

中间链路光学相位共轭补偿相干光正交频分复用系统的光纤非线性损伤

刘学君¹ 栾海英² 戴波¹ 蓝波¹

(¹北京石油化工学院信息工程学院, 北京 102617
²北京机械工业自动化研究所流体传动与汽车装备技术工程研究中心, 北京 100120)

摘要 由于相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统具有很高的峰均功率比(PAPR)以及非常近的子载波间隔,使得光纤非线性损伤成为系统的决定因素。提出中间位置光学相位共轭(OPC)补偿算法补偿 CO-OFDM 的 Kerr 损伤,由于 OPC 两端链路对称,可以最大限度地保证满足补偿条件,具有很好的非线性补偿效果。而且无链路色散补偿和有链路色散补偿系统均适用。该算法能使单信道 40 Gb/s CO-OFDM 的最大 Q 因子提高 3 dB,非线性阈值提高 4 dB;波分复用(WDM)系统的最大 Q 因子能提高 1.1 dB,非线性阈值提高 1 dB。

关键词 光通信;相干光正交频分复用;光纤非线性损伤;光学相位共轭

中图分类号 TN911.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s105012

Fiber Nonlinearity Impairment for Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Systems with Midlink Optical Phase Conjugation

Liu Xuejun¹ Luan Haiying² Dai Bo¹ Lan Bo¹

(¹Information Engineering Institute, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)
²Fluid Power Transmission and Automotive Equipment Technology Engineering Research Center, Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry, Beijing 100120, China)

Abstract Due to high peak-to-average power ratio (PAPR) and the nearest subcarrier spacing, fiber nonlinearity impairment becomes the determining factor of coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing (CO-OFDM) systems. Midlink optical phase conjugation (M-OPC) is used to compensate for the fiber Kerr nonlinearity effect in CO-OFDM systems. Because of the symmetry of both ends of the link, OPC can best meet the conditions of compensation and has best nonlinearity compensation effect. And OPC can be applied to link with and without online dispersion compensation. Through OPC for 40 Gb/s single channel system, the maximum Q can be increased by 3 dB, and the nonlinear threshold (NLT) (for $Q > 10$ dB) is increased by 4 dB. For wavelength division multiplex (WDM) system, the maximum Q can be increased by 3 dB and NLT is increased by 1 dB.

Key words optical communications; coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing; fiber nonlinearity impairment; optical phase conjugation

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 060.2430; 060.4370

1 引言

近年来,无线通信领域中成熟的正交频分复用(OFDM)技术成为高速光传输中的一个研究热点。自 2005 年 OFC2005 会议上英国人 Jolley 等^[1]首次

提出将无线中的 OFDM 技术应用到高速光纤传输领域后,OFDM 技术迅速成为高速光通信领域的研究热点和重点。2006 年,Shieh^[2]首先提出将相干光正交频分复用(CO-OFDM)技术应用于高速光传输系

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-03-04

作者简介: 刘学君(1977—),男,博士,讲师,主要从事正交频分复用(OFDM)技术及在高速宽带光传输领域方面的研究。

E-mail: liuxuejun.china@gmail.com

统,并于 2007 年实验室^[3]实现了 8 Gb/s 的 1000 km 传输。CO-OFDM 结合了 OFDM 和相干光检测这两种非常有前途的通信技术。这种协同具有双重功效:相干技术给 OFDM 提供一个非常有效的近乎线性的射频到光(RTO)和光到射频(OTR)变换手段;OFDM 技术给光相干系统提供高效的易于实现的信道和相位估计补偿算法。这样 CO-OFDM 系统具有高传输速率、高抗色散能力、高频谱效率等优势^[4]。但是由于 OFDM 技术自身固有的缺陷[具有很高的峰均功率比(PAPR)]以及光纤信道传输自身的特点(光纤中高光功率集中在很小的传输截面),使得 CO-OFDM 中多种非线性效应影响非常严重,成为系统的决定性因素^[5,6]。

2 OPC 补偿原理

光学相位共轭(OPC),也称为频谱反转(SI),在 1979 年由 Yariv 等^[7]提出,用来补偿信道的色散。OPC 是指利用某种非线性效应,使得任意光束中的每一个平面波分量的传输方向及其在任一处的相位因子发生时间反演。这样 OPC 之前链路中的损伤被 OPC 之后链路的时间反转信号所补偿,这种自然矫正传输相位干扰的特性和反向传输性质使其得到广泛的应用^[7,8]。特别是在现代光通信领域中,可以用来进行波长转换、色散补偿和非线性损伤补偿。光纤中脉冲传输过程(包括色散、非线性、衰减等效应),可以采用薛定谔方程表示为^[8]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = j\gamma |A|^2 A, \quad (1)$$

式中 $A(z, t)$ 是慢变振幅, z 表示传输距离, α 是损耗, $\beta_1 = 1/v_g$ 是群速度 v_g 的倒数, β_2 是 2 阶色度色散参数, γ 是非线性参数。

OPC 进行复数共轭计算后,链路中的传输方程表示为^[9]

$$\frac{\partial A^*}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A^* + \beta_1 \frac{\partial A^*}{\partial t} - j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A^*}{\partial t^2} = -j\gamma |A^*|^2 A^*, \quad (2)$$

式中上标 * 是复数共轭运算符。由(2)式可见,色散参数 β_2 和 Kerr 效应参数 γ 都被反转,这样 OPC 之前的色散和 Kerr 效应导致的损伤都被 OPC 之后的反转效应所补偿。

Watanabe 等^[10]在 1996 年提出非线性损伤补偿的基本原理,如图 1 所示。

图 1 中,OPC 之前,信号脉冲 $E_s(t)$ 具有光载波频率 ω_s ,链路 SMF1 长度为 L_1 ,入纤端的功率为 P_s ,

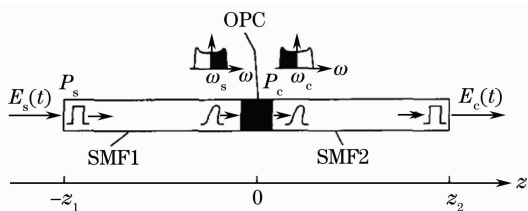


图 1 OPC 补偿传输链路波形损伤的原理

Fig.1 Theory of compensating impairments by OPC

色散系数为 β_{21} ,非线性折射率为 γ_1 ;OPC 之后,链路 SMF2 长度为 L_2 ,输出脉冲 $E_c(t)$ 的光载波频率为 ω_c ,出纤端的功率为 P_c ,色散系数为 β_{22} ,非线性折射率为 γ_2 ;则 OPC 补偿信道的色散和非线性损伤的链路条件为^[10]

$$\beta_{21}L_1 = \beta_{22}L_2, \quad (3)$$

$$\gamma_1 \bar{P}_s L_1 = \gamma_2 \bar{P}_c L_2, \quad (4)$$

式中 $\bar{P}_s = \left[\int_{-L_1}^0 P_s(z) dz \right] / L_1$ 和 $\bar{P}_c = \left[\int_{-L_1}^0 P_c(z) dz \right] / L_1$

是链路平均光功率。(3)式是色散补偿的条件,要求 OPC 前后残余色散相等;(4)式是非线性补偿条件,可以看成 OPC 前后平均功率所致非线性相移相等。当链路的长度和功率等设计满足(4)式时,OPC 可以最大限度地补偿非线性损伤。

OPC 的产生方式一般有 2 种:1) 参量过程,或称为弹性散射过程,如三波、四波混频、光子回波和双光子吸收等方式;2) 非参量过程,或称为光子的非弹性散射过程,如受激布里渊散射、受激拉曼散射、受激瑞利散射等。四波混频(FWM)技术是目前唯一能实现严格比特率和调制格式透明、能对一组波分复用(WDM)信号的多个波长同时进行转换的技术,同时具有高达 100 Gb/s 的变换潜力,因此得到广泛的关注。由于半导体光放大器(SOA)具有高非线性系数,易于系统集成,而且制造技术已经成熟,因此目前利用 SOA 的 FWM 效应实现 OPC 得到很广泛的研究和采用。本文采用基于 SOA 的 FWM 效应实现 OPC。

3 中间链路 OPC(M-OPC)算法实现

将 OPC 置于光纤链路的正中间,OPC 两端链路对称,可以最大限度地保证满足(3)和(4)式,得到很好的非线性补偿效果。为了研究中间链路 OPC (M-OPC)对 CO-OFDM 系统的非线性损伤的补偿效果,搭建了采用 M-OPC 补偿算法的 40 Gb/s 正交相移键控(QPSK)码型映射 CO-OFDM 仿真系统[链路无在线色散补偿,即链路上无色散补偿光纤

(DCF)],如图 2 和图 3 所示,其中 FEC 为前向纠错, M -QAM 为 M 阶正交振幅调制,MPSK 为 M 阶相移键控,IFFT 为快速傅里叶逆变换,CP 为循环前缀,A/D 为模数转换,MZM 为马赫-曾德尔调制器,coupler 为耦合器,fiber link 为光纤链路,D/A 为数模转换,FFT 为快速傅里叶变换,SSMF 为标准单模光纤,EDFA 为掺铒光纤放大器,Span 为光

纤跨段。子载波个数为 2048 个(其中 1024 个承载数据,其他 1008 为保护频带,16 为导频),CP 长度为 512(CP 为 25%),接收机的电域信道补偿算法采用文献[11]提出的方案。光纤链路参数见表 1 所示。其中 OPC 采用基于 SOA 的 FWM 效应实现,信号光与抽运光在 SOA 由于 FWM 效应产生共轭光完成 OPC 运算。

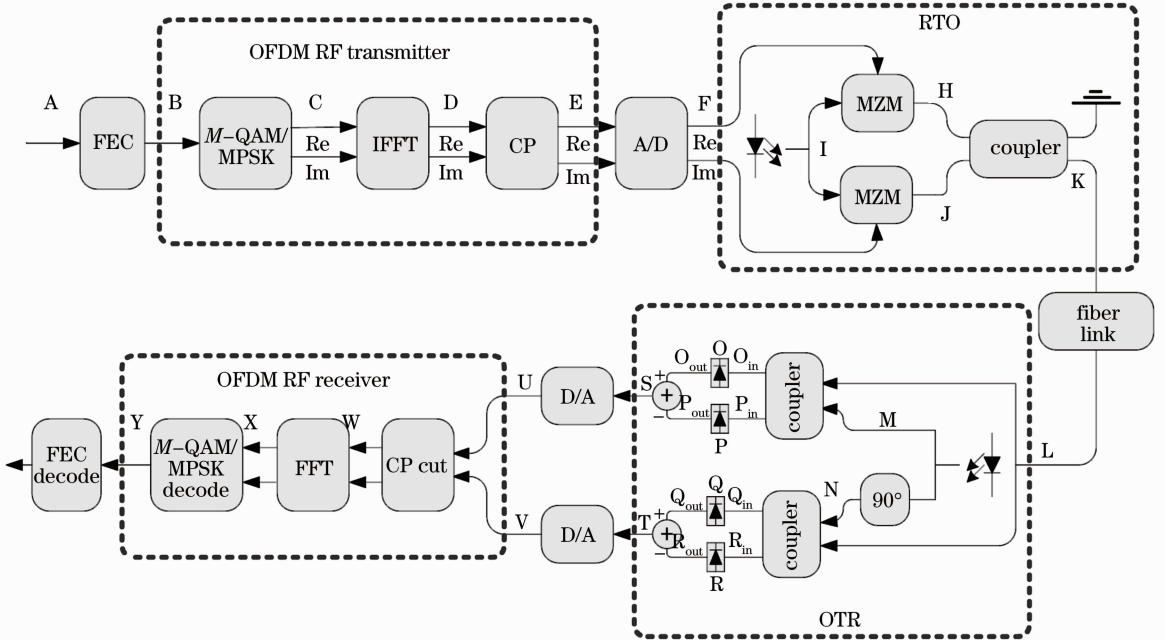


图 2 基本的单输入单输出(SISO)直接上/下变频 40 Gb/s CO-OFDM 系统调制/解调

Fig. 2 Schematic of the 40 Gb/s single input single output (SISO) CO-OFDM

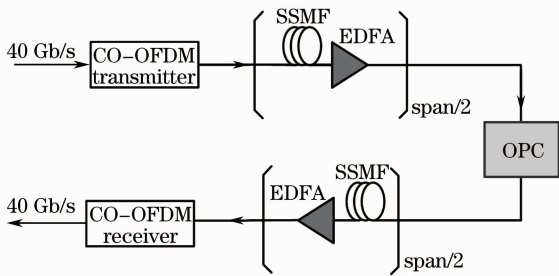


图 3 采用 M-OPC 补偿的 CO-OFDM 基本框图

Fig. 3 Schematic diagram of the CO-OFDM with M-OPC architecture

表 1 光纤链路参数

Table 1 Parameters of fiber link

Attenuation of SSMF	α	0.2 dB/km
Dispersion of SSMF	β_2	16 ps/(nm \cdot km)
Dispersion slope of SSMF	β_3	0.08 ps/(nm 2 \cdot km)
Nonlinear index of SSMF	n_2	2.6×10^{-20} m 2 /W
Effective core area of SSMF	A_{eff}	80 μm^2
Polarization mode dispersion of SSMF		5.0 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
Gain of EDFA		16 dB
Noise figure of EDFA		6 dB

图 4 为 OPC 的基本原理图。为了得到更好的 FWM 效应,抽运光和信号光被放大后耦合到长度为 1 mm 的 SOA 之中。对于单信道系统,抽运光波长为 1552 nm,信号光波长为 1554 nm,反转得到的 FWM 共轭光波长为 1550 nm。频谱如图 5 所示。SOA 之后,采用带通滤波器(BPF)将共轭光信号选出来,滤掉信号光、抽运光和其他干扰。最后采用 EDFA 和 BPF 对共轭光信号进行放大和滤波。针对单信道的 OPC 基本参数如下: BPF 带宽为 1 nm, SOA 的驱动电流为 300 mA,抽运光和信号光的功率分别为 11 dBm 和 -2 dBm。

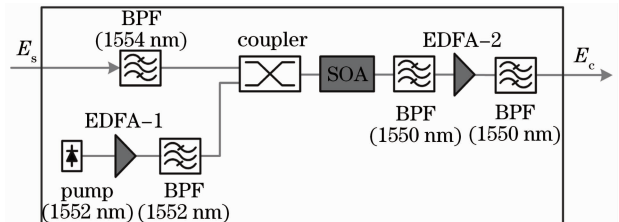


图 4 基于 SOA 的 OPC 基本原理图

Fig. 4 Schematic of OPC architecture based on SOA

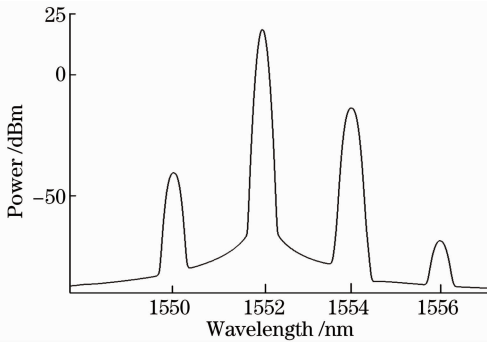


图 5 单信道的 OPC 中 SOA 后的频谱图

Fig. 5 Optical spectrum after SOA in OPC for single-channel systems

图 6 为在背靠背的情况下,OPC 补偿前后光信噪比(OSNR)对系统性能的影响。当系统 OSNR 为 10 dB 时,无 OPC 补偿系统 Q 因子大约等于 9.8 dB。由图可见,与无补偿系统相比,OPC 补偿算法引入的 OSNR 损伤非常小,小于 0.3 dB。因此,由 OPC 中 SOA 的 FWM 引入的损伤非常小,可以忽略。

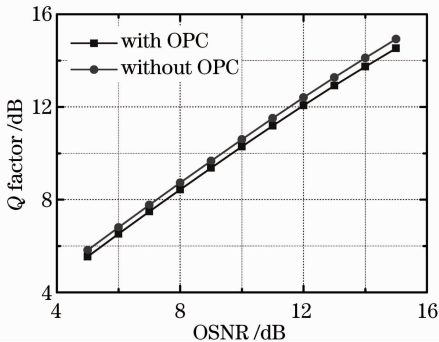


图 6 单信道背靠背情况下 OPC 补偿前后 OSNR 对 Q 因子的影响

Fig. 6 Back-to-back Q factor versus OSNR without and with OPC for the single-channel systems

4 单信道补偿

当满足(4)式时,OPC 可以很好地补偿系统的 Kerr 损伤。M-OPC 由于位于链路的中间位置,能最大程度地满足补偿公式,得到很好的补偿效果,对于 CO-OFDM 系统也是一样的。图 7 为在不同情况下,40 Gb/s CO-OFDM 系统传输 2400 km 后,OPC 补偿前后的系统性能。当功率小于 -5 dBm 时,放大自发辐射(ASE)噪声是性能的决定因素,此时有无 OPC 补偿系统性能差别不大。当功率大于 -1 dBm 时,非线性损伤成为系统的决定因素,因此 OPC 的补偿效果非常明显。在 -5 ~ -1 dBm 之间,系统性能由 ASE 噪声和非线性损伤共同作用,

此时 OPC 也有较好的补偿效果。

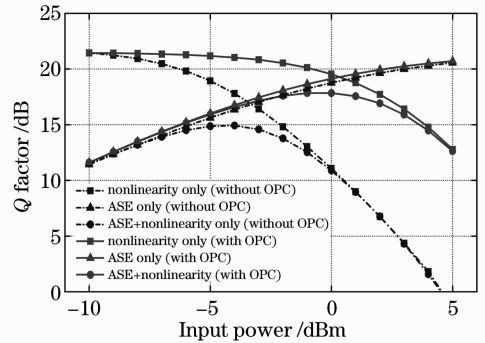


图 7 单信道传输 2400 km 后,在不同的条件下首段光纤入纤功率和 Q 因子的关系(无链路色散补偿)

Fig. 7 Q factor versus signal launch power of the first fiber span without and with OPC in different circumstances after 2400 km for the single-channel systems (without optical dispersion compensation)

图 8 为不同传输距离时,40 Gb/s CO-OFDM 系统 M-OPC 补偿前后系统的性能。首先,对于任何传输距离,当功率小于 -5 dBm 时,由于此时 ASE 噪声是决定因素,OPC 几乎没有什么补偿效果。当功率大于 -5 dBm 时,由于信道的入纤功率提高了,非线性损伤开始起作用,此时 OPC 对提高系统性能有很大帮助。随着功率的增加,系统的非线性损伤越发严重,OPC 的补偿效果更加明显,提高 Q 因子的值也在增加。

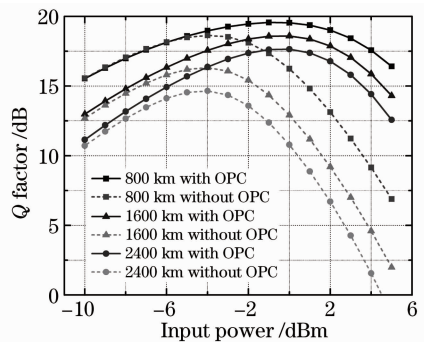


图 8 单信道不同传输距离,首段光纤入纤功率和 Q 因子的关系(无链路色散补偿)

Fig. 8 Q factor versus input power of the first fiber span with and without OPC for the single-channel systems (without optical dispersion compensation)

图 9 为不同传输距离,OPC 补偿前后的最大 Q 因子和非线性阈值的改善情况。其中 Q_{\max} 是取某一功率下系统最大的 Q 因子, P_{\max} 是保证 Q 大于等于 10 dB(误码率 BER 为 10^{-3})时所允许的最大入纤功率。对于无补偿系统,随着传输距离的增加, Q_{\max} 和 P_{\max} 都在降低,距离从 800 km 增加到 4000 km,

Q_{\max} 从 18.6 dB 降到 12.5 dB; P_{\max} 从 3.6 dBm 降低到 -1.9 dBm。传输距离越大, OPC 提高得 Q_{\max} 越大, 当 800 km 时 OPC 大概能使 Q_{\max} 提高 0.9 dB; 而传输距离为 4000 km 时可以提高 3.6 dB。OPC 同样可以使系统允许的最大传输功率提高, 从图中可知, 对于不同的传输距离, OPC 使得系统的 P_{\max} 能够提高 4 dB 以上。综上所述, OPC 能很好地补偿 CO-OFDM 中的链路的非线性损伤, 提高系统的性能。

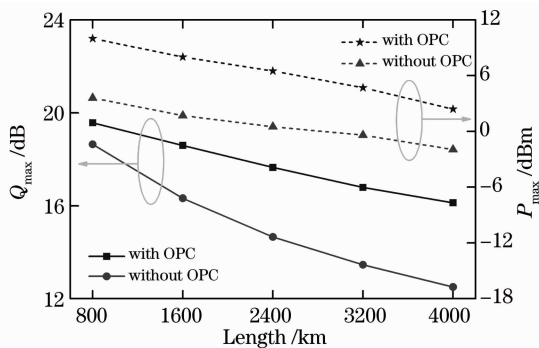


图 9 单信道不同传输距离 OPC 补偿前后最大 Q 因子和非线性阈值的比较(无链路色散补偿)

Fig. 9 Maximum Q factor and maximum power for NLT versus transmission length with and without OPC for the single-channel systems (without optical dispersion compensation)

5 WDM 补偿

基于 SOA 的 FWM 效应的 OPC 算法, 对于有多个信道传输的 WDM 系统也是十分有效的, 为了研究 M-OPC 补偿 WDM 系统中的 CO-OFDM 非线性损伤, 搭建了 7 个信道的 WDM 系统, 每个信道为 40 Gb/s CO-OFDM 系统, 信道间隔为 50 GHz。OPC 的参数如下: SOA 的驱动电流为 500 mA, 信号光和抽运光的功率分别为 20 dBm 和 -1 dBm, BPF 的带宽为 5 nm。图 10 为 SOA 之后的 WDM

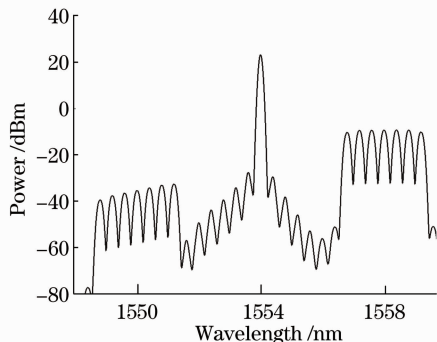


图 10 WDM 系统中 SOA 后的光谱图

Fig. 10 Spectrum after SOA for WDM systems

系统光谱图。其中抽运光波长为 1554 nm, 有 7 个信道的信号光的中心信道光载波为 1558 nm, FWM 得到的共轭光也为 7 个信道, 中心光载波为 1550 nm。由光谱可以看出, 输入的 WDM 信号光能得到很好的共轭反转光谱。

图 11 为背靠背情况下, WDM 系统中 OPC 对系统性能的影响。无 OPC 系统提取了中间信道的系统性能(1558 nm), 采用 M-OPC 补偿的系统, 取了 1、4、7 信道(1548.8、1550、1551.2 nm)。由图可见, 对于 WDM 系统, OPC 对各个信道的影响基本相同, 同时引入 OPC 对各个信道的损伤很小, 与无 OPC 系统相比, OPC 的损伤小于 0.5 dB。综上所述, WDM 系统由于 OPC 本身引入的损伤也可以近似忽略掉。

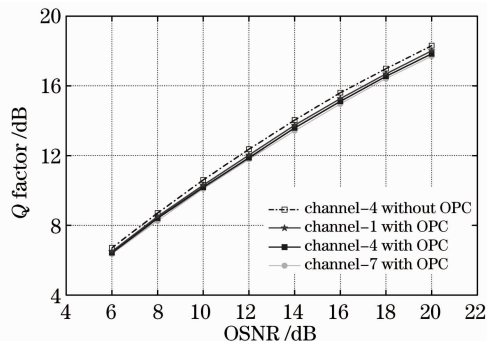


图 11 背靠背 WDM 系统中不同信道下 OPC 补偿前后 OSNR 对系统性能的影响

Fig. 11 Back-to-back Q factor versus OSNR without and with OPC under different channels for WDM systems

图 12 为 WDM 信号传输 1600 km 后, 中间信道 OPC 补偿前(1558 nm)和补偿后(1550 nm), 不同入纤功率与 Q 因子的关系。为了对比, 图中同时

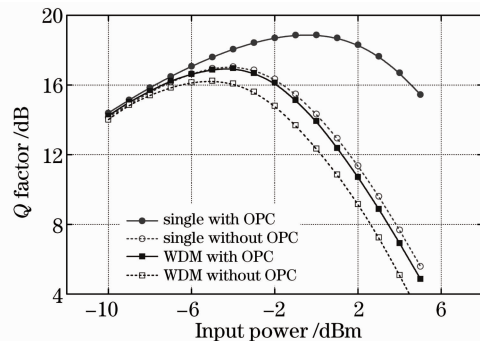


图 12 WDM 系统 1600 km 传输后不同入纤功率下 OPC 对系统性能的比较(无链路色散补偿)

Fig. 12 Q factor versus input power of the first fiber span after 1600 km link with and without OPC for WDM and single-channel systems (without optical dispersion compensation)

绘出了单信道 40 Gb/s 传输 1600 km 系统的 Q 因子。由图可见,在无 OPC 补偿时,在高功率时(即功率大于-5 dBm),WDM 系统比单信道系统 Q 因子大约低 2 dB,原因是 WDM 系统的临近信道的交叉相位调制(XPM)效应会降低系统性能。但是即使对于 WDM 系统,M-OPC 仍然能一定程度上补偿非线性损伤,由图可知, Q_{\max} 大约能提高 1.1 dB;非线性阈值 P_{\max} 大约可以提高 1 dB。

由于目前已有的 10 Gb/s 光传输系统都是采用 DCF 在线色散补偿的,考虑到在现有线路上采用 CO-OFDM 技术进行升级传输,研究有在线色散补偿链路的 CO-OFDM 系统的 M-OPC 非线性补偿效果是非常必要的。图 13 为有 DCF 的完全色散补偿系统时在不同传输距离下,入纤功率与 Q 因子的关系。由图可见,对于高入纤功率,OPC 能大幅度提高系统的性能,包括 Q_{\max} 和 P_{\max} 。比如经过 2400 km 传输后,M-OPC 可以把 Q_{\max} 从 9.9 dB 提高到 12.6 dB,提高了 2.7 dB; P_{\max} 从 -7 dBm 提高到 -0.5 dBm,大约提高了 6.5 dB。因此 M-OPC 对于现有线路的 CO-OFDM 升级也是有帮助的。

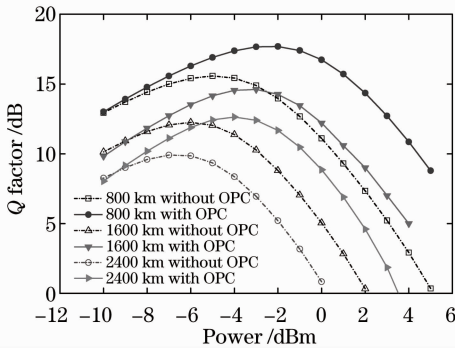


图 13 单信道不同传输距离下,首段光纤入纤功率和 Q 因子的关系(有链路完全色散补偿)

Fig. 13 Q factor versus input power of the first fiber span for the single-channel system with and without OPC (with complete optical dispersion compensation)

6 结 论

提出用中间链路 OPC 补偿算法来补偿 40 Gb/s CO-OFDM 传输系统的光纤链路非线性损伤。对于光纤非线性损伤非常敏感的高 PAPR 的 OFDM 信号来说,中间链路的 OPC 通过采用 SOA 的 FWM 效应,使得在传输链路中的 OFDM 信号的每一个平面

波分量的传输方向及其在任一处的相位因子发生时间反演。这样 OPC 之前链路中的 OFDM 损伤被 OPC 之后链路的时间反转信号进行大幅度的补偿,这种自然矫正传输相位干扰的特性和反向传输性质使其对于 OFDM 的补偿效果非常明显。由理论分析和仿真研究可知,M-OPC 不仅适用于无残留色散链路,同时也适用于有残留色散链路。该算法能使单信道 40 Gb/s CO-OFDM 的最大 Q 因子提高 3 dB,非线性阈值提高 4 dB;WDM 系统的最大 Q 因子提高 1.1 dB,非线性阈值提高 1 dB。

参 考 文 献

- 1 N. E. Jolley, H. Kee, R. Rickard *et al.*. Generation a propagation of a 1550 nm 10 Gbit/s optical orthogonal frequency division multiplexed signal over 1000 m of multimode fiber using a directly modulated DFB [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2005, OFP3
- 2 W. Shieh, C. Athaudage. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42** (10): 587~588
- 3 W. Shieh, X. Yi, Y. Tang. Transmission experiment of multi-gigabit coherent optical OFDM systems over 1000 km SSMF fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(3): 183~185
- 4 Hongchun Bao, William Shieh. Transmission simulation of coherent optical OFDM signals in WDM systems [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 4410~4418
- 5 Xuejun Liu, Yaojun Qiao, Yuefeng Ji. Reduction of the fiber nonlinearity impairment using optical phase conjugation in 40 Gb/s CO-OFDM systems [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(13): 2749~2753
- 6 Xuejun Liu, Yaojun Qiao, Yuefeng Ji. Compensating Gordon-Mollenauer phase noise by optical phase conjugation for 40 Gb/s CO-OFDM system [C]. Asia Communications & Photonics Conference & Exhibition (ACP), 2010. 609~610
- 7 A. Yariv, D. Fekete, D. M. Pepper. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation[J]. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(2): 52~54
- 8 G. P. Agrawal. Principles of Nonlinear Fiber Optics & Applications[M]. Jia Dongfeng, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*, Transl., 1st edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
阿戈汝(美). 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震红, 谈斌等译. 第一版, 北京: 电子工业出版社, 2002
- 9 S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich *et al.*. Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(4): 505~520
- 10 S. Watanabe, M. Shirasaki. Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3): 243~248
- 11 Xuejun Liu, Yaojun Qiao, Yuefeng Ji. Electronic compensator for 100-Gb/s PDM-CO-OFDM long-haul transmission systems [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(3): 030602