

文章编号: 0258-7025(2009)09-2234-11

光纤延迟线应用研究动态

张春熹 张晓青* 胡姝玲

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 对目前正成为研究热点的光纤延迟线(FDL)进行了原理和结构特点的分析,总结了光纤延迟线的分类,对光纤延迟线的 3 个重要应用领域作了详细的跟踪研究。在光纤传感与光学测量领域,分析了激光器线宽测试系统、晶体双折射参数测量系统、光相干层析成像(OCT)测量系统及光相关光谱术(OCS)测量系统,指出了光纤延迟线在这些系统中的主要作用及参数设置;在光纤通信领域,从原理和系统结构上重点分析了高速脉冲串发生器、光缓存器及光编/解码器,指出了目前存在的问题;在微波光子学领域,详细分析了多频光振荡器、微波光纤延迟线、光 A/D 转换器及光信号相关处理器。指出了关于光纤延迟线技术的最新研究方向主要是提高延时精度、实现连续可调、减小插入损耗和提高工程可靠性。解决 these 问题是光纤延迟线实用化的关键所在。

关键词 光纤器件;光纤延迟线;光纤传感器;光缓存器;微波信号光处理

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093609.2234

Development of Application Research on Fiber Delay Lines

Zhang Chunxi Zhang Xiaoqing Hu Shuling

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract The principle and configuration characteristics of fiber delay lines (FDL) are analyzed, which are becoming research hotspots. Categories of fiber delay lines are concluded and three important application fields of fiber delay lines are tailed after particularly. At first, in fiber sensing and optical measurement field, the paper analyzes laser line-width measurement system, crystalloid birefringence measurement system, optical coherence tomography (OCT) measurement system and optical correlation spectroscopy (OCS) measurement system. The primary function and parameter setting of fiber delay lines in these systems are pointed out. Secondly, it analyzes the principles and system configurations of high-speed pulse code generator, hybrid optical buffer and optical encoder / decoder in optical communication field, including some essential problems. Thirdly, in detail, it analyzes multi-tone photonic oscillator, microwave fiber delay line, optical A/D converter and optical signal correlation processor in microwave photonics field. At last the paper proposes that the research directions of fiber delay lines are improving delay time precision, realizing delay time regulation continuously, reducing insert loss and improving engineering reliability. Overcoming these problems is the key for wide application of fiber delay lines.

Key words optical fiber devices; fiber delay line; fiber sensor; optical buffer; optical processing of microwave signals

1 引 言

自从光纤技术发明以来,各种光纤器件的研究和应用层出不穷。作为新型信号处理器件的光纤延迟线(FDL)已经从最初简单的一段光纤,发展到现阶段

具有多种复杂结构的独立器件,成为光信息处理技术中的关键器件之一,具有多种信号处理功能,如在光纤传感与光学测量系统中参与实现测量信号的采集与传输、在光纤通信系统中实现信号的编码与缓存、

收稿日期: 2009-01-09; 收到修改稿日期: 2009-03-24

基金项目: 航空科学基金(2007ZC51043)资助项目。

作者简介: 张春熹(1965—), 男,教授,博士后,博士生导师,主要研究方向为光纤陀螺及其导航系统、光电检测与信号处理、光波导与集成光学技术。E-mail: zchunxi@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: zxqbim@163.com

在光控相控阵天线系统中实现微波信号的精确相位分配与控制、雷达回波信号的相关除噪等。相比传统的延迟线(如电缆延迟线、石英延迟线等),光纤延迟线具有工作频率高、带宽大、损耗低、结构简单、易实现多位延迟、抗电磁干扰能力强、保密性好、重量轻及性价比高等特点,应用前景广阔。

2 光纤延迟线的原理与结构特点

光纤延迟线的工作原理很简单:如果不考虑色散,当光脉冲信号在光纤中以群速度 v_g 传播时,脉冲时间延迟的长短 Δt 正比于光纤的长度 L ,即

$$\Delta t = \frac{L}{v_g} = \frac{Ln_g}{c}, \quad (1)$$

式中 n_g 为光纤的群折射率, c 为光在真空中的传播速度。只要改变光纤的长度,就能实现不同的延迟时间。

光纤延迟线的精度主要由光纤切割精度来决定,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 $0.8 \sim 1.0$ mm,延时精度一般在 $1 \sim 10$ ps 之间。

由于光纤延迟线的重要作用,许多文献中都明确提出了“光纤延迟线”这样的器件名称,根据应用领域和应用系统的不同,它们具有多种不同的结构^[1~3]。如果从结构上对光纤延迟线进行分类,可概括为两大类:1)简单固定延时光纤延迟线,包括:单光纤型、环形耦合型、抽头型及光纤布拉格光栅(FBG)型等;2)复杂可编程延时光纤延迟线阵列,包括:前向型(又分为并联和串联两种形式)、反馈型及混合型。复杂可编程延时光纤延迟线阵列是建立在以简单固定延时光纤延迟线作为基本延时单元的基础上的。

光纤延迟线最基本的应用是作为延时单元,根据不同应用系统的需求可在基本延时单元的基础上组成不同结构形式的光纤延迟线器件,从而实现多种不同的具体功能。这些应用主要有:传光型光纤传感器、光编/解码器、光缓存器、光相关器、光 A/D 转换器以及光滤波器等。从目前的研究热点来看,光纤延迟线最活跃的应用研究主要集中在光纤传感与光学测量、光纤通信、微波光子学等领域。其中,在微波方面的应用于 1976 年首次由 Kalman Wilner 等^[4]提出,在光纤通信方面的应用于 1978 年首次由 Marom E.^[5]提出,在线宽测量方面的延时外差法应用是在 1980 年由 Okoshi T. 等^[6]提出。

应用在光纤传感与光学测量领域的光纤延迟线

主要作用是实现光程的匹配,构成传光型光纤传感器,如果采用精确控制的光纤延迟线阵列,则可以通过切换实现变量程测量。应用在光纤通信领域尤其是各种复用技术和光分组交换网中的光纤延迟线目前也是研究重点,例如用光纤延迟线组成光缓存器和光编/解码器等。光纤通信中光波往往是作为载波使用,因此在光信号传输之前需要将用户信息调制到光载波上。微波光子学是微波技术和光子技术相融合的一个崭新的研究领域,其主要研究内容包括:微波光纤传输链路、高速宽带光子器件、光致电信号合成与控制等。应用在微波光子学领域的光纤延迟线工作速率很高,一般在 10 Gbit/s 以上,对器件本身的稳定性和可靠性要求更高。微波光子学研究的深入将会极大地促进远程通信的发展。随着高速光电器件如高速外调制器、高速探测器和高速光开关等不断成熟,微波光纤延迟线也将很快进入实用阶段。

3 光纤传感与光学测量领域

3.1 激光器线宽测量

窄带单频(单纵模)激光光源在光通信、光纤传感、相干检测及光谱学等领域有着广泛的应用,精确测定线宽指标是非常重要的工作^[7]。作为测量线宽的主要方法之一,采用光纤延迟线的零拍测量法,其原理如图 1 所示。

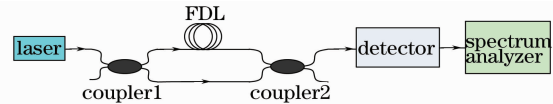


图 1 基于 FDL 的激光器线宽测量

Fig. 1 Laser line-width measurement based on FDL.

在第 1 个 3 dB 耦合器中信号光被分成两路,一路经过光纤延迟线,另一路不被延时,两路光在第 2 个 3 dB 耦合器中进行功率耦合,并经过光电转换电路检测,最后在频谱分析仪中观测结果。单纵模激光可认为是一个有相位扰动振幅稳定的准单色电磁波,相位的随机波动将导致谱线展宽。由于光电探测器具有平方率特性,光场中相位随机波动将转化为强度噪声,反映为光电流的频谱展宽。理论和实验都证明^[8],当 $\tau_d \gg \tau_c$ (τ_d 为光纤延时时间, τ_c 为激光器相干时间,一般情况下要求 $\tau_d \geq 6\tau_c$) 时,光电流的频谱可以精确反映被测激光器的线宽,体现出明显的准洛伦兹线型。此时频谱仪的半峰全宽 (FWHM) 输出结果等于被测激光器线宽的 2 倍。

对于目前大量使用的 10 kHz 量级线宽激光器

而言,需要用到上百千米长的光纤才能满足测量要求。如果在系统未延时的通路中增加一个声光调制器(AOM),则转化为差拍测量系统,测量原理基本相同,可克服低频干扰,精度有一定提高。贾豫东等^[9]研究了如图 2 所示的短光纤延时自外差法,其中光纤延迟线为 25 km 长的单模光纤,结合先进的有理式模型曲线拟合算法,测量得到的 3 dB 谱宽为 25 kHz,则可推算出线宽为 8.2156 kHz,用 6 倍相干长度光纤延时仿真得到的数据为 8.324 kHz,两者误差约为 108 Hz。

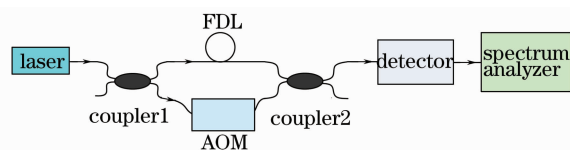


图 2 短光纤延迟自外差法组成框图

Fig. 2 Short fiber delay self-heterodyne system

该系统可以在延时光纤长度远小于 6 倍的激光器相干长度时,消除延时自外差法因为延时时间不够导致测量精度大幅度下降这一缺陷,为工程上实现精确测量窄线宽激光器线宽提供了行之有效的方法。

刘川等^[10]在光纤延迟零拍测量系统中采用多模光纤进行了激光器线宽的测量,分析了多模光纤传输对线宽测量的影响。和单模时的情况相比,多模时探测器电流的表达式除直流项外,只是在差拍谱的幅度上和单模时有所区别,并不影响线宽的测量。至于其他更高阶模存在的情况,由于它们的强度都很弱,可以忽略。

3.2 晶体双折射参数测量

某些晶体能使一束单色入射光线分成两束振动方向互相垂直的线偏振的折射光线,这种现象称为双折射。描述晶体双折射性质的主要参数之一是主平面位置。基于脉冲激光二极管和多模光纤的双折射传感元回转光路偏振仪可用来测量双折射^[11],原

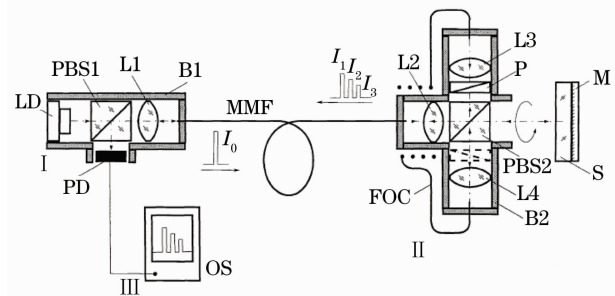


图 3 基于 FDL 的晶体双折射测量

Fig. 3 Crystalloid birefringence measurement based on FDL

理如图 3 所示。图中, I 为收发器, II 为传感单元, III 为处理单元。收发器 I 包括以下元件:箱体 B1, 脉冲激光二极管 LD, 偏振分束器 PBS1, 透镜 L1 和光电二极管 PD; 传感单元 II 包括以下元件:箱体 B2, 透镜 L2, L3 和 L4, 偏振分束器 PBS2, 偏振片 P (P 也可以安装在 PBS2 下方的虚线位置, 测量结果相同), 光纤延迟线圈 FOC(由多模光纤绕成); 处理单元 III 包括示波器 OS。MMF 是起连接传输作用的多模光纤, S 为被测物体, M 为平面镜。

设 I_0 为初始线偏振脉冲, 经过 MMF 传输后被分解为多个模式并完全解偏振。 I_1, I_2 和 I_3 是返回脉冲, 其返回路径如图 4 所示。带 p 下标的是水平偏振的脉冲分量, 总是透过 PBS2 出射, 带 s 下标的是垂直偏振的脉冲分量, 总是在 PBS2 表面反射。

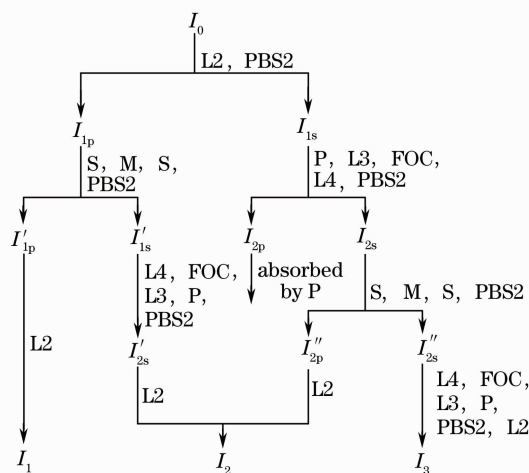


图 4 探测光脉冲的返回路径

Fig. 4 Return paths of optical probe pulses

设 3 个返回脉冲之间的延时间隔为 τ, L_{dl} 为光纤线圈的光纤长度, n 为光纤纤芯折射率, c 为真空中的光速, 则有

$$\begin{cases} I_1 = k_1 \cdot [\cos^2 \Delta + \sin^2 \Delta \cdot \cos^2 2(\varphi - \psi)] \cdot I_0, \\ I_2 = k_2 \cdot \sin^2 2(\varphi - \psi) \cdot \sin^2 \Delta \cdot I_0, \\ I_3 = k_3 \cdot [\cos^2 \Delta + \sin^2 \Delta \cdot \cos^2 2(\varphi - \psi)] \cdot I_0, \\ \tau = L_{dl} \cdot \frac{n}{c}, \end{cases} \quad (2)$$

式中 k_1, k_2 和 k_3 为考虑脉冲传递损耗后的系数, 取值与 τ 有关, 使得返回脉冲 I_1, I_2 和 I_3 的强度依次减小。 Δ 代表探测脉冲在行进过程中由被测件引入到光束中的相位差, φ 代表被测件主轴的角度, ψ 代表探测脉冲的偏振面角度。

如果未知晶体主轴角度的具体位置, 可通过传感单元 II 绕着其输出光束传播方向的轴旋转以获得返回脉冲 I_2 的强度最小值, 此时被测件主平面的角

度对应于偏振分束镜 PBS2 主平面的角度, 即 $\psi = \varphi$ 。在很多情况下主轴角度已知, 则当 $\psi = \varphi + 45^\circ$ 时, 从返回脉冲的强度可以计算出被测件引入的相位差为:

$$\Delta = \arctan \sqrt{\frac{I_2 k_1}{k_2 I_1}} \text{ 或者 } \Delta = \arctan \sqrt{\frac{I_2 k_3}{k_2 I_3}}. \quad (3)$$

可以看出, 本系统采用线偏振光脉冲进行测量, 既可以确定双折射晶体引入的相位差, 也可以确定其主平面位置。

3.3 OCT 测量

光学相干层析成像 (OCT) 是一种具有高分辨率、无损伤和实时成像能力的生物医学成像手段, 将一束光打到组织表面, 则返回的反射光在组织中传播用的时间延迟或光程差不同, 通过检测相应组织结构中不同深度返回的光信号, 提取该深度的信息就可以得到组织对某些光学参数的不同层的图样, 达到层析成像的目的。OCT 在医学诊疗和病理研究过程中具有重要的应用价值, 已应用于眼科、牙科和皮肤科的临床诊断以及珍珠质的定量检测^[12-14]。

利用啁啾光纤布拉格光栅 (CFBG) 的分布式反射特性, 可构成全光纤 OCT 测量系统^[15], 克服了传统 OCT 系统光纤重复耦合带来的插入损耗大、扫描延迟装置复杂以及准直调节十分困难的缺点。原理如图 5 所示。

低相干光源发出的低相干光经光纤耦合器耦合后进入光纤迈克尔孙干涉仪, 分别进入放有光纤光栅可变延迟线的参考臂和放有被测样品的样品臂。从光纤光栅可变延迟线返回的参考光和被样品背景反射回来的信号光, 只有在它们的光程差处于光源的一个相干长度范围内才会产生干涉信号, 并在探测光束焦点处返回的光束才有最强的干涉信号, 从而滤掉焦点外的杂散光得到高性能成像。产生的干

涉信号被探测器接收并进行处理。扫描测量的纵向分辨力本质上由光源的相干长度决定。

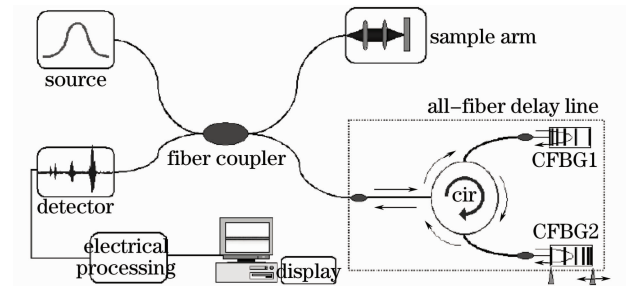


图 5 基于光纤光栅延迟线的 OCT 测量

Fig. 5 OCT measurement based on FDL

用于 OCT 系统的光纤延迟线包括两根完全一样的 CFBG, 按照相反的啁啾顺序级联来抵消 CFBG 内在的波长依赖性。如果在一段 CFBG 上通过压电陶瓷调节器施加一个小的应力则可以获得可调节的光延迟。由压电陶瓷引入的小位移可以被 CFBG 的分布反射特性放大到 100 倍以上。

设 δ_{OPD} 为光程差, a 为施加应力所得到的光纤延长长度, γ 为放大因子, n 为光纤纤芯模有效折射率, p_e 为弹光系数, $\Delta\lambda$ 为光纤光栅的带宽, λ_s 为带宽的下限波长, 它们之间存在两个关系式

$$\delta_{OPD} = a \cdot \gamma, \quad (4)$$

$$\gamma = 2n(1 - p_e) \frac{\lambda_s}{\Delta\lambda}. \quad (5)$$

3.4 OCS 测量

Amy Cheung 等^[16]提出了一种使用光相关光谱术 (OCS) 进行气体探测的独特方法, 在单模光纤系统中用带有光纤延迟线的半导体光放大器 (SOA) 来产生两路反相位信号, 使零点漂移误差减到最小, 在不同压力下获得乙炔 (C_2H_2) 气体的浓度, 实验结果与理论分析完全一致, 如图 6 所示。

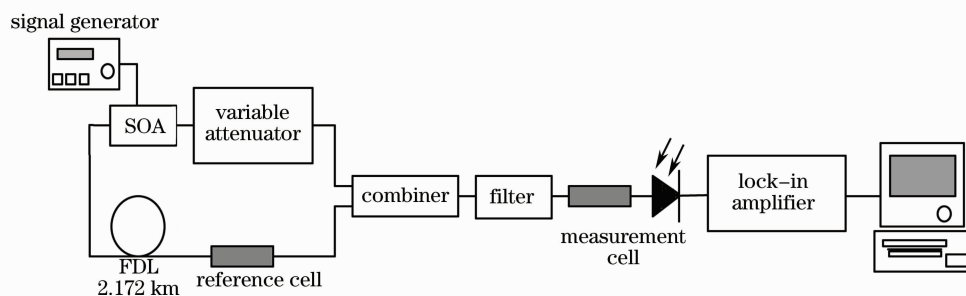


图 6 基于 FDL 的 OCS 气体浓度测量系统

Fig. 6 OCS gas concentration detection measurement system based on FDL

图 6 中采用的 SOA 中心波长为 1550 nm, 其结构相当于一个处于高增益状态下的无谐振腔的半导

体激光器, 当它受到光或电的抽运时, 载流子粒子数分布反转产生自发辐射跃迁从而获得光增益。作为

测量系统使用的单一光源,SOA 的宽带放大自发辐射能量进入单模光纤并耦合到两个输出端,大约都在 1.5 mW 左右,一个输出端接可变衰减器,另一个输出端接光纤延迟线和参考单元,到达合束器前两路信号达到相位相反,然后再由合束器合成一路,进入后续光路及电路。选择 SOA 的主要理由在于,SOA 的输出功率比发光二极管(LED)要大很多,SOA 的自发辐射在两端都有输出,都在毫瓦量级,而 LED 的输出耦合进光纤的能量是微瓦量级的。当信号发生器产生的信号频率为 46 kHz 时,采用 2.172 km 的单模光纤延迟线长度来获得 10.87 μ s 的时间延迟以得到 180°反相的参考信号。事实上调制信号的频率可以选得更高,可高达 1 MHz。调制信号频率提高,则相应地光纤延迟线的长度会缩短。测量结果如图 7 所示。

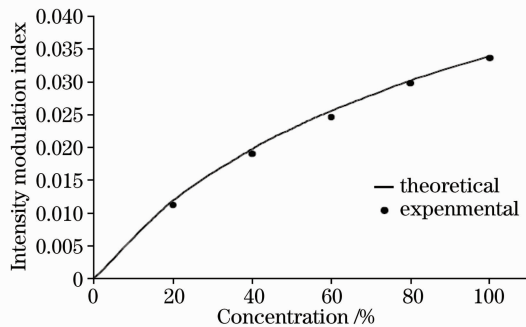


图 7 改变 C_2H_2 浓度时强度调制系数理论值和实验值的比较

Fig. 7 Comparison of theoretical and experimental intensity modulation index with varying C_2H_2 concentration

OCS 牵涉到采用相关统计方法来决定两个信号的关系。其原理是利用每种分子有自己独特的吸收线,将未知浓度的目标气体的谱吸收函数与参考单元中已知浓度的同种气体相比较。宽带光源的使用使得目标气体的多个吸收线都能被采集到,从而获得高的选择性和好的灵敏度。如果测量单元中的吸收谱与参考单元中的谱线相匹配,就能获得相当好的测量信号。测量信号的幅度包含了参考信号和测量信号之间光对比度的信息,从而计算出强度调制系数,再与气体的浓度联系起来。利用信噪比参数的分析可以预测到理论上可探测的乙炔气体的最小浓度。最小的可测量浓度能达到 0.38 mg/L。

气体的探测在安全和环境监测以及工业过程控制中有着很重要的应用。对气体探测系统的两个主要要求是高的选择性和好的灵敏度,采用 OCS 就可以达到这两个要求。

4 光纤通信领域

光纤的传输容量很大,在低损耗区内的理论带宽可达 10^{12} Hz。为了充分利用它,在光纤通信系统中可以采用时分复用(TDM)、波分复用(WDM)或频分复用(FDM)、码分多址(CDMA)技术来提高单通道的码速率。光纤延迟线在这几种技术中的研究和应用得到越来越多的重视。

4.1 超短光脉冲源

光时分复用要求光源产生高重复频率、占空比相当小的超短光脉冲,脉宽越窄,则可复用的路数越多^[17]。光纤延迟线可用于产生高比特率的复用信号及提取光交换所需要的时钟信号。

一种采用两个耦合器构成的环行延迟线系统原理如图 8 所示,各支路脉冲的位置由光纤延迟线调整,并由光耦合器来合路,所产生的脉冲串频率达到吉赫兹以上^[18]。第一环路称为“信号发生环”,光信号在环路中的延时为 T , T 远小于输入的两个相邻光脉冲之间的时间间隔。第二环路称为“信号倍乘环”,光信号在此环路中的延时为 $T-\tau$,其中 τ 远小于 T 。当一个峰值功率为 P_0 的光脉冲由 A 端输入到“信号发生环”后,在 B 点可得到一系列的间隔为 T 的光脉冲,第 N 个脉冲的峰值功率 P_N 可根据耦合器的参数和环行光纤延迟线的衰减特性求得。在经过“信号倍乘环”后的 C 点可以得到按顺序倍乘的脉冲串。由此产生的高频等间距 τ 脉冲串可用于精确定时,也可通过加权的方法得到速率达吉比特每秒以上的高速率脉冲编码。

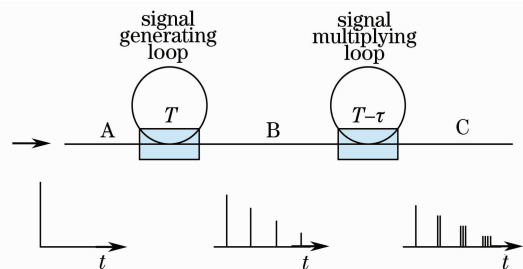


图 8 循环型光纤延迟线高速脉冲串发生器

Fig. 8 High-speed pulse code generator using circulated FDL

胡浩等^[19]在所研制的实验装置中用大信号调制半导体激光器产生重复频率为 10 GHz 的光脉冲,先送入 $LiNbO_3$ 电光相位调制器增强负啁啾,使光谱进一步展宽,再通过色散补偿光纤压缩脉冲啁啾,可得到光短脉冲。由于大信号调制激光器输出的光脉冲本身具有负啁啾,而通过相位调制器的光脉冲在不同的时间间隔内既有正啁啾也有负啁

啾,通过光纤延迟线适当调整进入相位调制器的光脉冲时延,使其通过相位调制器后累加产生更大的负啾啾,再利用正色散光纤压缩啾啾,从而得到一种新型的重复频率为 10 GHz,脉宽为 5.3 ps,抖动为 184 fs 的高稳定短光脉冲源。

4.2 光缓存器

为了充分利用波分复用、密集波分复用(DWDM)技术的优势,需要大力发展光分组网络。DWDM 技术是在 WDM 技术的基础上演变而来的,全光网络的建成将使光纤通信传输容量得到进一步的拓展。其中光纤延迟线用于实现光缓存器。

光缓存技术是光分组交换的关键技术。由于缺乏光信号随机访问存储器,目前仅有的技术是采用光纤延迟线来模拟实现光缓存。用于光缓存的光纤延迟线主要采取前向和反馈两种结构^[20,21],前向结构中传输损耗较大,数据包仅能单向传输;反馈结构中开关阵列很大,串扰严重。最新的研究中又提出一种新型的混合结构的光纤延迟线缓存控制策略^[22],克服了上两种结构的缺点。它在一个光纤环路中采用一系列可调谐波长变换器(TWC)和两个阵列波导光栅(AWG),组成了单光纤型、前向型及反馈型相结合的结构,一个分组被延迟的时间取决于它的初始波长,此初始波长被变换为与所希望时延相对应的特定波长,如图 9 所示。

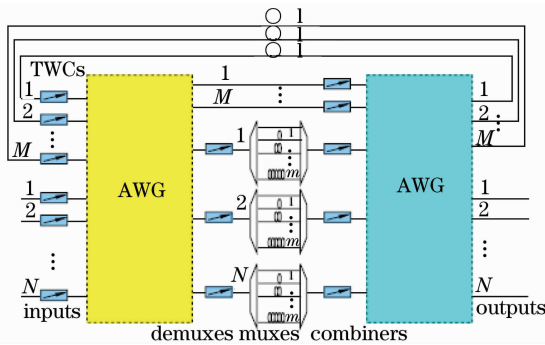


图 9 基于 FDL 的混合型光缓存器

Fig. 9 Hybrid FDL buffering switch architecture

把一组光纤延迟线与光交换矩阵结合在一起,可以形成一个延时可变组件,其中使用的光纤延迟线数量可达几十个。对缓存器进行再循环可以减少光纤数,其延时时间是环路长度与循环次数的乘积,但为了补偿因过多循环引起的损耗需要另外使用光放大,又将引起自发辐射噪声放大的问题,增加了解决问题的难度。用于光缓存器的几种光纤延迟线结构相对来说比较固定,更多的研究集中在控制方案^[23],FDL 数学模型以及控制算法上^[24,25]。

与目前分组网中使用的电缓存器相比,光纤延迟线的延迟时间上限即缓存容量还很有限且集成化程度不高;而且它们的最大区别在于,光纤延迟线还不具有真正的随机访问存储器的特性。真正意义上的全光缓存器不仅要起拷贝作用,而且要满足同步以及读写控制等要求^[26,27],目前尚没有任何一种全光缓存器能达到比较理想的功能与指标,综合性全光缓存系统的发展仍有待时日。

4.3 光编/解码器

在光码分多址(OCDMA)系统中,光纤延迟线用于实现高速光编/解码器,是时域光编/解码器的基本器件,通过直接光编码和解码,实现光信道复用和信号交换^[28,29],充分发挥光纤信道频带宽的潜力,具有动态分配带宽、网络扩展容易、多址接入方便灵活等优点,适合于实时要求高、业务突发性强、速率高的宽带通信。

在一维 OCDMA 系统中,每个用户的地址码是在时域上扩展的二进制序列,为了支持较多的同时用户数,会导致码序列太长,扩频系数变大,编码效率降低。目前的趋势是采用二维编码 OCDMA 系统。每个用户的地址码序列是二维的,其地址码序列的光脉冲不仅在时域上扩展,同时还在空间或波长上扩展。在相同扩频系数下,二维编码 OCDMA 系统不仅码字数增多,使用的同时用户数也相应增加。

一种基于阵列波导光栅和光纤延迟线的 OCDMA 系统编解码方案如图 10 所示,可实现二维 $7 \times (7-1)$ RS(Reed Solomon)码^[30]。其中,编码器

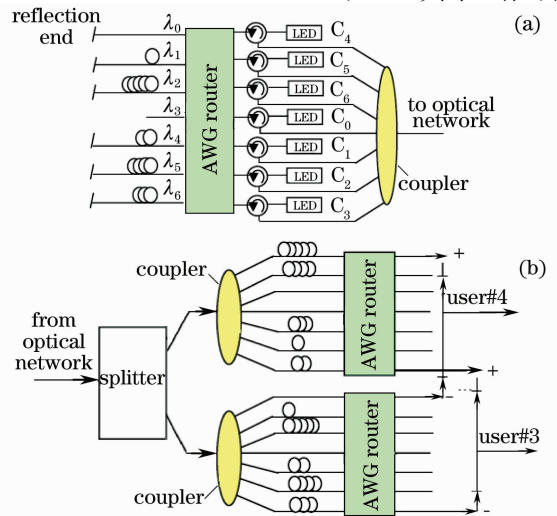


图 10 基于 AWG 和 FDL 的光编/解码器。(a) 二维光编码器;(b) 二维光解码器

Fig. 10 2-D OCDMA encoder / decoder based on AWG and FDL. (a) 2-D OCDMA encoder; (b) 2-D OCDMA decoder

由宽带光源 LED 和 7×7 的 AWG 路由器、光纤延迟线、反射器及耦合器组成,宽带光源的谱宽要通过滤波来匹配 AWG 的自由谱域范围,反射器通过把光纤延迟线的端面镀上金属来实现, C_0 至 C_6 为码字;解码器由分束器、耦合器、光纤延迟线及 AWG 路由器组成,先对编码信号在时域解码,补偿编码信号的时域延迟,再在频域用平衡检测原理进行相关解码输出,恢复传输的数据比特。

AWG 的直接功能是将宽带信号分解为多个信号切普(Chip)输出,当连接光延时器件时,可对 DS(直接序列)-OCDMA 系统实施时域编解码,当连接空间滤波器件时,可对 FE(频域编码)-OCDMA 系统实施频域编解码。更进一步,AWG 与光纤延迟线组合,用 AWG 对光源脉冲进行波长分割,再用光纤延迟线将不同的延时赋予不同的波长切普,就可实现 DS/FE 混合 OCDMA 系统的编解码。

5 微波光子学领域

微波光子学已经成为一个日益活跃的学科,这主要是由于光器件和光系统在处理微波信号上有独到之处,包括信号的产生、传输、处理和探测等几个方面^[31~33]。

5.1 多频光振荡器

多频光振荡器的一个重要应用是用作机载激光雷达的本振频率振荡器,在产生微波信号的同时还可以产生光载波,结构如图 11 所示^[34]。图中 DFB 指分布反馈,BPF 为带通滤波器,LNA 为低噪声放大器,PD 为相位探测器。其中决定信号发生频率的是短光纤环路,它将来自抽运激光器的连续光能量转换成微波信号,通过保偏光纤引入电光强度调制器,输出光通过光纤延迟线发射,然后被探测、放大、滤波,再返回到电光强度调制器的电信号输入端口。反馈环路中产生的随机电噪声信号调制激光器输出光信号,经过光纤延迟通路传输后再由光电探

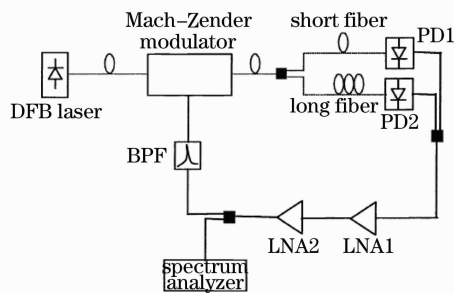


图 11 基于光纤延迟线的多频光振荡器

Fig. 11 Multi-tone photonic oscillator based on FDL

测器检测再生并馈送到调制器。当噪声信号在正反馈回路中环形时被放大,直到光调制器或者放大器中的一个进入非线性饱和状态,振荡器幅度将会稳定在饱和点,并以频率间隔 Δf 重复,这说明在以上的这些频率间隔处存在潜在的多频振荡,即

$$f_{\text{osc}} = \left(k - \frac{\varphi_B}{2\pi}\right) \cdot \frac{1}{\tau}, \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (6)$$

其中 φ_B 表示与 Mach-Zehnder 调制器偏置极性有关的相移, τ 表示环路中的群时延,改变光纤延迟线的长度即可改变 τ ,从而改变振荡器的频率,二者成反比。再对带通滤波器的频带进行选择,便可确定输出信号的频率。

理论上,这种方法能够产生高达 75 GHz 的信号,线宽小于 10^{-2} Hz。多频光振荡器是无载自由工作的,不会锁定于任何外部射频(RF)发生器。本方法中,频率分布间隔是由光纤长度的延迟时间决定的,而相位噪声与光纤延迟时间的平方成反比。加入长光纤环路的目的是为了降低相位噪声,改善频谱形状。

5.2 多通道 20 GHz 实时示波器

目前实时示波器的信号频率可达 8 GHz,对于 8 GHz 以上的瞬时信号将很难正确采样并恢复信号。来自美国的 YY 实验室开发了一种基于光纤延迟线环路技术的多通道 20 GHz 实时示波器系统,如图 12 所示。由前端预示波器和后端采样示波器

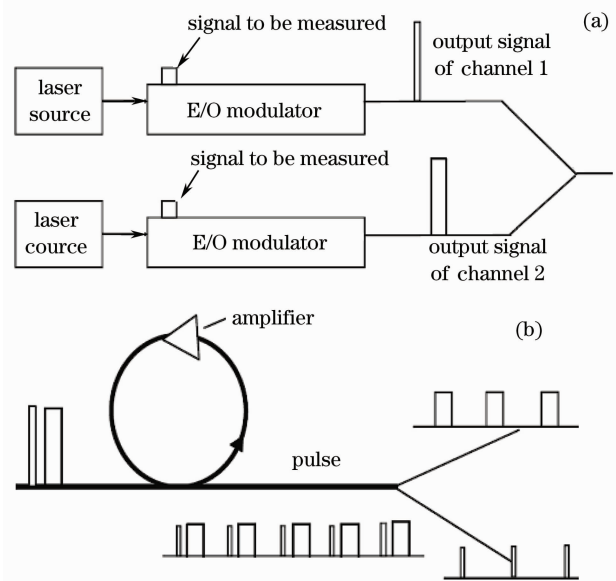


图 12 基于 FDL 的多通道 20 GHz 实时示波器。(a) 瞬态信号捕获;(b) 脉冲串发生器

Fig. 12 Multichannel 20 GHz real time scope based on FDL

(a) Transient signal capture;(b) pulse train generator

组成^[35],可测量频率高达 20 GHz 的瞬时信号。前端预波器分为两部分:瞬态信号捕获部分和脉冲串发生器。瞬态信号捕获部分靠近光源,有两个功能:1)是捕获单脉冲电信号,2)是将它们转换成与电信号形态相同的光瞬态信号,然后将信号送入脉冲串发生器。脉冲串发生器将此信号复制 1000 次,每个脉冲是原信号的复制,光纤延迟线环形一次延时 8 μ s,复制 1000 次需要 8 ms。后端采样示波器从包含 1000 个脉冲的 8 ms 时间长度的采样值中,很容易恢复出原始单脉冲信号。

文中采用该实验室的单脉冲探测器捕获单通道或双通道的单脉冲信号,测量的单脉冲信号宽度约为 100 ps,上升时间约为 54 ps,然后通过光纤延迟线环路将其复制 1000 倍形成脉冲串,采样示波器再将此脉冲串恢复成原始单脉冲信号,恢复出的单脉冲信号与原脉冲信号非常接近。文中作者曾假定用示波器直接测量以上瞬时单脉冲信号,并假定示波器横轴标定为 20 ps/div,且在 10 div 全部采样范围内的采样点数是 512,则可预言所需要的等效采样率为 2.56×10^{-1} T/s,比市售仪器高 100 倍左右。这个系统的优点在于利用先进的光纤延迟线将很窄的瞬时单脉冲信号捕获并复制成脉冲串,增加了采样信号的时间长度及稳定性,便于用商用的采样示波器对其采样、恢复并测量。

5.3 微波光纤延迟线阵列

为了提高相控阵雷达的分辨、识别以及抗干扰能力,解决多目标雷达的成像问题,相控阵天线必须采用具有大瞬时带宽的信号,因此系统也应具有尽可能大的工作带宽。光控相控阵就是利用光纤和光电子技术结合,通过实时延迟来实现天线波束的形成和控制,提高天线阵的宽带瞬时信号工作能力。

微波光纤延迟线阵列已成为光控相控阵天线光实时延迟技术中的主要方案之一^[36~40],它是通过控制已调制微波的光信号经历不同光纤长度决定的不同光程,从而得到不同的延时,实现波束扫描的相位控制。微波光纤延迟线的基本实现方案如图 13 所示,其中 d 为阵元间距。

此类微波光纤延迟线的指标主要是:1)最小分辨率(即单位延时差),最小达到几个皮秒;2)插入损耗,目前报道最小为 2~3 dB。如果采用光开关串联型光纤延迟线,若时延差越大,则损耗越大。

笔者所在的研究小组在分析光纤延迟线基本原理与典型结构的基础上,选取了磁光开关串联的光纤延迟线结构实现了一个微波光纤延迟线系统^[41],

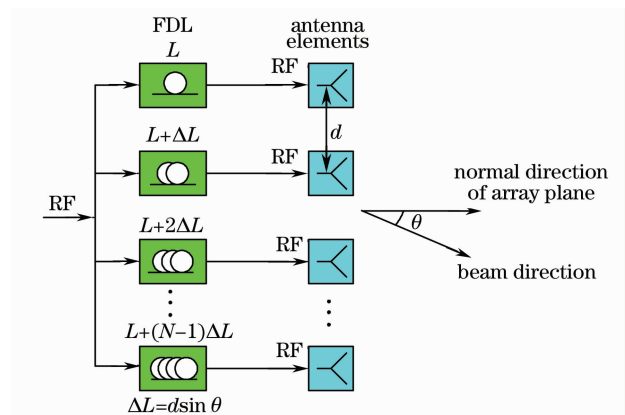


图 13 基于 FDL 产生倾斜发射波束的直线相控阵
Fig. 13 Linearly phased array based on FDL to generate a squint free radiation beam

如图 14 所示。硬件设计采用单片机控制,实现一个 X 波段的 3bit 的光纤延迟控制系统,整个系统结构紧凑,体积远小于由传统的微波器件实现的延迟系统。上位机软件设计了简单高效的控制界面,能实时显示光纤延迟系统的延迟信息,并能快速切换。对其各项指标进行了测量,实验结果表明,不同光纤长度阵列的延时差可控制在几十皮秒的量级之内,基本达到了设计要求,其他特性的测试及进一步的实验工作还在进行中。

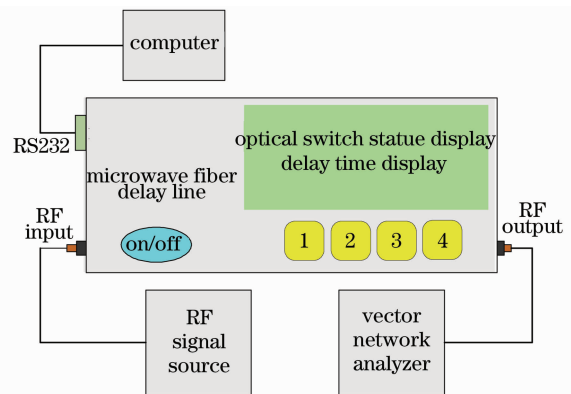


图 14 微波光纤延迟线实验系统框图

Fig. 14 Experiment set of microwave fiber delay line

5.4 光 A/D 转换

A/D 转换是现代数字信号处理系统前端非常关键的技术,由于目前电子 A/D 转换器的带宽约为 4 GHz(实验室水平),适应不了未来高速信号处理的要求,光 A/D 转换的研究日益引起人们的关注^[42,43],成为刚刚兴起的研究热点。实现光 A/D 转换的方法主要有两种:色散时域展宽(Dispersion time stretch)和多波长脉冲串时域取样。其中用到光纤延迟线的色散时域展宽原理如图 15 所示^[44]。

其基本思想是:用待测电信号先对掺铈光纤激

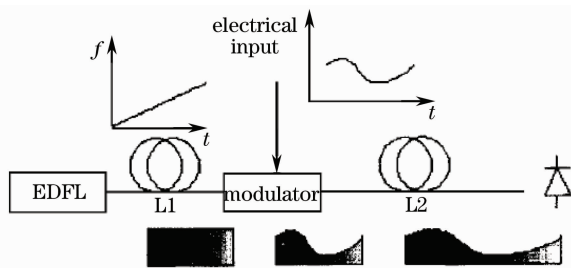


图 15 基于光纤延迟线的色散时域展宽

Fig. 15 Dispersion time stretch based on FDL

激光器(EDFL)产生的一个线性啁啾光脉冲串进行幅度调制,被调制的啁啾光脉冲串再通过一段光纤色散展宽,从而得到低速的待测信号。时域展宽的宽度由光纤延迟线的延迟时间决定。时域展宽方法用于高速连续信号的 A/D 转换时,需要根据光脉冲的脉宽和啁啾特性,将输入信号首先分割成小段后,再分别进行时域扩展。

5.5 信号相关处理

由雷达天线接收的回波信号常常被噪声所淹没,鉴别回波信号的有效方法是相关处理^[45]。基于光纤延迟线的相关器与电的相关器相比,系统时钟及延时分配简单,易于实现高速信号处理。两个回波信号 x_1 和 x_2 的相关可表示为

$$C_{12}(\tau_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_1(k\Delta\tau)x_2(k\Delta\tau + \tau_i), \quad (7)$$

式中 N 是取样数, τ_i 是延时增量 $\Delta\tau$ 的整数倍。抽头光纤延迟线相关器结构如图 16 所示,信号 x_1 经过耦合器分成 N 路,信号 x_2 经过抽头光纤延迟线得到 N 路不同延时的信号,对应的各分路信号相乘、累加后得到信号 x_1 和 x_2 的互相关。

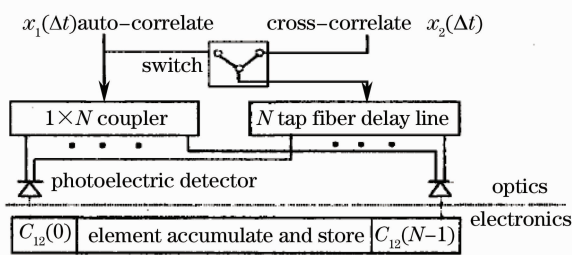


图 16 抽头光纤延迟线信号相关器

Fig. 16 Signal correlation processor based on tapped FDL

6 结 论

光纤延迟线不仅具有较多的应用领域,而且其应用功能还在进一步开发中。由于光纤本身具有极大的传输带宽,其优势是其他传输介质不能比拟的,

随着科学技术的进步和发展,光纤延迟线必将得到快速发展和广泛应用。因此,关于光纤延迟线的深度研究具有十分重要的意义。其深度研究可以归纳为进一步提高光纤延迟线的延迟精度和稳定性、实现较大范围连续可调谐的光纤延迟线、提高光纤延迟线的制作工艺、实现光纤延迟线延迟量的精确测量等。

目前在提高光纤延迟线精度方面的研究,可采用可调谐激光器作为系统光源,利用光纤材料的色散特性即光纤的折射率随传输波长变化而改变的特点,来改变延时光纤中信号存储的时间,从而达到提高光纤延迟线延时精度的目的。理论仿真结果表明^[46],采用该种技术的光纤延迟线系统,平均延时误差从 4.1 ps 下降到了 1.3 ps,延时精度得到了显著提高,实验装置还有待于进一步完善。汪松波等^[47]在现有光纤延迟线结构基础上尝试加入新的元素,如法拉第旋转镜和半导体光放大器等,具有精度高、转换速度快、功率恒定且偏振无关等特点,应能提高延迟线结构的性能。

如何实现一种既有较大动态范围,又能连续可变的光延迟,也是目前的研究热点。通常认为调谐精度小于 1 ps 可以看成连续调谐。现阶段比较成熟的是单纤信号传输,而以多路光纤组成网络或阵列,在技术上和工艺上都是困难和复杂的。尤其要实现高精度的连续可变光纤延迟线难度非常大,主要思路是将离散的大延时与各种小延时调谐方法联合使用,目前都还处在方案和初步实验阶段。目前国外处于实验室研究阶段的调谐方法有微光机电系统(MEOMS)调谐法、光纤光栅调谐法、光学全通滤波器调谐法、温度调谐法和基于光纤色散的波长调谐法等^[48]。国内在连续调谐光延迟技术方面的研究基本上刚刚起步。

在制作和选用不同用途的光纤延迟线时,要综合考虑其工作波长、传输模式、损耗、光纤长度、弯曲度和偏振等参数,重点关注其关键指标,如延时时间范围、延迟精度、插入损耗等。由于目前在光纤延迟线的实现方法、器件封装和性能评价等方面,还有许多没有解决的问题,迫切需要进行更加深入的探索和研究。只有进一步实现并完善光纤延迟线的延时可调性和便携性,保证光纤延迟线工作的稳定性和可靠性,降低其制造成本,才能尽快达到实用化要求。

参 考 文 献

- 1 Nabeel A. Riza, Muzammil A. Arain, Sajjad A. Khan. Hybrid

- analog-digital variable fiber-optic delay line[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 619~624
- 2 Brie Howley, Shi Zhong, Jiang Yongqiang *et al.*. Thermally tuned optical fiber for true time delay generation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, **37**(1): 29~32
 - 3 Li Zheng, Sun Yunan. Optical true-time delay for phased array antenna system[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(3): 381~385
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
 - 4 Kalman Wilner, Anthony P. Van Den Heuvel. Fiber-optic delay lines for microwave signal processing[C]. *Proc. IEEE*, 1976, **64**(5): 805~813
 - 5 E. Marom. Optical delay line matched filters[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems*, 1978, **25**(6): 360~364
 - 6 T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16): 630~631
 - 7 Wang Jinwen, Dong Xiaopeng, Zhou Jinlong. Measurement of the linewidth of DFB fibre laser based on the delayed self-homodyne[J]. *J. Xiamen University (Natural Science)*, 2007, **46**(3): 323~326
王劲文, 董小鹏, 周金龙. 基于延时零拍法的DFB光纤激光器线宽测量[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2007, **46**(3): 323~326
 - 8 L. E. Richter, H. I. Mandelberg, M. S. Kruger *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(11): 2070~2074
 - 9 Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong *et al.*. Short fibre delayed self-heterodyne interferometer for ultra narrow laser line width measurement[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, **34**(5): 568~571
贾豫东, 欧攀, 杨远洪等. 短光纤延时自外差法测量窄线宽激光器线宽[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, **34**(5): 568~571
 - 10 Liu Chuan, Liu Yang, Sun Liqun. Theoretical and experimental study on the self-homodyning linewidth measurement using multimode fiber[J]. *Optical Technology*, 2006, **32**(3): 643~646
刘川, 刘阳, 孙利群. 多模光纤用于激光线宽零拍测量法的原理和实验研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(3): 643~646
 - 11 Michael Shribak. Fiber optic sensor for birefringence[C]. *SPIE*, 2002, **4481**: 175~179
 - 12 Zeng Nan, He Yonghong, Ma Hui *et al.*. Pearl detection with optical coherence tomography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1140~1145
曾楠, 何永红, 马辉等. 应用于珍珠检测的光学相干层析技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1140~1145
 - 13 Yu Xiaofeng, Ding Zhihua, Chen Yuheng *et al.*. Development of fiber-based optical coherence tomographic imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 235~238
俞晓峰, 丁志华, 陈宇恒等. 光纤型光学相干层析成像系统的研制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 235~238
 - 14 Wang Ling, Ding Zhihua, Shi Guohua *et al.*. Fiber-based optical coherence tomography imaging system with rapid scanning optical delay line as phase modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 472~476
王玲, 丁志华, 史国华等. 基于快速扫描延迟线相位调制的光纤型光学相干层析系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 472~476
 - 15 EunSeo Choi, Jihoon Na, Seon Young Ryu *et al.*. Fiber-based optical delay line for OCT system[C]. *SPIE*, 2005, **5690**: 496~503
 - 16 Amy Cheung, Walter Johnstone, David Moodie. Recent advances in gas detection using optical correlation spectroscopy[C]. *SPIE*, 2005, **5952**: 595204
 - 17 Yongkang Dong, Zhiwei Lü, Qiang Li *et al.*. Controllable optical delay line using a Brillouin optical fiber ring laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 628~670
 - 18 Tang Difang, Yan Chunpeng, Yu Zunyong. High-speed pulse code generator using fiber delay lines [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1999, **20**(1): 65~68
唐棣芳, 燕春鹏, 于尊勇. 光纤延迟线高速脉码发生器[J]. *半导体光电*, 1999, **20**(1): 65~68
 - 19 Hu Hao, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. 10 GHz short optical pulses source with ultra-low jitter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1241~1244
胡浩, 于晋龙, 张立台等. 10 GHz 超低抖动光短脉冲源[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1241~1244
 - 20 Zhang Zhizhong, Zeng Qingji, Wang Jianxin *et al.*. Contention resolution in optical packet switched networks: using fiber delay-lines or wavelength converters[J]. *J. Electronics & Information Technology*, 2004, **26**(11): 1812~1818
张治中, 曾庆济, 王建新等. 光分组交换网络的冲突解决: 用光纤延迟线还是波长转换器[J]. *电子与信息学报*, 2004, **26**(11): 1812~1818
 - 21 Qun Qin, Sheng Wang, Huan Song. Optical burst switching network: development and technologies[C]. *SPIE*, 2004, **5281**: 294~304
 - 22 Lin Li, Stephen D. Scott, Jitender S. Deogun. A novel fiber delay line buffering architecture for optical packet switching [C]. *Proc. IEEE Global Communications Conference*, San Francisco, CA, 2003: 2809~2813
 - 23 H. J. S. Dorren, M. T. Hill, Y. Liu *et al.*. All-optical header processing and optical buffering for optical packet switching networks[C]. *SPIE*, 2005, **5626**: 123~136
 - 24 K. Laevens, M. Moeneclaey, H. Bruneel. Queueing analysis of a single-wavelength fiber-delay-line buffer [J]. *Telecommun. Syst.*, 2006, **31**: 259~287
 - 25 Mounire El Houmaidi, Mostafa A. Bassiouni, Guifang Li. Contention resolution and QoS provisioning using sparse fiber delay lines in WDM networks[J]. *Photon Netw Commun.*, 2007, **13**: 111~122
 - 26 Wu Chongqing. The fiber based all-optical buffer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(5): 601~606
吴重庆. 光纤型缓存器的研究进展[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(5): 601~606
 - 27 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da *et al.*. Investigation on control technique of adjustable double loop optical buffer in large range[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1930~1934
王拥军, 吴重庆, 疏达等. 大范围可调的双环全光缓存器的控制技术研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1930~1934
 - 28 Wang Xu, Wang Xuhua, Sun Yanbin *et al.*. Recent progresses of OCDMA networks and related devices [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(2): 451~457
王旭, 王旭华, 孙燕斌等. OCDMA 系统和相关器件研究进展[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(2): 451~457
 - 29 Li Chuanqi, Zhu Yingchun, Zhou Xu. Tunable encoder/decoder for optical code division multiple access networks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1901~1905
李传起, 朱迎春, 周谔. 光码分多址系统可调谐编/解码器研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1901~1905
 - 30 Wei Huashi, Yao Binghui, Yin Liye. Coding and decoding method in OCDMA system based on AWG [J]. *O. I. Automation*, 2008, **27**(4): 39~42
魏华实, 姚炳辉, 尹立业. 基于 AWG 的 OCDMA 系统编解码方案[J]. *兵工自动化*, 2008, **27**(4): 39~42
 - 31 Beatriz Ortega, Daniel Pastor, Jos'e Mora *et al.*. Advanced optical processing of microwave signals [C]. *EURASIP J. Applied Signal Processing*, 2005(10): 1462~1484
 - 32 Zhou Bo, Zhang Hanyi, Zheng Xiaoping *et al.*. Developing status of microwave photonics[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(2): 81~84

- 周 波, 张汉一, 郑小平 等. 微波光子学发展动态[J]. 激光与红外, 2006, **36**(2): 81~84
- 33 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. A novel scheme of dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 919~922
江 阳, 于晋龙, 王耀天 等. 一种新型双环路光电振荡器[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 919~922
- 34 Keyvan Sayyah, Daniel Yap. Multi-tone photonic oscillator [C]. *SPIE*, 2001, **4490**: 52~62
- 35 Yan Yin, Xiangying Zeng. A multichannel 20-GHz real-time scope based on optical-fiber delay-line loop technology [C]. *SPIE*, 2005, **5625**: 1055~1061
- 36 Jong Dugshin, Back Song Lee, 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 [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5): 1364~1366
- 37 Poompat Saengudomlert, Vincent W. S. Chan. Using optical switches and fiber delay lines for wideband beamforming with RF uniform linear antenna arrays[J]. *IEEE*, 2004, **0-7803-8560**: 555~558
- 38 Jin Mouping, Guan Wei, Guo Jun *et al.*. Experimental system of a wideband optically controlled phased array antenna[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(6): 1127~1129
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
- 39 Maggie Yihong Chen, Brie Howley, Xiaolong Wang *et al.*. 2-D scalable optical controlled phased-array antenna system [C]. *SPIE*, 2006, **6126**: 612601
- 40 Ma Yupei. Super broad band microwave optical fiber delay line [J]. *Semiconductor Technology*, 2007, **32**(2): 129~132
马玉培. 超宽带微波光纤延迟线[J]. 半导体技术, 2007, **32**(2): 129~132
- 41 Zhang Xiaoqing, Zhang Chunxi, Hu Shuling *et al.*. Microwave fiber delay line performance simulation research [C]. *SPIE*, 2008, **7127**: 71272N
- 42 G. J. McDonald, J Olliero, M. J. Cooper *et al.*. A transient waveform digitiser for wideband signal capture[C]. *SPIE*, 2006, **6399**: 63990N
- 43 Zhang Zhuangqian, Zhang Hongming, Fu Xin *et al.*. A new approach for analog to digital conversion based on double parallel optical intensity modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 378~382
章壮前, 张洪明, 傅 鑫 等. 一种采用并行光强度调制器的模数转换方法[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 378~382
- 44 Zhang Hongming, Yao Minyu, Zhang Jianfeng *et al.*. Optical A/D conversion [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(1): 13~15
张洪明, 姚敏玉, 张剑峰 等. 光 A/D 转换[J]. 激光与红外, 2001, **31**(1): 13~15
- 45 Qiu Shaofeng, Fan Ge. Applications of fiber delay line in radar [J]. *Optical Technology*, 2003, **29**(4): 429~431
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
- 46 Qing Xiang, Chen Fushen. Improvement on optical fiber delay lines precision based on tunable laser [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(1): 47~50
卿 翔, 陈福深. 采用可调谐激光器提高光纤延迟线精度的研究[J]. 激光技术, 2007, **31**(1): 47~50
- 47 Wang Songbo, Li Xinwan, Chen Jianping. Experimental study on high precision fast tunable fiber optic true delay line [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2008, (2): 24~26
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
- 48 Du Shu, Chen Fushen. Research on continuously tunable optical delay lines [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2007, (1): 39~43
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