

基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析

王国超 颜树华 杨俊 林存宝 魏春华 杜志广

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 飞秒光梳的出现为实现高精度绝对距离测量提供了诸多有效方法,并有望直接应用于激光雷达、卫星编队飞行和空间引力测量等空间探测任务。从未来空间精密测距的精度需求出发,提出在飞行时间法辅助测距的基础上利用光学脉冲互相关分析技术将目标距离测量直接溯源到光梳重复频率的测量方法,建立了飞秒光梳测距基本模型,进行了飞秒脉冲互相关理论分析,并开展了互相关及测距仿真实验。仿真结果表明,在目标距离为10 km以及重复频率扫描精度0.01 Hz条件下,进行非模糊量程内线性测距的测量精度优于450 nm,测距残余误差的峰谷(PV)值为780 nm,验证了该方法实现亚微米级甚至纳米量级大量程空间精密测距的可行性。

关键词 测量;激光测距;飞秒光梳;互相关;重复频率;飞行时间法

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0412002

Theoretical Modeling Analysis for Precise Space Ranging Based on Cross-Correlation of Femtosecond Optical Frequency Comb

Wang Guochao Yan Shuhua Yang Jun Lin Cunbao Wei Chunhua Du Zhiguang

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

Abstract The advent of femtosecond optical frequency comb (FOFC) offers many available solutions for absolute distance measurement, as is expected to be directly applied to many space ranging tasks, such as laser radar, satellite formation flying and gravity field measurement. With a purpose of precision requirement for future space ranging, an integrated method based on time of flight method and optical pulse cross-correlation analysis is proposed, making the distance traceable to the repetition rate of frequency comb. The fundamental model for laser ranging with FOFC is built, theoretical analysis for femtosecond pulse cross-correlation is implemented, and simulations for cross-correlation and large-scale ranging are demonstrated. The simulation result shows that when the target distance is near 10 km and the scanning precision for repetition rate is 0.01 Hz, the measurement accuracy is better than 450 nm within the linear test of a non-ambiguity range, and the peak-valley (PV) value of residual errors is less than 780 nm, validating that the proposed scheme is feasible for large-scale space ranging with sub-micron precision or even nanometer precision.

Key words measurement; laser ranging; femtosecond optical frequency comb; cross-correlation; repetition rate; time of flight method

OCIS codes 120.3180; 120.3930; 140.3600; 280.3400

1 引言

随着航天科学研究和国防军事的拓展需要,对空间定位测量和精密测距任务的要求越来越高。目前,

收稿日期: 2014-09-04; 收到修改稿日期: 2014-11-24

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,主要从事量子传感及光学精密测量方面的研究。

E-mail: yanshuhua996@163.com(通信联系人)

空间精密测距的典型应用主要体现于卫星编队飞行,编队卫星的间距一般为几米到几十千米,对队形及卫星间距离保持精度的要求很高,如何实现编队小卫星之间实时、高精度相对位置和相对姿态的自主测量显得尤为关键,如 GRACE 编队实现相对距离测量精度为几十到上百微米量级,下一代空间重力场重建与测量更是要求测距的相对精度达到亚微米甚至纳米量级^[1-2]。目前常见的空间定位测量方法有微波测量、光学相机测量、GPS 测量以及激光测量等。这些方法均各有优缺点,其中基于脉冲飞行时间的激光测量技术是目前精度最高的空间测量手段,但受限于快速光电探测器只能分辨皮秒的电子时间能力,其测量精度仅为毫米量级^[3-4]。基于相位跟踪原理的激光干涉测量技术在空间测距中也有所应用,虽然其能达到纳米级的测量分辨力,但由于仅具备半波长非模糊度量程、光路不可间断等测量原理自身的限制,因而只能用来辅助测量相对位置变化^[5]。近年来,一种理想的飞秒激光脉冲光源—飞秒激光光学频率梳[简称飞秒光梳(FOFC)],引起了科技界的广泛关注:其由锁模激光器产生,时域是由一连串飞秒激光脉冲组成,频域则表现为均匀分布的超宽带精密光谱,相对频率稳定度能达到 10^{-16} 水平;同时它又如同一个光学齿轮,可把难以直接测量的光学频率变频到较易测量的微波频率上^[6]。飞秒光梳实现了微波频标与光学频率的直接连接,不仅极大地促进了时间频率及其相关物理量的精密测量,包括激光干涉测量、精密光谱测量、太空光频梳、激光通信和激光雷达等领域的各种参量测量,同时也为激光绝对测距技术提供了诸多新的技术手段,理论上在 10^7 m 的量程范围内可达到纳米级的测量分辨率,有望直接应用于空间站的控制与定位、激光雷达、激光通信和卫星编队飞行等空间任务^[7-8]。

基于飞秒光梳的绝对测距技术最早是由日本科学家 Minoshima 于 2000 年提出^[9],其利用光梳重复频率及其谐波作为合成波长实现了 240 m 的绝对距离测量,测量结果的相对精度达到 $50 \mu\text{m}$ 。经过十多年的不断研究,飞秒光梳实现技术和基于飞秒光梳的绝对测距技术均取得了重大进展^[8,10]:飞秒光梳已经发展为小型化的光纤飞秒光梳,性能更加稳定,结构更加紧凑,已成功进行了太空测试和机载野外演示实验,为飞秒光梳的工程应用奠定了重要的基础^[11-12];在基于飞秒光梳的绝对测距方面也出现了诸多方法来解决大量程高精度的矛盾,主要有多波长干涉测距法^[13-15]、光谱干涉法^[16]、合成波长法^[19,17]、飞行时间法^[18]、双光梳干涉法^[19-20]以及结合非相干和相干原理测距法等^[21]。尤其引人关注的是,美国国家标准与技术研究院(NIST)于 2009 年首次提出并实验论证利用双光梳实现远距离纳米量级绝对测距,并使用光纤延迟模拟 1.14 km 的空间距离,结合光学载波相位的干涉测量法,在平均采样时间为 60 ms 时测量误差可以提高到 5 nm,平均采样时间为 0.5 s 时误差为 3 nm^[19]。2010 年,韩国科学技术院(KAIST)通过使用光学互相关技术创新地提高飞行时间技术的精确度到纳米量级,首次通过室外实验对 0.7 km 的目标进行测量,当平均采样时间为 5 ms 时测量结果的 Allan 方差为 117 nm,当平均采样时间为 1 s 时最终结果的 Allan 方差为 7 nm^[18]。目前,欧洲太空局(ESA)和美国国家航天航空局(NASA)正在策划将激光干涉技术用于星间精密测距,如 GRACE-C 项目和 LISA 项目^[22];ESA 也开展了将光梳绝对测距技术应用于卫星编队飞行、重力场测量等涉及空间精密测距的相关研究,如 HAALDM 项目等^[23]。

本文以飞秒光梳空间精密绝对测距的未来应用为出发点,阐述了飞秒光梳互相关测距的基本原理,建立了基于重复频率扫描与控制的飞秒脉冲绝对测距的理论模型,并仿真分析验证了基于飞秒光梳互相关用于绝对测距的可行性,仿真结果表明该方法能实现亚微米甚至纳米级精度的空间大距离测量,有望成为下一代空间精密定位技术的重要突破点。

2 飞秒光梳互相关空间绝对测距的基本原理

飞秒光梳空间精密测距系统的基本结构如图 1 所示,基本光路结构为一个标准的 Michelson 干涉仪光路,光纤飞秒光梳发射飞秒脉冲激光,脉冲激光束经过偏振分光棱镜(PBS)后,一路反射光通过参考镜返回作为参考光脉冲,另一路透射光经过扩束棱镜组后由空间目标上的反射镜 M_r 返回作为测量光脉冲,返回的参考光脉冲与测量光脉冲会聚后经过消偏振分光镜(BS)分别入射到飞行时间测量模块(TOF module)以及互相关分析模块,最后经过飞行时间分析与互相关分析等处理获取精确的绝对距离信息。这里需要指出的是,尽管互相关技术能通过多步测量来单独完成精确距离测量,但是如果结合飞行时间测量模块,其测量效率

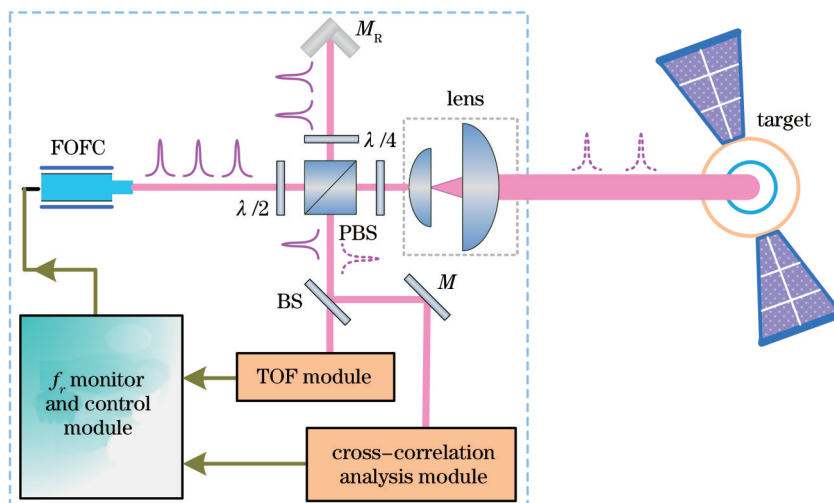


图1 基于飞秒光梳的空间精密测距原理示意图

Fig.1 Schematic figure of space precision ranging based on FOCF

会得到显著提高。

利用飞秒光梳互相关分析进行绝对测距最早由文献[21]提出,其测距的主要思想是利用飞行时间法以脉冲周期整数倍形式给出待测距离的非模糊信息,同时采用互相关探测技术观测参考脉冲与测量脉冲的干涉条纹。本文利用互相关强度分析取代干涉条纹分析,由于互相关强度与参考脉冲和测量脉冲之间的时延 Δt 有关,改变飞秒脉冲重复频率可以改变参考和测量的脉冲时延,因此通过扫描重复频率可以实现参考和测量脉冲的重合,此时的待测距离将由脉冲周期整数倍形式表示。同时,整个扫描重合过程可以由互相关分析进行反馈控制,距离测量精度也最终取决于使两个脉冲重合的精度,而测距非模糊度即为两个脉冲之间的光程差。图2是简化的互相关测距基本原理示意图,为了便于观察测量脉冲(c, d)颜色变为浅蓝色,参考脉冲(a, b)仍为粉色。互相关强度与两脉冲之间的时延 Δt_i 有关,通过改变飞秒光梳的重复频率将测量脉冲锁定到参考脉冲,使互相关强度获得最大,此时可认为参考脉冲和测量脉冲完全重合,待测距离由整数个脉冲光程间隔表示,脉冲 a', b', c', d' 是改变重复频率之后的脉冲表示,其中时延 Δt_1 对应的光梳重复频率为 f_{r1} (重复时间 T_1),时延 Δt_2 对应的重复频率为 f_{r2} (重复时间 T_2)。

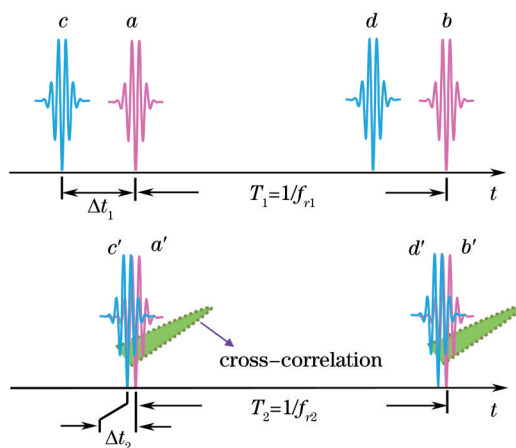


图2 相对脉冲时延关系图

Fig.2 Schematic figure of relative pulse delay

不妨设参考和测量光路的长度分别为 L_1 和 L_2 ,由时间速度公式 $t=l/c$,两脉冲所经光程差对应的时间可表示为 $2(L_2 - L_1)/c = nT_1 - \Delta t_1$;当在微调重复频率到 f_{r2} 时,对应时延也可表示为 $2(L_2 - L_1)/c = nT_2 - \Delta t_2$,其中整数 n 表示第 n 个脉冲。当扫描重复频率使返回参考脉冲光与返回测量脉冲光完全重合时,光程差对应的时

延表示为 $2(L_2 - L_1)/c = nT_3$, 则此时目标距离 $L_2 - L_1$ 可表示为

$$L_2 - L_1 = \frac{c}{2f_{r3}}n. \quad (1)$$

鉴于传统飞行时间法激光测距完全能保证厘米量级的测距精度, 而飞秒光梳脉冲串之间的非模糊度量程 cf_r 一般为米量级, 因此整数 n 可通过 TOF 模块来获取。该测量方法只与重复频率相关, 测量精度很大程度上取决于重复频率的稳定度和精度, 现阶段飞秒光梳工程上能达到优于 10^{-16} 的相对时间稳定度, 因此有望实现优于一个光学波长的测距精度, 且测距量程理论上可达到几十万公里。

此外, 如对实时测量要求不高, 也可以不依赖先验测量, 而通过大范围扫描重复频率使脉冲连续重合两次的方法来获取整数 n 。如果连续第二次脉冲重合时的重复频率为 f_{r4} , 且 $f_{r4} > f_{r3}$, 则目标距离又可以表示为

$$L_2 - L_1 = \frac{c}{2f_{r4}}(n - 1), \quad (2)$$

根据(1)式和(2)式, 可联立解得整周期 n 为

$$n = f_{r4} / |f_{r4} - f_{r3}|. \quad (3)$$

(3)式实际上对上调重复频率或者下调重复频率都是适用的。该方法确定脉冲整周期存在两个主要缺陷: 1) 由于扫描频率范围的限制, 目标距离必须足够大; 2) 在扫描重复频率的过程中目标距离必须基本保持恒定, 否则, 距离变化将会造成 $|f_{r4} - f_{r3}|$ 产生误差, 进而影响整周期的测量。由于本文采取辅助先验测量获取整周期值, 因此这里不对该整数判定方法做详细讨论。

3 飞秒光梳互相关建模分析

3.1 飞秒光梳的理论模型

在时域, 光学频率梳出射的锁模激光脉冲串的电场强度可表示为^[24]

$$E(t) = A(t)\exp[i\phi(t)] \otimes \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT)\exp(im\Delta\phi), \quad (4)$$

式中 $A(t)$ 为脉冲包络, $\phi(t)$ 为相位函数, 且 $\phi(t) = 2\pi f_c t + \phi_0$, $A(t)$ 和 $\phi(t)$ 的定义域为 $[-\tau/2, \tau/2]$, 即在时间范围 $[-\tau/2, \tau/2]$ 内 $A(t) \neq 0$, $\phi(t) \neq 0$, τ 为脉宽, 且 $\tau < T$, f_c 为载波频率, ϕ_0 为载波脉冲的任意初始相位, T 为脉冲重复周期, m 代表脉冲序数, $\Delta\phi$ 为载波包络相位差, 符号 \otimes 表示卷积运算。 $\Delta\phi$ 是由于激光谐振腔内的介质色散, 引起腔内群速度和相速度不同, 导致激光脉冲在谐振腔内往返一周后载波相位和包络相位之间产生的相位差。由傅里叶变换可得电场强度的频域表达式为

$$\begin{aligned} \hat{E}(f) &= \text{FT}[E(t)] = \text{FT}\{A(t)\exp[i(2\pi f_c t + \phi_0)]\} \text{FT}\left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT)\exp(im\Delta\phi)\right] = \\ &= \hat{A}(f - f_c) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp(-i2\pi f m T)\exp(im\Delta\phi) = \hat{A}(f - f_c) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp[i(m\Delta\phi - 2\pi f m T)], \end{aligned} \quad (5)$$

式中 FT 表示傅里叶变换, 且

$$\hat{A}(f) = \text{FT}[A(t)\exp(i\phi_0)] = \int A(t)\exp(i\phi_0)\exp(-i2\pi f t)dt. \quad (6)$$

当激光腔实现锁模之后, (5)式中级数和的相邻两项为同相关系, 即其相位差为 2π 的整数倍时, 将产生相干叠加, $\hat{E}(t)$ 取最大值, 且此时载波相位必须满足:

$$\Delta\phi - 2\pi f_n T = 2\pi n, \quad (7)$$

式中 n 为整数。由此可得出光梳中第 n 个梳齿谱线的频率:

$$f_n = n f_r + f_{\text{ceo}}. \quad (8)$$

式中 f_r 脉冲重复频率, 满足 $f_r = \frac{1}{T}$, f_0 为载波包络频移, $f_{\text{ceo}} = \frac{\Delta\phi}{2\pi T} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} f_r$ 。飞秒光梳的频域表达式为

$$\hat{E}(f) = \hat{A}(f - f_c) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - f_n) = \hat{A}(f - f_c) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - n f_r - f_{\text{ceo}}). \quad (9)$$

由以上分析可知,在频域内,飞秒光梳是由一系列相等频率间隔的窄谱线构成的梳状光谱,且本质上只由两个重要参数构成,一个是重复频率 f_r ,另一个是载波包络频移 f_{ceo} ,如图3所示。

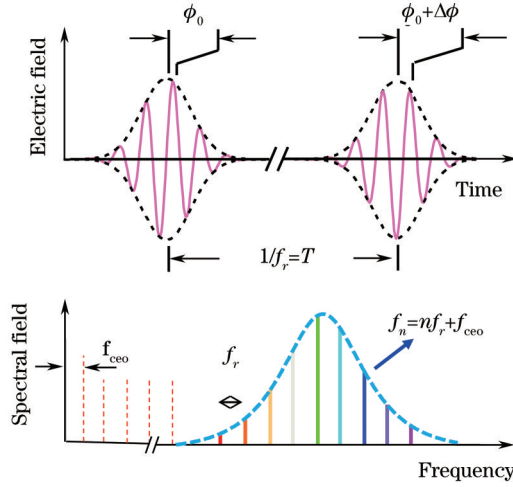


图3 飞秒光梳在时域和频域的特征示意图

Fig.3 Time-domain and spectrum-domain characteristic of FOF

3.2 飞秒光梳脉冲互相关模型分析

假设图1中从参考光路和测量光路返回的光梳脉冲可分别表示为

$$E_1(t) = A_1(t)\exp[i\phi(t)] \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T)\exp(im_1\Delta\phi), \quad (10)$$

$$E_2(t) = A_2(t)\exp[i\phi(t)] \otimes \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_2-m_2T)\exp(im_2\Delta\phi), \quad (11)$$

式中 $t_1 = 2L_1/c$ 、 $t_2 = 2L_2/c$, $2L_1$ 、 $2L_2$ 分别表示光学频率梳所经过的参考光程和测量光程, c 为真空中的光速。由于研究对象主要考虑的是空间目标,因此后面的分析将不考虑大气色散对脉冲互相关及大气折射率对测距精度的影响^[25]。则叠加后的合光场强度可表示为

$$\begin{aligned} I_{OF}(t) &= |E_1(t) + E_2(t)|^2 = A_1^2(t) \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T) + A_2^2(t) \otimes \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_2-m_2T) + \\ &\left\{ A_1(t)\exp[-i\phi(t)] \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T)\exp(-im_1\Delta\phi) \right\} \times \left\{ A_2(t)\exp[i\phi(t)] \otimes \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_2-m_2T)\exp(im_2\Delta\phi) \right\} + \\ &\left\{ A_1(t)\exp[i\phi(t)] \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T)\exp(im_1\Delta\phi) \right\} \times \left\{ A_2(t)\exp[-i\phi(t)] \otimes \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_2-m_2T)\exp(-im_2\Delta\phi) \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

若 $t_2 - t_1 = jT$ 或 $2L_2 - 2L_1 = jTc$ (j 为整数), 则 $m_1 - m_2 = j$, 故 $t - t_1 - m_1T = t - t_2 - m_2T$, (12)式可改写为

$$\begin{aligned} I_{OF}(t) &= A_1^2(t) \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T) + A_2^2(t) \otimes \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T) + 2A_1(t)A_2(t)\cos[j\Delta\phi] \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T) = \\ &\left[A_1^2(t) + A_2^2(t) + 2A_1(t)A_2(t)\cos(j\Delta\phi) \right] \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T). \quad (13) \end{aligned}$$

以上为电场线性互相关强度的表达结果, 如果将(13)式作进一步平方处理便得到干涉互相关 $I_{SC}(t)$ (二阶互相关)结果

$$\begin{aligned} I_{SC}(t) &= |E_1(t) + E_2(t)|^4 = \left[\left[A_1^2(t) + A_2^2(t) + 2A_1(t)A_2(t)\cos(j\Delta\phi) \right] \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T) \right]^2 = \\ &\left[A_1^2(t) + A_2^2(t) + 2A_1(t)A_2(t)\cos(j\Delta\phi) \right]^2 \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T). \quad (14) \end{aligned}$$

进一步地,也可以得到强度互相关 $I_{FC}(t)$ (一阶互相关)结果表达式:

$$I_{FC}(t) = \alpha |E_1(t)|^2 |E_2(t)|^2 = \alpha \left[A_1^2(t) \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T) \right] \times \left[A_2^2(t) \otimes \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_2-m_2T) \right] = \alpha A_1^2(t) A_2^2(t) \otimes \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \delta(t-t_1-m_1T), \quad (15)$$

式中 α 为互相关强度转化系数,通常由用于互相关的非线性晶体材料决定。

4 飞秒光梳绝对测距仿真结果

参考 Menlo System FC1500 光梳的性能参数,将用于建模仿真的光梳参数设定如下:光梳中心波长为 1550 nm;光梳的中心重复频率为 100 MHz;载波脉冲包络为高斯包络,飞秒光梳半峰全宽(FWHM)选定为 80 fs。图4为仿真算法演算产生的飞秒光梳电场时域图。

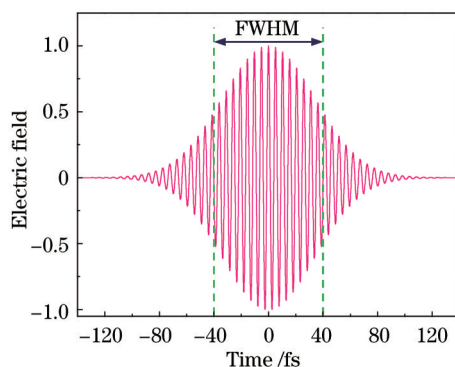


图4 仿真实验产生的飞秒光梳时域图

Fig.4 Simulated result for FOFC in time domain

保持测量光路的光程不变,通过改变参考光路光程也可以改变返回脉冲的相对时延,这也是自相关法测量激光脉冲特性的经典技术方法。图5给出了通过改变参考光路和测量光路光程差实现脉冲互相关的结果图,图5(a)是干涉互相关结果,图5(b)是强度互相关结果。互相关结果验证了飞秒激光脉冲互相关时延(这里对应光程差)基本特性,同时也证实了脉冲间约 1.5 m 的非模糊度距离。如果调节参考光路光程能做到足够精细,理论上也可以实现脉冲的完全重合,因此通过扫描参考光路的互相关分析也能实现绝对测距,但是要求 1.5 m 的扫描范围内达到亚微米级的扫描精度,这在实时性和超长导轨控制上都是极具难度的,因此现阶段该方法只能用于进行一些小范围离散长度值的测量。

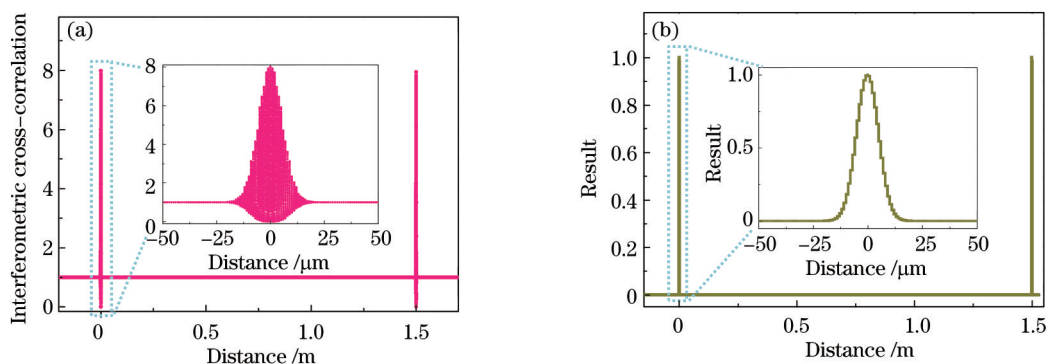


图5 改变光程差的互相关结果。(a)干涉互相关结果;(b)强度互相关结果

Fig.5 Cross-correlation result of changing optical path length difference. (a) Interferometric cross-correlation result; (b) intensity cross-correlation result

通过改变重复频率使返回的参考和测量脉冲之间的时延发生变化,进而实现飞秒脉冲间的互相关分析,此时脉冲重合程度和互相关结果的精细度与能够调节的重复频率的细分程度相关。图6为扫描重复频率的互相

关结果,图6(a)是干涉互相关结果,图6(b)是强度互相关结果,对应的仿真参数分别为:光程差为10 km,中心重复频率为100 MHz,重复频率扫描步进为0.01 Hz。根据前文提出的互相关精密测距方法,只要找到互相关强度的峰值位置对应的重复频率那么就能由(1)式得到精确距离值。这里由于是用计算机进行仿真,互相关强度峰值点位置可以非常准确地找到,因此,仿真实验中重复频率最小步进决定了测距的精度。现阶段商用频率计和信号发生器都能达到0.001 Hz的相对频率准确度,所以在实际的工程实现中重复频率准确测量并不困难,如何找准互相关强度的峰值位置才是难点,这里选择0.01 Hz做为扫描步进也是比较合理的。在频率扫描的基础上,也可以通过互相关分析,将重复频率锁定到互相关强度的峰值点。图6还验证了当目标距离是10 km时,通过改变重复频率约15 kHz可以实现参考和测量脉冲连续两次的重合,这个范围可由(1)式和(2)式解得,即 $2(L_2 - L_1)\Delta f_r = c$,目标距离与要求的重复频率调节范围呈反比,这也是该方法适合大距离测量的原因。图6(b)中10 km对应的互相关强度峰值点的重复频率为100010763.91 Hz。 F_{r_offset} 为重复频率偏离中心重复频率100 MHz的偏移量。

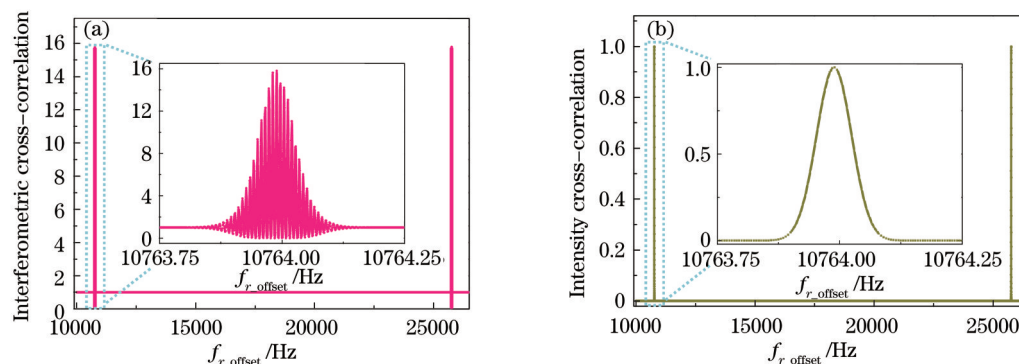


图6 扫描重复频率的互相关结果。(a)干涉互相关结果;(b)强度互相关结果

Fig.6 Cross-correlation result by scanning the repetition rate. (a) Interferometric cross-correlation result; (b) intensity cross-correlation result

在设定频率精度为0.01 Hz的扫描步进条件下,利用强度互相关分析对10 km附近的一个非模糊量程内的线性距离进行了仿真测量,测量结果如图7所示。图中距离步进设置为0.1 m,所得残余误差为测量值与给定距离真值之差,1.5 m线性距离内的仿真测距最大残余误差绝对值小于450 nm。通过残余误差的正向最大值和负向最小值做差从而得到残差PV值约为780 nm,理论证明了该方法对大距离目标能够实现亚微米级精度测量。这里只对强度互相关的情况进行了测距仿真是考虑到强度互相关分析在工程技术上更易于实现,这里不做具体讨论。

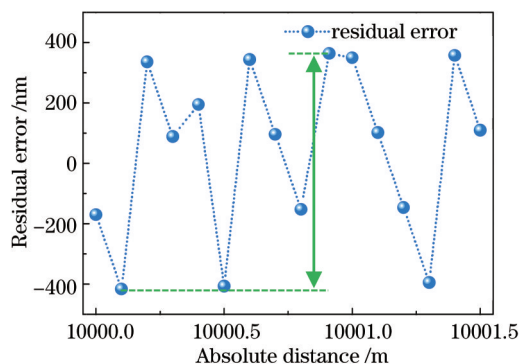


图7 非模糊度量程内的测距仿真结果

Fig.7 Simulation result for distance measurement in a pulse-to-pulse non-ambiguity range

以上测距误差是在具体的仿真参数设定下得到的,实际测量精度主要与重复频率的精度及测量距离的大小有关。图8(a)即在固定目标距离10 km情况下,给出了不同的重复频率扫描精度所对应的仿真测距误差水平。现阶段重复频率精度完全可以控制在0.01~0.001 Hz精度水平,此时所对应的残余误差水平是完全

可以满足亚微米空间测距精度要求的,而且该水平所对应的光梳频率稳定度只是 10^{-11} 水平,而其潜在稳定度能提高到 10^{-16} 。因此,在提高重复频率的精度情况下有望实现纳米级精度测量。图8(b)描述的是在扫描频率精度0.01 Hz的情况下测距误差量与目标距离之间的关系,根据(1)式可知本文介绍的测量方法是建立在重复频率的精度上,因此此时的误差量与目标距离基本成比较明显的线性关系。对于一般距离的空间测距需求,如卫星编队等,完全可以达到亚微米测量精度水平,但如果要测量几百公里的目标距离,就需要更高的重复频率精度和稳定度。

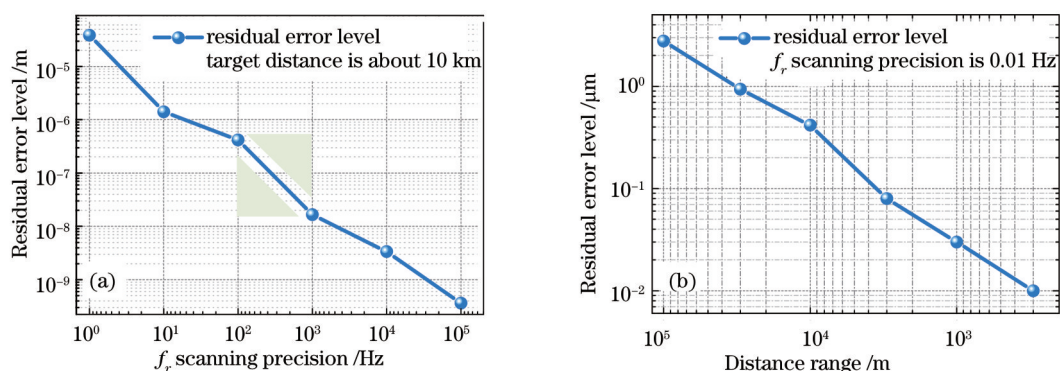


图8 不同仿真参数与测距精度的关系。(a)不同重复频率扫描精度下的测距误差水平;(b)不同目标距离下的测距误差水平
Fig.8 Relationship between simulation parameters and distance measurement precision. (a) Residual error levels of different target distance ranges; (b) residual error levels of different f_r scanning precision

5 结 论

在结合飞行时间法测距和光学脉冲互相关技术测距的基础上,建立了测距基本理论模型,并进行了相应仿真实验验证。仿真结果说明,该方法的测距精度与重复频率扫描精度和目标距离相关,当目标距离为10 km、重复频率扫描精度为0.01 Hz时,脉冲间非模糊量程内的线性测试所得到测距精度优于450 nm,测距残余误差的峰谷(PV)值为780 nm,验证了该方法实现亚微米级甚至纳米量级大量程空间精密测距的可行性,将成为未来空间定位技术的重要技术参考。

参 考 文 献

- 1 P L Bender, J L Hall, J Ye. Satellite-satellite laser links for future gravity missions [J]. Space Sci Rev, 2003, 108(1-2): 377-384.
- 2 Zheng Wei, Hu Houze, Zhong Min, *et al.*. Precise recovery of the earth's gravitational field by GRACE Follow-On satellite gravity gradiometry method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1415-1423.
郑 伟, 许厚泽, 钟 敏, 等. 基于 GRACE Follow-On 卫星重力梯度法精确反演地球重力场[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1415-1423.
- 3 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.
郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.
- 4 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen, *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312001.
晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312001.
- 5 N Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry [J]. Meas Sci & Technol, 1993, 4(9): 907-926.
- 6 John L Hall. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies [J]. Rev Modern Phys, 2006, 78(4): 1279-1295.
- 7 Scott A Diddams. The evolving optical frequency comb [J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B51-B62.
- 8 Nathan R Newbury. Searching for applications with a fine-tooth comb [J]. Nature Photonics, 2011, 5(4): 186-188.
- 9 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.
- 10 S W Kim. Combs rule [J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 313-314.

- 11 J Lee, K T Lee, Y S Jang, *et al.*. Testing of a femtosecond pulse laser in outer space [J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 5134.
- 12 L C Sinclair, I Coddington, W C Swann, *et al.*. Operation of an optically coherent frequency comb outside the metrology lab [J]. *Opt Express*, 2014, 22(6): 6996–7006.
- 13 S Hyun, Y J Kim, Y Kim, *et al.*. Absolute length measurement with the frequency comb of a femtosecond laser [J]. *Meas Sci & Technol*, 2009, 20(9): 095302.
- 14 Nicolas Schuhler, Yves Salvadé. Frequency comb referenced two-wavelength source for absolute distance measurement [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(21): 3101–3103.
- 15 Wang Guochao, Wei Chunhua, Yan Shuhua. Wavelength selection and non-ambiguity range analysis for optical-comb-referenced multi-wavelength absolute distance measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0412002.
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): 0412002.
- 16 K N Joo, S W Kim. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. *Opt Express*, 2006, 14(13): 5954–5960.
- 17 Y S Jang, K Lee, S Han, *et al.*. Absolute distance measurement with extension of nonambiguity range using the frequency comb of a femtosecond laser [J]. *Opt Eng*, 2014, 53(12): 122403.
- 18 J Lee, Y Kim, K Lee, *et al.*. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(10): 716–720.
- 19 I Coddington, W C Swann, L Nenadovic, *et al.*. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 351–356.
- 20 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.
- 21 J Ye. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(10): 1153–1155.
- 22 R L Ward, R Fledderman, Francis, *et al.*. The design and construction of a prototype lateral-transfer retro-reflector for inter-satellite laser ranging [J]. *Class Quantum Grav*, 2014, 31(9): 095015.
- 23 R Flatscher, A Cabral, M Abreu, *et al.*. HAALDM-Final Report [OL]. <http://www.nat.vu.nl/en/sec/atom/Publications/pdf/ESA-HAALDM-Report.pdf>. [2014-01-07].
- 24 J Ye, S T Cundiff. *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications* (1st Ed.) [M]. Norwell, MA: Springer, 2004: 12–23.
- 25 Xu Yan, Zhou Weihua, Liu Deming. Numerical experiment and analysis of cross-correlation between pulses of femtosecond laser sequence [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1108002.
许艳, 周维虎, 刘德明. 飞秒激光脉冲序列互相关的数值模型与分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1108002.

栏目编辑: 何卓铭