

400 Gbit/s 全光 OFDM 高速系统性能研究

唐静,夏珉,李微,杨克成,刘德明,黄本雄

(华中科技大学 国家光电实验室,湖北 武汉 430074)

摘要: AO-OFDM (全光正交频分复用) 技术是利用光处理方式实现多载波和 OIDFT (光离散傅里叶逆变换)/ ODFT (光离散傅里叶变换),其优势在于能提高处理速率、降低能量消耗。文章结合 AO-OFDM 技术和单通道 100 Gbit/s DP-QPSK (双偏振四相相移键控) 高阶调制技术,实现了谱效率达到 2.7 bit/s/Hz 的 400 Gbit/s 高速传输系统,在色散完全补偿情况下,实现了最大 SEDP (谱效率-距离积重) 为 3 564 km · bit/s/Hz 的传输,并利用插入 12.5% 循环前缀的方式,使得系统色散容限达到 70 ps/nm。实验结果表明,采用 AO-OFDM 技术的系统具有优良的传输性能,可以作为下一代 400 Gbit/s 高速传输系统实际应用的方案。

关键词: 全光正交频分复用;双偏振四相相移键控;高速传输系统

中图分类号: TN914

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2012)06-0017-04

Performances of 400 Gbit/s AO-OFDM high-rate communication systems

Tang Jing, Xia Min, Li Wei, Yang Kecheng, Liu Deming, Huang Benxiong

(Wuhan National Lab. for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The All-Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (AO-OFDM) technology is used to implement multi-carriers and Optical Inverse Discrete Fourier Transform (OIDFT)/Optical Discrete Fourier Transform (ODFT) by way of optical processing, which has the advantages of improving the processing rate and reducing power consumption. By using the AO-OFDM technology in combination with the single-channel 100 Gbit/s DP-QPSK high-order modulation technology, we can realize a 400 Gbit/s transmission system with a spectral efficiency of 2.7 bit/s/Hz and when the chromatic dispersion is completely compensated, we achieve a transmission with the maximum Spectral Efficiency-Distance Product (SEDP) of 3 564 km · bit/s/Hz. With 12.5% Optical Cyclic Prefixes (OCPs) inserted, the system dispersion tolerance reaches 70 ps/nm. The experimental results show that using the AO-OFDM technology, the system has better performances and can be used as a practical application scheme for next generation 400 Gbit/s transmission systems.

Key words: AO-OFDM; DP-QPSK; high-rate transmission system

0 引言

近些年,光网络用户需求的激增推动了进一步有效利用光纤信道带宽的研究工作。在国内,单载波 100 Gbit/s 基于 DP-QPSK (双偏振四相相移键控) 调制技术和相干接收处理的系统已经测试成功,400 Gbit/s 可能是下一个长途光纤传输的目标。对于更高速率和更高带宽利用率的系统要求,采用 OFDM (正交频分复用) 技术成为最有优势的可行方案^[1]。OFDM 技术在光纤传输中的实现主要有两种方式。一种是在电域实现 OFDM 信号,然后再用光学方法调制到光基带上进行传输。这种方式由于相关电技术比较成熟,目前已经进行了大量的实验研究。但是由于受到电信号处理速率的“瓶颈”约束,以及在高速处理中高能耗的制约,在速率要求不断提高的长途传输中,电域实现 OFDM 信号的方式遇到了极大的挑战。另外一种方式是采用全光的方式实现 OFDM 信号。采用全光的方式实现 OFDM

系统可以进一步降低处理速率上的限制和能量的消耗。同时随着光波导器件的日益成熟,这项技术受到了广泛关注。

目前对全光 OFDM 系统的研究主要有两种方案:一种是在信号调制之前先产生梳状光谱,谱的频率间隔等于调制速率。这种光梳状谱发生器可以由多种光学结构实现,例如双臂 MZM (马赫-曾德调制器) 结构^[2]、循环频移结构^[3]和环状 MZI (马赫-曾德干涉) 结构^[4]等。然后用分频器将单个载波频率滤出送入每路光调制器。此时进入光调制器的光脉冲在一个 OFDM 符号周期内具有变化的相位,所以调制器需要在 OFDM 符号之间调整相位来响应。另外一种方案是采用电 OFDM 信号的相同原理,利用 OIDFT (光离散傅里叶逆变换器) 的延时和移相结构处理光信号。系统仅需要一个超短脉冲串,这个脉冲串一般用 MLL (锁模激光器) 实现。光脉冲串在进入 OIDFT 复用之前先并行调制数据,这里的调制器对一个 OFDM 符号周期内的相位响应为

固定常数^[5]。相比于第 1 种方案来说,在输入脉冲相位变化时,降低了调制器对相位变化的响应需求。本文中我们将重点仿真和分析第 2 种方案的 AO-OFDM(全光 OFDM)系统。

1 AO-OFDM 系统

基于 QPSK(四相相移键控)高阶调制格式和偏振复用技术的 400 Gbit/s AO-OFDM 系统仿真结构图如图 1 所示。一个 CW(连续光)激光器发出波

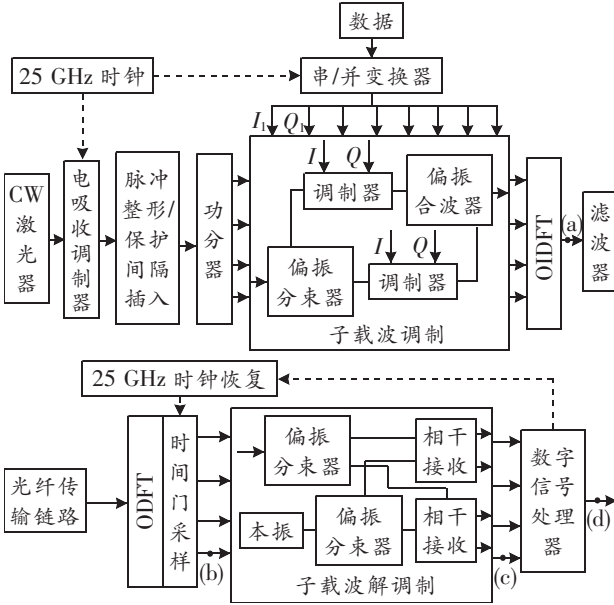


图 1 系统仿真结构图

长为 1 550 nm 的激光,该激光被一个强度调制器切割成频率为 25 GHz、占空比为 1/4 的光脉冲序列。为了实现同步,利用从数据中取出的时钟信号来驱动脉冲切割的强度调制器。该光脉冲序列被一个功分器等分为完全相同的 4 个并行的光脉冲序列。从数据源发出的 400 Gbit/s 的串行电信号通过一个串/并变换器之后,变成 4 路 100 Gbit/s 的并行电信号。这 4 路电信号分别调制到 4 路并行的光脉冲序列上,生成 4 路子载波。在该系统中选用的是 DP-QPSK 高阶调制格式。经过子载波调制之后,4 路光信号并行地进入一个 ODFT。ODFT 生成 OFDM 符号,并把它们送入光纤通道。传输之后,一个 ODFT(光离散傅里叶变换器)把各个子载波上的已调信号恢复出来,再通过时间门滤除时间上多余的成分,之后通过直接检测恢复出电信号。最后通过一个并/串变换器恢复出 400 Gbit/s 的信号。该系统利用 ODFT 处理技术和 ODFT 匹配滤波技术^[6,7],实现了 4 路 AO-OFDM 信号的传输。

在该系统中,实现 AO-OFDM 的两项关键技术

是:(1) 将连续的光信号模式转变为离散的短脉冲采样模式;(2) 在数据信号调制之后,对每路传输信号进行相位变换,并在一个周期内进行时域叠加,以实现子载波间的正交。假设第 k 路 AO-OFDM 信号 $x_k(t)$ 是由不同相位权重的短脉冲串进行时域叠加得到的。在不考虑循环前缀的情况下,AO-OFDM 信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k(t)$$

$$x_k(t) = \sum_{n=0}^{N-1} C_{nk} x^{(n)}(t) e^{j2\pi nk/N}$$

$$x^{(n)}(t) = s(t) * \delta(t - nT_s), \quad (1)$$

式中, $s(t)$ 表示基带光信号; C_{nk} 表示第 k 个子载波上调制的第 n 个信号; $x^{(n)}(t)$ 表示超短光脉冲串。由式(1)傅里叶变换可以得到 AO-OFDM 符号的频域表达如下:

$$X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k(f)$$

$$X_k(f) = \sum_{n=0}^{N-1} C_{nk} X^{(n)}(f) e^{j2\pi nk/N}$$

$$X^{(n)}(f) = S(f) e^{-j2\pi n T_s f}, \quad (2)$$

式中, T_s 为脉冲的采样间隔, $T_s = T/N = 1/f_d N$; T 为 AO-OFDM 符号周期; f_d 为子载波的频率间隔,它等于 AO-OFDM 的符号速率,由此来满足子载波的正交特性。当光源中心频率为 193.1 THz 时,子载波中心频率分别位于 $SC_1 = 193.1$ THz、 $SC_2 = 193.125$ THz、 $SC_3 = 193.15$ THz 和 $SC_4 = 193.075$ THz。由于我们采用蝶形延时移相结构的 ODFT 处理,此时处理为对称操作,所以偶数号通道将会分配到对称的频率上,在图 1 的(a)点处得到发射端的频谱如图 2 所示。占用的频带宽度为 150 GHz,在仿真 400 Gbit/s 传输速率的情况下,系统的谱效率

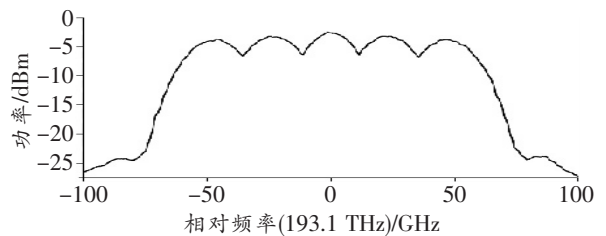


图 2 发射端的频谱图

达到 2.7 bit/s/Hz。在接收端,信号通过 ODFT 模块进行解复用,用匹配滤波的方法取出一个符号周期内的有效子载波信号,图 1 中(b)点处信号的眼图如图 3 所示。光信号送入相干探测器解调单载波的 DP-QPSK 信号,并对解调出的电信号进行 DSP(数

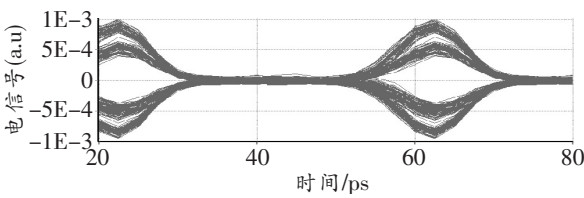


图 3 时间门采样后的眼图

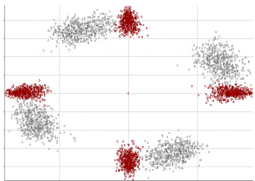


图 4 相干探测电信号相位纠正前后的星座矢量图

字信号处理)。图 4 给出了相干探测电信号相位纠正前(图 1 中(c)点)和纠正后(图 1 中(d)点)的对比星座矢量

图。整个系统设计中的参数如表 1 所示。

表 1 仿真设计参数

名 称	值
总传输速率/Gbit/s	400
子载波数(N)	4
采样间隔(T_s)/ps	10
子载波的频率间隔(f_d)/GHz	25
激光器线宽/kHz	100
SMF 色散系数(G. 655)/ps/(nm·km)	4.3
SMF 损耗/dB/km	0.21
单段光纤长度/km	80
DCF 色散系数/ps/(nm·km)	-100
DCF 损耗/dB/km	0.6
单段 DCF 长度/km	3.44
SMF 和 DCF 非线性系数/ m^2/W	2.6×10^{-20}
SMF 和 DCF 偏振模色散系数/ps/km ^{1/2}	0.1
传输中放大器增益/dB	9.5

注:SMF 为标准单模光纤;DCF 为色散补偿光纤。

2 结果及讨论

2.1 无色散补偿时的传输性能

图 5 给出了不同入纤光功率条件下系统的抗色散能力。仿真中通过改变传输光纤的长度得到不同

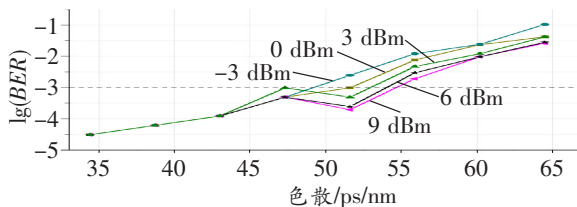


图 5 不同入纤光功率时系统性能曲线

色散下系统的 BER(误码率)性能。当入射光功率为 0 dBm 时,系统的 BER 达到 $BER=10^{-3}$,色散容限达到 50 ps/nm。考虑光纤的色散和非线性作用,当

入射光功率 <0 dBm 时,系统的误码率随色散的增大而线性增大,但当入射光功率 >0 dBm 时,由于非线性效应增大,在光纤较短的情况下,曲线在色散达到 55 ps/nm 时发生回落,之后由于又受到较强色散效应限制而使误码率增大。从图 5 中我们可以看出,AO-OFDM 系统的原理是在一个 OFDM 符号周期内实现正交性,而相邻符号之间仍受信道色散影响。因此,在系统传输中必须进行色散补偿,或者在 OFDM 符号周期上增加保护隔离带,以减小色散导致脉冲展宽对系统的影响。图 6 给出了延长符号周期、增加 12.5%保护带的情况下系统的抗色散性能。当误码率达到 10^{-3} 时,该方法可以将系统的抗色散性能提高 20 ps/nm。

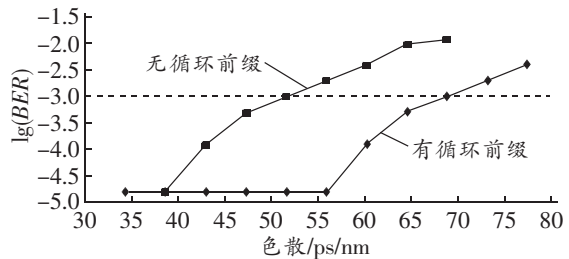


图 6 采用/不采用保护带方式时系统色散容限对比曲线

2.2 色散补偿下的传输性能

对链路进行完全色散补偿,我们仿真了系统的传输性能,结果如图 7 所示。由于此时链路的色散

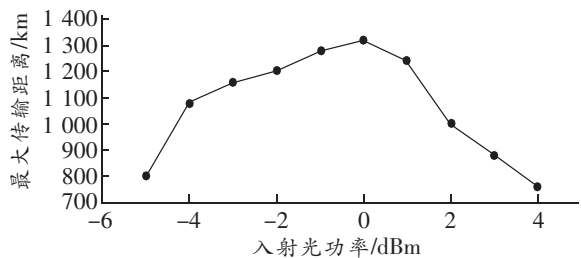


图 7 完全色散补偿下, $BER=10^{-3}$ 时系统的最大传输距离

完全补偿,因此该曲线也体现了系统的抗非线性性能。我们利用 SEDP(谱效率-距离积重,单位: $km \cdot bit/s/Hz$)评价系统的传输性能,它体现了系统在单位带宽上传输的容量-距离积。由图 7 可见,当入射光功率为 0 dBm 时,系统最大传输距离为 1 320 km,在实现了谱效率 2.7 bit/s/Hz 传输的基础上,我们得出 AO-OFDM 系统实现的最大 SEDP 为 3 564 $km \cdot bit/s/Hz$ 。图中,在入射光功率由 0 dBm 降至 -5 dBm 时,系统能实现的最大传输距离从 1 320 km 降低到 800 km。由此我们得

出,入射光功率低于 0 dBm 时,系统传输受放大器噪声的影响较大,传输性能以 100 km/dB 降低;同样,在入射光功率由 0 升至 4 dBm 时,系统能实现的最大传输距离从 1 320 km 降低到 760 km。因此我们得出,当入射光功率 >0 dBm 时,系统传输受限于光纤的非线性效应,传输性能以 150 km/dB 降低,系统受非线性效应影响的劣化程度较大。

3 结束语

基于 AO-OFDM 技术和单通道 100 Gbit/s DP-QPSK 高阶调制技术,我们仿真并分析了 400 Gbit/s 高速传输系统的性能。仿真结果表明,该系统可以成为 400 Gbit/s 长距离光纤传输的可行方案,能应对更高速率和更高带宽利用率的系统要求。

对于未来的实际应用,我们给出以下结论:(1) 该系统仅采用单个光源,因此系统的发射端复杂度没有显著提高。但是由于需要短脉冲光源进行离散采样,在调制复用之后发射端的谱宽会受到短脉冲光源的影响,因此对发射端滤波器的要求提高。为了得到较好的发射谱,另外一种解决方法就是在调制之前对脉冲源进行脉冲整形。(2) 在光脉冲串进入 ODFM 复用之前先进行调制数据的结构中,调制器在 OFDM 符号周期内的相位响应为固定常数。这相比于另外一种 AO-OFDM 结构来说,优势在于降低了调制器对相位变换的响应需求。(3) 在高速传输中,我们采用插入保护间隔的方式来降低色散导致的 OFDM 脉冲展宽对 OFDM 符号间干扰的影响,虽有改善,但色散性能并不良好。因此对于长途传输必须采用色散管理和补偿技术。(4) 由于 AO-

OFDM 信号是在一个 OFDM 符号周期内、不同相位系数脉冲的叠加,在接收端需要利用时间门技术进行采样,因此时钟同步问题将是长距离传输中需要解决的重要问题。

参考文献:

- [1] Lowery A J, Du L B. Optical orthogonal division multiplexing for long haul optical communications: A review of the first five years [J]. Optical Fiber Technology, 2011, 17(5): 421-438.
- [2] Healy T, Garcia Gunning F C, Ellis A D, et al. Multi-wavelength source using low drive-voltage amplitude modulators for optical communications [J]. Opt Express, 2007, 15(6): 2981-2986.
- [3] Kawanishi T, Sakamoto T, Shinada S, et al. Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation [J]. IEICE Electronics Express, 2004, 1(8): 217-221.
- [4] Dupuis N, Doerr C R, Liming Z, et al. InP - Based Comb Generator for Optical OFDM [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 466-472.
- [5] Lowery A J, Du L. All-optical OFDM transmitter design using AWGRs and low-bandwidth modulators [J]. Opt Express, 2011, 19(17): 15696-15704.
- [6] 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.
- [7] Li W, Liang X, Ma W, et al. A planar waveguide optical discrete Fourier transformer design for 160 Gb/s all-optical OFDM systems [J]. Optical Fiber Technology, 2010, 16(1): 5-11.

欢迎来稿 刊登广告