



频域反射法光纤延时精密测量

赵天择 杨苏辉 李坤 高彦泽 王欣 张金英 李卓 赵一鸣 刘宇哲

Accurate measurement of optical fiber time delay based on frequency domain reflectometry

Zhao Tian-Ze Yang Su-Hui Li Kun Gao Yan-Ze Wang Xin Zhang Jin-Ying Li Zhuo Zhao Yi-Ming
Liu Yu-Zhe

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 084204 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201075

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201075>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于金刚石氮-空位色心的精密磁测量

High-resolution magnetometry based on nitrogen-vacancy centers in diamond

物理学报. 2018, 67(16): 167601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181084>

万有引力常数G精确测量实验进展

Progress on the precision measurement of the Newtonian gravitational constant G

物理学报. 2018, 67(16): 160603 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181381>

基于金刚石色心自旋磁共振效应的微位移测量方法

A method of measuring micro-displacement based on spin magnetic resonance effect of diamond color center

物理学报. 2018, 67(4): 047601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171914>

用于 α 和 μ 常数变化测量的碘离子光谱研究

Spectra of I²⁺ for possible measurement of α and μ constant

物理学报. 2017, 66(23): 233301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.233301>

近距离牛顿反平方定律实验检验进展

Recent progress in testing Newtonian inverse square law at short range

物理学报. 2018, 67(16): 160401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180636>

⁶Li原子跃迁频率和超精细分裂的精密测量

Precise measurement of ⁶Li transition frequencies and hyperfine splitting

物理学报. 2018, 67(16): 163201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181021>

频域反射法光纤延时精密测量*

赵天择¹⁾ 杨苏辉^{1)†} 李坤¹⁾ 高彦泽¹⁾ 王欣¹⁾
张金英¹⁾ 李卓¹⁾ 赵一鸣²⁾ 刘宇哲²⁾

1) (北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2) (北京遥测技术研究所研发中心, 北京 100076)

(2020年7月6日收到; 2020年12月22日收到修改稿)

本文提出了一种应用于光纤延时系统中实现光纤延时精密测量的新方法, 用以提高光纤延时测量的精度和准确性. 该方法以 1064 nm 激光调制信号作为光源, 通过测量回波信号的幅值和相位信息得到被测通道的频率响应, 采用快速傅里叶逆变换得到被测目标的延时信息, 实现光纤延时测量. 本文通过理论分析和延时测量实验对频域反射法与传统的时域测量方法进行对比, 使用频域反射法在调制频率范围 10—200 MHz, 采样频率间隔 0.5 MHz 的实验条件下, 实现了 3.3 ps 延时测量分辨率, 并证明了该方法具有比时域方法更高的测量精度, 测量结果的准确性更好.

关键词: 频域反射法, 光纤延时, 频谱分析, 精密测量

PACS: 42.81.-I, 06.20.Dk, 06.30.Ft, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.70.20201075

1 引言

光纤延时器是利用光信号在光纤传输过程中产生的时间延迟设计而成的光学延时系统, 一般由延时光纤、光纤跳线和光开关组成: 脉冲激光信号经 Y 型光纤分束后, 通过两路延时光纤分别入射到探测器中, 利用光开关控制两路延时光纤的长度差, 从而实现光学延时控制^[1,2]. 相比于电延时系统, 光纤延时系统具有延时稳定性高、抗干扰能力强、延时损耗低等特点, 可以兼顾宽延时范围和高延时精度^[3,4]. 光纤延时系统在光控相控阵天线、雷达分布式网络、干涉型光纤水听器 and 高速光电芯片等领域都有广泛应用, 这些应用领域对光纤延时系统的精度和稳定性提出了较高要求^[5].

由于光纤延时器是通过控制光纤长度实现对系统延时的设置, 光纤延时测量方法直接决定了系

统延时的精度和分辨率. 因此, 高精度延时测量方法对光纤延时系统的发展具有重要意义. 光纤延时的测量方法主要分为时域和频域两大类, 时域测量方法主要是测量探测波往返的飞行时间 (time of flight), 包括相位测量方法和脉冲测量方法, 其中脉冲测量方法依照时刻鉴别方式可分为等比定时法、阈值法和极值法^[1,6], 这类测量方法普遍存在测量精度不高、稳定性差、工程技术难度大等问题, 一般仅能实现纳秒级别的精确测量^[6]. 2019年, Prokhorov 等^[7]对光学时域反射计系统进行改良, 实现了 5 ps 延时测量精度, 测量结果的综合不确定度为 100 ps. 而相位法主要通过测量回波或后向散射回波的相位, 得到接收信号与调制光源信号之间的相移量来计算延时, 是目前最为通用的光纤延时测量方法^[8–10]. 2018年, Huang 等^[11]使用连续频率从 25—3000 MHz 的差分射频信号进行相位法光纤延时测量, 测量结果稳定性高于 4 ps. 由于

* 国家自然科学基金 (批准号: 61835001, 61875011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

相位法的明确测量范围与信号调制频率成反比, 而测量精度又与调制频率成正比, 因此单频相位法的测量范围与测量精度难以兼顾, 需要同时使用多组频率测尺进行测量, 才能获得与真值较为接近的测量结果, 而测尺的选择又需要依据待测延时的先验知识. 对于可控延时带宽较大、可选延时步长较多的光纤延时系统, 其所需的延时光纤长度从厘米量级到千米量级不等, 使用相位法测量需进行较为复杂的实验设计^[11,12]. 此外, 由于相位法的测量结果完全取决于最高频测尺的相移量, 该方法受鉴相器相位抖动的干扰比较明显, 并且难以避免模糊误差和近零点阶跃误差的影响^[13].

在光纤延时与光纤长度的测量方面, 时刻鉴别法、相位法等时域测量方法是主流. 但是两种方法都存在测量精度和模糊距离方面的矛盾, 亦即提高模糊距离是以牺牲测量精度为代价的. 为了克服这一矛盾, 从单一频率的相位延时测量发展成线性调频延时测量方法. 而线性调频测量方法要求对激光的频率进行线性调制, 对光源的要求非常高.

频域反射法最早于 1980 年代被提出, 并被应用于光纤长度、衰减系数等特征的测量. Eickhoff 和 Ulrich^[14] 使用调制带宽为 1000 MHz 的光学频域反射计实现了单模光纤长度测量, 但空间分辨率仅为 0.5 m. 此后, 该方法凭借测量范围广、测量精度高的优势被广泛应用于线路故障检测和水下探测等领域. 2014 年, Illig 等^[15-17] 将频域反射法应用到水下激光雷达测距领域, 使用快速逆傅里叶变换算法 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 对采集到的频域信号进行处理, 并通过补零点的方式提高 FDR 的空间分辨率, 使用 500 MHz 调制带宽实现了厘米量级的水下测距精

度. 2018 年, Yoshimichi 等^[18] 发表了一系列研究, 借助频域反射法与 IFFT 算法实现了对电缆的故障定位以及多个故障点位的同时测量, 时间测量精度高于 1 ns.

本文针对光纤延时器系统中延时测量方法存在的问题, 提出一种将频域反射测量原理应用于光纤延时精密测量的新方法. 该方法的优势在于, 延时测量精度由频率变化步长决定, 从而规避了相位法测量范围与测量精度之间的矛盾, 通过信号处理中的内插零算法提高测量方法的延时分辨能力, 可以同时实现较长的延时测量范围和较高的延时测量精度. 由于该方法不是对光频进行调制, 而是对电光调制器上加载的调制信号进行频率控制, 容易实现高精度的频率调制精度和线性度^[6,11,19]. 实验表明, 该方法可以对 33 ps 以上延时进行精确测量, 延时测量分辨率可达 3.3 ps.

2 频域反射法延时测量原理

频域反射法的测量是在频域中进行的, 其测量原理如图 1 所示.

该方法首先对激光源信号采用步进频率调制, 通过光电探测器记录每个频率点反射信号的幅值和相位, 生成信道的频率响应. 再通过傅里叶变换将频域信息转化到时间域, 得到激光源信号在整个测量通道中散射与损耗的空间分布. 计算时域中产生能量峰值的目标位置, 从而获得延时与距离信息^[16,20].

将奈奎斯特定理应用于频域采样, 可以推导出频域反射法的测距方程. 图 2 中左半部分为频域采样信号的示意图, 右半部分为与之对应的时域信号

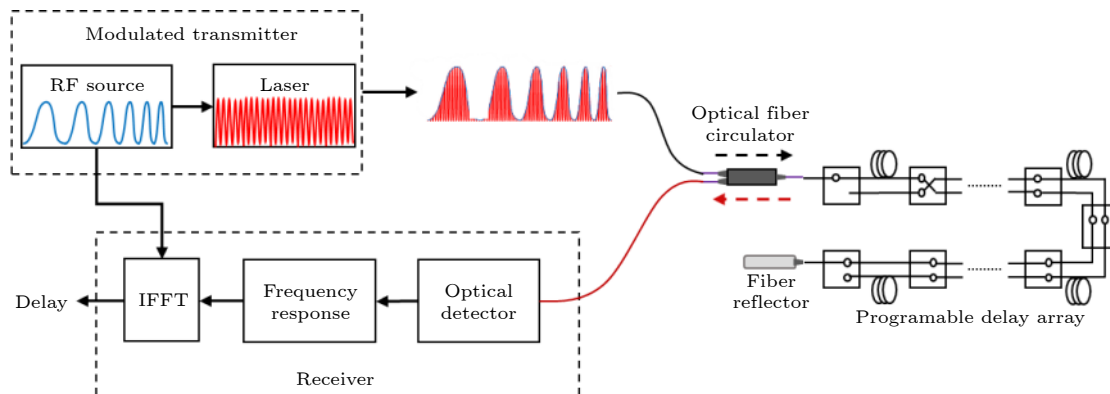


图 1 频域反射法测量光纤延时原理图

Fig. 1. Schematic diagram of optical fiber delay measurement by frequency domain reflectometry.

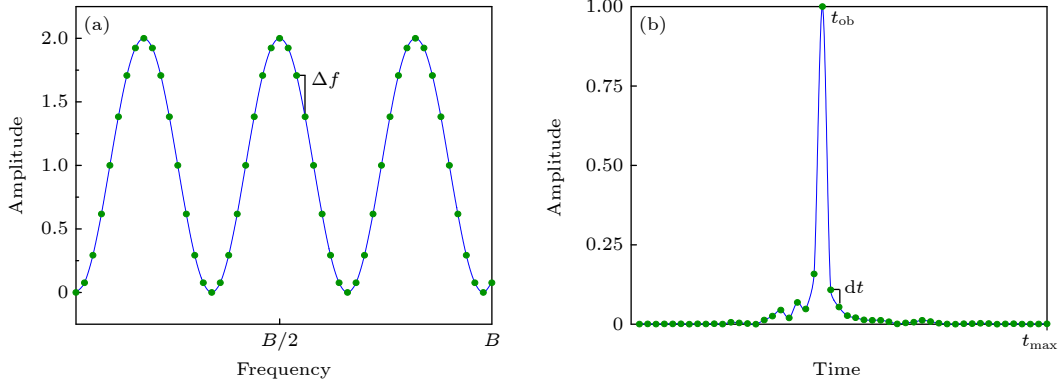


图 2 (a) 频域采样信号; (b) 时域信号

Fig. 2. (a) Frequency-domain signal; (b) time-domain plot.

示意图. 与时域采样相同, 频域采样间隔 Δf 定义了时域中的最大采样区间 t_{\max} , 时域区间乘以光速转换为距离测量范围 d_{UNAMB} , 即

$$t_{\max} = \frac{1}{\Delta f}, \quad (1)$$

$$d_{\text{UNAMB}} = \frac{c}{2nDf}, \quad (2)$$

(2) 式中, c 是光速, n 是光纤的折射率.

频域反射法测量精度取决于步进频率扫描的带宽 B 和 IFFT 步骤中使用的采样点数量. 时域的测量范围被时间步长 dt 划分为数个单位测量区间, 区间数量等于步进频率调制中使用的频率数 M . 落入单位区间内的所有测量点都将映射到该区间的中点. 由于反射测量中光程是实际距离的 2 倍, 因此, 为了将 2 个间隔很小的对象区分开, 必须确保其间隔大于单位区间的一半. 通过将测量范围 d_{UNAMB} 除以频率数 M 来计算最小可分辨距离 b 和最小可分辨延时 t_b :

$$b = \frac{1}{2M} d_{\text{UNAMB}} = \frac{c}{4MnDf} = \frac{c}{4nB}, \quad (3)$$

$$t_b = \frac{1}{4B}, \quad (4)$$

其中, 频率数 M 和频域采样间隔 Δf 的乘积产生调制带宽 B . 通过在 IFFT 步骤中对频域信号进行零点加载, 添加更多的高频频点可以缩短时间步长 dt , 从而在不改变时域采样区间长度的情况下增加时域采样单元的数量, 提高时域采样分辨率. 对于补零至 m 个频率采样点的 IFFT, 距离与延时测量精度由下式给出:

$$\delta d = \frac{M}{m} b = \frac{M}{m} \frac{c}{4nB}, \quad (5)$$

$$\delta t = \frac{M}{m} t_b = \frac{M}{m} \frac{1}{4B}. \quad (6)$$

可以看出, 频域反射法的测量范围 d_{UNAMB} 只与频域采样间隔相关, 而延时测量精度则与调制频率带宽和 IFFT 算法插零点数量相关. 这就解决了单频相位法测量范围与测量精度之间的矛盾, 只需缩小调制频率间隔、扩大频率带宽即可实现大范围、高精度测量.

3 延时测量实验设计

频域反射法测量光纤延时的实验系统如图 3 所示, 1064 nm 强度调制激光输出后经过光纤环形器、待测光纤后被光纤端面反射器反射, 经过待测光纤和光纤环形器进入光电探测器, 探测器输出的测量信号与信号源输入锁相放大器, 得到反射光的幅值和相位.

由于待测光纤的端面为 FC/PC 接头, 光纤环形器和端面反射器的光纤为 FC/APC 接头, 接头不匹配导致反射信号的相位抖动较大, 因此待测光纤两侧分别加了 3 m 的 FC/PC 转 FC/APC 的光纤跳线, 并作为系统的基准延时进行测量.

图 4 所示为接入 103.31 m 待测光纤后, 实验系统的延时测量结果. 图 4(a) 为探测器接收到的频域信息, 图 4(b) 为对频域信号进行 IFFT 变换后得到的时域信号, 图 4(c) 为通过插零点的方法, 使 IFFT 频率点数量 m 扩充至调制频率数 M 的 10 倍, 再进行 IFFT 变换后得到的时域信号. 信号峰值点对应的的时间 $t_1 = 1148.0$ ns, 即为系统基准延时与待测光纤延时的总和. 在未接入待测光纤的条件下测得系统基准延时 $t_0 = 115.4$ ns, 则待测光纤延时 $T = (t_1 - t_0)/2 = 516.3$ ns. 实验参数设置

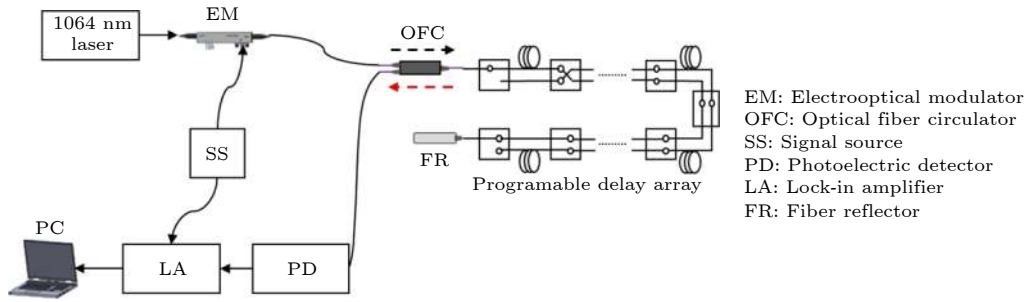


图 3 频域反射法测量光纤延时实验流程图

Fig. 3. Experiment of optical fiber delay measurement by frequency domain reflection method.

为：调制频率范围 10—200 MHz，调制频率间隔 0.5 MHz，对应明确测量范围 0—2000 ns. 研究过程中进行了两种不同的测量方式，一种是采用光纤环形器配合反射端面的方法进行反射式测量，另一种是直接将光纤延时器与电光调制器和探测器相连，进行透射式测量. 在 FDR 相关的文献调研中，

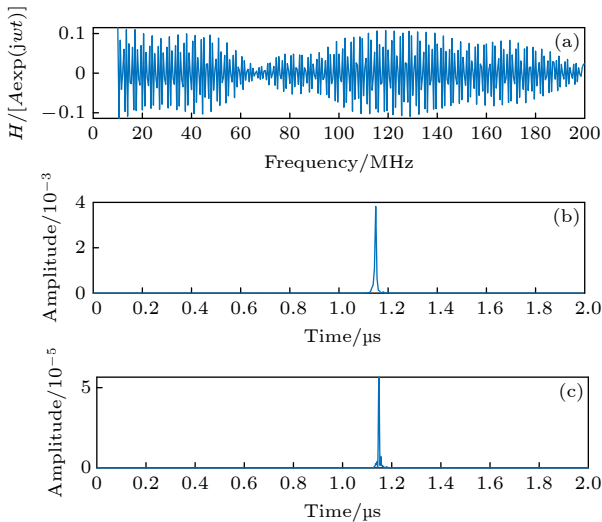


图 4 103.31 m 光纤延时测量 (a) 探测器接收到的频域信号; (b) 直接 IFFT 变换得到的时域测量信号; (c) $m = 10M$, 补零 IFFT 变换得到的时域测量信号

Fig. 4. Optical fiber delay measurement of 103.31 m optical fiber: (a) Frequency domain signal; (b) time-domain measurement signals obtained by IFFT transformation; (c) time domain measurement signal obtained by zero-padding IFFT transformation when $m = 10M$.

“反射”一般体现在障碍物目标对光源的反射、未知位置的后向散射等，并非是一定要使用反射端面才能实现测量过程，因此认为反射并不是测量方法的必要条件，实验结果也验证了这一观点.

此外，由于各种光纤延时测量方法都存在一定误差，该实验缺少客观准确的延时参考，因此采用测增量的方式为频域反射法设计了精度测试实验. 实验系统如图 5 所示，1064 nm 强度调制激光输出后经过待测通道进入光电探测器，通过光学导轨沿光路方向平移探测器，创造高精度延时增量，再将探测到的测量信号与信号源输入锁相放大器，得到探测信号的幅值和相位信息. 为避免引入更多误差，精度测试实验中未添加反射面.

由于从光纤头出射的激光准直性较好，因此未加入准直光路，光电探测器探头与光纤端面之间有一定初始距离，利用光学导轨移动探测器位置，测量系统的延时增量，即可获得有精确延时参考的测量结果.

4 实验测量结果与分析

针对第 3 节中介绍的频域反射法光纤延时测量系统，选取 4 根待测光纤进行延时测量，采用时刻鉴别法测得光纤延时分别为 64.5, 128.6, 256.7, 516.6 ns，对应光纤长度分别是 12.90, 25.71, 51.34, 103.31 m (时刻鉴别法测量参数: 光纤折射率为 1.5,

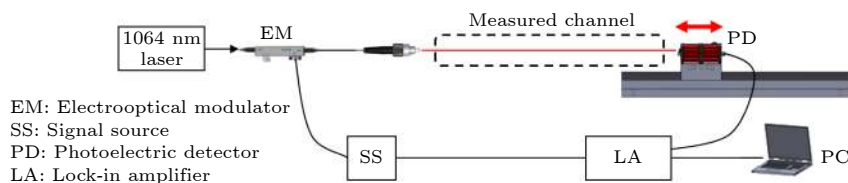


图 5 频域反射法距离精度测试实验示意图

Fig. 5. Experiment of range accuracy measurement by frequency domain reflection method.

脉冲激光器脉宽为 8 ns, 重频为 20 Hz, 100 次延时测量标准差为 0.2 ns, 对应光纤距离精度为 0.04 m)^[1]. 以时刻鉴别法测量结果作为先验知识, 选取 200 MHz 调制频率作为测尺 (测尺长度 2.5 ns), 使用相位法对光纤延时进行测量. 最后, 使用频域反射法测量光纤延时, 实验参数设置与第 3 节相同, IFFT 补零 $m = 10M$, 根据公式计算得出理论延时测量精度为 0.13 ns. 对比三种方法的延时测量结果, 如表 1 所示.

表 1 光纤延时测量结果 (单位为 ns)
Table 1. Measurement results of optical fiber delay (in ns).

Measurement method	Optical fiber 1	Optical fiber 2	Optical fiber 3	Optical fiber 4
Time discrimination	64.5	128.6	256.7	516.6
Phase measuring profilometry	66.0	127.9	261.6	512.7
Frequency domain reflection	64.5	128.7	256.8	516.3

已知石英光纤的传输延时温度系数为 $0.05 \text{ ns}/(\text{km} \cdot ^\circ\text{C})$ ^[21], 在工作温度 $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 待测光纤延时受工作温度变化影响造成的延时误差不高于 $\pm 0.05 \text{ ns}$, 该误差低于三种实验方法的测量精度. 考虑到环境振动会对测量结果有一定的影响, 测量实验选在光学实验室的隔振平台上进行, 因此环境振动的影响可以忽略. 使用频域反射法对 4 组光纤延时进行了多次重复测量, 延时测量结果相同, 可以认为测量稳定性较好. 频域反射法延时测量结果与时刻鉴别法接近, 而与相位法测量结果有一定差别. 由于实验过程中相位法与频域反射法共用相同的频域数据, 因此二者测量结果的差异是数据处理方式不同造成的. 为比较两种方法的测量结果与真实数值的关系, 在精度测试实验过程中同样对相位法与频域反射法的测量结果进行了对比.

精度测试实验中, 由于未加入反射端面, 频域反射法的最小可分辨延时应等于时域时间步长 dt , 即 $\delta t = dt = \frac{M}{m} \frac{1}{2B}$. 光纤端面与光电探测器探头的初始距离为 1.6 m, 以此距离为基准, 分别将探测器位置相对光路平移 1, 2, 3, 4, 6 cm, 测量 6 个采样点的幅值和相位信息. 空气折射率取 1.0, 则对应的参考延时增量分别为 0.033, 0.067, 0.100, 0.133, 0.200 ns. 实验参数设置为: 调制频率范围 10—200 MHz, 采样频率间隔 5 MHz, IFFT 补零

$m = 400M$, 对应明确测量范围 0—200 ns, 理论测量精度 0.007 ns. 同样使用相位法对参考延时进行测量, 比较二者的延时测量结果, 如图 6 所示.

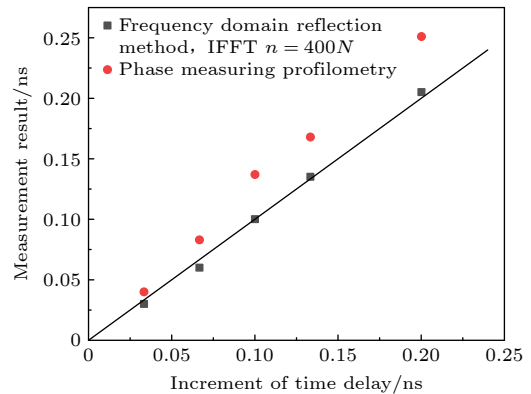


图 6 频域反射法与相位法对参考延时测量结果的比较
Fig. 6. Comparison of measurement results between frequency domain reflection method and phase measuring profilometry.

实验结果中, 频域反射法测量的延时误差均小于 7 ps, 且相比于相位法更接近真实的延时数值. 由于两种测量方法使用的是同一组频域数据, 可以认为本次实验过程中频域反射法的数据处理方式得到了更准确的实验结果.

更进一步地, 以 1 mm 间隔将探测器位置相对光路平移 1—8 mm, 对应参考延时增量步长为 3.3 ps, 测量 9 个采样点的幅值和相位信息, 通过增大 IFFT 补零点数量, 测试频域反射法的最小可分辨延时. 数据处理过程通过增大补零点数量提高理论测量精度, 分别使用了 $m = 400M$, $m = 800M$ 和 $m = 1600M$ 三种补零方式, 计算得到理论测量精度 δt 分别为 6.6, 3.3 和 1.6 ps. 实验结果如图 7 所示.

实验结果表明, 频域反射法能够对低至 3.3 ps 步长的延时增量进行识别和分辨, 但测量结果的误差较大, 目前还不能做到对皮秒量级的延时增量进行精确测量. 分析引入误差的原因可能在于, 皮秒量级延时增量对应的接收信号幅值和相位变化十分微小, 由探测设备导致的阶跃误差也就更为显著, 且空气环境下进行的激光延时测量更容易受到外界因素的干扰, 有必要对环境温度抖动造成的随机误差进行分析.

根据 Edlén 公式^[22] 计算得出, 环境温度 22 $^\circ\text{C}$ 条件下 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度抖动导致的折射率变化约为 $\Delta n = \pm 1.2 \times 10^{-4}$, 对于长度为 1.6 m 的测量区

间, 折射率变化带来的延时误差约为 ± 0.6 ps, 低于精度测量实验中的测量结果与可分辨延时增量. 此外, 三组实验结果的可分辨延时增量均与理论测量精度的计算结果相符合, 因此可以证明实验结果的可靠性. 从延时测量方法的角度而言, 增大光源信号的调制带宽和 IFFT 补零点数量, 可使频域反射法的延时测量精度有进一步的提高.

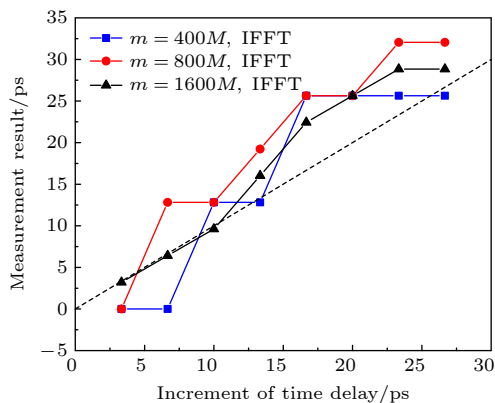


图 7 频域反射法最小可分辨延时增量的测量, $m = 400M$, 测量精度 6.6 ps; $m = 800M$, 测量精度 3.3 ps; $m = 1600M$, 测量精度 1.6 ps

Fig. 7. Measurement results of minimum discernible delay increment by frequency domain reflection method, $m = 400M$, measurement accuracy 6.6 ps; $m = 800M$, measurement accuracy 3.3 ps; $m = 1600M$, measurement accuracy 1.6 ps.

5 结 论

本文主要介绍了利用频域反射法实现光纤延时精密测量的理论依据与实验方法. 实验内容包括光纤延时测量和延时精度测量两部分, 其中延时精度测量部分使用频率范围 10—200 MHz, 采样间隔 5 MHz 的调制激光信号, 在 IFFT 补零点数 $m = 400M$ 条件下实现了 33—200 ps 延时增量的精确测量, 测量误差低于 7 ps; 在 IFFT 补零点数 $m = 1600M$ 条件下实现了对 3.3 ps 延时增量的准确分辨. 实验结果表明, 频域反射法延时测量结果相比于相位法更接近真实的延时数值, 其延时测量精度可通过扩大调制带宽和增加 IFFT 补零点数量得

到进一步提升. 将该方法应用于光纤延时系统中, 可以提高系统延时的精确程度和分辨率, 使其具有更广泛的应用前景.

参考文献

- [1] Li Y Y, Gao Y Z, Li Z, Yang S H, Wang X, Zhang J Y 2019 *Acta Opt. Sin.* **39** 0806002 (in Chinese) [李炎炎, 高彦泽, 李卓, 杨苏辉, 王欣, 张金英 2019 *光学学报* **39** 0806002]
- [2] Lu Q, Zhang W, Lin R G 2012 *Elec. Des. Eng.* **20** 160 (in Chinese) [陆强, 张伟, 林荣刚 2012 *电子设计工程* **20** 160]
- [3] He Z S, Jin L, Han Y J, Yan J H 2005 *Acta Electr. Sin.* **33** 12 (in Chinese) [何子述, 金林, 韩蕴洁, 严济鸿 2005 *电子学报* **33** 12]
- [4] Gao Y Z, Zhou L, Wang X, Yan H, Hao K Z, Yang S H, Li Z 2019 *IEEE Access* **7** 93489
- [5] Wang X C, Li S P, Jiang X, Hu J T, Xue M, Xu S Z, Pan S L 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 060601
- [6] Chen R Q, Jiang Y S, Pei Z 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0912002 (in Chinese) [陈瑞强, 江月松, 裴朝 2013 *光学学报* **33** 0912002]
- [7] Prokhorov D, Donchenko S S, Kolmogorov O V, Chemesova E V 2019 *SPIE Optical Metrology*, Munich, Germany 2019 p1105714
- [8] Cui M, Zeitouny M G, Bhattacharya N 2009 *Opt. Lett.* **34** 1982
- [9] Joo K N, Kim S W 2006 *Opt. Express* **14** 5954
- [10] Ji H 2007 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [冀航 2007 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [11] Huang X X, Yin F F, Li J Q, Dai Y T, Zhou Y, Xu K 2018 *IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC)* 2018 p130
- [12] Wang Y S, Xu X P 2003 *J. Beij. Univ. Tech.* **29** 424 (in Chinese) [汪友生, 徐小平 2003 *北京工业大学学报* **29** 424]
- [13] Ma X W, Ma C, Xin M 2015 *Elec. Qual.* **3** 38
- [14] Eickhoff W, Ulrich R 1981 *Appl. Phys. Lett.* **39** 693
- [15] Illig D W, Jemison W D, Rumbaugh L, Laux A, Mullen L J 2014 *Proc. of SPIE* **9111** 91110R
- [16] Illig D W, Jemison W D, Rumbaugh L, Lee R, Laux A, Mullen L 2013 *Ocean Eng.* **58** 304
- [17] Illig D W, Rumbaugh L, Jemison W D, Laux A, Mullen L 2014 *Oceans St. John's*, St. John's, Netherlands, September 14, 2014 p1
- [18] Yoshimichi O, Naoshi H 2018 *IEEE T. Dielect. El. In.* p2467
- [19] Chen Y, Zhao Y 2000 *Chin. J. Lasers B* **9** 219
- [20] Macdonald R I 1981 *Appl. Opt.* **20** 1840
- [21] Ou Yang H, Wang X, Wei M Y, Yue Y L 2020 *Electro-Optic Tech. Appl.* **35** 41 (in Chinese) [欧阳斌, 王侠, 韦幕野, 岳耀笠 2020 *光电技术应用* **35** 41]
- [22] Min S B, Yan L P, Cui J J, Wang D, Shu H L, Chen K 2020 *ACTA Metro. Sin.* **41** 1332 (in Chinese) [闵帅博, 严利平, 崔建军, 王冬, 束红林, 陈恺 2020 *计量学报* **41** 1332]

Accurate measurement of optical fiber time delay based on frequency domain reflectometry*

Zhao Tian-Ze¹⁾ Yang Su-Hui^{1)†} Li Kun¹⁾ Gao Yan-Ze¹⁾ Wang Xin¹⁾
Zhang Jin-Ying¹⁾ Li Zhuo¹⁾ Zhao Yi-Ming²⁾ Liu Yu-Zhe²⁾

1) (*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*R & D Center, Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China*)

(Received 6 July 2020; revised manuscript received 22 December 2020)

Abstract

Optical fiber time delay system has been widely used in optical-controlled phased array antenna, radar distributed network, interferometric optical fiber hydrophone and high-speed photoelectric chip. These applications require high-accuracy and high-stability time delay generated by the system. Time delay measurement directly determines the precision and resolution of the system. Therefore, high-precision time delay measurement method is of great significance in developing the optical fiber delay system. In this paper, progress and problems of optical fiber time delay measurements are discussed. A new method of precisely measuring the time delay in optical fiber is proposed. We use the frequency domain reflectometry (FDR) to avoid the discrepancy between measuring range and measuring precision, which exists in both time-of-flight (TOF) method and phase discrimination approach. An intensity modulated 1064 nm laser signal is used as a light source. The modulation frequency is tuned from 10 MHz to 200 MHz in steps of 0.5 MHz. The spectrum of echo signal is obtained by measuring the amplitudes and phases of echo signals at different frequency points. The delay information is obtained via the inverse fast Fourier transform (IFFT). The precision of delay measurement in our method is determined by step size of frequency variation, and a higher-precision measurement is realized by using interpolation zero algorithm. Since our method is not to modulate the optical frequency, but to control the frequency of the modulation signal loaded on the electro-optic modulator, it is easy to achieve the high-precision and high-linearity frequency modulation. In this paper, theoretical analysis and time delay measurement are used to compare the FDR method with conventional TOF measurement method. The accurate measurement of 33–200 ps is realized, and measurement error is lower than 7 ps. We also design an incremental measurement experiment to study the resolution of the FDR method, which achieves a delay resolution of 3.3 ps. The influence of temperature jitter is analyzed to prove the reliability of experimental results. It proves that the FDR method has a higher measuring accuracy than the TOF method. The time delay measurement precision can be further improved by expanding the modulation bandwidth. Our method is to be applied to an optical fiber delay system to improve the precision and resolution of system delay.

Keywords: frequency domain reflectometry, optical delay, spectral analysis, precision measurement

PACS: 42.81.–I, 06.20.Dk, 06.30.Ft, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.70.20201075

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61835001, 61875011).

† Corresponding author. E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn