

DOI: 10.7652/xjtuxb201309013

一种光纤组量程扩增的激光频率 扫描干涉绝对测距系统

吕涛, 刘志刚, 邓忠文, 陶龙, 龚海

(西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为解决激光频率扫描干涉(FSI)测距系统随着目标距离增大测量精度下降的问题,提出了一种利用光纤组量程扩增技术实现大尺寸绝对测距的精度补偿方法。采用参考光路光程可变递增的方法,建立了光纤组量程扩增的激光频率扫描干涉绝对测距系统,通过 FSI 原理实现了量程扩增部分光程差的自标定。对应不同测量目标,通过粗测和精确测量,实现了系统原点自标定、光纤通道切换和目标值的精确测量。实验结果表明,在测量距离大于 3 000 mm 后,光纤组量程扩增测距系统具有更高的绝对距离测量重复精度,在 6 700 mm 目标位置的绝对距离重复精度比 FSI 测距系统的重复精度提高了 $2.4\ \mu\text{m}$,并且在大尺寸测量方面更具有一定的优势。

关键词: 激光频率扫描干涉;光纤组量程扩增;原点自标定;大尺寸测量

中图分类号: TH161.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0077-06

A Range Amplified Absolute Distance Measurement System with Laser Frequency Sweeping Interferometry by Optical Fiber Pairs

LÜ Tao, LIU Zhigang, DENG Zhongwen, TAO Long, GONG Hai

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A precision compensation method for large scale of absolute distance measurement with range amplification technology by optical fiber pairs is proposed, which can be used to maintain measurement accuracy for laser frequency sweeping interferometry (FSI) system with object distance's accretion. A range amplified absolute distance measurement system with laser frequency sweeping interferometry is established by a variable and incremental reference path, the optical path difference of the range amplified part is self-calibrated in FSI measuring way. The origin of the system is self-calibrated and the reference path is switched after rough measurement, then the measuring result is achieved after fine measurement. The range amplified system with optical fiber pairs has a higher absolute distance repeatability precision when the object distance gets larger than 3 000 mm. The repeatability precision of the range amplified system is increased by $2.4\ \mu\text{m}$ compared with FSI system for absolute distance of 6 700 mm.

Keywords: laser frequency sweeping interferometry; range amplification with optic fiber pairs; self-calibration of the origin; lager scale metrology

目前,高精度大尺寸的绝对距离测量(ADM)已 在空间大尺寸无导轨测量和大型工件生产加工的在

收稿日期: 2013-02-01。 作者简介: 吕涛(1988—),男,博士生;刘志刚(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975225,50935006);国家“863 计划”资助项目(2012AA040701)。

网络出版时间: 2013-06-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130617.0840.003.html>

线检测^[1]中得到了广泛的应用。半导体激光频率扫描干涉(FSI)是一种很有前景的绝对距离测量方法,国内外对基于该方法的测距系统进行了大量的研究。美国密西根大学将FSI测距系统应用于正负电子对撞机(NLC)的探测器跟踪校对,在实验室环境450 mm距离下的测量精度达到了0.04 μm 。英国牛津大学应用FSI测距系统对欧洲核子中心的大型强子对撞机(ATLAS)进行了精密装配的检测。

在大尺寸绝对测距方面,荷兰里斯本大学的Cabral等人将FSI测距系统应用于欧洲航天局的达尔文空间计划,为了扩大测量距离,采用标定光程的单根光纤作为参考光路,在70 m的测量距离下,测量精度达到了32 μm ,但此系统只能用于70 m左右的小范围测量^[2]。天津大学将准白光干涉应用于绝对测距系统,实现了10 m以上的大范围测量,但需要一个较短的扫描移动导轨。利用光栅线位移传感器进行定位,为整个测量系统提供了零位信号^[3],但该系统相对复杂,没有从真正意义上脱离导轨。

本文对外腔可调谐半导体激光器的特性进行了研究,在激光频率扫描干涉测距系统的基础上,分析了光程差对FSI系统测量精度的影响,确定了FSI系统最优光程差的范围。在此基础上,引入自标定光纤组实现测量系统的量程扩增,通过自标定建立了系统原点,实现了大尺寸范围绝对距离的高精度测量。

1 FSI测距系统原理

FSI测距系统由外腔可调谐半导体激光器、F-P扫描干涉仪、迈克尔逊双光束干涉的激光干涉光路、光电探测器、环境参数传感器、数据采集卡以及相应的PC软件组成。FSI测距系统测量距离的原理如图1所示^[4]。可调谐半导体激光器在一定范围内调谐激光频率,输出对应波长。在激光干涉光路中,空间光分别经过反射棱镜1、2反射,在分光棱镜2处形成迈克尔逊干涉,通过光电探测器2得到干涉信号,由探测器1提取F-P扫描干涉仪产生的脉冲信号,用以获取迈克尔逊双光束干涉的条纹数。

测量光路和参考光路的光强分别为 I_1 、 I_2 ,则干涉信号对应的光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (1)$$

式中: ϕ_1 、 ϕ_2 分别为 I_1 、 I_2 的相位。测量光路与参考光路的相位差

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = 2\pi |l_1 - l_2| (\nu/c) \quad (2)$$

式中: l_1 、 l_2 分别为两束光的光程; ν 为光束光频; c 为光速。

实验中采用理想状态下的激光器线性扫频,以带补偿的三角波作为驱动信号,产生干涉信号,得到的干涉条纹数

$$N = |l_1 - l_2| (\Delta\nu/c) \quad (3)$$

式中: $\Delta\nu$ 为光频变化量。由式(3)可得测量光路与参考光路的光程差

$$l = |l_1 - l_2| = Nc/\Delta\nu \quad (4)$$

在实际光路中,空间光走的是往复路径,这样得到的到目标镜的距离实际为光程差的一半,则系统测量距离为^[4]

$$D = \frac{l}{2} = \frac{Nc}{2\Delta\nu n} = \frac{Nc}{2rFn} \quad (5)$$

式中: F 为自由光谱范围; r 为时域上对应F-P扫描干涉仪信号的波峰数; n 为空气折射率。

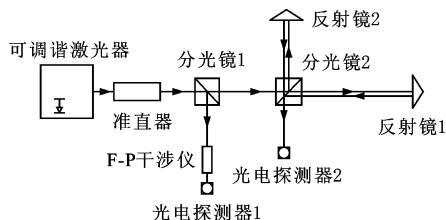
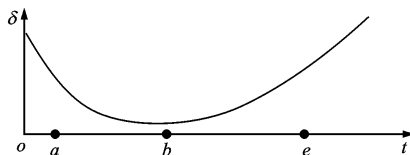


图1 FSI测距系统原理图

2 FSI测距系统的精度分析

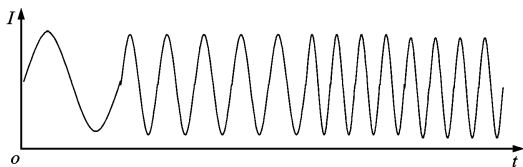
2.1 连续大范围测量存在的问题

根据式(5),在利用FSI测距系统进行连续测量时发现,随着目标距离的增大,测量臂和参考臂的光程差增大,测量结果的重复精度降低。由于光程差过小,因此测量重复精度也显著降低。光程差的变化会引起干涉信号条纹的变化,实验发现,FSI测距系统单次测量重复精度、干涉信号和光程差存在如图2所示的对应关系。 a 、 b 、 e 点对应的干涉信号逐



δ : 测量重复精度; a 、 b 、 e : 光程差从小到大增大过程中的典型点

(a) 重复精度随光程差的变化



(b) 干涉信号随光程差的变化

图2 光程差对FSI测距系统的影响示意图

渐由疏变密,即干涉条纹数增多,同时对应于图 2a,系统在光程差较小的 a 点区域内测量重复精度较低,在以 b 为典型点的区域内保持相对稳定的高精度,在 c 点代表的大光程差范围,系统的测量重复精度下降明显。

2.2 测量重复精度与光程差变化的关系

相位的提取精度和 $\Delta\nu$ 的精度决定了 FSI 测距系统的测量重复精度。由式(5)可得测量结果以标准差评定的重复精度的合成表达式为

$$\delta_D = \left[\left(\frac{c}{2nFr} \delta_N \right)^2 + \left(\frac{cN}{2nF^2r} \delta_F \right)^2 + \left(\frac{cN}{2nFr^2} \delta_r \right)^2 + \left(\frac{cN}{2n^2Fr} \delta_n \right)^2 \right]^{1/2} = D \left[\left(\frac{\delta_N}{N} \right)^2 + \left(\frac{\delta_F}{F} \right)^2 + \left(\frac{\delta_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\delta_n}{n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: δ_N 、 δ_F 、 δ_r 、 δ_n 分别为 N 、 F 、 r 、 n 的重复精度。由 N 、 F 的范围、 r 和 n 的精度决定最终测量的重复精度。

在式(6)中, F 、 r 的精度由 F-P 扫描干涉仪的性能和标定决定,不随光程差的改变而变化。式(6)中 $\frac{\delta_F}{F}$ 、 $\frac{\delta_r}{r}$ 、 $\frac{\delta_n}{n}$ 是与测量距离无关的量,随着光程差的增大,这 3 项误差以光程差 D 为倍数增大,从而导致测量结果的精度下降^[5]。

实验中采用 F-P 扫描干涉信号相邻波峰截取对应的双光束干涉信号,从而得到对应的相位值。干涉信号相位分为整数、小数部分,整数部分通过最小二乘查找波峰波谷直接得到,小数部分由起始终止不完整周期与相邻局部半周期的比值确定,如图 3 所示^[6]。

干涉信号的采样频率为 F_s , F-P 扫描干涉仪相邻波峰的间隔时间为 Δt , 在对应时间内采样点数 $M = F_s \Delta t$ 。随着光程差的增大(见图 2b),干涉信号由疏变密,信号在 Δt 时间内变得稠密,分配到单个整周期信号上的拟合点数减小,导致采用最小二乘检测相位求取的精度降低。随着光程差的增大,空气扰动和振动的影响也将增大,从而对测量结果的精度产生影响^[7]。另一方面,当光程差过小,干涉信号相位仅由小数部分组成时,由于驱动信号为非线性,因此导致干涉信号不是严格的等周期信号。通过与干涉信号的邻近半周期相比,可知相位的小数部分同样降低了相位的提取精度,光程差变化对干涉信号的影响如图 3 所示。

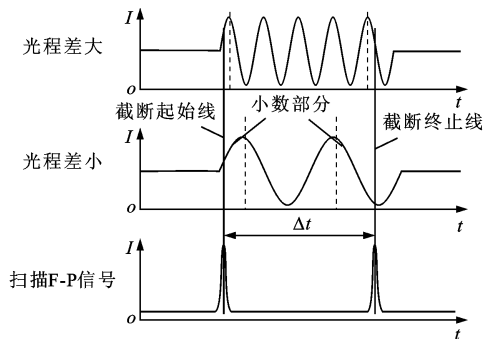


图3 干涉信号与光程差变化的对应关系

3 光纤组量程的扩增测距系统

FSI 频率扫描测距系统存在一段最优光程差范围,在此范围内可保持稳定的较高精度。随着目标距离的增大,如果适当地增大参考光路的光程,使测量系统光程差在最优范围内,则可以在一定程度上提高测量结果的重复精度。

3.1 频率扫描测距系统

FSI 测距系统实现大范围连续测量的条件是测量时系统需要有一个统一的原点,每次测量相对于相同原点得到一个绝对距离值。通过引入光纤、光开关等元件,并随着测量目标距离的增大来适时切换参考光路,以保证测量系统的光程差在最优范围内,从而实现系统量程的扩增^[8]。

如图 4 所示,系统由激光源和 F-P 扫描干涉仪、参考光程切换光纤组、标定与测量模块 3 部分构成,系统可以进行原点标定、量程扩增,以及实现大尺寸的连续测量。

3.2 量程扩增光纤组光程差的 FSI 自标定

由于 FSI 测量光路存在一个最优光程差的测量范围,如果测量臂和参考臂分别只有一路,随着测量目标的扩大,光程差将增大,因此导致测量精度降低。

为了控制光程差,系统加入了参考光路切换光纤组。在图 4 中,由光开关、耦合器和 2 根保偏光纤组成了一个光纤组,系统包括 m 个光纤组,参考光路有 $2m$ 根光纤提供切换。光纤组按序列分为奇偶两部分,奇数部分对应序号为 $[1] \sim [2m-1]$ 的光纤,偶数部分对应序号为 $[2] \sim [2m]$ 的光纤,图 4 中 $[1] \sim [2m]$ 为完整切换光路。这种光纤交叉分布可以保证相邻序号的光纤位于奇偶不同的光纤组,在进行自标定时分别通过 a 、 b 光路形成迈克尔逊双光束干涉。记相邻序号的光纤光程差分别为 $L_{1,2}$, $L_{2,3}$, $\dots$, $L_{(2m-1) \sim 2m}$, 需要保证光纤光程差在最优光程差 A 的范围内,并满足

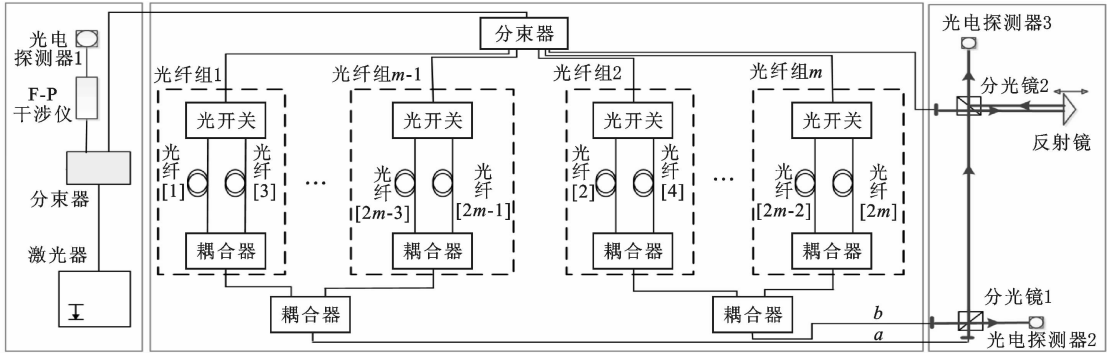


图 4 光纤组量程扩增频率扫描测距系统的原理图

$$\left. \begin{aligned} L_{1,2} &\leq A \\ L_{2,3} &\leq A \\ &\vdots \\ L_{(2m-1),2m} &\leq A \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

图 4 中, 标定光纤[1]、[2]的光程差, 分别打开光开关的对应通道, 光经过 a 、 b 光路, 在分光镜 1 处形成双光束干涉, 通过 FSI 测距原理以及式(5)得到光纤组[1]、[2]对应的光程差 $L_{1,2}$ 。同理, 在标定序列号为 $[2m-1]$ 、 $[2m]$ 的光纤时, 分别控制光开关打开相应通道, 两路光经过 a 、 b 光路, 在分光镜 1 处形成迈克尔逊双光束干涉, 即可得到对应的光程差 $L_{(2m-1),2m}$ 。

3.3 光纤组量程扩增系统的标定与测量过程

对已完成的光纤组光程差标定进行测量, 如图 5 所示, (1)~(2m+1) 为测量目标镜的 $2m+1$ 个临界位置, $L_1 \sim L_{2m}$ 为 $2m$ 根光纤通道分别对应的测量范围, $Z_1 \sim Z_{2m}$ 为测量时对应的系统不同参考光路光程差的零点位置, $d_1 \sim d_{2m}$ 为测量过程中不同参考光纤通道对应的典型位置。

将光开关控制光纤打开, 目标镜置于分光镜 2 光路出射位置(1), 得到测量值 X , 标记 X 值对应的位置①为系统原点。移动目标镜至某一位置, 同样在参考光路为光纤下得到测量值 Y 。若

$$Y + X \leq 2A \quad (8)$$

则目标落在(1)~(2)之间的 d_1 点, 并用光纤通道完成测量。相对于原点的测量距离为

$$L_{d_1} = \left| \frac{Y \mp X}{2} \right| \quad (9)$$

此时由于目标距离较近, 式(8)中正负计算符号的不同由目标相对于光纤通道的零点位置 Z_1 决定。采用单根光纤完成测量, 为保证测量精度, 测量在最优光程差范围内进行。若 2 次测量结果

$$Y + X \geq 2A \quad (10)$$

则需要根据式(10)的具体数值来确定光纤通道的切换策略。对于任一次测量, 记测量数值

$$kA \leq Y + X \leq (k+1)A \quad (2 \leq k \leq 2m) \quad (11)$$

式中: k 为与光纤序号相关的正整数。式(11)表明此次测量落在序号为 $[k]$ 的光纤测量区域内, 此时, 通过光开关控制打开参考光路中序号为 $[k]$ 的光纤通道, 再次测量, 得到测量数值 Z 。此次测量位置点相对于系统原点的绝对距离为

$$L_{d_k} = Z + \sum_{i=1}^{k-1} L_{i \sim (i+1)} + X/2 \quad (12)$$

对于任一次测量, 需要先通过粗测, 得到目标点对应于光纤通道的位置分布后, 再按式(8)、式(10)判断是否超出最优光程差的范围, 若没有超出最优光程差的范围, 则利用单根光纤作为参考光路按照式(9)进行测量; 若超出, 则按照式(11)切换参考光路光纤, 减小光程差至最优测量范围内, 再进行精确测量。按照式(12)可得到目标点相对于系统原点的绝对距离。

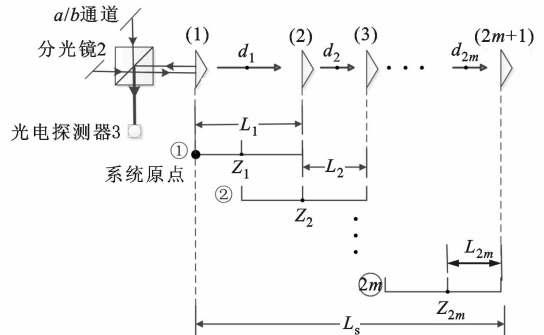


图 5 光纤组量程扩增系统的标定测量过程

作为系统光程差零点的 $Z_1 \sim Z_{2m}$, 每一光纤通道的光程差零点位置由上一参考光路的光纤测量得到, 从而解决了 FSI 测距系统光程差为零时无法测量的问题, 实现了光纤切换时系统的连续测量。光

纤组量程扩增的频率扫描测距系统的量程为

$$L_s = L_1 + L_2 + \cdots + L_{2m} \quad (13)$$

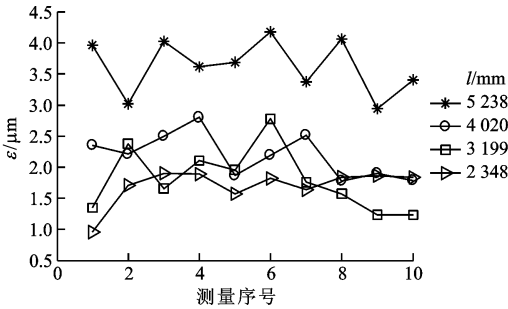
按照式(13)将量程扩增后,系统的量程将显著增大,在实际测量中考虑到激光的光强对干涉信号的影响,以及目标距离增大后振动和空气扰动等因素,系统的量程将在一定范围内进行扩增。

4 实验结果与分析

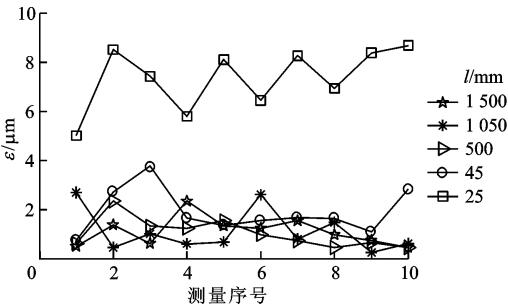
4.1 最优光程差范围的确定

为了确定 FSI 测距系统最优光程差的范围,在实验环境(n 均值为 1.003 217,气浮平台)下,在 5 200 mm 的测距范围内改变光程差,并对应光程差的每个位置点进行多组测量,每组测量采集多个数据,取标准差 ϵ 得到单次测量的重复精度,在 l 为 2 300~5 200 mm 内得到如图 6a 所示的标准偏差分布,可见随着 l 的增大,测量结果重复精度逐渐降低,在 l 大于 5 200 mm 后,重复精度发生明显下降。

在 l 为 0~2 000 mm 范围内,测量结果的重复精度分布如图 6b 所示, l 在 45~1 500 mm 内,测量重复精度稳定在 2 μm ,若 l 再减小,重复精度下降会较大。



(a) l 为 2 300~5 200 mm 的标准差分布



(b) l 为 25~1 000 mm 的标准差分布

图 6 光程差对系统重复精度的影响

图 7 显示单点测量重复精度随光程差变化的分布规律。根据量程扩增系统的精度要求,确定测量重复精度在 3 μm 以内,FSI 测距系统的最优光程差范围为 50~4 000 mm。

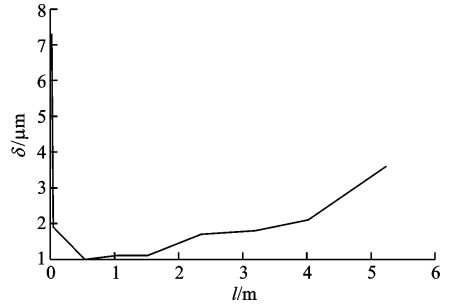


图 7 系统单点测量重复精度随光程差的变化曲线

4.2 标定测量实验结果

在实验室条件下(绝对距离 7 000 mm 内)进行连续测量,整个测量过程均在同一气浮平台上进行,可有效减小振动对实验结果的影响。实验中光学平台的长为 2 000 mm,为了达到 7 000 mm 的测量距离,图 8 采用了平面镜的多次反射来扩大量程,以保证实验在同一振源上进行。

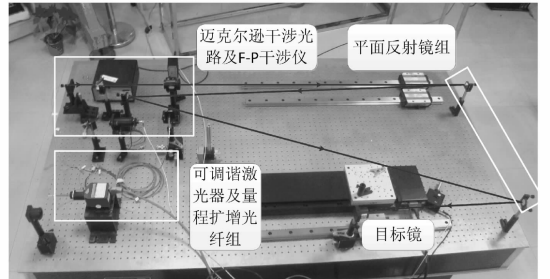


图 8 标定测量实验系统图

在 FSI 测距系统中,分别得到原点和目标点的测量值 X 、 Y ,则 FSI 系统的绝对测距精度为

$$\delta_L = \frac{(\delta_X^2 + \delta_Y^2)^{1/2}}{2} \quad (14)$$

实际测量中, $2A \leq Y + X \leq 3A$,根据式(11),需要切换参考光路至光纤[2],在此基础上,由精确测量得到单点测量值 Z ,而此次测量的绝对距离

$$L = \frac{Z + L_{1,2} + X}{2} \quad (15)$$

光纤组量程扩增系统在 4 000 mm 以内的绝对距离精度合成与式(14)相同,绝对距离超过 4 000 mm 时,光纤组量程扩增系统的绝对测距精度为

$$\delta_L = \frac{(\delta_Z^2 + \delta_{L_{1,2}}^2 + \delta_X^2)^{1/2}}{2} \quad (16)$$

传统 FSI 测距系统随着目标距离的增大,光程差变大,由图 7 得到绝对距离超过 4 000 mm 后,绝对距离的重复精度下降明显,因此光纤组量程扩增系统在目标增大时应适当切换参考光路,以降低光程差变化对系统精度的影响。图 9 显示在测量目标相对于系统原点距离为 7 000 mm 时,绝对距离测量

的重复精度。由图可看出,光纤组量程扩增系统大范围测量的重复精度显著提高,在绝对距离 6 700 mm 处的绝对距离测量重复精度由 0.005 9 mm 提高到了 0.003 5 mm。可见,在 3 000 mm 的测量范围内,FSI 测距系统和量程扩增系统的测量精度都很高,随着目标距离的增大,光纤组量程扩增测距系统具有更高的绝对距离测量重复精度。

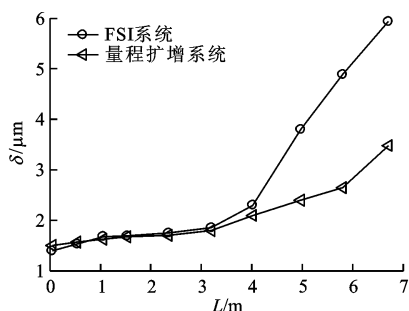


图9 2种测距系统测量重复精度的对比曲线

5 结 论

本文以 FSI 测距系统为基础,研究分析了影响系统精度的因素,提出了完整的测距精度补偿方法。通过光程差变化对 FSI 测距系统的测量重复精度影响的分析,确定了 50~4 000 mm 为最优光程差的测量范围。

根据最优光程差的测量范围,本文采用参考光路光程可变递增的方法,建立了光纤组量程扩增测距系统。参考光路的不同光纤光程,通过 FSI 原理实现了自标定。引入光开关、耦合器等作为关键元件,通过粗测和精确测量,提出了完整的切换、测量策略,从而实现了系统原点标定、参考光路切换和系统的连续测量。

在绝对距离 7 000 mm 范围内实现连续测量时,与 FSI 测距系统相比,在目标距离较近时,FSI 测距系统和量程扩增系统测量的重复精度相当。当目标距离较远引起测量光路和参考光路的光程差超过最优范围时,光纤组量程扩增系统可通过切换通道得到较高的绝对距离的测量重复精度。在超过绝对距离 3 000 mm 的目标内,光纤组量程扩增系统的测量精度提高显著,在绝对距离为 6 700 mm 时,测量精度可提高 2.4 μm。

参考文献:

- [1] THIEL J, PFEIFER T, HARTMANN M. Interferometric measurement of absolute distances of up to 40 m

[J]. Measurement, 1995, 16(1): 1-6.

- [2] CABRAL A, ABREU M, REBORDAO J M. Dual-frequency sweeping interferometry for absolute metrology of long distances [J]. Optical Engineering, 2010, 49(8): 085601-085614.
- [3] 段发阶, 杨蓓, 叶声华. 大量程光纤准白光干涉绝对测距技术 [J]. 科学技术与工程, 2002, 2(4): 56-58. DUAN Fajie, YANG Bei, YE Shenghua. Quasi-white light optical fiber interferometer for large range absolute distance measurement [J]. Science Technology and Engineering, 2002, 2(4): 56-58.
- [4] YANG Haijun, DEIBEL J, NYBERG S, et al. High-precision absolute distance and vibration measurement with frequency scanned interferometry [J]. Applied Optics, 2005, 44(19): 3937-3944.
- [5] CABRAL A, REBORDAO J M. Accuracy of frequency-sweeping interferometry for absolute distance metrology [J]. Optical Engineering, 2007, 46(7): 07360201-07360210.
- [6] 吴俊清. 相位差的数字化测量研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 99-104. WU Junqing. Research of digital measurement for phase difference [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(1): 99-101.
- [7] YE Jun. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe [J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [8] 安连生. 应用光学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 216-237.

[本刊相关文献链接]

- 邓忠文, 刘志刚, 陶龙, 吕涛, 令锋超. 新型可调谐外腔半导体激光器光频扫描干涉测距方法. 2013, 47(5): 104-109. [doi: 10.7652/xjtuxb201305019]
- 汪霖, 曹建福, 韩崇昭. 基于空间球的三维激光扫描仪标定算法. 2013, 47(4): 79-85. [doi: 10.7652/xjtuxb201304014]
- 邓玉芬, 郭俊杰, 王金栋, 李海涛. 激光跟踪仪在重型车床几何精度检测中的应用. 2013, 47(1): 74-79. [doi: 10.7652/xjtuxb201301015]
- 邹超荣, 吴九汇, 何卫锋, 程礼. 激光冲击强化技术的理论模型及参数优化研究. 2013, 47(1): 96-100. [doi: 10.7652/xjtuxb201301019]
- 赵军, 赵继, 张雷. 焊缝结构光图像处理与特征提取方法. 2013, 47(1): 114-119. [doi: 10.7652/xjtuxb201301022]
- 梁晓轩, 王晶, 张镇西. 纳米尺度激光紧聚焦光穿孔技术. 2012, 46(10): 107-115. [doi: 10.7652/xjtuxb201210019]

(编辑 管咏梅)