

# 可编程光纤延时系统特性

李炎炎<sup>1</sup>, 高彦泽<sup>1</sup>, 李卓<sup>1</sup>, 杨苏辉<sup>1,2\*</sup>, 王欣<sup>1</sup>, 张金英<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>北京理工大学精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

**摘要** 采用 17 个光开关和 16 段不同长度光纤的级联方式, 搭建了一套可编程光纤延时系统, 实现的延时范围为 0~65535 ns, 步长为 1 ns, 数据刷新率可达 100 Hz, 延时稳定性为 0.2 ns, 延时抖动小于 0.32 ns, 整套系统损耗小于 31 dB. 对可编程光纤延时系统的延时精度、损耗和数据刷新率等特性进行了研究, 分析了损耗和色散对延时测量的影响, 提出了一种减少延时测量误差的阈值补偿法, 弥补了损耗和色散引起的延时测量误差。

**关键词** 光纤光学; 光纤延时; 延时测量; 光开关; 损耗

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0806002

## Characteristics of Programmable Optical Fiber Delay System

Li Yanyan<sup>1</sup>, Gao Yanze<sup>1</sup>, Li Zhuo<sup>1</sup>, Yang Suhui<sup>1,2\*</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>, Zhang Jinying<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** A programmable optical fiber delay system is built by using 17 optical switches and 16 optical fibers with different lengths. The system can realize the delay range of 0-65535 ns, step length of 1 ns, maximum data refresh rate of 100 Hz, delay stability of 0.2 ns, jitter delay less than 0.32 ns, and loss less than 31 dB. The delay accuracy, loss, and data refresh rate of the programmable optical fiber delay system are studied. The influences of loss and dispersion on delay measurement are analyzed. A threshold compensation method to reduce delay measurement error is proposed to compensate for the delay measurement error caused by loss and dispersion.

**Key words** fiber optics; optical fiber delay; delay measurement; optical switch; loss

**OCIS codes** 060.2310; 130.4815; 060.2300

## 1 引 言

延时技术广泛应用于光通信、雷达、导航和探测等领域<sup>[1]</sup>, 声、光、电技术都可以实现延时, 随着光纤技术和光电子技术的发展, 近年来光延时技术得到了迅速发展。与传统的电延时和声表面波延时相比, 光纤延时具有抗干扰能力强、保密性高、系统中更稳定及带宽更大等特点, 在光通信系统、微波光子和光学相干断层扫描(OCT)等领域的应用尤为突出<sup>[2-6]</sup>。不同应用领域对延时技术的要求不同, 例如在光控相控阵雷达中, 光延时技术取代了传统的移相器, 通过光学方法使微波调制后的光信号产生延时差, 间接产生相位差<sup>[7]</sup>, 解决了波束倾斜问题<sup>[8]</sup>,

该应用下延时精度很高, 一般在 ps 量级, 但延时范围较小。在激光雷达回波目标模拟器中, 通过光纤延时可以模拟目标的回波特性, 仿真目标到探测器的距离信息<sup>[9]</sup>, 模拟激光雷达回波中目标距离信息的应用对延时范围要求通常在 km 量级, 延时精度在 ns 量级。光延时技术的应用领域众多, 但要兼顾大范围和高精度这两方面则比较困难, 例如: 邱志成等<sup>[10]</sup>采用优化拓扑结构, 用磁光开关和单模光纤构建了 5 bit 光纤延迟线, 步进可达 100 ps, 但延时范围仅为 0~3.1 ns; 国建卫等<sup>[9]</sup>采用光纤延时系统实现了 197 km 距离范围对应的延时, 但步进为 10 ns。

本文在激光雷达目标回波模拟器延时系统大范

收稿日期: 2019-02-13; 修回日期: 2019-03-28; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61835001, 61875011)

\* E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

围、高精度的应用背景下,使用 17 个双端口光开关与 16 段不同长度的光纤相结合,搭建了一套可编程光延时系统,实现的延时范围为 0~65535 ns,步长为 1 ns,在大范围前提下提高了延时精度。实验发现,光纤的长度误差、光纤接头和连接器都会引入额外的延时误差,光纤与光开关的损耗和色散等因素会给延时系统引入延时测量误差,因此对延时器不同延时的精确测量及校准是一项重要的任务。对延时系统的数据刷新率、损耗等性能参数进行了测量,并讨论了损耗和色散对延时测量精度的影响。提出采用阈值补偿法来减小损耗和色散对延时测量精度的影响,最终实现的延时测量精度为 0.32 ns,系统的数据刷新率可达 100 Hz,满足大范围和高精度的要求。

在延时系统中,延时主要由光纤长度决定,该延时为光学真延时,系统较为稳定。多次延时测量得到的标准差为系统的稳定性参数,测量最大值与最小值的差值为延时抖动参数。本文对比现有的几种延时判定方法,结合系统脉冲的特性,采用阈值法测量延时,提出了一种可修正延时点右移的方法,提高了光延时系统的延时测量精度。

## 2 基本原理

### 2.1 光纤延时系统结构

图 1 所示为光纤延时系统结构,该系统由 17 个光开关(首尾为 1×2 光开关,中间为 2×2 光开关)和 16 段不同长度的光纤组成,每段光纤可产生  $2^m$  ns( $m=0,1,2,\dots,15$ )的延时,每个光开关都有直通和交叉两种状态。

例如,要实现 1 ns 延时,除第二个光开关为交叉状态之外,其他光开关都是直通状态。计算机发出对应的光开关控制指令,指令被传送到光纤延时系统并存储在缓存区,在驱动信号的触发下被传给光开关,光开关按照接收的指令切换状态,形成预设的光路。按照上述方法,本系统可实现延时范围为 0~65535 ns、步进为 1 ns 的所有延时。

光开关之间的连接会引入额外延时,导致光开关不同状态组合的光路上下固定延时不一致,可通过补偿光纤弥补延时。例如,图 1 中,光开关 1 与光开关 2 之间②处通过  $\Delta L$  长度的光纤连接,而在①处除了 1 ns 延时光纤还要增加  $\Delta L$  长度的光纤,这样可以补偿光路在经过光开关上下两路时上下固定延时不一致的情况,按照上述方法在 17 个光开关之间上下都增加  $\Delta L$  长度的光纤。尽管该方法会引入

额外延时,但可将其算作系统的固定延时。

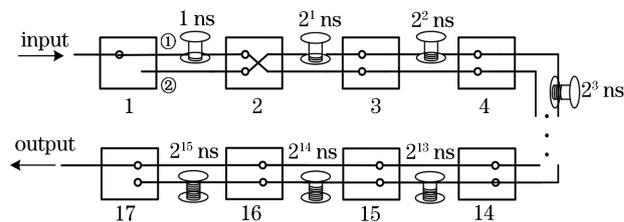


图 1 光纤延时系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of optical fiber delay system

### 2.2 光纤延时原理

光在石英介质中传输的速度与折射率有关,经过一定长度传输产生的延时可表示为

$$T = \frac{L \times n}{c}, \quad (1)$$

式中: $T$  为延时; $L$  为光纤长度; $n$  为光纤的折射率; $c$  为光在真空中传播的速度。

常用的延时测量方法是光脉冲延时测量,其原理如图 2 所示。

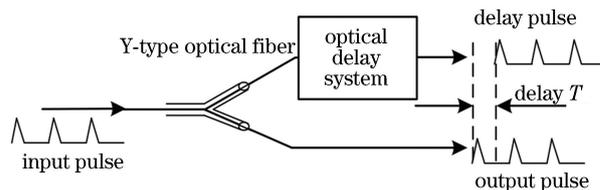


图 2 光脉冲延时测量原理

Fig. 2 Principle of optical pulse delay measurement

输入的光脉冲通过 Y 型光纤后被分为两束,一束经过光纤延时系统,另一束则不经过光纤延时系统,未延时的输出脉冲与延时后的延时脉冲会产生延时  $T$ 。

### 2.3 损耗对延时测量的影响

延时测量需要时刻鉴别,目前主要有三种时刻鉴别方法:恒比定时法、阈值法和极值法<sup>[11]</sup>。如图 3 所示, $U$  表示脉冲幅度, $t_1$  和  $t_2$  分别表示原始脉冲和延时脉冲对应的时刻鉴别点, $V_{m1}$  和  $V_{m2}$  分别表示原始脉冲和延时脉冲的幅度最大值。恒比定时法一般取脉冲上升沿的同等比例(如 50%)对应的时间得出延时  $T$ ;阈值法是通过取两脉冲上升沿同一阈值  $V_{th}$  对应的时间得出延时  $T$ ;极值法是通过求脉冲最高点的时间,从而得出延时  $T$ 。

本系统为光学真延时,延时与光纤长度呈线性关系,几乎不受环境因素的影响。但是,脉冲激光器发出的脉冲存在一定的抖动,通过示波器可以看到脉冲峰值有抖动,上升沿较为稳定,因此采用阈值法测量上升沿。当光电探测器无光照时,由于热激发

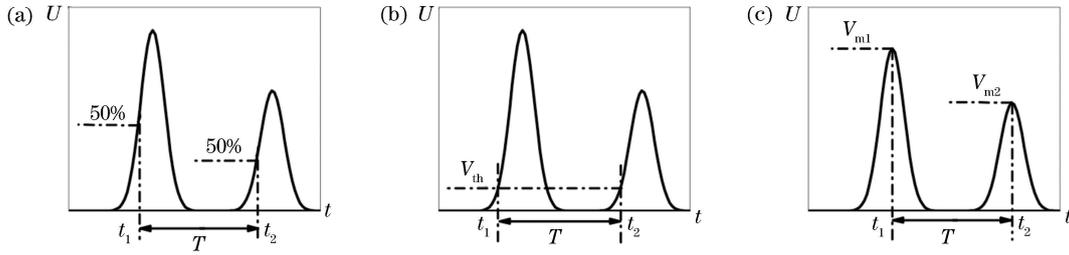


图 3 时刻鉴别法。(a)恒比定时法;(b)阈值法;(c)极值法

Fig. 3 Methods of time discrimination. (a) Constant ratio timing method; (b) threshold method; (c) extremum method

的影响,会存在一定的散粒噪声和背景噪声,因此设定阈值时噪声值要高于无光照时。在示波器上观测到噪声小于20 mV,因此阈值应高于20 mV。

在实验中,可以将脉冲近似看成是高斯脉冲,光纤延时系统由光开关、光纤和光连接器等组成,光经过光纤延时系统后有损耗,不同损耗对延时测量有不同的影响,采用阈值法测量延时会产生误差。如图4所示, $f_1(t)$ 为初始脉冲, $f_2(t)$ 为衰减后的脉冲,二者可分别表示为

$$f_1(t) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right], \quad (2)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right], \quad (3)$$

式中: $\sigma_1 = \tau_{\text{FWHM1}} / (2\sqrt{2\ln 2})$ ,  $\tau_{\text{FWHM1}}$  是初始脉冲  $f_1(t)$  的半峰全宽; $\mu_1$  为脉冲  $f_1(t)$  峰值对应的时刻点; $\sigma_2 = \tau_{\text{FWHM2}} / (2\sqrt{2\ln 2})$ ,  $\tau_{\text{FWHM2}}$  是衰减脉冲  $f_2(t)$  的半峰全宽; $\mu_2$  是脉冲  $f_2(t)$  峰值对应的时刻点。

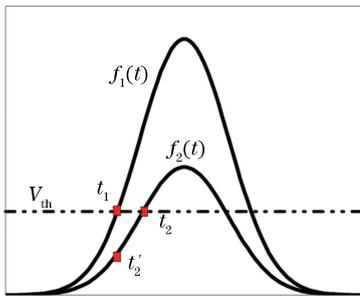


图 4 损耗对延时测量影响的示意图

Fig. 4 Schematic of effect of loss on delay measurement

设定阈值为  $V_{\text{th}}$ , 令

$$f_1(t) = V_{\text{th}}, \quad (4)$$

$$f_2(t) = V_{\text{th}}, \quad (5)$$

解得

$$t_1 = \mu_1 - \sqrt{-2\sigma_1^2 \ln(V_{\text{th}}\sigma_1 \sqrt{2\pi})}, \quad (6)$$

$$t_2 = \mu_2 - \sqrt{-2\sigma_2^2 \ln(V_{\text{th}}\sigma_2 \sqrt{2\pi})}, \quad (7)$$

式中: $t_1$  和  $t_2$  分别为脉冲 1 和脉冲 2 在阈值下对应的时刻,按照波形比例,延时点  $t_2$  应该左移,实际对应为  $t'_2$ ,两者有如下关系:

$$t'_2 = \mu_2 - \sqrt{(t_2 - \mu_2)^2 - 2\sigma_2^2 \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}. \quad (8)$$

因此确定阈值之后,根据(8)式并通过补偿得到  $t'_2$ ,补偿值可表示为

$$\Delta t' = t_2 - t'_2 = t_2 - \mu_2 + \sqrt{(t_2 - \mu_2)^2 - 2\sigma_2^2 \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}. \quad (9)$$

## 2.4 光纤色散对延时测量的影响

光信号经过光纤传输时,光信号的频率和模式不同导致传输速率不同,经过一段距离的传输会发生色散,引起脉冲展宽<sup>[12]</sup>,色散过大会对延时测量造成误差,影响精确度。多模光纤传输时产生的色散有模式色散和色度色散,其中模式色散为主要影响因素。渐变折射率多模光纤模间色散导致的脉冲展宽可表示为

$$\Delta\tau_{\text{modal}} = \frac{Ln_1\delta^2}{8c} = \frac{L(d_{\text{NA}})^4}{32cn_1^2}, \quad (10)$$

式中: $d_{\text{NA}}$  为光纤的数值孔径; $\delta = (n_1 - n_2) / \bar{n}$ ,  $n_1$  为纤芯折射率,  $n_2$  为包层折射率,  $\bar{n}$  为平均折射率。可以看出,色散与传输距离和光纤的数值孔径有关,即传输距离和数值孔径越大,则色散越大。

色散导致光脉冲展宽,在能量不变的情况下,脉冲幅值降低,如图5所示。原始脉冲  $f_3(t)$  和由于色散产生的脉冲展宽后的输出脉冲  $f_4(t)$  可分别表示为

$$f_3(t) = \frac{1}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu_3)^2}{2\sigma_3^2}\right], \quad (11)$$

$$f_4(t) = \frac{1}{\sigma_4 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu_4)^2}{2\sigma_4^2}\right], \quad (12)$$

式中: $\sigma_3 = \tau_{\text{FWHM3}} / (2\sqrt{2\ln 2})$ ,  $\tau_{\text{FWHM3}}$  是脉冲  $f_3(t)$  的半峰全宽; $\mu_3$  为脉冲  $f_3(t)$  峰值对应的时刻点; $\sigma_4 = \tau_{\text{FWHM4}} / (2\sqrt{2\ln 2})$ ,  $\tau_{\text{FWHM4}}$  是脉冲  $f_4(t)$  的半峰全

宽;  $\mu_4$  是脉冲  $f_4(t)$  峰值对应的时刻点。设定阈值  $V_{th}$  后可以得到  $t_3$  和  $t_4$  时刻, 由于波形的变化, 脉冲  $f_4(t)$  实际对应的时刻应为  $t'_4$ 。根据(9)式, 计算出色散导致的延时测量误差补偿量为

$$\Delta t'' = t_4 - t'_4 = t_4 - \mu_4 + \sqrt{(t_4 - \mu_4)^2 - 2\sigma_4^2 \ln \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \quad (13)$$

因此, 结合损耗和色散对延时测量的影响, 可以根据上述方法进行误差补偿, 提高精确度。

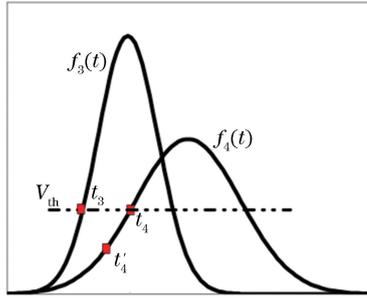


图 5 色散对延时测量影响的示意图  
Fig. 5 Schematic of effect of dispersion on delay measurement

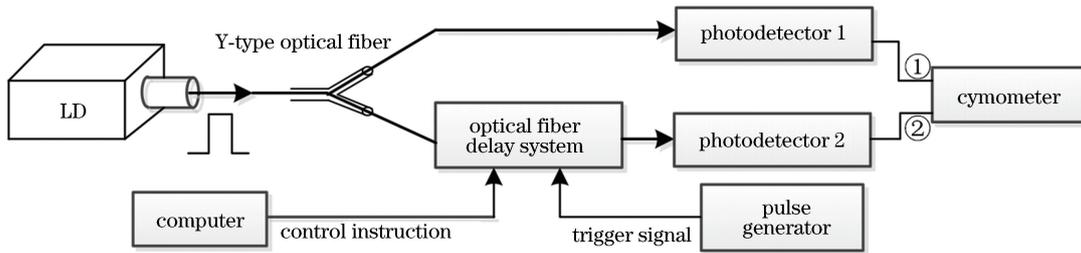


图 6 光纤延时系统装置图  
Fig. 6 Experimental setup for optical fiber delay system

### 3.2 数据刷新率

系统的数据刷新率是指 1 s 内光纤延时系统能够响应的次数, 因为数据刷新率由光开关的响应时间和系统内部计算机的传输响应时间决定, 所以通过测试光开关的切换时间可以得到系统响应时间, 由此推算系统的数据刷新率。如图 7 所示, 以单个  $2 \times 2$  光开关为例, 激光二极管(LD)输出连续激光到光开关的 IN1 端口, 光开关的初始通光状态设为交叉状态(IN1→OUT2, IN2→OUT1), 光电探测器初始输出信号为低电平, 把直通状态(IN1→OUT1, IN2→OUT2)控制数据写入光开关控制系统的缓存区, 当脉冲发生器发出的触发信号到来时, 光开关根据缓存区的控制数据由交叉状态切换到直通状态, 光电探测器的输出信号由低电平变为高电平, 使用数字示波器的单次触发功能抓取脉冲发生器发出的

## 3 系统特性

### 3.1 延时范围及精度

图 6 所示为延时测试原理图, 激光器发出的激光脉冲通过 Y 型光纤后被一分为二, 一束直接通过光电探测器 1, 另一束经过光纤延时系统后通过光电探测器 2。计算机通过串口 RS232 将控制指令写入缓存区, 信号发生器给系统提供驱动信号, 以使光纤延时系统接收到控制指令, 系统按照预设的延时进行光开关快速切换, 通过比较两通道时间间隔得到延时。

系统延时主要是由光纤长度不同而产生的, 为光学真延时, 因此通过多次测量延时接近真值。每组延时都测量 100 次, 标准差计算式为

$$\sigma = \lim_{q \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (x_i - x_0)^2}{q - 1}} \quad (14)$$

式中:  $q$  为测量次数;  $x_i$  为测量值;  $x_0$  为平均值。标准差反映了测量值的离散情况, 可用标准差判定系统的稳定性。将多次测量得到的最大值和最小值的差值作为系统延时的抖动。

触发信号和光电探测器输出的信号波形, 分别在示波器的 CH1 通道和 CH2 通道显示。测量触发信号上升沿到光电探测器输出信号上升到高电平的时间, 即  $2 \times 2$  光开关由交叉状态转换到直通状态的响应时间。按照上述方式, 所有光开关和光开关组合的状态切换响应时间均能被测试, 根据系统的并行控制设定判断光开关的切换状态是否同步进行且满足数据刷新率要求。

### 3.3 链路损耗

光纤延时系统是由多个光开关和多段光纤连接而成, 脉冲光通过系统时, 除了光开关的损耗, 还包括光纤和连接器的损耗, 测量这些连接的损耗对初始激光脉冲的功率选择有一定的指导意义。

整个光纤延时系统的损耗由三部分组成: 光纤损耗、光开关损耗和连接器损耗。整体损耗可表示为

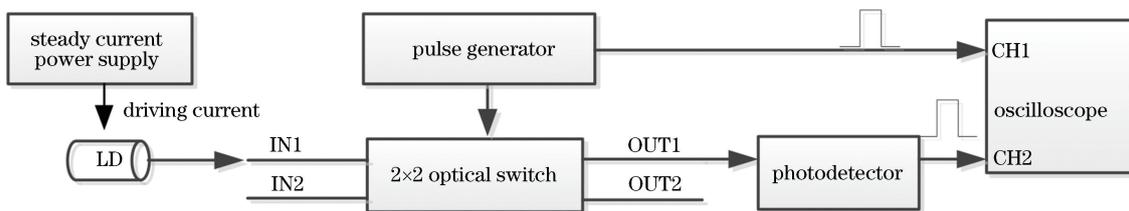


图 7 数据刷新率测试原理图

Fig. 7 Principle diagram of data refresh rate test

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{fib}} + P_{\text{swi}} + P_{\text{con}}, \quad (15)$$

式中： $P_{\text{fib}}$ 为系统中接入光纤引起的损耗； $P_{\text{swi}}$ 为光开关在传输中引起的损耗； $P_{\text{con}}$ 为光开关与光纤直连的连接器产生的损耗。损耗计算式为

$$\alpha = -10 \lg \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}}. \quad (16)$$

因为光纤的损耗约为 0.5 dB/km,所以延时越长对应的光纤越长,链路损耗则越大。每个光开关损耗约为 0.5 dB,每个连接器的损耗约为 0.5 dB,总损耗约为 31 dB。本系统所用激光脉冲的脉宽为 8 ns,单脉冲能量为 2  $\mu$ J,由于光电探测器接收的光功率在 10 mW 以下,高于阈值会出现过饱和现象。考虑到链路的最大损耗,还需要加上可调衰减器调节衰减,避免光电探测器出现过饱和现象。

#### 4 分析与讨论

根据实验在大范围背景设定下的应用,选定 16 段光纤对应的延时和 50 m 对应的延时 333 ns 进行测量,这覆盖了 65535 ns 内所有数量级的延时,测量延时应为预设延时与固定延时之和,表 1 所示为光纤延时系统部分延时测量结果。

表 1 光纤延时系统部分测量结果

Table 1 Partial measurement results of optical fiber delay system

Preset value of delay /ns	Measured value of delay /ns	Measured jitter /ns	Standard deviation /ns
0	199.076	0.26	0.090
4	203.032	0.31	0.107
32	228.564	0.29	0.164
64	258.411	0.26	0.146
128	322.693	0.26	0.140
256	450.569	0.28	0.081
333	521.914	0.20	0.088

如表 1 所示,通过频率计对表中各个延时进行 100 次测量,得到延时系统的抖动和标准差。表 1 中所有测量值均为 100 次测量后的结果。可以得出系统最大值与最小值的差值小于 0.32 ns,延时标准差不超过 0.2 ns,由此得出系统的稳定性在 0.2 ns

以内,延时抖动小于 0.32 ns。

图 8 为预设延时与实际测量延时的关系图,图 8(a)为整体图,图 8(b)为 0 ns 处的局部放大图。从拟合曲线可以看出,预设延时与实际测量延时呈线性关系,拟合曲线表达式为  $y = 0.984x + 198.613$ 。该直线表明整套系统能覆盖 0~65535 ns 内所有延时,随着预设延时的增大而呈线性增大,延时精度达 ns 量级,能实现步进为 1 ns 的大范围延时。系统包含光纤、光连接器和光开关等,由拟合曲线可知,引入的固定延时为 198.613 ns。随着光纤长度的增加,由于光纤的裁剪误差的影响,光纤实际产生的延时比预设延时要小,随着预设延时的增大,预设延时与实际测量延时的差值越来越小,因此根据后续设定程序对差值进行补偿。

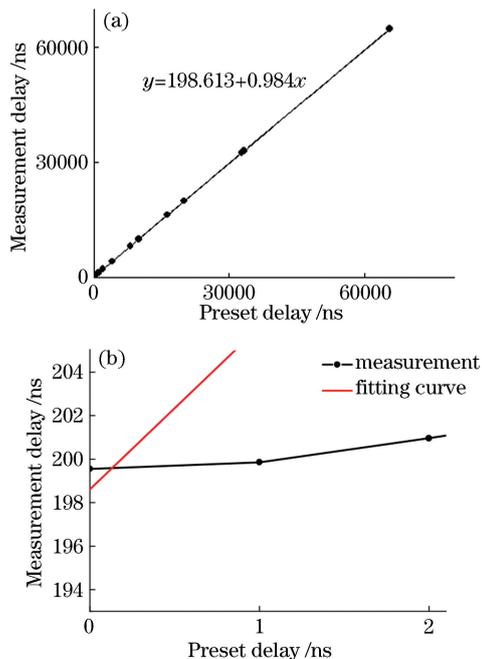


图 8 预设延时与测量延时的关系图。(a)整体图;(b)局部放大图

Fig. 8 Relationship between preset delay and measurement delay. (a) Overall diagram; (b) local enlarged diagram

图 9 为采用阈值法和恒比定时法测量延时产生的测量误差对比,可以看出,采用恒比定时法测量时

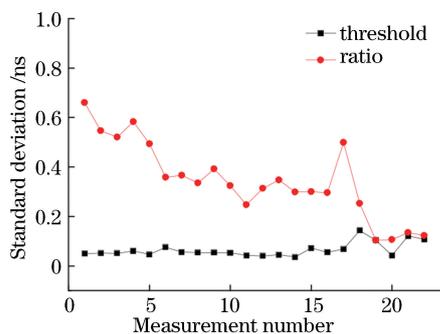


图 9 阈值法和恒比定时法测量误差的比较

Fig. 9 Comparison of measurement errors obtained by threshold method and constant ratio timing method

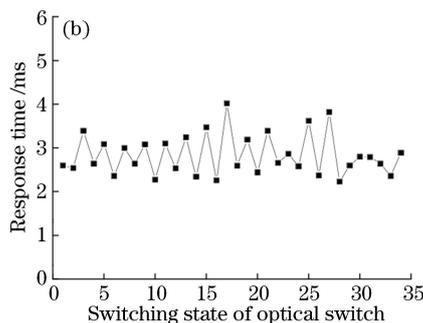
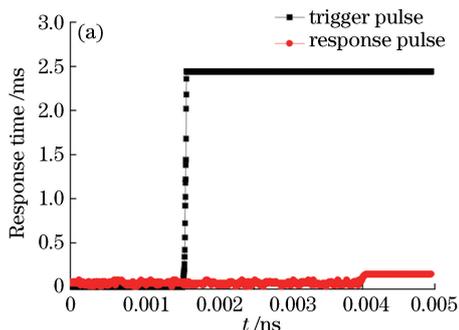


图 10 光开关响应时间。(a)光开关 1 的直通状态响应时间；(b) 17 个光开关不同状态的响应时间

Fig. 10 Response time of optical switch. (a) Response time of optical switch 1 in direct state; (b) response time of 17 optical switches in different states

## 5 结 论

对可编程光纤延时系统特性进行了研究,该系统延迟时间可调,可模拟延时范围为 0~65535 ns,延时精度为 1 ns,系统稳定性在 0.2 ns 以内,延时抖动小于 0.32 ns,光开关响应时间小于 4 ms,数据刷新率可达 100 Hz。该系统适用于大范围、高精度的延时需求,结构化程度高,易于在不同场合进行延时模拟仿真,提高了现有的大范围光延时系统的延时精度,为后续系统的研制设计提供了支撑。

### 参 考 文 献

[1] Hu X Z, Yu S H. Basic theories and application of optical fiber communications[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2008: 8-15.  
胡先志, 余少华. 光纤通信基本理论与技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008: 8-15.

[2] Liu L, Wang W. Development of light-controlled phased array radar and key technologies in its implementation [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2016(18): 134.

误差明显偏大,这与激光脉冲的抖动有关,抖动较大导致峰值不定,恒比定时法测量延时不够准确,因此选用阈值法测量延时较稳定且准确。

图 10 为光开关响应时间的显示结果,图 10(a)为光开关 1 的直通状态切换时的响应时间,图 10(b)为 17 个光开关两种切换状态响应时间及多个光开关级联的状态切换响应时间,可以看出,切换状态的响应时间在 2~4 ms 之间。由此可以判定光开关控制指令为并行的,当光纤延时系统接收到控制指令后,17 个光开关同时切换状态,达到预设状态,数据刷新率可达 100 Hz。

刘磊, 王伟. 光控相控阵雷达发展动态和实现中的关键技术[J]. 电子技术与软件工程, 2016(18): 134.

[3] Lu Q, Zhang W, Lin R G. Design of delay system based on optical fiber transmission [J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(23): 160-163.  
陆强, 张伟, 林荣刚. 基于光纤传输的延时系统设计 [J]. 电子设计工程, 2012, 20(23): 160-163.

[4] Chen W, Cao J H, Pei L. Realization and application of all-optical delay line[J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(1): 71-75.  
陈伟, 曹继红, 裴丽. 全光时延线的实现和应用[J]. 光电技术应用, 2013, 28(1): 71-75.

[5] Duan X, Zhang S T, Jiang Y Y, et al. Improvement and implementation of a multi-channel programmable optical controlled true time delay network[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(5): 1-4.  
段兴, 张斯滕, 姜媛媛, 等. 多通道可编程光控真延时网络方案改进与实现 [J]. 光通信技术, 2017, 41(5): 1-4.

[6] Zhu N H, Yan L S, Liu J G. Frontier of optical fiber optics[M]. Beijing: Science Press, 2011: 328-329.  
祝宁华, 闫连山, 刘建国. 光纤光学前沿[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 328-329.

[7] Schippers H, Verpoorte J, Jorna P, et al. Conformal

- phased array with beam forming for airborne satellite communication [ C ]//2008 International ITG Workshop on Smart Antennas, February 26-27, 2008, Darmstadt, Germany. New York: IEEE, 2008: 343-350.
- [8] Chen Y, Lang T T, He J J. Integrated optical true time delay module based on optical wavelength router [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0223001.  
陈阳, 郎婷婷, 何建军. 基于波长路由的光真延时模块[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0223001.
- [9] Guo J W, Pu R W, Sun L J. Study on numerically-controlled fiber delay system based on radar target simulation [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(1): 139-142.  
国建卫, 蒲儒伟, 孙力军. 基于雷达目标模拟的数控光纤延迟系统研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(1): 139-142.
- [10] Qiu Z C, Shi S J, Qiu Q. Research of high precision optical fiber delay line [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6): 72-75.  
邱志成, 史双瑾, 邱琪. 高精度光纤延迟线的研究[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 72-75.
- [11] Chen R Q, Jiang Y S, Pei Z. High frequency and high accuracy laser ranging system based on double thresholds leading-edge timing discrimination [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912002.  
陈瑞强, 江月松, 裴朝. 基于双阈值前沿时刻鉴别法的高频脉冲激光测距系统[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912002.
- [12] Wang X, Li X K, Chen L F. Fast measurement of optical fiber dispersion method based on optical switch and laser beat frequency [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030603.  
王旭, 李小康, 陈龙飞. 基于光开关和激光拍频的光纤色散快速测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030603.