

低相干光干涉法延时测量中的误差分析

闫成至 李尚远 郑小平 张汉一 周炳琨

(清华大学电子工程系信息技术国家实验室, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 低相干光干涉法通过测量宽谱光通过待测器件之后的相位变化得到其相对延时量。采集宽谱光时域干涉数据, 利用傅里叶变换提取出频域相位信息后再进行相位展开、多项式拟合处理, 所得相位曲线对频率求导可得待测延时曲线。延时测量误差来源于干涉信号强度误差和纯相位误差。理论分析和仿真计算表明, 延时误差与相位误差成正比; 强度噪声引起的相位误差与噪声强度成正比, 且该类噪声可通过曲线拟合算法得到有效抑制。实验表明, 温度等环境因素引起的纯相位误差是延时测量误差的主要因素。实验上, 对约 19 m 光子晶体光纤于 1540~1560 nm 波段的相对延时进行了测量, 达到了 0.14 ps 的精度。

关键词 测量; 低相干光干涉; 延时误差; 傅里叶变换; 多项式拟合

中图分类号 O436; TN427 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0108003

Time Delay Error in Optical Low Coherence Interferometry

Yan Chengzhi Li Shangyuan Zheng Xiaoping Zhang Hanyi Zhou Bingkun

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Relative time delay of the optical device under test (DUT) is measured by optical low coherence interferometry by measuring the phase change of a broadband light after passing through it. The interference patterns of broadband light are recorded and analyzed using Fourier transform (FT) to calculate the phase change of the broadband light in frequency domain. The polynomial fitting algorithm is used to smooth the calculated phase curve. The derivation of phase delay curve versus frequency is the measured time delay. Measurement error of time delay comes from the intensity noise and pure phase noise of interference patterns. Theoretical analysis and simulation calculations show that the time delay error is directly proportional to phase error, and the phase error due to intensity noise is directly proportional to the noise too and it can be eliminated by polynomial fitting algorithm. Experimental results show that the instability of the phase characteristic of the DUT is mainly due to temperature variation, which is also the main source of measurement error. The relative time delay of a section of photonic crystal fiber (PCF) about 19 m from 1540 to 1560 nm is measured and the best precision reaches sub-picoseconds.

Key words measurement; optical low coherence interferometry; time delay error; Fourier transform; polynomial fitting

OCIS codes 120.3180; 120.5050; 060.5295

1 引言

低相干光干涉法用于光学器件延时、色散和长度等参数的测量时, 具有结构简单、成本低和精度高

等优点。基于低相干光干涉的测量方法之一是利用傅里叶变换提取低相干光干涉信号的频域信息, 再通过适当处理得到待测参数^[1]。1979 年 J. R. Birth

收稿日期: 2010-05-18; 收到修改稿日期: 2010-07-12

基金项目: 国家 973 计划(2006CB302805)资助课题。

作者简介: 闫成至(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事低相干光延时测量方面的研究。

E-mail: yancz07@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 郑小平(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光通信网络和微波光子学等方面的研究。

E-mail: xpzheng@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

等^[2]曾详细阐述傅里叶变换低相干光干涉测量法的原理。之后从1987~2010年,该方法不断被用于各种光学器件参数的测量^[3~10]。测量实验中,噪声与误差是最关键的问题,但目前针对低相干光干涉系统中噪声和误差的分析却非常少。仅在1992年,W. V. Sorin等^[11]证明减小参考臂光束强度可提高干涉信号的信噪比。1998年Kazumasa^[12]导出该系统中噪声谱密度公式并分析了偏振对测量的影响。本文分析了低相干光干涉法延时测量数据处理过程中的误差传递关系,研究了实验中存在的各种噪声对延时测量误差的影响,并指出测量中误差的主要来源。

2 测量原理

图1为基于低相干光干涉法测量光学器件延时的示意图。宽谱光经耦合器后分成两束,一束为信号光,通过待测器件,另一束为参考光,经准直器进入空间光路,经置于移动平台上的角锥棱镜反射后原路返回。当两路光光程差小于相干长度时会发生干涉,改变移动平台位置可得到干涉信号 $I(x)$,其中 x 为两路光的光程差。 $I(x)$ 可表达为

$$I(x) = I_0 \operatorname{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) \exp[i\phi(\omega)] \exp(-i\omega x/c) d\omega \right\}, \quad (1)$$

式中 $G(\omega)$ 为光源光谱, $\phi(\omega)$ 为宽谱光通过两路后的相位差, I_0 是一个常数, c 为真空中光速。根据傅里叶变换性质,可得

$$\phi(\omega) = \arctan \{ \mathcal{F}[I(x)] \}. \quad (2)$$

设宽谱光通过待测器件后群延时为 $t(\omega)$,根据定义可得

$$t(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega}. \quad (3)$$

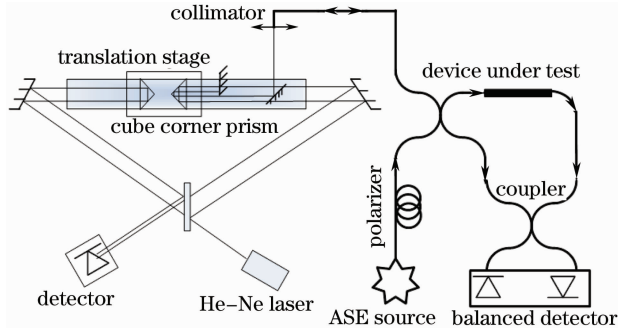


图1 低相干光干涉法延时测量原理图

Fig. 1 Time delay measuring system based on optical low coherence interferometry

实验中,需要用 He-Ne 激光干涉作刻度校准以获得等距离间隔的干涉信号。测量中同步采集宽谱光干涉信号与 He-Ne 激光干涉信号,筛选出 He-Ne 激光干涉信号过零点,取相应位置宽谱光干涉点为有效数据点,则各采样点之间空间距离都为 $\Delta x = \lambda_{\text{He-Ne}}/2$ 。实验中利用平衡探测器采集宽谱光干涉信号,可降低由宽谱光强不稳定引入的噪声^[9]。对干涉数据进行傅里叶变换,并求出光波长所对应各频率点的相位值。由于反正切函数的性质,求得的相位值范围在 $[-\pi, \pi]$ 内,需对其进行相位展开,得到连续变化的相位曲线。相位曲线经多项式拟合算法平滑后再对频率求导即可求得待测器件相对延时曲线。

3 误差传递关系

3.1 相位误差与强度噪声的关系

傅里叶变换过程中的误差传递关系曾被详细研究过^[13],此处可直接利用其结论。设噪声强度均方根为 U_n ,相位误差 $U_{\varphi(k)}$ 可表达为

$$U_{\varphi(k)}^2 = \frac{U_n^2}{2NM^2(k)}, \quad (k \neq 0) \quad (4)$$

式中频域幅度值 $M(k)$ 与信号强度及数据长度 N 都有关系,令 U_1 表示干涉信号幅度,则相位误差均方根为

$$U_{\varphi(k)} = \frac{U_1}{\sqrt{2NM^2(k)}} \cdot \frac{U_n}{U_1}, \quad (5)$$

式中 U_n/U_1 是噪声强度与干涉信号强度的比值。在光源性质以及待测器件延时量确定的情况下,系数 $U_1/\sqrt{2NM^2(k)}$ 是一个常数。在理想宽谱光源情况下,令待测器件在1540~1560 nm波段相对延时大小为300 ps,仿真计算得到系数大小约为1/3。

图2为仿真计算得到的相位误差与强度噪声之间的关系,可见仿真计算与理论分析符合得很好。

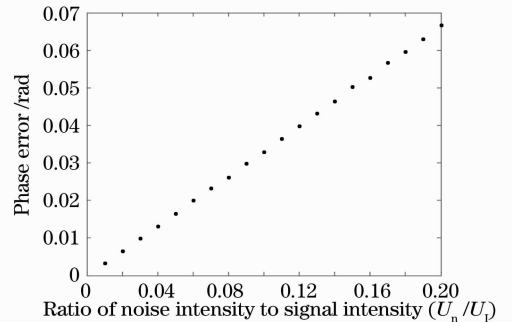


图2 相位误差与强度噪声的关系

Fig. 2 Phase error versus intensity noise

仿真计算中,使用高斯分布型的强度噪声,产生的相位误差分布如图3所示,可见高斯型强度噪声产生的相位误差也服从高斯分布。

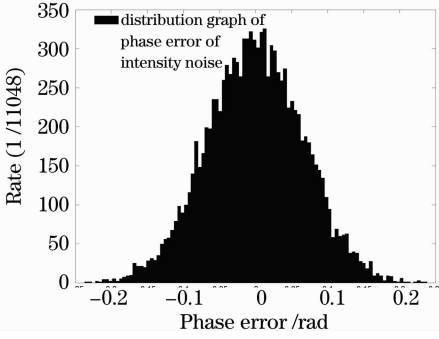


图3 相位误差直方分布图

Fig. 3 Distribution graph of phase error due to Gaussian intensity noise

3.2 延时误差与相位误差的关系

3.2.1 理论推导

由于噪声影响,为提高测量精度,求得的相位展开曲线需经过多项式拟合之后才可以求相对延时。拟合曲线求导所得延时曲线的精度与待拟合数据的长度有关,即与干涉信号频域信息中的宽谱光所相应频率点数有关。数据处理过程中(2)式的傅里叶变换对为干涉信号空间位置 x 与宽谱光空间频率 ω/c ,信号采样点间空间距离 $\Delta x = \lambda_{\text{He-Ne}}/2$ 。设采样点数为 N ,根据傅里叶变换性质,频域相邻点之间角频率间隔为 $4\pi c/(N\lambda_{\text{He-Ne}})$ 。则波长为 λ 的光波对应的频率点次序为 $N\lambda_{\text{He-Ne}}/(2\lambda)$ 。当宽谱光波长范围为 $[\lambda_1, \lambda_2]$,宽谱光所对应频率点数或有效频率点数 n 可表达为

$$n = \left(\frac{N\lambda_{\text{He-Ne}}}{2\lambda_1} \right) - \left(\frac{N\lambda_{\text{He-Ne}}}{2\lambda_2} \right). \quad (6)$$

用 y 表示求得各频率点相位值,对其做三次多项式拟合

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3, \quad (7)$$

各频率点间相位差对频率求导可得相对延时

$$\tau(\omega) = \frac{\Delta y}{\Delta \omega} = \frac{b_1 + 2b_2x + 3b_3x^2}{\Delta \omega}, \quad (8)$$

式中 $\Delta \omega = \frac{4\pi c}{N\lambda_{\text{He-Ne}}}$ 为各频率点之间的频率间隔。

令

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & n & n^2 & n^3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [b_1 \quad 2b_2 \quad 3b_3 \quad 0],$$

则各频率点相位以及各频率点之间的相位差可用矩阵表达为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{XB}, \quad (9)$$

$$\Delta \mathbf{Y} = \mathbf{CX}^T, \quad (10)$$

式中 \mathbf{X}^T 为 \mathbf{X} 的转置矩阵。根据矩阵算法可求得多项式系数矩阵

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}. \quad (11)$$

(8)~(11)式共同给出了各频率点相对延时与相位之间的关系,根据误差传递公式即可求得各频率点延时测量误差。假设各频率点相位误差相等,即 $U_{y_i} = U_y = U_\varphi$ 。令 $N = 2^{22}$, $\lambda_1 = 1540 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1560 \text{ nm}$,可得延时误差

$$U_{\tau(\omega)} = 2.59U_\varphi (\text{ps/rad}). \quad (12)$$

(12)式表明多项式拟合后所得延时的误差与相位误差成正比关系。结合(5)式可知,延时误差与强度噪声也成正比关系。

3.2.2 仿真计算

仿真计算表明,当相位噪声服从高斯分布,且均方值较小的情况下,延时误差远小于(12)式所表达的值。在噪声强度小于信号强度五分之一的情况下,延时误差与噪声强度基本成正比例关系。图4为仿真计算得到的延时误差与强度噪声之间的关系,用公式表达为

$$U_{\tau(\omega)} = 2.4 \times \frac{U_n}{U_1} (\text{fs}). \quad (13)$$

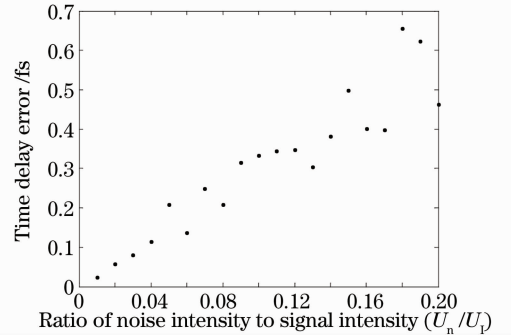


图4 延时误差与强度噪声的关系

Fig. 4 Time delay error versus intensity noise

多项式曲线拟合算法本身具有滤波作用,故而可以抑制噪声。图5为当高斯型强度噪声存在时,按照相位曲线是否经过多项式拟合,通过仿真计算得到的延时曲线对比图。

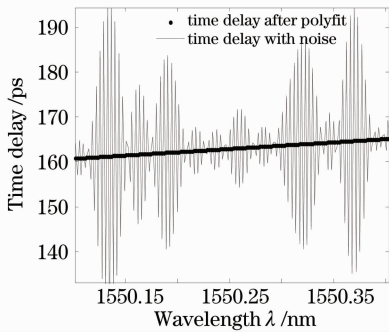


图 5 强度噪声存在时曲线拟合前后的延时曲线

Fig. 5 Time delay curve before and after phase curve polynomial fitting with intensity noise existing

(12), (13)式虽给出两个延时误差估算公式,但并不矛盾,因为二者的适用范围是不一样的。(12)式适用于普遍情况,而(13)式仅适用于相位误差服从高斯分布且均方值较小的情况。实际测量中,在分析各种噪声对延时测量误差的影响程度时,需要首先判断该噪声引起的相位误差均方值大小及其是否服从高斯分布,然后针对性地选择(12)式或(13)式进行估算。

4 实验中存在的噪声

低相干光干涉法延时测量系统中存在多种噪声,既包括接收器散粒噪声、热噪声和宽谱光拍频噪声等强度噪声,也存在由温度等环境因素引入的纯相位噪声。

4.1 强度噪声

实验中存在的强度噪声来源于接收器散粒噪声、热噪声以及宽谱光拍频噪声等。除光源性质外,噪声强度与干涉信号强度的比值还与待测器件延时量有关。对约 19 m 光子晶体光纤(PCF)进行测量,噪声强度约为信号强度的十分之一,图 6 为实际测量得到的干涉信号。图 7 为仿真计算得到的由该强

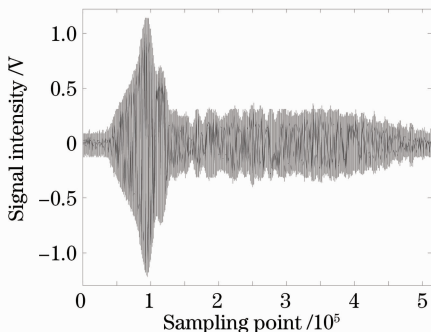


图 6 实验中测量到的宽谱光干涉信号

Fig. 6 Interference patterns of broadband light

度噪声所引起的相位误差分布图,可见由强度噪声引起的相位误差基本服从高斯分布,且均方值较小。由(13)式可知,测量中强度噪声对延时测量误差的影响在飞秒量级。

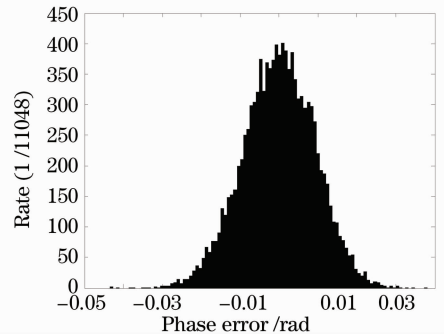


图 7 强度噪声引起的相位误差分布

Fig. 7 Distribution graph of phase error due to intensity noise

4.2 纯相位噪声

光子晶体光纤又被称为微结构光纤,其横截面上通常含有不同排列形式的气孔。环境温度变化会引起光子晶体光纤的热胀冷缩效应,其长度以及包层结构都会发生变化,这些变化都导致其相位特性的变化,使得延时测量结果出现波动。由于实验无法区分这种环境变化,只能将这种波动视为噪声,由此增加了测量误差。图 8 为某次测量得到的相位误差直方分布图,很明显其不服从高斯分布,并且其分布情况在各次测量中都会变化。因此,根据(12)式估算,该类相位噪声对延时误差的影响在飞秒量级。

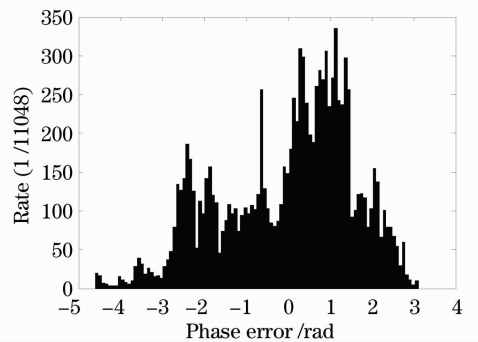


图 8 延时测量相位误差直方分布

Fig. 8 Distribution graph of phase error in measurement of PCF time delay

测量所用光子晶体光纤温度系数约为 $30 \text{ ps}/(\text{C} \cdot \text{km})^{[14]}$,即温度每变化 1 C ,待测器件延时量变化 0.6 ps 。实验中,将光子晶体光纤暴露在空气中测量,得到测量精度约为 1.7 ps 。用罩子将光子晶体光纤包围起来,减小空气流动引入温度变化的影响,对其相对延时再次测量,得到测量精度提高至 0.14 ps 。此对比

实验表明,温度等环境因素对待测器件相位特性的影响是测量误差的主要来源。图 9 为光子晶体光纤延时多次测量结果。

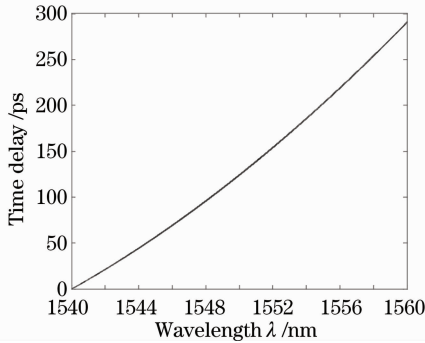


图 9 光子晶体光纤延时测量曲线
Fig. 9 Time delay curve of PCF

5 结 论

理论分析和仿真计算表明,干涉信号经傅里叶变换之后得到的相位误差与强度噪声成正比,相位曲线经多项式拟合后计算得到的延时曲线误差与相位误差也成正比关系。低相干光干涉法延时测量中,误差来源可分为强度噪声和纯相位噪声两种。强度噪声通过影响中间相位曲线计算结果来引入延时误差,该类噪声引起的相位误差基本服从高斯分布,可通过多项式拟合得到很好的抑制。纯相位噪声指由温度等环境因素引起的待测器件相位特性的变化,是实验中延时测量误差的主要来源。

参 考 文 献

- 1 Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1413~1420
江毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1413~1420
- 2 J. R. Birth, T. J. Parker. Dispersive Fourier Transform Spectroscopy in Infrared and Millimeter Waves[M]. New York: Academic, 1979

- 3 P. L. Francois, F. Alard, M. Monerie *et al.*. Chromatic dispersion measurement from Fourier transform of white-light interference patterns [J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23** (7): 357~358
- 4 M. J. Gander, R. McBride, J. D. C. Jones *et al.*. Experimental measurement of group velocity dispersion in photonic crystal fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(1): 63~64
- 5 S. D. Dyer, K. B. Rochford. Low-coherence interferometric measurements of fibre Bragg grating dispersion [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(17): 1485~1486
- 6 Carlos Palavicini, Yves Quiquempois, Guy Debarge. Phase-sensitive optical low-coherence reflectometry technique applied to the characterization of photonic crystal fiber properties [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4): 361~363
- 7 Philippe Hamel, Yves Jaouen, Renaud Gabet. Optical low-coherence reflectometry for complete chromatic dispersion characterization of few-mode fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 1029~1031
- 8 Xue Hui, Shen Weidong, Gu Peifu *et al.*. Thickness measurement of thin film based on white-light spectral interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (7): 1877~1880
薛辉, 沈伟东, 顾培夫等. 基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1877~1880
- 9 Wang Zefeng, Liu Xiaoming, Hou Jing. Broadband dispersion measurement of photonic crystal fiber based on supercontinuum white light interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1496~1500
王泽锋, 刘小明, 侯静. 基于超连续谱白光干涉仪的宽波段光子晶体光纤色散测量 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1496~1500
- 10 Yves Jaouen, Renaud Gabet, Philippe Hamel. Optical low-coherence reflectometry for characterization of specialty fibers and photonics crystal waveguides [C]. *SPIE*, 2008, **7099**: 70990M
- 11 W. V. Sorin, D. M. Baney. A simple intensity noise reduction technique for optical low-coherence reflectometry [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(12): 1404~1406
- 12 Kazumasa Takada. Noise in optical low-coherence reflectometry [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7): 1098~1108
- 13 Giovanni Betta, Consolatina Liguori, Antonio Pietrosanto *et al.*. Propagation of uncertainty in a discrete Fourier transform algorithm [J]. *Measurement*, 2000, **27**(4): 231~239
- 14 Liu Zhigang. Studies on Optical Controlled Microwave Beamforming Networks [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. 51~52
刘志刚. 光控微波波束形成网络的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007. 51~52