

文章编号: 0258-7025(2010)04-1022-06

# 一种基于光耦合器的全光正交频分复用系统和器件

李 源<sup>1,2</sup> 王 凯<sup>1</sup> 李 蔚<sup>1</sup> 梁晓军<sup>1</sup> 乔耀军<sup>3</sup> 王 伟<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

<sup>2</sup> 华中师范大学计算机科学系, 湖北 武汉 430079

<sup>3</sup> 北京邮电大学教育部光通信与光波重点实验室, 北京 100876

<sup>4</sup> 中国船舶重工集团公司第七〇一研究所, 湖北 武汉 430064

**摘要** 提出了一种基于 SiO<sub>2</sub> 平板波导技术,由两端口的定向耦合器、移相器和光延时线构成的全光离散傅里叶变换器(ODFT)。研究了该器件的原理,设计和优化了一个 4×40 Gb/s 的全光傅里叶变换芯片,并且给出了器件的设计细节和实现方法。在此基础上又设计了一个 4×40 Gb/s 的全光正交频分复用(OFDM)系统,消除了系统中的电子瓶颈。用 VPItransmissionMaker(VPI)对该系统进行了仿真,并与采用幅度调制和差分相位调制方式的系统进行了对比。结果表明,基于全光傅里叶变换器的全光正交频分复用系统性能优越,经过 320 km 的传输后,误码率(BER)小于 3×10<sup>-11</sup>。全光正交频分复用是一种有潜力的高速长途传输技术。

**关键词** 光通信;全光正交频分复用;全光离散傅里叶变换;耦合器;移相器;延时;峰值平均功率比

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1022

## A Novel All Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing System and Devices Based on an Optical Coupler

Li Yuan<sup>1,2</sup> Wang Kai<sup>1</sup> Li Wei<sup>1</sup> Liang Xiaojun<sup>1</sup> Qiao Yaojun<sup>3</sup> Wang Wei<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Department of Computer Science, Huazhong Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China

<sup>3</sup> Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

<sup>4</sup> China Shipbuilding Industry Corporation No.701 Research Institute, Wuhan, Hubei 430064, China

**Abstract** An all-optical discrete Fourier transformer (ODFT) based on SiO<sub>2</sub> planar lightwave circuit (PLC) technologies and made up of optical directional couplers, phase shifters, and optical delay lines is designed. Whose principle is investigated and an ODFT chip operating at 4×40 Gb/s is designed and optimized. Detailed designation and implementation methods are also given. Based on that, an all-optical orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) transmission system is designed, eliminating the processing speed introduced by electronics as in conventional OFDM systems. The VPItransmissionMaker V7.6 is used to evaluate system performances. Simulation results prove the effectiveness of the all-optical OFDM system. The bit error rate (BER) is lower than 3×10<sup>-11</sup> after transmission through 320 km in the optical fibers. All-optical OFDM has been treated as a good candidate for the long-haul and high-speed transmission technology.

**Key words** optical communications; all optical orthogonal frequency division multiplexing; all optical discrete Fourier transformation; coupler; phase shifter; time delay; peak-to-average power ratio

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(60772013)、国家 863 计划(2009AA03Z408)和北京邮电大学教育部光通信和光波重点实验室开放性课题资助项目。

作者简介: 李 源(1971—),男,博士研究生,主要从事通信技术方面的研究。E-mail:liyuan710505@tom.com

导师简介: 李 蔚(1968—),女,教授,主要从事光纤通信技术与器件的研究。E-mail:weilee@hust.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

正交频分复用(OFDM)属于多载波通信的技术,它具有很高的频谱利用率色散容限。随着 Internet 和多媒体业务的发展,光通信系统传输速率提高到100 Gb/s甚至更高<sup>[1, 2]</sup>。OFDM 的优点使得它在光传输领域受到重视,被认为是最有发展前景的高速长途传输技术之一。

现有的光 OFDM 技术中<sup>[3~6]</sup>,反向快速傅里叶变换/快速傅里叶变换(IFFT/FFT)电路的信号处理速率是系统传输的最大瓶颈,并且,这种系统要使用复杂的数模(D/A)转换器和模数(A/D)转换器,对器件和成本的要求高。在基于全光离散傅里叶变换器(ODFT)的 OFDM 系统中,光信号可以快速、并行处理,进而能消除信号处理部分的电子瓶颈。ODFT 的实现是全光 OFDM 的核心问题。

文献[7]提出了一种采用移相器与光延时相结合实现 OFDM 光通信系统的方案。利用光移相器阵列和光延时线相结合来实现全光离散傅里叶逆变换(IDFT)和离散傅里叶变换(DFT)。这是一种巧妙的方案,不过原文存在一个问题,就是移相器阵列的取值不合适(本质上是离散化变量的取值不合适),使得传递矩阵不满秩,接收端不能正确恢复出信号。

文献[5]提出了基于光纤光栅和环形器的编解码方法,已调制的光脉冲经过环形器,入射到反射型光纤光栅,不同的反射光经历了不同的延时,同时附加了不同的相位变化。这是用另一种方法实现了全光 IDFT 和 DFT。

如果子载波数目为  $N$ ,那么文献[7]方案的移相器阵列的数目就是  $N^2$ ,文献[5]方案需要  $N$  个环形器和光纤光栅的组合,器件结构复杂,规模比较大。本文提出了一种由光耦合器和移相器组成光 FFT 基本单元的思想,这种基本单元的互连加上延时可以构成全光离散傅里叶变换器件,器件规模比文献[5,7]的小了很多,而且不需要复杂的 D/A 和 A/D 转换器。

## 2 基于光耦合器的全光 OFDM 系统

### 2.1 系统原理与结构

单个 OFDM 符号可以表示为

$$x_l(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_{l,k} \exp(i2\pi k \Delta f t), \quad (1)$$

式中  $X_{l,k}$  为不同信道上的数据,与  $\exp(i2\pi k \Delta f t)$  相乘就是调制到不同频率的子载波上,再相加就形成了 OFDM 符号。从数学上看,这是一个傅里叶级数,那么

每项的系数  $X_{l,k}$  就可表示为

$$X_{l,k} = \frac{1}{T} \int_T x_l(t) \exp(-i2\pi k \Delta f t) dt, \quad (2)$$

(1),(2)式经过离散化,变为

$$x_l(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X_{l,k} \exp\left(i \frac{2\pi}{N} nk\right),$$

$$X_{l,k} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_l(n) \exp\left(-i \frac{2\pi}{N} nk\right), \quad (3)$$

这正是离散傅里叶变换对,说明 OFDM 可以用 IDFT 和 DFT 实现。

基于 DFT 的全光 OFDM 系统如图 1 所示。

在发射端,激光器产生连续光,时间门把连续光切成占空比为 1/4 的脉冲,之后分成 4 路,每一路都通过一个调制器。基带数据经过串/并转换,变成 4 路比特流,再分别调制到 4 路光脉冲上,调制方式是强度调制。然后经过全光 IDFT(OIDFT),形成光 OFDM 符号,耦合入光纤传输。如果输入的激光器为 1552.52 nm,那么经过 OIDFT 后产生的 4 路正交子载波的中心波长分别为 1552.36,1552.04,1553.00 和 1552.68 nm,4 路串并转换后的数据就调制到这 4 个子载波上,然后合波后送入光纤中传输。

在接收端,光 OFDM 符号先经过全光 DFT,之后通过时间门。时间门只让有意义的光信号通过,而去除了无意义的信号,这样可以消除峰均比过高的信号的影响。在时间门之后用光电二极管进行直接检测,然后抽样判决、并/串转换。其中时间门的通断是通过接收端数据时钟恢复电路的输出同步时钟信号来控制的。

### 2.2 全光离散傅里叶变换器件的实现

考察二输入二输出耦合器,其传输性质描述为<sup>[8]</sup>

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

先后做替换  $\alpha_1$  变成  $-j\alpha_1$  和  $-j\beta_1$  变成  $\beta_1$ , (4) 式变为

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

对(3)式的变换对中取  $N=2$ ,如果不考虑矩阵外面的常系数,(5)式与它们相同,说明可以基于耦合器构造  $2 \times 2$  的离散傅里叶变换器件。

在上面的两个替换中,可以用  $-\pi/2$  的相移来实现与  $-j$  相乘。具体地,就是在耦合器输入端之前和输出端之后分别加入  $-\pi/2$  的相移,如图 2 所示。把光耦合器和移相器的组合作为一个整体,成为全光 DFT 的基本单元,用一个二输入二输出的圆圈表示。

在图 2 的基本单元的基础上,可以组合出  $4 \times 4$

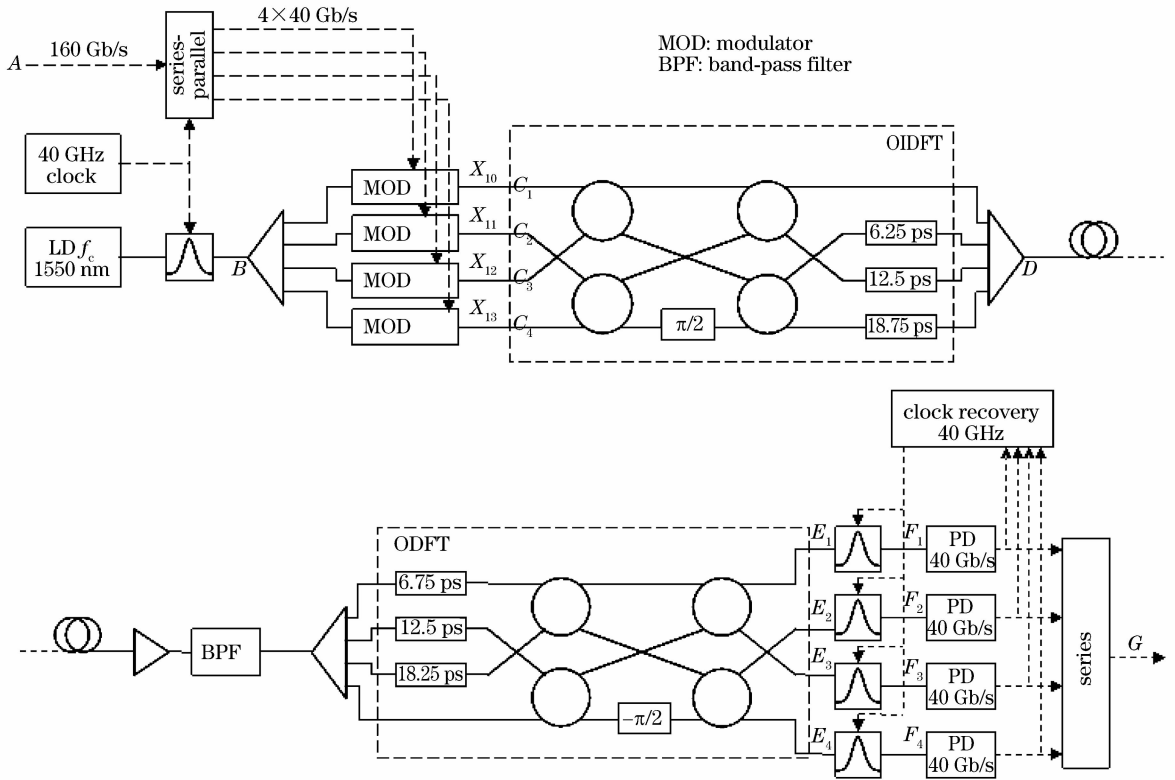


图 1 采用耦合器加移相器的全光 OFDM 系统

Fig. 1 All optical OFDM system based on couplers and phase shifters

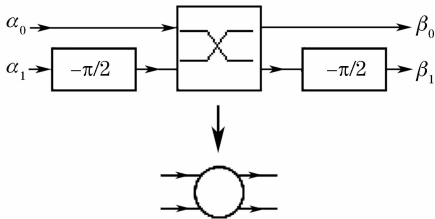


图 2 光耦合器加移相器构成全光基本离散傅里叶变换单元

Fig. 2 Basic all optical DFT unit consisting of a coupler and phase shifters

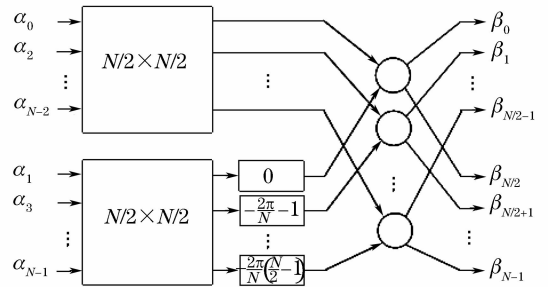


图 4 N x N 的全光 DFT 器件

Fig. 4 Schematic diagram of an N x N all optical DFT processor

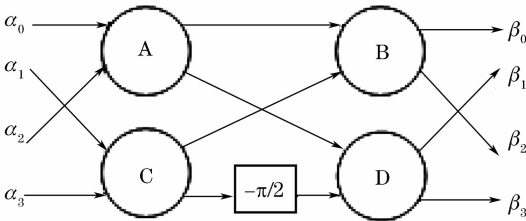


图 3 4 x 4 的全光 DFT 器件

Fig. 3 4 x 4 all optical DFT processor

的全光 DFT 器件,如图 3 所示。相应地,4 x 4 的全光 IDFT 器件就是把图 3 中的 -π/2 移换成 π/2。

把电 FFT 的蝶形单元与图 2 的基本单元对比,运用 FFT 算法的思想,可以将 N x N 的全光 DFT 器件用图 4 的结构实现。在文献[8]中也提供了类

似的图形,但存在两个问题:没有把输入按标号分成奇偶两部分;缺少移相器。

光移相器的实现方法有很多,比如波片、光纤光栅等。在提出的全光 OFDM 系统中,最好的实现形式是平面光波导。在铌酸锂波导上加电极,电产生热,利用波导的热光效应,可产生相位变化。

### 2.3 时间门的作用与实现

OFDM 光信号到达接收端之后,通过 Y 型耦合器分为 4 路。每路分别经过不等的时延,作为全光 DFT 的输入,4 路的信号如图 5 所示。

观察可以发现,只有在黑色矩形框表示的长度为 τ 的时间段内,对应的才是同一个符号周期内信号的顺序排列,才有可能正确恢复出数据。其他长

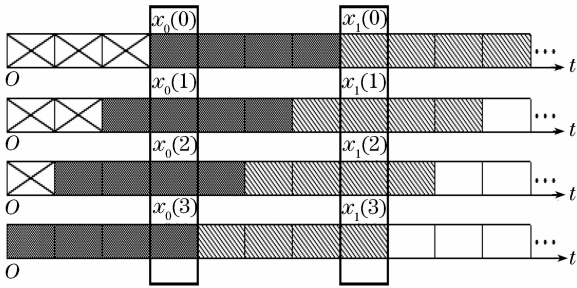


图 5 接收端延时后的 4 路光信号

Fig. 5 Four received optical signals after time delaying

度为  $3\tau$  的时间段内的信号, 是不同符号周期的信号, 形式上也做 DFT, 得到的结果是没有意义的。所以, 时间门在这里就是让有意义的时间片的信号通过, 而过滤掉无意义的时间片的信号。可以利用电光效应在波导上实现。

### 2.4 系统性能的仿真分析

为了验证所提出的基于光耦合器的全光离散傅里叶变换器件及其所组成的全光 OFDM 系统的性能, 在 VPI 平台上进行了仿真, 框图和仿真参数如图 6 和表 1 所示。

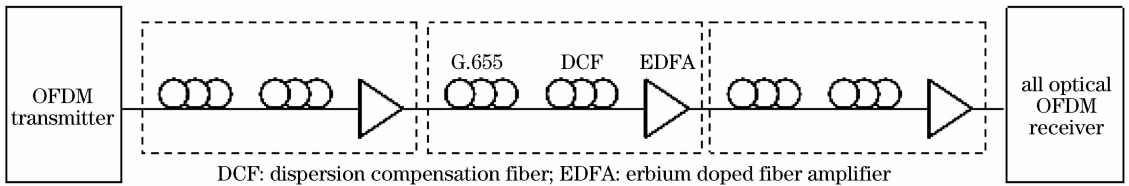


图 6 全光 OFDM 系统仿真框图

Fig. 6 Schematic diagram of the all optical OFDM simulation system

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Fiber dispersion (G. 655) / [ps/(nm · km)]	4. 6651	System capacity / (Gb/s)	160
Dispersion slop (G. 655) / [ps/(nm <sup>2</sup> · km)]	0. 0114	Number of subcarriers	4
Fiber length (G. 655) / km	80	Bit rate of subcarriers / (Gb/s)	40
Fiber dispersion (DCF) / [ps/(nm · km)]	-90. 0	Transmission distance / km	320
DCF fiber length / km	4. 15	Gain of EDFA / dB	13. 5

仿真结果: 在这个系统上实现了速率为 160 Gb/s 的正确传输, 接收端的误码率为  $3. 076 \times 10^{-11}$ 。系统中各点得到的图形及说明如下所述。

各个子载波的信号是 4 个不同时间片上的脉冲在时域上组合在一起形成的, 在 D 点。但没法同时得到各个子载波的功率谱, 因为在 D 点, 4 个子载波

在频域上是叠加在一起的。所以用如下方法得到: 断开  $C_2, C_3, C_4$  处的连接, 得到子载波 1 在 D 点的功率谱; 断开  $C_1, C_3, C_4$  处的连接, 得到子载波 2 在 D 点的功率谱; 子载波 3 和 4 也是如此。4 个子载波的功率谱如图 7 所示。

DFT 满足条件  $T_s \Delta f = 1/N$ , 所以可以得出子

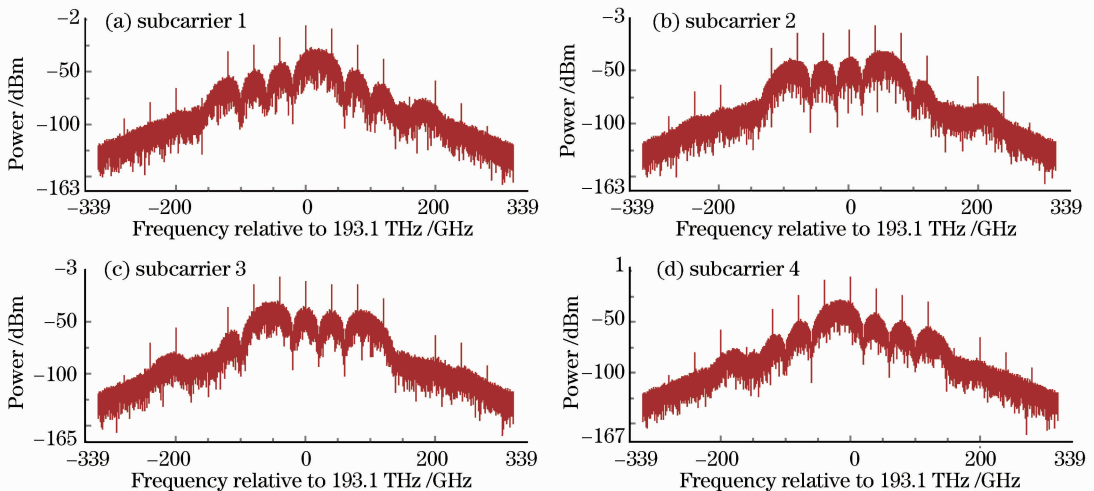


图 7 4 个子载波的功率谱

Fig. 7 Power spectrums of four subcarriers

载波间的频率间隔为  $\Delta f = 1/(NT_s) = R_b/N = 40$  GHz, 其中  $R_b$  为总比特率。由  $\lambda = c/f$  可得  $\Delta\lambda = (c/f_c^2)\Delta f = 0.32$  nm。

这 4 路信号通过 Y 型耦合器叠加在一起形成 OFDM 符号波形, 耦合入光纤, 其时域图如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 不同时间片的码元能达到的峰值有大有小, 实际传输的信号就是忽大忽小的。这可以用峰值平均功率比 (PAPR) 来表征, 定义为<sup>[9,10]</sup>  $10\lg \frac{\max[|x_l(n)|^2]}{E[|x_l(n)|^2]}$ 。对于图中信号, 当 4 个子载波的信号以相同相位求和时, 得到的信号的峰值功率就是平均功率的 4 倍, PAPR 为 6 dB。

经过全光 DFT, 到达时间门之前的各路光信号

的时域如图 9 所示。

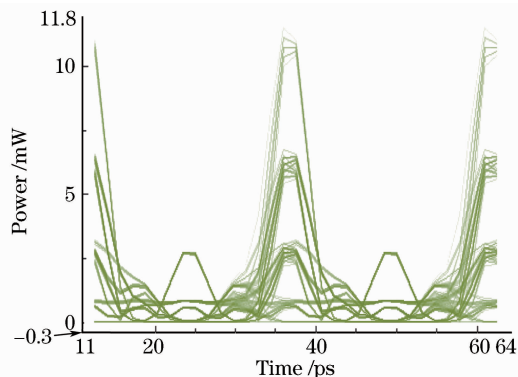


图 8 光 OFDM 符号波形

Fig. 8 Optical OFDM symbol

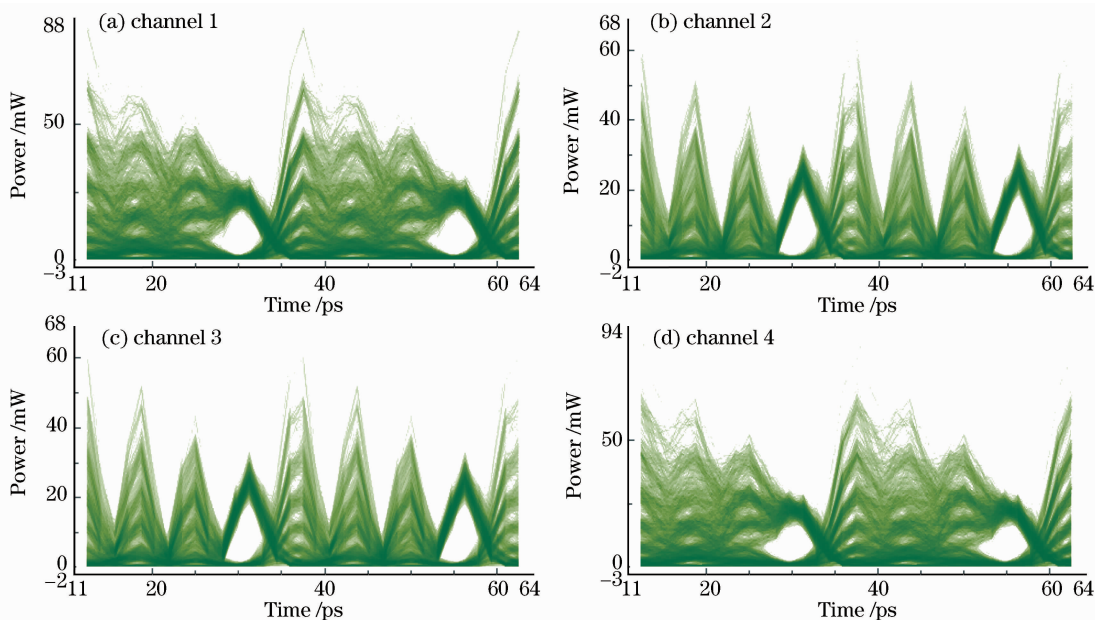


图 9 时间门之前的光信号时域图

Fig. 9 Optical waveforms before entering time gates

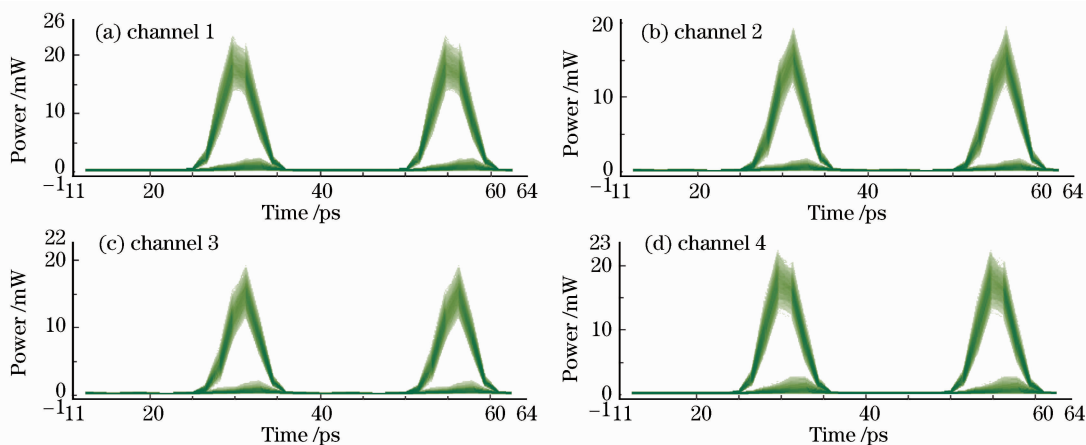


图 10 时间门之后的光信号时域图

Fig. 10 Optical waveforms after entering time gates

可以看出,每 4 个  $\tau$  中只有一个  $\tau$  是有意义的,与图 6 的分析是对应的。通过时间门之后的各路光信号的时域图如图 10 所示。

这样,时间门之后的信号就准确地对应着二进制数据流。再通过光电转换、抽样判决和并/串转换,发射端的数据就被完整接收。

还比较了幅移键控(ASK),差分相移键控(DPSK),全光 OFDM(OOFDM)3 种调制对噪声和色散特性。噪声特性是通过误码率与光信噪比的关系来表现的,如图 11 所示。对于相同的光信噪比(OSNR),DPSK 的误码率最小,OOFDM 比它大一点,ASK 最大。所以,OOFDM 在噪声特性上是好于 ASK 的。

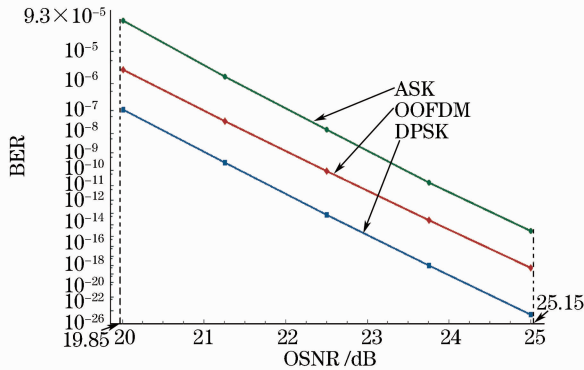


图 11 3 种调制格式的误码率-光信噪比曲线

Fig. 11 Curves of BER-OSNR about three kinds of modulation mode

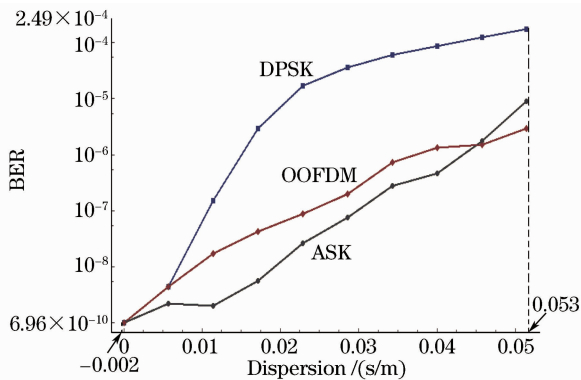


图 12 3 种调制格式的误码率-累积色散曲线

Fig. 12 Curves of BER-accumulated dispersion about three kinds of modulation mode

色散特性是用下面的方法得到的:发射端的信号与噪声源一起耦合入光纤,调整噪声源的功率谱密度,使色散为零时接收端的误码率等于  $1 \times 10^{-9}$ 。改变色散的大小,比较误码率的变化,相应的曲线如

图 12 所示。可以看出,ASK 的变化最小,OOFDM 比 ASK 稍差,而 DPSK 最差。

### 3 结 论

仿真实证,本文提出的基于耦合器的离散傅里叶变换全光 OFDM 系统,可以在 160 Gb/s 速率下经过 320 km 的传输而达到很好的接收效果。由于分成 4 路,降低了调制和接收的电/光转换、光/电转换的速率要求。这些说明了全光正交频分复用是很有潜力的传输方式。

### 参 考 文 献

- 1 E. Lach, K. Schuh, B. Junginger *et al.*. Challenges for 100 Gbit/s ETDM transmission and implementation [C]. *OFC* 2007, OWE1
- 2 Jianjun Yu, Xiang Zhou, Lei Xu *et al.*. A novel scheme to generate 100Gbit/s DQPSK signal with large PMD tolerance [C]. *OFC* 2007, 1~3
- 3 Li Zhaoxi, Hu Guijun, Kong Lingjie. Performance analysis of a multimode fiber communication system based on the adaptive modulation orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):582~586  
李兆玺,胡贵军,孔令杰. 自适应调制的正交频分复用多模光纤通信系统性能分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):582~586
- 4 Li Shuo, Shou Guochu, Hu Yihong. Implementation of superstructure fiber Bragg gratings-orthogonal wavelength division multiplexing and analysis of receiver crosstalk [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8):1195~1200  
李 硕,寿国础,胡怡红. 超结构光纤光栅的正交波分复用系统实现方案及接收机串扰分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8):1195~1200
- 5 Zhang Qi, Yu Chongxiu, Xu Daxiong *et al.*. Encoder/decoder based on optical fiber grating [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(5):595~597  
张 琦,余重秀,徐大雄等. 基于光纤光栅的编解码器的研究[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(5):595~597
- 6 Hongchun Bao, William Shieh. Transmission simulation of coherent optical OFDM signals in WDM systems [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8):4410~4418
- 7 Kyusang Lee, Chan T. D. Thai, June-Koo Kevin Rhee. All optical discrete Fourier transform processor for 100 Gbps OFDM transmission [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6):4023~4028
- 8 Kenichiro Tanaka, Seiji Norimatsu. Transmission performance of WDM/OFDM hybrid systems over optical fibers [J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2007, **90**(10):1431~1440
- 9 Tong Xuejian, Luo Tao. Principle and Applications of OFDM Wireless Communication Technology [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2003  
佟学俭,罗 涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003
- 10 Zhang Haibin. Principle and Key Technologies for Orthogonal Frequency Division Multiplexing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006  
张海滨. 正交频分复用的基本原理和关键技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006