

基于 TDC7201 的光纤折射率和长度测量研究

倪演海¹, 肖尊定¹, 胡建超²

(1. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004; 2. 桂林聚联科技有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要:为了探索飞行时间技术在中短距离长度测量方面的应用, 提出一种测量光纤折射率和长度的方案。基于飞行时间技术原理的 TDC7201 芯片, 配合微控制器、激光发射机和激光接收机等器件和模块, 构成一套测量系统, 理论上可对长度范围为 2 cm~100 km 的光纤进行测量。以该方案搭建了一个实验平台, 对约 1 cm、2 cm、3 cm、以及 1.5 m、5.1 m、20 km、70 km 和 90 km 等多种长度的光纤进行了折射率或长度测量。结果表明: 该方案最短测量距离为 1 cm, 最长测量距离超过 90 km, 在测量长度约 5.1 m 的光纤时, 系统的标准差可达 0.9 mm。

关键词: TDC7201; 飞行时间; 光纤折射率测量; 光纤长度测量

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)05-0010-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of optical fiber refractive index and length measurement based on TDC7201

NI Yanhai¹, XIAO Zunding¹, HU Jianchao²

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Guilin G-LINK Technology Co. Ltd., Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To explore the applications of time of flying technology for short to medium distance measurement, a scheme for optical fiber refractive index and length measurement is introduced, which is based on the TDC7201 chip that apply time of flying technology principle. The measurement system is made up of some devices and modules, such as TDC7201, microcontroller, laser transmitter and laser receiver, and the fiber length measurement range is 2 cm to 100 km in theory. The experiment platform is established, and then the refractive index or length of 1 cm, 2 cm, 3 cm and 1.5m, 5.1m, 20 km, 70 km, 90 km fiber are measured. The result shows that the minimum measurement length is 1 cm, the maximum measurement length over 90 km, and the standard deviation of 5.1 m fiber length measurement is 0.9 mm.

Key words: TDC7201; time of flying; optical fiber refractive index measurement; optical fiber length measurement

0 引言

光纤光缆生产、光纤连接器制造和光纤通信科研实验等场合, 经常需要对光纤的长度或者折射率进行测量。目前, 光纤长度测量中较重要的方法有光时域反射法、光频域反射法、光脉冲延时法、光纤干涉法、激光相位法和激光锁模法等^[1-8]。这些方法各有其优势, 也存在相对不足之处, 难以在测量精度、测量范

围、测量时间、操作便捷性和系统成本等方面做到兼顾。针对此问题, 本文提出一种基于飞行时间技术的光纤折射率和长度测量方案。

1 光纤折射率和长度测量方案

TDC7201^[9]是一款由德州仪器(TI)公司推出的时间数字转换器(TDC)。TDC7201 可以精确地将一段时间转换成数字信号, 能用于超声波测距、无人机和机器人、激光雷达和高级驾驶员辅助系统(ADAS)等场合。本文以 TDC7201 为核心器件, 配合微控制器、脉冲激光发射机和脉冲激光接收机等电路, 设计和搭建了光纤折射率和长度测量实验平台。简化的实验方案框图如图 1 所示。

图 1 中, 微控制器采用 STM32F103VCT6, 通过

收稿日期: 2019-10-14。

作者简介: 倪演海(1986—), 男, 硕士研究生, 长期从事光检测、光传感和光电子等领域应用技术研究工作, 主持或参与过手持式、台式和机架式仪器仪表等项目开发工作, 主要研究内容涉及光源、光功率计、光衰减、插回损测试仪、光时域反射仪、光线路保护模块和分布式光纤振动传感系统等。



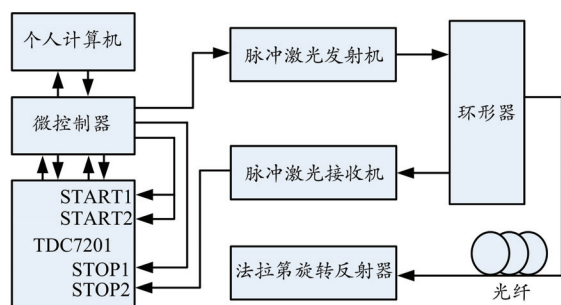


图1 光纤折射率和长度测量实验方案框图

串行外设接口 (SPI) 控制 TDC7201 进行飞行时间测量,然后读取测量数据,并通过通用异步收发传输器 (UART) 接口上传数据到个人计算机上,由计算机进行数据记录和处理。脉冲激光发射机采用一片高速金氧半场效应晶体管 (MOSFET) 驱动器,驱动一个带尾纤的同轴封装、中心波长为 1550 nm 的法布里-珀罗激光器 (FP-LD); 激光器工作时脉冲峰值电流约 200 mA, 峰值发光功率约 10 dBm。脉冲激光接收机由 PIN 型 InGaAs 探测器、高速跨阻放大器、一级主放大器 and 高速比较器构成,其接收灵敏度小于 -45 dBm,主要作用是对脉冲信号的上升沿进行优化。环形器采用 1550 nm 光纤环形器,环形器的输出端通过法兰盘与被测光纤连接;被测光纤的长度范围为 1 m~90 km。被测光纤末端根据光纤长度决定是否需要增加法拉第旋转反射器。本次实验测得光纤长度短于 50 km,无需在末端接入法拉第旋转反射器,仅需要将光纤末端切成平面,并使其端面与空气接触即可。根据菲涅尔反射理论,光纤与空气分界面将产生约 4% 的后向反射,此反射信号返回到环形器后进入接收机,最后进入 TDC7201 的 STOP2 管脚中作为停止飞行时间计时的触发信号;长于 50 km 的光纤末端需接入法拉第旋转反射器,目的是使光纤末端的反射功率足够强,从而让接收机能够正确产生停止信号,使 TDC7201 得到正确的计时结果。

本文搭建的实验平台的工作原理如下:首先,微控制器通过 SPI 接口给 TDC7201 发送控制命令,配置工作模式和参数;然后,微控制器同时给 TDC7201 内置的 TDC1 和 TDC2 发出 START 脉冲信号,当 TDC1 和 TDC2 分别在管脚 START1 和 START2 上检测到触发信号后,开始启动各自的计时器进行计时;接着,微控制器给 TDC1 发出脉冲信号,触发 STOP1,使 TDC1 停止计时,并得到飞行时间 ToF_1 ;与此同时,微控制器给激光发射机发出脉冲信号,驱动激光器发射脉冲激光;脉冲激光经过环形器后进入被测光纤,再经过光纤末端或法拉第旋转反射器的反射后回到环形器,之

后进入激光接收机,最终变成电脉冲信号进入 TDC2,触发 STOP2,使 TDC2 停止计时,并得到飞行时间 ToF_2 ;最后,将 ToF_2 减去 ToF_1 ,即为激光从发射时刻到传播到光纤末端再返回到接收机的时间。

基于本实验平台,光纤折射率的测量方法有 2 种,分别简称为增加法和剪断法。

①增加法。增加法的主要应用场合是测量产品化的光纤连接器的折射率,如 1 m、3 m 和 5 m 等长度的光纤连接器。操作步骤如下:首先,环形器输出端不连接任何光纤,测量并记录端面处的飞行时间 ToF_1 ;然后,接上被测光纤连接器,测量并记录端面处的飞行时间 ToF_2 ;接着,使用长度量具量出被测光纤连接器的实际长度 L ;最后,使用公式 $n=c(ToF_2-ToF_1)/(2L)$ 即可求出被测光纤连接器的折射率,其中 n 为折射率, c 为真空中的光速,式中除以 2 是因为测得的飞行时间是光在被测光纤中的往返传输时间。

②剪断法。剪断法的主要应用场合是测量未安装连接器的裸光纤的折射率。操作步骤如下:首先,被测光纤的其中一端需要熔接一个光纤连接器并与环形器的输出光接口正确连接,裸光纤的另一端需要使用切割刀切去一段,测量并记录此时端面处的飞行时间 ToF_1 ;然后,使用切割刀将末端裸光纤再次切去一段,如 5~10 cm 长度,测量并记录此时端面处的飞行时间 ToF_2 ;接着,使用尺子量出切下来的光纤的实际长度 L ;最后,使用公式 $n=c(ToF_1-ToF_2)/(2L)$ 即可求出被测光纤连接器的折射率。

基于本实验平台,光纤长度的测量方法为增加法,操作步骤与测量折射率的步骤相似,但过程中省去使用长度量具测量光纤长度的步骤,并假定光纤的折射率已知或者经过上述步骤测出,最后使用公式 $L=c(ToF_2-ToF_1)/(2n)$ 即可求出被测光纤的长度。

2 实验结果

首先,本文使用增加法测量了 1 根长度为 1556 mm 和 1 根长度为 5086 mm 以及两者长度相加的 3 个光纤连接器的折射率,其结果如表 1 所示。之后,使用剪断法测量一段长 3 m 左右的裸光纤的折射率,结果如表 2 所示。

表 1 和表 2 的计算公式中使用的光速参数为 299792458 m/s。从测量结果来看,测算的光纤折射率离散较大,其主要原因是被测光纤的长度较短以及存在长度测量误差。表 2 中,100 mm 的光纤长度对应的飞行时间为 977 ps,假如长度测量误差为 1 mm,即测

表 1 增加法测量折射率

长度增量/mm	时间增量/ps	测算折射率
1556	15222	1.4664
5086	49676	1.4641
6642	64919	1.4651

表 2 剪断法测量折射率

剪去长度/mm	时间减少/ps	测算折射率
10	97	1.4540
20	195	1.4615
30	294	1.4690
50	488	1.4630
100	977	1.4645

量到的长度为 101 mm, 则计算得到的折射率为 1.4500, 与 1.4645 相差较大; 而表 1 中, 假如长度测量误差同样为 1 mm, 则长度为 5086 mm 的光纤测量到的长度为 5087 mm, 计算得到的折射率为 1.4638, 与 1.4641 相差较小。因此, 若需要测量光纤的折射率, 应当测量较长长度的光纤, 并且要求长度误差足够小。

然后, 本文对约 20 km、70 km 和 90 km 的光纤进行了长度测量, 并与光时域反射仪 (OTDR) 测得的长度进行对比, 测量的结果如表 3 所示。表 3 中, OTDR 测量光纤长度采用的折射率参数为 1.4682, 光速参数为 299792458 m/s。为了便于比较, TDC 测算光纤长度采用同样的折射率参数和光速参数。由表 3 的对比结果可知, 在中长距离光纤长度测量方面, 可以认为 TDC 的测量结果精确可信。

表 3 OTDR 和 TDC 测量光纤长度对比

OTDR 测量长度/m	TDC 测算长度/m	绝对误差/m	相对误差
20092	20094	2	0.01%
70682	70681	1	0.001%
90779	90778	1	0.001%

最后, 本文对搭建的测量系统的分辨率和标准差进行测量和计算, 并对多个样本的测量数据进行分析。结果表明: 基于本实验平台, 飞行时间分辨率约为 61 ps, 最佳标准差约为 9 ps。

本文连续对一根长度为 5.086 m 的光纤连接器进行了 10000 多次的飞行时间测量, 得到的数据变化情况如图 2 所示。其中, 蓝色细实线代表未经过任何处理的原始飞行时间数据, 红色粗实线代表经过 64 次滑动平均处理后的飞行时间数据。

图 2 中, 原始飞行时间平均值为 49676 ps, 最小值为 49446 ps, 最大值为 49930 ps, 最大值与最小值之差为 484 ps, 标准偏差为 60 ps; 经过 64 次滑动平均处理后, 平均值为 49676 ps, 最小值为 49647 ps, 最大值为 49699 ps, 最大值与最小值之差为 52 ps, 标准差为 9 ps。

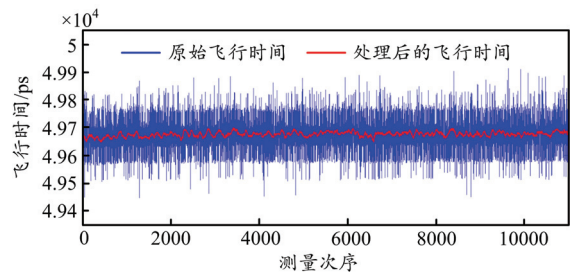


图 2 测量长度为 5.086 m 的光纤连接器的飞行时间数据变化曲线

按照折射率参数为 1.4682, 光速参数为 299792458 m/s, 将时间数据转换为光纤长度数据, 则可以得到长度原始数据的最大值与最小值之差为 49.4 mm, 标准差为 6.1 mm; 平均处理之后最大值与最小值之差为 5.3 mm, 标准差为 0.9 mm。

3 结束语

本文基于 TDC7201 搭建了光纤折射率和长度测量实验平台, 对最短约 1.5 m、最长超过 90 km 的多种长度的光纤进行了折射率或长度的测量, 并对测得的数据进行了简单的对比和分析。实验结果表明: 基于 TDC7201 的光纤折射率和长度测量实验平台具有分辨率高、标准差小和测量范围大等性能优势, 并且具有系统简单、使用方便和成本低等特点。本文的设计在光纤光缆生产制造、光纤连接器生产和科研实验等方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 铁咪咪, 刘铭, 赵静祎, 等. 两种光纤长度测量方法的比较[J]. 现代计算机, 2018(4): 28-31.
- [2] MIAO Xinyu, ZHOU Bo, ZHOU Feng. Precise measurement method of optical fiber length based on timestamp technique[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2016, 7(3): 302-306.
- [3] 肖平, 袁睿. OTDR 波形分析及在光纤测量中的应用[J]. 光通信技术, 2010(4): 42-44.
- [4] 徐紫艳, 张晓青, 贾豫东. 基于激光相位法测量光纤长度[J]. 北京信息科技大学学报, 2017, 32(2): 30-33.
- [5] 张颖艳, 孙小强, 傅栋博, 等. 基于高斯光脉冲延迟技术的光纤长度精确测量方法[J]. 计量学报, 2015, 36(1): 10-13.
- [6] 吴东方, 张天照, 董翔. 基于微分干涉技术的光纤长度测量系统[J]. 信息技术, 2010(7): 104-106.
- [7] 李楚瑞, 王超, 肖倩. 基于全光纤干涉的新型光纤长度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 415-419.
- [8] 胡艳丽. 基于锁模光纤激光器的光纤长度测量方法的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [9] Texas Instruments. TDC7201 Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Applications in LIDAR, Range Finders, and ADAS [EB/OL]. (2016-05-16)[2020-04-20]. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/tdc7201>.