

·测试、试验与仿真·

## 全光时延线的实现和应用

陈伟,曹继红,裴丽

(北京交通大学光波技术研究所,全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044)

**摘要:**从光时延线的原理、结构和性能等方面对全光时延线的实现方法进行了详述,并认为基于波长转换和光纤色散的全光可调时延线将在全光网络中具有重要作用;之后,对光时延线在OTDM、光学测量和光交换中的应用进行了介绍,最后总结了全光时延线需要改进的几个方面。

**关键词:**光时延线;慢光;波长转换;色散

中图分类号:O432.2

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-01-0071-05

## Realization and Application of All-optical Delay Line

CHEN Wei, CAO Ji-hong, PEI Li

(Education Department Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on principles, structures and performances of optical delay line, realization methods of all-optical delay line are introduced on detail. All-optical tunable delay line based on wavelength conversion and optical fiber dispersion is thought as an important factor in all-optical network. Applications of optical delay line in optical time division multiplex (OTDM), optical measurement and optical switching are introduced. The needed improvements of all-optical delay line are summarized finally.

**Key words:** optical delay line; slow light; wavelength conversion; dispersion

在目前的光纤通信系统中,信息虽然是以光为载波在光纤波导中传输,但在一些节点处仍需要经过光电转换才能进行光信息处理。随着现在信息量的不断增大,电子器件的处理速度已经不能满足需求,出现信息的丢失和通信质量的下降,称之为“电子瓶颈”。它限制了通信速率的进一步提高,并且额外的光/电和电/光转换,提高了成本,加大了器件尺寸,增加了系统复杂性。所以全光器件的研究和实现对全光通信系统的发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。

全光时延线作为新型信号处理器,是全光器件和光缓存器的一种,也是光信息处理技术中的关键器件之一,应用广泛。相比于传统的时延线,全光时延线能避免“电子瓶颈”,具有带宽大、损耗低、结构简单、易实现多位延时、抗电磁干扰能力强、保密性

好等特点,应用前景广阔。全光时延线的实现和应用是全光通信中的研究热点之一<sup>[2]</sup>。

### 1 全光时延线的原理与结构

#### 1.1 传统全光时延线

传统全光纤时延线的工作原理很简单,就是让光在光纤中多传输一段光纤,实现延时。时延量和光多传输的光纤长度成正比。其结构简图如图1。假设不考虑色散,光脉冲信号在光纤中以群速度 $v_g$ 传播,则脉冲时延的长短 $\tau$ 与光纤长度 $L$ 的关系式如下

$$\tau = \frac{L}{v_g} = \frac{Ln_g}{c} \quad (1)$$

式中, $n_g$ 为光纤的群折射率, $c$ 为光在真空中的传播速

收稿日期:2012-12-27

基金项目:国家自然科学基金(61275076)资助的课题

作者简介:陈伟(1987-),女,山东省潍坊人,硕士,主要从事光器件和光信息处理方面的研究。

度。由式(1)可知,只要改变光纤的长度,就能实现不同的时延量。传统光纤时延线的精度主要是由光纤切割的精度来决定,其延时范围约在皮秒至毫秒量级。根据现有的工艺水平,光纤切割长度误差可以控制在0.8~1.0 mm之间,延时精度一般在1~10 ps之间<sup>[3]</sup>。

传统的光时延线结构如图1所示。其结构比较简单,成本低,无累积噪声,可实现连续的或者离散的时延。但是要想获得更大时延,就需要更长的光纤和更复杂的结构,进而增加了设备体积,不利于集成;并且光纤越长,接头越多,光衰减就更大。

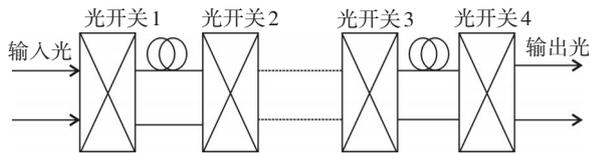


图1 传统光时延线的结构

## 1.2 基于慢光实现的全光时延线

全光时延线的另一个很重要的发展方向就是慢光。它是通过一定的物理效应,让介质的色散曲线发生急剧的改变,从而使得某一频率附近的群速度大大下降,进而实现非常缓慢的光速。这样,光信号通过器件所需的时间就会很长,借此可以获得较大的时延。这个理论可以通过公式进行简单的说明。光在光纤中传输的群速度 $v_g$ 可用下式表示

$$v_g = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}} \quad (2)$$

其中, $n$ 为光纤折射率, $\omega$ 为光信号频率, $dn/d\omega$ 为光纤折射率 $n$ 随光信号频率 $\omega$ 的变化率。真空中光速与介质中实际的群速度比值,可称为减慢因子,并由下式表示为

$$S = \frac{c}{v_g} = n + \omega \frac{dn}{d\omega} \quad (3)$$

减慢因子 $S$ 代表光速减慢的程度。由减慢因子的表达式,可以看出群速度降低有两个途径:一是增大折射率;另一是增大折射率的变化率 $dn/d\omega$ ,使折射率在频率 $\omega$ 附近产生剧烈的变化来增大色散。由于介质中的折射率都与真空中的折射率相差不大,所以通过改变折射率的方法来减慢光速,其减慢的程度十分有限。因此,实现极慢光速的可行办法就是增大折射率的变化,这可通过电磁感应透明技术、相干粒子数振荡技术、受激布里渊散射技术等实现<sup>[4]</sup>。

1999年,美国哈佛大学的研究人员在435 nm的温度下,在冷却到波色—爱因斯坦凝聚态的钠原子蒸汽中,利用电磁诱导透明效应,使光速降低到17 m/s,从而获得了7  $\mu$ s的脉冲延时<sup>[5]</sup>。但这类方法对实验条件的要求非常苛刻。为了实现室温下的慢光,人们开始利用相干布居振荡效应来达到这一效果。后来,为了能够更好地与光纤进行耦合,又研究了基于光纤的非线性效应产生慢光的机制,这种方法更适用于光通信中全光缓存器的应用需求。

2005年,康乃尔大学的研究人员在室温下,利用单模光纤中的受激布里渊散射效应,实现了最大25 ns的连续性可调延时<sup>[6]</sup>。2007年,美国杜克大学的研究小组利用受激布里渊散射机制,将光信号转移到产生的声子上,让带有信号的声子传播一段距离后,再用另一束连续光与其相互作用,将存储于声子之上的信号给“读”出来<sup>[7]</sup>。这种方案的原理和基于受激布里渊散射效应的慢光实验不同,信号传输的速度也从光速下降到了声速。

通过大幅地降低光速的确能用较短的介质产生较大的时延,但目前对慢光的研究还不十分成熟,存在的问题很多。尽管时延较长,但所需使用的脉冲也很宽。相对于脉宽来说,延时量并不算大。另外,产生慢光效应的窗口、带宽一般很小,而且只能在特定频率附近。脉冲变形很严重,其所能获得的最大时延量也存在一定的理论极限,目前所报道的能够实现的最大时延只有几比特。

## 1.3 基于波长转换和色散的全光可调时延线

最近几年,通过色散介质和波长转换实现的可调光时延线引起了很多关注。这种方法对于信号的格式和比特速率都是透明的,在光信息处理系统中的应用会更多。

通过增大色散补偿光纤的色散系数和增加光纤长度来加大总的色散,可实现传输光的延时。此方法中,光信号只是在经过色散时延介质时的波长不同,而在通过系统的其他部分时,信号的波长是相同的。因而时延完全是由两个不同波长的信号在同一段色散介质中的群速度不同而引起的。所以,时延量的大小与波长转换的间隔以及色散介质总的色散量成正比。原理结构简图如图2。

假设色散介质的色散系数为 $D$ ,长度为 $L$ ,那么延时量 $T_d$ 可以用下式表示

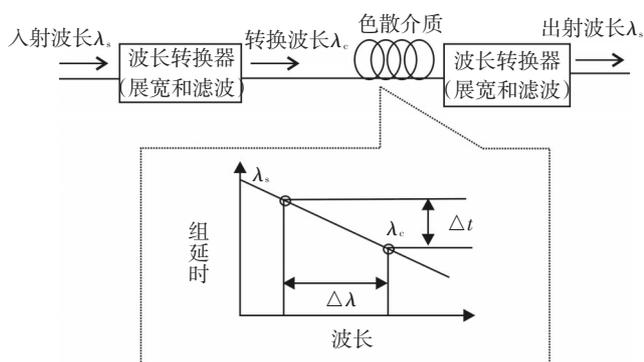


图2 可调光时延线结构简图

$$T_d = DL(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (4)$$

此种方法获得的时延,是完全可调的。时延量的正负则由色散参数的正负,以及 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的大小共同决定。出现正的时延量时,被称为脉冲延时;出现负的时延量时,叫做脉冲超前。光交换、信号重定时、调整时间跳跃等方面的应用会因为脉冲超前变得更加灵活<sup>[8]</sup>。实际中,基于此原理的全光时延线结构会因波长变换实现方法的不同而有所不同。

有很多大学和机构的研究人员,利用此原理进行了多项试验。现在已经实现了对80 Gbit/s的差分相移键控信号获得超过100 ns的连续时延<sup>[9]</sup>。2005年美国康奈尔大学的研究小组利用HNLF中的自相位调制效应将输入信号的光谱进行展宽,然后将滤波器调节到偏离信号中心频率的地方来进行滤波,从而实现了波长转换的过程。信号经过色散介质DCF后,仍使用这种光谱展宽和滤波相结合的方式将信号的波长转换回来;先是对重复频率为75 MHz的周期脉冲实现了4 ns的时延<sup>[10]</sup>,后又对10 Gbit/s的归零码信号实现了250 ps的时延。此外,南加州大学的一个研究小组使用两块周期性极化反转型铌酸锂光波导,利用其中的级联和频与差频的效应来实现波长转换和波长逆转换,并使用DCF作为色散介质,对10 Gbit/s的非归零码信号实现了44 ns的时延<sup>[11]</sup>,并成功将其应用于光分组的时隙交换中。2006年,日本大阪大学的研究人员基于自相位调制,利用双向高非线性光纤和2R(reshaping and reamplification)再生光时延线结构,通过波长变换,对光时延的产生进行了验证<sup>[12]</sup>。2007年,美国加利福尼亚大学的研究人员在上述的基础上,通过结构改造,对10 Gbps的光信号实现了0~170 ps的线性可调时延<sup>[13]</sup>。2011年,日本的几位科学家和相关实验室,通

过使用高色散的双同心光纤(dispersive dual concentric core fiber, DCCF)和如下实验模型,对C波段的传输光实现了最大54 ns/km的时延<sup>[14]</sup>。DCCF是一种拥有较大反常色散的光纤,目前所制造的DCCF可拥有的最小色散是-2 800 ps/nm/km。其时延线结构如图3所示。

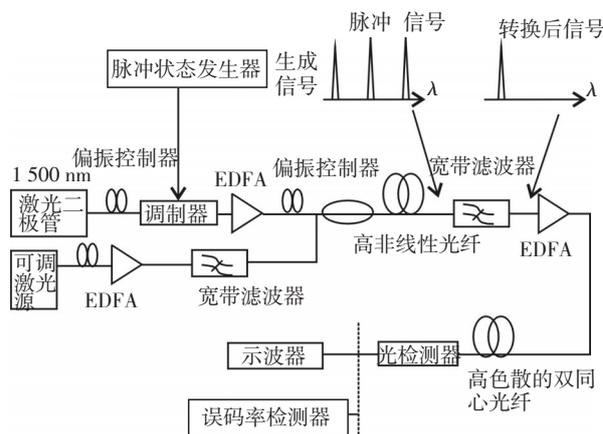


图3 利用DCCF和波长变换实现可调时延

## 2 全光时延线的应用

从传统的光时延线到连续可调的光时延线的研究有很多,其应用也非常广泛。主要应用在OTDM、光学测量、分组交换、高性能的光学开关和信号处理等方面。

### 2.1 光时延线在OTDM中的应用

OTDM是支撑未来超高速光通信网的重要技术之一。OTDM技术实现多信道复用,提高了光纤链路的利用率和信息速率,能在网络多媒体、虚拟现实及超级计算机互联等领域内获得广泛应用,前景广阔<sup>[15]</sup>。

光时分复用通信系统由以下几部分组成:光发射部分、传输线路、接收部分。在传输线路部分,不同信道的光信号经过不同的时延,在输出端再复用到一条光纤。传统光时延线在延时精度方面存在误差,复用效果不均匀;而可调时延线能实现精确的延时,复用效果均匀。图4和图5分别是利用传统全光时延线和全光可调时延线实现的OTDM结构效果图。

### 2.2 光时延线在光子学微波频率测量中的应用

光子学微波频率测量技术被认为是未来电子战

中处理雷达信号的先进方法之一。近年来,国内外开展了多种基于光子学技术的微波频率测量研究,取得了显著成果。但以前的测量方法在测量误差和设备方面存在很多不足。2011年,大连理工大学的

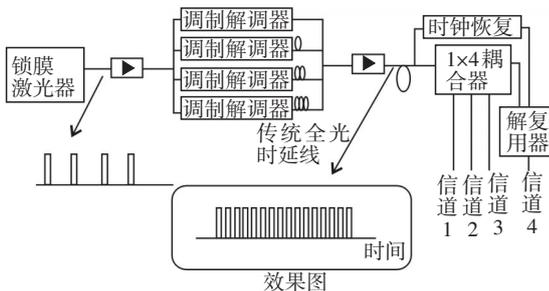


图4 利用传统全光时延线实现的OTDM示意图

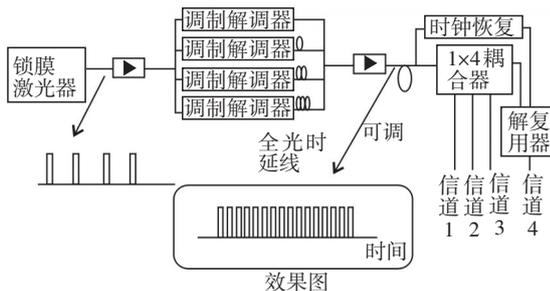
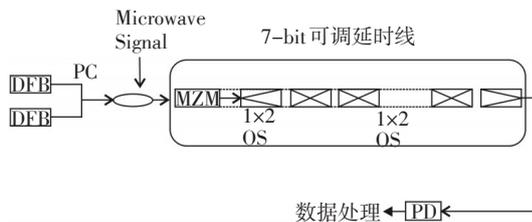


图5 利用全光可调时延线实现的OTDM示意图



DFB:分布式反馈激光器 PC:偏振控制器  
Microwave Signal:微波信号 MZM:马赫-曾德电光调制器  
OS:光开关 PD:光电探测器

图6 利用7 bit可调时延线实现的光子学微波频率测量

研究人员利用基于7 bit的光时延线,实现了更低测量功率和误差的应用。其运用结构图如图6所示。

这种利用7 bit光延迟线的光子学微波频率测量方法,在1~20 GHz的带宽范围内实现了误差小于 $\pm 40$  MHz的频率测量。系统的最小可探测功率可达到-20 dbm,测量动态范围达45 dB。该方法为微波频率测量提供了一种大带宽、小体积、低成本的光子学替代方案<sup>[16]</sup>。

### 2.3 基于慢光的全光时延线在光交换中的应用

光分组交换被认为是未来全光网的最终选择,

具有交换速度快、交换容量大及强大的灵活性等特点。全光缓存器是光分组交换网的关键部件,是全光网调度和控制包转发的基础。目前的数据交换基本上是采用光/电/光的交换模式,受到电路处理速度的限制。

基于慢光时延线作为全光缓存器的一种,通过控制光脉冲的传播速度,对特定波长的光进行特定的延时缓存和排序,解决了传统光分组交换的竞争问题,使丢包率大大降低,同时也简化了光分组交换的结构,避免了使用传统光纤延迟线作为缓存器时的体积大、结构复杂的问题。慢光时延线同时实现全光交换和全光路由,不受“电子瓶颈”的影响,能获得更高速的数据交换和传输<sup>[17-18]</sup>。

### 3 结束语

全光时延线是全光通信系统中的重要技术之一。从最简单的一段光纤,到现在利用光效应实现的可调时延器,得到了大量的研究进展,但目前还不是很成熟。目前的研究关键点在于大范围内的连续性可调时延的实现。理想的可调时延线应在适应高速能力、光学性能、多通道操作、输入比特率的可变性、同步的多种功能和可重构性方面作出改进,同时要最大程度地实现信号保真。

### 参考文献

- [1] 段沁萍.全光网下一代的热点[N].通信产业报,2000-11-01(001).
- [2] 吴雷.温度高精度大范围连续可调光纤延迟线的研究[D].上海:上海交通大学,2011:1-7.
- [3] 邱志成.高精度光纤延时技术研究[D].成都:电子科技大学,2009:11.
- [4] 李群.光线中受激布里渊散射慢光延时系统的研究[D].天津:天津理工大学,2010:1-2.
- [5] Hau L V,Harris S E,Dutton Z,et al.Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. Nature, 1999,397(6720):594-598.
- [6] Yoshitomo Okawachi, Matthew S Bigelow, Jay E Sharping, et al.Tunable All-Optical Delays via Brillouin Slow Light in an Optical Fiber[J]. P hysical Review Letters, 2005:1-4.
- [7] Zhu Z,Gauthier D J,Boyd R W. Stored light in an optical fiber via simulated Brillouin scattering[J]. Science, 2007, 318: 1748-1750.
- [8] 胡哲峰.基于波长转换和色散的全光可调延时线及其应

- 用[D]. 武汉:华中科技大学, 2010:18-20.
- [9] L Christen, O F Yilmaz, S Nuccio, et al. Tunable 105 ns optical delay for 80 Gb/s RZ-DQPSK, 40 Gb/s RZ-DPSK, and 40 Gb/s RZ-OOK signals using wavelength conversion and chromatic dispersion[J]. Optical Letter, 2009, 34:542-544.
- [10] Okawachi Y, Sharping J E, Xu C, et al. Large tunable optical delays via self-phase modulation and dispersion[J]. Optics Express, 2006, 14(25):12022-12027.
- [11] Wang Y, Yu C, Yan L, et al. 44-ns continuously tunable dispersionless optical delay element using a PPLN waveguide with two-pump configuration, DCF, and a dispersion compensator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(11):861-863.
- [12] Masayuki Matsumoto, Yoshiyuki Shimada, Hironobu Sakaguchi. Wavelength-Shift-Free SPM-Based 2R Regeneration by Bidirectional Use of a Highly Nonlinear Fiber[A]. Optical Fiber Communication Conference & Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference [C]. California, America, 2008:1-3.
- [13] Zhaoyang Hu, Daniel J. Blumenthal. SPM-Based 2R Regenerative 10 Gbps Optically Linearly Controlled Delay Line with 0 ps to 170 ps Tuning Range[A]. Optical Fiber Communication Conference & Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference [C]. California, America, 2008:1-3.
- [14] Taiji Sakamoto, Takashi Matsui, Kyoza Tsujikawa, et al. Wide-Range Tunable Optical Delay Line Using Dual Concentric Core Fiber With Dispersion Coefficient of -2800 ps/nm/km[J]. Journal of Light Wave Technology, 2011, 29(13):1920-1922.
- [15] 李利军. 高速光时分复用系统关键技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008:2-3.
- [16] 吴彭生, 韩秀友, 谷一英, 等. 基于可调光时延线的光子学微波频率测量[J]. 光子学报, 2011, 32(9):944-945.
- [17] 陈伟, 李诗愈, 陆培祥. 光纤慢光与全光通信技术[J]. 光通信研究, 2009, 1:40-41.
- [18] 卢超, 毛幼菊. 光分组交换网络中光纤延迟线缓存技术[J]. 光电技术应用, 2009, 24(1):1-4.

(上接第31页)

由于板段的边缘与中心区域通常存在  $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温差<sup>[9]</sup>, 当原料的粘度随着温度的变化而变化较大时(即料性较短), 由于温差所导致的伸长性能差异也会导致放大像畸变的产生。

另外, 为保证皮料的熔合性能, 芯料粘度会比皮料粘度稍高(较理想的匹配为芯料  $T_g$  比皮料  $T_g$  高  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[10]</sup>, 若芯皮玻璃的粘度差别较小, 熔压过程中芯料变形量较大, 也会导致放大像畸变的产生。

## 4 结论

产生放大像畸变的原因主要是熔压过程中不同区域的纤维变形不一致。毛坯板段中放大像畸变的具体分布情况为横向放大像畸变变化趋势为(从中心到边缘)由大变小然后又逐渐增大, 靠近边缘位置存在一个突变区; 纵向上中心放大像畸变最小, 两端放大率最大;

压缩量、压板温度、保温时间、模具摩擦和原材料性能等因素都会影响毛坯板段的放大像畸变;

通过在模具与复丝之间增加润滑材料, 减少模具对板段伸长的摩擦阻力, 可以有效控制板段的放大像畸变。

通过综合采取以上措施, 最终实现了放大像畸

变小于1%的产品合格率大于80%。

## 参考文献

- [1] David W. Stowe etc. Direct Contact Fiber Optic Plates for the Detection of Luminescent Cells. Incom: 2007(10).
- [2] Zhang Qing. Character Measurement of Fiber Optic Image Device using CCD Camera, ICCASM 2010: V13-444.
- [3] 邓志成. 一种像增强器图像失真的校正方法[J]. 深圳大学学报(理工版), 2006(7):258-261.
- [4] 顾肇业. 光学纤维面板测试方法[S]. 中华人民共和国国家标准, GB11447-89.
- [5] 钟汉民. 真空气压光学纤维面板工艺初探[J]. 光学技术, 1986(5).
- [6] 林治平. 锻压变形力的工程计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986:70-71.
- [7] 许光明, 崔建忠. 金属成型过程中摩擦的分析[J]. 有色矿冶, 200, 16(5):44-47.
- [8] 刘艳霞, 朱宇姝, 皮亚南. 金属成型加工时坯料与模具间的摩擦特点[J]. 江西科学, 2002, 20(4):245-249.
- [9] 齐艳. 大尺寸光纤产品毛坯制作初探[J]. 机械管理与开发, 2011(4).
- [10] Lee Cook, Susan Patterson. New Fiber Optic faceplate glass system development Electron Image Tubes and Image intensifiers 1990, 1243:176.