

文章编号：1001-3806(2007)01-0047-03

## 采用可调谐激光器提高光纤延迟线精度的研究

卿翔, 陈福深 \*

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 成都 610054)

**摘要：**为了提高一种 3bit 可变光纤延迟线的延时精度, 提出一种采用可调谐激光器作为系统光源的技术, 利用光纤的材料色散特性即光纤的折射率随传输波长变化而改变的特点, 来改变延时光纤中信号存储的时间, 从而达到提高光纤延迟线延时精度的目的。仿真结果表明, 采用该种技术的光纤延迟线系统, 平均延时误差从 4.1ps 下降到了 1.3ps, 延时精度得到了显著提高。

**关键词：**光数据存储; 光纤延迟线; 可调谐激光器; 材料色散; 延时精度

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

### In proven ment on optical fiber delay lines precision based on tunable laser

QING Xiang, CHEN Fu-shen

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In order to improve the precision of a 3bit variable optical fiber delay line, a new technology using a tunable laser as the lighting source of the delay system is proposed based on the characteristics of optical fiber's material dispersion that the refraction index of optical fiber changes along with the difference of transmitting wavelength. At the same time, the period of optical signal storage in delay lines is also altered and the delay precision of optical fiber delay lines is improved. The simulation results indicate the mean delay error decreases from 4.1ps to 1.3ps, and the delay precision of the 3bit optical fiber delay line is remarkably improved by using this new technology.

**Key words:** optical data storage; optical fiber delay line; tunable laser; material dispersion; delay precision

### 引言

随着光纤传输技术在通信领域的快速发展, 光纤一个很重要的应用, 即能进行频域和时域信号处理的特点也得到了充分体现, 其中最典型的应用就是将光纤作为延迟线。相比传统的电延迟线, 光纤延迟线具有带宽宽、损耗低、抗电磁干扰能力强、保密性好、重量轻以及性价比高等优点。光纤延迟线应用广泛, 包括编解码器、滤波器、相关器以及存储器等, 尤其在雷达和电子对抗中作用明显, 军用性强。目前, 光电器件如高速激光器、探测器和光开关等的逐步成熟, 使得光纤延迟线更加趋于实用化, 成为光纤信息处理的一个研究热点。

### 1 3bit 可变光纤延迟线的原理及系统设计

#### 1.1 光纤延迟线的原理

图 1 为光纤延迟线示意图。射频信号 RF 输入激

作者简介: 卿翔 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为集成光学器件和光纤通信技术。

\* 通讯联系人。E-mail: fschen@uestc.edu.cn

收稿日期: 2005-11-25; 收到修改稿日期: 2006-02-24

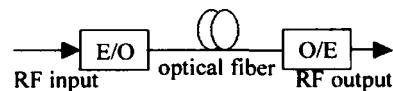


Fig 1 The schematic of optical fiber delay line

光器, 激光器将输入的 RF 信号变换为被调制的光信号, 通过接头耦合进光纤。在接收端通过检测器将调制的光信号再变换为原来的射频 RF 电信号。输出的射频电信号的频谱与输入的射频电信号频谱完全相同, 只是用光纤作为介质延迟了一段时间。即射频信号瞬时存储在光纤延迟线单元中, 存储时间的长短与光纤的长度成正比, 这就是光纤延迟线的原理。

当光波在光纤中以速度  $v$  传播的时候, 特定长度  $L$  的光纤产生的延时可以表示为:

$$\Delta t = L/v = L n_k / c \quad (1)$$

式中,  $n_k$  为传输波长为  $\lambda$  时, 光纤的折射率,  $c$  为光波在自由空间中的传播速度。从  $\Delta t$  的表达式可以看出, 延迟时间的长短是与光纤长度  $L$  和光纤折射率  $n_k$  成正比例的。那么只要能够改变  $L$  和  $n_k$  的值, 就能得到不同的可调的延时值。 $L$  的改变可以通过使用光开关选择不同的延时路径来得到, 不同的延时路径对应长度不同的延时光纤。由于光纤本身具有的材料色散特

性,光纤的折射率  $n_\lambda$  是传输波长  $\lambda$  的函数<sup>[1]</sup>,即只要改变  $\lambda$  的值,就能改变光纤折射率  $n_\lambda$ ,也可以得到可调的延时值。其中,光纤长度  $L$  决定延时的主要范围,根据现有的工艺水平,长度误差可以控制在  $0.8\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$  左右,延时精确度一般在  $1\text{ps} \sim 10\text{ps}$  之间;而通过改变  $\lambda$  值来改变折射率  $n_\lambda$ ,从而达到改变信号在光纤中存储的时间长短的方式主要起修正延时值,提高延时精度的作用<sup>[2,3]</sup>,根据作者设计的 3bit 可变光纤延迟线中采用的可调谐激光器的波长调谐范围,以及选用的延时光纤的种类和长度,修正的延时精度在  $0.4\text{ps}$  到几个皮秒之间。

## 1.2 光纤的材料色散特性与延迟时间的关系

由于色散的影响,光信号在光纤中传输时,会造成光脉冲沿传输路径的不断展宽,对于单模光纤而言,因只有一种模式传输,故不存在模间色散,只有材料色散和波导色散,因此色散引起的延时值  $\Delta\tau$  可以表示为:

$$\Delta\tau = D \cdot \Delta\lambda \cdot L = [D_m(\lambda) + D_w(\lambda)] \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (2)$$

式中,  $D_m(\lambda)$ ,  $D_w(\lambda)$  分别是材料色散系数和波导色散系数,材料色散是由纤芯对不同波长呈现不同的折射率而引起的,波导色散是由于导波模的相位常数随工作波长的变化而引起的,其中材料色散影响较波导色散影响要大。在实际由色散引起的延时中,波长的变化  $\Delta\lambda$  除了由光源谱宽  $\Delta\lambda_s$  引起外,改变后的中心波长与原中心波长  $\lambda_0 = 1550\text{nm}$  的差值  $\Delta\lambda_d$  也是构成波长变化的最主要的因素,对于本文中使用的半导体可调谐激光器,通常  $\Delta\lambda_s \ll 0.2\text{nm}$ ,而  $\Delta\lambda_d$  是  $1.6\text{nm}$  的整数倍,因此:  $\Delta\lambda = \Delta\lambda_s + \Delta\lambda_d = \Delta\lambda_s + (\lambda - \lambda_0)$   $(3)$

$$\Delta\tau = [D_m(\lambda) + D_w(\lambda)] / \Delta\lambda_s + (\lambda - \lambda_0) / L \quad (4)$$

从(4)式可以看出,采用改变可调谐激光器波长的方法得到的可变延时值  $\Delta\tau$  由光纤的色散系数  $D(\lambda)$ 、波长变化  $\Delta\lambda$  以及延时光纤的长度  $L$  确定<sup>[4]</sup>,它主要起修正延时精度的目的。

## 1.3 新型 3bit 可变光纤延迟线的系统设计

可变光纤延迟线系统通常包括光源、调制器、可变延时单元、探测器以及 RF 信号源等几个部分,本文中设计的可变光纤延迟线系统如图 2 所示,最显著的特点是使用可调谐激光器替代了以往只具有固定波长的激光器<sup>[5]</sup>。

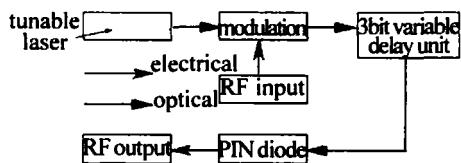


Fig 2 The system structure diagram of optical fiber delay line being designed

光源采用当前技术比较成熟的用于 DWDM 的半导体可调谐激光器,调谐波长在  $1525\text{nm} \sim 1565\text{nm}$  共  $40\text{nm}$  范围内,谱线宽度最大不超过  $0.2\text{nm}$ ,使用的波长间隔为  $1.6\text{nm}$  (对应频率  $200\text{GHz}$ ),能够使用的波长是 25 个<sup>[6]</sup>。结合课题项目的要求,RF 信号频率范围在  $8\text{GHz} \sim 12\text{GHz}$ ,因此选用高速外调制器。3bit 可变延时单元结构如图 3 所示,采用延时光纤将 4 个  $2 \times 2$

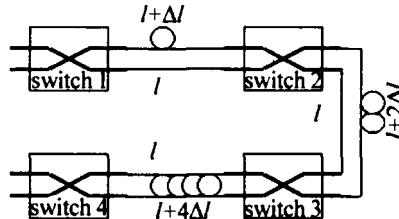


Fig 3 The 3bit variable delay unit

光开关级联,通过对 4 个光开关的“开”、“关”状态的任意组合,能得到  $\Delta t_1 \sim \Delta t_8$  共 8 种不同的延时。由于光源用的是可调谐激光器,具有一定的波长范围,因此光开关应该选择波长范围宽,偏振性不敏感,中心波长工作在  $1550\text{nm}$  的机械式光开关。从(4)式知道,要得到较大范围的精度修正值,延时光纤要求选用材料色散系数特别高的光纤,图 4 所示的某单模硫系光纤就

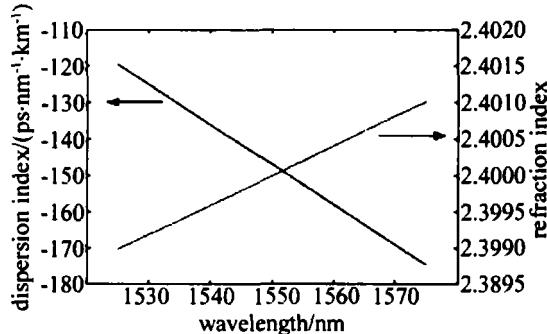


Fig 4 The dispersion index and refraction index of some single mode  $A_2S_3$  fiber

具有这种特性,色散系数特别高,并且主要是由材料色散引起。在可调谐激光器的波长范围 ( $1525\text{nm} \sim 1565\text{nm}$ ) 内,这种光纤的色散系数、光纤折射率与波长基本呈线性关系,中心波长  $1550\text{nm}$  处色散系数大约是  $-150\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,折射率可达到  $2.40^{[7,8]}$ 。因此,对于采用这种单模硫系光纤作为延时光纤的系统,(4)式可以表示为:

$$\Delta\tau \approx D_m(\lambda) \cdot [\Delta\lambda_s + (\lambda - \lambda_0)] \cdot L \quad (5)$$

## 2 理论分析与仿真结果

图 3 所示的延时单元由 4 个  $2 \times 2$  光开关级联,通过对 4 个光开关的“开”、“关”状态的任意组合,能得到  $\Delta t_1 \sim \Delta t_8$  共 8 种不同的延时,用表达式可以表示为:

$$\Delta t_i = \frac{[3L + (i-1)\Delta l] \cdot n_0}{c}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 8) \quad (6)$$

式中,取  $l=0.25\text{m}$ ,  $\Delta l=0.05\text{m}$ ,  $n_0=2.40$ ,它是传输波长为  $1550.12\text{nm}$ 时延时光纤的折射率。代入这些数

据,可以得到一组共8种理论延时值,如表1所示。

作者设计的可变光纤延迟线系统采用Virtual

Table 1 The relations among kinds of time delay, length of optical fiber and theoretic delay

kinds of delay $i$	1	2	3	4	5	6	7	8
length of fiber/m	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10
theoretic delay/ns	6.0000	6.4000	6.8000	7.2000	7.6000	8.0000	8.4000	8.8000

Photonics公司的光子传输组件(photonic transmission design suite, PTDS)和MATLAB进行混合仿真计算。图5中的点线连接的小方框曲线是在  $l=0.25\text{m}$ ,  $\Delta l=0.05\text{m}$ ,  $n_0=2.40$ ,传输波长为  $1550.12\text{nm}$ ,还未采用改

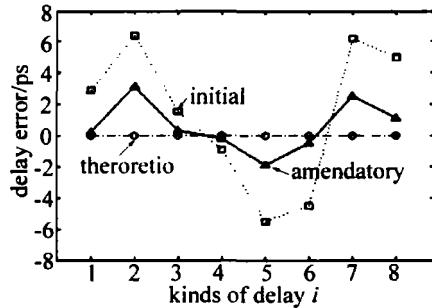


Fig 5 The comparison between the initial delay and the amendatory delay  
变可调谐激光器波长来修正延时精度的方法时,得到的一组初始延时仿真值图形。其中,横坐标1~8代表3位共8种不同的延时,纵坐标是初始延时值  $\Delta T_i$ 与对应理论延时值  $\Delta t_i$ 之间的延时误差,用  $\Delta T$ 表示,它们之间的关系用公式可以表示为:

$$\Delta T = \Delta T_i - \Delta t_i, (i = 1, 2, 3, \dots, 8) \quad (7)$$

从图5中的初始延时曲线可以看出,未修正过的初始延时值与理论延时值之间的延时误差值在  $0.9\text{ps} \sim 6.4\text{ps}$ 之间,平均值是  $4.1\text{ps}$ 。根据(5)式可知,采用改变激光器波长变化  $\Delta\lambda$ 的方法,能够得到一组延时精度修正值。以延时种类为6的情况下,延时光纤总长度  $L=1.00\text{m}$ 的情况下,延时修正值  $\Delta\tau$ 与波长变化  $\Delta\lambda$ 之间的关系如图6所示,在  $\Delta\lambda$ 可调谐的范围内,能够实现的延时精度修正值在  $-3.5\text{ps} \sim +4.5\text{ps}$ 之间。

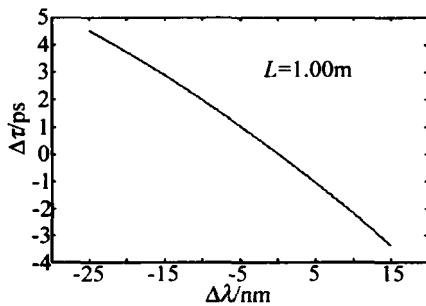


Fig 6 The relations between wavelength change and the amendatory delay

对于图5所示光源工作在中心波长  $\lambda_0=1550.12\text{nm}$ 处得到的一组初始延时值,它与理论延时值之间的误差具体数值见表2。根据误差值,采用改

Table 2 The relations between the initial delay error and the wavelength change

kinds of delay $i$	1	2	3	4	5	6	7	8
initial delay errors/ps	2.9	6.4	1.5	-0.9	-5.5	-4.5	6.2	5.0
wavelength change/nm	-14.4	-24.0	-8.0	4.8	24.0	24.0	-24.0	-24.0

变激光器波长的方法分别来修正8种延时的精度。要修正8种延时中的任意一种,只需根据表2,将激光器波长从中心波长  $\lambda_0$  改变到对应的  $\lambda_0 + \Delta\lambda$ ,就能达到提高延时精度的目的。

采用改变激光器波长修正延时值后得到的仿真图形用图5中实线连接的三角形曲线表示,可以看出,相较于未修正过的初始延时值,它更加靠近理论延时曲线,延时精度得到了显著的提高,平均延时误差下降到了  $1.3\text{ps}$ 。

### 3 结论

在介绍了光纤延迟线的应用和原理后,设计了一种新的3bit可变光纤延迟线系统,以半导体可调谐激光器代替传统的固定波长激光器作为延迟系统的光源,并且选用材料色散特性特别显著的高色散率单模硫系光纤作为延时光纤。提出利用光纤的折射率随传输波长变化而改变的特点,来改变延时光纤中信号存储的时间,从而达到提高光纤延迟线延时精度的目的。通过使用PTDS和MATLAB,对这种3bit可变光纤延迟线系统混合仿真,得到了理论延时值、未修正过的初始延时值以及修正过的延时值共3组延时数据。从数据中可以看出,采用调谐激光器波长的方法,延时值相较于未修正过的初始延时值,平均误差值从  $4.1\text{ps}$  下降到了  $1.3\text{ps}$ ,显著地提高了光纤延迟线的延时精度。

### 参考文献

- [1] KESER G Optical fiber communications [M]. 3rd ed, Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2002. 84~86 (in Chinese).
- [2] CAMPILLO A L, FUNK E E, TULCHINSKY D A et al Wavelength-division-multiplexed analog-delay line [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(2): 440~447.

(下转第53页)

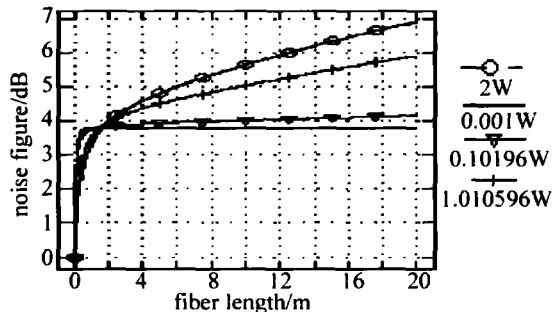


Fig 6 Noise figure versus fiber length for different input signal powers under the bi-directional pumping cases

ASE逐渐被抑制,噪声指数减小;随着输入信号功率增加,信号本身要消耗输入端反转粒子,使噪声指数增加。同时,抽运光沿光纤不断衰减,信号光不断被吸收,增益下降,使噪声指数随光纤长度增加而变大。反向抽运时,噪声指数沿长度急剧增加,长度越长,对抽运光和信号光吸收越多,反转粒子数越少,噪声功率越高,噪声指数越大。双向抽运时,噪声指数随输入信号功率、抽运功率的变化与同一条件下正向抽运方式下结果相类似。在最佳长度内,其噪声性能优良;超过最佳长度,其噪声指数要大于同等条件下正向抽运的噪声指数。

从图3至图6可以看出,对相同的抽运功率、输入信号功率和最佳长度,反向抽运的噪声指数要比正向抽运和双向抽运的大。如抽运功率为20W,输入信号功率为0.01W,最佳长度为7m时,抽运和双向抽运噪声指数小于4dB,反向抽运已达到7dB。要使反向抽运噪声指数小于4dB,其光纤长度必须小于4m,即缩短到最佳长度以下,这是以减小增益为代价的。已有研究<sup>[9]</sup>结果表明,反射镜的加入可以改善后向抽运方式的噪声性能。

(上接第49页)

- [3] YEGNANARA YANAN S, JALAL I B. Wavelength-selective true time delay for optical control of phased-array antenna [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(8): 1049~1051.
- [4] WU Ch Q. The theory of optical waveguide [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 81~84 (in Chinese).
- [5] ZHU Zh, CHEN L Y, LIH et al. Wavelength stabilization scheme for tunable laser diode based on temperature feedback [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 18~20 (in Chinese).
- [6] WANG H, WANG P, YU H. Optical fiber communications [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2004. 186~194 (in Chinese).
- [7] SHI Ch Zh, LAO Y B, LAI Sh R. Nonlinear properties of chalcogenide fibers and their application to all-optical switching [J]. Laser Journal, 2001, 20(5): 1~4 (in Chinese).
- [8] LIM, LIAO Y B, SHI Ch Zh. Dispersion characteristics of single mode  $\text{As}_2\text{S}_3$  fiber [J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(2): 171~173 (in Chinese).
- [9] WANG A T, XU L X, M NG H et al. Experimental study on ytterbium-doped fiber amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(9): 777~779 (in Chinese).
- [10] L MPERT J, L IEM A, ZELLMER H. High-average-power picosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. Opt Lett, 2001, 26(23): 1849~1851.
- [11] LU X Q, CHEN Sh H. Ytterbium-doped fiber amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(3): 209~214 (in Chinese).
- [12] PASCHOTAL R, N LSSON A C J. Ytterbium-doped fiber amplifier [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(7): 1049~1056.
- [13] HANNA D C, PERCIVAL R M, PERRY IR et al. An ytterbium-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from 1.010 $\mu\text{m}$  to 1.162 $\mu\text{m}$  and three-level operation at 974nm [J]. Journal of Modern Optics, 1990, 37(4): 517~525.
- [14] KONG L F, LOU Q H, ZHOU J et al. Frequency response and transient gain of Yb-doped double clad fiber amplifier [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(11): 1286~1289 (in Chinese).
- [15] WANG Y, PO H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2001, 21(10): 2262~2270.
- [16] BJARKEV A. Optical fiber amplifiers: design and system applications [M]. New York: Artech House Inc, 1993. 77.
- [17] XIA G J, DUAN J H, ZHAO Sh H et al. Performance study on double cladding Er-Yb co-doped fiber amplifiers with a reflector [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 12~19 (in Chinese).

### 3 结论

对掺 $\text{Yb}^{3+}$ 光纤放大器信号增益和噪声指数在3种抽运方式下的特性进行数值模拟。结果表明,抽运方式对增益影响较小,抽运方式不同,其它条件相同时,虽然增益沿光纤的分布不同,但光纤末端信号增益是相同的。抽运方式对噪声指数影响较大,光纤达最佳长度时,正向和双向抽运方式的噪声指数要优于反向抽运方式。

### 参 考 文 献