

·光电器件与材料·

多抽头宽带光纤延迟线的设计与分析

李希明, 黄鹏飞

(中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 提出一种具有实用价值的步进延迟可调的多抽头宽带光纤延迟线。首先简要介绍了光纤延迟线的优点、工作原理和基本结构, 分析了光纤延迟线的增益、带宽、动态范围和失真指标, 着重分析了多抽头宽带光纤延迟线的光纤分配网络的设计和实现。最后对设计的多抽头宽带光纤延迟线进行了测试, 给出了测试方法和测试结果, 并将它同国际、国内其他同类产品做了对比, 描述了它的应用前景和应用领域。

关键词: 宽带光纤延迟线; 光纤; 激光器; 多抽头

中图分类号: TN812; TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)01-0045-04

Multi-tapped Wideband Optical Fiber Delay Line

LI Xi-ming, HUANG Peng-fei

(The 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC), Guilin 541004, China)

Abstract: The multi-tapped wideband optical fiber delay line with the practical value and the adjustable step delay is introduced. Firstly, the advantage, working principle and basic structure of optical fiber delay line are introduced. Then the gain, bandwidth, dynamic range and distortion index of the optical fiber delay line are analyzed, and the design and implementation of the optical fiber distribution network are discussed. Finally, the multi-mapped wideband optical fiber delay line is tested, and the test method and result are given. The multi-mapped wideband optical fiber delay line is also compared with other international and domestic products and its application prospect and application field are described.

Key words: wideband optical fiber delay line; optical fiber; laser; multi-tap

延迟线作为一种重要的信号暂存设备, 广泛应用于信号处理、雷达和电子对抗等领域。最早投入使用的延迟线有声表面波(SAW)延迟线、电荷耦合器件(CCD)延迟线和同轴线延迟线等, 但随着信号的工作频率和带宽的拓宽, 系统对延迟线的损耗、时间带宽积($T \cdot B$)的要求越来越高, 上述的各种延迟线的性能, 已经逐渐不能满足系统的要求, 而由光纤和光电器件组成的光纤延迟线就可以很好地满足这些要求。

光纤的延迟损耗很低, 并且损耗跟频率无关, 这一点是其他延迟线无法做到的。单模光纤延迟线的单位延迟时间损耗小(大约为0.08 dB/ μ s), 时间带宽

积大(可达 10^8), 带宽很宽(可达100 GHz)等优点, 且动态范围大, 三阶交调信号小, 并且能封装进一个小型的屏蔽盒内, 占用空间很小, 对实现整个信号处理系统的小型化和机动性很有好处。

现阶段投入使用的光纤延迟线大多是窄带的, 只满足某个频带的需求, 如S波段光纤延迟线、K波段光纤延迟线等, 本光纤延迟线是作为一种宽带、通用性器件而研制的, 它可以覆盖从P波段到Ku波段的所有频段, 另外配上特殊定制的多抽头光纤, 可以提供给客户一个全频带的、步进的、延迟时间可控的通用模块。

收稿日期: 2012-02-10

作者简介: 李希明(1982-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为微波光纤通信、高速数据光纤传输。

1 光纤延迟线工作原理和结构

光在真空中的传播速度为 3×10^8 m/s, 光纤的纤芯折射率为 n_1 , 光纤的长度为 L , 光纤延迟时间 τ 为

$$\tau = n_1 L / c \quad (1)$$

当 $n_1 = 1.5$ 时, 光纤的延迟约为 $5 \mu\text{s}/\text{km}$ 。

由此可以得出, 改变光纤的长度可以调整信号延迟时间, 其最大信号延迟时间取决于光纤的衰减, 通常对于普通的 G.652 光纤, 最大延迟时间可以达到 $200 \sim 300 \mu\text{s}$ 。

光纤延迟线按照功能可以分解成: 光发射模块、光接收模块和光纤分配网络。其中光发射模块由 DFB 激光器、自动光功率控制 (APC)、自动温度控制电路 (ATC)、低噪声宽带放大电路、阻抗匹配电路和光隔离器构成; 光接收模块由光电探测器、低噪声宽带放大电路、阻抗匹配电路和滤波电路组成; 光纤分配网络由带抽头的光纤和光开关组成, 其原理框图如图 1 所示。

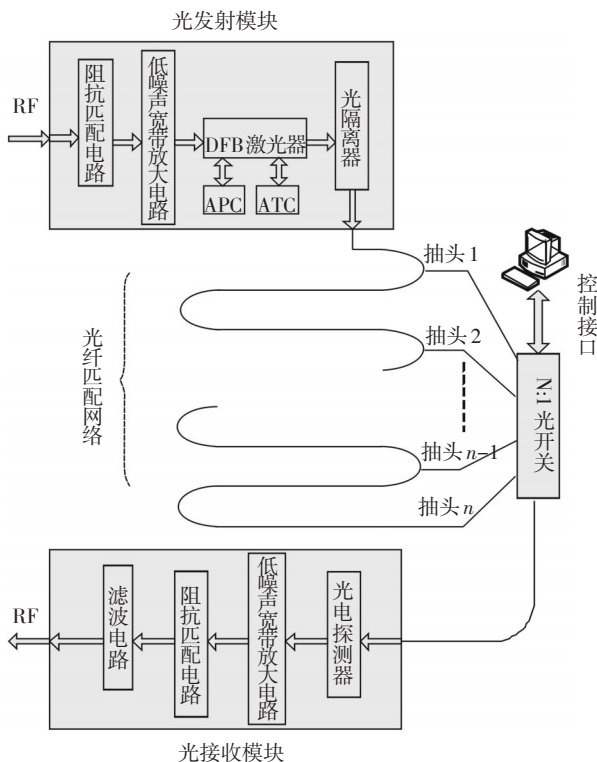


图 1 多抽头宽带光纤延迟线原理框图

在发射光端机, 光端机通过调制激光器的工作电流的方式将输入射频信号调制到光载波上, 输出光信号的强度随着输入信号电平的变化而变化。另外, 由于 DFB 激光器对温度变化比较敏感, 为了保证光信号功率的平稳输出, 必须在光发射模块中增加

自动光功率控制电路 (APC) 和自动温度控制电路 (ATC)。

激光器输出的调制光信号经过光隔离器进入光纤, 经过光纤分配网络的传输, 信号产生了延迟。通过对光开关的控制, 选择一路延迟后的光信号进入光接收机, 光电探测器将光信号转换成电信号, 经过放大、阻抗匹配和滤波电路后输出。输出射频信号的频谱与输入信号的频谱保持一致。

2 设计与分析

实用性是一个设计是否具有生命力的关键因素, 这也是多抽头宽带光纤延迟线在设计之初时最看重的指标, 所有预设的性能指标均以满足实用化为前提。光纤延迟线一般有如下指标: 带宽、电平损耗、最大输入电平、最大延迟时间、延时步进时间、步进位数、延时精度。其中, 带宽指标设定为 $100 \text{ MHz} \sim 18 \text{ GHz}$, 覆盖 P 波段到 Ku 波段, 基本满足现阶段的需求; 增益指标为 -8 dB , 根据使用环境的要求可以变动; 最大输入电平指标与激光器密切相关, 一般为 10 dBm ; 另外最大延迟时间、延时步进时间和步进位数决定于用户需求, 此处设定为最大延迟时间: 0.16 ms , 延时步进时间: $40 \mu\text{s}$, 步进位数: 4。

2.1 增益

光纤延迟线的损耗可以按照结构分为 3 个变量: 发射机效率、接收机效率和光路损耗

$$\eta = \eta_{TX} \eta_{RX} \eta_F \quad (2)$$

式中, η_{TX} 是在输入射频电流转换成光功率的模型中, 整个发射机的效率, 包括放大器和匹配网络; η_{RX} 是在调制光功率转换成射频输出电流的模型中, 整个接收机的效率; η_F 是光路损耗。

根据实践, DFB 激光器和光电探测器造成的电平损耗大约为 39 dB , 为了补偿这个损耗, 必须在激光器前面或探测器后面加上放大器。在设计时需要考虑放大器的位置分布, 因为放大器的位置会极大地影响链路的噪声指标和失真指标。

光纤分配网络的损耗包括光纤损耗、各个光接头的损耗、各个抽头的分光损耗、光开关的插入损耗等。这些参数可以使用仪器直接测量, 得到光路损耗参数 η_F 。利用电路和光路的损耗参数可以得到整个链路的损耗。

2.2 带宽

光纤延迟线的传输带宽受到激光器带宽、放大电路带宽、阻抗匹配电路带宽、光接收电路带宽和光纤散射的限制。阻抗匹配电路、光接收电路和光纤散射都具有足够的带宽余量,对带宽指标的影响不大。相对而言,低噪声放大电路和激光器的带宽指标基本上决定了整个光纤延迟线的带宽指标。

在本设计中,光发射机的激光器选择ORTEL公司的1541C,光接收机的探测器选用ORTEL公司的2516B,他们的带宽均在18 GHz以上,满足设计要求。低噪声放大电路选择宽带放大电路,为了获得最佳的频率响应曲线,针对激光器和低噪声放大电路的频率响应曲线设计一个频响补偿电路是十分必要的,降低低频信号的响应度,提高高频信号的响应度,尽量使得频率响应曲线做到最平坦。

2.3 动态范围和失真

底部噪声电平决定了链路的最小可检测射频信号,激光器和放大器的非线性特性限制了可传输的最大射频信号。最大信号和最小信号之差就是系统的动态范围指标,一般来说,这个指标是以dB为计量单位的。当链路传输一个单音信号时,这时对其他信号的干扰很小,可以用1 dB压缩点来描述最大输入信号幅度。当链路传输很多个信号时,这时候使用三阶截止点来计算无失真最大输入信号。

2.4 光纤网络设计

光纤分配网络主要由带抽头的光纤和N:1光开关组成,光信号经过不同抽头输入到光开关中,通过外部控制,选择输出某个光信号。

光纤方面采用长飞公司生产的G.652光纤,它是标准单模光纤,可以通过熔接,制作成一根带多个抽头的光纤。

光开关采用中国电科34所生产的FSW1×N-SM/MM型单模光开关,它既可以通过手动按钮控制输出,又可以通过RS232接口遥控输出,实现一体化、自动化控制。它的主要指标为:波长850、1310、1550 nm,插入损耗≤0.5 dB,重复性≤±0.75 dB,寿命≥10⁷次,回波损耗≥50 dB(单模)≥25 dB多模,串音≤-70 dB,切换时间≤10 ms。

光纤网络的设计关系到信号延迟时间、延迟步进时间、步进延时精度等至关重要的参数,步进延时

精度由光纤熔接的工艺精度决定,经实践,在最优情况下,光纤熔接的精度约为1 mm,光纤延迟线的步进延时精度约为5 ps。由于光纤延迟线的精度的一致性很好,在定型后,可以为每个抽头配备相对固定的调相器来调整精度,精度可达皮秒级。

多抽头光纤延迟线,设定步进位数为 m ;进入光纤分配网络的光功率为 P ,单位为dBm;假定所有抽头的间距相等为 L ,可设定抽头之间的光纤衰减为 a ,单位为dB;各个抽头的分光比为1: n ,从图1可以得出,抽头1的分光比为 n_1 ,抽头2的分光比为 n_2 ,...,抽头 n 的光功率直接输出,不需分光。为保证从光接收机输出的电信号电平一致,必须保证从光纤网络输入到光接收机的光信号的功率一致,考虑到光纤网络各个组件的性质,只要保证每个抽头的输出光功率一致就可以了,那么现在可以得到以下公式。

各个抽头的输出光功率为

$$P_1 = P - a + 10 \lg \frac{1}{n_1 + 1} \quad (3)$$

$$P_2 = P - a + 10 \lg \frac{n_1}{n_1 + 1} - a + 10 \lg \frac{1}{n_2 + 1} \quad (4)$$

...

$$P_{m-1} = P - (m-1)a + 10 \lg \left(\frac{\frac{n_1}{n_1 + 1} \times \frac{n_2}{n_2 + 1} \times \dots \times \frac{n_{m-2}}{n_{m-2} + 1}}{\frac{1}{n_{m-1} + 1}} \right) + \quad (5)$$

$$10 \lg \frac{1}{n_{m-1} + 1}$$

$$P_m = P - ma + 10 \lg \left(\frac{n_1}{n_1 + 1} \times \frac{n_2}{n_2 + 1} \times \dots \times \frac{n_{m-1}}{n_{m-1} + 1} \right) \quad (6)$$

$$P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_m \quad (7)$$

光纤延迟线一般会要求如下指标:工作频率、最大延时时间、步进时延、时延精度等指标,根据这些指标,下列参数可以确定。

根据最大延时时间除以时延步进就可以得到抽头数量 m ;由时延步进指标就可以得到光纤延迟线的步进长度 L ,再乘上单位长度的光纤衰减,G.652光纤在1550 nm处的单位光衰减为0.25 dB/km,可以得到抽头间光纤衰减 a 的具体值;在代入需要的抽头数目 m ,就可以通过式(3)~式(7)计算出每个抽头的分光比及光纤总衰减等指标。据此制作就可以获得所需的光纤分布网络。

假设现在需要一个光纤延迟线,要求最大延时时间为0.16 ms,步进时延为40 μ s。这样的话,经过初步计算,它的时延网络的抽头数目为4,光纤的步进长度为40 μ s/5(μ s/km)=8(km),抽头间光纤衰减 $\alpha=8 \times 0.25=2$ dB,将这些参数代入上述公式,可以得到结果

$$n_1 = 10^{\frac{\alpha}{10}} \left[10^{\frac{\alpha}{10}} \left(10^{\frac{\alpha}{10}} + 1 \right) + 1 \right] \approx 8.079,$$

$$n_2 = 10^{\frac{\alpha}{10}} \left(10^{\frac{\alpha}{10}} + 1 \right) \approx 4.079,$$

$$n_3 = 10^{\frac{\alpha}{10}} \approx 1.585 \quad (8)$$

所以,抽头1的分光比为1:8.079,抽头2的分光比为1:4.097,抽头3的分光比为1:1.585。

根据计算所得结果,可以十分精确地控制各个抽头的分光比,生产出符合要求的光纤网络。

2.5 设计总述

综合考虑上述指标,在电路设计中最具难度的是带宽指标,为了达到18 GHz这个指标,除了选择合适的器件外,还必须采用各种补偿电路,补偿系统整个链路的频率响应平坦度、增益、平坦度等指标。另外须设计好各个模块间的阻抗匹配电路,在满足其他指标的前提下尽量减少它对系统噪声性能的影响。光纤分配网络的设计难点在于各个延时信号的输出信号幅度的一致性和延时精度的保证。

3 试验验证

将设备连接,使用光功率计测量光发射机的输出光功率为9.3 dBm,光纤分配网络的每个抽头输出的光信号损耗约为11.6 dBm,实际测试结果见表1(注:选择不同抽头输出,输出光功率略有不同)。从图表可以看出,各个延时信号的输出幅度基本保持一致,在信号处理端不需要额外进行信号电平的调整,杜绝了信号在电平调整过程中带来的延时时间误差。

表1 不同抽头输出的光功率

抽头	1	2	3	4
输出光功率/(dBm)	-2.2	-2.3	-2.3	-2.4

延时时间测量现在一般采用脉冲信号发生器和

高速示波器来测试,将射频信号发生器输出的射频信号通过分路器一分为二,一路输入光纤延迟线,另外一路输入高速示波器通道1,将光纤延迟线输出的信号送入高速示波器的通道2,通过测量示波器屏幕上2个信号的时间差就可得到信号延时时间的指标。

这里采用安捷伦公司的81130脉冲信号发生器和力科公司的SDA18000高速示波器测试出各个抽头的延时时间,经测量,各个抽头的延时为40、80、120、160 μ s,步进延时精度在100 ps左右。

延迟线的带宽指标可以用矢量网络分析仪直接测量(例如:安立公司的37369D型),得到带内平坦度指标,具体见图2所示。

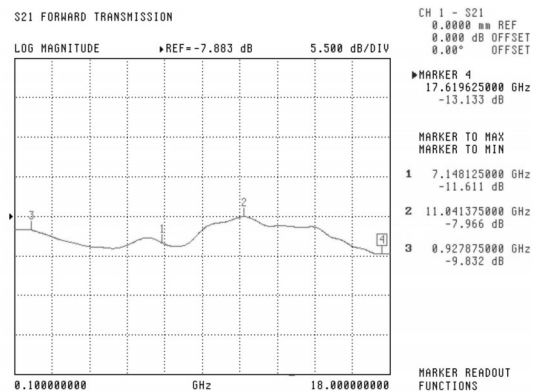


图2 延迟线的带内平坦度测试

最终测试的系统带宽为100 MHz~18 GHz,输入1 dB压缩点典型值为13 dBm,最大延时时间为0.16 ms,步进延时为40 μ s,步进延时精度为100 ps,切换时间 ≤ 10 ms。由于延迟线的延时精度是由光纤的熔接工艺决定,在更高要求下,延时精度可以做到5 ps左右。

4 结束语

现在国内和国际上投入实用的光纤延迟线一般为固定延时产品,步进延时和延时精度可调产品大多停留在实验室内,可靠性不高并且成本很高,极少用在工程施工中。本设计可以在线控制输出多个延时信号,并且它每个延时信号的输出电平基本一致,在信号处理端不需要额外进行信号电平的调整,杜绝了信号在电平调整过程中带来的延时时间误差。多抽头宽带光纤延迟线可以通过更改光端机工作带

(下转第75页)

参考文献

- [1] 马丁,王远达,卢永吉.从航空武器装备维修体制变化看ATE的发展趋势[J].航空科学技术,2008(5):11-13.
- [2] 王哲,吕洁光,周伟超.基于决策树控制的自动测试平台软件的设计和开发[J].宇航计测技术,2009(5):62-66.
- [3] 程勤.ATE综合校准系统的软件设计及实现[J].计测技术,2011,30(2):45-48.
- [4] 高远征,万晓冬,杨春英.机载ATE总体技术指标确定方法的研究[J].计算机测量与控制,2008(3):304-305.
- [5] 张秋菊,刘珍阳.航空电子自动测试设备的开发与实现[J].光电技术应用,2006,21(6):45-49.
- [6] 刘浩,朱小平.ATLAS语言在自动测试设备ATE中的应用实践[J].计算机测量与控制,2005(2):118-119.
- [7] ANSI/IEEE STD-716.C/ATLAS Test Language[S].1995.
- [8] IEEE STD-76-95 Common/Abbreviated Test Language for All Systems, 1995-03.
- [9] PAWS CEM Programmers's Reference.
- [10] 林志文,何巨模,刘松风.基于ATLAS编程和IVI驱动的测试程序开发运行平台[J].测控技术,2005(3):56-58.

(上接第48页)

宽和光纤分配网络的参数的方式,很方便地应用于各种信号处理领域,它的最大延时时间可达几百微秒,延时精度可达皮秒级。并且整个链路集成为一个组件,可以方便地嵌入到雷达测试、信号处理、及仿真、光纤传感、光学测量、相位噪声测量等系统中,组合成自动化测试、信息处理系统。

参考文献

- [1] 解安国,薛余网,郭建文.微波光纤延迟线技术研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2002(4):1-5.
- [2] 邱绍峰,范戈.光纤延迟线在雷达信号处理中的应用[J].光学技术,2003,29(4):429-431.
- [3] 张治中,雒江涛,曾庆济,等.波长转换器和光纤延迟线在WDM光分组交换中的结构设计和性能研究[J].光子学报,2004,33(12):1465.
- [4] Merrill L Skolnik.雷达系统导论[M].3版.左群生,等.北京:电子工业出版社,2006.
- [5] 金谋平,官伟,郭俊,等.一种宽带光控相控阵天线实验系统[J].电子学报,2006,34(6):1127-1129.
- [6] 李正,孙雨南.应用在相控阵雷达上的光学实时延迟线[J].光学技术,2006,32(3):381-385.
- [7] 马玉培.超宽带微波光纤延迟线[J].半导体技术,2007,32(2):129-132.
- [8] 杜书,陈福深.连续可调光延迟线技术研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2007(1):39-43.
- [9] 吴重庆.光通信导论[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [10] 汪松波,李新碗,陈建平.高精度快速可控光纤真延迟线实验研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2008(2):24-26.
- [11] 刘焕淋,庞俊宇.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.
- [12] 张春熹,张晓青,胡姝玲.光纤延迟线应用研究动态[J].中国激光,2009,36(9):2234-2244.
- [13] 吴重庆.光纤延迟线型全光缓存器的研究[J].光学学报,2011,31(9):0900116.

版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,并加入中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。