

具有不同色散分布链路的高速 CO-OFDM 系统中非线性损伤的研究

刘学君¹ 栾海英² 陈雯柏³ 戴波¹ 刘建东¹ 朱琳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

³北京信息科技大学自动化学院, 北京 100192

摘要 由于相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统很高的峰均功率比(PAPR)以及非常近的子载波间隔,使得链路色散导致的子载波走离对光纤非线性损伤的影响更加明显。研究了不同色散分布、不同残余色散情况下,无色散补偿光纤(DCF)和有色散补偿光纤的光纤链路时 CO-OFDM 系统的非线性损伤以及系统性能。针对单信道 40 Gb/s CO-OFDM 系统,无 DCF 链路比完全补偿 DCF 链路, Q 因子高 5.1 dB;对于 DCF 链路,当残余色散从 0 变为到 1200 ps/nm 时,最大 Q 因子提高了 4 dB,非线性阈值提高了 4 dBm,1200 ps/nm 时性能几乎和无色散补偿系统相同。

关键词 光通信;相干光正交频分复用;光纤非线性损伤;色散分布;色散补偿光纤

中图分类号 TN913.7 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.020601

Fiber Nonlinearity Impairments for CO-OFDM Systems with Different Dispersion Distribution Link

Liu Xuejun¹ Luan Haiying² Chen Wenbai³ Dai Bo¹ Liu Jiandong¹ Zhu Lin¹

¹ Information Engineering Institute, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing, 102617, China

² Fluid Power Transmission and Automotive Equipment Technology Engineering Research Center, Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry, Beijing 100120, China

³ Institute of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

Abstract Due to the high peak-to-average power ratio (PAPR) and the very close sub-carrier spacing for coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM) system, the sub-carriers walking-away resulted by link dispersion greatly affects the nonlinear damage of the optical fiber. We firstly study the nonlinear damage and system performance of CO-OFDM system without/with dispersion compensating optical fiber (DCF) under the conditions of different distributions of dispersion and different residual dispersion. For the single channel 40 Gb/s CO-OFDM system, the Q factor of DCF link is 5.1 dB higher than that of completely compensated DCF link. For DCF link, when the residual dispersion is added from 0 to 1200 ps/nm, the maximum Q factor is improved by 4 dB, and the nonlinear threshold is increased by 4 dBm. When the residual dispersion is 1200 ps/nm, the performance of DCF link system is almost the same as the system without DCF.

Key words optical communications; coherent optical orthogonal frequency division multiplexing; fiber nonlinearity impairment; distribution of dispersion; dispersion compensating optical fiber

OCIS codes 060.4510; 060.1660; 060.2430; 060.4370

1 引言

从 2006 年开始,相干光正交频分复用技术(CO-OFDM)成为高速光传输中的一个研究热点^[1-2],采用电

收稿日期: 2013-08-01; 收到修改稿日期: 2013-09-20; 网络出版日期: 2014-01-17

基金项目: 北京市自然科学基金(4132020)、北京石油化工学院校青年基金(N2012-13)

作者简介: 刘学君(1977—),男,博士,讲师,主要从事 OFDM 技术及其在高速宽带光传输领域应用方面的研究。

E-mail: liuxuejun.china@gmail.com

域补偿算法就可以非常有效地补偿色度色散(CD)和偏振模色散(PMD)^[3-4]。CO-OFDM融合了OFDM技术和相干光通信的优点,CO-OFDM系统可以在现有光传输系统的基础上构建出高速率、低成本、长距离的光传输网络,是实现下一代超高速长距离光传输系统的十分有竞争力的技术之一^[5-7]。对于高速光纤链路来说,链路色散会影响光传输系统的非线性效应^[8],CO-OFDM也不例外。本文主要研究光纤链路色散对CO-OFDM系统的光纤非线性损伤的影响。

2 无在线色散补偿系统的色散系数的影响

搭建了40 Gb/s四相相移键控(QPSK)信号码型映射CO-OFDM仿真系统,如图1所示。2048个子载波,其中1024个转载数据,1008个为保护频带(ZP),16个为导频,循环前缀(CP)长度为512(CP占总长度的25%),接收机的电域信道补偿算法采用本课题组在文献[4]中提出的方案。

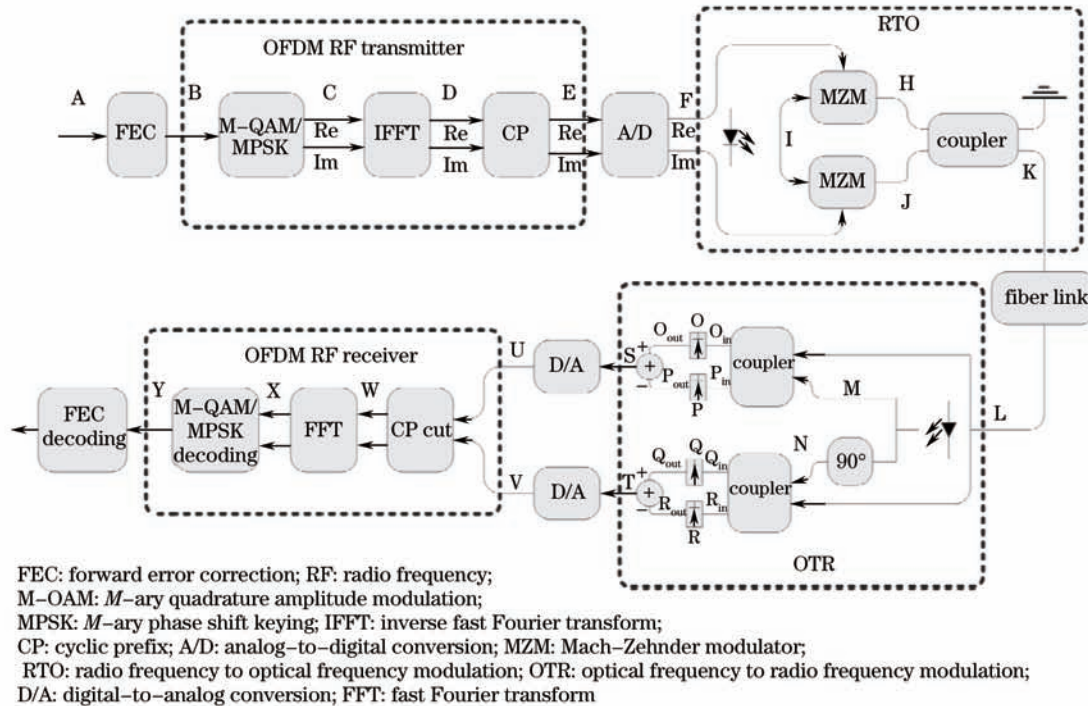


图1 基本的单入单出型40 Gb/s CO-OFDM系统调制/解调

Fig.1 Basic 40 Gb/s single-input-single-output CO-OFDM modulation/demodulation system

引入OFDM技术到光传输领域后,光纤链路可以不采用在线色散补偿,而依靠OFDM特有的CP技术对抗色散走离导致的符号间干扰(ISI)和码间干扰(ICI)损伤,并采用电域色散补偿(EDC)算法补偿该色散致相移。无在线色散补偿链路如图2所示,每一段链路由标准单模光纤(SSMF)和掺铒光纤放大器(EDFA)组成,无色散补偿光纤(DCF)。

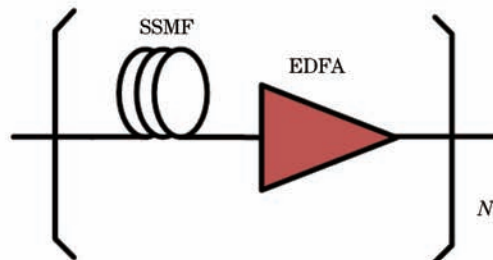


图2 无在线色散补偿链路示意图

Fig.2 Schematic diagram of link without online dispersion compensation

虽然不需要在线链路色散补偿,但是信道中的光纤累积色散会影响非线性效应。图3所示为不同光纤色散系数下,无色散补偿系统的入纤功率和 Q 因子的关系,激光器线宽为0,ZP比例为50%,CP比例为25%,

距离为 800 km。由图可见,当功率较小时,同样的功率下, Q 因子几乎不受色散系数的影响。原因是小功率下非线性效应不明显,色散对性能影响较小。当功率大于 -6 dBm 时,在同样的功率下,色散系数越大,系统性能越好,也就是说色散引起的走离减轻了 OFDM 系统的四波混频(FWM)效应。因此,系统链路上的色散在 CP 长度足够补偿时,对抵消非线性损伤是很有益处的。

图 4 为不同光纤色散系数下,无色散补偿系统的光纤色散系数和最大 Q 因子以及非线性阈值(NLT)的关系,其他条件与图 3 相同。提高色散系数,导致无链路色散补偿的累积色散增加,进而加重子载波间的走离,影响 FWM 所需要的相位匹配,减轻了系统的非线性损伤。由图可见,色散系数越大,非线性损伤越小,系统的非线性阈值(使系统 Q 因子大于 10 dB 的最大允许传输功率)、最大 Q 因子等都得到了显著的提高。因此,对于 CO-OFDM 系统来说,链路采用色散系数为 16 ps/(nm·km) 的普通单模光纤要好于采用低色散系数的光纤。

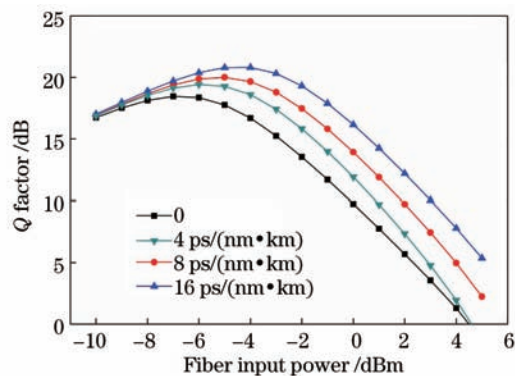


图 3 40 Gb/s CO-OFDM 系统 Q 因子和首段光纤入纤功率的关系

Fig.3 Relation between Q factor and the optical power into the first fiber span

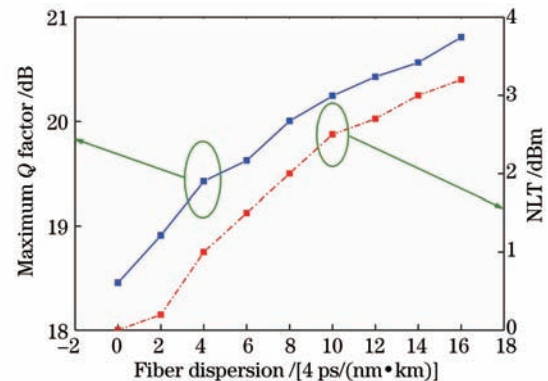


图 4 40 Gb/s CO-OFDM 系统最大 Q 因子和非线性阈值与首段光纤入纤功率的关系

Fig.4 Dependences of the maximum Q factor and the nonlinear threshold on the optical power into the first fiber span

3 在线色散补偿系统的残余色散的影响

虽然无在线色散补偿链路是 CO-OFDM 系统最优的选择,但是目前已有的骨干网都是采用 DCF 在线补偿的光纤链路。考虑到基于当前链路的 CO-OFDM 技术升级,需要研究 DCF 光纤链路的对 CO-OFDM 的影响^[9]。有 DCF 在线色散补偿链路如图 5 所示。

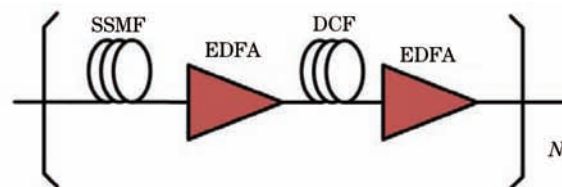


图 5 在线色散补偿链路示意图

Fig.5 Schematic diagram of the online dispersion compensation link

DCF 光纤的纤芯直径通常比标准单模光纤小很多(标准单模光纤 $9 \mu\text{m}$, DCF 的只有 $4 \mu\text{m}$),损耗也比较大,必须附加放大器来进行补偿。DCF 本身的小芯径必然导致其中传输的信号在高功率的时候容易受到非线性的影响^[10-12];引入附加 EDFA,系统中的放大自发辐射(ASE)噪声增加,使得信号低功率时系统性能也将下降。针对在线色散补偿系统,下面先研究 DCF 光纤入纤功率对非线性效应的影响。当 SSMF 光纤与 DCF 光纤入纤功率不同时, Q 因子与首段光纤入纤功率的关系如图 6 所示,在线色散补偿,激光器线宽为 0, ZP 比例为 50%, CP 比例为 25%,距离为 800 km。图中的差值 0、4 dBm 和 8 dBm 表示 DCF 比 SSMF 所少的功率值,同时也绘出了无在线色散补偿系统的仿真结果。首先,有 DCF 的系统性能比无在线色散补偿系统要差很多,分析原因有三:1) DCF 的小芯径导致非线性效应增强;2) DCF 附加 EDFA 引入 ASE 噪声;3) DCF 补偿

了系统的色散,减低了链路的累积色散,使得非线性效应增强^[7]。当SSMF入纤功率低时,在DCF入纤功率比SSMF降低的情况下,附加的EDFA的ASE噪声作用增强,使得系统性能降低;当SSMF入纤功率高时,在DCF入纤功率比SSMF降低的情况下,DCF中的非线性损伤越小,增强了系统性能。对于有DCF的系统,当SSMF光纤与DCF光纤入纤功率之差越来越大时,也即同样的SSMF入纤功率下DCF的入纤功率越来越小,使得曲线整体向右移动。

图7为SSMF与DCF光纤入纤功率之差对系统最大Q因子的影响,其他条件与图6相同。随着功率之差的增加,同样SSMF功率下进入DCF的功率降低,最大Q因子首先增大,然后降低,出现一个峰值(约为4 dBm)。Q因子先增大的原因是,差值增大则DCF的入纤功率降低,非线性效应降低;后降低的原因是,差值进一步增大使得入DCF的功率更低,附加的EDFA的ASE噪声效应增强。因此,系统有一个最优的功率差值,对于本系统,最优的功率差值为4 dBm,即DCF的功率总要比SSMF的功率低4 dBm,才能保证系统的性能最好。因此,后续的仿真研究中都采用4 dBm的功率差。

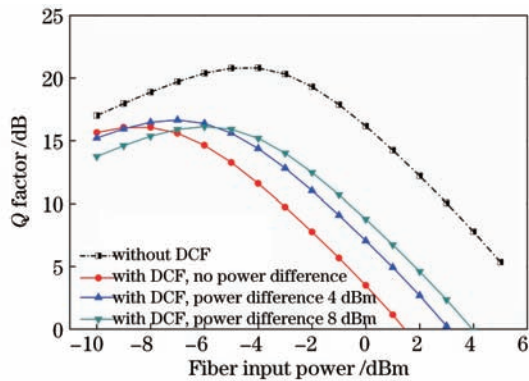


图6 40 Gb/s CO-OFDM系统,当SSMF光纤与DCF光纤入纤功率之差不同时,Q因子与首段光纤入纤功率的关系

Fig.6 Relation between Q factor and the optical power into the first fiber span for different power difference between SSMF and DCF

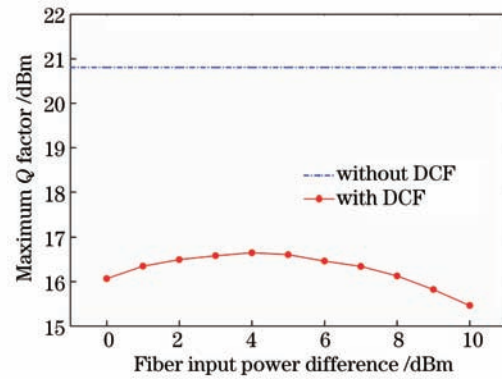


图7 40 Gb/s CO-OFDM系统,最大Q因子与SSMF光纤与DCF光纤入纤功率之差的关系

Fig.7 Relations between the maximum Q factor and the power difference between SSMF and DCF for 40 Gb/s CO-OFDM system

色散斜率的存在使得DCF很难和SSMF的色散完全匹配进行精确补偿,链路残余色散在所难免。下面将研究残余色散对CO-OFDM系统的影响。由前面的研究可知色散是对非线性损伤有很大影响的,DCF系统亦是如此。图8是不同残余色散下Q因子与入纤功率的关系。在功率较低时(小于-7 dBm),非线性效应不明显,所以残余色散对系统性能影响很小;当功率大于-7 dBm时,系统中存在很强的非线性损伤,此时残余色散是有益的因素,随着残余色散的增加,非线性损伤得到抑制,Q因子得到提高。当残余色散等于1200 ps/nm时,此时的DCF系统几乎和无在线色散补偿系统性能相同。

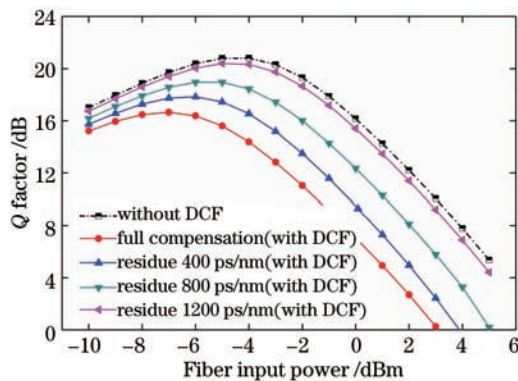


图8 40 Gb/s CO-OFDM系统不同残余色散下Q因子与入纤功率的关系

Fig.8 Relation between Q factor and the optical power into the first fiber span for different residual dispersion

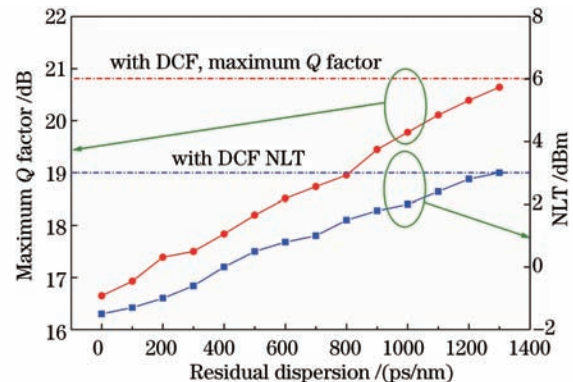


图9 40 Gb/s CO-OFDM系统最大Q因子及非线性阈值与残余色散的关系

Fig.9 Dependences of the maximum Q factor and nonlinearity threshold on the residual dispersion

图9为最大 Q 因子和非线性阈值与残余色散的关系。由图中可见,残余色散对系统是非常有益的因素。随着残余色散的增加,最大 Q 因子和非线性阈值都得到了显著提高,当残余色散为1200 ps/nm时,性能几乎和无色散补偿系统相同。从0到1200 ps/nm,最大 Q 因子提高了4 dB,非线性阈值提高了4 dBm。信道中所存在的残余色散,对CO-OFDM来说不仅不是问题,反倒是有利因素。因此可以这样说:即使采用CO-OFDM升级现有链路,虽然性能与无DCF补偿的链路相差较大,但是现有链路不需要做复杂而精细的色散补偿和管理,大大节省了人力、财力和维护成本。

4 结 论

研究了链路色散分布对CO-OFDM系统的光纤非线性损伤以及系统性能。仿真研究表明,单信道40 Gb/s CO-OFDM系统,无DCF链路比完全补偿DCF链路 Q 因子高5.1 dB;对于DCF链路,当残余色散从0增加到1200 ps/nm时,最大 Q 因子提高了4 dB,非线性阈值提高了4 dBm,性能几乎和无色散补偿系统相同。

参 考 文 献

- 1 W Shieh, C Athaudage. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Electron Lett*, 2006, 42(10): 587-588.
- 2 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.
- 3 W Shieh, X Yi, Y Tang. Transmission experiment of multi-gigabit coherent optical OFDM systems over 1000 km SSMF fiber [J]. *Electron Lett*, 2007, 43(3): 183-185.
- 4 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.
- 5 Xuejun Liu, Haiying Luan, Bo Dai, *et al.*. Influence of fiber link impairments to Eb/No estimation in CO-OFDM systems with QPSK mapping [J]. *Optik*, 2013, 124(15): 1977-1981.
- 6 Liu Xuejun, Luan Haiying, Dai Bo, *et al.*. Fiber nonlinearity impairment for coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing systems with midlink optical phase conjugation [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s105012.
刘学君, 栾海英, 戴波, 等. 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 [J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s105012.
- 7 Hongchun Bao, William Shieh. Transmission simulation of coherent optical OFDM signals in WDM systems [J]. *Opt Express*, 2007, 15(8): 4410-4418.
- 8 Govind P Agrawal. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin, *et al.*. Transl.. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2002. 160-167.
阿戈沃(美)著. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等译. *非线性光纤光学原理及应用* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 160-167.
- 9 Xuejun Liu, Yaojun Qiao, Yuefeng Ji. Inline dispersion compensation effect for 100 Gb/s PDM-CO-OFDM long-haul transmission systems [C]. 2010 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, 2010. 897-901.
- 10 A Jawad Almosawe, H L Saadon. Nonlinear optical and optical limiting properties of new structures of organic nonlinear optical materials for photonic applications [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(4): 041902.
- 11 Huang Wenfa, Wang Xiaochao, Wang Jiangfeng, *et al.*. Temperature characteristic of stimulated Brillouin scattering in single-mode fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0405001.
黄文发, 汪小超, 王江峰, 等. 单模光纤中受激布里渊散射的温度特性 [J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405001.
- 12 Li Ming, Cao Yang, Li Shuming, *et al.*. Study on the repetition space-time codes for multiple-input multiple-output free-space optical systems [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0405004.
黎明, 曹阳, 李书明, 等. 多输入多输出空间光通信中的循环时空编码研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405004.