

文章编号: 1001-4322(2009)09-1301-04

# 基于磁光开关的高精度光实时延时线\*

史双瑾, 邱 琪, 苏 君, 邱志成, 廖 云

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

**摘 要:** 给出了基于高速磁光开关的光实时延时技术的方案。研究了拓扑结构和磁光开关对光延时性能的影响。研制了 5 bit, 32 位的光实时延时系统, 并建立了光延时的测试平台, 经测试, 延时线延时精度优于 3 ps。对光延时单元插损进行测试, 结果显示: 32 态单元插损为 0.12~0.88 dB, 各态变化呈随机性。

**关键词:** 光纤实时延时线; 磁光开关; 拓扑结构; 插入损耗

**中图分类号:** TN955 **文献标志码:** A

自 20 世纪 90 年代以来, 作为微波光子技术的一个重要应用, 光实时延时技术(OTTD)全面成熟, 逐渐被应用在相控阵雷达系统, 由此产生了光控相控阵雷达。光实时延时技术与相控阵技术的融合, 解决了传统相控阵技术中的两大技术瓶颈, 即瞬时大带宽的制约及波束偏斜问题。

光实时延时技术在无线通信技术、光交换技术及高精度同步控制技术上也有广泛的应用前景。基于不同技术路线的光实时延时的方案已提出, 包括基于光开关和延时光纤<sup>[1-3]</sup>、色散补偿光纤<sup>[4]</sup>、光纤光栅<sup>[5-7]</sup>和光波导技术<sup>[8-10]</sup>等。在机载和星载的应用中, 对应用于光控相控阵技术的 OTTD 的延时单元的体积、精度、速度、可靠性和重量等指标上提出了严格的要求。

本文研究了实现高精度光实时延时线的关键技术, 包括延时线的拓扑结构、光开关的可靠控制、光延时的测试、光纤的精确对准工艺及光延时模块的一体化设计等。最后选用了基于光开关和延时光纤的技术作为 OTTD 的实现方案。

## 1 光延时线拓扑结构与磁光开关应用

基于光开关和延时光纤的 OTTD 方案一般采用几条不同长度的光纤作为延时单元, 通过光开关选择不同的光纤路径来获得若干离散的时延值, 从而得到不同的延时。光纤的传输路径分固定路径式和动态配置式两种。基于光开关和延时光纤的动态配置型光纤延时线(FDL)的拓扑结构主要有两种形式, 即旁路结构和差分结构, 如图 1, 其中  $\tau$  为光延时单元的步长。

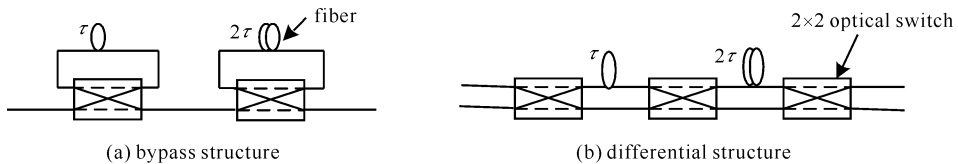


Fig. 1 Bypass and differential structures of fiber delay line

图 1 2 bit 旁路结构和差分结构的光纤延时线

旁路结构中, 延时光纤跨接在同一个光开关的两个端口。优点: 结构紧凑, 一个 2 bit 延迟单元只需要 2 只光开关; 另外, 可以在延迟光纤中加入一段光纤, 以便对光开关不同状态引起的误差进行补偿。缺点也很突出: 最小延时单元不能做得很小, 限制其在较高工作频率下的应用; 一只光开关被 2 次经过, 增加了链路的损耗。

差分结构中, 由于上路的光纤比下路光纤分别长  $\tau$  和  $2\tau$ , 通过光开关对上下通道的选择, 可以实现  $0, \tau, 2\tau, 3\tau$  这 4 种不同的延时状态, 即实现了 2-bit 的光纤延迟线。考虑到磁光开关为非互易性器件, 不支持光路的双向工作, 所以选择差分结构作为项目的实施方案。显然, 这种方案中, 光开关起着重要的作用, 其指标很大程度上决定了延时单元的性能。

为满足工程应用, 应用于 FDL 中的光开关必须具备体积紧凑、高速切换(主要是考虑切换过程中不影响业

\* 收稿日期: 2008-09-27; 修订日期: 2009-04-08

基金项目: 省部级资助项目

作者简介: 史双瑾(1969—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事光电子技术及光通信方面的研究; sjshi@uestc.edu.cn。

务)、低插入损耗、高隔离度、低功耗和高可靠性等特点。目前,已经商品化的光开关有机械光开关、微电子机械系统(MEMS)光开关、液晶光开关、热光开关和磁光开关等。在光延时单元的实现中,综合考虑了各种光开关的指标后,选用了磁光(MO)开关。磁光开关是借助于法拉第效应实现的,其最大优势在于其采用的全固态技术,避免了可动部件带来的一系列问题,此外体积较小,功耗低。主要指标为:切换速度小于  $15 \mu\text{s}$ ,插入损耗小于  $1 \text{ dB}$ ,串扰优于  $40 \text{ dB}$ ,工作频率小于  $3000 \text{ Hz}$ 。

磁光开关的控制通过 2 个控制引脚实现。光路切换时,从一个引脚相对另外一个引脚输入正的电脉冲,光开关切换至一个输出通道,反之,当两引脚的输入电脉冲改变方向时,光开关则切换至另外一个输出通道。电脉冲要求电压幅度为  $7 \text{ V}$ ,脉宽为  $12\sim 15 \mu\text{s}$ ,脉冲电流输出能力至少为  $500 \text{ mA}$ 。由于光开关带状态锁存,切换后不需要持续的脉冲来保持状态。

## 2 光纤延时线

光纤延时线的研究包括磁光开关的逻辑控制与驱动、光延时的精密测量、光纤的高精度连接和系统的一体化设计等多个方面。

### 2.1 磁光开关的控制与驱动

图 2 为所采用的磁光开关阵列逻辑控制与驱动框图。磁光开关状态控制器输出的控制信号通过串行通信芯片传输到驱动板,由板上单片机处理,根据内部协议决定需要配置的光开关的位置,并为其提供脉冲驱动电路所需的电平信号,脉冲驱动电路输出相应的驱动电流,控制相应光开关进行状态转换。

为了保证磁光开关的可靠控制,串行通信协议中使用了多重的防护措施。

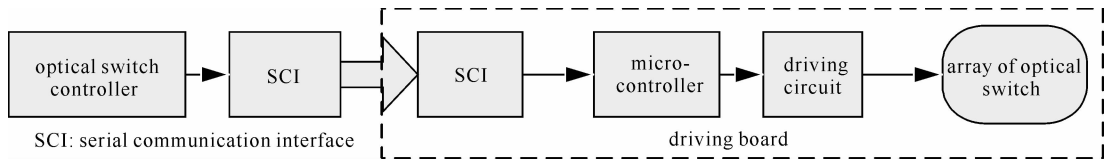


Fig. 2 Block diagram of control system for magneto-optic switch

图 2 磁光开关的控制框图

此外,在电路板的设计中需合理布线,避免磁场建立时驱动不足,导致磁光开关的切换进入中间态,从而引起较大的插损,影响正常的工作。

### 2.2 测试技术

光延时的准确、高效测量是研制中一个必须解决的问题。考虑到所需要的测试精度,显然光时域反射计(OTDR)不能满足要求,所以必须考虑新的测试方法。用矢量网络分析仪可以测量器件电长度,从而得出对应的时间延迟。在此基础上我们提出一套精确测量光纤延时的方法,其核心思路是:测试通道中加入的新器件

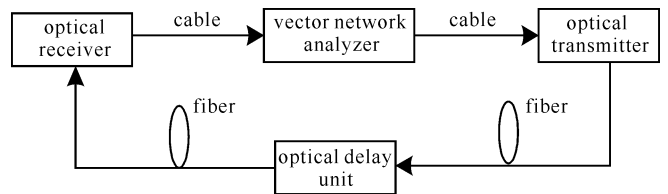


Fig. 3 Block diagram of measuring fiber delay line

图 3 光纤延时线的测试框图

会带来相应的相位变化,通过计算相位变化从而反推出新器件引入的延时。该方法理论上的测试精度优于  $\text{ps}$  量级,且有比较高的测试效率。图 3 为测试框图。

### 2.3 模块的一体化设计

由于光延时模块中包含光开关、光纤、热缩保护套管、驱动控制电路及光电接口等部分,为了兼顾体积与性能两者的指标,必须在结构上进行光、机、电的一体化设计。模块在结构上使用了分层的设计思想。驱动板、光开关阵列及光纤托架分 3 层叠放,便于模块的操作与维护。

由于涉及的器件多,尺寸复杂,空间小,在研制过程中,我们使用 3 维建模软件 Pro/Engineer,进行了模块的整体设计与模装。光延时单元的模块化设计方便了构建多通道的光延时单元,便于后续与维护与升级。

### 2.4 光纤的连接工艺

延时单元延迟精度误差主要来自于延时光纤的连接精度。在具体的实施环节中,依靠多台光纤调整机构,并与实时测试配合,使光纤的连接精度得到了提高。

### 3 实验方案及结果

我们研究了 5 bit, 32 种状态的光实时延时单元, 其结构如图 4 所示。其中首尾两只为高速  $1 \times 2$  磁光开关, 中间 4 只为高速  $2 \times 2$  磁光开关。通过对 6 只磁光开关的配置, 可以得到 32 种不同的延时状态。

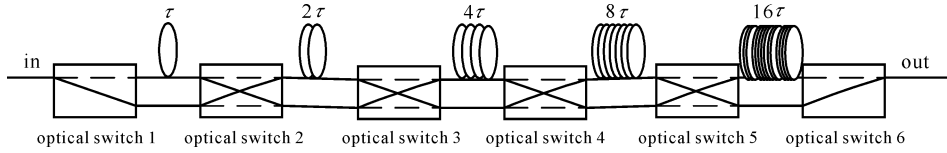


Fig. 4 5 bit fiber delay line based on optical switches and fiber

图 4 基于光开关和延时光纤的 5 bit 延时线

图 5 为延时单元的实物照片。延时模块的体积为  $110 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 。

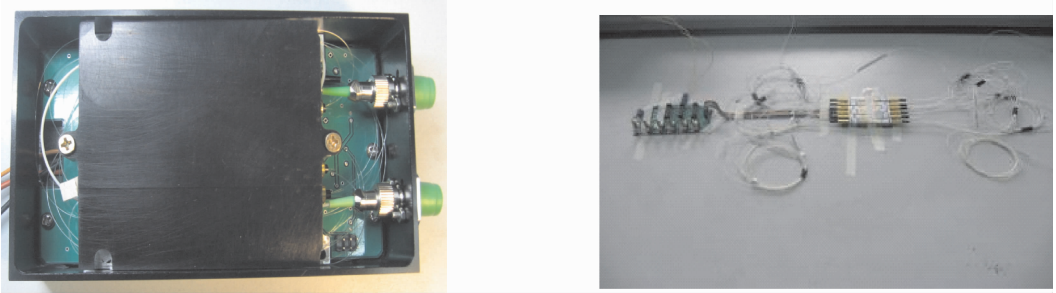


Fig. 5 Photos of 5 bit fiber delay line

图 5 5 bit 光纤延迟线实验系统

5 bit 光纤延迟线的 32 种状态的实测精度如图 6 所示。从图可见, 最大延时误差为 2.94 ps, 延时的平均误差为 0.85 ps, 模块的延时步长为 30 ps。

经实测, 32 种状态光纤延迟线插入损耗的一致性优于 1 dB。这为 OTTD 中的多通道光功率幅度一致性的解决提供了保证。

为了评估延时单元的温度特性, 在  $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 对光延时单元的插入损耗进行了测试, 各延时状态对应的插入损耗与温度的关系如图 7 所示。由图 7 可见, 工作温度为  $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  时 32 态插入损耗变化为 0.12 ~ 0.88 dB; 光延时单元的损耗与温度成反比, 即工作温度越高, 损耗越低, 工作温度越低, 损耗越高, 同时各态的变化呈现随机性, 这主要是由于光开关内多个晶体面的粘合状态受温度的影响而导致的。

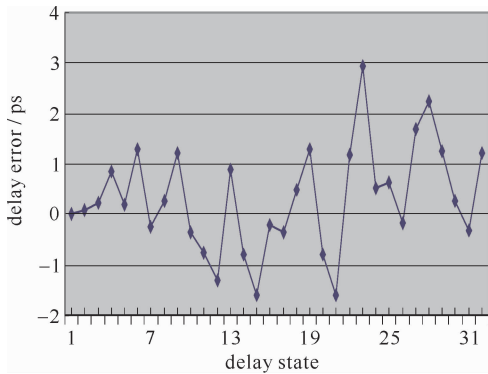


Fig. 6 Delay accuracy of 5 bit fiber delay line

图 6 实测的 5 bit FDL 的精度

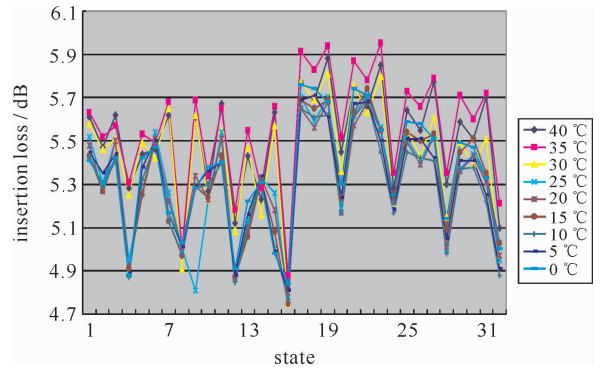


Fig. 7 Insertion loss vs temperature of 32 states

图 7 不同温度下延时单元的插入损耗

此外, 我们实现了多个 5 bit 的光实时延时单元, 各延时单元在延时步长、延时精度和延时通道一致性等性能指标上符合较好。

### 4 结论

本文利用高速磁光开关构建了 5 bit, 32 位的光实时延时单元, 在相关的拓扑结构分析、独特的光纤调试工艺及高效的测试方法的配合下, 在光延时模块的延时精度和体积上得到了比较好的结果, 有望满足工程应用。

需要指出的是, 为了扩展应用范围, 光延时单元的环境适应性需要关注, 包括光纤的抗辐照性、外界磁场

的变化对延时组件的精度和幅度的影响及光开关的剩磁对环境的影响。利用光开关和光纤构建多比特光延迟线系统,由于光开关内部不同通道固有的光程差造成的延时差,从理论上是很难消除或补偿的。受光纤接续长度不确定性的限制,若要进一步提高光延时的精度必须使用新型的光子延时技术。

### 参考文献:

- [1] Shin J D, Lee B S, Kim B G. Optical true time-delay feeder for X-band phased array antennas composed of  $2 \times 2$  optical MEMS switches and fiber delay lines[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 2004, **16**(5):1364-1366.
- [2] Vidal B, Madrid D, Corral J L, et al. Photonic true-time delay beamformer for broadband wireless access networks at 40 GHz band[J]. 2002 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2002, **3**:1949-1952.
- [3] Kaman V, Zheng Xuezhe, Helkey R J, et al. A 32-element 8-bit photonic true-time-delay system based on a  $288 \times 288$  3-D MEMS optical switch[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 2003, **15**(6):849-851.
- [4] Esman R D, Frankel M Y, Dexter J L, et al. Fiber-optic prism true time-delay antenna feed[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 1993, **5**(11):1347-1349.
- [5] Corral J L, Marti J, Fuster J M, et al. True time-delay scheme for feeding optically controlled phases-array antennas using chirped-fiber gratings[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 1997, **9**(11):1529-1531.
- [6] Campopiano S, Pisco M, Cusano A, et al. Electrically tunable true time delay line based on a chirped fiber Bragg grating[C]//Proc of SPIE. 2006:**63510D**.
- [7] Italia V, Pisco M, Campopiano S, et al. Tunable optical true time delay line based on fiber Bragg grating[C]//Proc of 2005 IEEE/LEOS Workshop on Fibers and Optical Passive Components. 2005, **22-24**:345-348.
- [8] Howley B, Chen Yihong, Wang Xiaolong, et al. 2-bit reconfigurable true time delay lines using  $2 \times 2$  polymer waveguide switches[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 2005, **17**(9):1944-1946.
- [9] Howley B, Wang Xiaolong, Chen M, et al. Reconfigurable delay time polymer planar lightwave circuit for an X-band phased-array antenna demonstration[J]. *J Lightwave Tech*, 2007, **25**(3):883-890.
- [10] Shi Zhong, Gu Lanlan, Howley B, et al. True-time-delay modules based on a single tunable laser in conjunction with a waveguide hologram for phased array antenna application[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(8):301-307.

## High performance optical true time delay line based on magneto-optic switch

Shi Shuangjin, Qiu Qi, Su Jun, Qiu Zhicheng, Liao Yun

(*Institute of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

**Abstract:** The optical true time delay scheme based on magneto-optic(MO) switch was analyzed, and optical and electrical features of MO switch were discussed. The advantages and disadvantages of different topologies were analyzed, i. e. bypass structure and differential structure. A method for measuring optical delay with high precision and high efficiency was put forward. A 5 bit optical delay line system based on MO switch and fiber was set up, and the maximal delay error was less than 3 ps. The test of optical delay units shows that the insertion loss of 32 delay states ranges from 0.12 dB to 0.88 dB at a temperature of 0 to 40 °C.

**Key words:** optical true time delay line; magneto-optic switch; topology; insertion loss