

光纤色散在光信息处理中的应用

谭中伟 秦凤杰 任文华 刘艳

(北京交通大学光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 随着光纤通信和光网络技术的快速发展,基于光纤的光信息处理技术引起了越来越多的关注。介绍了几种基于光纤色散的光信息处理技术,包括时间透镜、基于时域展宽的光模数转换技术、光纤光栅传感器的波长解调、图像的时域串行编码技术、全光积分器、光相关器和光的时域-频域卷积等。主要介绍了这些技术的原理、近期进展和优缺点。分析了目前基于光纤色散的光信息处理技术普遍存在的困难,对其发展趋势进行了探讨。通过对模式色散和色度色散的比较,探讨了模式色散在光信息处理技术中的发展前景,并介绍了两种基于模式色散的光信息处理技术。

关键词 光纤光学;光纤色散;光信息处理;模式色散;光学傅里叶变换

中图分类号 TN91 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080023

Application of Fiber Dispersion in All Optical Data Processing

Tan Zhongwei Qin Fengjie Ren Wenhua Liu Yan

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract With the development of optical communication and optical networks, the optical data processing based on optical fiber has been investigated intensely. Several technologies of fiber dispersion based optical data processing are introduced, including time lens, time stretch based analog/digital (A/D) converter, fiber grating sensor's wavelength demodulation, serial time-encoded amplified imaging, all optical integrator, convolution and correlation. Their principles, developments, advantages and disadvantages are discussed. The potential applications of optical data processing using modal dispersion are also discussed through comparing chromatic dispersion and modal dispersion and two kinds of modal dispersion based optical data processing are introduced.

Key words fiber optics; fiber dispersion; optical data processing; modal dispersion; optical Fourier transform

OCIS codes 060.7140; 200.4560; 230.1150

1 引言

电子技术由于受到其信息载体-电子的固有限制,已表露出一些局限性,使其难以完全满足超高速信息处理的要求,而不具荷电性的光子作为另一类新的信息载体自然就成为理想的选择,未来的信息化时代将是光子载体与电子载体携手合作、互相补充的时代^[1-2]。光纤由于具有传输速度高、通信带宽大和体积小等优点,在信息处理领域的应用越来越广泛,如光交换^[2]、光时分复用和解复用^[3]、光模数转换^[4]和微波光子学^[5]等。

本文着重介绍了几种基于光纤色散的光信息处理技术的原理、近期进展和优缺点,包括时间透镜^[6]、基于时域展宽的光模数(A/D)转换技术^[7]、光纤光栅传感器的波长解调^[8]、图像的时域串行编码技术^[9]、全光积分器^[10]、光相关器^[11]和光的时域-频域卷积^[12]等。

2 色度色散在光信息处理中的应用

在光纤中传输的光信号(脉冲)的不同频率成分或不同的模式分量以不同的速度传播,到达一定距离后

收稿日期: 2013-03-29; **收到修改稿日期**: 2013-04-18; **网络出版日期**: 2013-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61177012)、北京交通大学红果园双百人才计划、中央高校基本科研业务费专项资金(2012YJS028)

作者简介: 谭中伟(1978—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信、光纤传感和光信息处理等方面的研究。

E-mail: tanzwei@126.com

必然产生信号失真(脉冲展宽),这种现象称为光纤的色散或弥散。光纤的色散主要有材料色散、波导色散、偏振模色散和模式色散四种。其中,模式色散是多模光纤所特有的;材料色散和波导色散都是指不同的频率成分具有不同的传播速度,也叫做色度色散^[13]。

长期以来,色散一直是光纤通信系统传输性能提高的主要限制因素。色散越大,光纤中的带宽-距离乘积越小,色散的补偿和管理一直是光纤通信系统的重要研究内容之一^[14-15]。然而,随着光纤中的光信息处理技术的发展,人们逐渐开始利用色散的光脉冲展宽特性来研制各种各样的光信息处理技术。该技术最主要的优点是速度快、带宽大。以下将重点介绍几种基于光纤色度色散的光信息处理技术,包括它们的原理以及目前国际上的最新进展。

2.1 时间透镜

时间透镜的概念源于时空对应性原理。在夫琅禾费近似条件下,傍轴光束的传输方程为^[16]

$$E_z = -\frac{i}{2k}(E_{xx} + E_{yy}), \quad (1)$$

式中 k 为波数, E_z 为傍轴光束的慢变包络函数沿传输方向 z 的导数, E_{xx} 和 E_{yy} 分别表示函数沿传输方向 x 和 y 方向的二阶导数。

窄带光脉冲在色散介质中的传输方程经过变量代换后可以表示为^[16]

$$A_l = \frac{i}{2} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} A_{\pi}, \quad (2)$$

式中 β 为光纤的传输常数, A_l 为光脉冲的包络函数对传输方向 l 的导数, A_{π} 表示函数对时间的二阶导数。基于窄带的光脉冲在色散介质里的传输方程与傍轴光线的传输方程的相似性, Kolner 等^[16] 于 1989 年提出了时间透镜的概念。空间透镜对空间变量 x 和 y 产生了一个二阶相位调制, 如果能够在时域上产生一个二阶相位调制, 那么就相当于在时域上有一个透镜。而光脉冲在色散介质中传输时的展宽和压缩就相当于光束在空间中的发散和会聚, 其结构如图 1 所示。

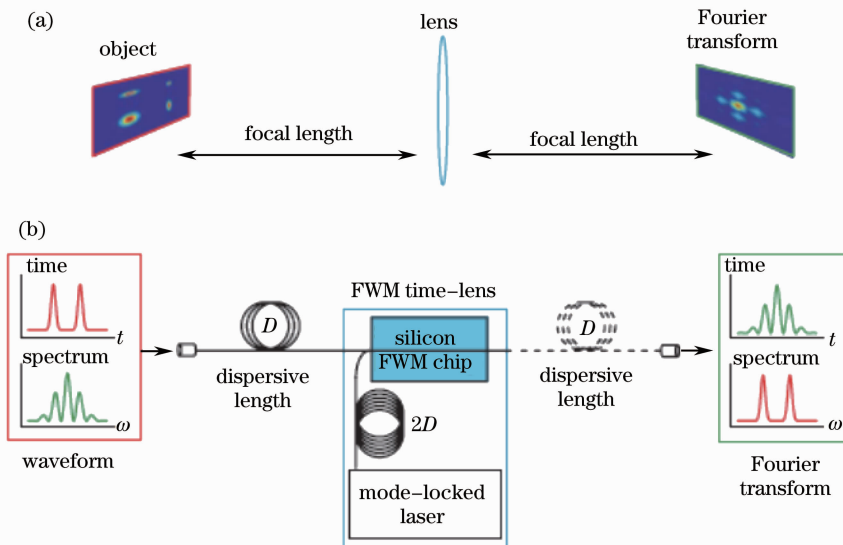


图 1 时域成像与空间成像的对比。(a)基于透镜的空间成像;(b)基于时间透镜的时域成像

Fig. 1 Comparison between temporal imaging and spatial imaging. (a) Lens-based spatial imaging;

(b) time lens-based temporal imaging

时间透镜可以通过以下几种方法实现:1)利用光电相位调制器实现^[17];2)利用非线性晶体的和频或差频来实现^[18];3)利用光纤中的交叉相位调制(XPM)或四波混频(FWM)来实现^[19-21]。

时间透镜既能对光脉冲进行放大或者压缩,也能对光脉冲进行时域和频域之间的转换,一般被用在时域成像、光通信、光信号处理等领域,例如基于时域成像技术的波形展宽^[22]、基于时间-频率转换的波形检测^[18]、基于光学傅里叶变换的线性扰动消除^[19]、基于多波长脉冲压缩技术^[23]的任意波形生成器等。目前,

时间透镜的应用主要集中于光信号处理领域。时间成像系统(时域-时域)是时间透镜的最重要应用^[24],除此之外,时间透镜一般还被用于频谱的时间成像系统(时域-频域)^[25]、实时傅里叶变换(频域-时域)^[26]。从时间透镜的概念出现以来,基于它的研究一直没有间断。无论在哪种应用中,分辨率都是时间透镜的一个非常重要的参数。分辨率指脉冲压缩时能达到的最小脉冲宽度。脉冲展宽时能分辨出的最短的时间和做光学傅里叶变换时的光谱分辨率都取决于时间透镜的分辨率 $\tau_0 = 2.77/(\Gamma_0 \omega_m)$,其中 ω_m 为调制频率, Γ_0 为相位调制的大小。在调制频率一定的情况下,相位调制的大小决定了时间透镜的分辨率,但一般的光电相位调制器仅能达到几个 π 的相移。康奈尔大学的 Gondarenko 等^[27]将基于硅光子集成器件的非线性效应应用到时间透镜的系统中,取得了超过了 100π 的相位调制,因此得到了分辨率很高的时间透镜。当时间透镜的分辨率很高的时候,它的孔径即有效的时间窗口却非常短,因此,在使用时很受限制。为了解决时间透镜的孔径和分辨率的矛盾,可以使用两个时间透镜搭建类似望远镜原理的系统。根据此原理,他们将 100 ps 时间窗口内的 24 bit 的光信号进行了压缩,使其从 10 Gb/s 的信号压缩成 270 Gb/s 的信号^[6]。此外,他们还进行了基于时间透镜原理的空间隐形(Spatial cloaking)的研究^[28]。

2.2 基于时域展宽的光模数转换技术

随着计算机技术和信号处理技术的进步,对模数转换器提出了更高的要求,即高速的采样速度、高的比特精度和宽的带宽等。传统的电模数转换器难以超越每秒几十吉次(Gs/s)的采样量级,不能满足雷达、微波通信、高速光网络和医学成像等系统高速发展的要求^[29-30]。相比较而言,由于光学模数转换技术具有高采样速率、低抖动等优势,被认为是一种非常有潜力的技术^[31]。

基于时域展宽的光模数转换技术是一种利用光纤色散使光脉冲在时域展宽,增大输入信号的持续时间,以此来降低信号的频率和带宽,用低速的模数转换设备对高速信号进行采样的方法^[32-33],其典型的系统结构如图 2 所示。

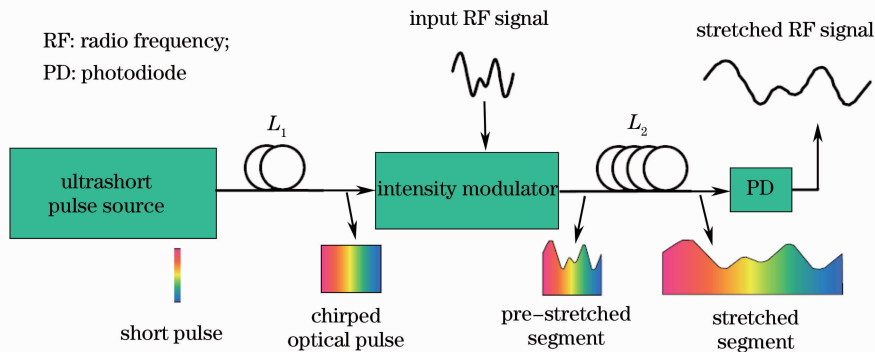


图 2 基于光纤色散的时间展宽的原理图

Fig. 2 Principle of time stretch based on fiber dispersion

当光纤总长度($L_2 + L_1$)比第一段光纤 L_1 长度大 M 倍的时候,时间展宽系统能将对电的采样率的要求降低至 $1/M$,而且,取样时钟抖动引起的噪声可以降低至 $1/M^2$ 倍。使用该方法研制的高速光采样系统已经实现了用带宽为 16 GHz 的实时采样示波器对 45 Gb/s 伪随机码信号的实时采样。由于需要处理的超高速信号通常都是光脉冲信号,在实际使用中基于时间展宽的光模数转换系统还需要用光电转换设备将展宽后的光信号变成电信号再进行取样,成本较高,而且速度会受到限制。不过,该问题在 2012 年得到了解决,使用高非线性光纤,利用高速光信号与一个啁啾光脉冲之间的四波混频效应可以直接将高速光信号调制在啁啾光脉冲上,实现光-光调制^[32],用此方法可以实现的模数转换速度将完全摆脱电子瓶颈的限制。

该技术的主要问题是使用光纤作为色散介质时,所需光纤的长度太长,体积较大,而且需要放大器来补偿插损。采用其他的手段如光纤光栅等色散更大的器件是时间展宽系统走向实用的一个急需解决的问题^[4,34]。

2.3 光纤光栅的波长解调

作为一种准分布式的光纤传感器,光纤光栅传感器具有波长编码(不受光源的光强波动影响)、易于波分

复用等其他传感器所不具备的显著优点。市场上光纤光栅传感器的商业化比重占据将近一半的份额。但是,目前光纤光栅传感器主要用于静态事件检测,或者是在对实时性要求不高的情况下使用,主要原因就是波长解调的速度较慢。而实际上,光纤光栅传感器在一些对实时性要求较高的、多点的动态系统中的应用还存在一定的困难,如水声传感、列车定位和测速、地震波的检测和飞机或航天器的振动检测等^[35-36]。

2007年,香港理工大学的Fu等^[37]提出了基于色散的光纤光栅的波长快速解调。利用光纤色散来使包含了光纤布拉格光栅(FBG)波长信息的光脉冲在时域上展宽,相当于进行了光学傅里叶变换,然后通过时在域进行高速检测,得到光纤光栅波长变化的信息,光纤光栅波长的变化被转换为光脉冲群时延的变化,如图3所示。

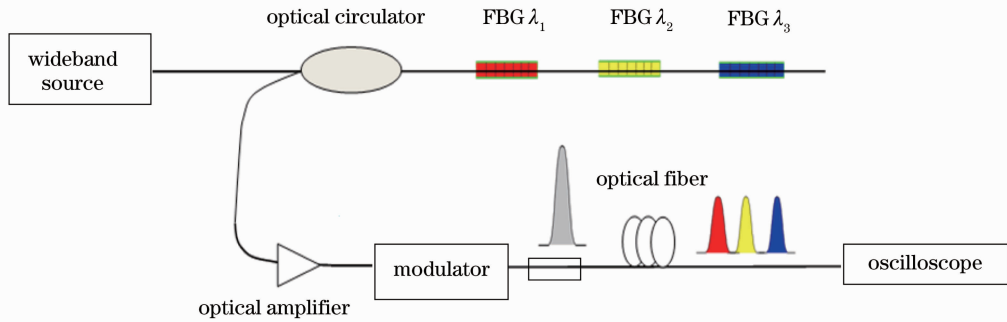


图3 基于色散的光纤光栅的波长快速解调

Fig. 3 Fast interrogation of fiber gratings based on fiber dispersion

由于该系统没有使用任何机械调节的部件,所以测量速度很快,稳定性好。其测量速度仅仅取决于高速光电检测的速度,测试精度取决于高速光电检测的测试速度和光纤引入的总色散量。这种方法也得到了—定的关注,但其缺点是,由于波长的变化是通过色散转换为时间的变化,对时间的测量速度和精度要求很高;由于光纤光栅的温度灵敏度为 $0.014\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,应变灵敏度为 $1.22\text{ pm}/\mu\epsilon$,要实现 1°C 和 $10\mu\epsilon$ 的测量精度,至少需要波长检测精度达到 0.01 nm 。目前常见的波长解调器通常可以达到 1 pm 的精度,而对于这种方法即使是要达到 0.01 nm 的波长精度,如果采用色散系数较大的色散补偿光纤 $[D=85\text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})]$,使用 100 km 的光纤,产生的时延量也只有 85 ps 。因此,该方案一般需要使用高速示波器才能实现,很难在实际工程中使用。此外,如果使用非相干光源,光源的相位噪声会经过光纤色散转化为强度噪声,导致信号的信噪比很差;而使用锁模激光器作为光源的话又使系统的成本更高。

2.4 图像的时域串行编码技术

快速成像技术对记录和观察快速且不重复出现的动态过程有着难以估量的价值,这种动态过程包括闪电、液体的流动等。然而普通的电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)相机从一个光电转换器阵列中读取数据时要实现并行到串行的变换,这个过程需要花费较多的时间;而且,当帧速率较高时,每帧的像素点数就会减少,通常为提—高帧速率会相应减少像素点数,因此很难同时实现高灵敏度和高速率。

2008年,美国加州大学的Goda等^[38]利用光纤的色散把包含图像信息的光谱在时域展开,相当于进行了一次光的傅里叶变换,实现了空间-频域-时域的全光编码,即—维的串行时域编码放大显微镜(STEAM)。该技术的最大特点是:利用光谱成像技术,使空间中不同位置的图像映射到光谱中;然后,利用光纤的色散将光谱包含图像信息的超窄光脉冲在时域展宽,实现图像信号在时域进行光的串行编码,进而使用高速光电检测器和数据采集设备接收图像,避免了使用CCD等阵列式的光电转换设备,从而大幅度地提高了成像速度。该技术的一维成像速度达到了 25 MHz ,现在可以应用在条码识别和流式细胞仪中^[35,39]。该技术还可以与光学相干层析术(OCT)和激光手术等技术相结合^[40,41]。此外,该技术还可以用于超高速的激光扫描装置,在激光雷达、共焦显微镜和无损检测等领域都有潜在的应用^[42]。基于二维的STEAM技术,研制出了 6 MHz 的高速摄像机^[8],其结构如图4所示。

在图4中,被动锁模的激光器发出一个飞秒脉冲,经过环形器到二维(2D)空间色散器后,被目标物体反射回到光纤中,此时物体的空间信息已经被编码到光谱中。光束再经由光纤传输,在色散的作用下实现波形

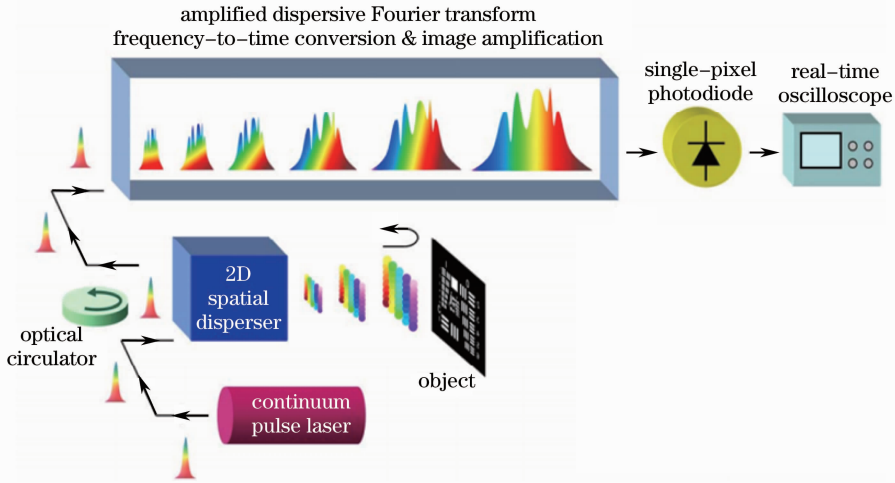


图 4 STEAM 相机的结构图

Fig. 4 Structure of STEAM camera

的展宽以及光学傅里叶变换,可以用高速 A/D 进行检测。在 STEAM 相机中,色散光纤和单个探测器代替了探测器阵列(如 CCD),不仅简化了系统,而且使快速的实时测量变成了现实。

其主要问题有两个:1)要实现高分辨率的图像,需要使用较长的光纤,因此,同样受到光纤长度和损耗的限制;2)由于在成像过程中需要严格的波长编码,因此,现有的 STEAM 技术必须使用相干脉冲光源、主动照明的工作方式和很短的工作距离,目前只能局限于显微镜的制作。如果能够突破这些限制,STEAM 技术将会获得更加广泛的应用。

2.5 全光的积分器、相关器和卷积等应用

使用光纤色散产生的群时延来研制积分器的想法与光学傅里叶变换的原理有些类似,但需要考虑时域和频域波形的相互作用。积分可以由下式来表示:

$$y(t) = \int_{t'=-\infty}^t x(t')dt' = \int_{\tau=0}^{+\infty} x(t-\tau)d\tau. \quad (3)$$

由于光脉冲包括许多频率分量,因而群速度的频率相关性导致了脉冲传输过程中的展宽,不再同时到达光纤输出端。这种时延差所造成的后果就是脉冲传播时延随时间的推移而展宽。由于每个频率分量都包含了相同的光脉冲的波形,在接收端相当于许多个经历了不同时延的信号叠加,因此,相当于在某个时间段内进行了积分,其原理如图 5 所示^[43]。

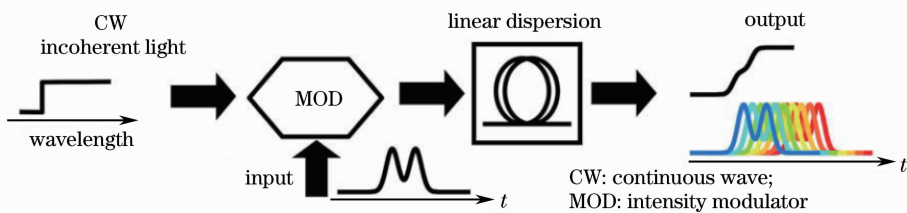


图 5 基于光纤色散的光积分器

Fig. 5 Optical integrator based on fiber dispersion

这种形式的积分器仅仅需要将光谱进行滤波,然后加以调制就可以得到,结构简单,而积分窗口的长度主要由积分器使用光纤的色散量来决定。由于光源发出的光具有一定的频谱宽度,因此光信号在光纤中传播会因为色散产生失真。光源线宽越窄,则调制信号在传播过程中产生的失真越小。

卷积从某种意义上说也是一种积分运算,因此,可以将光积分器的原理移植到光卷积的系统中。光卷积的原理与积分器类似,区别是,光谱不再是简单的方波,而是具有一定的形状,这样当光脉冲经过色散展宽之后,就相当于将时域波形和频域波形做卷积运算^[11],因此,需要使用滤波器将频谱变成需要的函数^[12]。

另外一种重要应用是计算相关函数,即信号之间相互关联的程度,包括互相关函数和自相关函数。如果

两个信号的形式完全相同,则互相关函数就变为自相关函数,其卷积运算的峰值很大。对于两个不同的信号,两个信号的相似性越大,其卷积运算的峰值会越大,反之,卷积运算的峰值越小。光相关器在信号处理、图像识别等领域有着广泛的应用。基于光纤的光学相关器有基于光纤延时线的光学相关器^[44]、基于光学逻辑门的光学相关器^[45]、基于光纤布拉格光栅的光学相关器^[46]和基于色散的光学相关器^[12]。基于光纤色散的光学相关器的优点是具有良好的可调性。而且,将它和全光微分器等器件一起应用可以完成更为复杂的逻辑运算^[47-48]。

基于光纤色散的全光积分器、相关器和卷积的原理和结构都比较类似。其共同优点是可以精确、灵活地调整色散值,使系统输出信噪比达到最优。但是此类器件也有许多缺点和不足。首先,需要多波长光源,对于不同波长的光源需要经过波分复用器进行合波作为信号源。其次,如果选用多个不同波长的激光器作为光源,价格较为昂贵;如果采用便宜的LED作为光源,则需要将光源经过滤波器进行限带处理,但得到的信噪比会比较差。

3 模式色散在光信息处理中的应用

虽然基于色度色散的光信息处理技术得到了越来越广泛的应用,但基于色度色散的方法所遇到的两个主要的困难也逐渐为人们所认识:

1) 为了产生足够的色散量,系统中一般需要使用较长的光纤和宽带的光源,然而,较长的光纤会导致系统体积较大,而且需要使用额外的放大器来补偿光纤引入的损耗,成本较高。例如,假设光源的带宽为40 nm,仅仅为了获得40 ns的群时延,需要使用将近60 km的普通单模光纤或12 km的色散补偿光纤。

2) 色度色散的色散量与带宽成正比,为了保证一定的色散量,要求光源的带宽很大。如果系统采用相干光源的话,一般需要采用皮秒甚至是飞秒级的锁模脉冲激光器,价格很高;如果可以采用非相干的宽带光源,系统成本会较低,但是,由于在光信息处理系统里一般都需要使用比较窄的光脉冲,因此,在对其进行调制的时候,非相干光源的随机相位会使信噪比降低,从而导致系统性能较差。

在基于色度色散进行信息处理的研究逐渐发展的同时,人们发现多模光纤的模式色散也可以用来研制全光的信息处理技术。在多模光纤中,不同的模式传输路径不同,到达终点的时间也就不同,这就引起了脉冲的展宽。在制作光信息处理系统的时候,与色度色散相比,模式色散具有3个主要的优点:

1) 与色度色散相比,模式色散具有色散量大的优点。而对于一个数值孔径(NA)约为0.3的多模光纤,产生40 ns的模式色散,仅仅需要使用4 m长的光纤,相比于色度色散,其所需光纤长度和损耗都非常小。

2) 模式色散对光源带宽和波长相关性较弱,在短光纤的条件下,可以认为模式色散是与光源波长和带宽无关的。除了多模光纤的长度和数值孔径之外,色散量的大小只受到光纤的激励条件影响。因此,系统可以使用的光源更为多样。

3) 参考信号的引入不需要使用高速的调制器,而主要靠对空间中不同模式的激励来实现,因此,系统的成本较低。

使用模式色散的缺点也是很明显的,最主要的一点就是对空间中不同模式的激励并不容易实现。幸运的是,近年来,为了突破单模光纤传输带宽限制,模分复用(MDM)技术和多输入多输出(MIMO)技术引起了越来越广泛的关注,因此,不同模式的激励技术也得到了越来越多的研究^[49-50]。这里介绍模式色散增强的色度色散^[19]和基于模式色散的全光积分器^[51]。

3.1 模式色散增强的色度色散

如前文所述,色散在很多场合都有重要应用,但是,光纤的色散并不能覆盖所有的波长,或者是在有些波长色散量较小。一个可以增大光纤色散的方法是:通过衍射光栅将不同频率的光在空间中分离开,然后以不同角度注入到多模光纤中,激励出不同的模式,这样就建立起波长和模式的对应关系。随着光脉冲在多模光纤中的传输,光脉冲因为模式色散而发生展宽,由于不同模式对应着不同的波长,因此,也相当于不同的波长间产生了较大的色散。

用此方法,在波长为800 nm时,用20 m多模光纤获得了2 ns的群时延,仅仅有色度色散是无法得到这么大的时延的,因此,把这种方法叫做模式色散增强的色度色散。不仅如此,由于该方法的色散主要由模式

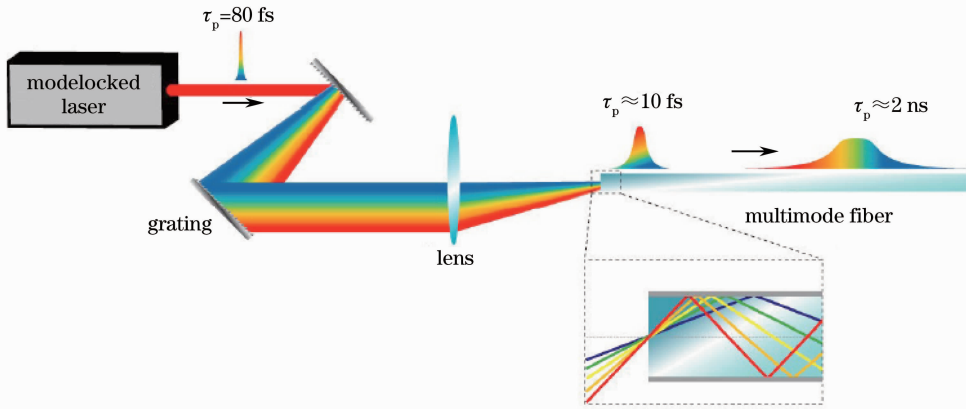


图6 模式色散增强的色度色散的原理图

Fig. 6 Principle of chromo-modal device

色散产生,因此,色散曲线也是由模式的激励条件决定的。改变激励条件(使入射到光纤的光斑发生微小的侧移),就能灵活地调整色散曲线。

该方法的主要问题是,如何使某一个特定的激励条件仅仅激发出一个特定的模式。此外,各个模式之间的模式耦合也是一个问题。模式耦合可以由随机的折射率波动、弯曲、旋转和复用器件的串话等因素引起。当光纤较短的时候模式耦合还比较小,但当光纤长度增大后模式耦合也会增大。

3.2 基于模式色散的全光积分器

文献[10]中主要使用色度色散来产生延时,而我们发现,如果采用模式色散来产生延时,那么所需光纤的长度将大为减少,同时,积分器将具有波长无关性,对光源的带宽也没有要求,这将促进全光积分器的应用以及将其用于与其他光逻辑器件共同完成更为复杂的逻辑功能。然而,在制作积分器的时候一个条件是需要产生延时和相互叠加的部分具有相同的能量,在基于色度色散的积分器中,这个条件是靠控制光源的光谱或对宽带光源进行功率均衡来实现的;在使用模式色散的时候,一个很重要的条件就是要使各个模式所承载的功率一致,这个条件可以通过如图7所示的结构来实现。

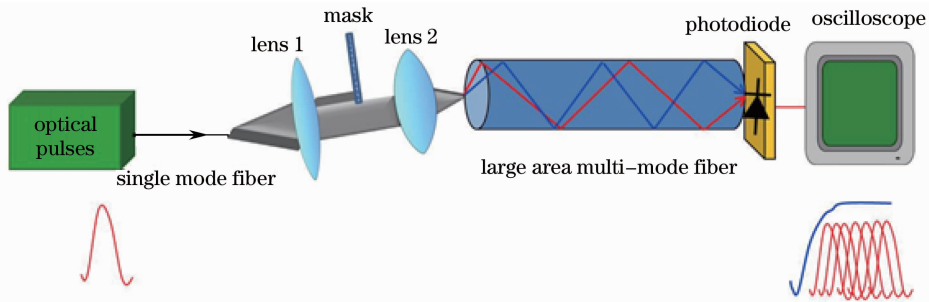


图7 基于模式色散的全光积分器的原理图

Fig. 7 Principle of all-optical integrator based on modal dispersion

在一般的激发条件下,基模总是比较容易获得更高的功率,而随着模式阶数的增大,功率总是呈现出下降的趋势。而对于普通的高斯光束,却是中心处光功率较强,随着半径的增大功率逐渐减小,因此,在一个遮光板的帮助下,可以通过改变入射光的角度和位置调整这两者之间的关系,用高斯光束中心区域来激发高阶模式,而使用空间中靠近边缘功率较低的部分来激发低价模式,最后让各个模式的光功率保持一致。这时,如果采用一个窄脉冲作为输入信号,则可以得到一个类似方形的冲击响应函数。这实际上就是一个全光积分器,方形的宽度即积分窗口的大小主要由模式色散决定。而且,该方法的优点之一是只需要考虑最终的模式功率分布,而不需要考虑不同模式的耦合问题,而模式耦合通常是多模光纤使用中的重要问题^[52-53]。

使用该方法可以在20 m长、数值孔径为0.37的多模光纤上获得将近400 ps的积分窗口。而且它是与光源的带宽和波长无关的,很容易与其他光逻辑器件结合,例如,与一个光微分器一起实现直流光的相位恢复。将具有相位调制的直流光通过一个光微分器时,相位的微分(瞬时的频率)会转化为功率的变化,对它进

行积分之后就可以将相位变化转换为功率的变化了。

由于全光卷积和光相关器的原理与积分器类似,因此,也可以用类似的方法来制作光卷积和光相关器。与积分器不同的是,它的冲击响应函数不再是方形,而是需要进行卷积或者是做相关运算的函数,这个函数要通过在空间上加强度掩模板改变模式的激励条件来实现。

4 结束语

得益于光纤器件的体积小、成本低和带宽很宽等优点,基于光纤色散的光信息处理技术发展很快,所涉及的领域也越来越多,逐渐成为国内外研究的热点。但基于色度色散的相关技术一个重要问题在于需要光纤的长度较大,而且需要使用宽带的光源。使用模式色散代替色度色散是一个可能的发展方向,它具有效率高、体积小、与光源的波长和带宽无关等优点,但不同模式的准确激励仍然是其应用中的一个重要限制因素。随着模式复用和 MIMO 技术的进步,不同模式的激励问题也会得到越来越多的研究和关注,随着该问题的解决,相信基于模式色散的光信息处理技术将会得到进一步的发展和更为广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Guoliang Li, Xuezhe Zheng, Jon Lexau, *et al.*. Ultralow-power high-performance Si photonic transmitter [C]. OFC, 2010, OMI2.
- 2 Jian Shuisheng. Photon latest technologies will develop the basis of low-carbon information society of human beings [J]. Optical Communication Technology, 2011, 35(8): 1-5.
简水生. 光子技术最新进展将为人类进入低碳信息社会奠定基础 [J]. 光通信技术, 2011, 35(8): 1-5.
- 3 Chi Jianfeng, Li Tangjun, Jia Nan, *et al.*. High-precision chromatic dispersion management completes 160 Gb/s OTDM signal 100-km stable error-free transmission [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105003.
池剑锋, 李唐军, 贾楠, 等. 高精度色散管理实现 160 Gb/s 光时分复用信号 100 km 稳定无误码传输 [J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105003.
- 4 Tan Zhongwei, Chen Zhiwei, Zhang Xiaoxing, *et al.*. The time-stretch analog-to-digital conversion based on chirped fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s106001.
谭中伟, 陈志伟, 张晓兴, 等. 基于啁啾光纤光栅的时间展宽模数转换系统 [J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s106001.
- 5 Yang Xiufeng, Peng Lei, Tong Zhengrong, *et al.*. Design of tunable bandpass photonic microwave filter based on multi-wavelength fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0206004.
杨秀峰, 彭磊, 童峥嵘, 等. 基于多波长激光器的带通微波光子滤波器设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0206004.
- 6 A L Gaeta, M A Foster, R Salem, *et al.*. Ultrafast waveform compression using a time-domain telescope [J]. Nature Photonics, 2009, 3(10): 581-585.
- 7 Ali M Fard, Shalabh Gupta, Bahram Jalali. Photonic time-stretch digitizer and its extension to real-time spectroscopy and imaging [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(2): 207-263.
- 8 K Goda, K K Tsia, B Jalali. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena [J]. Nature, 2009, 458(30): 1145-1149.
- 9 H Xia, C Wang, S Blais, *et al.*. Ultrafast and precise interrogation of fiber Bragg grating sensor based on wavelength-to-time mapping incorporating higher order dispersion [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(3): 254-261.
- 10 M Ferrera, Y Park, L Razzari, *et al.*. On-chip CMOS-compatible all-optical integrator [J]. Nature Commun, 2010, 1: 29.
- 11 Y Park, J Azana. Optical signal processors based on a time-spectrum convolution [J]. Opt Lett, 2010, 35(6): 796-798.
- 12 S H Kim, K Goda, A Fard, *et al.*. Optical time-domain analog pattern correlator for high-speed real-time image recognition [J]. Opt Lett, 2011, 36(2): 220-222.
- 13 Gerd Keiser. Optical Fiber Communications [M]. Noida: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2008.
- 14 Cao Wenhua, Wang Yong, Liu Songhao. Dispersion and nonlinearity compensation in optical fiber communication systems by optical phase conjugation incorporated pulse prechirp [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0906005.
曹文华, 王勇, 刘颂豪. 光纤通信系统中基于光学相位共轭和预啁啾的色散及非线性补偿研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0906005.
- 15 Tan Zhongwei, Ning Tigang, Liu Yan, *et al.*. Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-haul DWDM system [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2799-2803.

- 谭中伟, 宁提纲, 刘艳, 等. 基于啁啾光纤光栅的色散管理 [J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2799—2803.
- 16 B H Kolner, M Nazarathy. Temporal imaging with a time lens [J]. Opt Lett, 1989, 14(12): 630—632.
- 17 N K Berger, B Levit, S Atkins, *et al.*. Time-lens-based spectral analysis of optical pulses by electrooptic phase modulation [J]. Electron Lett, 2000, 36(19): 1644—1646.
- 18 C V Bennett, B H Kolner. Upconversion time microscope demonstrating $103\times$ magnification of femtosecond waveforms [J]. Opt Lett, 1999, 24(11): 783—785.
- 19 L K H Mouradian, F Louradour, V Messenger, *et al.*. Spectro-temporal imaging of femtosecond events [J]. IEEE J Quantum Electron, 2000, 36(7): 795—801.
- 20 M A Foster, Reza Salem, David F Geraghty. Silicon-chip-based ultrafast optical oscilloscope [J]. Nature, 2008, 456(7218): 81—84.
- 21 Li Bo, Tan Zhongwei, Zhang Xiaoxing. The simulation and analysis of time lens using cross phase modulation and four-wave mixing [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 014203.
- 李博, 谭中伟, 张晓兴. 利用交叉相位调制和四波混频制作的时间透镜的仿真分析 [J]. 物理学报, 2012, 61(1): 014203.
- 22 José Azaña, Naum K. Berger, Boris Levit, *et al.*. Simplified temporal imaging systems for optical waveforms [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(1): 94—96.
- 23 José Azaña, Miguel A Muriel. Real-time optical spectrum analysis based on the time-space duality in chirped fiber gratings [J]. IEEE J Quantum Electron, 2000, 36(5): 517—526.
- 24 Yoshitomo Okawachi, Reza Salem, Adrea R Johnson, *et al.*. Asynchronous single-shot optical sampling of high-repetition-rate signals using temporal magnification [C]. OFC, 2013, OTu2D.4.
- 25 José Azaña, Naum K Berger, Boris Levit, *et al.*. Time-to-frequency conversion of optical waveforms using a single time lens system [J]. Physica Scripta, 2005, 2005(T118): 115—117.
- 26 Zhongwei Tan, Yanling Chang, Wenhua Ren, *et al.*. Temporal-spectral Imaging of optical pulses using time lens [C]. SPIE, 2008, 7135: 71352E.
- 27 Jacob S Levy Alexander Gondarenko, Mark A Foster, Amy C Turner-Foster, *et al.*. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects [J]. Nature Photonics, 2010, 4(1): 37—40.
- 28 M. Fridman, Alessandro Farsi, Yoshitomo Okawachi, *et al.*. Demonstration of temporal cloaking [J]. Nature, 2012, 481(7379): 62—65.
- 29 George C Valley. Photonic analog-to-digital converters [J]. Opt Express, 2007, 15(5): 1955—1982.
- 30 K Goda, B Jalali. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements [J]. Nature Photonics, 2013, 7(2): 102—112.
- 31 Y Han, B Jalali. Photonic time-stretched analog-to-digital converter: fundamental concepts and practical considerations [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(2): 3085—3103.
- 32 A M Fard, B Buckley, S Zlatanovic, *et al.*. All-optical time-stretch digitizer [J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(5): 051113.
- 33 M H Asghari, B Jalali. Stereopsis-inspired time-stretched amplified real-time spectrometer (STARS) [J]. IEEE Photon Journal, 2012, 4(5): 1693—1701.
- 34 Eric D Diebold, Nick K Hon, Zhongwei Tan, *et al.*. Giant tunable optical dispersion using chromo-modal excitation of a multimode waveguide [J]. Opt. Express, 2011, 19(24): 23809—23817.
- 35 M L Filigrano, P Corredera Guillen, A Rodriguez-Barrios, *et al.*. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12, (1): 85—92.
- 36 L S Yan, Z T Zhang, P Wang, *et al.*. Fiber sensors for strain measurements and axle counting in high-speed railway applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(7): 1587—1594.
- 37 H Y Fu, H L Liu, H Y Tam, *et al.*. Novel dispersion compensating module based interrogator for fiber bragg grating sensors [C]. ECOC'2007, 2007.
- 38 Keisuke Goda, Kevin K Tsia, Bahram Jalali. Amplified dispersive Fourier-transform imaging for ultrafast displacement sensing and barcode reading [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(13): 131109.
- 39 K Goda, A Ayazi, D R Gossett, *et al.*. High-throughput single-microparticle imaging flow analyzer [J]. PNAS, 2012, 109(29): 11630—11635.
- 40 K Goda, D R Solli, B Jalali. Real-time optical reflectometry enabled by amplified dispersive Fourier transformation [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(3): 031106.
- 41 Kevin K Tsia, Keisuke Goda, Dale Capewell, *et al.*. Simultaneous mechanical-scan-free confocal microscopy and laser

- microsurgery [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(14): 2099–2101.
- 42 K Goda, A Mahjoubfar, C Wang, *et al.*. Hybrid dispersion laser scanner, *Scientific Reports*, 2012, 2: 445.
- 43 Y Park, J Azana. Ultrafast photonic intensity integrator [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(8): 1156–1158.
- 44 Y Park, J Azana. Optical signal processors based on a time-spectrum convolution [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(6): 796–798.
- 45 M C Cardakli, S Lee, A E Willner. Reconfigurable optical packet header recognition and routing using time-to-wavelength mapping and tunable fiber Bragg grating for correlation and decoding [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(5): 552–554.
- 46 Roderick Peter Webb, Xuelin Yang, Robert J Manning, *et al.*. All-optical binary pattern recognition at 42 Gb/s [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(13): 2240–2244.
- 47 F Li, Yongwoo Park, Jos Azana. Single-shot real-time frequency chirp characterization of telecommunication optical signals based on balanced temporal optical differentiation [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(18): 2742–2744.
- 48 A Pasquazi, Marco Peccianti, Yongwoo Park, *et al.*. Sub-picosecond phase-sensitive optical pulse characterization on a chip [J]. *Nature Photonics*, 2010, 5(10): 618–623.
- 49 L Grüner-Nielsen, Y Sun, J W Nicholson, *et al.*. Few mode transmission fiber with low DGD, low mode coupling and low loss [C]. *OFC/NFOEC*, 2012. PDP5A1.
- 50 Sercan Ö. Arık, Daulet Askarov, Joseph M Kahn. Effect of mode coupling on signal processing complexity in mode-division multiplexing [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(3): 423–431.
- 51 Tan Zhongwei, Wang Chao, Diebold, *et al.*. Real-time wavelength and bandwidth-independent optical integrator based on modal dispersion [J]. *Opt Express*, 2012, 20(13): 14109–14116.
- 52 K Jespersen, Z Li, L Grüner-Nielsen, *et al.*. Measuring distributed mode scattering in long, few-moded fibers [C]. *OFC/NFOEC*, 2012. OTh3I.4.
- 53 Keang-Po Ho, Joseph M Kahn. Statistics of group delays in multimode fiber with strong mode coupling [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29, (21): 3119–3218.