

基于偏振叠加和干涉两种方法的可控光脉冲延时器*

赵建领 吴令安[†]

(中国科学院物理研究所和北京凝聚态物理国家实验室, 光物理开放实验室, 北京 100190)

(2009 年 3 月 8 日收到; 2009 年 9 月 4 日收到修改稿)

可控的光信号延时在科研和通信领域有着广泛的应用. 本文提出了两种可控光脉冲延时器的方案, 分别基于偏振叠加和干涉原理. 通过相位调制器的调制将光脉冲约束在一个环路中, 需要时再释放, 以达到光脉冲延时的目的. 调节环路的长度和循环的次数便可以实现延时时间的可控. 这两种方案均可以应用于全光纤光路中, 通过集成光学技术可以实现微小尺寸的封装. 基于偏振叠加的方案还可以方便地应用于自由空间光延时.

关键词: 光延时, 可控, 偏振, 干涉

PACC: 4280, 4230Q, 4225J, 4225K

1. 引 言

在生产实践和科研中, 信号的延时是一个十分普遍而重要的问题, 以保证各种信号的时序或同步. 电子学领域中的时序控制电路可用精确的可编程时钟延时器, 其时间范围和精度可达到纳秒量级. 而在光学领域, 也需要对光信号进行精确的延时, 特别是对于脉冲光. 例如, 在光通信中光延时有着广泛的应用; 在光包交换网的交换系统和接入系统中经常出现包的竞争问题, 比较好的解决方法就是把相互竞争包的其中一个延时一段时间, 待另一个包完成交换后再处理这个包. 在光时分复用系统中, 通过光延时可以提取光交换所需要的时钟信号. 在光纤码分多址技术中, 通过可调光延时器可以实现高速的编码/解码器^[1,2]. 时域的光学相干层析术也需要长时间的光延时^[3-5]. 同时, 大容量的可调光延时器还用于实现光缓存器^[6]. 另外, 目前热门的光纤量子保密通信领域也需要精确的光脉冲和电脉冲信号的可控延时^[7]. 对于皮秒级的光延时, 一般采用延长光路的办法就可以解决, 在自由空间或光纤中都可以. 但如果需要大范围的延时, 此办法就不现实, 因为要通过几十甚至几百米的光程很麻烦, 也会有各种各样的损耗. 而且这种方法延时时间固定, 可控性比较差.

目前, 可调光延时的实现方法主要有如下几种: 光延时线加光开关^[8]、自由空间型^[9]、光纤光栅型^[10-16]、集成光波导型^[17]、光纤加热与拉伸型^[18]以及基于波长变换的干涉环^[19]等. 这些方案存在可调范围窄、系统复杂、稳定性差和精确度低等缺点. 光通信领域需要一种精确和高效的可调光脉冲延时器.

本文提出两种可编程的光脉冲延时器方案, 分别基于偏振叠加和光的干涉来实现. 通过这两个方案可以实现光脉冲信号延时, 同时可通过编程来控制延时的时间长短, 延时范围依赖于光环路的长度, 可以制作成任意延时范围的器件, 而且结构简单, 控制方便.

2. 基于偏振叠加的可控光脉冲延时器^[20]

基于偏振叠加的可控光脉冲延时器原理如图 1 所示. 其中, PM 为相位调制器, PBS_1 和 PBS_2 为 4 端口偏振分束器. 为了方便起见, 这里假定 PBS_1 和 PBS_2 对平行偏振的光透射, 对垂直偏振的光反射. 同时, PBS_2 与 PBS_1 的轴向呈 45° 夹角.

这里输入到可控光脉冲延时器的一个光脉冲 L 在 PBS_1 中为平行偏振, 将透射通过并入射到 PBS_2 , 该光脉冲在 PBS_2 的坐标系中, 即图 2(a) 所示的 (X', Y') 坐标系, 为 -45° 偏振. 因此, 该光束在 PBS_2

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB921107) 和国家自然科学基金 (批准号: 60578029 和 10674174) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wula@aphy.iphy.ac.cn

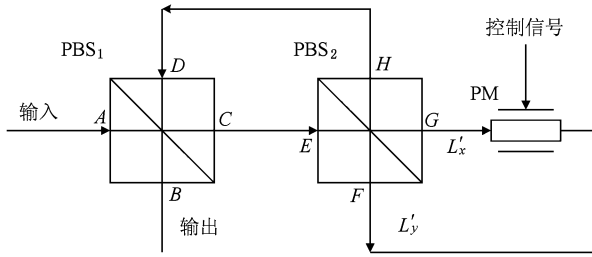


图1 基于偏振叠加的可控光脉冲延时器原理图

处平均分为两束 L'_x 和 L'_y 。其中, 光束 L'_x 通过相位调制器 PM 后从 PBS₂ 的 F 端口入射, 光束 L'_y 通过 PM 后从 PBS₂ 的 G 端口入射。

如果相位调制器不工作, L'_x 和 L'_y 都将从 PBS₂ 的 H 端口出射, 并由于走过的光程相等, 将叠加重新合成为原光脉冲 L , 如图 2(b) 所示。该光脉冲再次入射到 PBS₁ 时将透射从 B 端口输出。

如果相位调制器只对 L'_y (或 L'_x) 进行一次 π 相位的调制变成 $-L'_y$ (或 $-L'_x$), 则两束光从 PBS₂ 的 H 端口出射并叠加而重新合成为光脉冲 L' , 其偏振方向相对于原来的脉冲 L 旋转了 90° , 如图 2(b) 所示。该光脉冲再次入射到 PBS₁ 将被反射, 从 C 端口输出并再次入射到 DPBS₂。此时, 如果相位调制器不工作, 光脉冲将一直在该环路中循环而不输出。如果相位调制器某时刻对其中的 Y' (或 X') 分量再次进行 π 相位的调制, 则光脉冲将重新旋转恢复为平行偏振的光脉冲 L , 并下次通过 PBS₁ 时从 B 端口

输出。

从上面的分析可以看出, 对于从 PBS₁ 端口 A 输入的平行偏振光脉冲, 如果不进行调制则直接行走一周从端口 B 输出, 此时所走过的路程为 $(AC + CE + EF + FG + GH + HD) + (DB) = \Delta$, (1)

这里 EF (GH) 是指从 E (G) 端面到分束面到 F (H) 的距离, 而 FG 是指从 F 端面经 PM 到 G 端面的距离。

如果 PM 调制 π 相位一次, 则偏振旋转 90° , 这样光脉冲将一直在光路内部循环而不输出, 这相当于延时。光脉冲在光路中每循环一周所走过的路程为

$$(DC + CE + EF + FG + GH + HD) = \delta. \quad (2)$$

当需要输出的时候, 再次进行调制, 偏振再次旋转 90° , 则光脉冲将从 PBS₁ 端口 B 输出。这样便实现了整个延时控制的过程。

延时的大小取决于延时器中光路的长度以及光脉冲循环的次数。如果光脉冲在延时器内部循环 n 周, 便可以实现 $(n - 1)\delta$ 的光路延长。如果使用全光纤器件, 则可以实现的总延时为 $[\Delta + (n - 1)\delta]/v$, 其中 v 为光在光纤中的速度。这样可以通过控制光脉冲在延时器内部的循环次数 n , 便可以实现 δ/v 整数倍的光延时输出, 而且整个控制过程只需要在相位调制器上进行首末两次 π 相位的调制, 操作简单方便。

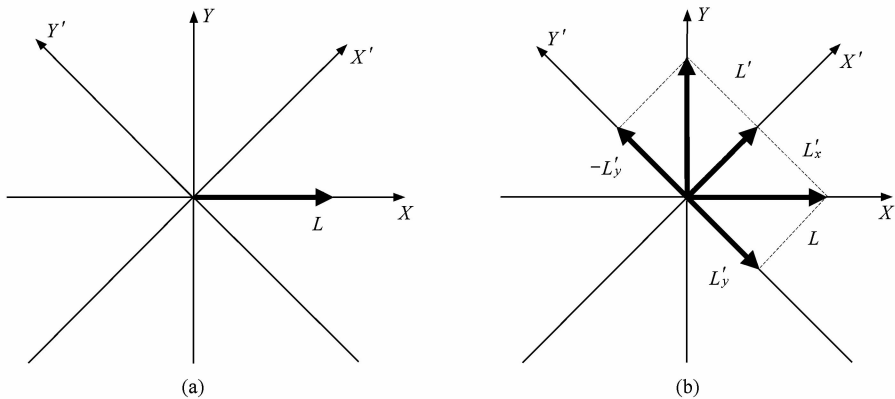


图2 偏振状态分析 (a) 入射的平行偏振光脉冲; (b) 光脉冲的偏振叠加

此方案在光纤光路中较容易实现。对于自由空间的光路, 因为两个偏振分束器角度差 45° 放置较麻烦, 可以采用 $\lambda/2$ 波片来实现 PBS₁ 和 PBS₂ 之间偏振方向的改变, 如图 3 所示。图中, 两个 $\lambda/2$ 波片

的主轴方向与透射通过 PBS₁ 的水平偏振光呈 22.5° 夹角, PBS₁ 和 PBS₂ 是完全相同的两个偏振分束器, 放置角度也完全一致。这样, $\lambda/2$ 波片 1 将入射光脉冲的偏振方向 (水平或者垂直) 旋转 45° 再入

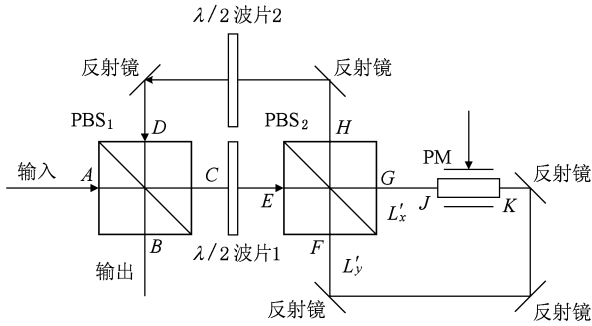


图3 自由空间的可控光脉冲延时器原理图

射到 PBS₂。而 PBS₂ 出射的光脉冲经 λ/2 波片 2 后，偏振方向再次旋转 45° 重新变为水平或者垂直偏振状态。在这个光路中，光束的运行和延时的控制方法类似，延时的计算与光纤中也一致。

3. 基于光的干涉的可控光脉冲延时器^[21]

如果使用全光纤的光路，还可以采用更为简单的器件，只用普通 2 × 2 耦合器而不需要四端口的偏振分束器。基于 Sagnac 环中光的干涉的可控光脉冲延时器原理，如图 4 所示。

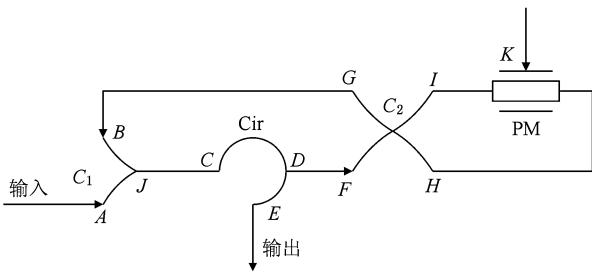


图4 基于干涉的可控光脉冲延时器原理图 PM 为相位调制器, Cir 为光纤环行器, C₁ 为 2 × 1 耦合器, C₂ 为 2 × 2 耦合器; C₂ 和后面的光纤环路构成一个 Sagnac 环

光脉冲从耦合器 C₁ 的 A 端口输入后，通过环行器 Cir 和分光比为 50/50 的耦合器 C₂ 的 F 端进入包含相位调制器 PM 的 Sagnac 环。如果相位调制器不加任何调制，由于光的干涉作用，光脉冲将从 C₂ 的 F 端口输出返回到 Cir，从 E 端口输出并从整个光纤环路中出来。光脉冲走过的路程为

$$(AJ + JC + CD + DF + FH + HI) + (IF + FD + DE) = \Delta, \quad (3)$$

其中 HI 经过了相位调制器 PM。

如果相位调制器 PM 对其中一个方向的光脉冲进行 π 相位的调制，则光脉冲在 Sagnac 环中的干涉结果将导致光脉冲从 C₂ 的 G 端口输出，通过 C₁ 的 B 端口重新进入 Cir 以及 Sagnac 环。只要相位调制器每次对从某一方向来的脉冲进行 π 相位的调制，光脉冲会在整个光路中不断循环而不输出，便实现了延时。光脉冲在光路中每循环一周所走过的路程为

$$(IG + GB + BJ + JC + CD + DF + FH + HI) = \delta. \quad (4)$$

此时，只要相位调制器停止调制，光脉冲就会从环行器的 F, D, E 端口从整个光纤环路中输出。

设相位调制器上加调制的次数为 n，则光延时器对光脉冲的延时时间为 [Δ + nδ] / v，其中 v 为光在光纤中的速度。通过调节相位调制器上加调制的次数 n，便可以实现 δ/v 整数倍的可控光脉冲延时。延时的大小取决于延时器中光纤的长度以及加调制的次数。

4. 结 论

以上光延时器的两种方案原理简单，其延时的长短取决于光环路的长度以及光所循环的次数。通过调节光环路的长度，可以制成不同延时步长、不同量程和精度的光脉冲延时器。通过计算机编程可以方便地控制相位调制器上的电压，实现全自动控制。所有的器件可以采用光通信中的标准光纤器件，通过光集成技术还可以将其集成在一个很小的封装中。同时，光纤对光信号的损耗比较小，几乎可以忽略不计，而方案中损耗主要来自器件的损耗；这个问题随着光集成工艺的发展也将完美解决。这里的方案大大拓展了光脉冲延时器的延时范围，利用现有的集成光学技术，可以将光纤环路缩短到毫米量级，这样延时的步长可以小至皮秒量级；如果光纤环路设置的比较长，则可以实现纳秒、微秒或者更长的延时步长。性能优秀的可调光脉冲延时器，在光通信和科研的各个领域有着广泛的应用。这里提出的可控光脉冲延时器方案具有结构简单、控制方便、延时范围广和利于集成化等多种优点，是比较有竞争力和应用前景的方案。

- [1] Li O, Wu J X 1999 *J. China Inst. of Communications* **20** 91 (in Chinese) [李鸥, 邬江兴 1999 通信学报 **20** 91]
- [2] Zhang J G, Picchi G 1993 *Electron. Lett.* **29** 1211
- [3] Huang D, Swanson E A, Lin C P, Schuman J S, Stinson W G, Chang W, Hee M R, Flotte T, Gregory K, Puliafito C A, Fujimoto J G 1991 *Science* **254** 1178
- [4] Tearney G J, Bouma B E, Fujimoto J G 1997 *Opt. Lett.* **22** 1811
- [5] Rosa C C, Rogers J, Podoleanu A G 2005 *Opt. Lett.* **30** 3263
- [6] Langenhorst R, Eiselt M, Pieper W, Grosskopf G, Ludwing R, Kuller L, Dietrich E, Weber H G 1996 *J. Lightwave Technology* **14** 324
- [7] Ma H Q, Li Y L, Zhao H, Wu L A 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5014 (in Chinese) [马海强、李亚玲、赵环、吴令安 2005 物理学报 **54** 5014]
- [8] Yan L S, Lin L, Belisle A, Wey S, Yao X Steve 2007 *J. Opt. Networking* **6** 13
- [9] Yang T T, Wang T, Liu D M, Huang D X 2001 *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.* **29** 12 (in Chinese) [杨滔滔、王涛、刘德明、黄德修 2001 华中科技大学学报 **29** 12]
- [10] Tsuchida H 1990 *Opt. Lett.* **15** 640
- [11] Raz O, Rotman R, Tur M 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1076
- [12] Soref R A 1984 *Appl. Opt.* **23** 3736
- [13] Goutzoulis A P, Davies D K, Zomp J M 1989 *Opt. Eng.* **28** 1193
- [14] Italia V, Pisco M, Campopiano S, Cusano A, and Cutolo A 2005 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11** 408
- [15] Yoffe G W, Arkwright J W 1998 *Electronics Lett.* **34** 1688
- [16] Corral J L, Marti J, Regidor S, Foster J M, Laming R, and Cole M J 1997 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **45** 1531
- [17] Hyundai P, John P M, Daniel J B, John E B 2008 *Opt. Express* **16** 11124
- [18] Chandan D, Ulrich G 1998 *U. S. Patent No.* 5703708
- [19] Fang N, Huang Z M 2003 *China Patent No.* 200310109273.1 (in Chinese) [方捻、黄肇名 2003 中国发明专利申请号 200310109273.1]
- [20] Zhao J L, Wu L A 2009 *China Patent No.* 200910081894.0 (in Chinese) [赵建领、吴令安 2009 中国发明专利申请号 200910081894.0]
- [21] Zhao J L, Wu L A 2009 *China Patent No.* 200910082400.0 (in Chinese) [赵建领、吴令安 2009 中国发明专利申请号 200910082400.0]

Two variable optical delay schemes based on polarization and interference*

Zhao Jian-Ling Wu Ling-An[†]

(Laboratory of Optical Physics, National Laboratory for Condensed Matter Physics and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 8 March 2009; revised manuscript received 4 September 2009)

Abstract

Variable optical delays have wide application in scientific research and optical communications. In this paper two different schemes to realize a variable optical delay are proposed, one based on polarization and the other on interference. A phase modulator is employed to restrict the signal pulse within an optical loop, and to release it when required. The delay time can be varied by adjusting the length of the loop and the number of cycles the pulse travels around it. Both types of delays are suitable for fiber systems, and can be made into a small package by means of integrated optics technology. The polarization scheme is also convenient for optical delays in free space.

Keywords: optical delay, variable, polarization, interference

PACC: 4280, 4230Q, 4225J, 4225K

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB921107), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60578029 and 10674174).

[†] Corresponding author. E-mail: wula@aphy.iphy.ac.cn