

激光与光电子学进展

两阶优化增强光学相位共轭技术补偿光纤非线性

易小刚^{1*}, 刘毅^{1,2}¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;²新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 采用光学相位共轭(OPC)法补偿相干光通信系统中的非线性损伤是当前光通信领域的研究热点之一。为了进一步提升 OPC 抑制光纤非线性的能力,针对掺铒光纤放大器的色散管理光传输链路,提出了一种优化共轭信号功率及共轭信号累积色散的两阶优化方法。理论分析表明,功率优化带来的性能增益仅与光纤的色散-衰减系数比有关。因此,以超大有效面积光纤和反色散光纤(SLA-IDF)及标准单模光纤和色散补偿光纤(SSMF-DCF)两种色散管理链路为例,对理论分析结论进行验证。数值模拟结果表明:9信道的偏振复用四相相移键控信号经过 1920 km(24×80 km)的传输后,对于 SLA-IDF 链路,优化光强和色散后系统的最优信噪比(SNR)分别提升了 3.8 dB 和 1.0 dB;对于 SSMF-DCF 链路,优化光强和色散后系统的最优 SNR 分别提升了 0.4 dB 和 1.6 dB。

关键词 光通信; 相干光通信; 色散管理; 光纤非线性; 光学相位共轭

中图分类号 TN929.14

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1906001

Enhanced Optical Phase Conjugation Technique for Fiber Nonlinearity Mitigation by Two-Stage Optimization

Yi Xiaogang^{1*}, Liu yi^{1,2}¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education of China, Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract One of the hottest subjects in the current optical communication sector is the use of optical phase conjugation (OPC) method to decrease fiber nonlinearity. To enhance OPC's capacity to suppress fiber nonlinearity, we propose a two-stage optimization strategy for maximizing the power of conjugated signals and the cumulative dispersion of conjugated signals for the dispersion-managed optical transmission link of erbium-doped fiber amplifiers. The theoretical analysis reveals that the performance gain brought by power optimization is only related to the dispersion-attenuation coefficient ratio of the fiber. Therefore, the theoretical analysis findings are validated using two types of dispersion management connections as examples: super-large-area fiber and inverse dispersion fiber (SLA-IDF) and standard single-mode fiber and dispersion compensation fiber (SSMF-DCF). The numerical simulation results show that after the 9-channel polarization multiplexed quadrature-phase-shift keying signal is transmitted over 1920 km (24×80 km), for the SLA-IDF link, the optimal signal-to-noise ratio (SNR) of the system after optimizing the optical intensity and dispersion is improved by 3.8 dB and 1.0 dB, respectively; for the SSMF-DCF link, the optimal SNR of the system after optimizing the optical intensity and dispersion is improved by 0.4 dB and 1.6 dB, respectively.

Key words optical communications; coherent optical communications; dispersion management; fiber nonlinearity; optical phase conjugation

1 引言

近年来,得益于高速数字信号处理技术(DSP)的

进步,数字相干光通信系统已成为光通信领域的研究热点。相比传统的直接检测技术,相干接收机的灵敏度更高,且能在接收端恢复出传输光场的全部信息,包

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-09-23; 录用日期: 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61475112,61705157)、山西省重点研发计划(201903D121124)、太原理工大学引进人才科研启动项目(tyut-rc201356a)

通信作者: *yixiaogang@tyut.edu.cn

括光场的幅度、相位及偏振态。这些优势使得相干光传输系统能传输更高阶的调制信号以及更远的通信距离,显著提升光通信系统的容量^[1-3]。

光信号在光纤中传输时,由光纤克尔效应(Kerr effect)引起的非线性损伤极大限制了相干光通信系统的传输容量。为了尽可能地消除或抑制这类非线性损伤源,人们提出了多种光域或电域的非线性损伤补偿技术^[4-11],比较典型的有数字背向传输(DBP)方法^[4]和光学相位共轭(OPC)方法^[7]。DBP方法的优势是补偿效果明显、原理简单,但其计算复杂度较高,且需要大带宽的高速模/数转换(ADC)电路,对于高速、长距离传输来说,现阶段DBP技术还不能达到对光信号的实时处理。OPC方法是一种光域补偿方法,可实时处理信号。具体步骤:先通过光链路中的光学共轭器(一般设置在链路中点)将光信号转换为共轭信号,共轭信号在另一半链路中传输时会补偿前半段受到的色散及非线性损伤。OPC技术对链路的对称性要求较高,需要信号在传输过程中的功率演化及累积色散演化相对于光学共轭器的位置镜像对称^[12-13]。该特点限制了OPC

技术的应用,且传统OPC技术主要应用于拉曼(Raman)放大的光传输链路中。针对OPC技术对链路对称性要求较高的缺点,Kaminski等^[14]提出了一种优化色散图谱(Dispersion map)方法,大大提高了OPC技术在掺铒光纤放大器(EDFA)色散管理链路中补偿光纤非线性损伤的效率。

为了进一步提升OPC技术补偿光纤非线性损伤的能力,针对EDFA的长距离色散管理光传输链路,本文提出了一种结合光强优化和色散优化的双阶优化方法。理论分析结果表明,光强优化带来的性能增益仅与光纤的色散-衰减系数比有关。以信息传输速率为128 Gbit/s的9信道偏振复用正交相移键控(PM-QPSK)相干光传输系统为例,对理论分析结果进行了验证,得到的数值模拟结果和理论预测结果相一致。

2 理论分析

2.1 OPC补偿两跨段色散管理链路中的非线性损伤

两跨段色散管理链路模型及其对应的非线性-累积色散关系图(NADD)如图1所示。在图1(a)中的两

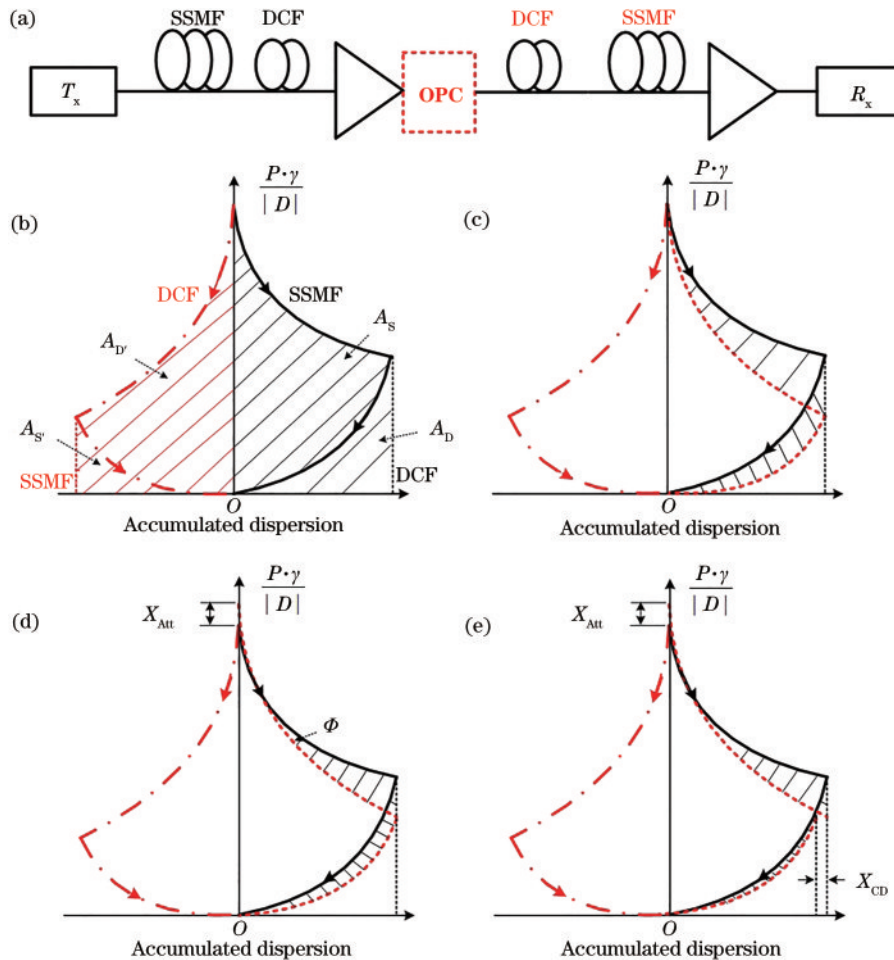


图1 两跨段色散管理链路模型。(a)两跨段色散管理链路的结构;(b)NADD;(c)镜像对称的NADD;(d)共轭信号功率的调节;(e)累积色散的调节

Fig. 1 Model of two-span dispersion management link. (a) Structure of two-span dispersion management link; (b) NADD; (c) mirror-symmetric NADD; (d) adjustment of conjugate signal power; (e) adjustment of cumulative dispersion

跨段色散管理链路中点放置一个光学相位共轭器,假定传输链路由标准单模光纤(SSMF)和色散补偿光纤(DCF)组成。为了实现色散演化对称,SSMF与DCF的累积色散完全相互补偿。此外,为了获得更好的色散演化对称性,OPC前后的SSMF和DCF放置顺序相反^[14]。图1(b)为信号在该链路上传输时的NADD^[15]。其中: T_x 为光发射机; R_x 为光接收机; P 为光信号的功率; γ 为光纤的非线性系数; D 为光纤的色度色散系数; X_{Att} 为共轭信号的放大(衰减)倍数; X_{CD} 为引入的累积色散;实线为信号进入光纤后到达OPC前的NADD;点横线为信号经过OPC后到达接收机前的NADD;箭头为信号的演化方向。

OPC补偿光纤非线性时,光信号传输距离 L 后累积的非线性相移可表示为

$$\Phi(L) = \int_0^L P(L) \cdot \gamma dL = \int_0^L \frac{P(L) \cdot \gamma}{|D|} d(|D| \cdot L) = \int_0^L \frac{P(L) \cdot \gamma}{|D|} d(X_{AcD}), \quad (1)$$

式中: $P(L)$ 为光功率; $X_{AcD} = |D| \cdot L$ 为长度 L 上的累积色散。由式(1)可知,光信号在链路上累积的非线性相移即为图1(b)中阴影部分的面积。信号在前半段链路上(OPC之前)的累积非线性相移为 $A_S + A_D$,在后半段链路上(OPC之后)累积的非线性相移为 $A_{S'} + A_{D'}$ 。下标S和D(S'和D')分别为信号(共轭信号)在SSMF和DCF上的传输过程。这两部分的非线性相移分别来自原始信号和共轭信号,总的非线性相移为两者之差的绝对值,可表示为

$$\Phi^{Total} = |A_S + A_D - A_{S'} - A_{D'}|, \quad (2)$$

式中, Φ^{Total} 为OPC补偿光纤非线性后残留的非线性损伤。 $\Phi^{Total} = 0$ 表示完美补偿,即OPC完全消除了光信号受到的非线性损伤。

为了更加直观地反映 Φ^{Total} 的大小,在图1(b)的基础上对共轭信号(原始信号)的NADD曲线相对于Y轴进行镜像对称变换(Mirror symmetry),得到图1(c)中的虚线。由式(2)可知, Φ^{Total} 的大小对应于图1(c)中阴影部分的面积,即OPC补偿光纤非线性后的残留。为了进一步减小 Φ^{Total} ,提升OPC的补偿效率,将共轭信号放大(衰减) X_{Att} 倍,使NADD曲线整体上(下)移,如图1(d)所示。可以发现,通过放大或衰减

共轭信号能减小阴影部分的面积。类似地,通过引入一定的累积色散 X_{CD} 也可以进一步降低 Φ^{Total} ,如图1(e)所示。此外,SSMF和DCF曲线之间的夹角 φ (与功率优化过程无关,仅由光纤参数决定)决定了功率优化后的 Φ^{Total} 。若 $\varphi = 0$,则仅对功率进行优化就能使 $\Phi^{Total} = 0$,且 φ 越大,功率优化效果就越弱。SSMF曲线遵循

$$\frac{P_S(L) \cdot \gamma_S}{|D_S|} = \frac{P_0 \cdot \exp(-\alpha_S L) \cdot \gamma_S}{|D_S|} = \frac{P_0 \cdot \exp\left(-\alpha_S \frac{X_{AcD}}{|D_S|}\right) \cdot \gamma_S}{|D_S|}, \quad (3)$$

DCF曲线遵循

$$\frac{P_D(L) \cdot \gamma_D}{|D_D|} = \frac{P_0 \cdot \exp(-\alpha_D L) \cdot \gamma_D}{|D_D|} = \frac{P_0 \cdot \exp\left(-\alpha_D \frac{X_{AcD}}{|D_D|}\right) \cdot \gamma_D}{|D_D|}, \quad (4)$$

式中: $\alpha_{S(D)}$ 、 $D_{S(D)}$ 、 $\gamma_{S(D)}$ 分别为SSMF(DCF)光纤的衰减系数、色度色散系数、非线性系数; P_0 为初始光功率; P_S 为进入SLA(SSMF)光纤的入纤功率; P_D 为进入OPC前的光功率。可以发现,SSMF和DCF曲线均为指数曲线,其倾斜度和各自的指数 $|\alpha_{S(D)}/D_{S(D)}|$ 有关,即两条曲线的夹角 φ 与 $|\alpha_S/D_S|$ 和 $|\alpha_D/D_D|$ 的差值有关。两类光纤的衰减系数和色散系数之比(色散系数与衰减系数之比)的差距越大,表明 φ 越大,功率优化效果越不明显。

2.2 基于OPC技术的多跨段色散管理传输链路

通过上述分析可知,对于色散管理链路,OPC的补偿效率可以通过功率优化和色散优化得到进一步提升。为了验证该结论,构建了多跨段色散管理传输链路,如图2所示。其中: P_1 为进入反色散光纤(IDF)或DCF共轭信号的功率,可调衰减器引入的衰减量 $X_{Att} = P_S - P_1$;N为OPC前后的跨段数; N_S 为总跨段数。该多跨段色散管理传输链路考虑了两大类光纤组合构成的传输链路,即大有效面积(SLA)光纤和IDF的组合以及SSMF和DCF的组合。不同光纤的参数如表1所

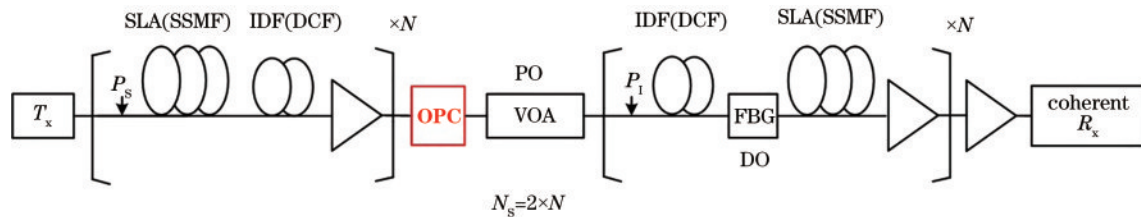


图2 基于OPC技术的长距离色散管理传输模型

Fig. 2 Long-distance dispersion management transmission model based on OPC technology

表 1 不同光纤的参数
Table 1 Parameters of different fibers

Fiber type	Attenuation coefficient / (dB·km ⁻¹)	Dispersion coefficient / (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	Nonlinear coefficient / (W·km ⁻¹)	Dispersion-attenuation coefficient ratio
SLA	0.19	20	0.85	105.3
IDF	0.23	-44	3.08	191.3
SSMF	0.20	17	1.30	85.0
DCF	0.50	-100	5.40	200.0

示。整个链路的跨段数 $N_s=24$, 单跨长度为 80 km。在每跨段末端放置一个噪声指数为 5 dB 的 EDFA 补偿跨段损耗。在链路中点的 OPC 后插入一个可调衰减器 (VOA), 以实现功率优化 (PO) 功能。在时域上对光场信号进行复共轭运算, 以实现理想的 OPC 过程。类似地, 在共轭信号传输部分, SLA 光纤前插入一个光纤布拉格光栅 (FBG), 以引入一定的累积色散 X_{CD} , 实现色散优化 (DO) 功能。假定 FBG 为理想的线性光栅, 不产生衰减与非线性效应。在整个链路末端放置一个 EDFA 以补偿 VOA 引入的损耗。

传输系统的发射机由 9 信道或单信道的 PM-QPSK 组成, 信道间隔为 50 GHz。调制信号速率为 32 Gbit/s $\times 4 = 128$ Gbit/s, 用于调制光载波的电脉冲形状为根升余弦脉冲 (RRC), 滚降因子为 0.01。每个信道用 4 列不相关的伪随机码 (PRBS) 编码, PRBS 在不同信道之间不相关。每个信道的调制光信号采用每符号 32 个采样点进行仿真。

光信号在光纤中的传输用分步傅里叶算法求解矢量形式的马可方程 (Manakov-PMD) 方程模拟, 其步长分布由常数相位法^[16] 决定, 每一步的最大非线性相移为 0.1° 。在接收端采用相干检测法检测信号: 首先, 用每符号 2 个采样点的采样率得到基带电信号; 然后, 采用标准 DSP 算法对信号进行后续处理, 包括电色散补偿 (EDC)、信道均衡 (Channel equalization) 和载波相位估计 (Carrier phase estimation); 最后, 计算中间信道 (设置在 1550 nm 波长处) 经传输后的信噪比 (SNR) 并

以此衡量整个系统的性能。信噪比通过直接对比传输符号和 DSP 处理的符号得到。

3 结果与讨论

首先, 研究了光功率优化对 OPC 补偿非线性效率的影响。在传输光纤分别为 SLA-IDF 以及 SSMF-DCF 时, 改变 VOA 的衰减量 X_{Att} 和 FBG 的累积色散量 X_{CD} 得到的系统 SNR 如图 3 所示。其中, 用 FBG 的累积色散 X_{CD} 对 SSMF (SLA) 光纤的累积色散 X_{CD}^0 进行归一化, 虚线为单信道传输情况, 实线为 9 信道传输情况。为了说明 OPC 抑制非线性损伤的能力, 将入纤功率 P_s 设置在一个较高值, 以激发起较强的光纤非线性。SLA-IDF 链路的 $P_s = 9$ dBm, SSMF-DCF 链路的 $P_s = 6$ dBm。从图 3(a) 可以发现: 对于 SLA-IDF 传输链路, 共轭信号的功率对 OPC 的补偿效率影响较大, 对于单信道和多信道传输, 两类光纤组合的最优功率优化值均为 3.4 dB, 不进行功率优化时 ($X_{Att} = 0$), 单信道和多信道系统的 SNR 分别为 5.4 dB 和 4.7 dB; 将共轭信号功率衰减 3.4 dB (功率的最优值 X_{Att}^{OP}) 后, 系统的 SNR 分别增大到 18.8 dB 和 15.6 dB; 对于 SSMF-DCF 传输链路, 功率优化的最优值为 2 dB, 可分别为多信道和单信道带来约 1.9 dB 和 3.9 dB 的性能增益。从图 3(b) 可以发现, 对于单信道和多信道传输, 两类光纤组合的最优色散优化值 X_{CD}^{DO} 均为 $0.7X_{CD}^0$: 对于 SLA-IDF 链路, 色散优化后多信道和单信道系统的性能增益分别为 2.4 dB 和 2.3 dB; 对于 SSMF-DCF 链路, 色散

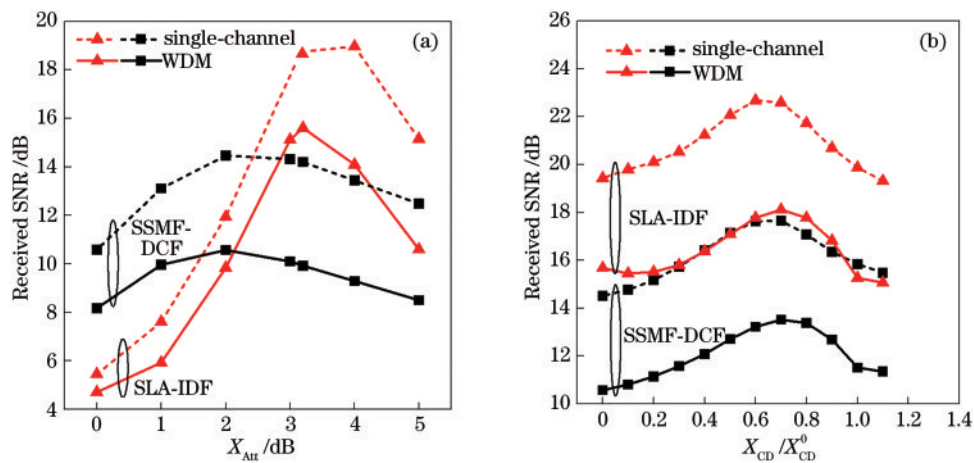


图 3 系统 SNR 随共轭信号功率及累积色散的变化情况。(a) PO; (b) DO

Fig. 3 Variation of system SNR with conjugate signal power and cumulative dispersion. (a) PO; (b) DO

优化后多信道和单信道系统的性能增益分别为 2.9 dB 和 3.2 dB。

设置不同的入纤功率 P_s 时几乎均能找到最好的功率与色散优化值,如表 2 所示。综合图 3 的模拟结果可以发现,改变共轭信号的功率以及引入一定量的额外累积色散均能明显提升 OPC 的补偿效率,这与 2.1 节的理论分析结论一致

表 2 两类光纤链路的最优光强和色散值

Table 2 Optimal light intensity and dispersion values of two types of optical fiber links

Link	$X_{\text{Att}}^{\text{opt}}/\text{dB}$	$X_{\text{CD}}^{\text{opt}}/X_{\text{CD}}^0$
SLA-IDF	3.4	0.7
SSMF-DCF	2.0	0.7

针对两类光纤组合的传输链路进行了功率扫描,得到经过 24 个跨段 ($24 \times 80 \text{ km} = 1920 \text{ km}$) 传输后系统 SNR 和入纤功率 P_s 的关系,如图 4 所示。将链路中的 VOA 衰减及 FBG 引入的色散量均设置为表 2 中的最优点,同时考虑了不进行非线性补偿的情况。可以发现:对于 SLA-IDF 色散管理链路,对共轭信号的功率进行优化后,单信道系统的最优 SNR 相对于仅有 OPC 的情况提升了 4.4 dB,优化 FBG 引入的累积色散后,系统的 SNR 进一步提升至 6.2 dB;对 9 信道传输系统进行功率优化和色散优化后,SNR 分别提升了 3.8 dB 和 1.0 dB;对于 SSMF-DCF 色散管理链路,功率优化和色散优化会给单信道传输和多信道传输分别带来 1.0 dB 和 2.8 dB、0.4 dB 和 1.6 dB 的性能增益。

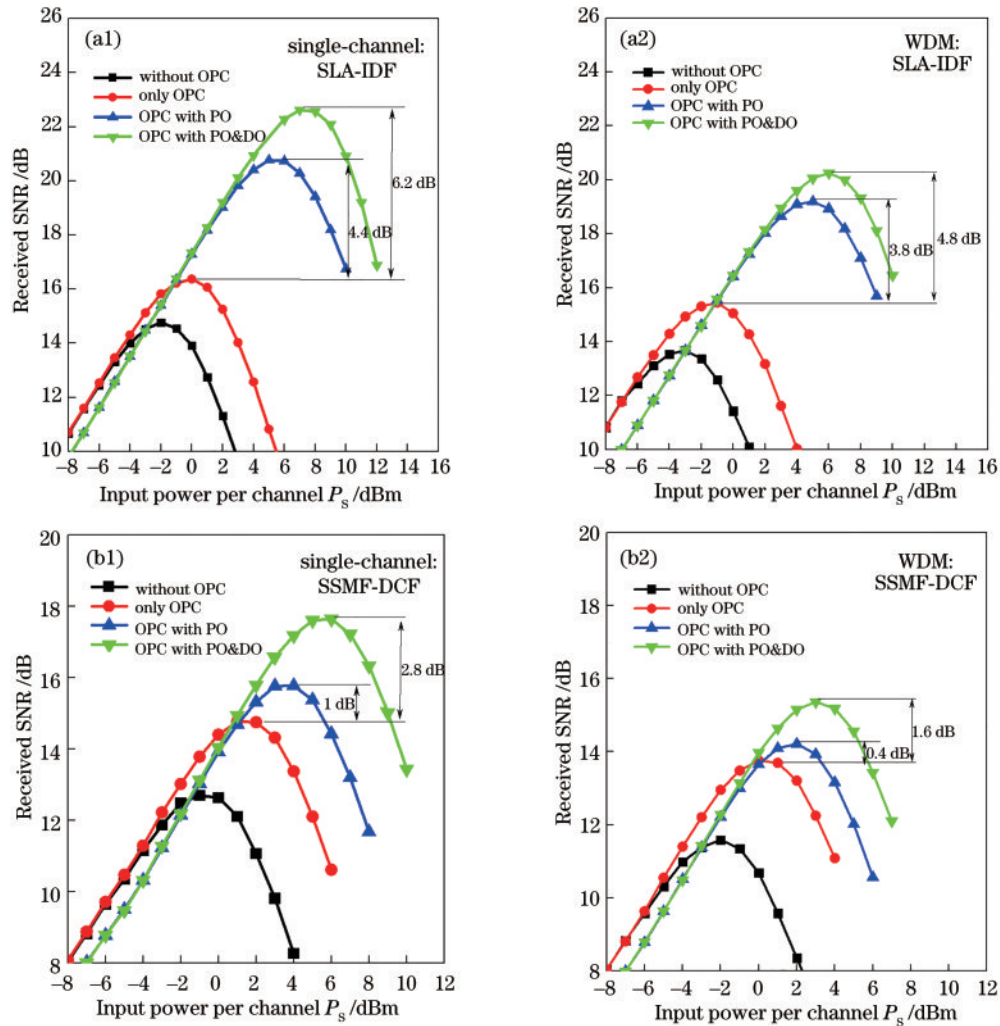


图 4 系统 SNR 和每信道输入功率的关系。(a)SLA-IDF 链路;(b)SSMF-DCF 链路

Fig. 4 Relationship between system SNR and input power per channel. (a) SLA-IDF link; (b) SSMF-DCF link

从图 4 可以发现,功率优化在两类链路上带来的性能增益存在较大差距。原因是 SLA 光纤的色散-衰减系数比(105.3)和 IDF 的色散-衰减系数比(191.3)接近,功率优化可以带来较大的性能增益。但对于 SSMF-DCF 链路来说,SSMF 的色散-衰减参数比(85.0)与 DCF 的色散-衰减参数比(200.0)差距较大,

功率优化效果并不明显。考虑了两阶优化方法对系统最大传输距离的改善情况,给出了单信道和多信道系统在 SLA-IDF 链路上传输时系统的最大 SNR 随传输距离的变化情况,如图 5 所示。此外,图 5 中还给出了误码率(BER)为 3.8×10^{-3} 时的硬判决前向纠错极限(HD-FEC)。可以发现,由于实验中传输的信号为 QPSK 信

号,其接收到的信号 SNR 与其电平信号和噪声的比值 (Q 因子)相等^[17],即 HD-FEC 的 SNR 为 8.5 dB。不采用 OPC 技术时,PM-QPSK 信号在 HD-FEC 极限下能传输的最大距离约为 4800 km (60×80 km),采用 OPC 技术可将该距离增大到约 6400 km (80×80 km),对功率和色散进行优化后可将该距离增大到约 9600 km (120×80 km)。相比链路中没有 OPC 的情况,使用 OPC 并进行功率(色散)优化可以将最大传输距离增长 1 倍。

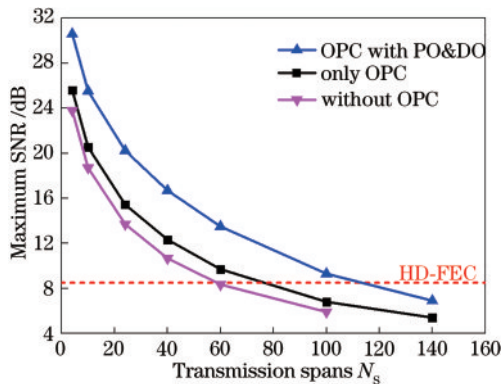


图 5 PM-QPSK 信号在 SLA-IDF 链路上传输时的最大 SNR
Fig. 5 Maximum SNR of PM-QPSK signal transmitted on SLA-IDF link

4 结 论

采用 OPC 技术抑制光通信系统中的非线性损伤具有能够实时工作的优点,但 OPC 技术对信号的功率演化及累积色散演化的对称性要求较高。针对色散管理光传输链路,采用色散图谱优化方法,通过改变共轭光信号功率或引入一定量的累积色散均能大幅提高 OPC 补偿非线性损伤的效率。理论分析结果表明,功率优化提供的性能增益大小仅与正色散光纤及负色散光纤的色散-衰减系数比有关。两类光纤的色散-衰减系数差值越小,功率优化带来的性能增益越大。以 SLA-IDF 及 SSMF-DCF 组合链路对理论分析结论进行验证,结果表明:9 信道的 PM-QPSK 信号经过 1920 km 传输后,对于 SLA-IDF 色散补偿链路,功率优化和色散优化带来的性能增益分别为 3.8 dB 和 1.0 dB;对于 SSMF-DCF 链路,功率优化和色散优化带来的性能增益分别为 0.4 dB 和 1.6 dB。

参 考 文 献

[1] Charlet G, Renaudier J, Mardoyan H, et al. Transmission of 16.4-bit/s capacity over 2550 km using PDM QPSK modulation format and coherent receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 153-157.
[2] 徐文婧,李岩,刘宇畅,等.相干光通信载波相位恢复算法研究[J].*光学学报*,2021,41(12):1206002.
Xu W J, Li Y, Liu Y Y, et al. Carrier phase recovery algorithm for coherent optical communication[J]. *Acta*

Optica Sinica, 2021, 41(12): 1206002.

- [3] 李耀祖,王目光,郭玉箫,等.基于简化扩展卡尔曼滤波的双偏振载波相位恢复算法[J].*光学学报*,2019,39(11):1106005.
Li Y Z, Wang M G, Guo Y X, et al. Dual-polarization carrier phase recovery algorithm based on simplified extended Kalman filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106005.
[4] Ip E. Nonlinear compensation using backpropagation for polarization-multiplexed transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(6): 939-951.
[5] Aldaya I, Giacomidis E, de Oliveira G, et al. Histogram based clustering for nonlinear compensation in long reach coherent passive optical networks[J]. *Applied Sciences*, 2019, 10(1): 152.
[6] 吴金达,卢瑾,任宏亮,等.基于广义回归神经网络的 CO-OFDM 系统非线性均衡[J].*光学学报*,2018,38(9):0906002.
Wu J D, Lu J, Ren H L, et al. Nonlinear equalizer based on general regression neural network in coherent optical OFDM system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0906002.
[7] Jansen S L, van den Borne D, Spinnler B, et al. Optical phase conjugation for ultra long-haul phase-shift-keyed transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 54-64.
[8] Liu L, Li L C, Huang Y D, et al. Intrachannel nonlinearity compensation by inverse Volterra series transfer function[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(3): 310-316.
[9] 黄媛,赵家钰,王金东,等.一种基于波分复用的实时光纤信道偏振补偿系统[J].*光学学报*,2020,40(14):1406003.
Huang Y, Zhao J Y, Wang J D, et al. A real-time polarization compensation system based on wavelength-division multiplexing for optical fiber communication systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1406003.
[10] 蒙建宇,张洪波,张敏,等.基于 IPCA-DNN 算法的光纤非线性损伤补偿[J].*光学学报*,2021,41(24):2406002.
Meng J Y, Zhang H B, Zhang M, et al. Fiber nonlinear impairments compensation based on IPCA-DNN algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2406002.
[11] 龚思雨,张建勇.具有模式依赖损耗的模式复用系统的动态信道补偿特性[J].*光学学报*,2020,40(23):2306006.
Gong S Y, Zhang J Y. Dynamic channel-compensation characteristics of MDM system with mode-dependent loss [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306006.
[12] Minzioni P, Schiffrin A. Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects[J]. *Optics Express*, 2005, 13(21): 8460-8468.
[13] Minzioni P. Nonlinearity compensation in a fiber-optic link by optical phase conjugation[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2009, 28(3): 179-209.
[14] Kaminski P M, da Ros F, Yankov M P, et al. Symmetry enhancement through advanced dispersion mapping in OPC-aided transmission[J]. *Journal of*

- Lightwave Technology, 2021, 39(9): 2820-2829.
- [15] Kaminski P M, Sutili T, da Cruz Júnior J H, et al. All-optical nonlinear pre-compensation of long-reach unrepeated systems[C]//2020 European Conference on Optical Communications (ECOC), December 6-10, 2020, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2020.
- [16] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. 3rd ed. New York: Academic Press, 2001.
- [17] Al-Khateeb M A Z, McCarthy M, Sánchez C, et al. Effect of second order signal-noise interactions in nonlinearity compensated optical transmission systems[J]. Optics Letters, 2016, 41(8): 1849-1852.