

光学学报

基于无波长偏移光学相位共轭的信号损伤补偿

巩小雪¹, 肖汶玲¹, 张琦涵^{2*}, 张天天¹, 尹星¹, 郭磊¹¹重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;²东北大学计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 为了解决强度调制-直接检测正交频分复用(IM-DD OFDM)光通信系统中由光纤色散和非线性效应导致的传输性能下降的问题,提出利用正交偏振泵浦非简并四波混频(NFWM)产生的无波长偏移光学相位共轭(OPC)波对系统中的信号损伤进行光域补偿。首先在理论上推导了利用正交偏振泵浦NFWM生成OPC波的原理,基于上述原理,设计了无波长偏移OPC实现方式,在正交偏振态上得到与原信号波长完全一致的OPC波。然后对影响生成OPC波功率的因素进行了具体分析。最后依据优化参数设置,进行仿真验证,结果表明所提系统能够以114.375 Gbit/s的传输速率在长度为240 km的标准单模光纤链路中传输。

关键词 光通信; 强度调制-直接检测; 正交频分复用; 色散补偿; 非线性抑制; 光学相位共轭

中图分类号 TN913.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231959

1 引言

随着互联网的全球普及和信息化进程的加速,新型基础设施的建设备受关注^[1]。光纤通信系统作为全球宽带网络的重要基础设施^[2-3],目前正广泛应用于城域网领域。为了满足城域网日益增长的系统容量和传输距离需求,需要使单个波长信道内的传输容量最大化。正交频分复用(OFDM)技术通过将信号降速后再加载到每个子载波上,能在光纤传输时容忍一定的色散,进而在有限的带宽范围内最大化传输容量,因此成为研究热点^[4]。强度调制-直接检测(IM-DD)是目前城域网接入层应用最为广泛的方式^[5-8],但其受光纤的色散影响较为严重,无法满足城域网中其他层的长距离传输需求。故将二者结合在一起的IM-DD OFDM系统受到了越来越多的关注^[9-11]。但随着下一代城域网对系统容量和传输距离需求的进一步增大,色散问题将超过OFDM技术可容忍的极限,并且非线性效应的影响也会更加明显,使系统性能严重下降^[12-13]。

现有研究用于补偿色散和非线性效应的方法主要包括电域补偿算法和光域补偿算法。电域补偿算法使用收发机的数字信号处理(DSP)技术进行补偿,但随着传输速率的提高,DSP的复杂度成倍增加,该算法的适用范围受到限制^[14-15]。光域补偿算法通过使用光

学器件如光纤布拉格光栅和色散补偿光纤进行补偿,通常能够获得较高的传输速率和较长的传输距离^[16-17]。但是,由于光学器件的造价较高,因此在中长距离传输中整个链路成本也会很高。此外,常用数字反向传播(DBP)技术^[18]和光学相位共轭(OPC)技术^[19-21]同时补偿色散和非线性效应,但DBP需要求解光纤信道的逆非线性薛定谔方程,计算成本过高,目前只能通过降低其运算复杂度来满足链路传输的需求。在运用OPC技术的过程中,理论上当两段光纤长度一致时,在第一段光纤中积累的偶数阶色散以及非线性效应导致的脉冲展宽将在第二段光纤中完全得到恢复^[22]。然而,传统的基于单泵浦非简并四波混频(DFWM)的OPC方案由于相位共轭器处的信号波长发生偏移,使得在第二段光纤链路中的群速度色散参数改变,导致OPC波的位置需要稍微偏离光纤链路的中点,这样才能够实现完全的信号损伤补偿,且该方案存在偏振敏感问题,导致四波混频(FWM)的效率降低,从而影响OPC波对系统的补偿性能。此外,由于高非线性光纤(HNLF)具有超快的非线性响应,且具有可与光纤信道紧耦合等优势,基于HNLF实现FWM的研究备受关注^[23]。

本文针对IM-DD OFDM光通信系统提出基于正交偏振泵浦非简并四波混频(NFWM)的无波长偏移OPC补偿方案,同时补偿色散且抑制非线性效应的影

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-01-13; 录用日期: 2024-01-21; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2906200)、国家自然科学基金资助项目(62075024, 62025105, 62071076, 62221005)、重庆市教委创新研究群体项目(CXQT21019)

通信作者: *qihanzhang@stumail.neu.edu.cn

响。首先理论分析了在 HNLF 中利用基于正交偏振泵浦 NFWM 产生无波长偏移 OPC 波的原理,并给出其产生方式。其次通过对影响 NFWM 效率的信号功率、泵浦功率以及 HNLF 的长度等参数进行分析,得到优化的参数设置值。基于这些参数,进行仿真验证,结果表明所提系统能够以 114.375 Gbit/s 的传输速率传输 240 km 的标准单模光纤 (SSMF)。该方案能够避免中点偏移和偏振敏感问题,可为高速率长距离的城域光网络 IM-DD OFDM 系统的实现提供参考。

2 理论分析

2.1 无波长偏移 OPC 波的产生原理

通过利用 HNLF 中基于正交偏振泵浦的 NFWM 得到无波长偏移的 OPC 波,下面理论分析该 OPC 波的近似解。假设位于两正交偏振态上的线偏振泵浦波的振幅和传播常数分别为 A_{1X} 和 β_1 、 A_{2Y} 和 β_2 ,其中下标 X 、 Y 分别代表偏振态 X 和偏振态 Y ,信号波的偏振态同 A_{1X} ,其振幅设为 A_{3X} ,传播常数设为 β_{3X} 。这三个波的功率(即振幅)满足 $|A_{1X}|^2 \gg |A_{3X}|^2$ 、 $|A_{2Y}|^2 \gg$

$|A_{3X}|^2$,三个波经波分复用器(WDM)耦合后进入 HNLF 中并激发 NFWM 过程,生成与 A_{2Y} 同偏振态的闲频波,其振幅为 A_{3Y} ,传播常数为 β_{3Y} ,这四个波之间应满足耦合振幅方程

$$\begin{cases} \frac{dA_{1X}}{dz} = j\gamma \left[(|A_{1X}|^2 + 2|A_{2Y}|^2) A_{1X} \right] \\ \frac{dA_{2Y}}{dz} = j\gamma \left[(|A_{2Y}|^2 + 2|A_{1X}|^2) A_{2Y} \right] \\ \frac{dA_{3X}}{dz} = j2\gamma \left[(|A_{1X}|^2 + |A_{2Y}|^2) A_{3X} + A_{1X} A_{2Y} \overline{A_{3Y}} e^{-j\Delta k z} \right] \\ \frac{dA_{3Y}}{dz} = j2\gamma \left[(|A_{1X}|^2 + |A_{2Y}|^2) A_{3Y} + A_{1X} A_{2Y} \overline{A_{3X}} e^{-j\Delta k z} \right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: Δk 为相位失配参量, $\Delta k = \beta_{3X} + \beta_{3Y} - \beta_1 - \beta_2$; γ 为非线性参量; j 为虚数单位; z 为光信号传播方向上的坐标; $\overline{A_{3Y}}$ 为振幅 A_{3Y} 的共轭; $\overline{A_{3X}}$ 为振幅 A_{3X} 的共轭。通过对上述耦合振幅方程的求解,可以得到最后经过 NFWM 过程后的闲频波振幅,该闲频波振幅可表示为

$$A_{3Y} = j \frac{2\gamma}{g} A_{1X}(0) A_{2Y}(0) \overline{A_{3X}(0)} \sinh(gz) \exp \left\{ j \left[2\gamma (|A_{1X}|^2 + |A_{2Y}|^2) - \kappa/2 \right] z \right\}, \quad (2)$$

式中: $A_{1X}(0)$ 、 $A_{2Y}(0)$ 和 $A_{3X}(0)$ 分别为三个波在输入 HNLF 时,即 $z=0$ 时的初值,且由于 A_{3Y} 是新产生的,可假设 $A_{3Y}(0) = 0$; κ 为有效相位失配参量, $\kappa = \gamma (|A_{1X}|^2 + |A_{2Y}|^2) + \Delta k$; g 为参量增益, $g = \sqrt{4\gamma^2 |A_{1X}(0)|^2 |A_{2Y}(0)|^2 - (\kappa/2)^2}$ 。

根据 NFWM 的频率对称关系,可以得到 Y 偏振态上产生的闲频波与原信号波具有相同的频率,即得到了无波长偏移的 OPC 波。由式(2)可知,生成的

OPC 波的振幅与 HNLF 的非线性参量 γ 和长度 z 、两束泵浦波的输入功率 $A_{1X}(0)$ 和 $A_{2Y}(0)$ 以及信号波的输入功率 $A_{3X}(0)$ 有关。所以,可对上述参数进行仿真分析,得到这些参数对系统的影响,进一步优化系统的传输性能。

2.2 无波长偏移 OPC 波的产生方式

图 1 给出了 HNLF 中基于正交偏振泵浦 NFWM 的无波长偏移 OPC 波的产生方式,采用两路正交泵浦信号,与信号发生 NFWM 效应生成 OPC 波。具体来

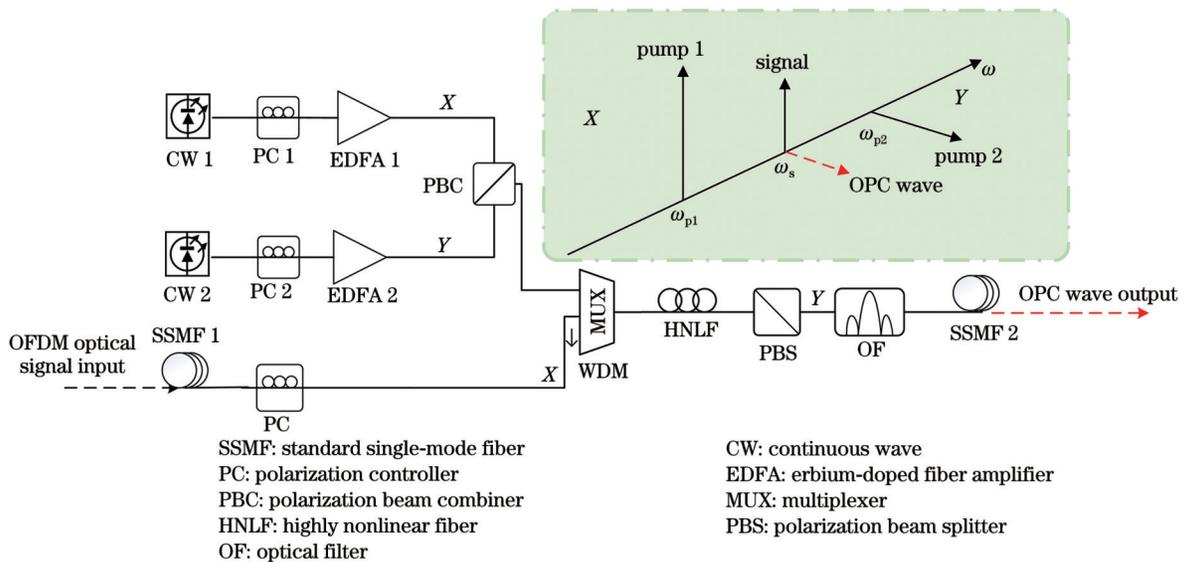


图 1 基于正交偏振泵浦 NFWM 的无波长偏移 OPC 波的产生方法

Fig. 1 Wavelength-shift-free OPC wave generation method based on orthogonal polarization pumped NFWM

说,连续波(CW)激光器 CW 1 和 CW 2 产生的光信号分别经过偏振控制器(PC)PC 1 和 PC 2 后得到两路偏振态分别为 X 和 Y 的泵浦光信号,经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后通过偏振合束器(PBC)进行合束,并与经 PC 控制在 X 偏振态上的信号波一起注入 WDM 中。这三路信号耦合注入 HNLF 中,发生 NFWM 效应,在 Y 偏振态上生成 OPC 波。如图 1 所示,两泵浦对称位于信号光的两侧,其中信号光的波长接近 HNLF 的零色散波长。假设位于 X 偏振态上的泵浦的中心频率为 ω_{p1} ,位于 Y 偏振态上的泵浦中心频率为 ω_{p2} ,信号波的中心频率为 ω_s 。两个泵浦波与信号波要生成无波长偏移的 OPC 波应满足关系式 $\omega_{p1} + \omega_{p2} = 2\omega_s$,才能够保证 OPC 波的波长位置与原信号波长一致,仅处于另一偏振态上。正因为生成的 OPC 波处于另一偏振态上,利用偏振分束器(PBS)能够很容易地把 Y 偏振态上的信号分离出来,再经过光学滤波器(OF)滤除泵浦波,即可得到无波长偏移的 OPC 波。OFDM 光信号在第二段 SSMF 中受到的偶数阶色度色散和非线性损伤,可在产生无波长偏移的 OPC 波后,在等长的第二段 SSMF 中传输并得到有效补偿。此外,由于在生成

无波长偏移的 OPC 波的过程中没有发生频率的偏移,故不存在传统的 OPC 方案需要偏移中点位置才能够完全补偿的情况,即无波长偏移的 OPC 波的发生装置可以完全置于两段光纤链路的中点处。

3 系统仿真及结果分析

3.1 仿真系统设计

图 2 给出了所提的 HNLF 中基于正交偏振泵浦 NFWM 产生 OPC 波的 IM-DD OFDM 系统的原理图。主要包括 OFDM 发射机、传输链路(包含 SSMF 1、无波长偏移 OPC 波的发生和分离装置、SSMF 2)以及 OFDM 接收机。在发送端,经过离线 DSP 技术处理得到 OFDM 电信号^[24](该射频信号的电压为 V_{RF1}),与 CW 激光器产生的光信号一同进入马赫-曾德尔调制器(MZM)进行强度调制,得到 OFDM 光信号。OFDM 光信号经 SSMF 1 传输后,进入到无波长偏移 OPC 波的发生和分离装置,得到 OPC 波,再进入等长的 SSMF 2 进行传输。在接收端,通过光电探测器(PD)进行直接检测,并进行简单离线 DSP 的信道均衡处理。

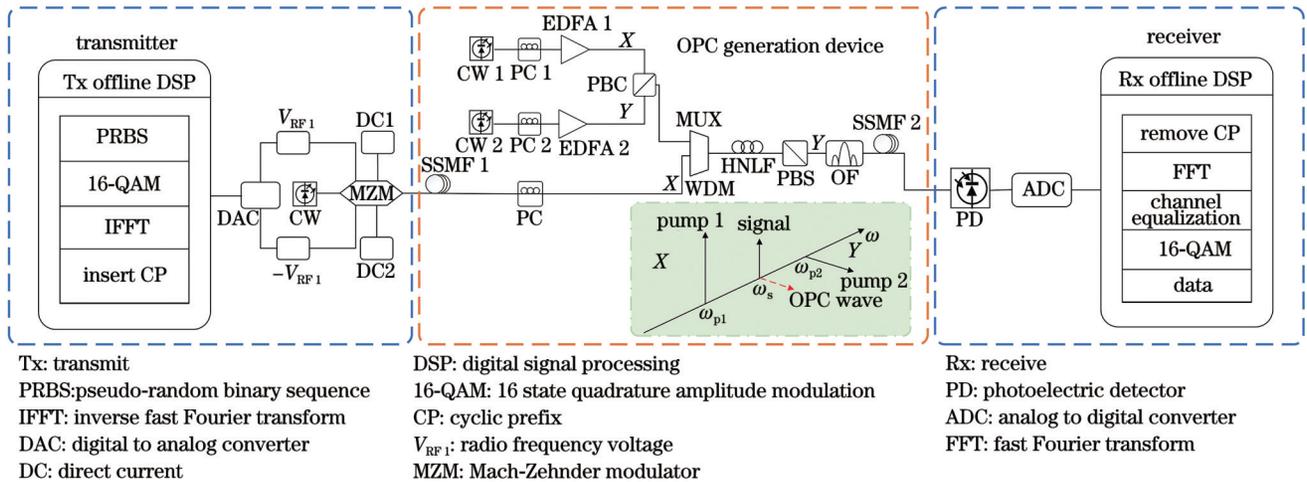


图 2 基于正交偏振泵浦 NFWM 产生 OPC 波的 IM-DD OFDM 系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of IM-DD OFDM system based on OPC wave generated by orthogonal polarization pumped NFWM

3.2 仿真参数设置

仿真系统采用 MATLAB 与 VPI 联合仿真搭建。在发送端,伪随机序列(PRBS)经过 16-QAM 映射(16-QAM mapping)成复数,而后进行快速傅里叶逆变换(IFFT)并插入循环前缀(Insert CP),离线生成 OFDM 符号,然后通过数模转换器(DAC)转化为差分模拟信号以驱动 MZM 产生 IM-OFDM 光信号。在接收端,通过反向操作并在解 16-QAM 映射(16-QAM demapping)前进行信道均衡(Channel equalization)即可得到数据信息。其中,OFDM 符号数目为 1000,承载数据的有效子载波个数为 61,IFFT 点数为 1024,CP 比例为 1/4,符号速率为 75 GBaud,于是可计算得到系统的传输速率为 114.375 Gbit/s。OFDM 光信号

CW 的中心频率设置为 193.4145 THz, X 偏振态泵浦信号 CW 1 的中心频率设置为 193.272 THz, Y 偏振态泵浦信号 CW 2 的中心频率设置为 193.557 THz。传输链路总长度为 240 km。表 1 列出了参数汇总。

3.3 结果分析

由 2.1 节的讨论可知,泵浦光功率以及 HNLF 的非线性系数和长度可能对系统的性能起到关键作用。因此,首先对泵浦光功率的影响情况进行分析。图 3 所示为在不同的泵浦光功率取值下,误码率(BER)随注入到 OPC 中的信号光功率变化的曲线图。从图 3 可以看出,当信号光功率小于 5.3 dBm 时,随着信号光功率的增加,光纤的线性效应占主导地位,BER 逐渐降低;此后,随着光信号功率的继续增加,光纤的非线

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting

Parameter	Value
Symbol rate /GBaud	75
Transfer rate / (Gbit/s)	114.375
Number of OFDM symbol	1000
Modulation format	16-QAM
IFFT/FFT point	1024
Number of effective subcarrier	61
Proportion of cyclic prefix	1/4
OFDM optical signal center frequency /THz	193.4145
Center frequency of X-polarization pump signal /THz	193.272
Center frequency of Y-polarization pump signal /THz	193.557
Length of SSMF link /km	240

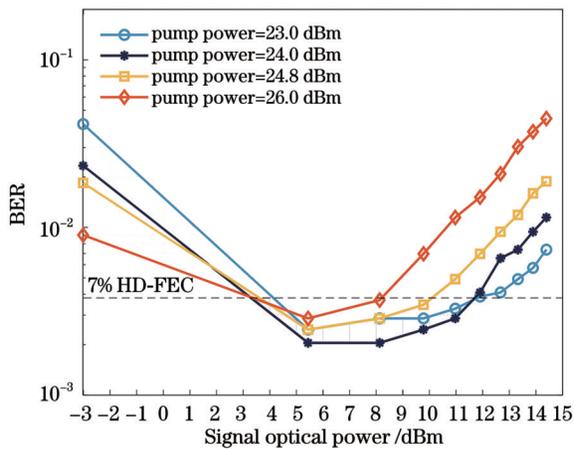


图 3 BER 随信号光功率变化

Fig. 3 BER varies with signal optical power

性效应开始起主要作用, BER 将上升。但当泵浦功率较大时, 随着光信号功率的继续增加其 BER 会出现陡升, 如图 3 菱形标记曲线所示, 其主要原因是泵浦功率的增大会导致生成的 OPC 波的带宽内存在较大的放大自发辐射噪声, 该噪声无法被 OF 滤除, 因而影响其补偿的有效性。从图 3 的星号标记和圆圈标记曲线可以看出, 随着光信号功率增大至 12.0 dBm 后, 泵浦光功率为 24.0 dBm 时得到的 BER 比泵浦光功率为 23.0 dBm 的大, 但当泵浦光功率为 24.0 dBm 时, 系统的 BER 在信号光功率为 5.3~12.0 dBm 范围内最低, 因此其鲁棒性要强于泵浦光功率为 23.0 dBm 时的。因此在实际应用中, 可以通过选取最佳的光信号功率和泵浦光功率来提升系统鲁棒性, 降低 BER, 进而提升 OPC 补偿算法的性能。

接下来分析 HNLf 的非线性系数和长度对系统性能的影响。图 4 给出了在不同的克尔系数取值下, BER 随 HNLf 长度变化的曲线示意图。由图 4 可知, 随着非线性参量的增大, 在 HNLf 较短时 BER 较小,

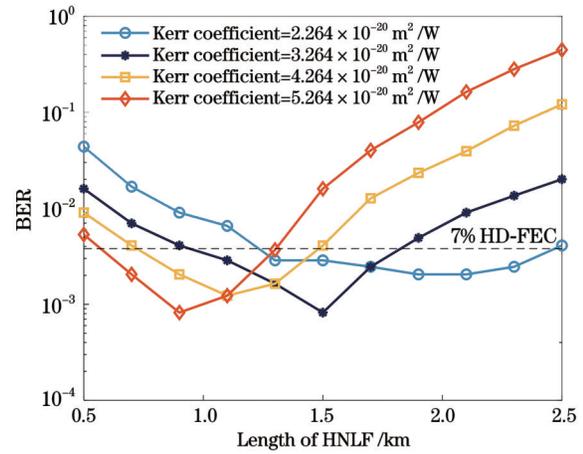


图 4 BER 随 HNLf 长度变化

Fig. 4 BER varies with length of HNLf

但随着 HNLf 长度的增加, 其性能反而在劣化。本方案采取的是双偏振泵浦, 这使得总泵浦光功率较大, 与信号在 HNLf 中发生的非线性效应更剧烈, 因此采用较短的 HNLf 就可以生成所需的 OPC 波。

通过分析上述参数对系统造成的影响, 对各个参数进行优化, 注入 HNLf 的信号功率设置为 5.3 dBm, 注入 HNLf 的泵浦功率设置为 24.0 dBm, HNLf 长度设置为 1.5 km, 得到基于正交泵浦 NFWM 的无波长偏移 OPC 传输的 IM-DD OFDM 系统的仿真性能表现。传统 OPC 方案会产生中点偏移和偏振敏感的问题, 实际上中点偏移问题可以通过公式计算出大概的偏移值, 但即便计算出偏移值仍然会不可避免地受到偏振敏感的影响。因此, 为了更直观地说明无波长偏移的 OPC 波的优势, 将未进行中点偏移值计算的传统 OPC 方案、进行中点偏移值计算的传统 OPC 方案以及所提的无波长偏移 OPC 方案进行了对比分析, 得到的 BER 随接收光功率 (ROP) 变化的结果如图 5 所示。其中圆圈标记曲线为系统基于未经过中点偏移值计算的传统 OPC 方案结果, 方形标记曲线为系统基于经过中点偏移值计算的传统 OPC 方案结果, 三角标记曲线为所提基于无波长偏移的 OPC 方案结果。由图 5 可知, 在设置的传输速率和距离下, 未经过中点偏移值计算的 OPC 传输系统 BER 几乎是一条接近 0.5 的直线, 无法进行正确的解调, 其主要原因是共轭波发生频率偏移导致 SSMF 2 中的二阶色散值发生变化, 在传输速率较低时, 其高阶色散效应并不明显, 但是在高速率情况下, 由于频率偏移所造成的三阶色散会使系统性能严重劣化; 经过中点偏移值计算后的 OPC 传输系统的性能显然优于未经过中点偏移值计算的 OPC 传输系统, 但是与基于无波长偏移的 OPC 传输系统的性能相比还是欠佳, 主要原因是基于单泵浦 DFWM 的 OPC 传输系统会存在偏振敏感问题, 而单模光纤中的偏振模色散问题也会因为速率的上升变得愈加严重, 导致其整体的性能弱于无波长偏移的 OPC 传输系

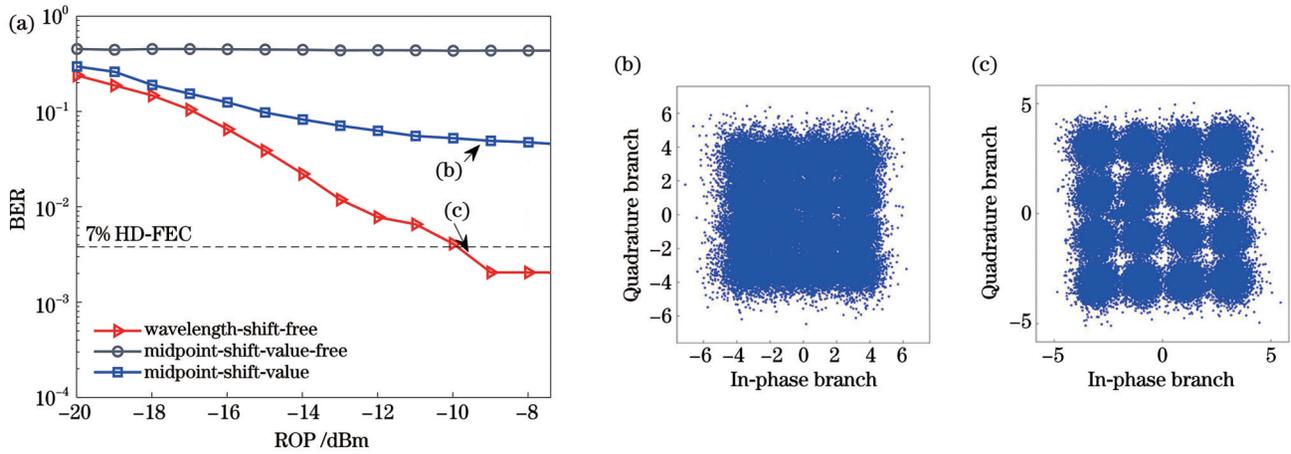


图5 无波长偏移、有无中点偏移值计算OPC传输系统的传输性能对比。(a)基于不同补偿情况下随ROP变化的BER曲线;(b)经过中点偏移值计算OPC传输系统的星座图;(c)无波长偏移OPC传输系统的星座图

Fig. 5 Transmission performance comparison of wavelength-shift-free, midpoint-shift-value-based, and midpoint-shift-value-free OPC transmission systems. (a) BER curves with ROP under different compensation conditions; (b) OPC transmission system constellation diagram calculated after midpoint-shift-value; (c) OPC transmission system constellation diagram with wavelength-shift-free

统。图5(b)、(c)表示基于经过中点偏移值计算的OPC传输系统和基于无波长偏移OPC传输系统在ROP为-8.0 dBm时的星座图。由星座图可知,经过中点偏移值计算的OPC传输系统的星座图只能看出16-QAM信号大致的形状,但每个点之间的间隙被噪点填满,导致其解调困难,当ROP为-8.0 dBm时无法达到7%的硬判决前向纠错(HD-FEC)门限。基于无波长偏移的OPC传输系统的星座点较为清晰且坐标位置正确,噪点较少,能够达到7%的HD-FEC门限。因此,可以更加直观地说明所提方案的有效性。

4 结 论

理论分析并验证了基于正交偏振泵浦NFWM无波长偏移OPC补偿IM-DD OFDM光通信系统损伤的可行性和有效性。为了使系统达到更好的性能,对影响系统性能的各个参数进行研究,将所提方案与传统的OPC方案的性能进行对比,得到基于无波长偏移OPC传输的系统当ROP为-10.0 dBm时,BER达到7%的HD-FEC门限,而基于传统OPC方案的系统即使经过中点偏移值计算后,在该传输条件下也无法达到判决门限。所提方案可为高速率长距离IM-DD OFDM光通信系统的设计提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] 王丽彪, 刘凯. F5G数字基建: 高质量发展的先导与基石[J]. 信息通信技术与政策, 2020(9): 85-90.
Wang L B, Liu K. F5G digital infrastructure: the pioneer and foundation for high-quality development[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(9): 85-90.
- [2] Hasan D A, Hussain B K, Zeebaree S R M, et al. The impact of test case generation methods on the software performance: a review[J]. International Journal of Social Science and Business, 2021, 5(6): 33-44.

- [3] Kaur S, Singh P, Tripathi V, et al. Recent trends in wireless and optical fiber communication[J]. Global Transitions Proceedings, 2022, 3(1): 343-348.
- [4] Ma J X, Hu Z Q. Polarization multiplexed optical OFDM system with a beat interference cancellation receiver[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 7202710.
- [5] 胡霞, 赵利, 余建军. 基于波长变换的概率整形正交频分复用光信号传输系统[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 1906001.
Hu X, Zhao L, Yu J J. Probabilistic shaping orthogonal frequency division multiplexing optical signal transmission system based on wavelength conversion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 1906001.
- [6] 巩小雪, 胡婷, 张琦涵. 色散抑制单边带数字滤波多址-无源光网络系统[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1406002.
Gong X X, Hu T, Zhang Q H. Dispersion suppressed single sideband digital filtered multiple access-passive optical network systems[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1406002.
- [7] 孙梦凡, 蔡沅成, 朱敏, 等. 直接探测光纤通信系统场信号恢复技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1100002.
Sun M F, Cai Y C, Zhu M, et al. Survey of field-signal recovery technique in direct-detection optical fiber communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1100002.
- [8] Hossain M A, Elshafiey I, Al-Sanie A, et al. OFDM based fiber nonlinear impairment compensation for long-reach passive optical networks[J]. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 2021, 15(9/10): 442-447.
- [9] Mrabet H. A performance analysis of a hybrid OCDMA-PON configuration based on IM/DD fast-OFDM technique for access network[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7690.
- [10] Taspinar N, Alhalabi M. Performance investigation of long-haul high data rate optical OFDM IM/DD system with different QAM modulations[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 72(3): 192-197.
- [11] Yu B X, Guo C J, Zhang S, et al. Chromatic dispersion mitigation using a SEFDM-based diversity technique for IM/DD long reach optical links[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 38579-38592.
- [12] Zou D D, Li F, Li Z B, et al. 100G PAM-6 and PAM-8 signal transmission enabled by pre-chirping for 10-km intra-DCI utilizing MZM in C-band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3857-3865.

- 2020, 38(13): 3445-3453.
- [13] Zhang J W, Guo C J, Liu J, et al. Decision-feedback frequency-domain Volterra nonlinear equalizer for IM/DD OFDM long-reach PON[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3333-3342.
- [14] Karar A S. Iterative algorithm for electronic dispersion compensation in IM/DD systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 698-704.
- [15] Liang W X, Wang H D, Huang X C, et al. 56 Gbit/s OOK signal in C-band over 20 km dispersion-uncompensated link transmission with receiver-side EDC algorithm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(5): 7905707.
- [16] Amiri I S, Rashed A N Z, Kader H M A, et al. Optical communication transmission systems improvement based on chromatic and polarization Mode dispersion compensation simulation management[J]. *Optik*, 2020, 207: 163853.
- [17] Dahir A A, Yu Z H. Dispersion compensation by using FBG and low pass Gaussian filter[C]//2020 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), May 15-18, 2020, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2020: 803-806.
- [18] Yi X W, Huang X T, Zhang J, et al. Imbalanced digital back-propagation for nonlinear optical fiber transmissions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4622-4628.
- [19] Chen Y X, Li J H, Zhu P K, et al. Demonstration of 400 Gb/s optical PDM-OFDM superchannel unrepeated transmission by all optical phase-conjugated copy[J]. *Optics Communications*, 2016, 380: 326-330.
- [20] Singh S, Singh S. On compensation of four wave mixing effect in dispersion managed hybrid WDM-OTDM multicast overlay system with optical phase conjugation modules[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 38: 160-166.
- [21] Zhang H H, Zhang Q L, Huang C R, et al. Transmission impairment mitigation for single-sideband signals by optical phase conjugation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(3): 150-153.
- [22] Yi X G. Fiber nonlinearity compensation: DBP versus link-optimized OPC in coherent transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(5): 287-290.
- [23] Gong X X, Zhong J T, Zhang Q H, et al. Reconfigurable all-optical format conversion for 16QAM/8QAM by employing PSA in HNLF[J]. *Optics Express*, 2023, 31(14): 22802-22816.
- [24] Gong X X, Guo L, Dong Y X, et al. SPM-improved transmission performance of software-reconfigurable IMDD PONs based on digital orthogonal filtering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(20): 4488-4496.

Signal Impairments Compensation Based on Wavelength-Shift-Free Optical Phase Conjugation

Gong Xiaoxue¹, Xiao Wenling¹, Zhang Qihan^{2*}, Zhang Tiantian¹, Yin Xing¹, Guo Lei¹

¹*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

²*School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China*

Abstract

Objective Maximizing the transmission capacity of individual wavelength channels is necessary to meet the increasing capacity and distance requirements of metro optical networks. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology can tolerate certain chromatic dispersion when signals are loaded onto each subcarrier, thus maximizing the transmission capacity within limited bandwidths during optical fiber transmission. In addition, intensity modulation-direct detection (IM-DD) is currently the most widely used method in metro optical network access layers. However, it is severely affected by fiber chromatic dispersion and cannot meet the needs of long-distance transmission in other layers of metro optical networks. Therefore, the IM-DD OFDM system combining the two technologies has received increasing attention. However, as the capacity and distance requirements of next-generation metro optical networks increase further, the dispersion problem will exceed the tolerable limit of OFDM, and the impact of nonlinear effects will become more obvious, causing a serious decline in system performance. Digital back-propagation (DBP) and optical phase conjugation (OPC) technologies are commonly used to compensate for chromatic dispersion and nonlinear effects simultaneously. However, DBP requires solving the inverse non-linear Schrodinger equation of the fiber channel, which has a high computational cost. When using OPC technology, when two sections of fiber have the same length, the even-order chromatic dispersion and pulse broadening caused by nonlinear effects accumulated in the first section of fiber will be completely recovered in the second section of fiber theoretically. However, traditional OPC schemes based on single-pump degenerate four-wave mixing (DFWM) have signal wavelength shifts at the phase conjugator, which changes the group velocity dispersion parameters in the second section of the fiber link. As a result, the OPC needs to be slightly shift from the midpoint of the fiber link to achieve complete signal impairment compensation. There is also a polarization sensitivity problem that reduces the efficiency of four-wave mixing (FWM), thus affecting the compensation performance of OPC waves in the system.

Methods We propose a wavelength-shift-free OPC compensation scheme based on orthogonal polarization pumping non-degenerate four-wave mixing (NFWM) for IM-DD OFDM optical communication systems. It simultaneously compensates for chromatic dispersion and suppresses the impact of the nonlinear effects. First, we theoretically derive the principle of generating an OPC using orthogonal polarization pumping NFWM in a highly nonlinear fiber (HNLF). Based on the above principle, we design a wavelength-shift-free OPC implementation method to obtain an OPC wave with the same wavelength as the original signal in the orthogonal polarization state. Then, the factors that affect the power of the generated OPC wave are specifically analyzed. Finally, according to the optimized parameter settings, a simulation verification is performed.

Results and Discussions The pump optical power, the nonlinear coefficient, and the length of HNLF play a key role in the performance of IM-DD OFDM systems based on orthogonal polarization pumping NFWM for generating OPC. First, the impact of pump optical power is analyzed. Fig. 3 shows that the bit error rate (BER) varies with the change in the signal optical power injected into the OPC at different pump optical power values. It can be seen that a larger pump power will cause a sudden increase in the BER as the optical signal power continues to increase. The main reason for this is that the increase in pump power will lead to a large amplified spontaneous emission noise within the bandwidth of the generated OPC wave. The noise cannot be filtered out by an optical filter and will affect its compensation effectiveness. Next, the impact of the nonlinear coefficient and length of the HNLF on the system performance is analyzed. As shown in Fig. 4, with an increase in the nonlinear parameters, the BER is lower when the HNLF is shorter. However, its performance degrades as the length of HNLF increases. Finally, we compare the performance of the traditional OPC scheme without calculating the shift value at the midpoint, the traditional OPC scheme with midpoint-shift-value calculation, and our wavelength-shift-free OPC scheme. The BER curves varied with the received optical power (ROP), as shown in Fig. 5. It can be seen that our proposed system can achieve a 7% HD-FEC threshold at a rate of 114.375 Gbit/s through a standard single-mode fiber link with a length of 240 km, and the constellation points are relatively clear with few noise points.

Conclusions We theoretically analyze and verify the feasibility and effectiveness of wavelength-shift-free OPC compensation for IM-DD OFDM optical communication systems based on orthogonal polarization pump NFWM. To achieve better performance for the system, we study various parameters that affect system performance. The performance comparison between the proposed scheme and the traditional OPC scheme is conducted, and it is found that the system based on wavelength-shift-free OPC transmission achieves a BER of 7% for HD-FEC threshold at an ROP of -10 dBm, while the system based on traditional OPC scheme cannot achieve the decision threshold even after midpoint-shift-value calculation under this transmission condition. Our scheme can provide a theoretical basis for the design of high-speed long-distance IM-DD OFDM optical communication systems.

Key words optical communications; intensity modulation-direct detection; orthogonal frequency division multiplexing; dispersion compensation; nonlinearity suppression; optical phase conjugation