

一种基于时间透镜的 10 Gb/s 无色散补偿高速 光纤通信系统

何 舟^{1,2} 梅君瑶¹ 王传彪¹ 梁晓军¹ 叶 斐¹ 李 蔚¹ 黄德修¹

(¹华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074
²武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

摘要 基于光波时空二元性理论,研究了时间透镜和光脉冲在色散介质中传输的原理,提出了一种利用光脉冲频谱包络来传输光信号的方法:利用光脉冲的频谱包络在色散介质中保持不变的原理,在发射端用基于时间透镜的全光傅里叶逆变换器件将光脉冲的频谱包络转换到时域进行表示,从而得到新的传输符号;在接收端用基于时间透镜的全光傅里叶变换器件将原始光脉冲序列恢复。该传输系统可以消除色度色散、偏振模色散、时间抖动等线性畸变对光脉冲的影响。给出了全光傅里叶变换/逆变换器件的具体实现方法和 10 Gb/s-200 km 无预啾啾、无任何色散补偿的传输实验,验证了该方案的正确性与可行性,为高速光纤通信提供了一种新的方案。

关键词 光通信;傅里叶光学;时间透镜;全光傅里叶变换/逆变换;平方相位调制;色散

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0105007

A 10 Gb/s High-Speed Optical Communication System without Dispersion Compensation Based on Time Lens

He Zhou^{1,2} Mei Junyao¹ Wang Chuanbiao¹ Liang Xiaojun¹ Ye Fei¹
Li Wei¹ Huang Dexiu¹

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics / School of Optoelectronics Science and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan Research Institute of
Posts and Telecommunications, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Based on optical wave space-time duality theory, time lens and principle of optical pulse transmission in dispersive media are studied. A method have been proposed using pulses' spectral envelope to transmit optical signals. With the fact that pulses' spectral envelope will keep unchanged when propagating in dispersive medias, at the transmitter, an all-optical inverse Fourier transformation device based on time lens is used to transform the spectral envelope into time-domain, and a new transmitting symbol is obtained. An corresponding Fourier transformation device will be placed to recover original signals at the receiver. The transmission system presented can eliminate the chromatic dispersion, polarization mode dispersion (PMD), timing jitter and other liner distortions. Detailed implementations of optical Fourier transformation and inverse Fourier transformation are given. Besides, a 10 Gb/s-200 km optical transmission experiment without any dispersion compensations or pre-chirp verifies our transmission scheme, which offers a new method in high-speed optical communications.

Key words optical communications; Fourier optics; time lens; all-optical Fourier transform/inverse Fourier transform; quadratic phase modulator; dispersion

OCIS codes 060.1155; 050.1965; 070.2465; 070.7345

收稿日期: 2010-06-04; 收到修改稿日期: 2010-07-25

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328300)和国家自然科学基金(60772013)资助课题。

作者简介: 何 舟(1981—),女,博士研究生,主要从事光传输网络技术等方面的研究。E-mail: hezhou@wri.com.cn

导师简介: 李 蔚(1968—),女,教授,主要从事光纤通信技术和器件等方面的研究。

E-mail: weilie@hust.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

目前光纤通信系统中,单信道传输速率正在从 10 Gb/s,40 Gb/s 向 100 Gb/s,160 Gb/s 发展。在光纤中传输的光脉冲宽度更窄,频谱更宽,受色度色散、色散斜率、偏振横色散(PMD)和时间抖动等线性扰动的巨大影响,导致传输的光脉冲畸变,极大地限制了传输距离。

为了在光纤中实现高速率的信号传输,一般采用:1)精确的色散补偿技术和色散管理技术来控制色散^[1];2)光孤子技术进行色散和非线性效应之间的相互抑制,以保持信号波形在传输过程中保持不变^[2];3)正交频分复用(OFDM)技术的多载波调制和传输,将单信道信号调制到多个子载波上,降低每个子载波的速率,以提高每个子载波的色散容限^[3];4)多进制相位调制技术,一方面可以降低传输的比特率,一方面提高了信号抗非线性相位噪声的能力^[4];5)相干接收技术。上述的这些技术各有优缺点,有不同的应用场合,均需要复杂的光学系统,提高了系统的复杂度和成本。

虽然光脉冲在光纤中传输时,其波形会被色散畸变,但是在不考虑非线性效应或者非线性效应较弱的情况下,比如光纤中光信号功率较低、单信道传输或者信道数不多时,其频谱包络将保持不变。文献[5,6]利用这个原理以及高斯光脉冲的波形和频谱包络一样的原理,提出了一种在光纤传输系统的接收端采用基于时间透镜的全光傅里叶变换系统,将传输后未畸变的频谱包络转换到时域,从而消除了由光纤线性项引起的时域波形畸变,实现了 160 Gb/s 的传输。但是,该系统只能逐个脉冲地进行傅里叶变换,导致变换时间窗口小于 5 ps,实用性不好,并且只能用于高斯光脉冲的传输。文献[7]则是在系统的发射端和接收端同时采用傅里叶变换系统,导致接收到的信号序列与发射端是相反的,亦无实用价值。

本文从光脉冲的传输函数入手,推导出光脉冲在色散介质中的传输与空间中傍轴光线传输原理相对应;并根据光脉冲在光纤中传输的非线性薛定谔方程得到一种抵抗色度色散,PMD 以及时间抖动的新的光信号传输方法——频谱包络传输方法:利用基于时间透镜的全光傅里叶逆变换(OIFT)系统,把原始光脉冲的频谱形状转换到时域上进行表示,此时,输出信号的包络就会与输入信号的频谱相对应;然后再将该输出信号发射到光纤链路中进行传输,在传输过程中,输出信号的频谱包络,即原始

光脉冲,在色散介质中保持不变;在接收端,再通过全光傅里叶变换(OFT)将波形的频域包络转换到时域,就能恢复出原始光脉冲。

为了实现高速光纤通信系统,在发射端,用 OIFT 器件对 N 个光脉冲一起做傅里叶逆变换,将其频谱包络转换为时域以得到新的传输波形,新波形的速率降为原来信号速率的 $1/N$,抗色散能力大大提高;同时傅里叶变换/逆变换的时间窗口扩大到文献[5~7]的 N 倍,在器件的实现上也变得简单可行。最后进行基于时间透镜的 10 Gb/s 强度调制-直接检测(IM-DD)光通信实验,并得到了预期结果,进一步验证了时间透镜在提高光纤通信系统的色散容限中的可行性。

基于光波时空二元性理论探讨了基于时间透镜的 OFT/OIFT 的实现方法。而时间透镜可通过以下几种方法实现:1)光电相位调制^[8];2)非线性晶体的和频、差频;3)光纤中的交叉相位调制^[9]。其中基于光电相位调制器的时间透镜较容易实现,且性能稳定。采用该方法,提出用正弦波替代抛物线来驱动光电相位调制器实现时间透镜。

2 光波时空二元性理论光脉冲在光纤中传输时频域包络不变原理

光脉冲在光纤中传输时,满足非线性薛定谔方程^[10]

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{N} + \hat{D})A, \quad (1)$$

式中 \hat{D} 是光脉冲在光纤中传输时的色散效应, \hat{N} 是非线性效应,可表示为

$$\begin{cases} D = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial T^3}, \\ N = i\gamma \exp(-\alpha z) |A|^2 \end{cases} \quad (2)$$

当忽略非线性项作用时,非线性薛定谔方程变为

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A(z,t)}{\partial t^3}, \quad (3)$$

对(3)式进行傅里叶变换得到

$$\frac{\partial \tilde{A}(z,\omega)}{\partial z} = i \frac{\beta_2}{2} \omega^2 \tilde{A}(z,\omega) - i \frac{\beta_3}{6} \omega^3 \tilde{A}(z,\omega), \quad (4)$$

式中 ω 表示频率,与时间 t 相对应; $\tilde{A}(z,\omega)$ 为 $A(z,t)$ 的傅里叶变换形式,可表示为

$$\tilde{A}(z,\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(z,t) \exp(j\omega t) dt. \quad (5)$$

此时,(4)式的解为

$$\tilde{A}(z, \omega) = \tilde{A}(0, \omega) \exp \left[i \left(\frac{1}{2} \beta_2 \omega^2 - \frac{1}{6} \beta_3 \omega^3 \right) z \right], \quad (6)$$

从(6)式可得

$$|\tilde{A}(z, \omega)|^2 = |\tilde{A}(z, 0)|^2, \quad (7)$$

(6)式表明,光纤中的线性项改变了光脉冲的频谱相位;转换到时域,会改变时域波形,且改变量依赖于光脉冲的频率及其传输距离。但是,这种频谱相位变化不会影响脉冲频谱包络,因为脉冲频谱包络满足(7)式,即传输了距离 z 后,信号的时域波形会畸变,但是其频域包络保持不变,线性项对频域包络无损伤。不考虑非线性效应或者非线性效应较弱的情况下,如光纤中光信号功率较低、单信道传输或者信道数不多时,如果在接收端将原始光脉冲进行傅里叶逆变换,将脉冲频域波形变换到时域,则可以消除原始光脉冲受线性项的畸变,在接收端应用 OFT 可以很好地恢复出原始信号。文献[6~8]就是利用这个原理实现光脉冲在光纤中的传输。

基于上述原理,提出了一种基于 OIFT/OFT 的频谱包络传输系统,如图 1 所示。

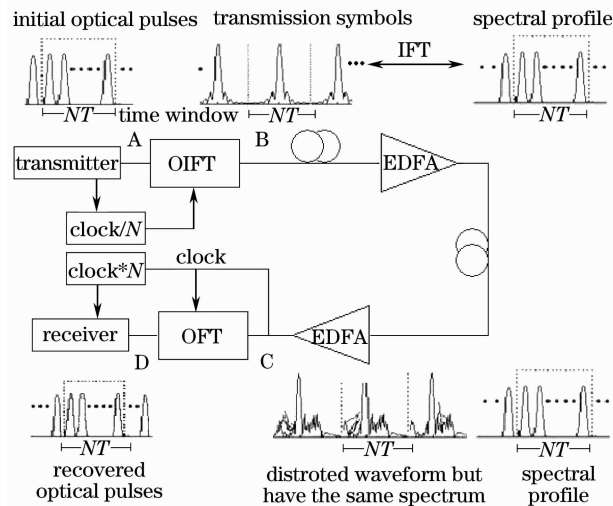


图 1 基于 OIFT/OFT 的光频域包络传输系统
Fig. 1 OIFT/OFT based optical frequency domain profile transmission system

该传输系统主要是利用频谱包络来传输信息,在发射端,首先利用 OIFT 器件将原始光脉冲序列每 N 个一组进行傅里叶逆变换,将原始光脉冲序列的频谱形状转换到时域上进行表示,得到新的传输符号。此时,新传输符号的频域包络与原始光脉冲序列的波形一致。传输符号进入光纤中传输时,考虑光纤的线性畸变项(如色度色散, PMD 和时间抖动等),传输符号本身将会发生畸变,但其频谱包络

保持不变,即原始光脉冲序列的波形不会改变。这样在接收端,利用 OFT 器件对畸变了传输符号进行傅里叶变换,得到其未畸变的频谱包络,从而恢复出原始光脉冲序列,因而该系统具有很好的抗色散能力。

这里所提出的传输系统与文献[6,7]的不同之处在于同时应用了傅里叶逆变换/变换器件;与文献[8]相比,在发射端用傅里叶逆变换器件,而在接收端用傅里叶变换器,而文献[8]的发射端和接收端均为傅里叶变换器,所以不能恢复出原始信号。

3 空间成像及时域傅里叶变换的结构和具体实现

在傍轴近似条件下,透镜将位于远场的衍射图样成像到透镜的像方焦平面处,在透镜的像方焦平面上得到的衍射光场的强度,除了一个常数因子,就等于透射光场复振幅的傅里叶变换。透镜实际上起到了傅里叶变换的作用。光学傅里叶变换通常是由单个或多个透镜组成的傅里叶变换系统来实现。

下面将空间域中的透镜类比到时间域中。空间域中透镜的作用是为空间分布的光斑提供一个随着空间位置,即 x 轴和 y 轴方向位置平方成正比的二次空间相移。对应地,时间透镜用于提供与时间平方成正比的相位调制。而基于时空二元性理论^[11],傍轴光在空间中的传播与窄带光脉冲在色散介质中的传播具有相同的性质。所以可以应用时间透镜和色散介质实现时域的傅里叶变换。但是与空间成像不一样的是,时域成像中的二阶色散可正可负,所以时间透镜可以用来实现被测信号在时域和频域之间的相互转换,如图 2 所示。

其中色散介质用光纤布拉格光栅(FBG)来实现,FBG 的脉冲响应函数为

$$h = \exp \left(-i \frac{1}{2\beta_2 z} t^2 \right), \quad (8)$$

式中 $\beta_2 z$ 为 FBG 的累积二阶色散。

如前所述,时间透镜,也就是二次相位调制,它的作用相当于空间域中透镜的作用。在实现 OIFT/OFT 过程中,通常使用光电相位调制器来实现^[9],如铌酸锂(LiNbO₃)调相器(PM),其调制函数为

$$\exp \left(i \frac{1}{2\beta_2 z} t^2 \right), \quad (9)$$

则图 2 中 OIFT/OFT 的数学描述为

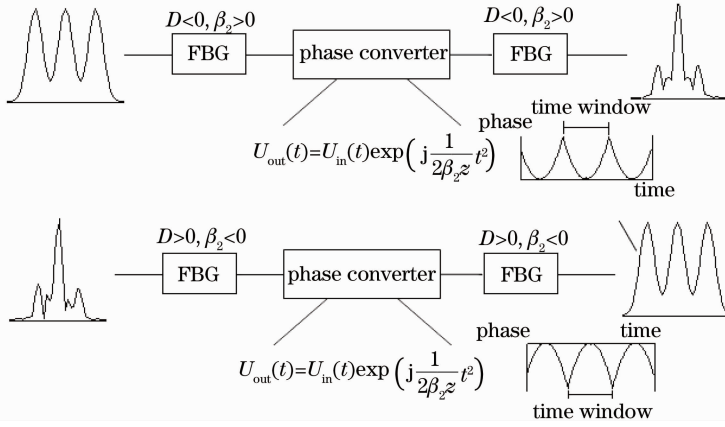


图 2 OIFT(上)与 OFT(下)结构框图

Fig. 2 Architectures of OIFT device (upper) and OFT device (lower)

$$\left\{ \left[f(t) * \exp\left(-i \frac{1}{2\beta_2 z} t^2\right) \right] \exp\left(i \frac{1}{2\beta_2 z} t^2\right) \right\} * \exp\left(-i \frac{1}{2\beta_2 z} t^2\right) = \mathcal{C}' \mathcal{F}\left[\frac{t}{(-\beta_2)z}\right], \quad (10)$$

式中 $f(t)$ 表示输入光脉冲信号, $*$ 表示卷积。当 FBG 的二阶色散 $\beta_2 > 0$ 时, (10) 式表示的是把频谱的形状转换到时域上进行表示的傅里叶逆变换过程; 当 $\beta_2 < 0$ 时, (10) 式表示的是傅里叶变换过程。

实际中, 所使用的 LiNbO₃ 调相器很难完全实现二阶相位调制, 但是可以采用一个正弦或余弦函数来进行调制, 在正弦或者余弦调制的中心附近就可以近似为二阶相位调制。对于余弦信号 $\cos(\omega_m t)$, 其中 ω_m 是余弦信号的角频率, 它与余弦信号的频率 f_m 具有如下关系: $\omega_m = 2\pi f_m$, f_m 为图 2 中时间窗口的导数。 τ_d 为输入脉冲宽度, 假设 $\omega_m \tau_d$ 非常小, 可以在余弦调制的中心附近取二阶近似得

$$\cos(\omega_m t) = 1 - \frac{(\omega_m t)^2}{2}, \quad (11)$$

而一个典型的 LiNbO₃ 调相器通常有一个光输入端口, 一个光输出端口和电驱动口, 其传输函数为

$$h_{PM}(t) = \exp\left[j\pi \frac{V(t)}{V_\pi}\right], \quad (12)$$

式中 V_π 为 PM 的半波驱动电压。要 PM 实现二阶相位调制, 从 (9), (12) 式可得出调相器的驱动电信号为

$$V(t) = \frac{1}{2\beta_2 z} \frac{V_\pi}{\pi} t^2, \quad (13)$$

结合 (11), (13) 式, 此时调相器的电驱动信号可表示为

$$V(t) = \frac{1}{2\beta_2 z} \frac{V_\pi}{\pi} \frac{2[1 - \cos(\omega_m t)]}{\omega_m^2}. \quad (14)$$

4 10 Gb/s 无色散补偿光传输实验及其结果

基于图 2 进行了 10 Gb/s-200 km 无色散补偿的 IM-DD 光传输实验, 实验框图如图 3 所示。

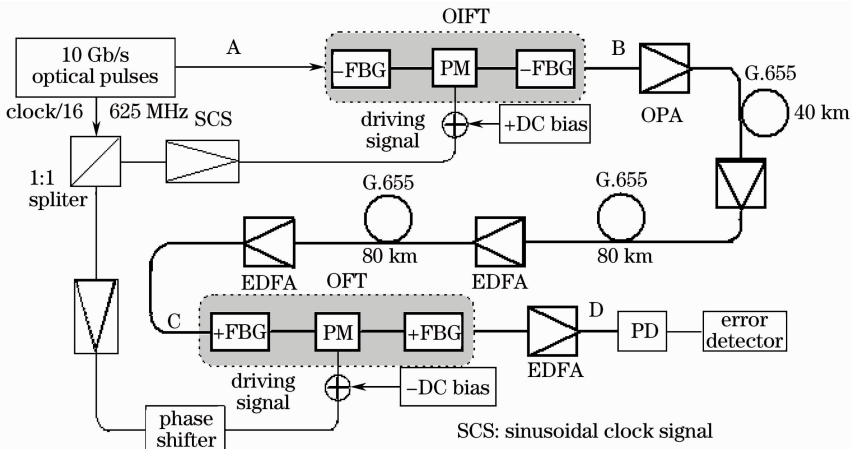


图 3 基于时间透镜的光通信系统

Fig. 3 Optical communication system based on time lenses

首先,从发射端输出的光脉冲序列(比特流为 10 Gb/s,时间周期 $T=100$ ps)16 个为一组送入 OIFT 中做傅里叶逆变换,得到新的传输符号。此时,傅里叶逆变换的时间窗口是 $16T$,即 1600 ps。OIFT 后接前置放大器(OPA)补偿 OIFT 的光损耗。之后,新的传输符号依次进入 40,80 和 80 km 的 G.655 光纤中进行传输,每段光纤后均接掺铒光纤放大器(EDFA)完全补偿光纤损耗。在接收端,传输符号经过 OFT 器件,恢复出原始光脉冲序列,最后送入接收机进行判决探测。系统的时钟信号被 16 分频后,得到 625 MHz 的正弦波,正弦波再被均分为两路:其中一路经过放大电路,与一个正的直流(DC)偏置一起,作为 OIFT 中调相器的电驱动信号;另一路经过放大移相后与一个负的 DC 偏置一起,作为 OFT 中铌酸锂调相器的电驱动信号。

实验中采用的具体参数为:光脉冲源产生的光

脉冲中心波长为 1550.12 nm,时间窗口长度 $16T=1600$ ps。从发射机提取的时钟信号经 16 分频后得到 625 MHz 的正弦波,其经过放大偏置后,用作 OIFT 器件中调相器的驱动信号。OIFT 中,两个 FBG 的累积色散均为 $D_z = -3400$ ps/nm,其中色散参数 D 与二阶色散 β_2 存在如下关系: $D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2$ 。此时,625 MHz 正弦波的放大倍数及直流偏置大小可由(14)式计算得到。相应地,OFT 器件中两个 FBG 的累积色散均为 $D_z = 3400$ ps/nm,同理将正弦波放大至要求值,再经过移相和偏置来驱动 OFT 器件中的调相器。传输过程中光纤总长度为 200 km,整个传输过程中无色散补偿。由于发射端的光脉冲源是无预啁啾的激光器,因而对于 10 Gb/s 的传输速率,在无色散补偿情况下是无法传输 50 km 以上的。实验结果如图 4 所示。

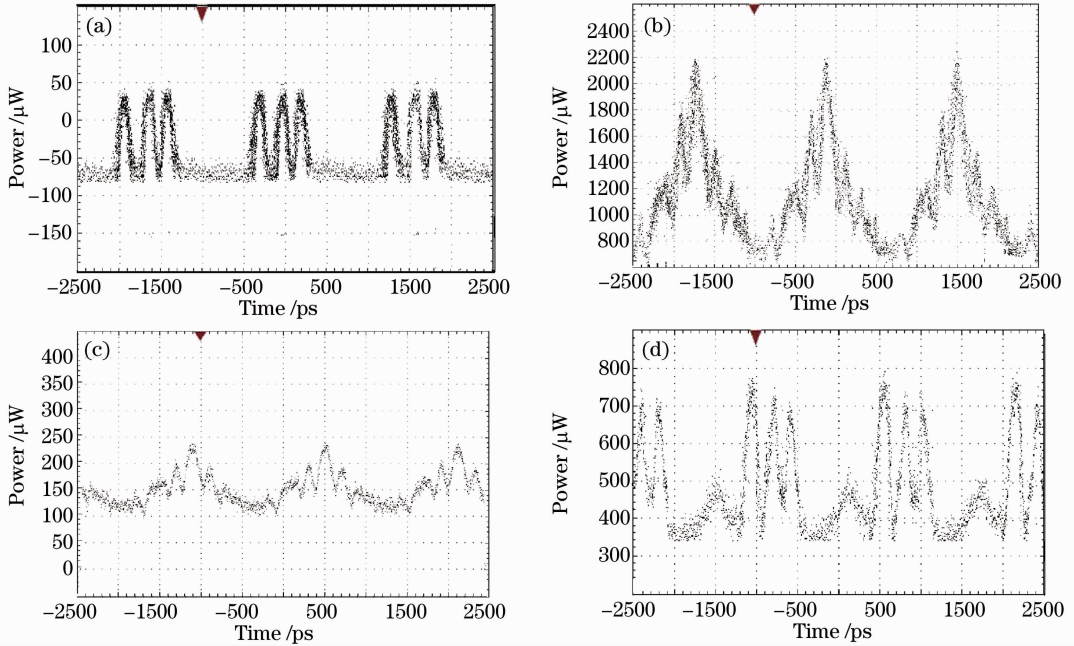


图 4 基于时间透镜的光通信系统中不同位置的波形图

Fig. 4 Pulse shape at different places of optical communication system based on time lenses

图 4(a)为 10 Gb/s 的光脉冲源发射出的原始光脉冲序列,该光脉冲序列是周期性的,每个周期的码型设置为“0000010101000000”(每 16 个光脉冲为一组);图 4(b)为原始光脉冲序列经过 OIFT 器件后得到的传输符号;图 4(c)为传输符号在无色散补偿的光纤中传输了 200 km 后的波形;图 4(d)为传输后的符号经过 OFT 器件后恢复出的脉冲序列。从图 4(d)可以看出,传输符号在无色散补偿的光纤中传输一段距离后,尽管传输符号发生了畸变,但其频谱包络却基本保持不变,所以在接收端经过 OFT

变换后,可以恢复出原始的光脉冲序列,这说明该光通信系统有很好的抗色散功能。此外,与基于电子芯片的光 OFDM 系统相比较,该 OFDM 系统具有很好的实时性。

对图 3 所示传输系统的误码率(BER)进行测试,并将其与“背靠背”(back-to-back)系统的误码率及 IM-DD 系统的误码率进行了比较,如图 5 所示。其中 IM-DD 系统比特流亦为 10 Gb/s,传输链路与图 3 所示相同,亦传输了 200 km。比较图 3 所示基于时间透镜的传输系统误码率与 IM-DD 系统的误

码率发现,基于时间透镜的传输系统的功率代价降低了 3 dBm。

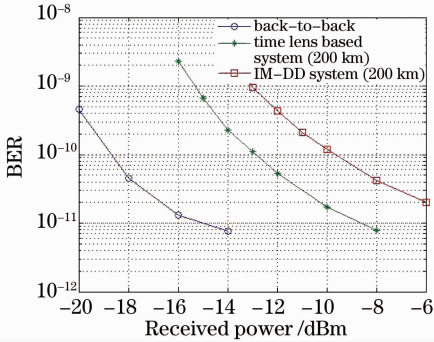


图 5 不同传输系统的误码率

Fig. 5 BER measurements of different transmission systems

由上面实验结果得出,基于时间透镜的实时傅里叶变换/逆变换器件可以有效地用于光通信中提高系统的色散容限。由于实验条件的限制,仅进行了 10 Gb/s 的光传输实验。处理好 OIFT/OFT 器件中的脉冲宽度、时间窗口、色散介质的色散参数以及时间透镜的电驱动信号之间的关系,时间透镜可用于更高速率、更远距离的光传输系统中,以解决高速光通信系统的色度色散, PMD, 时间抖动及高阶色散等一系列问题。

5 结 论

通过光脉冲在色散介质中的传输与光束在傍轴光线上传输的一致性,将空域-时域中的透镜相对应,可在时域实现实时的全光傅里叶变换/逆变换。

将基于时间透镜的傅里叶逆变换应用于高速光通信系统的发射端,将原始光脉冲序列每 N 个一组送入傅里叶逆变换器件中,此时原始光脉冲的频谱形状被转换到时域上进行,得到了新的传输符号并进入光纤中进行传输。传输符号的频谱包络就对应发射机输出的原始光脉冲序列。传输过程中仅考虑光纤的线性项作用,虽然传输符号发生畸变,其频谱包络却基本保持不变。在接收端,用基于时间透镜的全光傅里叶变换器件对传输后的符号进行傅里叶变换,得到符号的包络与原始光脉冲序列相对应。该传输系统可以提高高速光通信系统中的色散容限,并通过实验验证了无色散补偿、无啁啾的

10 Gb/s-200 km 信号传输。

致谢 感谢加拿大 McMaster 大学电子工程系李洵教授提供的理论指导,感谢光迅科技股份有限公司提供的 FBG。

参 考 文 献

- Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi *et al.*. Digitalized optical coherent detection of differential phase shift keying signal and chromatic dispersion compensation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 471~476
冯勇, 闻和, 张汉一等. 差分相移键控信号的数字相干光检测与色散补偿研究与实现[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 471~476
- Meng Xiaobo, Zhou Jun, Ren Chunyang *et al.*. Effect of high-order dispersion on propagation of optical soliton and soliton couple[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(6): 638~641
孟小波, 周骏, 任春阳等. 高阶色散对光孤子及孤子对传输的影响分析[J]. *激光技术*, 2009, **33**(6): 638~641
- Wei Li, Xiaojun Liang, Weidong Ma *et al.*. A planar waveguide optical discrete Fourier transformer design for 160 Gb/s all-optical OFDM systems[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2010, **16**(1): 5~11
- Li Yuan, Wang Kai, Li Wei *et al.*. A novel all optical orthogonal frequency division multiplexing system and devices based on an optical coupler[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1022~1027
李源, 王凯, 李蔚等. 一种基于光耦合器的全光正交频分复用系统和器件[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1022~1027
- H. Toshihiko, N. Masataka. Optical adaptive equalization of high-speed signals using time-domain optical Fourier transformation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(7): 2530~2540
- T. Hirooka, K. I. Hagiuda, T. Kumakura *et al.*. 160 Gb/s-600 km OTDM transmission using time-domain optical Fourier transformation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(24): 2647~2649
- Toshikazu Sakano, Kentaro Uchiyama, Ippei Shake *et al.*. Large-dispersion-tolerance optical signal transmission system based on temporal imaging [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(8): 583~585
- Dong Yang, Shiva Kumar. Realization of optical OFDM using time lenses and its comparison with optical OFDM using FFT[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(20): 17214~17226
- Toshihiko Hirooka, Masataka Nakazawa. All-optical 40-GHz time-domain Fourier transformation using XPM with a dark parabolic pulse [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(22): 1869~1871
- Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics, Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*. Transl. Third edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 29~30
Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方译. 第三版北京: 电子工业出版社, 2002. 29~30
- Brian H. Kolner. Space-time duality and the theory of temporal imaging [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8): 1951~1963