

摘 要

光纤延迟线 (Optical fiber delay line) 具有体积小、重量轻、带宽宽, 损耗低、抗干扰能力强等优点, 被广泛应用到光控相控阵雷达、卫星天线以及通信等领域。高精度、小体积、大动态范围的光纤延迟线成为现今应用领域急需突破的关键技术。

介绍了光纤延迟线的原理, 并分析了国内外发展情况。对旁路结构和差分结构两种典型的拓扑结构进行了研究, 选择了具有损耗小、高精度优点的差分结构。分析了光开关状态差所带来误差的影响不可忽视, 发现了不同的拓扑结构带来的光开关状态差的影响不尽相同。在 MATLAB 环境下, 建立了光纤延迟线的模型, 并在 5BIT 光纤延迟线所有的拓扑结构中选出了光开关状态影响最小的一种结构, 仿真证明, 当光开关误差小于 1ps 时, 延迟误差优于 2ps。设计了一种基于磁光开关和单模光纤的 5BIT 高精度光纤延迟线。对光纤延迟线关键部件进行优化设计, 分析了各类光开关的性能, 最终选择了体积小并且切换速度快的磁光开关。

分析了光学测量法和矢量网络分析的几种测量方法的优缺点, 选择了精度较高且测量方便简单的频域法, 用光收发模块和 40GHz 矢量网络分析仪搭建了光纤延迟线的测量平台, 测量精度可达 1ps。在高精度光纤连接技术的研究中, 使用工装夹具能够很好的提高光纤的切割精度, 采用光纤自动熔接加监测的技术, 实现连接精度优于 1ps。

实现了磁光开关的高速驱动电路与控制电路, 完成了 5BIT 光纤延迟线的电路的控制, 实验证明磁光开关的切换速度优于 20 μ s。

最后采用优化的拓扑结构, 用磁光开关和单模光纤构建了 5bit 光纤延迟线, 实验研究证明当步进为 100ps 时, 32 种状态中, 光纤延迟线的最大延迟误差优于 2.98ps, 损耗的一致性优于 0.55dB, 对光纤延迟线进行了温度特性的实验研究, 结果表面, 在同一状态下不同温度间的损耗值的最大差异为 0.32dB。

关键词: 光纤延迟线, 精度, 光开关, 拓扑结构

Abstract

In comparison with electric delay line, Optical fiber delay lines(OFDL) have many advantages, such as, small size, low weight, broad bandwidth, no susceptibility to electro-magnetic interference, and squint-free array steering. OFDL are installed or to be installed on radar stations, satellites and communications field. The OFDL which has high precision, small size and high dynamic range is urgently needed in the field of application.

The principle of OFDL is introduced and the developing situation which is at home and abroad is analyzed. In the design of topological structures, two structures are compared, because the structure of bypass cannot have small delay step and is hard to reach high precision, so we choose the difference structure. The error caused by an optical switch is analyzed, and we find that different topological structures have different influences in the precision of OFDL. The software MATLAB is used to get the best topological structure, by simulating, when the error caused by an optical switch is 1ps, the precision of optical fiber delay line can reach 2ps, and this method can be applied to any bit OFDL with arbitrary optical switches. In the choice of the key component, all of the optical switches are compared and we choose Magneto optical switch which has small size and high speed.

In the research of method of measurement for high precision, many ways are analyzed including optical measurement and vector network analyzer. We choose the vector network analyzer to measure the length of the fiber, and the method is based on frequency domain method, that has high precision and is easy to measure for us. In the research of connection method for optical fiber, By using the work fixture and in the state of monitoring, we get good result in cutting the fiber and the precision can reach 1ps.

The drive circuit and steering circuit which have high speed were finished, and the 5bit steering circuit is proved stable. By measuring, the switching time of the magneto optical switch is less than 20 μ s.

At last, the optimal structure is used. The magneto optical switches and single mode fiber are used to build a 5bit OFDL. By measuring, when the step length is 100ps, the precision of the fiber delay line was better than 2.98ps, and the flatness of the loss is about 0.55dB. In the same state, the biggest difference of loss is 0.32dB at different temperatures.

Keywords: optical fiber delay line, precision, optical switch, topologic structure

缩略语

APC	Angle Physics Contact	角度物理接触
CDOW	Cylindric Dielectric Optical Waveguide	原主介质光波导
IL	Insertion Loss	插入损耗
LD	Laser Diode	激光二极管
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems	微机械系统
OFDL	Optical fiber delay line	光纤延迟线
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry	光时域反射计
OTTD	Optical Ture Time Delay	光实时延时
PD	Photo Diode	光电二极管
RF	Radio Frequency	射频、无线电频率
SOA	Semiconductor optical amplifier	半导体光放大器

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

签名： 邵志远 日期： 2009 年 5 月 27 日

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

签名： 邵志远 导师签名： 邵志远
日期： 2009 年 5 月 27 日

第一章 绪论

1.1 光纤延迟线

光导纤维（简称光纤）是一种传导光波的原主介质光波导（Cylindric Dielectric Optical Waveguide），该波导结构约束光波形态的电磁能量于波导之中，并引导电磁能量沿光纤的轴向传播，简单地说光纤就是用来导光的透明介质纤维。

我们知道，现代相控阵雷达的信号馈送已成为设计师的难题，仅就移相器的控制线而言，每个 T/R 组件中的移相器至少要 n 根控制线（ n 为移相器位数），其指令形式是 n 位并行的二进制字。某些类型的数字移相器，对每一位还要求一根辅助控制线，这样控制线的数量还要加倍，对超大型相控阵天线，T/R 组件数量达 $10^3 \sim 10^4$ 个，故采用传统的金属传输线将是非常困难的，甚至在某些情况下已变得不可能^[1]。近几年来，由光纤传输线代替了波导、同轴线和微带线。光纤的引入给相控阵雷达带来了明显的优点：光纤体积小、质量轻、强度好、成本低。其直径仅 $125\mu\text{m}$ ，与细同轴线相比可缩小体积一倍以上，其质量至少可降至 $1/8$ 以下，光纤的相对拉力强度大于 $7.04 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ，其最小弯曲半径可小于 2.54cm ，光纤的市场价格仅为同轴线的 $1/5$ 以下。光纤还有优良的电学性能，如大带宽、高隔离度、损耗小等，光纤实现的调制带宽可高达 100GHz 。目前使用的 1310nm 和 1550nm 两床后的带宽和就有 20THz ，如果消除 OH^- 吸收峰，长波长串口的可用带宽可以到 50THz ，从 1100nm 到 1700nm 的带宽更宽达 140THz 。下一代相控阵雷达内部互连的信号总衰减要求小于 10dB ，光纤损耗小的优点极为有利，其典型损耗小于 0.5dB/km 。相控阵天线还要求组件传输间的距离小于 60dB ，对金属传输线非常困难，而光纤可大于 100dB ，这就带来了光纤引入相控阵天线的另一重要优点，即避免了电磁干扰(EMI)，对于存在大量电磁信号的相控阵天线，电磁干扰常成为困扰设计师的难题。光纤的上述优点使它对雷达的遥控、运输以及空间应用也都带来了明显优点，光纤及其子系统正在成为新一代相控阵雷达（也包含其他雷达、通信和电子战应用）的必不可少的组成部分。随着技术的发展，光纤引入相控阵不仅仅是代替金属传输线，而且具有可完成信号分配、波束形成与控制等功能。因此光纤作为光控相控阵雷达系统的物理传输媒介，有着巨大的优越性。

雷达基站和指挥中心之间有大量的信息传输,若用电缆传输,其重量和成本都比较高,改用光纤传输后,不仅重量和成本下降,并且电磁兼容性有明显提高。另外,反辐射导弹可以根据通信和雷达天线的辐射信号来摧毁发射天线。而雷达天线是个辐射源,它是敌方袭击的目标,在常规战术雷达中,用同轴电缆连接雷达天线和控制中心,由于电缆的损耗较大,天线和控制中心的距离不可能拉开很远,因此,一旦天线遭到反辐射导弹的袭击,控制中心就可能被摧毁,指挥和操纵人员的安全就得不到保证。由于光纤传输具有损耗低,频带宽等固有特点,用于光纤连接雷达天线和雷达控制中心,从而可使两者的距离从原来用同轴电缆300m以内扩大到(2~5) km。而且信号在传输过程中无辐射,也有利于反辐射导弹的袭击。因此,用光纤传输系统取代同轴电缆,来连接雷达天线和雷达控制中心,传递雷达信号是非常理想的^[2]。

光纤在相控阵雷达中的应用主要是光纤延迟线信号处理。先进的高分辨率雷达要求损耗低、时间带宽积大的延迟器进行信号处理。光纤延迟线具有损耗低(在(1~10) GHz 频段内,单位延迟时间的损耗仅为0.4dB/ps~0.1dB/ps)、时间带宽积大(达 $10^4 \sim 10^6$)、带宽宽(>10GHz)等优点^[3],实现彼此跟踪的延迟线相当容易,而且能封装成小型的封装盒。光纤技术在相控阵雷达的应用还包括用光纤延迟线在光控相控阵雷达波束形成所需要的相移^{[4][5][6][7][8]};在电光相控阵发射机中采用光学进行波束形成,用光纤技术进行天线的灵活遥控等。

由此可见,光纤延迟线已是一种新型的微波频率信号处理器件,较之其他延迟线信号处理器件更加优越。它能实现宽的带宽,尺寸较小,损耗低,温度稳定性好。特别是光纤延迟线具有与频率无关的恒定单位延时损耗,尤其适用于宽带信号处理。

1.2 光纤延迟线的基本原理

光纤延迟,是指光信号经过一定长度的光纤传输后所产生的时间延迟。光纤延迟线(Optical Fiber Delay Line),广义上是指任何具有时间延迟功能的传输光信号的光纤或无源光纤网络^[9]。这里我们提到的光纤延迟线是狭义的,它主要是指包含有光源、调制器、传输光纤和光电探测器等具有信号延迟功能的光纤组合器件。

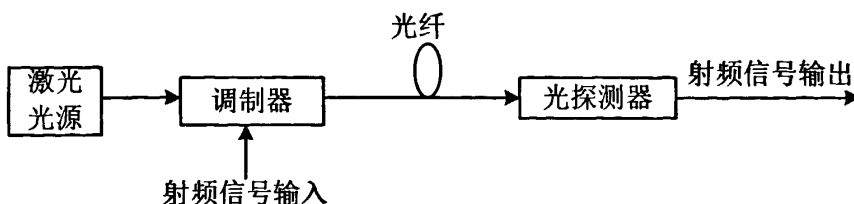


图 1-1 光纤延迟线示意图

最简单的光纤延迟线如图 1-1 所示，将微波射频信号输入到调制器，激光器发出的光信号受到调制，成为载有外界调制信息的光信号，然后耦合到具有时间延迟功能的光纤媒介中，经由光电探测器检测后再转换成与调制信号相同的射频信号输出。延迟光纤的作用就是传输光信号，输出射频信号可以认为是经过光纤延迟了信号，在此过程中，光波为外界射频信号的载体，光纤则是光信号的延迟介质。

根据光纤传输理论，光在光纤介质中的传播速度为 v 的话，那么其表达式可以写为

$$v = \frac{c}{n} \quad (1-1)$$

式中， n 为传输光波的波长为 λ 时，光纤纤芯的折射率， c 为光波在自由空间中的传播速度。当广播在光纤中以速度 v 传播的时候，长度为 L 的光纤产生的延时可以表示为

$$\Delta t = \frac{L}{v} = \frac{Ln}{c} \quad (1-2)$$

由 Δt 的表达式 (1-2)，我们可以看出延时时间的长短是与光纤长度 L 和光纤折射率 n 成正比的。

1.3 光实时延迟能解决“波束偏斜”现象

现今机载或星载雷达系统对带宽和稳定性的要求越来越高，使得传统的机械扫描天线逐渐被相控阵控天线取代。后者每一个天线阵元的发射相位和幅值都可以单独控制，因而可以方便而快速的形成波束。

传统的相控阵控天线，其阵元的相位由电子移相器或者电子延时器控制，但

是，随着对系统带宽和抗电磁干扰性能的要求越来越高，下一代的相控阵天线必定是使用光学实时延时技术^[10]（OTTD）。

为简单起见，考虑一个一维的相控线阵，则其远场辐射在 Φ 方向的分布为：

$$E(\Phi, t) = \sum_{n=0}^N A_n \exp(i\omega_m t) \exp[i(\psi_n + nk_m d \sin \Phi)] \quad (1-3)$$

其中， N 为阵元数， d 为阵元间隔， A_n 为第 n 个阵元的幅值， ω_m 为微波角频率， $k_m = \omega_m / c$ 为微波波数， ψ_n 为第 n 个阵元辐射的相移， Φ 为波束相对线阵法线方向的方向。由（1-3）可以看出，相控天线的远场辐射波束指向可以由各阵元的相移控制，比如，若把波束指向 Φ_0 方向，各阵元的相移满足下式（1-4）即可：

$$\psi_n = -nk_m d \sin \Phi_0 \quad (1-4)$$

如果微波中心角频率 ω_m 不变对应于 ψ_n 不变，则对(2-4)两边取微分，得到：

$$\Delta \Phi = -\tan \Phi_0 \left(\frac{\Delta \omega_m}{\omega_m} \right) \quad (1-5)$$

可以看出，如果微波角频率偏移 $\Delta \omega_m$ ，则波束指向偏移 $\Delta \Phi$ ，换句话说，对于一个宽带系统，其各个频率分量的波束指向会有偏移，这就是所谓的“波束偏斜”现象^[11]。

TTD 技术的出现就是为了在宽带系统中消除偏斜现象。在光学 TTD 中，若要波束指向 Φ_0 ，则对第 n 个阵元辐射引入延时 $t_n(\Phi_0)$

$$t_n(\Phi_0) = nL(\Phi_0) / c = nd \sin \Phi_0 / c \quad (1-6)$$

因此，对于任意的微波角频率 ω_m ，第 n 个阵元辐射的相移 ψ_n 为：

$$\psi_n = -t_n(\Phi_0) \omega_m = -nd \omega_m \sin \Phi_0 / c = -ndk_m \sin \Phi_0 \quad (1-7)$$

注意到 $t_n(\Phi_0)$ 与 ω_m 无关，并且通过比较（1-7）与（1-4），可以看出，使用 TTD 技术就可以避免波束偏斜现象^[12]。

1.4 国外光纤延迟线的发展情况

光控相控阵雷达从上个世纪 90 年代以来，得到了广泛的研究，建立了各种波段的实验系统，由于受当时器件水平和造价等因素的限制，到目前为止，采用完

全的光控技术的相控阵雷达实用系统尚未见正式的报道。但随着光电子技术和光电集成技术的迅猛发展，该项技术进入实际工程应用将指日可待。

在国外，从上世纪 80 年代开始，便有人提出将光技术应用于相控阵雷达。上世纪 90 年代以来，光纤技术的军事应用受到美、欧等国军方的重视。在美国，三军光纤技术开发活动由三军光纤协调委员会进行组织，21 世纪的今天，美国国防部已把“光子学、光电子学”列为 2010 年十大国防技术中的一项，其中光纤技术占据着举足轻重的地位。

从光纤延迟线的诞生到现在，国外在此方面的研究取得了长足的进步，在 90 年代美国休斯公司用了数目庞大的器件第一次用实验验证了用光控延时技术可以实现相控阵雷达的宽带宽角扫描，用激光二极管控制光路，如图 1-2^[13]：整个装置包含 8 根光纤延迟线，延时的大小分别为 $t_0 + \Delta t$ —— $t_0 + 7\Delta t$ ，这样就构成了一个 3bit 的延时结构，延迟线上的激光二极管前都有一个偏执开关，通过它来控制激光二极管的开启与关闭，当其中一个激光二极管开启时，其它的激光二极管都应该是关闭的，调制信号获得一固定的延时，然后这 8 根光纤和耦合器相连，通过光电探测器得到射频信号的输出，这一结构能够在 1—11GHz 的微波频率范围内应用。

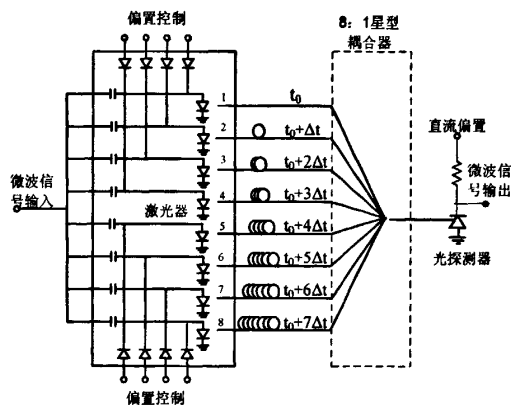


图 1-2 激光二极管控制的光纤延迟线

2003 年，韩国 Soongsil 大学采用 MEMS 光开关和光纤完成了最小延迟 12ps，最大误差为 0.2ps 的光纤延迟线^[14]，如图 1-3 所示，实验报道一个单波长 2 通道 3bit 的 TTD 系统。该系统 RF 调制频率为 X 波段，延时范围-36~48ps，最小延时 12ps，最大延时误差 0.2ps，对应的角度误差 0.84°。这种结构的缺点就是 MEMS 光开关的速度比较慢，选择速度较快的磁光开关会是一种更好的方案，但是磁光开关价

格和体积上要比 MEMS 高。

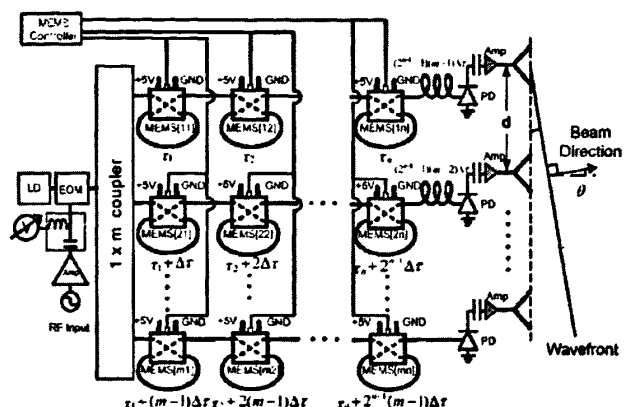


图 1-3 韩国 Soongil 提出的基于 MEMS 的 TTD 示意图

2005年Nicholas Madamopoulos设计了图1-4的7BIT光波导延迟线^[15]，它采用了SOA开关它的优点是控制非常简单，只需要控制驱动电流，同时此开关具有高消光比与偏振无关的特性，可以减少串扰，它的插入损耗也很低，并且具有ns级的极快的响应速度，并且能对损耗进行一定程度的补偿。对于光纤长度的控制的精确性，这里用到了OptiFlex技术，其精确度可以达到ps量级。这种结构里面采用的技术都已经相对比较成熟，因此在一定程度上减少成本^[16]。

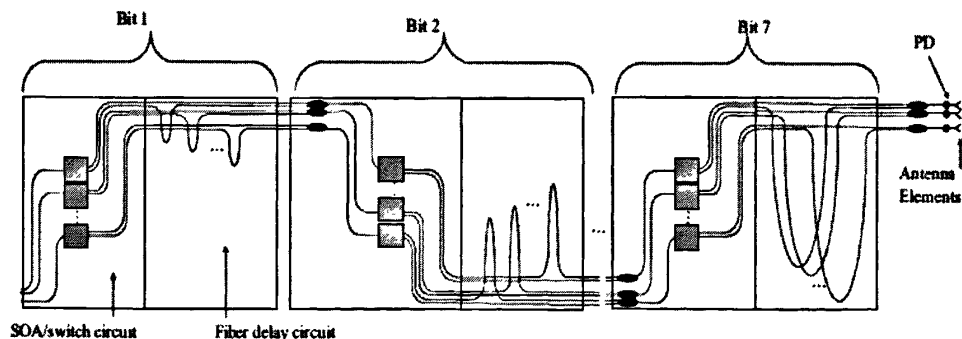


图 1-4 7BIT 光波导延迟线

2006 年 Krzysztof M. Madziar and Jarosław Dawidczyk^[17]提出了图 1-5 的结构，它是采用色散光纤实现延时的一种结构，由激光器产生的光波通过光电调制器被微波信号调制后，经过光分束器后进入到不同的光纤，每一路光纤都是由一段高色散光纤和零色散光纤组成，只是各路中色散光纤和零色散光线的比例不一样的。

选定中心波长，此后的各路的光纤延时相等，此时天线阵列产生的波平面与阵列面是垂直的。当按照一定规律改变进入延时结构的光载波的波长时，各路光信号的传播时间就发生改变，因此可以得到不同的延时差，从而控制波束的扫描方向，因为其延迟时间可以实现连续变化，所以其扫描角度也是连续的。

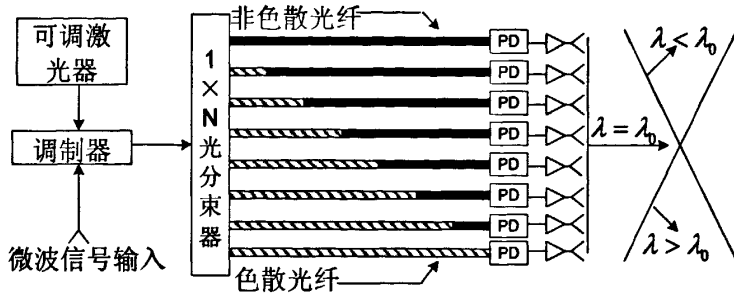


图 1-5 色散光纤延迟结构

2006 年 Maggie Yihong Chen 等人在集成光波导上设计了一个 4BIT×4BIT 的 2D PAA 光纤延迟结构^[18]，如图 1-6 所示：实现了从 0~175ps 延迟，延迟步长为 11.6ps，最大误差为其延迟值的 1.4%，采用的波导开关为 TIR 型，开关时间为 2ms。此结构适用于 X-BAND 雷达。

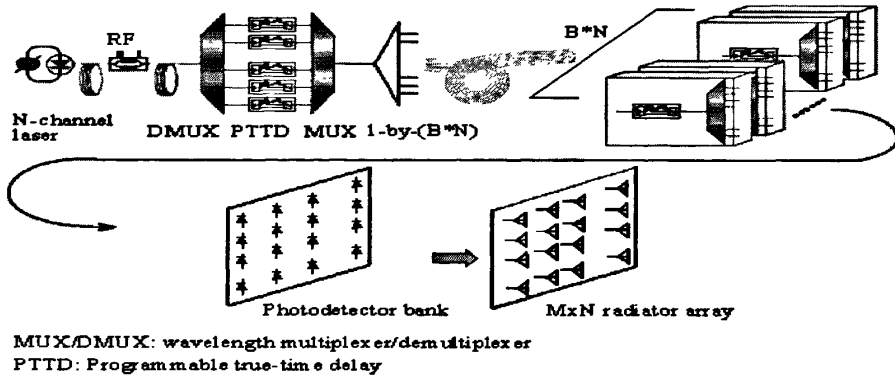


图 1-6 基于光波导的 2D PAA 系统

1.5 国内光纤延迟线的发展情况

2005 年，哈尔滨工程大学与中电 44 所合作，用电光开关和单模光纤研制的 5 位光纤延迟线，最大偏差为 81.6ps^[19]。2006 年，浙江大学用磁光开关和单模光纤研制成 4BIT 光纤延迟线，它的单态最大误差为 3ps^[20]。图 1-7 表示的 2006 年华东

电子研究所研制的 5 位光纤延迟线组件, 微波信号通过单刀 8 掷 RF 开关, 对 8 只激光器之一进行调制, 该激光器将微波信号变成光信号, 光信号再被耦合进入 4×8 光纤耦合器, 经耦合器分束后, 光信号入射到探测器上, 通过单刀 4 掷 RF 开关接通 4 个探测器中的一个, 就能输出可选择 32 种延迟之一的 RF 信号, 该系统的最大延迟误差为 $30\text{ps}^{[21]}$ 。2008 年上海交通大学, 设计的快速程控光纤延迟线, 利用对光纤拉伸的工艺, 实现了最小的延时间隔为 1ps , 3×3 的光纤延时系统误差在 10% 以内^[22]。

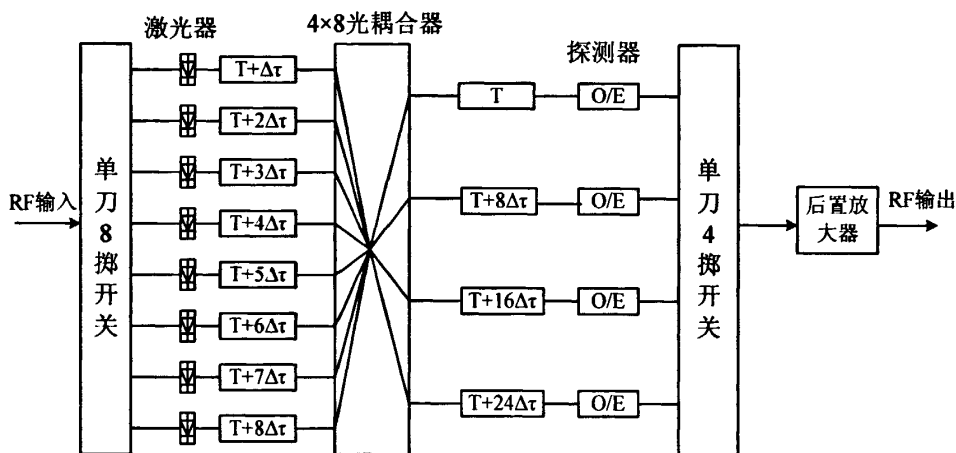


图 1-7 五位光纤延迟线

通过上面的介绍可知, 国内在光纤延迟线方面的研究比国外晚了很多, 仅有国内部分研究所, 和部分高校进行过光纤延迟线的研究。但是这些研究主要集中在纯粹的光开关和光纤构成的延迟线这一方面, 并且研究的成果大多体积大、功耗大、精度低, 而基本没有在集成光波导延迟线或者光纤和波导作为混合延迟线方面的研究。因此, 国内在光纤延迟线方面还有很多工作要做, 特别是在应用领域急需的高精度、小体积大动态范围的光纤延迟线成了目前研究的重点。

1.6 光纤延迟线的发展趋势

从近几年的研究发现, 光纤延迟线的发展趋势有以下几个特点:

(1) 光实时延迟线用于相控阵天线的技术问世已 20 余年, 在这 20 多年内, 新的技术方案不断地出现, 一方面说明光实时延迟线的技术具有十分诱人的特性

和美好的应用前景，另一方面也说明了实时延迟线技术在处在发展阶段，还有大量的研发工作要做。

(2) 近几年研究的热点逐渐转向体积小，重量轻，延迟精度更高的集成光波导方向，光子晶体光纤在光波导延迟线中的应用其报道也很频繁。

(3) 2D 的 PAA 系统研究的报道也逐渐增多

(4) 小延时系统中，连续延时的 TTD 成为研究的热点。目前已做到百皮秒量级。

(5) 依靠器件性能的提高，比如制造开关速度更快，体积更小的磁光开关，随着激光技术的进步，采用体积小，功耗低，性能更加优良的激光器，如光纤激光器，以及增加波长可调激光器的可调波长数，缩小波长间隔，增加波长的稳定性等等。

从上面的分析可知，虽然有新的光纤延迟线类型在不断出现，但是高精度是其围绕发展的核心，所以制作高精度的光纤延迟线对我们来说显得尤其重要。

1.7 本文主要研究工作

本文研究分析并完成了一种高精度、小体积、高速的光纤延迟线的研制。主要包括高精度光纤延迟线的设计与仿真，高精度光纤延迟线测量方法的研究，高精度光纤延迟线连接技术的研究，如何实现小体积和高速的要求，光收发模块的理论研究，最后通过实验完成了 5BIT 高精度光纤延迟线的研制。

首先，文章介绍了光纤延迟线的应用背景及国内外的发展情况，介绍了光纤延迟线的工作原理，对光纤延迟线进行了分类，分析了光纤延迟线的发展趋势。

然后，分析了光开关存在状态差并且会对光纤延迟线的精度产生影响，发现不同的拓扑结构对于光纤延迟线精度的影响是不同的，所以在 MATLAB 环境下，建立了光开关的模型，可以对任意结构的光开关和任意 BIT 的光纤延迟线进行结构优化设计，对 5BIT 光纤延迟线的仿真，结果证明优化后的拓扑结构能够很大的提高光纤延迟线的精度。

接下来，为了完成高精度、小体积、高速的光纤延迟线实物的研制，对各种光开关进行了比较，选择了速度快、体积小的磁光开关。在测量方法的分析后，

选择了矢量网络分析仪中的群延时法来对光纤延迟线进行高精度测量。在高精度光纤延迟线连接技术上，选用了稳定可靠，并且损耗小的固定熔接法，采用工装夹具和光纤熔接机对其进行高精度的切割和熔接。

然后，为了得到完全透明的信号传输，对光纤延迟线的收发模块进行了理论分析。

最后，完成了由磁光开关和单模光纤构成的 5-BIT 光纤延迟线模块，实验测试结果表明，模块的体积小，速度快，精度高，损耗小且一致性好。

第二章 光纤延迟线的原理

2.1 光纤延迟线的分类

自 1984 年 P.G.Sheeahan 等提出在相控阵天线上使用光延迟线控制波束指向^[23]以来,出现很多种光延迟方法的提出。从光载波角度出发,这些方法主要可以分为两类,第一类是离散型,即通过控制光信号经历不同的光程,得到不同的延迟。第二种为连续型,即利用不同频率的光在高色散光学元件中经历不同的光程特性,从而产生不同的延迟^[24]。

2.1.1 离散型

这一类光纤延迟线主要是通过改变物理长度来实现延迟的不同的光的延迟,也是最早用来实现光延迟的类型。这种类型的光纤一般的结构如图 2-1 所示,激光器发出固定波长的光信号,通过光路控制器通过不同的光路,由于不同光路间的光纤长度是不同的,所以最后就得到了不同的延迟时间,最早的光路控制器是由光电二极管构成。

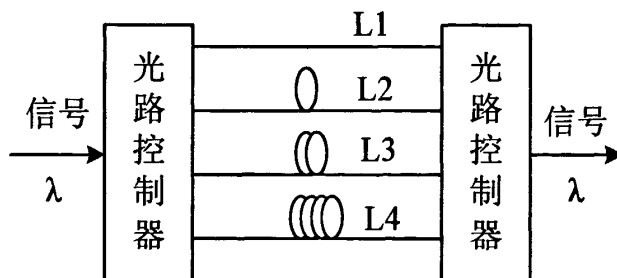


图 2-1 离散型光纤延迟线结构

随着光学技术的发展,各种结构和类型的光开关的出现就随之取代了上面激光二极管的作用,由于光开关加上光纤延迟线结构紧凑,系统稳定,构成简单成了现阶段使用最多的光纤延迟结构。1996 年美国空军 ROME 试验室做出 5bit 的延迟线^[25],并应用在 L 波段的雷达上,在扫描角为 $\pm 60^\circ$ 时,雷达实现了 700MHz 的瞬时带宽。

2.1.2 连续型

它是利用不同频率的光在光学元件中经历不同的光程的特性，产生不同的延时。下面的两种类型为其中的代表。

➤ 啁啾光纤光栅型

1997 年 J. L. Corral, 等人提出用啁啾光纤光栅作为光延迟结构^[26]，如图 2-2，可调谐激光器发出波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_n$ 的波长的激光，根据啁啾光栅的原理和功能，不同波长的光波分别在啁啾光纤光栅不同的位置点反射回来。因此，波长不同的光波就具有了不同的延时，改变多波长激光器的波长就可得到所需延时，并可实现连续调谐。它的优点是光栅的高色散系数特性，对于系统中由色散引起的光脉冲的展宽有一定的补偿作用。缺点同样也是由光栅的特性带来的，由于信号在光纤光栅中反射的位置呈线性关系，间隔不大，所以实现的可变延时范围较小。在已有的报道中，此系统能达到的精度为 5ps 左右。

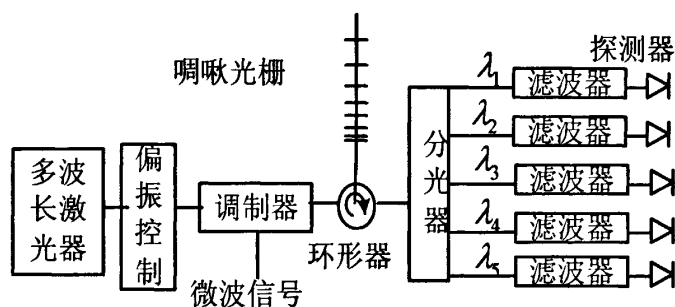


图 2-2 啁啾光纤光栅延迟结构

➤ 色散光纤型

另一种被广泛研究的可得到连续延迟的光纤延迟线为色散光纤型，如图 2-3 所示它主要由可调激光器和色散光纤构成，其延时变化为公式 (2-1)

$$\Delta t = D \cdot \Delta \lambda \cdot \Delta L \quad (2-1)$$

其中 D 为色散光纤的色散系数， ΔL 为相邻两段色散光纤的长度差， $\Delta \lambda$ 为和中心波长的光谱间隔。通过改变可调激光器的波长，由公式 (2-1) 可知经过各个光路的延时会发生变化，变化的大小和波长变化的大小以及色散光纤的色散值相关，一般的商用色散光纤在 1550nm 处的色散为 $-98\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ ，而高色散光子晶

体光纤（HDPCF）在 1550nm 处的色散为-600ps/nm·km，它在 TTD 中的应用^[27]使得光纤需要的光纤长度更短，延迟时间更长，使得系统重量变轻，体积减少，结构更加紧凑。

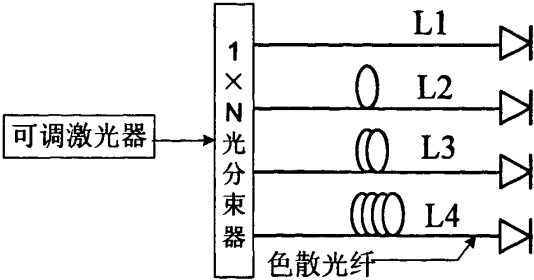


图 2-3 色散光纤型

➤ 其他类型

用于光纤延迟线还有其它类型^{[28][29][30][31][32][33][34]}，例如 M. S. Rasras 等人^[35]报道采用四级环形谐振腔级联实现了 0~320 ps 的连续可变时延,最大时延相当于长 6.56cm、有效折射率 1.46 的波导产生的时延。平面波导环形谐振腔的优点在于采用平面波导技术,易于与其它器件实现集成。如图 2-4 所示。

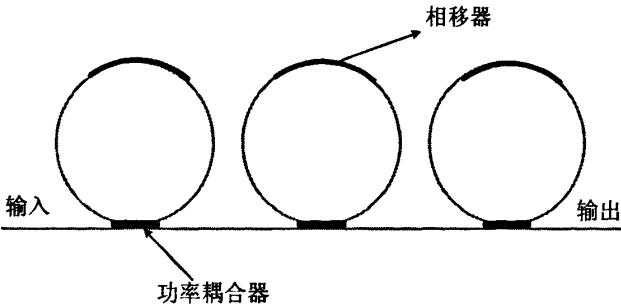


图2-4 级联环形谐振腔构成的光延迟结构

2.1.3 集成光波导型

随着雷达工作频率的增加，所需要的延时步长越来越小，因为光纤的切割的精度有限，随着集成光学的不断发展，集成光波导除了以上光纤所具备的一切优点之外，它还能使重量更轻、体积更小、延时精度更高（ps 量级），光波导的延迟精度是由制作工艺决定的，可以达到 ps 量级，制作光波导延迟线的材料有 GaAs,Si

和有机聚合物^{[36][37][38][38]}等。集成光波导主要在于光波导开关和波导延迟线的设计。

2004~2005 年,美国 Omega Optics 公司和德克萨斯大学 Austin 分校共同提出一种基于热光效应开关的聚合物 OTTD 方案^[39]。其结构示意图如图 2-5 所示。它描述的是单片波导上集成 TIR 波导光开关和二进制设置的波导延时线。据报道实验结果是一个 2bit 的波导光开关和波导延时线组合,光开关的驱动功率为 130mW,开光速率为 4ms。可提供的延时值为 0, 37.8, 160.4 和 199.2ps 这种结构在光波导延迟线上采用了 180 度弯曲的技术,由于弯曲半径小于一定的值时,弯曲损耗就会以指数增长,弯曲半径的数值是个关键参数,采用 BeamProp 软件技术可以对其进行模拟仿真得到所需要的弯曲半径,然后再在其左右根据实际测量的情况来选取最合适的值。系统的损耗值由光波导的弯曲损耗,光波导和光开关的耦合损耗以及路径损耗构成,开关在 non-switching state 的损耗为 1.5dB,在 switching state 时为 2.0dB。采用此结构的系统在波长 1550nm 时总的损耗为 0.9dB/cm。该系统适用于 X-Q (8-50GHz) 的频段的雷达。

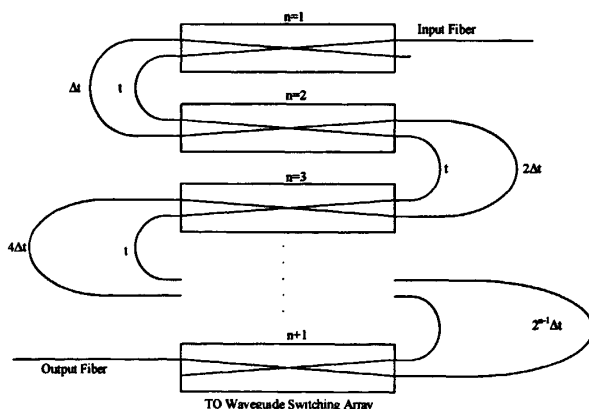


图 2-5 热光开关聚合物 OTTD

2004年,他们发表了一种基于掺Er聚合物波导(EAPW)的行波放大,用于补偿功率损耗的结构^[40](如图2-6所示)。实验装置泵浦波长为974nm,波导中传播的信号波长为1550nm,泵浦能量为75mW,在2cm的长度上可获得0.5dB的增益。

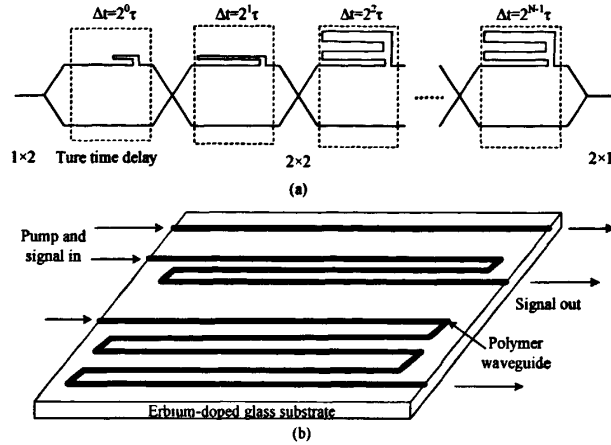


图 2-6 (a)多个级联结构示意图; (b)基于 EAPW 的行波放大结构示意图

2.1.4 2D 光纤延迟结构

近年来的另外的一个研究热点就是 PAA 的 2D 扫描中光纤延迟结构的研究。2007 年 Byung-Min Jung 等人设计了一种基于 MEMS 光开关的 2D 光控相控阵雷达系统^[41]，如图 2-7 所示，它由一个多波长光源，若干 2×2 MEMS 光开关构成，在 10GHz 的频段上搭建了一个 $2\text{bit} \times 4\text{bit}$ 的光纤延迟结构，在 x 方向上的延迟步长为 12ps，在 y 方向上的延迟步长为 6ps，延迟误差为 2.8ps。

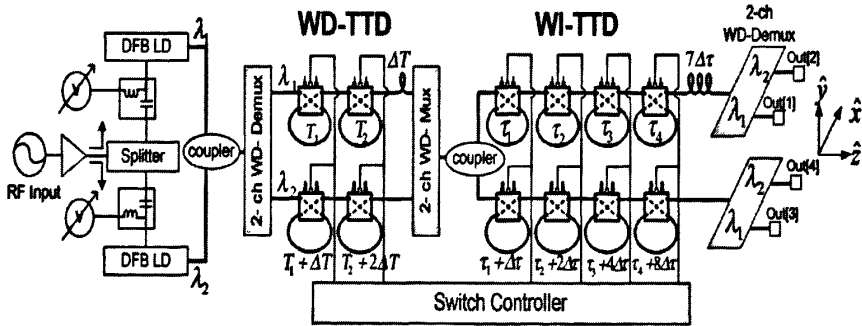


图 2-7 基于 MEMS 的 2D PAA 系统

上面介绍的是几类延迟方法中比较典型的结构，下面的表 2-1 对其优缺点作了比较。从表 2-1 可知，上面几种类型的光纤延迟线各有其优缺点，从实用角度来看，连续型光纤延迟线对器件和环境的要求很高，并且延迟范围小，而光波导延

迟线虽然体积小，但是它的损耗限制了它的实用性，所以目前研究实用性最高的高精度离散型光纤延迟线对我国应用领域技术的发展显得相当重要。

表 2-1 延迟种类的优缺点比较

类型	优点	缺点
离散型	结构简单,延迟范围和延迟值可以做到很大	单位延迟值比较大, BIT数越大其损耗也会随之增大, 扫描的角度是离散的值
连续型	单位延迟值比较小, 可以实现连续的扫描	对光源的依赖性比较大, 性能的稳定性取决于光源可调激光器的波长稳定性, 延迟范围不大
集成光波导型	体积小, 重量轻, 延迟精度比较高	其性能主要依赖于光波导的制造工艺, 损耗大。
2D 扫描型	可以实现2D范围内的扫描	结构比较复杂, 成本也随之增大, 2维扫描时间一致性不是很好

2.2 本章小结

根据光纤延迟线延迟方式的不同, 对光纤延迟线种类进行了划分, 介绍它们的延时原理, 分析和比较了它们的优缺点和实用性, 为后面选择实用性最高的高精度离散型光纤延迟线奠定基础。

第三章 高精度光纤延迟线的设计与仿真

3.1 光开关状态误差的分析

从图 3-1 中可以看出 2×2 光开关有直通和交叉 2 种状态, 在直通状态中有 t_{bar11} 和 t_{bar22} 两个通道, 在交叉状态中有 $t_{cross12}$ 和 $t_{cross21}$ 两个通道, 其中 t_{bar11} 中下标 bar 表示光开关的直通状态, 而 11 表示从进端口 1 输入信号, 从出端口 1 输出信号, 而 t_{bar22} 表示在光开关的直通状态下, 光从进端口 1 到出端口 1 所需要的时间, t_{bar22} 表示光从进端口 2 到出端口 2 所需要的时间, 同理, $t_{cross12}$ 表示在光开关的交叉状态下, 光从进端口 1 到出端口 2 所需要的时间, $t_{cross21}$ 表示在光开关的交叉状态下, 光从进端口 2 到出端口 1 所需要的时间。通过控制光开关的直通和交叉状态, 可以得到 4 个延迟时间, 设 Δt_1 , Δt_2 和 Δt_3 分别对应于“1”, “2”和“3”相对于“0”延时路径的理论延时值^[36]。

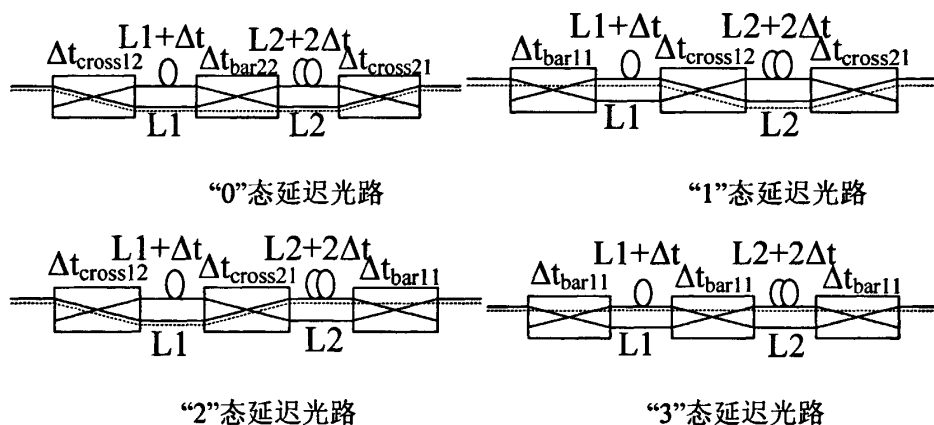


图 3-1 2-BIT 光纤延迟线的 4 种状态

在理想的情况下, 假设光通过光开关的四个通道的时间相等, 即 $t_{bar11} = t_{bar22} = t_{cross12} = t_{cross21}$, 用公式表示为:

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (3-1)$$

可以得到 0τ , 1τ , 2τ , 3τ 这四个理想的延迟时间。若考虑光开关内部结构对

延时精度的影响，即光开关的四个通道时间不等，根据表，得到此时的延时值并不是理想的 0: 1: 2: 3。

从上面可以看出，光开关对延时精度的影响是来源于光开关在直通和交叉态度转换下光开关内部结构差异，使得光开关的通道对光信号具有不同的延时值，从而引起延时误差。

表 3-1 2BIT 光纤延迟线 4 种状态的光程

状态	光路的总延迟值	相对于“0”态的延迟
0	$(L1+L2)n/c + \Delta t_{bar22} + \Delta t_{cross12} + \Delta t_{cross21}$	0
1	$(L1+L2+\Delta t)n/c + \Delta t_{bar11} + \Delta t_{cross21} + \Delta t_{cross12}$	$n\Delta t/c + \Delta t_{bar11} - \Delta t_{bar22}$
2	$(L1+L2+2\Delta t)n/c + \Delta t_{bar11} + \Delta t_{cross12} + \Delta t_{cross21}$	$n2\Delta t/c + \Delta t_{bar11} - \Delta t_{bar22}$
3	$(L1+L2+3\Delta t)n/c + 3\Delta t_{bar11}$	$n3\Delta t/c + 3\Delta t_{bar11} - (\Delta t_{bar22} + \Delta t_{cross12} + \Delta t_{cross21})$

3.2 光开关误差的测量

由于光开关内部结构会对延时精度产生影响，因此需要我们测量出光开关内部的差异来确定其具体会带来多大的影响。我们采用的光开关为磁光开关，从厂商那了解到此种开关的结构比较特殊，为“互异短直通型”，“互异”即当光开关处于直通状态时，如图 3-2 所示：光信号从入端口 1 进，可以从出端口 1 出，而当光信号从出端口 1 进时，不能从端口 1 出而只能从进端口 2 出，而“短直通”表示的意思是光信号通过直通状态的上路时间要小于通过其它三个通道的时间，

$$\text{即} \quad \Delta t_{bar11} < \Delta t_{bar22} = \Delta t_{cross12} = \Delta t_{cross21} \quad (3-2)$$

$$\text{令} \quad \Delta t_{bar11} = \Delta t1 \quad (3-3)$$

$$\Delta t_{bar22} = \Delta t_{cross12} = \Delta t_{cross21} = t2 \quad (3-4)$$

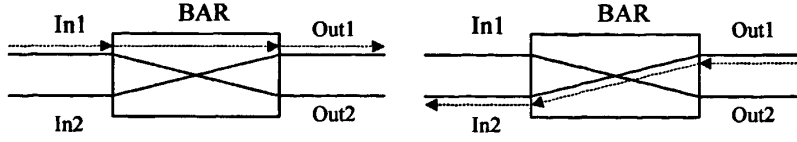


图 3-2 互异短直通型磁光开关

如图 3-3 所示，设光开关四段尾纤的长度分别为 $L1, L2, L3$ 和 $L4$ ，当光开关分别处于直通(bar)和交叉(cross)态时，测得 4 个通道加尾纤的时间分别为 $t1, t2, t3$ 和 $t4$ 。

$$t1 = L1 + \Delta t_{bar11} + L3 = 6.0937(ns) \quad (3-5)$$

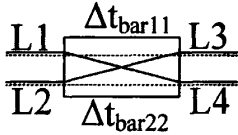
$$t2 = L2 + \Delta t_{bar22} + L4 = 6.1137(ns) \quad (3-6)$$

$$t3 = L1 + \Delta t_{cross12} + L3 = 6.0845(ns) \quad (3-7)$$

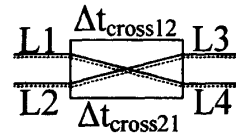
$$t4 = L2 + \Delta t_{cross21} + L4 = 6.1238(ns) \quad (3-8)$$

将 (3-5) (3-6) (3-7) (3-8) 四式运算可得：

$$\begin{aligned} \Delta t &= (t1 + t2) - (t3 + t4) = \Delta t_{bar11} + \Delta t_{bar22} - \Delta t_{cross12} - \Delta t_{cross21} \\ &= \Delta t1 - \Delta t2 = -0.9(ps) \end{aligned} \quad (3-9)$$



(a)直通态的光路



(b)交叉态的光路

图 3-3 磁光开关的四个光路

从上面的测量可以得知，在此种“互易短直通型”的磁光开关中，光信号通过光开关短的通道比通过其它三个通道的时间少了 $0.9ps$ ，这样就会对光纤延迟线的精度带来影响。

3.3 拓扑结构的分析

在上面的内容中，分析了由于 2×2 光开关内部结构或制作工艺的原因对于光纤延迟线的精度带来影响光开关引起的状态差的含义是：当光开关分别处于“开”

和“关”两种不同的状态时，光通过光开关的 4 个通道需要的时间分别为 t_{11} , t_{12} , t_{21} , t_{22} ，其中 t_{11} 代表光信号通过 In1 与 Out1 两个端口之间所需要的时间，由于光开关结构和制作工艺的原因的这 4 个时间并不一定会完全相等，这样经过不同的光开关的通道时会带来误差，也就会给光纤延迟线的精度带来一定的影响，如何克服或者减少光开关带来的状态误差的影响对于高精度的光纤延迟线来说显得尤其重要。下面考虑在不同的拓扑结构中，由于光开关状态差带来影响的差异。

光开关和光纤构成光纤延迟线的结构如下图所示有旁路和差分这两种，在不考虑光开关状态误差存在的情况下，如图 3-4 所示，在旁路结构中只需要将 OUT1 的尾纤和 IN1 的尾纤相连接，并且令它们的长度和分别等于 Δt 和 $2\Delta t$ ，通过控制光开关的直通和交叉的状态，就可以实现 $0 \sim 3\Delta t$ 四个不同延时的 2-bit 光纤延迟线。而在差分结构中需要将前一个光开关的 OUT1, OUT2 分别和后一个光开关的 IN1 和 IN2 相连接，IN1 与 OUT1 的尾纤长度之和比 IN2 与 OUT2 尾纤之和分别多了 Δt 和 $2\Delta t$ ，通过控制光开关的直通和交叉的状态，就可以实现 $0 \sim 3\Delta t$ 的 2-bit 光纤延迟线。

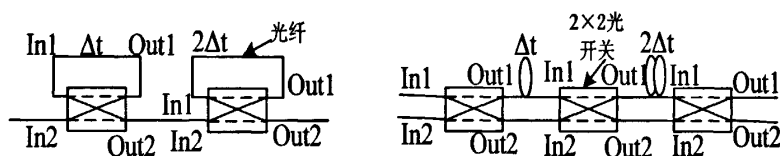


图 3-4 旁路和差分结构

当采用旁路结构时，理想的光开关通过延迟光纤和未通过延迟光纤的时间差应该为 Δt ，但是由于光开关状态差的存在，此时的时间差变为 $t_{21} + t_{12} - t_{22} + \Delta t$ ，要克服此时间差，如图 4-5 所示只需要在延迟光纤上，减去 $(t_{21} + t_{12} - t_{22}) * n/c$ 长度的光纤就能达到理想的延迟时间，通常这种方法称为光纤补偿法，其中 n 是光纤的折射率， c 是光速。用同样的方法在差分结构上也进行光纤补偿，在延迟光纤上加上 $(t_{12} - t_{11}) * n/c$ 长度的光纤进行补偿。

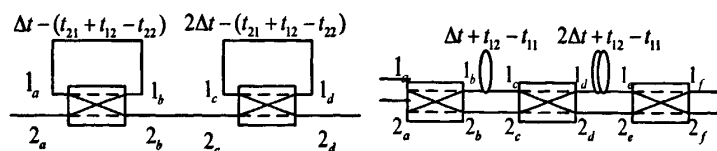


图3-5 经过补偿的2-bit旁路结构和差分结构

表 3-2 中列出的是经过补偿后, 两种结构的 2bit 延迟时间, 从表中可以看出旁路结构经过光纤补偿后克服了光开关带来的状态差, 而差分结构的情况则不一样, 在此结构中加补偿光纤的实质就是光开关两个通道 t_{11} 和 t_{21} 的时间附加上 $t_{12}-t_{11}$, 也就是变相的同时改变了 t_{11} 和 t_{21} 的长度, 除非光开关采用 $t_{11}=t_{21}$, $t_{12}=t_{22}$ 这样的特殊结构才能用光纤补偿来克服光开关的状态差, 否则差分结构是无法从根本上克服光开关带来的状态差。

表 3-2 经过光纤补偿后两种结构对应的 2-bit 时间

状态	旁路结构		差分结构	
	延迟时间	相对于 0t 路径的延迟	延迟时间	相对于 0t 路径的延迟
0t	$2t_{22}$	0	$t_{12} + 2t_{22}$	0
1t	$\Delta t + 2t_{22}$	Δt	$\Delta t + 2t_{12} + t_{22}$	$\Delta t + t_{12} - t_{22}$
2t	$2\Delta t + 2t_{22}$	$2\Delta t$	$2\Delta t + 3t_{12} + t_{21} - t_{11}$	$2\Delta t + 2t_{12} + t_{21} - t_{11} - 2t_{22}$
3t	$3\Delta t + 2t_{22}$	$3\Delta t$	$3\Delta t + 3t_{12}$	$3\Delta t + 2t_{12} - 2t_{22}$

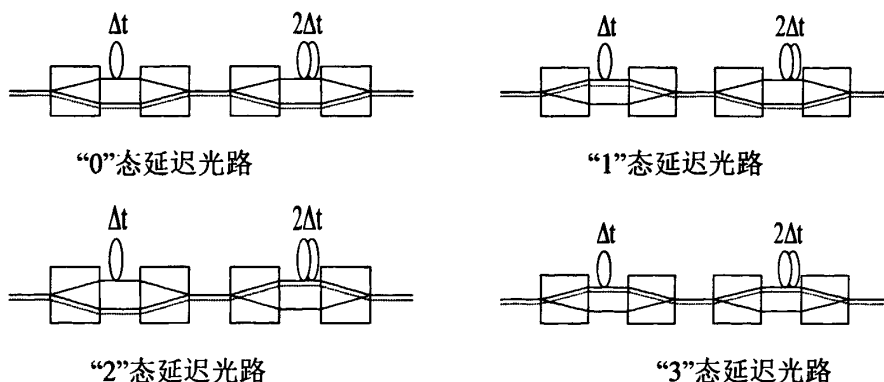


图 3-6 2BIT 光纤延迟线中 1×2 光开关的光路图

随着 BIT 数的增加, 由于光开关状态带来的误差累计会越来越大, 除了通过光纤补偿法在差分结构中可以消除光开关状态误差带来的影响外, 另外一种可以减小其影响的方法就是用 1×2 的光开关来取代 2×2 的光开关。下图 4-6 表示的是用 4 个 1×2 的光开关可以构成 2-bit 光纤延迟线的四种状态。

它的实质如图 3-7 所示，由于光信号进入和离开光纤延迟线系统只用到一个端口，所以可以将第一个和最后一个 2×2 的光开关用一个 1×2 的光开关来代替，而中间的一个 2×2 的光开关可以用两个 1×2 的光开关来代替。假设经过这两个 1×2 光开关的内部通道的时间分别为 t_{reset1} 、 t_{set1} 、 t_{reset2} 和 t_{set2} 。表 4-2 表示的是光信号通过用两个 1×2 光开关的内部通道来表示 2×2 光开关四个通道的时间表达式。

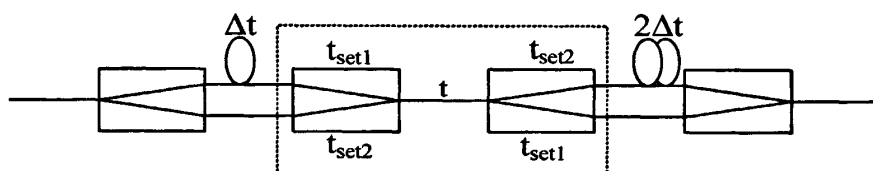


图 3-7 用 1×2 代替 2×2 光开关的原理图

从表 3-3 中可以看出如果 1×2 的光开关不是对称结构，即 $t_{set1} \neq t_{set2}$ ，则光开关的状态差依然存在，也无法通过光纤补偿来消除，但如果 1×2 的光开关是完全对称结构则可以消除光开关状态差带来的精度影响。

表 3-3 2×2 光开关与 1×2 光开关的等价光路

2×2 光开关的状态	1×2 光开关的状态
t_{bar11}	$t_{set1} + t_{set2} + t$
t_{bar22}	$t_{set1} + t_{set2} + t$
$t_{corss12}$	$t_{set1} + t_{set1} + t$
$t_{corss21}$	$t_{set2} + t_{set2} + t$

3.4 几种拓扑结构的比较

对上几节内容中的旁路，差分以及在差分结构中使用 1×2 的光开关来代替 2×2 光开关的结构，分别进行优缺点分析。

旁路结构：

✧ 优点：结构紧凑，因为比差分结构少用了—个光开关，所以体积相对较小，成

本也相对较低；通过光纤补偿方法可以消除光开关状态误差所带来对精度的影响。

- ✧ 缺点：受光纤弯曲半径的限制，光纤的弯曲半径如果小于 3cm，它所带来的弯曲损耗将非常大，所以它的最小延迟时间不能达到很小，大概在 500ps 左右；另外它的损耗的一致性也不是很好，因为通过一段延迟光纤要经过一个 2×2 光开关的两个交叉通道，而未经过延迟光纤只要经过一次直通通道，所以它们之间的损耗差异会变得很大，BIT 数越多，差异也会随之增大。

差分结构：

- ✧ 优点：最小延迟时间可以做得很小，因为它的延迟时间是由上下两段延迟光纤的差值决定的，所以理论上可以无限小；每次都只经过光开关的一个通道，所以损耗的一致性较好。
- ✧ 缺点：开关数量较旁路结构多了一个，所以成本略高，体积略大；无法克服光开关状态差所带来的对精度的影响。

1×2 光开关：

- ✧ 优点：由于全部使用的是 1×2 的光开关，由于该种光开关结构上的对称性，信号无论经过光开关的哪一支，它的光开关状态误差相对于 2×2 光开关的延时误差都相对较小；最小延迟时间也不受光纤弯曲半径的影响，可以做得很小。
- ✧ 缺点：由于使用两个 1×2 光开关来代替一个 2×2 光开关，所以光开关的数量增多，损耗的一致性变差，体积也随之增大。

3.5 拓扑结构的选择

在上面一节的内容中分析几种结构的优缺点，在不同应用中，所要求延迟的精度不尽相同，例如在相控阵雷达中，微波信号为 1GHz 时， 1° 的方向偏移对应的延迟误差大约为 3ps，而当微波频率上升到 10GHz 时，则对应的延迟误差为 0.3ps，可见随着微波频率的升高要求延迟步长越来越小。

根据课题的需要，将要搭建一个 5-BIT 的高精度，小体积和高速的光纤延迟线，延迟的步长为 100ps，损耗的一致性要小于 1dB。旁路结构虽然无光开关状态差的影响，但是由于其最小延迟步长的限制和损耗一致性较差，所以该结构不适

合本课题。对于 5-BIT 的光纤延迟线需要用到十个 1×2 的光开关，所以结构不紧凑，体积也很大，所以也不符合要求，因此我们选择了差分结构。但是差分结构中存在着光开关状态差对精度影响，所以下面我们将下面我们将研究在差分结构中，通过优化拓扑结构设计从而减小光开关状态差对延迟线的影响。

3.6 拓扑结构的优化设计

光开关状态差对光纤延迟线精度有影响，是因为光开关内部结构的差异，如图 4-8 所示，一个光开关有“0”和“1”两种摆放方法，“0”态表示光开关正放，“1”态表示光开关反向放置。通过改变光开关的正反放置，可以发现经过光开关的路径改变了，对于某些结构的光开关，经过光开关的光程也随之改变了，最后各种结构的光开关状态差也可能不尽相同。以我们使用的短直通磁光开关为例，设 $t_{12}=t_{21}=a$, $t_{12} \neq t_{11}$, $t_{11}=b$ ，其中 a 和 b 分别表示光信号通过各自通道所需的时间。由于光开关可以正反放置，所以光纤延迟线的拓扑结构会不仅仅只有一种，而在不同的拓扑结构中，光开关状态差所带来的误差累积会不尽相同，下面就将对此进行分析。

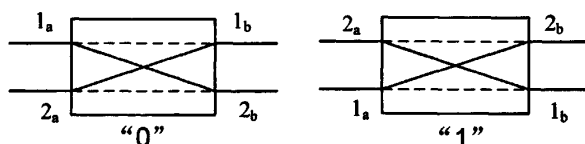


图 3-8 光开关的两种摆放位置

如图 3-9 所示，这是基于短直通磁光开关 2-BIT 光纤延迟线的两种拓扑结构，在第一种结构中，三只光开关都是正放，它的拓扑结构为“000”，而在另一种结构中，第二只光开关为正向放置，而第一只和第三只光开关为反向放置。

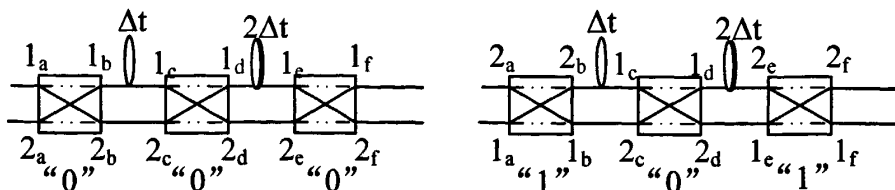


图 3-9 2BIT 光纤延迟线的两种结构

分别计算出这两种拓扑结构 4 种状态的时间,如表 3-4 所示,拓扑结构为“000”光纤延迟线,由于光开关状态差引起的误差为 $3(b-a)$,而拓扑结构为“101”的光纤延迟线它由于光开关状态差引起的误差为 $(a-b)$,从结果中可以看出在不同的拓扑结构中,光开关状态差引起的误差累积是不尽相同的。

表 3-4 两种拓扑结构的的光开关状态误差

状态	“000” 拓扑结构		“101” 拓扑结构	
	延迟时间	与“0”相比的延时	延迟时间	与“0”相比的延时
“0”	$(3a)$	0	$(a+2b)$	0
“1”	$(2a+b)+\Delta t$	$(b-a)+\Delta t$	$(2a+b)+\Delta t$	$(a-b)+\Delta t$
“2”	$(2a+b)+2\Delta t$	$(b-a)+2\Delta t$	$(2a+b)+2\Delta t$	$(a-b)+2\Delta t$
“3”	$(3b)+3\Delta t$	$3(b-a)+3\Delta t$	$(2a+b)+3\Delta t$	$(a-b)+3\Delta t$

3.7 优化拓扑结构的理论仿真

随着光开关数量的增加,光纤延迟线系统的拓扑结构也会随之增加,加之各种开关内部结构的差异,光开关状态差带来的误差影响也越来越复杂,因此,对于任何一种内部结构的光开关,需要在用它构成光纤延迟线的所有拓扑结构中,选出一种最优的结构来使得光开关状态差所带来的影响达到最小。

MATLAB 是矩阵实验室 (Matrix Laboratory) 之意,它具有友好的工作平台和编程环境;简单易用的程序语言,强大的科学计算及数据处理能力,出色的图形处理功能等等^[38]。

MATLAB 是一个高级的矩阵/阵列语言,它包含控制语句、函数、数据结构、输入和输出和面向对象编程特点。用户可以在命令窗口中将输入语句与执行命令同步,也可以先编写好一个较大的复杂的应用程序(M 文件)后再一起运行。新版本的 MATLAB 语言是基于最为流行的 C++ 语言基础上的,因此语法特征与 C++ 语言极为相似,而且更加简单,更加符合科技人员对数学表达式的书写格式。使之更利于非计算机专业的科技人员使用。而且这种语言可移植性好、可拓展性极强,这也是 MATLAB 能够深入到科学研究及工程计算各个领域的重要原因。

MATLAB 自产生之日起就具有方便的数据可视化功能，以将向量和矩阵用图形表现出来，并且可以对图形进行标注和打印。高层次的作图包括二维和三维的可视化、图象处理、动画和表达式作图。可用于科学计算和工程绘图。新版本的 MATLAB 对整个图形处理功能作了很大的改进和完善，使他不仅在一般数据可视化软件都具有的功能（例如二维曲线和三维曲面的绘制和处理等）方面更加完善，而且对于一些其他软件所没有的功能（例如图形的光照处理、色度处理以及四维数据的表现等），MATLAB 同样表现了出色的处理能力。同时对一些特殊的可视化要求，例如图形对话等，MATLAB 也有相应的功能函数，保证了用户不同层次的要求。另外新版本的 MATLAB 还着重在图形用户界面（GUI）的制作上作了很大的改善，对这方面有特殊要求的用户也可以得到满足。

3.7.1 仿真

本文需要实现的对任意结构的光开关状态差，所以需要借助于 MATLAB 强大的计算能力在多 BIT 的光纤延迟线中计算出所有的拓扑结构，以及每种拓扑结构所对应的所有延迟状态的延迟时间。例如 2BIT 的光纤延迟线就共有 8 种拓扑结构，每种拓扑结构有 4 种延迟状态。而对于 n -BIT 的光纤延迟线则有 2^{n+1} 的种拓扑结构，每种拓扑结构对应则有 2^n 种延迟状态。

模型的建立：

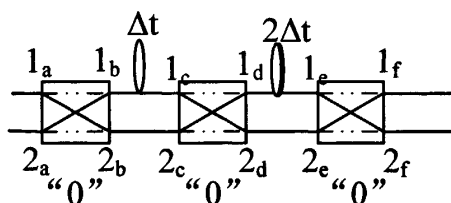


图 3-10 光开关模型的建立

首先要在 MATLAB 中建立光开关的模型，假设一个光开关有四个通道，四个通道的时间可以手动输入，这样便可以实现任意结构的光开关的内部结构模型。其次要确定光信号通过前后光开关的逻辑顺序，如图 4-10 所示，光信号从 1_a 端口进入时，有两个通道可以选择，可以从 1_b 端口出，也可以从 2_b 端口出，当光信号从 1_b 端口出来时，此时，此时光信号只能进入 1_c 端口，而不能进入 2_c 端口。

3.7.2 计算并进行最优选择

按照上面的模型，计算出所有的拓扑结构，并且将每种拓扑结构对应的所有状态的延迟时间计算出来。这里以将要搭建的 5BIT 光纤延迟线为例，它一共有 $2^6=64$ 种拓扑结构，每种拓扑结构有 $2^5=32$ 种延迟状态，加上第一个和最后一个光开关进出端口的选择的 4 种可能，就一共需要 $64 \times 32 \times 4=8192$ 个延迟时间需要计算。计算出这些所有的延迟时间后，需要将每一种拓扑结构中最大的误差减去最小的误差得到一个差值，然后再将 32 种拓扑结构的差值进行比较，得到最小的值便是最优的结构。

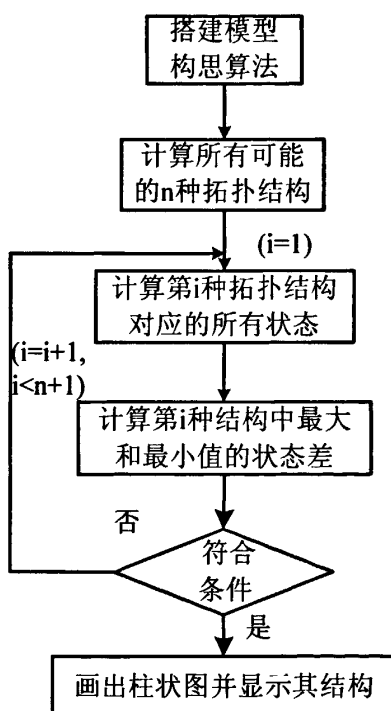


图 3-11 仿真的思路

在 MATLAB 的环境中按照图 3-11 的思路建立了光纤延迟线模型，它能够对 n -bit 的所有结构的光开关构成的拓扑结构进行计算，从而选择出状态差最小的结构并且画出其柱状图。例如，对于对称结构的光开关，设 $t_{11}=t_{22}=1, t_{12}=t_{21}=2, n=5$ ，表示经过光开关直通态为 1 个单位时间，经过交叉态为 2 个单位时间。仿真后的结果为图 3-12 所示，由于光开关为对称结构所以运行后所有拓扑结构的结果都一样，它的延迟误差为 6 个单位时间。

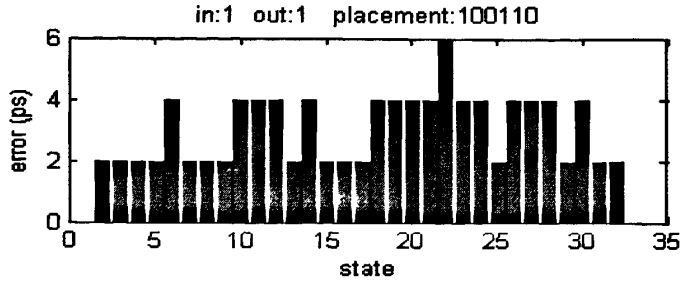


图 3-12 对称结构光开关构成 5BIT 延迟线的 32 种延迟时间

例如设 $t_{12}=t_{21}=t_{22}=2$, $t_{12} \neq t_{11}$, $t_{11}=1$, $n=5$, 在 MATLAB 里面仿真后, 得到一种最差的结构, 它的拓扑结构以及 32 种状态的误差如图 3-13 右所示, 它的拓扑结构为“000000”, 即第一个光开关反相放置, 其余的正相放置, 得到最大误差为 6 个单位时间。

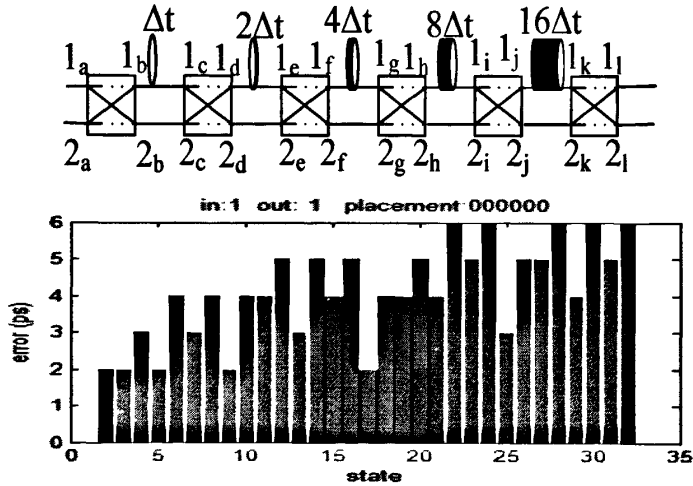


图 3-13 非对称光开关拓扑结构为“000000”的延迟线结构和其对应的光开关时间

基于非对称结构的光开关, 仿真后得到的最优结构及其 32 种状态的误差如图 3-14 所示, 拓扑结构为“110101”, 即第三和第五个光开关正放, 其余反向放置, 这种结构的最大误差为 2 个单位时间。

从这两种结构中我们可以看出它们由于光开关状态差的累计, 达到的最大状态误差不尽相同, 假设光开关的状态误差为 1ps, 那么上面两种拓扑结构中, 其中一种最大误差为 6ps, 另一种为 2ps, 两者相差了 4ps。可见, 通过此方法得到的最

优拓扑结构，有效的提高了光纤延迟线的精度。

当然光开关的内部结构可能不仅仅是上面提到 2 种结构，对于其它内部结构的光开关，只需要在程序里修改光开关的模型，便可以得此种光开关对应的最优拓扑结构和由光开关状态误差对精度影响的柱状图。

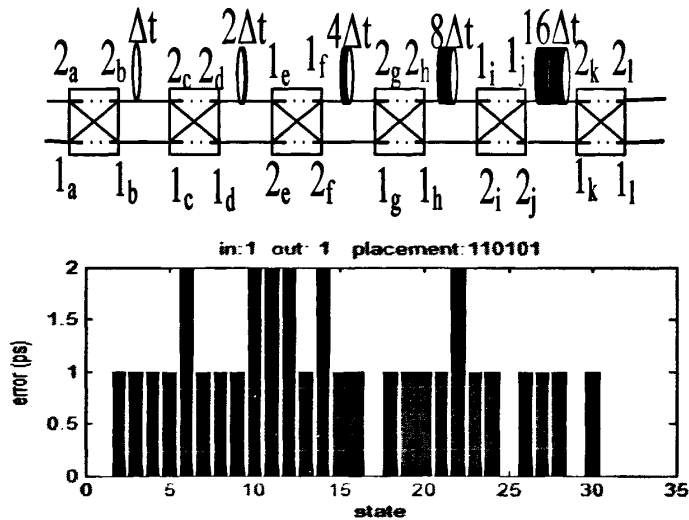


图 3-14 非对称光开关拓扑结构为“110101”的延迟线结构和其对应的光开关的时间

3.7.3 仿真程序的界面设计

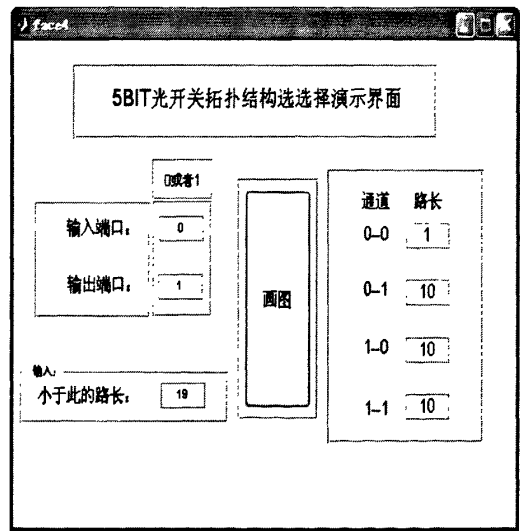


图 3-15 5BIT 拓扑结构优化程序界面设计

用户界面是用户和计算机进行信息交流的工具和方法，作为一个数学运算能力很强的软件，MATLAB 的运算结果通常用图形来表示，这里为了使用的方便，也设计了图形用户界面，可适用于任意结构的光开关，如图 3-15 所示，可以在 4 个通道里输入你所使用光开关的路长，选择输入和输出端口，选择满足条件的误差范围，点击画图键，便能画出上面一节内容中的柱状图。

3.8 采用工装夹具提高光纤延迟线的精度

光纤的切割和连接精度对于光纤延迟线的精度有着很大的影响，这里我们可以用工装夹具来提高其精度。通过在光纤切割刀和工装夹具的配合，就能切割出所需长度的光纤，实际能达到的精度和实际中具体的操作有关。

对于已经熔接好，但是精度稍差的光纤延迟线也可以通过工装夹具用拉伸光纤的方法来进一步提高它的精度。

光纤的主要成分时二氧化硅，光纤预制棒的制作方法有外部汽相氧化法，汽相轴向沉积法，改进的化学汽相沉积法，等离子体活性化学汽相沉积法，双坩埚法等^[42]。生成的预制棒经过拉制后形成均匀的光纤，从光纤的拉制工艺可以知道，若对光纤进行加热，还可以对光纤继续拉伸，从而改变光纤的长度。但是光纤拉伸法带来的弊端就是随着光纤被氢氧焰加热并被拉伸后，它的损耗会随之增加，拉伸 0.5mm 的长度，带来的额外损耗大约为 2dB，而且被拉伸的部位保护层被破坏，易被折断。这里的操作可以将需要拉伸的延迟光纤用位移台和夹具将其固定住，用氢氧焰对它进行加热后，用位移台微调器进行拉动，便完成了光纤的拉伸，精度可以达到 0.01mm。

虽然光纤拉伸法可以提高光纤延迟线的精度，但是它所带来的损耗不可忽视，而且影响了不同状态间的损耗一致性，并且光纤易折断，所以，在实际光纤延迟线的研制中，我们未采用光纤拉伸法来拉伸光纤，仅采用了工装夹具来提高光纤的切割精度。

3.9 本章小结

本章对影响光纤延迟线精度的两种拓扑结构和光开关状态误差进行研究，发现旁路结构虽然能够克服光开关状态误差，但是它的最小延迟很大，制作时难度高，损耗大而且损耗的一致性也不好，所以选择易于制作高精度的差分结构。在减小光开关状态差对差分结构影响的研究中，发现不同的拓扑结构对于光开关状态差所带来的影响不尽相同，基于此点发现，利用 MATLAB 软件设计了一套程序，能够对任意结构光开关构成的光纤延迟线进行优化，选出光开关状态差的影响最小的拓扑结构，仿真证明，当光开关误差小于 1ps 时，延迟误差优于 2ps，较好的提高了光纤延迟线的精度。

第四章 高精度光纤延迟线的研制

4.1 光开关的介绍与选择

光开关是一种具有一个或多个可选择的传输窗口，可对光传输线路或集成光路中的光信号进行相互或逻辑操作的器件^[43]。图 4-1 是使用 2×2 光开关切换光路的示意图，通过控制光开关的“直通”和“交叉”两种状态就可以选择光信号通过的光路，所以光开关是光纤延迟线的关键器件。

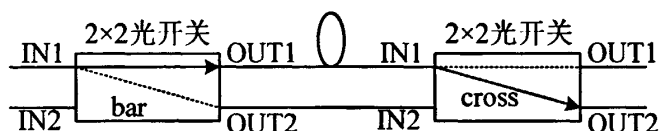


图 4-1 使用 2×2 光开关切换光路的示意图

光开关的参数主要有波长范围、插入损耗、光路回波损耗、串扰、光路输入功率、偏振相关损耗、重复性、开关速度和寿命等。

现在光开关的总类有很多，根据工作媒质划分，光开关大体上可分为自由空间光开关和波导型光开关。自由空间光开关的损耗小，基于电光效应的光开关较基于机械作用的自由空间光开关的开关速度更快些。根据器件原理，光开关又可分为两大类：机械式开关和非机械式开关。机械式光开关是通过光纤或光学元件的移动，使光路发生改变，但开关时间较长，一般为毫秒量级，有的还存在回跳抖动和重复性差点问题。非机械光开关是通过电光效应、磁光效应、声光效应以及热光效应以改变波导的折射率，使光路发生改变，具有开关时间短、体积小、便于光集成或光电集成的优点，但插入损耗较大，隔离度较低。表 4-1 是各种光开关的各项性能的描述。

基于课题的需要，我们选用的光开关需要具备体积小、速度快，损耗小这几个特点，目前市场上，切换速度最快是电光开关和半导体光开关^[44]，但是电光的体积比较大，半导体光开关的插入损耗则比较大，而 MEMS 光开关虽然体积和损耗不是很大，但是它的速度比较慢，所以这里我们选择了磁光开关，它的速度为

10-20 μ s，体积小，损耗也小于 1dB，所选的类型和偏振无关，且状态锁定稳定，功耗低，它的缺点是价格相对较贵。

表 4-1 各类光开关性能的比较

种类 类型	插入损耗	体积	串扰	开关速度	功率消耗
聚合物	一般	小	一般	1ms	相当小
电光	大	大	一般	ns	相当小
半导体	大	小	低	ns	相当大
液晶	一般	小	一般	10ms	小
MEMS	一般	中	低	1ms	小
磁光	小	小	低	10-20 μ s	小

4.2 高精度光纤延迟线的测量方法

光纤长度测量精度对于高精度光纤延迟线的研制至关重要，但是测量光纤长度的方法有很多种，下面分别进行介绍。

4.2.1 光时域后向反射法

一般工程上测量光纤长度是用 OTDR（光时域后向反射）的方法，OTDR 测量是通过发射光脉冲到光纤内，然后在 OTDR 端口接收返回的信息来进行。当光脉冲在光纤内传输时，会由于光纤本身的性质、连接器、接合点、弯曲或其它类似的事件而产生散射、反射^[45]。其中一部分的散射和反射就会返回到 OTDR 中。返回的有用信息由 OTDR 的探测器来测量，它们就作为光纤内不同位置上的时间或曲线片断，从发射信号到返回信号所用的时间，再确定光在玻璃物质中的速度，就可以计算出距离，以下的公式就说明了 OTDR 是如何测量距离的。

$$d = (c \times t) / 2n \quad (4-1)$$

在这个公式里，c 是光在真空中的速度，而 t 是信号发射后到接收到信号（双

程)的总时间(两个值相乘除以2后就是单程的距离)。因为光在玻璃中要比在真空中的速度慢,所以为了精确地测量距离,被测的光纤必须要指明折射率 n , n 是由光纤生产商来标明,光时域后向反射法的测量精度只能达到 ns。

4.2.2 光学干涉法

在光学上精确的测量光学器件的长度一般用到光学干涉法,原理如图4-2^[49]所示:实际上这个测试系统就是根据迈克尔逊干涉仪的原理搭建而成,通过分路器将一束入射光分成2束光,上面的一路通过待测器件后再由反射镜反射后通过分路器返回到频谱分析仪,下面的光束通过参考器件后,也被反射镜反射回频谱分析仪,通过调节下路反射镜的位置,通过频谱分析仪的图像来分析其干涉情况,它的测量精度如公式4-2所示和光源的波长有关,这种测量方法的精度可以达到 0.01ps^[36]。

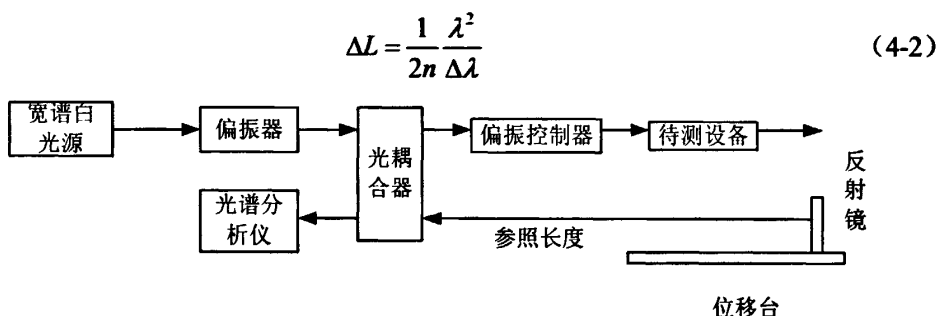


图 4-2 光学干涉法测量光纤长度

4.2.3 频域法

矢量网络分析仪通常用于电器件的测量,如果要用于光学方面的测量,就需要进行 E/O 和 O/E 的转换,如图 4-3 所示,矢量网络分析仪端口 1 发射出微波信号,在光发射模块中,经过光调制器加载到激光器发射出的光信号上,完成 E/O 转变,光载波经过光纤后,被光接收模块接收,经过光电探测器后接收到微波信号,完成 O/E 转变,然后再输入矢量网络分析的端口 2,经过矢量网络分析仪内部对信号的分析 and 计算,完成对光器件的测量。

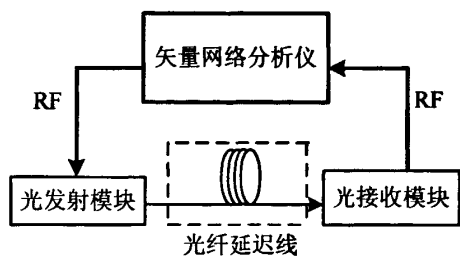


图 4-3 网络分析仪测量光纤长度

在矢量网络分析中可以用频域法测量信号的相位延迟，测量装置如图 4-3 所示。由矢量网络分析仪来产生一定频率的微波信号送入被测可变光纤延迟线系统，光纤延迟线系统在计算机的控制下产生相应的延迟时间，然后将进过延时光纤的微波信号送回矢量网络分析仪，通过测量 S21 参数的相位，根据延迟时间变化与相位变化的关系即可计算得到实际延迟时间。相位变化与延迟时间变化的关系为：

$$\Delta\varphi=360\cdot f\cdot\Delta\tau \tag{4.3}$$

上式中， $\Delta\tau$ 为延迟时间， f 为微波频率， $\Delta\varphi$ 为相位变化量，例如当频率为 1GHz 时，相位变化 9° 所对应的延时为 25ps，在测量过程中由于噪声的关系，被测相位在跳动，所以对测量精度会有一定的影响，仪器相位变化抖动为 1° ， 1° 抖动对应的延时误差为 2.78ps，当频率升高到 2GHz 时，相位变化 18° 所对应的延时为 25ps， 1° 抖动对应的延时误差为 1.39ps，可以看出频率越高测量的精度越高。

4.2.4 几种测量方法的比较与选择

表 4-2 几种测量方法的优点和缺点

测量方法	优点	缺点
光时域反射法	使用方法简单	精度太差，最高只能达到ns
光学干涉法	测量精度高，精度可达 0.01ps。	平台搭建困难，精度和光源质量有关，使用复杂，当光纤长度较长时无法测量。
频域法	测量方便，频率越高精度越高，3GHz时精度可达1ps。	精度和仪器的质量相关，易于受到噪声的影响。

上面的内容分别对几种测量光纤长度的方法进行了介绍，从上面的分析中可以看到几种测量方法各有优缺点，表 4-2 中具体描述了各自的优缺点，通过对几种测量方法的比较以及一些实际中的测量，最终我们选择了频域法。

4.3 高精度光纤延迟线连接技术的研究

光纤延迟线中光开关的尾纤以及延时光纤需要连接起来才能正常使用，它们的连接直接影响光纤延迟线的精度以及通道信号的质量，一般连接光纤的方法有两种，一种是活动连接法，另一种是固定连接法。

4.3.1 活动连接法

活动连接法是通过光纤活动连接器实现光纤之间活动连接的方法。光纤连接器基本上采用某种机械结构和光学结构，使两根光纤的芯对准，保证能量的通过。

光纤连接器是光纤通信系统中各种装置连接所必不可少的器件，也是目前使用量最大的光纤器件。虽然目前全世界共有超过 70 多种光纤连接器，并且新品种还在不断的出现，但市场上其主流品种仍然是早年就一直沿袭下来的直径为 $\phi 2.5\text{mm}$ 的精密陶瓷插芯和陶瓷管构成的连接器。它的结构如图 4-4 所示：由两个插针和一个耦合管三个部分组成。

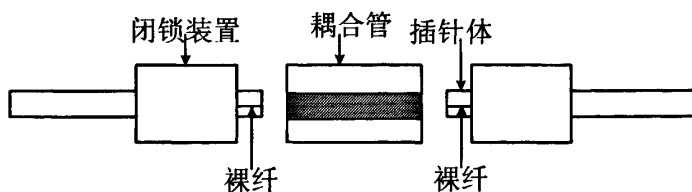


图 4-4 光纤连接器的一般结构

这种方法利用环氧树脂热固化剂，将光纤粘固在高精度的陶瓷插针孔内，然后使用两插针在外力的作用下，在耦合管中实现对准。插针的外组件采用金属或非金属材料制作。插针的对接端必须进行研磨处理，另一端通常采用弯曲限制构件来支撑光纤或光纤软缆以释放应力。耦合管一般是由陶瓷，或青铜等材料形成的两半合成的，紧固的圆筒形构件做成，多配有金属或塑料袋法兰盘，以便于连接器的安装固定，为尽量精确地对准光纤，对插针和耦合管道加工精度要求很

高。

连接器的第一个也是最重要的特性是插入损耗 (Insertion loss)，是指因连接器的导入而引起的链路有效光功率的损耗。插入损耗是由制造商以如下的两个数值提供的：平均值和最大值。如果你的系统不能承受这个最大损耗值的话，它可以帮助你决定是否使用这种连接器。一般的连接器平均损耗大约为 0.25dB。这个数字可以在 0.1 和 1dB 之间浮动。最大损耗大约为 0.5dB，变化范围在 0.3dB 和 1.5dB 之间。

连接器的另一个重要的光学特性是回波损耗。单模光纤连接器会产生回波损耗，而多模光纤连接器不存在这个问题，我们使用的是单模光纤，所以也存在这个问题。回波损耗的问题起源于一个简单的矛盾现象：为了最小化插入损耗需要尽可能将光纤端面抛光，这样回波损耗就会增加。回射发生在纤芯空气的交界面，一种有效的解决方法是将两个连接器通过物理接触来减少它们之间的空气缝隙。如果将断面抛磨成与插针体中心线成 8° 角，回波损耗会变得更小，这种连接器叫做成角度物理接触 (APC)。使用这种端面，反射回来的光会进入光纤的包层并被吸收。

4.3.2 固定连接法

光纤固定连接的方法有机械拼接和熔接这两种^[50]。如图 4-5a 所示机械拼接法是采用 V 型槽或几根平行棒之间的间隙使光纤准直连接，有些接头中还预加了折射率匹配凝胶，可以起到减小反射损耗和固定光纤末端的作用。

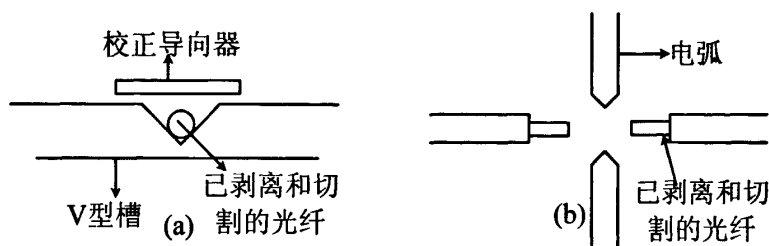


图 4-5 两种固定熔接法

熔接法是通过将光纤的端面熔化后将两根光纤连接到一起的，这个过程与金属线焊接类似，通常要用电弧来完成，图 4-5b 为熔接示意图。在光纤进行熔接前要把它的涂覆层剥离。机械接头本身是保护连接的光纤护套，但熔接在连接出却

没有任何的保护，因此，熔接设备光纤包括重新涂敷器，它涂覆熔接区域。在这里我们选择另一种方法，使用熔接保护套管，将保护套管套在结合处，然后对它们进行加热。内管是由热缩材料制成的，因此这些套管就可以牢牢地固定在需要保护的地方^[48]。表 4-3 给出的是两种光纤固定连接法的优缺点：

表 4-3 两种固定连接法的优缺点

方法	熔接法	机械拼接法
连接工艺	电弧放电	需要粘接剂
特点	易于自动熔接	易于多纤连接
连接工具	自动或手动熔接机	简单但需用手工
操作技术	采用自动焊接过程简单	连接时间长
接头损耗 (dB)	0.1	0.15

4.3.3 两种方法的比较与选择

上面介绍的两种光纤连接的方法都能连接光开关的尾纤，但是，是否适用于光纤延迟线中还需要通过实际操作来证明和选择。

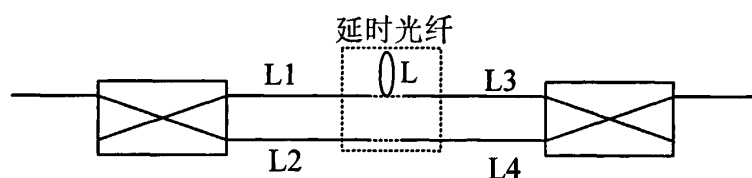


图 4-6 光开关尾纤和延时光纤的连接

如图 4-6 所示，一个 2×2 光开关进出端口分别有两端尾纤，它们的长度分别为 L_1, L_2, L_3, L_4 延时光纤的长度为 L ，如果光信号经过上路比下路要多时间 t ，则应该有：

$$L_1 + L_3 + L - (L_2 + L_4) = (t \times n) / c \quad (4-9)$$

即
$$L = (t \times n) / c + (L_2 + L_4) - (L_1 + L_3) \quad (4-10)$$

其中 n 是光纤的折射率， c 是光速。

表 4-4 两种连接方法的优点和缺点

光纤连接方法	优点	缺点
活动连接法	连接方便,如果延时光纤未达到精度要求,可以重新制作并连接延时光纤,不需要重新处理光开关两端的尾纤。	由于采用光纤连接器来连接光纤,所以体积较大,并且损耗较大。此外光纤端面易被污染,降低了连接的成功率。
固定连接法	采用熔接的方法,所以损耗较小,连接点采用热缩套管保护,占用的体积很小。	如果精度不达标,或者熔接的过程中断面损坏,重新制作比较麻烦,需要重新处理尾纤。

活动连接法,我们使用插针和套筒对其进行测量,当精度不满足要求时可以将不达要求的延时光纤丢弃,重新制备,直到达到要求为止。

固定连接法,我们采用光纤熔接机进行连接,按照上面的方法分别测量出四段尾纤的长度,然后将延时光纤和光开关的尾纤分别熔接起来,下路的两段尾纤也熔接起来,熔接完后,再使用热缩套管将熔接点保护起来,避免这一区域受到弯曲。

通过实际的使用,我们掌握了两种方法的优缺点,如表 4-2 所示,经过比较两者的优缺点,我们选择了适合于课题需要的固定连接法,采用光纤熔接机来连接尾纤和延时光纤。

4.4 本章小结

本章首先对光纤延迟线的测量方法进行了比较和分析,选择了测量精度较高的频域法来进行精度测量,测量精度可达 ps。然后对两种光纤连接技术进行了比较,固定连接法具有损耗低,牢固性好的优点,使用光纤熔接机自动熔接加监测的方法能够有效的提高光纤延迟的连接精度,连接精度理论上能够达到 0.01mm。

第五章 光开关的高速驱动与状态切换的实现

5.1 基本原理

离散型光纤延迟线通过控制光信号通过的光路长短来获得不同的延迟，因此正确控制光开关的状态切换是实现延迟线的关键。磁光开关具有体积小、功耗小、切换速度快、插入损耗小和状态可锁定的特点，该项目中我们采用了磁光开关来完成光路的切换。

5.1.1 磁光开关

磁光开关是采用法拉第旋光效应，通过线圈激励磁场，控制晶体中的极化方向来实现光信号在晶体中的前进方向，进而实现光路的切换，该项目中我们采用的磁光开关如图 5-1 所示。

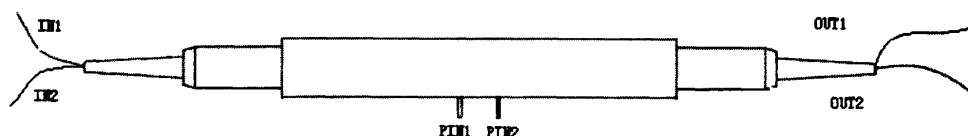


图 5-1 光开关结构示意图

光开关的状态切换依靠改变脉冲驱动电流的方向来实现的，其驱动关系如表 5-1 所示。脉冲驱动电流为 500mA，脉冲时间 17 μ s。脉冲驱动完成过后光开关完成状态切换，并保持该状态，不需要提供持续的工作电流。

表 5-1 光开关驱动电流方向与光路状态表

	状态1	状态2
脉冲驱动电流方向	PIN1=>PIN2	PIN2=>PIN1
光路状态	IN1=>OUT1 IN2=>OUT2	IN1=>OUT2 IN2=>OUT1

5.1.2 延迟线驱动控制电路原理

该光纤延迟线的光开关状态控制电路我们采用单片机和场效应管作为主要部件来实现。单片机主要完成光开关状态控制信号的接收、解码和场效应管开关状态的控制。场效应管主要为光开关的状态切换提供所需的切换电流。驱动控制电路的结构框图如图 5-2 所示。光开关状态控制单元与驱动控制电路之间的通信我们采用了串行通信方式。

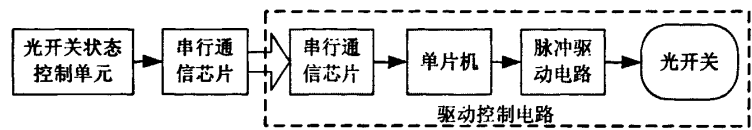


图 5-2 光开关状态控制电路结构框图

光开关驱动部分我们采用场效应对管实现光开关引脚上电流的流动方向，驱动部分结构如图 5-3 所示。图中 P1 和 P2 连接驱动控制信号，当 P1 获得高电平，P2 获得低电平时，光开关的引脚 PIN1 被场效应对管导通到 VCC，引脚 PIN2 导通到 GND，驱动电流由光开关的引脚 PIN1 流向引脚 PIN2，实现光开关的直通状态。反之，当 P1 获得低电平，P2 获得高电平时，光开关的引脚 PIN1 导通到 GND，引脚 PIN2 导通到 VCC，驱动电流由光开关的引脚 2 流向引脚 1，实现光开关的交叉状态。由于驱动部分我们采用了大功率的场效应对管，因此可以保证光开关的大电流高速驱动，实现状态转换时间小于 $20\mu\text{s}$ 。

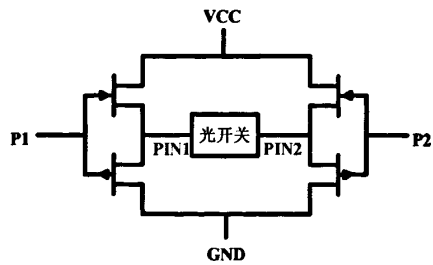


图 5-3 光开关驱动示意图

5.1.3 光开关状态控制单元电路原理

为了控制延迟线的状态切换我们研制了光开关状态控制单元。该控制单元主要功能就是实现手动或自动设置延迟线的延迟状态，并将该延迟状态转换为光开关状态控制码发送到延迟线驱动控制板，实现光纤延迟线的延时切换。

光开关状态控制单元的工作流程如图 5-4 所示，光开关状态控制单元开始工

作后首先等待用户输入需要改变延时的延迟线通道号和该通道需要实现的延时状态。用户完成设置按下发送键后，光开关状态控制单元自动将延时通道和延时状态装换为光开关状态控制码，以串行的方式发送到延迟线的驱动控制板。完成发送后，光开关状态控制单元再次等待用户输入新的控制指令，开始下一次工作循环。

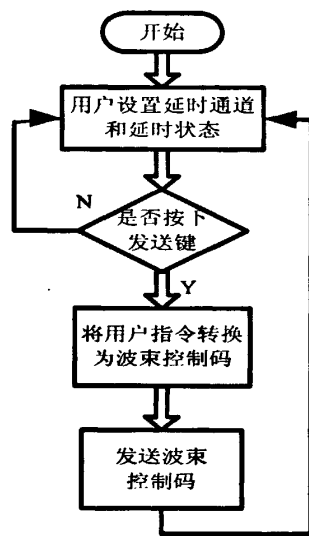


图 5-4 光开关状态控制单元工作流程图

5.2 电路实现

前面我们介绍了延迟线相关电路单元的基本工作原理，根据电路需要实现的功能和工作流程，我们设计并制作了相应的电路单元。

5.2.1 延迟线驱动控制电路的电路实现

前面我们介绍了驱动控制板的工作流程，下面我们将简述光开关的具体驱动过程。控制板结构框图如图 5-5 所示：

1) 上电复位

当电路板加电以后，光开关状态不确定，为了使延迟线进入一种已知状态，需对光开关的状态进行复位。

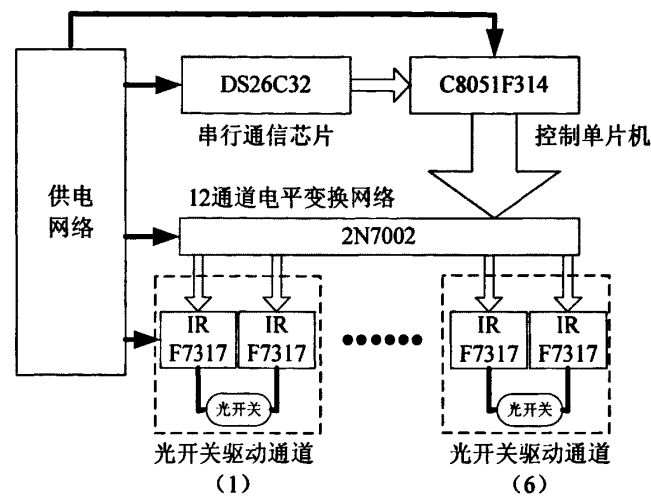


图 5-5 驱动控制板结构框图

控制单片机（C8051F314）提供 6 对引脚用于控制光开关的驱动，引脚对应关系如图 5-6 所示。为了控制系统的功耗，各个光开关的驱动是分时的。控制单片机首先拉高 P1.1 输出高电平（3.3V），该信号经过由场效应管（2n7002）组成的电平变换网络转换为 7.5V 电平信号，该信号通入对应的场效应管（IRF7317），控制该场效应管将光开关的一个引脚导通到 VCC，由于 P2.1 为低电平，因此与之对应的场效应管将光开关的另一支引脚导通到 GND，光开关内部实现导通。P1.1 的高电平状态保持 17 μ s 后撤除，因此光开关获得一个 17 μ s 的驱动脉冲，切换到直通状态。然后 P2.1 拉高 17 μ s，通过上述过程使光开关切换到交叉态，完成对光开关 1 的复位。顺序驱动其他引脚完成全部 6 支光开关的复位。

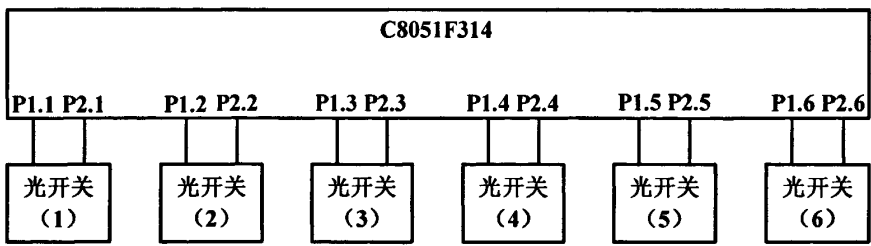


图 5-6 单片机控制引脚与光开关对应关系图

2) 状态切换

当延迟线完成状态复位，进入零延迟状态过后，就开始等待光开关状态控制单元发送的光开关状态控制码，准备进行延迟状态切换。当光开关状态控制单元发送信号到达时，先通过串行接收芯片（DS26C32）接收，转换为 TTL 电平的信号，

通入控制单片机。单片机完成信号接收过后，先检验控制码的码头和码尾，然后进行信号的奇偶效验，当完成上述过程后判断控制码时候正确，如不正确，重新回到等待状态，等待下一组控制码的到来。

在获得了光开关状态控制单元发送的状态码过后，单片机判断状态码与延迟线当前状态的关系，如果状态码与当前状态相同则回到等到状态，如不同则查表获得下一状态各个光开关的状态，针对需要相应的光开关提供对应的状态切换电流。

5.3 光开关切换速度测试

为了计算延迟线状态切换时间，我们测试了光的开关的切换速度。测试系统结构如图 5-7 所示。

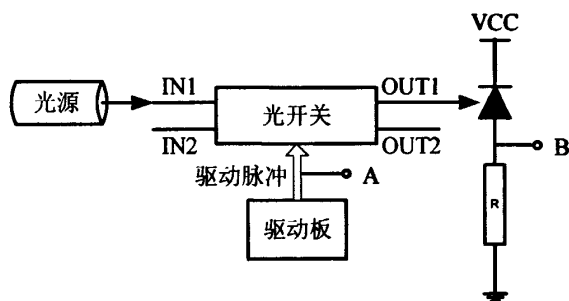


图 5-7 光开关切换速度测试系统

该测试系统主要包含以下大部分：1) 带尾纤输出的 LD；2) 待测光开关；3) 光开关驱动板；4) 高速 PIN 管。

5.3.1 测试原理

光开关的主要作用就是实现输入光路和输出光路之间的切换，因此测试光开关的切换速度是非常重要的，切换速度是光开关的主要结束参数。

我们按照图 5-7 搭建了光开关切换速度测试系统，其基本原理是测试驱动脉冲前沿和输出光信号前沿之间时间差来获得光开关的切换时间。光开关的一个输入端 (IN1) 连接 LD，一个输出端 (OUT1) 连接 PIN 管，示波器的两个探头分别测量驱动脉冲和串联 PIN 管的电阻的电压。

5.3.2 测试结果

开始测试前首先利用光开关驱动板将光开关切换到交叉状态, LD 输出的连续光信号通入光开关, 因为此时光开关处于交叉状态, OUT1 无光信号输出, 因此 B 点此时为低电平。

驱动板为光开关提供一个驱动脉冲, 使其切换到直通状态, OUT1 在切换过程中由无光到有光, PIN 管应为有光信号输出而产生光电流, 电阻 R 上将产生压降, 当电阻上电压上升到稳定值时, 可以认为光开关切换完成。由于示波器同时采样了 A、B 两点的电信号, 因此对比这两个信号的前沿的时间差就可以获得光开关的切换时间, 示波器信号输出如图 5-8 所示。

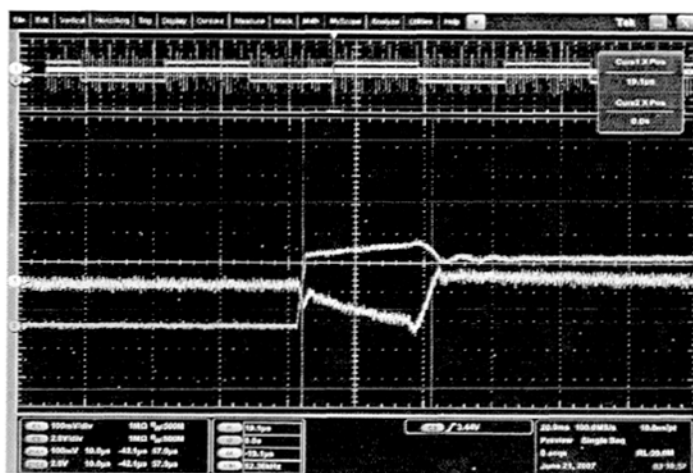


图 5-8 示波器输出波形图

在 5-8 的测试图中通过对比信号前沿的时间差我们可以确定光开关的切换时间为 $19\mu\text{s}$ 。

5.4 本章小结

设计并研制了磁光光开关高速驱动与 5BIT 光纤延迟线状态控制电路, 经实际测量, 状态切换速度优于 $20\mu\text{s}$, 该驱动电路满足 5BIT 光纤延迟线的要求。

第六章 高精度光纤延迟线的实验研究

6.1 实验平台的搭建

下面给出 5bit 光纤延迟线的设计以及研制过程, 光纤延迟线的实验系统框图如图 6-1 所示, 由四部分组成, 光发射模块, 光纤延迟线模块, 光接收机模块以及矢量网络分析仪。矢量网络分析仪端口 1 发出的射频信号经过调制器加载到激光器发射出的光信号上, 经过光纤延迟线后产生一定的时延, 再经过光接收模块将探测到的信号传入矢量网络分析仪端口 2, 然后根据相位变化来测得延时。

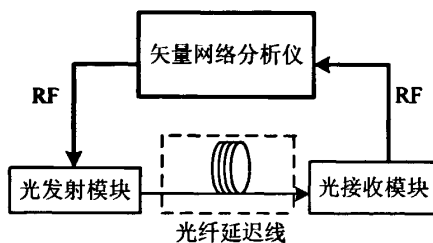


图 6-1 光纤延迟线测量平台

6.2 实验中用到的器材

除了上面一节提到的一些模块外, 实验中还需要其它的器件, 这节内容将列出实验中用到的所有的器材

➤ 矢量网络分析仪

实验中用到的最重要的器材为矢量网络分析仪, 因为它的带宽直接影响到测量的精度, 这里用的是 Anritsu 公司频带宽度为 40GHz 矢量网络分析仪 37369。

➤ 光发射模块

光发射模块采用的是 HP 公司的 83403A, 带宽为 300KHz~3GHz, 波长为 1550nm, 它将光源和调制器集成到一起。

➤ 光接收模块

光接收模块采用的是 HP 公司的 83410C, 带宽为 300KHz~3GHz。

➤ 光开关

光开关选择体积小、速度快的磁光开关, 速度 $<20\mu\text{s}$ 。

➤ 光纤切割刀和光纤熔接机

选用日本古河公司的 S177 熔接机和切割刀, 切割精细且熔接损耗小。

➤ 外接延时光纤, 跳线和法兰盘

延时光纤采用康宁公司的 SMF-28e, 它是 G652 单模光纤, 在 1550nm 处的折射率为 1.4682, 光纤跳线的光纤也是 SMF-28e, 它的接口和对应的法兰盘为 PC/APC 型。

➤ 手持光源和光功率计

用德国的 W&S 公司的手持光源和光功率计来测量模块的损耗, 精度可达 0.02dB

测量的仪器如下图 6-2 所示:

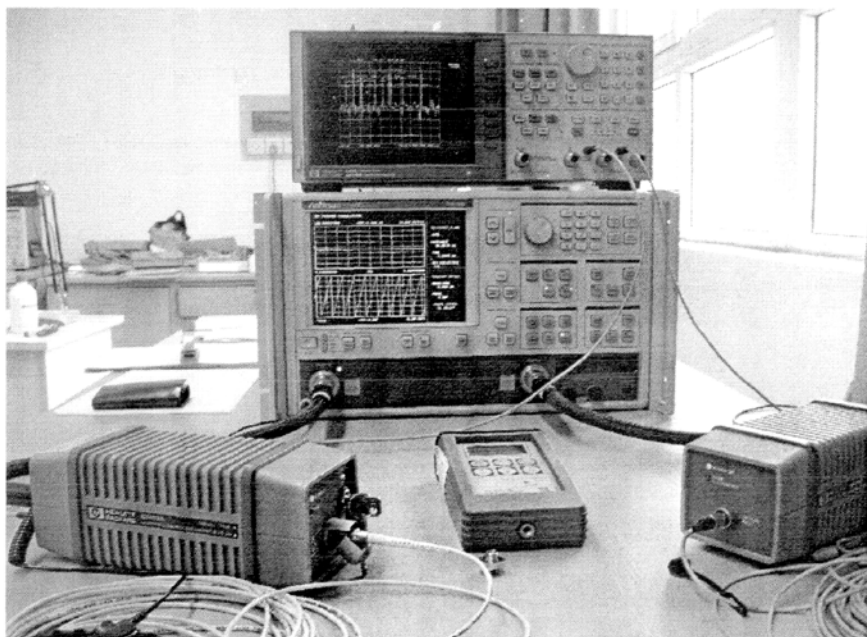


图 6-2 测量光纤延迟线的仪器实物

6.3 实验过程

► 选择拓扑结构

如图 6-3 所示选用 6 个 2×2 的光开关构成 5BIT 的光纤延迟线, 可以获得 32 个离散的延迟量。每组光纤长度都以下层为基准, 上层的光纤比它长 ΔL , 通过选取 ΔL 的长度要使得它们的延时量 $\Delta \tau$ 分别满足 ΔT , $2\Delta T$, $4\Delta T$, $8\Delta T$, $16\Delta T$ 。它的拓扑结构采用上面内容中经过优化后的结构为“110101”, 光载波信号从第一个光开关的 $1a$ 端口进, 第 6 个光开关的 $1i$ 输出端口出, 其中第一个和最后一个进出两端口的光开关的尾纤都用光纤跳线将它们熔接起来, 以方便测量时与光收发模块相连。

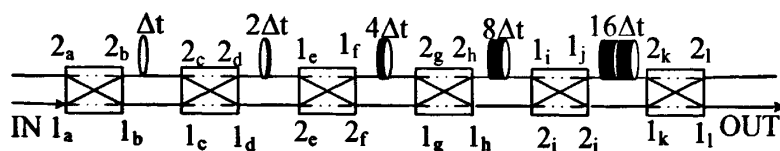


图 6-3 5BIT 光纤延迟线用的拓扑结构

► 计算各段延时光纤的长度

设计各段的延时 ΔT 、 $2\Delta T$ 、 $4\Delta T$ 、 $8\Delta T$ 、 $16\Delta T$ 为 100ps、200ps、400ps、800ps 和 1600ps。

$$\Delta L = \Delta \tau \frac{C}{n} \quad (6-1)$$

C 为光速, n 为光纤的折射率, 这里选用的康宁公司的 G652 单模光纤, 它在 1550 处的折射率为 1.4682, 根据公式(6-1)可得到对应延时光纤的长度分别为 20.43mm, 40.87mm, 81.73mm, 163.47mm, 326.88mm。

► 测量

使用频域法测量光纤延迟线时, 需要有个基准的相位, 因为系统固有延迟的缘故, 即延迟时间里面包括了光信号经过光收发模块的时间, 所以我们在测量时需要将这段时间给忽略, 以更好的获得光纤延迟线确切的延时, 我们可以用两根光纤跳线和法兰盘连接收发模块, 以此为基准做一个归一化, 此时矢量网络分析仪中信号的相位为零, 当在其中插入光开关和延时光纤后, 相位会发生变化,

根据相位与延时的关系可以得到延迟时间。

► 切割光纤

上路光纤需要比下路光纤长，所以我们先光开关尾纤先切割好，分别测量出此时上下支路的延迟时间，然后再计算出需要在上支路加上多长的延迟光纤，用工装夹具切割出需要长度的光纤后进行熔接。

由于各个光开关的损耗并不完全相同，再加上各个熔接点的损耗也不相同，所以 5BIT 光纤延迟线的 32 种状态的损耗也不相同，但是在延迟线具体的应用中，对于 5BIT 光纤延迟线的损耗一致性有一定的要求，即要求通道内的 32 态的损耗差异不超过 1dB，所以在熔接过程中对于那些损耗很大的熔接点要舍弃重新熔接，这在一定程度上增加了风险并且降低了成功率。对于损耗的测量我们用手持光源和光功率计，测量精度为 0.02dB。

► 盘纤和一体化结构

为了尽可能的减小模块的体积，我们最后用到的光开关都是定制尾部没有塑料保护的裸纤，在盘纤过程中，要尽量使光纤的弯曲半径大，避免引入额外的损耗值，并且利用托架将光开关、延时光纤以及热缩套管固定到一起，尽可能减少光纤延时模块的体积，完成其一体化结构。

6.4 结果的分析与讨论

按照上面的做法，依次完成六只光开关的熔接，完成了 5BIT 光纤延迟线的研制，并对其 32 种状态的延时，损耗，以及在 0℃，10℃，20℃，30℃，40℃ 五个不同温度下，进行损耗的一致性测试研究，实验测量结果如下所示：

表 6-1 5BIT 光纤延迟模块 32 种延时状态数据

序列	光开关状态	理论延时 (ps)	实测延时 (ps)	误差 (ps)	理论步长 (ps)	实测步长 (ps)
0	100001	0	0	0	0	0
1	010001	100	100.05	0.05	100	100.05
2	111001	200	200.35	0.35	100	100.3

电子科技大学硕士学位论文

3	001001	300	299.15	-0.85	100	98.8
4	101101	400	400.02	0.02	100	100.87
5	011101	500	502.10	2.10	100	102.08
6	110101	600	601.25	1.25	100	99.15
7	000101	700	700.46	0.46	100	99.21
8	100111	800	800.23	0.23	100	99.77
9	010111	900	899.35	-0.65	100	99.12
10	111111	1000	999.36	-0.64	100	100.01
11	001111	1100	1098.70	-1.30	100	99.34
12	101011	1200	1201.90	1.90	100	103.2
13	011011	1300	1301.80	1.80	100	99.9
14	110011	1400	1399.40	-0.60	100	97.6
15	000011	1500	1499.79	-0.21	100	100.39
16	100010	1600	1600.34	0.34	100	100.55
17	010010	1700	1700.50	0.50	100	100.16
18	111010	1800	1801.30	1.30	100	100.8
19	001010	1900	1899.20	-0.80	100	97.7
20	101110	2000	2001.60	1.60	100	102.6
21	011110	2100	2102.20	2.20	100	100.6
22	110110	2200	2202.98	2.98	100	100.78
23	000110	2300	2301.03	1.03	100	98.05
24	100100	2400	2400.65	0.65	100	99.62
25	010100	2500	2499.53	-0.47	100	98.88

第六章 高精度光纤延迟线的实验研究

26	111100	2600	2600.69	0.69	100	101.16
27	001100	2700	2700.25	0.25	100	99.56
28	101000	2800	2801.54	1.54	100	101.29
29	011000	2900	2900.86	0.86	100	99.32
30	110000	3000	2999.69	-0.31	100	98.83
31	000000	3100	3100.21	0.21	100	100.52

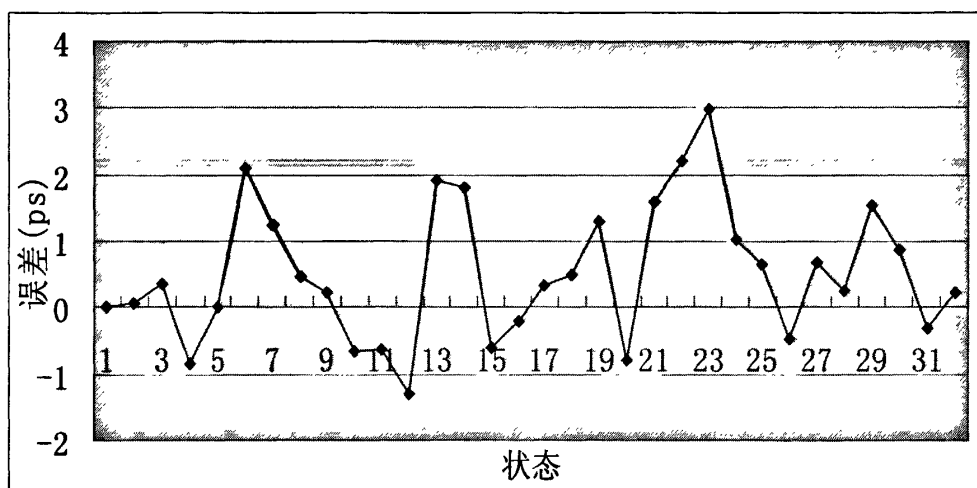


图 6-4 5BIT 光纤延迟线的 32 种状态延迟的误差值

表 6-1 的数据测量得到的 32 种状态延迟精度,下面的 3 个表中光开关的控制状态分别用“0”和“1”表示,“0”表示光开关处于直通态,而“1”则表示光开关是交叉态。五段基准延时光纤的误差分别为 0.05 ps, 0.35 ps, 0.02 ps, 0.23 ps 和 0.34 ps, 32 种状态中最大的正误差为 2.98ps, 最大的负误差为-1.3ps, 32 种状态的平均误差为 0.51ps。最大的误差出现在第 22 个状态,即为 22τ 的延时误差为 2.98ps, 表中的数据都是和状态“0”作比较后得到的相对延时,而光纤延迟线的绝对延时则可以通过调整第一个和最后一个光开关尾纤的长度来得到,光纤延迟线误差主要来自于切割精度,测量误差以及光开关状态误差。图 6-4 表示的是 32 种状态的误差曲线图。

表 6-1 5BIT 光纤延迟模块 32 种损耗状态数据

序列	光开关状态	输入光功率 (dBm)	测量光功率 (dBm)	损耗 (dB)	损耗起伏 (dB)
0	100001	-11.76	-16.52	4.76	0
1	010001	-11.76	-16.43	4.67	0.09
2	111001	-11.76	-16.45	4.69	-0.02
3	001001	-11.76	-16.57	4.81	-0.12
4	101101	-11.76	-16.67	4.91	-0.10
5	011101	-11.76	-16.54	4.78	0.13
6	110101	-11.76	-16.51	4.75	0.03
7	000101	-11.76	-16.63	4.87	-0.12
8	100111	-11.76	-16.38	4.62	0.25
9	010111	-11.76	-16.41	4.65	-0.03
10	111111	-11.76	-16.28	4.52	0.13
11	001111	-11.76	-16.53	4.77	-0.25
12	101011	-11.76	-16.32	4.56	0.21
13	011011	-11.76	-16.62	4.86	-0.30
14	110011	-11.76	-16.64	4.88	-0.02
15	000011	-11.76	-16.48	4.72	0.16
16	100010	-11.76	-16.37	4.61	0.11
17	010010	-11.76	-16.59	4.83	-0.22
18	111010	-11.76	-16.52	4.76	0.07
19	001010	-11.76	-16.58	4.82	-0.06

第六章 高精度光纤延迟线的实验研究

20	101110	-11.76	-16.67	4.91	-0.09
21	011110	-11.76	-16.59	4.83	0.08
22	110110	-11.76	-16.48	4.72	0.11
23	000110	-11.76	-16.57	4.81	-0.09
24	100100	-11.76	-16.52	4.76	0.05
25	010100	-11.76	-16.55	4.79	-0.03
26	111100	-11.76	-16.41	4.65	0.14
27	001100	-11.76	-16.19	4.43	0.22
28	101000	-11.76	-16.63	4.87	-0.44
29	011000	-11.76	-16.74	4.98	-0.11
30	110000	-11.76	-16.57	4.81	0.17
31	000000	-11.76	-16.52	4.76	0.05

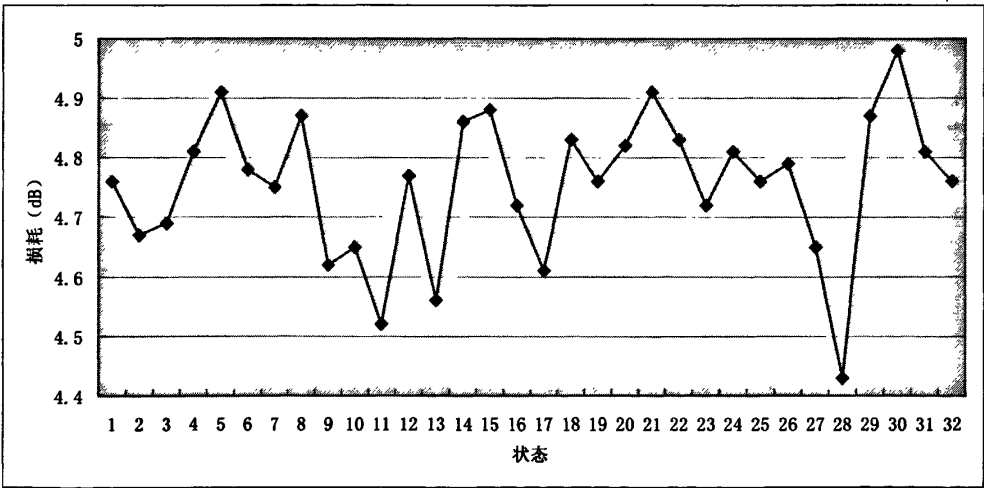


图 6-5 光纤延迟线的 32 种状态损耗值

表 6-2 表示的是入射光功率在-11.76dBm 时，光纤延迟模块的 32 种状态的损耗值，通过计算可知，32 种状态中损耗最大值为 4.98dB，最小值为 4.43dB，32 种状态的损耗一致性<0.55dB，损耗差异主要是由光开关之间的损耗差异、光纤熔接点的损耗以及盘纤的损耗的差异造成的。

表 6-3 5BIT 光纤延迟模块在不同温度下的损耗

测试条件：输入功率=-11.76 (dBm)		损耗值（dB）				
序列	光开关状态	工作温度				
		0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
0	100001	5.14	5.19	4.95	4.90	4.93
1	010001	4.95	5.05	4.95	4.90	4.96
2	111001	4.91	4.97	4.80	4.77	4.90
3	001001	4.89	4.98	4.85	4.79	4.88
4	101101	5.24	5.32	5.16	5.15	5.18
5	011101	5.20	5.26	5.08	5.03	5.06
6	110101	5.11	5.18	5.07	5.10	5.23
7	000101	5.04	5.07	4.87	4.84	4.91
8	100111	4.99	5.05	4.83	4.76	4.79
9	010111	4.95	5.02	4.82	4.70	4.74
10	111111	4.94	4.97	4.76	4.66	4.77
11	001111	4.75	4.82	4.69	4.56	4.66
12	101011	5.05	5.14	4.95	4.91	4.96
13	011011	5.05	5.12	4.91	4.83	4.89
14	110011	4.97	5.02	4.87	4.85	5.00
15	000011	4.85	4.85	4.69	4.66	4.76
16	100010	5.25	5.25	5.15	5.15	5.16
17	010010	5.19	5.21	5.10	5.07	5.14

第六章 高精度光纤延迟线的实验研究

18	111010	5.20	5.17	5.08	5.05	5.20
19	001010	5.03	5.03	4.96	4.93	5.00
20	101110	5.33	5.35	5.22	5.23	5.25
21	011110	5.25	5.30	5.17	5.17	5.21
22	110110	5.21	5.30	5.13	5.18	5.30
23	000110	5.13	5.13	5.04	5.08	5.19
24	100100	5.15	5.17	5.09	5.07	5.22
25	010100	5.12	5.14	5.03	4.95	5.05
26	111100	5.14	5.11	5.03	4.98	5.13
27	001100	4.93	4.94	4.87	4.80	4.87
28	101000	5.21	5.24	5.14	5.13	5.20
29	011000	5.16	5.16	5.05	5.01	5.07
30	110000	5.09	5.08	5.06	5.08	5.25
31	000000	5.02	5.03	4.94	4.97	5.11

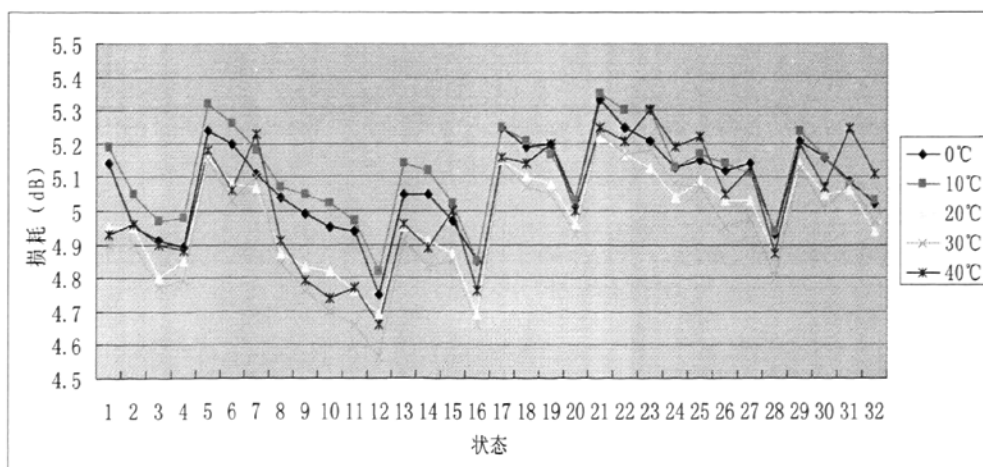


图 6-6 光纤延迟线在不同温度下的损耗

表 6-3 中数据是在 5 种不同的温度下, 测量得到的光纤延迟模块 32 种状态的损耗值。图 6-6 是相对应的损耗曲线图, 五条曲线别代表光纤延迟线在 0° 、 10° 、 20° 、 30° 和 40° 下损耗值, 从表中可以看到在同一状态的不同温度下, 损耗的最大差异为 0.32dB, 这主要和磁光开关的温度特性相关。

在这次的高精度、小体积, 高速的光纤延迟线延迟研制过程中, 发现还可以从下面几个方面继续提高延时精度。

- 由于体积和速度的要求选择了磁光开关, 如果使用没有状态差的光开关, 延时精度会得到很大提高。
- 由于使用的光收发模块只有 3GHz, 而且光源的线宽比较大, 所以对测量精度会有一定的影响。
- 在测量光纤延迟模块的绝对长度时, 发现光纤绝对长度越长, 测量的精度会相应的降低, 所以以后在制作多个模块, 并且保证模块间的绝对长度一致时, 需要尽可能使得光纤尾纤长度短。
- 使用进一步提高光纤切割精度的工具, 能够有效减少研制的工作量和精度。

6.5 本章小结

基于上面几章内容的理论分析, 用磁光开关和单模光纤研制了 5BIT 光纤延迟线, 该延迟线使用经过优化后的差分拓扑结构使得光开关状态差带来的影响最小, 在制作过程中, 使用自动熔接加监测的方法进行光纤熔接, 使用矢量分析仪测量延时精度, 经测量 32 态的最大误差仅为 2.98ps, 损耗的一致性优于 0.55dB, 测量了不同温度下光纤延迟模块的损耗值, 结果表面, 在同一状态下不同温度间的损耗值的最大差异为 0.32dB, 这主要的和器件的温度特性相关, 实验结果表明研制的 5BIT 的高精度光纤延迟模块达到国内领先水平。

第七章 结论

本文基于光开关和单模光纤构成光纤延迟线的结构，需要完成一个 5BIT 光纤延迟线的研制，主要研究如何提高它的精度，减小它的体积和提高它的速度。在此结构中，光开关是关键器件，它的选取对于系统性能指标有着很大的影响，由于磁光开关具有体积小、速度快并且状态稳定的特点，所以我们就选取了磁光开关。

为了实现高精度 5BIT 光纤延迟线的研制，主要从三个方面进行研究。

在光纤延迟线结构的研究中，分析了 2×2 光开关处于“直通”和“交叉”两种状态时，共 4 个通道，如果光信号经过这 4 个通道的时间不同，就会对系统总体延时误差产生影响。又虽然旁路结构通过光纤补偿能够消除光开关状态差对精度的影响，但是这种结构的最小延迟时间太大，并且损耗的一致性不好，不能满足系统的要求。而差分结构能够提供小的延迟，而且损耗一致性较好，但是它无法克服光开关状态差所带来的影响。在 2BIT 光纤延迟线的研究中，发现不同的拓扑结构在理论上对于光开关状态差带来的影响不尽相同，并且和光开关的内部结构相关。基于上面的分析，通过 MATLAB 软件设计了能够得到一个受光开关状态差影响最小的拓扑结构的程序，此程序能够适用于任意结构的光开关和任意 BIT 的光纤延迟线。由于我们选用的磁光开关为短直通型，即光信号经过上路的直通态的时间比其它通道的时间要短，经过测量发现这个时间差为 0.9ps，将此值代入 MATLAB 程序中，经过优化能够得到最优的拓扑结构，在理论上将最大误差缩小了 3.6ps。

实现了磁光开关的高速驱动电路与控制电路，完成了 5BIT 光纤延迟线的电路的控制，实验证明磁光开关的切换速度优于 20 μ s。

在高精度测量方法上，对测量光纤的几种方法进行了比较，选择了精度较高，测量方便的矢量网络分析仪的频域法，但是由于实验器材的限制，收发模块的带宽只有 3GHz，并且光源的线宽比较宽，使得测量精度受到一定程度影响。

在高精度光纤连接技术的研究中，采用工装夹具来切割光纤，光纤熔接机来熔接光纤，从而有效的提高了光纤延迟线的精度。

在完成 5BIT 光纤延迟线的研制后,经测量在 32 种状态中最大的误差为 2.98ps,损耗差异为 0.55dB,在高精度、小体积和高速这三方面都满足了不仅课题的需要,而且对于提高我国在这方面的研究水平很有帮助。

随着光器件的发展,未来光纤延迟线的研究方向集中在连续型的光纤延迟线,这主要是基于其可以获得连续可调的扫描角度的优点,而波导延迟线由于其体积小的优势非常明显,如果能解决其损耗和延迟时间的问题,未来将会占据延迟线发展的主要方向,而两者的结合,即连续可调的光波导延迟线是将来发展的必然趋势。

致谢

本文是在导师邱琪教授的悉心指导和热情关怀下完成的。无论是在科研，学习和生活方面，邱老师都给我极大的指导，帮助和关心。邱老师严谨的治学态度，强烈的创新意识，深厚宽广的学术功底，执着的学术追求和正直坦荡的为人都是我树立了学习的榜样。在此论文完成之际，谨向邱老师表示衷心的感谢和崇高的敬意。

同时，要特别感谢史双瑾老师对我的各方面的指导，当我在科研过程中遇到问题时，他总是很耐心的和我一起讨论问题出现的原因，并鼓励我换个角度思考解决问题的方法，他勤奋严谨的科研态度值得我学习。

感谢研究室诸多同学的帮助，在学习和研究中大家集思广益，互相帮助，充分发挥了团队精神。

最后，感谢我的爸爸和妈妈在远方对我的关心和支持。

参考文献

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统. 北京: 国防工业出版社, 1994: 258-279
- [2] 殷连生. 光纤传输系统在雷达中的应用. 现代雷达, 1991: 89-95
- [3] 张明友. 光控相控阵雷达. 国防工业出版社. 2008: 62-65
- [4] Forrest J.R. Optical fiber networks for signal distribution in phased array radars. Proc.IEE Inter. Conf. 1982: 408-412.
- [5] Jalali B. Yegnanarayanan S. Optically controlled phased-array antenna using wavelenght-selective true time delay. Phased Array Systems and Technology, 2000 IEEE International Conference. 2000: 367-370
- [6] Steyskal H. Cox C. Ackerman E. Digital and optical beamforming techniques. Phased Array Systems and Technology, 2003. IEEE International Symposium. 2003, 616: 1411-1417
- [7] Merrill I. Skolnik. Radar Handbool. Boston:Mc-graw Hill, 1990,
- [8] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理(第三版). 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002
- [9] 王惠文等. 光纤传感技术与应用. 北京: 国防工业出版社, 2001:158-165.
- [10] Esman R.D, Monsma M.J, Dexter J.L. et al. Fiber-optic prism true time-delay antenna feed. IEEE Photonics Technology Letters, 1993:1347-1349
- [11] Popa A.E. Military and aerospace application of lightwave technology. 1998 IEEE MTT-S int'l Microwave Symposium. New York, 1988, Vol.2:893-896
- [12] Seeds A.J. Optical techniques in phased array. Phased Array Radar, IEE Tutorial Meeting, 1989: 1-18
- [13] W. Ng, A. A. Walston, G L.gonan, J. J. Lee, etal. The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay, IEEE J. Lightwave Technol., 9(1991), 1124-1131.
- [14] Jong-Dug Shin, Back-Song Lee, and Boo-Gyoun Kim. Optical True Time-Delay

- Feeder for X-Band Phased Array Antennas Composed of 2×2 Optical MEMS Switches and Fiber Delay Lines. IEEE Photon. Technol. Lett. 2004, 16(5):1364-1366.
- [15] Nicholas Madamopoulos. Semiconductor optical amplifier-based switched photonic delay lines for microwave photonic applications. Proc. of SPIE Vol. 6012 60120S-1: 388-391
- [16] S.O.Brattstrom, A C-band phased array antenna using digital beam forming in a surveillance radar system, IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Oct. 2003, 217-222.
- [17] Krzysztof M. Madziar. Modelling of the dispersion coefficient for the optical beamforming for phased array antennas Proc. of SPIE Vol. 6347, 2003:138-141.
- [18] Maggie Yihong Chen, Brie Howley 2-D Scalable Optical Controlled Phased-Array Antenna System Proc. of SPIE Vol. 6126: 254-257
- [19] 官伟. 光控相控阵天线系统. 硕士学位论文. 哈尔滨工程大学. 2005
- [20] 刘娟, 用于相控阵天线的光纤延迟系统的性能分析与设计实现, 硕士学位论文, 浙江大学, 2006
- [21] 金谋平, 官伟, 郭俊等. 一种宽带光控相控阵天线实验系统. 电子学报. 2006.(6):1127-1129
- [22] 汪松波. 快速程控光纤延迟线设计与工艺研究, 硕士学位论文, 上海交通大学, 2008
- [23] Sheehan PG, Forrest R J. The use of optical techniques for beamforming phased arrays. SPIE, 1984, 477:75-81.
- [24] Lee J.J, Robert Y Loo, Stan Livingston et al. Photonic wideband array antennas. IEEE Trans. 1995:966-981
- [25] Fu Z, Chen R T. Compact broadband 5-bit photonic true-time-delay module for phased-array antennas. Opt Lett. 1998, 23(7):522-526.
- [26] Tapio Niemi, Maria Uusimaa, and Hanne Ludvigsen. Limitations of phased-shift Method in Measuring Dense Group Delay Ripple of Fiber Bragg Gratings. IEEE

PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, NO12, DECEMBER 2001.VOL.
13.2003:78-83

- [27]Yongqiang Jiang, Brie Howley, Zhong Shi, etc. Dispersion-Enhanced Photonic Crystal Fiber Array for a True Time-Delay Structured X-Band Phased Array Antenna.IEEE Photon. Technol. Lett. 2005,17(1):187-189.
- [28]K.Nishizawa, H.Miyashita, T.Wakayama, T.Matsuda, H.Hashiguchi, and S.Fukao, A1.3 GHz active phased array antenna for wind profiling boundary layer radar, IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Oct, 2003,142-145.
- [29]P.K.Bondyopadhyay, New phased array antenna architecture for X-band radar, Antennas and Propagation Society International Symposium, 3(2002),360-363
- [30]Z.H.Zhang, X.F.Jiang, A novel phased array antenna of multiple object tracking radar, Antennas, Propagation and EM Theory, Aug, 2000, 435-438.
- [31]J.C.Eade, Wide band phased array antenna for radar applications, Twelfth International Conference on Antennas on Propagation, 2(2003),485-488
- [32]J.C.Eade, J.Whitehurst, Dual band phased array antenna design for radar application, Eleventh International Conference on Antennas and Propagation, 1(2001),77-81.
- [33]R.S.Tahim, J.Foshee, and K.Chang, Design of phased array antenna systems for multi-point communications, Aerospace Conference, 2(2003),947-953.
- [34]R.S.Tahim, J.Foshee, and K.Chang, Networking of multi-band phased array antennas for mobile communication, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2(2003),468-471.
- [35]G.H.Jin, Y.Zou, V.Fuilygin, et al., PLZT film waveguide Mach-Zehnder electrooptic modulator, J.Lightwave Technol., 18(2000), 807-815.
- [36]H.M.Yoo, M.Junho, S.Y.Choon, et al, Mach-Zehnder electro-optic modulator based on organic-silica sol-gel hybrid films, Electronics Letters, Volume 35, Sept. 1999, 1770-1771

- [37]Guoyang Xu, Jing Ma, Seng-Tiong Ho, T.J.Marks, Low-voltage electro-optic modulator structure using transparent conducting oxide with high conductivity-loss ratio as electrodes, Avionics Fiber-Optics and Photonics, September 2005, 77-78.
- [38]Rose,J.L, Soley,L.E, Ultrasonic guided waves for anomaly detection in aircraft components. Materials Evalution, 2000,1080-1086.
- [39]FrnazJ.H.aJniVK.光通信器件与系统 徐宏杰, 何裙, 蒋剑良等译 .北京:电子工业出版社, 2002:145-167
- [40]Xiaolong Wang, Brie Howley, Maggie Y, etc. Polymer Based Thermo-optic Switch for Optical True Time Delay. Proc. of SPIE Vol. 5728 .2005:60-67
- [41]Yihang Chen, Kevin Wu, Feng Zhao, etc. Loss Compensated Photonic True-time Delay for Phased-array Antenna. Antennas and Propagation Society Symposium,2004 IEEE.4324-4327.
- [42]Byung-Min Jung, Jong-Dug Shin Optical True Time-Delay forTwo-Dimensional XBand Phased Array Antennas IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 19, NO. 12, JUNE 15, 2007:346-349
- [43]李毅, 光纤控制相控阵雷达的设计与计算机仿真分析, 硕士学位论文, 北京理工大学, 2003
- [44]Gerd Keiser 著, 李玉权译, 光纤通信. 电子工业出版社, 2002: 317-319
- [45]黄章勇. 新型无源光器件. 北京: 北京邮电大学出版社. 2003:184-242
- [46]王刚, 明安杰, 梁静秋. 光开关研究进展. 微纳电子技术. 2005. (4): 195-199
- [47]邱昆. 光纤通信导论. 成都: 电子科技大学出版社, 1995:56-57
- [48]Rui Chen. Xiaoping Zbeng. Hanyi Zbang. The Error of Optical True Time Delay Network Caused by Optical Switches. Optical Transmission. and Subsystems II Proc of SPIE. 2005. 2625:519-527
- [49]王辉, 王平, 于宏. 光纤通信. 北京: 北京电子工业出版设. 2002:118-133.
- [50]Djafar K. Mynbaev, Lowell L. Scheiner 光纤通信技术, 徐工权, 段鲲, 廖光裕等译 北京: 机械工业出版社, 2008: 434-438.

在研期间发表论文

邱志成，史双瑾，邱琪. 高精度光纤延迟线的研究，光电工程. (已录用)