

3 三光频梳测距系统原理

3.1 多波长测距原理

多波长干涉测距法最初由美国科学家 Wyant 和 Polhemus 等提出,他们将合成波长的理论从微波电学领域拓展到光学领域,利用两束波长的不同激光对目标同时进行干涉距离测量,得到对应的相位信息^[17],再利用 $\Delta = \lambda_p \lambda_q / (\lambda_p - \lambda_q)$ 得出相应的合成波长,其中 λ_p 和 λ_q 为两个不同阶数梳齿对应的波长。将这个数学意义上的合成波长扩展到测量

中,将其视为测量波长,那么通过解算其相位信息,即双波长测距的相位差,便可求解出目标的距离,同时将测量的非模糊范围扩大到合成波长的一半,使测量量程达到米量级甚至千米量级。

将光学频率梳应用到多波长测距系统中,解决了该系统需要多台激光器和配套稳频设备以及高精度的光学合束和准直手段的问题,在此基础上,Zhao 等^[18-20]提出了双光学频率梳的多波长测距方法,实现了多个尺度合成波长的同步生成,提高了测量的精度及动态速度,双光频梳测量系统原理图如图 2 所示。

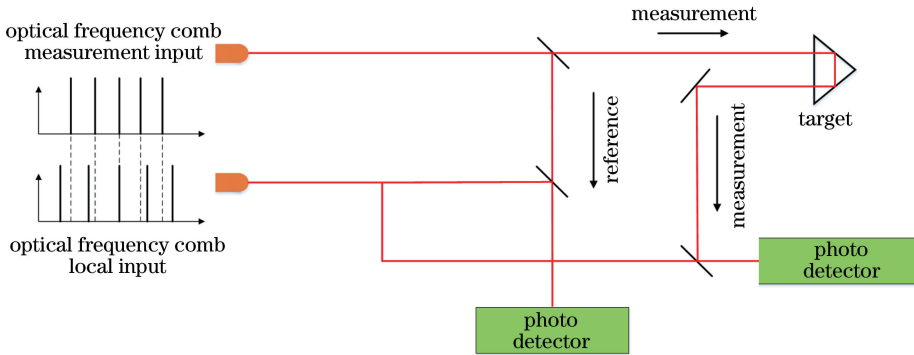


图 2 双光频梳测量系统原理图

Fig. 2 Schematic of a dual-comb measurement system

两路光频梳分别为测量光频梳和本振光频梳,二者可以溯源到同一基准但其重复频率存在频率差,最终得到的信号频谱仍然是等间隔多频率的形式。测量光频梳经过马赫-增德尔测量系统后,可由光电探测器接收得到测量和参考的相位信息,经本振光频梳的下变频处理后,可完整保留这两个相位信息,从而进一步利用公式计算出未知的距离值。这一过程可表示为

$$L = N \frac{\lambda_i}{2} + \Delta\phi_i \frac{\lambda_i}{4\pi}, \quad (11)$$

式中: L 为待测距离; λ_i 为第 i 阶梳齿对应的波长, $i = f_1, f_2, f_3, f_4$; N 为一个正整数。

双光频梳多波长测距系统解决了传统多波长测距系统的测量精度、动态速度、激光稳频一致性等问题,但其本身也具有一定的缺陷,受限于固定的合成波长,其测量结果无法兼顾高精度和高非模糊范围的双重要求。为了解决这一问题,提出了升级版的三光频梳测量系统。

3.2 三光频梳测距系统原理

针对双光梳多波长测量系统的弊端,再结合高速动态测量的需求,提出了三光梳多波长测量系统。三光频梳测量系统原理图如图 3 所示,该方法同时

兼顾大合成波长时的长距离非模糊范围和小合成波长时的短距离测量精度。利用电光调制原理生成的三组光频梳的重复频率分别为 5 GHz、5 GHz + 1 MHz 和 5 GHz + 0.3 MHz。其中,第三路(Comb 3)为本振光梳,它降低了测量光的频率以使光电探测器(Menlo Systems FPD510-F)可以顺利地接收到信号。其余两路(Comb 1、Comb 2)均为测量光梳,通过耦合器对其进行光纤合束后再分为两路光,其中一路光从准直器(COL)出射,经目标角锥棱镜后与本振光在探测器处发生拍频,经数据处理后可以得到测量光路的信息;另一路光则直接与本振光拍频,经数据处理后可以得到参考光路信息。在光频梳生成端引入声光调制器(AOM, Brimrose TEM-200-50-10-1550-2FP),它的作用是进行移频,让原本正负低阶低噪声的梳齿可以更多地用于测量,并可以避免正负频率混叠的问题。

得到的结果频谱由三组频率间隔分别为 0.3, 0.7, 1.0 MHz 的等频率间隔频谱组成。0.3 MHz 和 0.7 MHz 分别为两路测量光梳的下变频信号,而 1.0 MHz 则是这两路测量光梳的互拍频信号。根据经典的合成波长理论,下变频信号携带的相位信息与原始信号的相位信息相同。再根据双光梳多波长

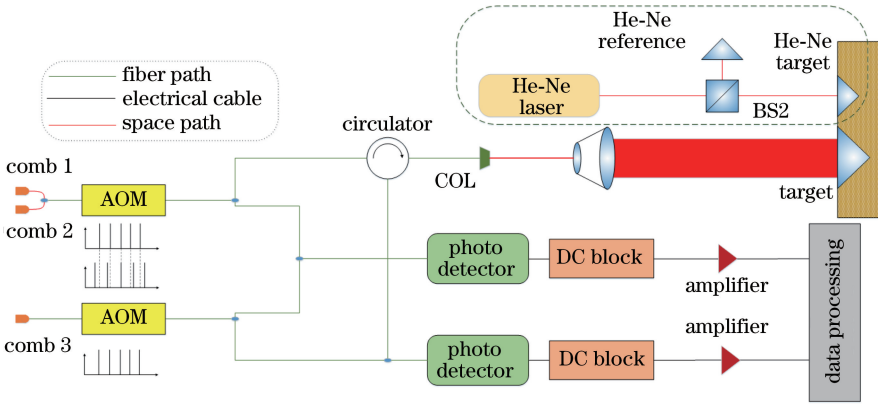


图 3 三光频梳测量系统原理图

Fig. 3 Schematic of a triple-comb measurement system

测量理论,将等频率间隔为 0.3 MHz 的信号序列相位提取出来作为精测部分,用以保证测量的分辨力和精度;将频率间隔为 0.7 MHz 和 0.3 MHz 的信号序列相对应阶数的信号相位提取出来作为粗测部分,用以保证测量的非模糊范围。具体结合三光梳的粗测和精测部分的理论,公式可以拓展为

$$L_f = N_f \frac{\Lambda_r}{2} + N_f \frac{\Delta\phi_{f_1} - \Delta\phi_{f_2}}{4\pi}, \quad (12)$$

$$L_r = \Lambda_r \frac{\Delta\phi_{r_1} - \Delta\phi_{r_2}}{4\pi}, \quad (13)$$

式中: L_f 和 L_r 分别为精测和粗测所得的距离值; Λ_f 和 Λ_r 分别为精测和粗测的合成波长值;精测阶数为 $(f_1 - f_2)$,粗测阶数为 $r_1 - r_2$; N_f 为正整数; $\Delta\phi_{f_1}$ 和 $\Delta\phi_{f_2}$ 分别为第一路测量光频梳对应阶数测量所得的相位变化值,二者相减即为精测所需的相位差; $\Delta\phi_{r_1}$ 和 $\Delta\phi_{r_2}$ 分别为两路测量光频梳相对应阶数的梳齿所携带的相位信息变化值,二者相减即为粗测所需的相位差。根据三光频梳测量原理,这个粗测和精测的结果值可以同步得到,再可以根据 3δ 法则,利用 $L = R_f \times \text{floor}(L_r/R_f) + L_f$ 将粗测和精测的结果相连接,其中, R_f 为精测所得结果的非模糊范围,满足关系 $R_f = \frac{c}{2n_g f_r}$, c 为光速,数值上等于 $2.99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, f_r 为 10 GHz 的频率间隔, n_g 为折射率,计算所得数值约为 15 mm, $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整函数。这样即可得到一个可以同时保证精度和测量范围的结果。

该测量系统的理论动态测量速率取决于最小频率差,而在本实验中,光电探测器将光信号转换成电信号后,经数字采集卡(PicoScope 6403C)将数据采集到上位机数据处理程序中,经过带通滤波和希尔

伯特变换等方法提取并计算出最终的结果,理论数据更新频率最高可达近 4.5 MHz。

3.3 三光频梳系统的噪声分析

由于在生成端引入了射频电学器件,噪声问题不可忽视。在时域上,噪声造成了脉冲的抖动,而在频域中,则是采用单边带相位噪声来评价生成光频梳的质量。单边带相位噪声,可根据在一定偏移频率下的功率谱密度求解得到,用于评价由噪声导致的频谱变宽的程度。根据维纳-辛钦定理,功率谱密度可由对相关函数进行傅里叶变换得到,因为光频梳在时域上由脉冲序列组成,故可以设定域上的光频梳波形函数为

$$E_d(t) = P \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta[t - kT + \xi(t)], \quad (14)$$

式中: $E_d(t)$ 为时域上的光频梳波形函数; P 为脉冲强度; T 为脉冲的周期,且 $T = 1/f_0$; f_0 为重复频率; $\xi(t)$ 表示时间抖动。由此可以得到功率谱 $S(f)$ 与阶数的关系为

$$S(f) \propto k^2 f_0^2 S_k(f - kf_0), \quad (15)$$

式中: k 为谐波阶数; $S_k(f - kf_0)$ 为相位噪声的功率谱密度。于是可以得出结论,相位噪声是随着阶数的增加而增加。由于引入的电学噪声为随机噪声,因此在信号数据处理时采用了减噪方法,在一定程度上减小了噪声对测量的影响。在测量时,单边带相位噪声的简化表达式为

$$L(f) = \frac{P_{\text{SSB}}(f)}{P_s} = 10 \lg \frac{P_{\text{SSB}}(f)}{P_s}, \quad (16)$$

式中: $L(f)$ 为所求的相位噪声,单位为 dBc/Hz; $P_{\text{SSB}}(f)$ 为单边带一定偏移频率处测量带宽 1 Hz 内的功率, P_s 为信号的总功率,其比值即为功率谱密度。此外,实验中还利用标准自相关函数的算法对数据进行误差分离,求出了其中包含的系统误差

成分,并在算法上对其进行了分析和补偿。

4 实验与分析

电光调制光频梳生成的平坦光频梳,利用光谱仪(YOOKOGAWA AQ6370D)测量光频梳生成结果如图4所示。经过级联的电光调制器和偏振控制器后的结果如图4(a)所示,在3 dBm的平坦度范围内得到了近50阶的梳齿,在6 dBm的平坦

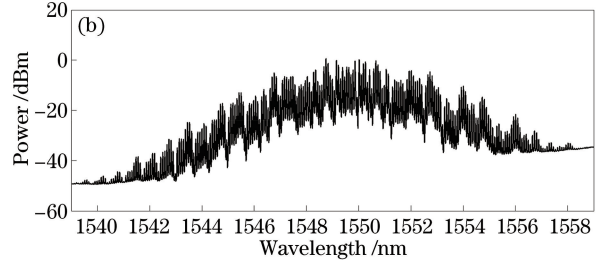
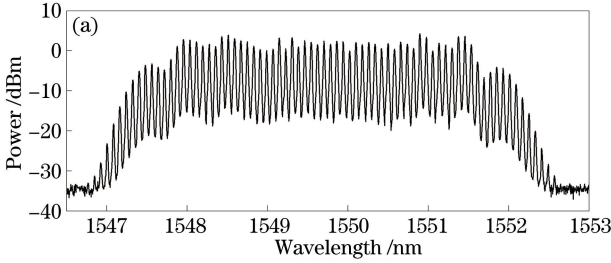


图4 光频梳生成结果图。(a)电光调制光频梳的生成结果;(b)光频梳光谱拓宽后的结果

Fig. 4 Results of optical frequency comb generation. (a) Optical frequency comb generated by an electro-optic modulator; (b) optical frequency comb after spectral broadening

生成的光学频率梳被应用于三光频梳测距系统中,对其拍频的结果进行相位噪声的测量。相位噪声测量结果如图5所示。利用频谱仪分别在拍频结果的第1阶、第10阶和第20阶进行测量。由此证明了相位噪声的分布在统计上基本符合“T”分布,且阶数越高,相位噪声越大。

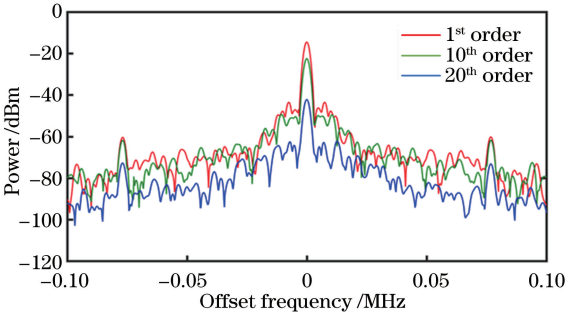


图5 相位噪声测量结果

Fig. 5 Results of phase noise measurement

利用生成的平坦光频梳结合三光梳测量系统,对固定单点稳定性进行测量,测试结果如图6所示。图6(a)为数据更新速率分别为4.5 MHz、200 kHz和20 kHz的情况下,所得到的单点稳定性测量结果,由图可知,采用的数据更新速率越低,即平均时间越长,所得到的结果标准差越小、精确度越高。图6(b)为标准差分布,表示了在不同标准差范围内的数据点的频数,经统计,该分布基本符合正态分布。

实际测量中,与He-Ne干涉仪(Reineshaw XL-80)进行对比,目标反射镜以0.5 m为步进,总量程

度范围内得到了60阶梳齿;利用色散和非线性作用将光谱进行扩展后,又可以得到谱宽为20 nm的光谱,峰值功率保持在0 dBm,基本符合长距离测量的要求。经过长度为2 km、色散系数为 $18 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 的单模光纤及1 km长度的高非线性光纤进行光谱扩宽后,谱宽约为20 nm,基本符合实验要求,光频梳光谱拓宽后的结果如图4(b)所示。

为5 m,测距实验结果如图7所示。蓝色线代表干涉仪所测得的结果,而红色线表示对应测量点上利用改进的三光频梳系统所得到的测量偏差,红色点则代表该偏差的平均值。由图可以看出,在这个测量距离范围内,测量标准差数值极限约为 $\pm 1 \mu\text{m}$,满足测量要求。

本实验同时进行精测和粗测两部分测量,但是二者的测距公式有着一定的一致性,将测距公式中正整数项去掉后,归一化测量模型变为

$$L = \frac{c \cdot \Delta\phi}{4\pi n_g \cdot \Delta f}, \quad (17)$$

式中: $\Delta\phi$ 为测量结果的相位差, Δf 为合成波长用到的频率差。由此可以得出测量的合成标准不确定度公式为

$$u_L = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{n_g \Delta f} u_{\Delta\phi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\phi}{n_g^2 \Delta f} u_{n_g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\phi}{n_g \Delta f^2} u_{\Delta f}\right)^2}, \quad (18)$$

式中: $u_{\Delta\phi}$, u_{n_g} , $u_{\Delta f}$ 分别为相位差、折射率和频率差的不确定度。根据测量不确定度的评定标准,可用测量的标准偏差表征其不确定度分量的数值,测量不确定度分析值如表1所示,最终求得的合成标准不确定度的结果为 $1.04 \mu\text{m}$,基本与实验结果相符。

由于本实验高动态、高分辨力以及高精度的特性,环境影响因素需控制在较低的水平之内。测量时的环境条件比较稳定,其微小波动也在表1中有

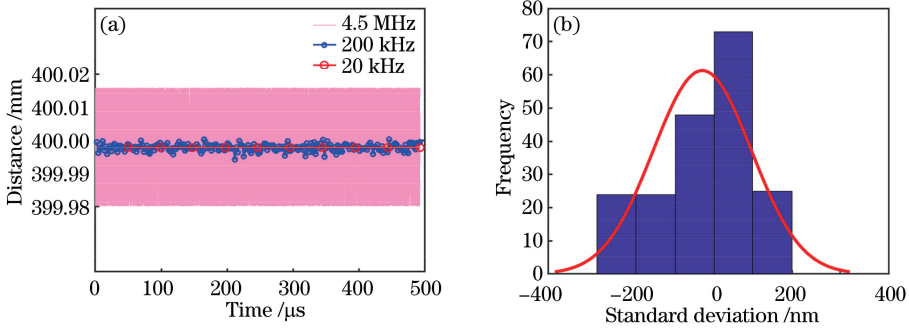


图 6 测试结果图。(a)不同平均时间下的单点稳定性；(b)单点稳定性测量标准差的分布

Fig. 6 Test results. (a) Single-point stability versus average time; (b) standard deviation distribution of single-point stability

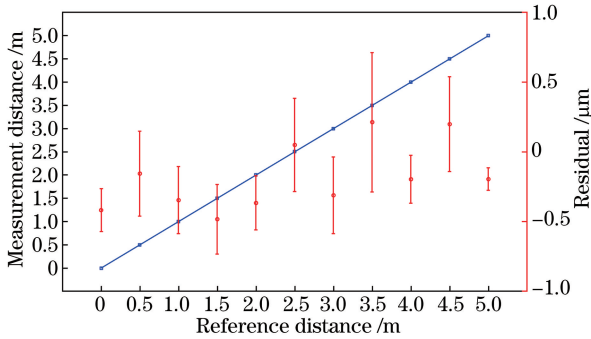


图 7 测距实验结果

Fig. 7 Experimental distance measurement results

所表示,温度为 25.5 °C,气压为 100.86 kPa,湿度为 40.6%,由此可通过 Ciddor 公式求出此时环境的群折射率为 1.00027325。

表 1 测量不确定度分析值

Table 1 Analytical values of measurement uncertainty

Source of uncertainty	Value
Due to frequency uncertainty /kHz	39
Due to air refractive index	3×10^{-8}
Temperature uncertainty /°C	0.1
Pressure uncertainty /kPa	0.02
Humidity uncertainty /%	0.3
Due to the empirical equation /m	10^{-9}
Due to vibrations and disturbance /nm	100

5 结 论

提出一种基于光学频率梳的绝对测量方案,主要分析了级联了相位调制器和强度调制器的电光调制生成光学频率梳的数学模型、生成方法和质量评估,并将其运用在三光学频率梳多波长测量系统中。该系统结合了两套外差式的双光学频率梳多波长测量系统,同时可以兼顾大尺寸测量的非模糊范围要求和精准测量的精度要求,并满足了高速动态测量的需求。结果表明,所设计并实施的方案满足高精度、大尺寸、低成本、高动态的实验要求,适用于精密

地进行长距离测量。然而,测量距离越长,折射率不确定度越大,因此在更长距离的实验中,该实验装置和补偿算法还需要进一步改进。

参 考 文 献

- [1] Zheng B F, Xie Q J, Shu C. Comb spacing multiplication enabled widely spaced flexible frequency comb generation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(13): 2651-2659.
- [2] Spencer D T, Drake T, Briles T C, *et al.* An optical-frequency synthesizer using integrated photonics[J]. Nature, 2018, 557(7703): 81-85.
- [3] Zhao X, Li C, Li T, *et al.* Dead-band-free, high-resolution microwave frequency measurement using a free-running triple-comb fiber laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1-8.
- [4] Wu H Z, Zhang F M, Liu T Y, *et al.* Absolute distance measurement by multi-heterodyne interferometry using a frequency comb and a cavity-stabilized tunable laser[J]. Applied Optics, 2016, 55(15): 4210-4218.
- [5] Liu T Y, Zhang F M, Wu H Z, *et al.* Time-frequency analysis in absolute distance measurement using chirped pulse interferometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904005. 刘亭洋, 张福民, 吴翰钟, 等. 脉冲啁啾干涉绝对距离测量中的时频分析[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904005.
- [6] Coillet A, Chembo Y K. Routes to spatiotemporal chaos in Kerr optical frequency combs[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2014, 24(1): 013113.
- [7] Sakamoto T, Chiba A. Multiple-frequency-spaced flat optical comb generation using a multiple-parallel phase modulator[J]. Optics Letters, 2017, 42(21): 4462-4465.
- [8] Mildner J, Meiners-Hagen K, Pollinger F. Dual-

- frequency comb generation with differing GHz repetition rates by parallel Fabry-Perot cavity filtering of a single broadband frequency comb source [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(7): 074011.
- [9] Kuse N Y, Schibli T R, Fermann M E. Low noise electro-optic comb generation by fully stabilizing to a mode-locked fiber comb [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16884-16893.
- [10] Kourogi M, Nakagawa K, Ohtsu M. Wide-span optical frequency comb generator for accurate optical frequency difference measurement [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(10): 2693-2701.
- [11] Wu R, Torres-Company V, Leaird D E, *et al.* Supercontinuum-based 10-GHz flat-topped optical frequency comb generation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6045-6052.
- [12] Torres-Company V, Weiner A M. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 8(3): 368-393.
- [13] Morohashi I, Sakamoto T, Sotobayashi H, *et al.* Broadband wavelength-tunable ultrashort pulse source using a Mach-Zehnder modulator and dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(15): 2297-2299.
- [14] Morohashi I, Sakamoto T, Sekine N, *et al.* Ultrashort optical pulse source using Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator [J]. *Nano Communication Networks*, 2016, 10: 79-84.
- [15] Kolner B H, Nazarathy M. Temporal imaging with a time lens [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(12): 630-632.
- [16] Dou Y J, Zhang H M, Yao M Y. Ultra-short optical pulse generation based on optical frequency comb and application in optical analog-to-digital conversion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1205006. 窦玉杰, 张洪明, 姚敏玉. 基于光频梳的超短光脉冲的产生及其在光模数转换中的应用 [J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1205006.
- [17] Yang T, Dong J J, Liao S S, *et al.* Comparison analysis of optical frequency comb generation with nonlinear effects in highly nonlinear fibers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8508-8520.
- [18] Zhao X N, Qu X H, Zhang F M, *et al.* Absolute distance measurement by multi-heterodyne interferometry using an electro-optic triple comb [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 807-810.
- [19] Delfyett P, Bhooplapur S, Klee A, *et al.* Optical frequency combs from mode-locked diode lasers - applications in communications, signal processing & radar for avionics [C] // 2015 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP), November 10-12, Santa Barbara, CA, USA. New York: IEEE. 2015: 32-33.
- [20] Yang R T, Pollinger F, Meiners-Hagen K, *et al.* Absolute distance measurement by dual-comb interferometry with multi-channel digital lock-in phase detection [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 084001.