

一种异或逻辑新型光纤长度测量系统的结构及理论分析

包乌日汗¹ 朱世国²

(¹ 内蒙古民族大学物理与电子信息学院, 内蒙古 通辽 028000; ² 四川大学物理学院, 四川 成都 610064)

摘要 本文论述了由异或逻辑光纤长度传感器和双斜式模数转换器组成的一种新型数字式光纤长度测量系统的工作原理。光纤长度传感器两个输入信号分别来自光信号发送端的参考信号和光信号接收端的再生信号, 它们均是周期为 T 、占空比 50% 的方波信号。光纤长度传感器输出信号的直流电平与光纤长度具有线性关系。利用双斜式模数转换器的“+、-、 $\times$ 、 $\div$ ”模拟运算功能实现了光纤长度的数字化测量。

关键词 参考信号; 再生信号; 光纤长度传感器; 双斜式模数转换器

THE STRUCTURE AND THEORETICAL ANALYSIS OF A NOVEL OPTICAL FIBER LENGTH MEASUREMENT SYSTEM BASED ON XOR LOGIC

BAO Wurihan¹ ZHU Shiguo²

(¹ College of Physics and Electronics, Inner Mongolia Minzu University, Inner Mongolia Tongliao 028043;

² College of Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064)

Abstract This study shows the operating principle of a new digital system for measuring optical fiber length. The system combines an exclusive-OR (XOR)-based fiber-optic length sensor with a dual-slope analog-to-digital converter (ADC). The sensor receives two input signals; a reference signal from the transmitting end and a regenerated signal from the receiving end. Both signals are square waves with a period of T and a 50% duty cycle. The DC level of the sensor output varies linearly with the actual fiber length. Digital length measurement is conducted by using the dual-slope ADC to perform analog arithmetic operations, including addition, subtraction, multiplication, and division.

Key words reference signal; regenerated signal; fiber-optic length sensor; dual-slope analog-to-digital converter

光纤由于传输损耗低、色散小、传输距离长等原因, 光纤通信已成为当今社会的重要通信工具。在光纤通讯工程中许多技术指标的确定和纤维光

学实验研究中许多物理量的测定都与光纤长度测量有关。在光纤长度测量领域, 目前采用最多的是光时域反射仪(OTDR)^[1]。它是根据光脉冲在

收稿日期: 2025-02-17

通信作者: 包乌日汗, baowurihangood@163.com; 朱世国, 843194510@qq.com。

引文格式: 包乌日汗, 朱世国. 一种异或逻辑新型光纤长度测量系统的结构及理论分析[J]. 物理与工程, 2025, 35(5): 337-342.

Cite this article: BAO W R H, ZHU S G. The structure and theoretical analysis of a novel optical fiber length measurement system based on XOR logic[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(5): 337-342. (in Chinese)

光纤中瑞利后向散射波和光纤末端的菲涅耳反射波回传到被测光纤始端的时间、幅度大小,获得被测光纤链路的传输特性和长度信息。其功能不仅测量光纤长度、还可测量光纤链路的损耗特性、断点位置等等。但其结构复杂,使用时需要经过参数设置、数据获取和曲线分析等过程才能获得最终结果。另外受测量系统的“盲区”限制,常用于远距离光缆线路的长度测量。本文论述了一种新型的异或逻辑光纤长度测量系统的电路结构及理论基础。该测量系统具有原理新颖、结构简单、使用方便和测量结果直观等优点。在光纤长度测量领域,填补了此前无直读式光纤长度测量设备的空白。适用于科研单位和高等院校实验室对短距离和中长距离光纤长度测量的需要。

1 测量原理

1.1 测量系统框图及异或逻辑光纤长度传感器

图1是异或逻辑数字式光纤长度测量系统的结构框图。图中由周期为 T 、占空比为50%的方波信号对半导体激光二极管LD的光强进行调制。调制后的光信号经被测光纤传输到接收端。在接收端半导体PIN光电二极管把光信号变换为电信号,经过再生调节再次变换成一个周期为 T 、占空比也是50%的方波信号(称再生信号)。图1中的示波器用以监测光电转换信号的再生调节过程。光电转换再生信号相对于发送端参考电信号具有一定延时 τ 。这一延时既有测量系统的电路延时,记为 τ_1 ;也有光信号在光纤中的传输时间,记为 τ_2 。 τ_2 与被测光纤长度 L 成正比。如果把再生信号和参考信号分别接到异或逻辑电路输入端A和B,异或逻辑电路输出端C的波形就是一个周期为 $T/2$ 的方波序列(如图2示)。在 $0 \sim T/$

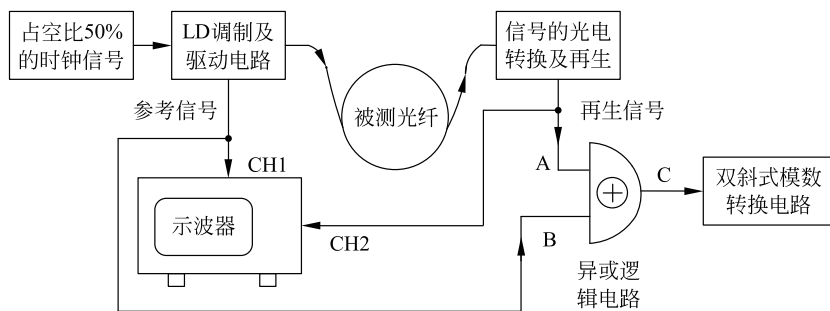


图1 数字式光纤长度测量系统的方框图

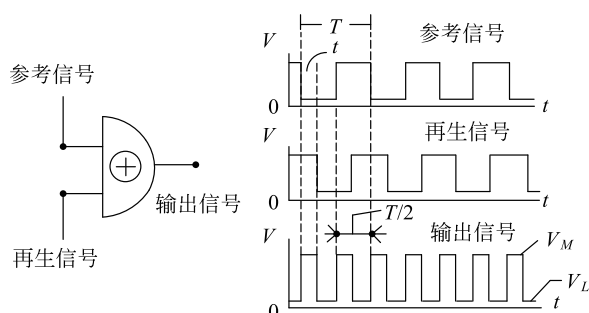


图2 异或逻辑电路输入/输出信号波形

2延时范围内^①,异或逻辑电路输出信号的脉宽就与以上两路输入信号的相对延时成正比。所以,异或逻辑电路输出的方波信号,其直流电平 U 与两路输入信号的延时 τ 具有以下关系

$$U = (2\tau/T) \times (V_H - V_L) + V_L \quad (1)$$

而延时 τ 中的 τ_2 又与被测光纤长度 L 成正比。因此异或逻辑电路在图1所示的应用中,实际上就是一个光纤长度传感器,其传感特性(即输出信号的直流电平 U 与被测光纤长度 L 的关系)如图3示,其数学表达式如式(2)所示

$$U = U_0 + K \times L \quad (2)$$

其中,截距 U_0 和斜率 K 的数学表达式为

$$U_0 = (2\tau_1/T) \times (V_H - V_L) + V_L \quad (3)$$

$$K = (2/V_{GX}T) \times (V_H - V_L) \quad (4)$$

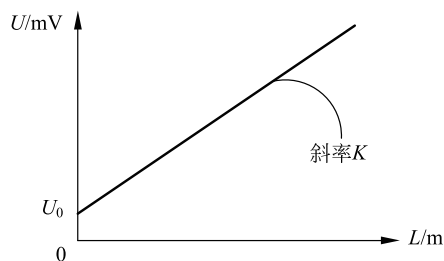


图3 光纤长度传感器传感特性

其中, V_{GX} 是光纤中的光速。由于通信光纤的纤芯折射率和包层折射率相差甚微,在弱波导近似下 V_{GX} 等于空气的光速 C 除以纤芯折射率 n_1 。

① 异或逻辑电路输入信号的相对延时超过 $T/2$ 时,输出信号的脉宽就会随输入信号相对延时线性下降。直到输入信号相对延时超过调制信号1个周期 T 后,输出信号脉宽随输入信号相对延时又按以上规律周期性变化。

为了实现光纤长度的数字化测量,在图1中需要把异或逻辑电路的输出接至双斜式模数转换电路。双斜式模数转换器原本用于直流电压的数字化测量。在一定条件下也可用来测量各种占空比方波信号的直流电平。加上巧妙运用双斜式模数转换器的“+、-、 $\times$ 、/”模拟运算功能,就可实现光纤长度的数字化测量。

1.2 双斜式模数转换器的工作原理

双斜式模数转换器在电量和非电量测量技术中应用非常广泛。其核心部件是如图4示的积分电路。工作原理如下:首先通过模数转换器内部开关的自动切换,对电容 C_{int} 极板上的残存电荷清零。然后,模数转换器内部的开关 K_{int} 自动切换到被测电压 V_{in+} 和 V_{in-} 一侧。在被测电压 V_x 的作用下对 C_{int} 进行恒流定时充电,充电电流 $I = V_x / R_{int}$ 。充电到一定时间 T_1 , 停止充电。充电时间结束后,开关 K_{int} 自动切换到参考电压 V_{ref+} 和 V_{ref-} 一侧。在转换器内部模拟开关作用下,参考电压的极性自动地与被测电压 V_x 相反。因此电容 C_{int} 开始恒流放电,放电电流 $I = V_{ref} / R_{int}$ 。放电开始时,转换器内部的计时器进行计时。放电完毕,停止计时,放电时间记为 T_2 。

根据 T_1 期间电容 C_{int} 充电电量应与 T_2 期间放电电量相等原则,被测电压 V_x 与参考电压 V_{ref} 、充电时间 T_1 、放电时间 T_2 之间具有如下关系:

$$V_x = V_{ref} (T_2 / T_1) \quad (5)$$

其中 T_1 、 V_{ref} 在测量过程中均为常数,故被测电压 V_x 与放电时间 T_2 成正比。实际上,以上计时系统是由时钟脉冲发生器和计数器组成。如果时钟脉冲的周期为 T_{cp} , 则 $T_1 = N_1 T_{cp}$, $T_2 = N_2 T_{cp}$, N_1 和 N_2 分别是计时系统充、放电期间计数器的读数。所以(5)也可改写为

$$V_x = V_{ref} (N_2 / N_1) \quad (6)$$

在3位半双斜式模数转换器中, N_1 设定为1000, N_2 的计数范围为1~2000。所以3位半数字电表所显示的每1个字,就等价于参考电压 V_{ref} 的1000分之一。

以上是双斜式模数转换器对直流电压的模数转换过程。对于直流电平不为零的周期信号(包括各种占空比的方波信号),理论上可以证明:只要双斜式模数转换器的正向积分时间 T_1 满足以下任一条件

$$T_1 = n T_y \quad (7)$$

$$\text{或} \quad T_1 \gg T_y \quad (8)$$

(其中 n 为整数, T_y 是被测信号的周期), 则被测周期信号直流电平 U 与双斜式模数转换器的参考电压 V_{ref} 也具有式(6)的关系。在异或逻辑数字式光纤长度测量系统中, T_y 是10微妙数量级、双斜式模数转换器正向积分时间 T_1 是 10^2 毫秒数量级。 T_1 除以 T_y 的商数 n 很大, 具有 10^3 数量级。符合式(8)所表示的条件。

为了使转换结果的数字与光纤长度有准确的对应关系, 还需消除光纤长度传感器传感特性截距电压 U_o 对转换结果的影响(调零)。另外还必须调节模数转换器的参考电压 V_{ref} 使转换结果每1个数字等价于1单位光纤长度(校准)。为此, 图4中模数转换器 IN 一端不能与 COM 端短接, 而是应该如图5示接一个其值等于 U_o 的补偿电压 V_b 。这种情况下, 双斜式模数转换电路的转换关系式(6)就具有以下形式

$$U(L) - U_o = V_{ref} (N_2 / N_1) = K \times L$$

$$\text{或} \quad N_2 = K \times L \times N_1 / V_{ref} \quad (9)$$

上式中的 K 是光纤长度传感器传感特性的斜率。式(9)表明, 在图5示的连接情况下模数转换的数字 N_2 只与光纤长度 L 有关。为了使模数转换每

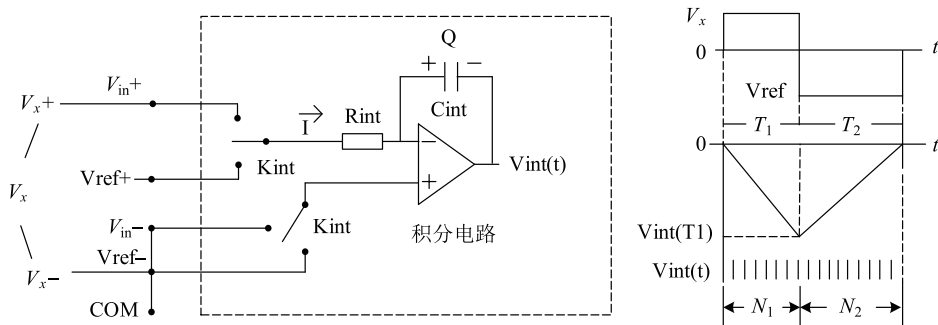


图4 双斜式模数转换器的基本原理

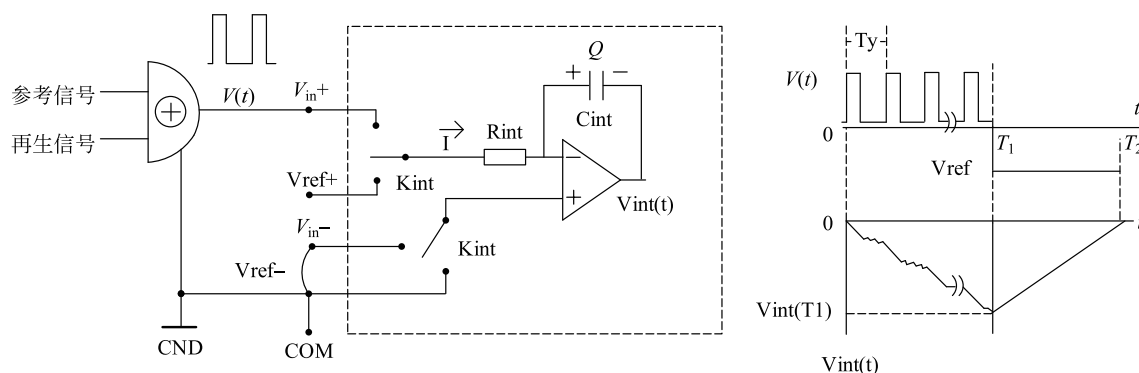


图5 实现光纤长度测量仪零点调节的电路连接

增加1个数字等价1单位光纤长度 L_1 ,还必须应按以下关系选择双斜式模数转换器的参考电压 V_{ref}

$$V_{ref} = 1000 \times K \times L_1 \quad (10)$$

1.3 光信号的光电转换及再生调节

以上分析均在再生信号的占空比与参考信号的占空比相同的前提条件下进行的。采用图6所示光电转换电路就能实现这一要求。有关方波光信号光电转换及再生调节的理论分析见文献[2]。以下仅对其工作过程进行定性论述:首先,图6中 R_c 和 R_b 的阻值必须使三极管 BG2 在光信号无光期间处于深度饱和状态。在此期间它的集-射极电压 V_{ce} 极低,即使经过后面的放大电路也会使反相器 IC2 的输出维持在高电平状态。在光信号有光期间, PIN 光电二极管有光电流 I_o 产生,它是从 PIN 管的负极流向正极,对 BG2 基极电流 I_b 有拉电流作用,使 I_b 减小。随着 I_b 的减小, BG2 逐渐脱离深饱和状态,其集-射极电压 V_{ce} 开始上升。经过后面放大,反相器 IC2 的输出很快从高水平向低电平状态翻转。在光信号下一个无光状态到来时, PIN 无光电流, BG2 基极电流 I_b 开始增加,三极管 BG2 再次进入深度饱和状态, IC2 的输出由低电平翻转成高电平。随着时间推

移,反相器 IC2 输出状态周期性反转,实现了光信号的光电转换。一般情况下,目前获得的光电转换信号占空比不一定与参考信号占空比相等。这是由于 PIN 管的结电容和 BG2 基-射极之间杂散电容的存在(在图6中用 C_a 表示以上两种电容的总效应),图6中三极 BG2 基极电流 I_b 的增减并不是开关式改变,而是按一定时间常数变化。这就使得反相器输出状态的翻转时刻与光信号从有光向无光(或从无光向有光)状态转换时刻不是处于同步状态,致使光电转换信号占空比与参考信号占空比不等。

理论和实践表明:在 BG2 饱和深度一定的情况下,调节发送端激光二极管 LD 的驱动电流(也即改变光信号的幅度)可以使 IC2 输出的光电转换信号占空比与参考信号占空比相等。三极管 BG2 饱和深度不同,光电转换信号达到再生状态时所需光信号幅度也不一样。调节图6中的电位器 W_2 可以改变 BG2 的饱和深度。

2 测量结果及讨论

测量系统的电路结构如图7示。该图中双斜

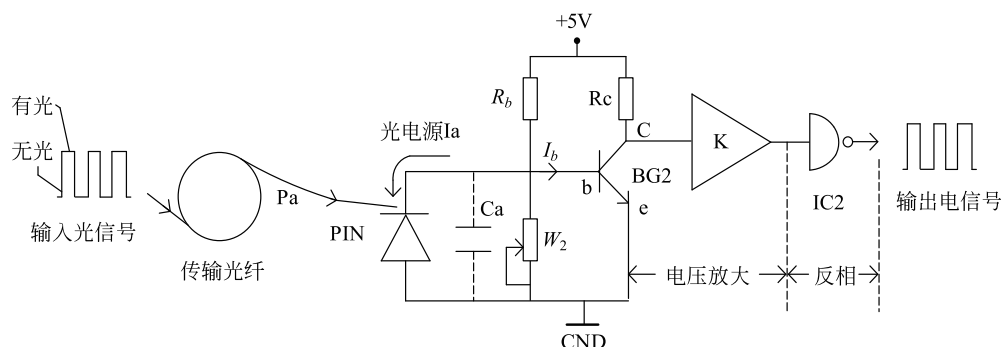


图6 光信号的光电转换及再生调节

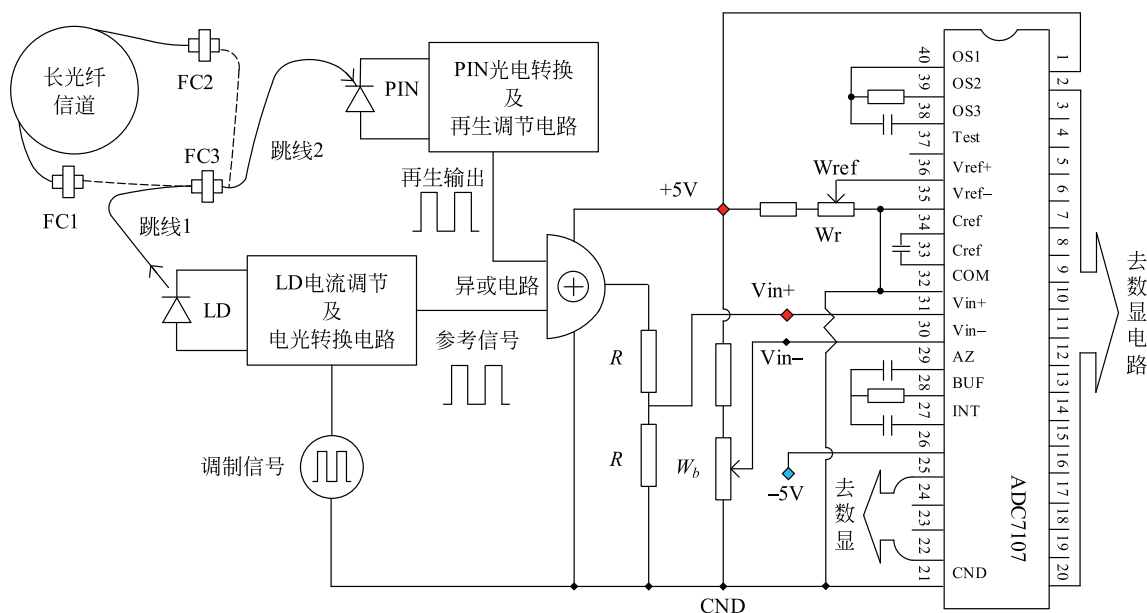


图7 数字式异或逻辑光纤长度测量仪的电路结构

式模数转换器采用 ADC7107 集成芯片,其出脚功能及与外围元件的连接见文献[3]。利用由四川大学物理学院研发的光纤中光速测量仪和示波器组成的图 8 示光纤长度测量系统,进行了实际测量。测量时操作步骤如下:

2.1 零点调节

把由两条 1m 长光纤跳线和光纤活动连接器组成的短光纤信道接入图 8 示测量系统的 LD 出光口和 PIN 入光口。调节 LD 驱动电流使 PIN 的入照光功率 $700\mu\text{W}$ 左右;调节再生调节电位器使光电转换信号的占空比与参考信号占空比相等;最后调节图 8 中的零点调节电位器使光纤长度指

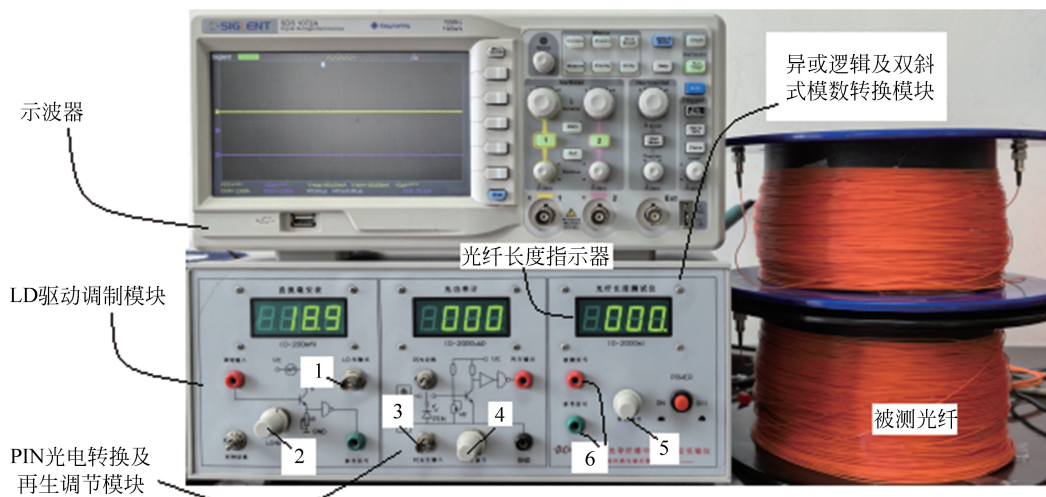
示器的数显为“0000”。

2.2 校准调节

在零点调节基础上,把插入 LD 出光口和 PIN 入光口的光纤跳线从活动连接器一端分开,通过光纤活动连接器把长度已知的光纤信道(标准光纤)接入测量系统。调节 LD 驱动电流使光电转换信号再次达到再生状态。然后,调节图 7 中 ADC7107 模数转换器的参考电压 V_{ref} 。调节电位器 W_r (设置在图 8 示实际测量设备内部),使光纤长度指示器的显示数字与标准光纤长度一致。

2.3 实际测量

用人工方法对光纤生产厂家提供的约 200m



1—LD 光出口; 2—LD 电流调节; 3—PIN 光入口; 4—再生调节; 5—零点调节; 6—异或输入

图8 实际测量系统

长 6 盘光纤和约 1m 长 9 条光纤跳线测量出它们的准确长度(以 m 为单位,不是整数)。然后,用光纤跳线和活动连接器进行串接成如表 1 和表 3 所示不同长度的光纤信道。首先,以长度为 1249m 光纤信道作为标准长度,对测量系统进行校准调节。然后用该测量系统对每盘光纤及长度不同的串接光纤进行了测量。测量结果的数据如表 1、表 2 和表 3 所示。实验数据表明:本测量系统的原理可行、数据稳定、测量结果准确。在 0~1000m 测量范围内,误差±1m 左右。

2.4 测量结果讨论

(1) 测量系统采用的 ADC7107 模数转换集成芯片,属 3 位半模数转换电路,计数范围 0~1999。如果 1 个字等价 1m,图 8 示测量系统的测量范围可以做到 0~1999m。由于调制信号周期 $T=16\mu\text{S}$ 、电路延时 $\tau_1=800\text{nS}$,则 $(T/2)-\tau_1=7200\text{nS}$ 。按光纤中光速约等于 20 万千米/S 算,测量系统的实际测量范围只能在 0~1400m。所以笔者在可能条件下,选择 1249m 作为校准长度。

(2) 表 3 的测量数据表明,图 8 示测量系统的分辨率可达 1m。

(3) 在以上测量范围内,无论被测光纤多长,测量误差均在正负 1m 左右,这表明异或逻辑光纤长度传感器传感特性线性度很好。

(4) 上述测量误差的主要来源是测量系统参考信号占空比的抖动和光电转换再生调节不准(在 50.00% 的基础上均有 0.05% 的偏差)所致。

3 结论

综上所述,本研究论述的异或逻辑光纤长度测量系统,在光纤长度测量领域里填补了此前无直读式仪表的空白。相对于目前广泛使用的时域反射计,具有原理新颖、结构简单、容易制作、使用方便、测量结果直观等优点。适合于距离(0.1~10km)光纤长度的测量。它在进行光纤通信教学的高等院校和纤维光纤研究的科研单位具有广泛的应用前景。有关测量范围的进一步探索、测量误差的进一步分析和测量精度进一步提高等问题有待大家更加深入的实验研究,本文仅是起个抛砖引玉作用。

参 考 文 献

[1] 马正先,熊建文,等. OTDR 在光纤测量中的应用[J]. 激光杂志,1999,20(2):1-7.
MA Z X, XIONG J W, et al. Application of OTDR in fiber optic measurement[J]. Laser Journal, 1999, 20(2): 1-7. (in Chinese)
[2] 朱世国,高福华. 数字式光信号检测和再生电路的理论分析及实验研究[J]. 物理实验,1999(2):25-33.
ZHU S G, GAO F H. Theoretical analysis and experimental study of digital optical signal detection and regeneration circuit [J]. Physical Experiment, 1999(2): 25-33. (in Chinese)
[3] 沙占友,沙占为. 数字万用表的原理、使用与维修[M]. 北京:电子工业出版社,1987.
SHA Z Y, SHA Z W. Digital multimeter principles, operation and maintenance[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1987. (in Chinese)

表 1 实验测量数据 1

每盘光纤人工测量长度/m	207.78	206.38	212.78	208.98	208.7	199.46
测量系统显示数字	209	207	213	209	209	199

说明:1. 测量系统校准长度 1249m;2. PIN 入照功率 670μW;3. 电路延时 $\tau_1=800\text{nS}$;4. 调制信号周期 16μS。

表 2 实验测量数据 2

串接光纤实际长度/m	207.78	415.16	628.94	838.92	1048.6	1249.1
测量系统显示数字	209	415	630	839	1048	1249*

说明:1. 测量系统校准长度 1249m;2. PIN 入照功率 670μW;3. 电路延时 $\tau_1=800\text{nS}$;4. 调制信号周期 16μS。

表 3 实验测量数据 3

实际长度/m	1.035	2.065	3.070	4.070	5.100	6.100	7.130	8.125	9.150
系统显示数字	1	2	3	4	5	7	8	9	10

说明:1. 测量系统校准长度 1249m;2. PIN 入照功率 670μW;3. 电路延时 $\tau_1=800\text{nS}$;4. 调制信号周期 16μS。