

基于数字相干叠加的相干光正交频分复用系统中光纤非线性容忍性研究

陈雪梅 张静 易兴文 曾登科 杨合明 邱昆

Fiber nonlinearity tolerance research of coherent optical orthogonal frequency division multiplexed system based on digital coherent superposition

Chen Xue-Mei Zhang Jing Yi Xing-Wen Zeng Deng-Ke Yang He-Ming Qiu Kun

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 144203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.144203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铷原子耦合光频率近共振时的电磁感应透明

[Electromagnetically induced transparency in a nearresonance coupling field](#)

物理学报.2015, 64(15): 154208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154208>

有源环形谐振腔辅助滤波的单模光电振荡器

[Single mode optoelectronic oscillator assisted by active ring resonance cavity filtering](#)

物理学报.2015, 64(4): 044202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044202>

MoS<sub>2</sub> 纳微薄膜激光非线性透射的调控研究

[Research on the controllable nonlinear laser transmission properties of MoS<sub>2</sub> nano-micron film](#)

物理学报.2015, 64(3): 034214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034214>

KDP 晶体相位匹配角理论预测模型及其验证分析

[Theoretical model of phase-matching angles for KDP crystals and its verification analysis](#)

物理学报.2015, 64(2): 024213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024213>

LiNbO<sub>3</sub> 晶体界面非线性表面波的研究

[Study on nonlinear surface waves along the boundary of LiNbO<sub>3</sub> crystals](#)

物理学报.2015, 64(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014204>

# 基于数字相干叠加的相干光正交频分复用系统中 光纤非线性容忍性研究\*

陈雪梅 张静 易兴文<sup>†</sup> 曾登科 杨合明 邱昆

(电子科技大学通信与信息工程学院, 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2014年12月23日收到; 2015年1月20日收到修改稿)

光正交频分复用系统中的光纤非线性效应制约着系统进一步的扩容. 针对此问题, 提出一种数字相干叠加的方法, 用于提高相干光正交频分复用系统对光纤非线性的容忍性. 仿真中, 5通道的波分复用下偏振复用相干光正交频分复用系统的每个通道传输四进制正交振幅调制映射的 71.53 Gbit/s 信号在光纤中传输 400 km. 首先, 通道间隔为 25 GHz, 与传统相干光正交频分复用系统相比, 色散补偿前后, 使用数字相干叠加的相干光正交频分复用系统的信噪比分别提升了 6.02 dB 和 9.05 dB, 最佳入纤光功率均增大了 2 dB; 其次, 通道间隔为 50 GHz, 色散补偿前后, 信噪比分别提升了 4.9 dB 和 8.75 dB. 通过理论推导及仿真, 验证了所提方法能有效消除相干光正交频分复用系统的一阶非线性失真, 进而提高系统对光纤非线性的容忍性.

**关键词:** 光纤通信, 光正交频分复用, 数字相干叠加, 光纤非线性

**PACS:** 42.65.-k, 42.65.Hw

**DOI:** 10.7498/aps.64.144203

## 1 引言

作为现有通信网设施的主干支撑, 高速光纤通信系统正在向着大容量、长距离方向发展<sup>[1-5]</sup>. 相干光正交频分复用 (coherent optical orthogonal frequency division multiplexed, CO-OFDM) 以其高频谱利用率高和高色散容忍, 近年来在大容量传输中受到广泛关注<sup>[6]</sup>. 然而, 光纤中的交叉相位调制 (cross-phase modulation, XPM)、四波混频 (four-wave mixing, FWM) 等光纤非线性效应限制了 CO-OFDM 的传输性能<sup>[7-10]</sup>, 目前已有多种不同的方法可以用于光纤非线性的补偿. Kim 等<sup>[11]</sup> 提出针对光纤非线性的数字预补偿方法, 美国 Mateo 研究小组<sup>[12]</sup> 通过后向传播的方法对 XPM 和 FWM 引起的信道损伤进行补偿, 其相应的复杂度较大. 2013年5月, Liu 等<sup>[13]</sup> 提出相位共轭双波 (phase-conjugated twin waves, PCTW) 的方法应

用于偏振复用正交相移键控 (polarization-division multiplexed quadrature phase shift keying, PDM-QPSK) 单载波系统中, 利用两个偏振方向传输互共轭信息经光纤传输后的一阶非线性失真互反的特性来对抗光纤非线性. Yi 等<sup>[14,15]</sup> 进一步将数字相干叠加 (digital coherent superposition, DCS) 扩展到 CO-OFDM 系统中, 提出一种 DCS-OFDM 机制, 利用 Hermitian 数据结构下的共轭对称性, 在接收机中通过对共轭子载波进行数字相干叠加减小由激光器引起的线性相位噪声导致的载波间干扰 (inter-carrier-interference, ICI), 复杂度较低.

本文在单偏振 CO-OFDM 研究的基础上进一步提出一种波分复用 (wave division multiplexed, WDM) 下的 PDMCO-OFDM 传输系统, 对每个通道上  $x$ ,  $y$  偏振方向上解调后的 OFDM 子载波对进行 DCS 处理, 消除一阶非线性失真, 从而提升系统对光纤非线性的容忍性. 在发送端, 每个通道的  $x$ ,  $y$  偏振方向上均用偏置在零点的马赫-曾德尔强度

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2013AA01340, 2012AA011302, 2012AA011304)、国家自然科学基金 (批准号: 61405024, 61107060, 61405024) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: ZYGX2014J004) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: xwyi@uestc.edu.cn

调制器对 OFDM 信号进行调制, OFDM 信号的产生满足 Hermitian 对称, 这样傅里叶逆变换 (inverse fast fourier transform, IFFT) 后产生的信号是一个实信号. 在接收端, 经过传统的 OFDM 信号处理后, 再分别将每个通道  $x, y$  偏振方向的 OFDM 信号分别进行 DCS 处理. 通过理论分析和仿真发现, CO-OFDM 系统使用 DCS 后可以增强系统对光纤非线性的容忍性.

## 2 PDM DCS-OFDM 原理

文献 [11, 12] 已经论证了 DCS 能有效减小由相位噪声引起的 ICI, 提高 CO-OFDM 系统对相位噪声的容忍性. 本文将进一步论证 DCS-OFDM 机制下 WDM-PDM-CO-OFDM 系统对光纤非线性容忍性的提升.  $x, y$  偏振方向的 OFDM 子载波分别表示为  $X_{x,y}(k), k = 0, \dots, N-1$ , 其中,  $N$  表示总的子载波个数,  $k$  表示第  $k$  个子载波. 图 1 表示分别在  $x, y$  偏振方向产生的相位共轭的 OFDM 子载波对, 其中共轭子载波对在同一个偏振方向上.

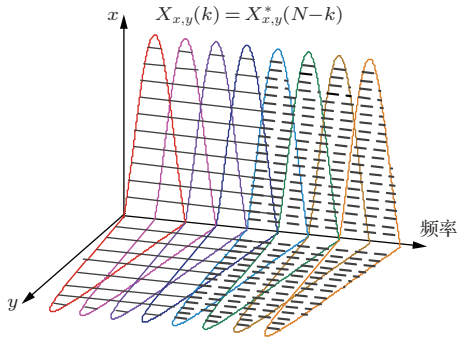


图 1 (网刊彩色) 频域上的 Hermitian 对称结构的 OFDM 子载波对, 虚线表示共轭子载波

Fig. 1. (color online) OFDM subcarrier pairs with Hermitian symmetry in the frequency domain, dash lines stand for phase-conjugated subcarriers.

本文将微扰方法 [16] 扩展到 DCS-OFDM 系统中. 一阶非线性项可以理解为 FWM 在频率为  $f_k$  处产生, 由频率在  $f_{k+n}, f_{k+m}$  和  $f_{k+n+m}$  的子载波相互影响所引起, 其中  $n, m = 0, \dots, N-1$ . 对于在  $x, y$  偏振方向的第  $k$  个子载波的一阶非线性失真可以表示为

$$\begin{aligned} & \delta X_{x,y}(L, k) \\ = & i \frac{8}{9} \gamma P_0 L_{\text{eff}} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \eta(\text{nm}) \\ & \times [X_{x,y}(k+n)X_{x,y}(k+m)X_{x,y}^*(k+n+m)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + X_{y,x}(k+n)X_{y,x}(k+m)X_{y,x}^*(k+n+m)] \\ & k, n, m = 0, \dots, N-1, \\ & \eta(\text{nm}) \\ = & \frac{\int_0^L \exp[G(z) - i4\pi^2 f_{k+n}f_{k+m}C(z)] dz}{L_{\text{eff}}}, \quad (1) \end{aligned}$$

式中,  $\eta(\text{nm})$  表示传递函数, 同时也可以理解为四波混频系数;  $G(z) = \int_0^z [g(z') - a(z')] dz'$ ,  $C(z) = \int_0^z \beta_2(z') dz'$  和  $L_{\text{eff}} = \int_0^L e^{G(z)} dz$  分别表示对数信号功率演变、累积色散和链路有效长度;  $L, i, P_0$  分别表示光纤总长度、虚数单位和输出功率;  $z, \lambda, \beta_2, g$  分别表示沿着光纤链路传播的距离、光纤非线性克尔系数、群速度色散系数以及增益系数. 当满足对称色散补偿和平衡功率映射时,  $\eta(\text{nm})$  为实数.

在 WDM-PDM-CO-OFDM 系统发射机中, OFDM 信号子载波满足 Hermitian 对称结构, 因此  $x, y$  偏振方向的信号可以分别表示为

$$\begin{aligned} X_{x,y}(k) &= X_{x,y}^*(N-k), \\ k &= 0, \dots, N-1. \quad (2) \end{aligned}$$

采用 Hermitian 结构产生的 OFDM 信号, IFFT 后仅有实部, 虚部为 0. 运用傅里叶变换的特性, 可以得出

$$E_{x,y}(w) = E_{x,y}^*(-w). \quad (3)$$

将 (2) 和 (3) 式代入 (1) 式中, 根据对称色散补偿下  $\eta(\text{nm})$  为实数, 满足  $\eta(\text{nm}) = \eta^*(\text{nm})$ , 可以得出

$$\begin{aligned} & - [\delta X_{x,y}(L, N-k)]^* \\ = & - \left\{ -i \frac{8}{9} \gamma P_0 L_{\text{eff}} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \eta^*(\text{nm}) \right. \\ & \times [X_{x,y}^*(N-k+n)X_{x,y}^*(N-k+m) \\ & \times X_{x,y}(N-k+n+m) + X_{y,x}^*(N-k+n) \\ & \times X_{y,x}^*(N-k+m)X_{y,x}(N-k+n+m)] \left. \right\} \\ = & i \frac{8}{9} \gamma P_0 L_{\text{eff}} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \eta(\text{nm}) \\ & \times [X_{x,y}(k-n)X_{x,y}(k-m)X_{x,y}^*(k-n-m) \\ & + X_{x,y}(k-n)X_{x,y}(k-m)X_{x,y}^*(k-n-m)] \\ = & \delta X_{x,y}(L, k), \\ \text{即,} & \\ & - [\delta X_{x,y}(L, N-k)]^* = \delta X_{x,y}(L, k), \quad (4) \end{aligned}$$

$$X_{x,y}(L, k) + X_{x,y}^*(L, N - k) = 2X_{x,y}(0, k). \quad (5)$$

由(4)和(5)式可知, 在信号子载波为Hermitian对称结构的系统中, 互共轭的子载波对的一阶非线性失真符号相反, 将解调后的子载波进行数字相干叠加后, 一阶非线性项相互抵消, 从而使得WDM-PDM-CO-OFDM系统对光纤非线性的容忍性得以增强.

### 3 系统仿真与分析

图2(a)是5通道的WDM-PDM-CO-OFDM系统框图. 在收发端, 均用光梳作为光源, 用于保持每个通道的频率稳定性. 图2(b)为发射机

OFDM信号产生的示意图. 每个通道的 $x, y$ 方向分别用偏置在零点的马赫-曾德尔强度调制器对Matlab产生的OFDM实信号进行调制, 这样产生的信号在频域是Hermitian对称结构. 为方便起见, 后文将仿真系统中使用DCS-OFDM机制的WDM-PDM-CO-OFDM系统简称为方案一, 未使用DCS-OFDM机制的传统WDM-PDM-CO-OFDM系统简称为方案二. 方案一在接收端首先将5个通道的信号解复用后进行相干检测, 完成光电转换, 再对接收到的OFDM信号进行传统的数字信号处理(digital signal process, DSP)处理, 最后根据本文所提的DCS方法对不同偏振态上的子

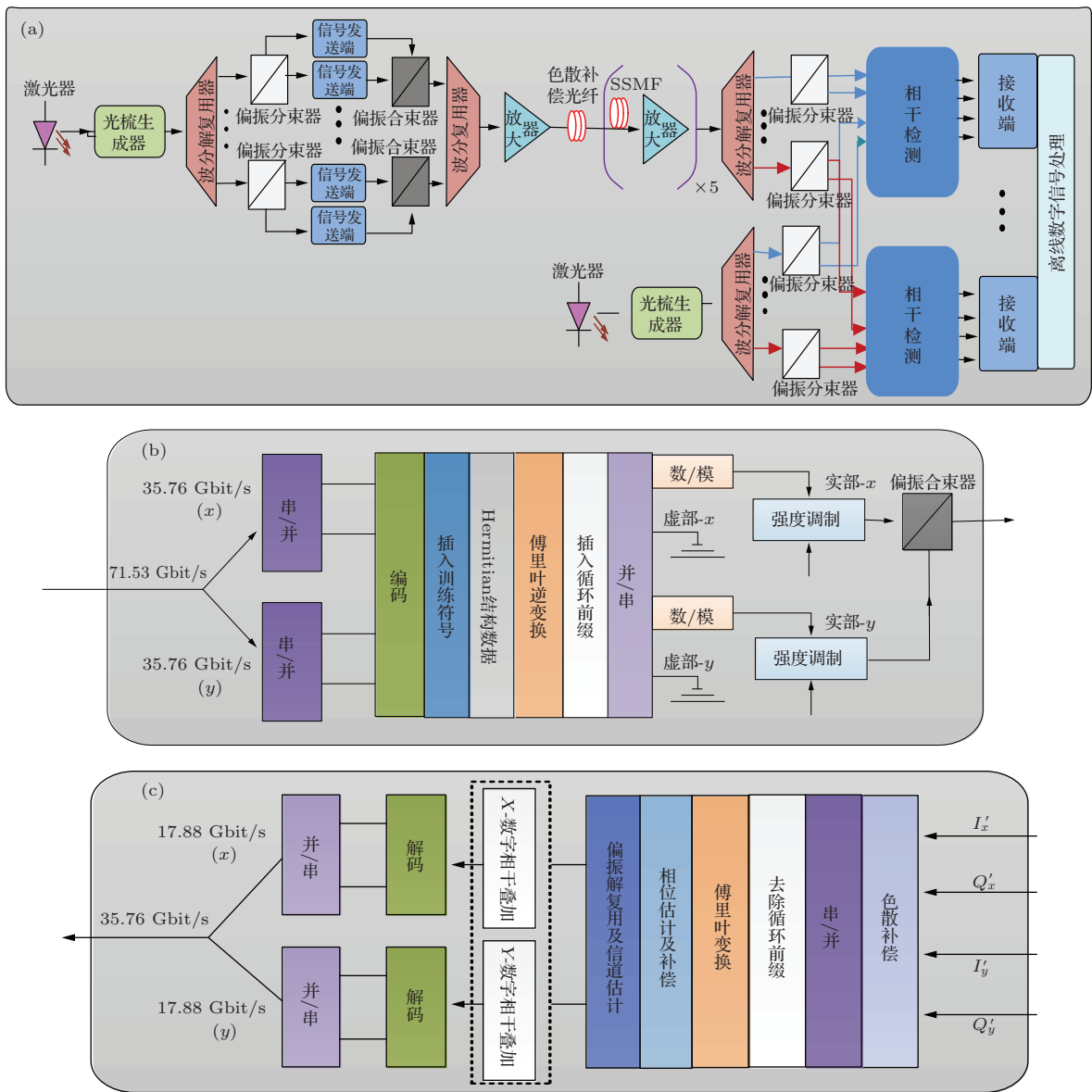


图2 (网刊彩色) (a) WDM-PDM-CO-OFDM系统示意图; (b) 传输信号生成示意图; (c) 接收端DSP示意图  
 Fig. 2. (color online) (a) System schematic of WDM-PDM-CO-OFDM; (b) schematic of transmitted signal generating; (c) schematic of DSP at the receiver.



载波分别进行共轭相加, 接收机中的DSP处理如图2(c)所示. 方案二在接收端的DSP过程与方案一相似, 但省略图2(c)中虚线框所示DCS的步骤, 故输出速率为方案一的两倍. 两种方案的频谱带宽均为20 GHz, 由于方案一中每个通道均有一半冗余信号, 所以频谱利用率仅为方案二的一半. WDM系统中, 每个通道的光功率相同.

根据图2中的原理, VPItransmissionMaker V9.1用于搭建系统仿真平台. 两个方案的有效信号速率分别为35.76 Gbit/s和71.53 Gbit/s. 为了研究DCS对光纤非线性的改善, 故将激光器线宽设置为0 kHz, 以避免激光器线宽带来的线性相位噪声的影响. 两种方案均采用四进制正交幅度调制(4 quadrature amplitude modulation, 4-QAM)映射, 数/模转换(digital-to-analog converters, DAC)采样率为40 GS/s, IFFT点数为512, 其中有效子载波数为206, 其余进行零填充, 用于构造保护频带, 循环前缀(cyclic prefix, CP)为IFFT点数的1/8. 两种方案中每个通道的子载波带宽相同, 这对于对比分析光纤非线性的影响非常重要<sup>[17]</sup>. 传输过程中, 采用标准单模光纤(standard single mode fiber, SSMF)模型, 其衰减和色散系数分别为0.2 dB/km和16 ps/(nm·km), 每跨光纤长度为80 km, 总的光纤传输距离为5 × 80 km. 掺饵光纤放大器(erbium doped fibre amplifier, EDFA)用于补偿每跨光纤传

输损耗, 其增益和放大器噪声系数分别为16 dB和5 dB. 由于WDM系统中非线性的强弱与通道间隔相关, 因此将通道间隔 $\Delta f$ 分别设置为25 GHz和50 GHz, 以便研究DCS机制对不同非线性强度下系统性能的改善.

### 3.1 $\Delta f$ 为25 GHz时的仿真结果

两个仿真系统在发射端均采用色散补偿光纤(dispersion compensating fiber, DCF)补偿一半色散, 构造理论分析中的对称色散补偿, 使得一阶非线性效应得以消除, 接收机中在电域进行另外一半色散补偿. 本文选择第三通道(其代表着最大的信道间非线性损伤)用于监测, 仿真结果如图3(a)所示, 方案一最优发射光功率为-2 dBm, 方案二最优入纤光功率为-4 dBm, 方案一较方案二最大信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)提升为9.02 dB, 对应通道光功率为0 dBm. 图3(b)为SNR提升最大处的两种方案在 $x, y$ 方向上的对比星座图, 可以看出, 方案一的星座图更加收敛. 考虑到方案一的有效速率只有方案二的一半, 但是提高的SNR还是远大于3 dB, 这主要是因为将互共轭的OFDM子载波对进行DCS处理之后, 有效地消除了子载波的一阶非线性失真. 由此可见, 方案一采用DCS后以牺牲一半的频谱效率为代价而使得系统对光纤非线性有更好的容忍性.

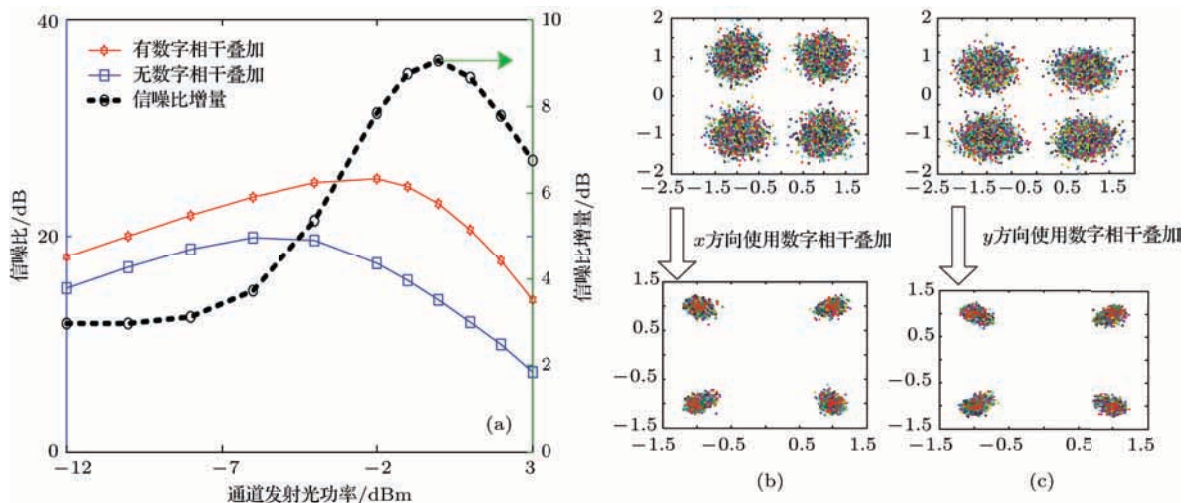


图3 (网刊彩色) (a) 有对称色散补偿时测量的SNR与通道发射光功率对比图; (b), (c)表示 $x, y$ 方向上SNR差值最大处使用DCS前后的对比星座图; 虚线表示方案一与方案二测量的SNR差值

Fig. 3. (color online) (a) Estimated SNR versus channel launch power with symmetric dispersion compensation; (b), (c) stand for constellations before and after DCS at the maximum SNR improvement in  $x, y$  direction, respectively; the dash lines are the estimated SNR difference between case one and case two.

虽然色散补偿能减小光纤非线性带来的影响, 但是其加大了 DSP 计算的复杂度. 图 4 为上述两方案均没有色散补偿情况下第三通道的仿真对比图. 结果显示, 方案一较方案二的通道最优发射光功率仍然大 2 dB, 且在通道光功率为 0 dBm 时, 方案一与方案二的最大测量 SNR 提升为 6.05 dB, 图 4 (b) 和图 4 (c) 为两个偏振态上两种方案的对比星座图. 在此情形下, 方案一同样对光纤非线性有更好的容忍性.

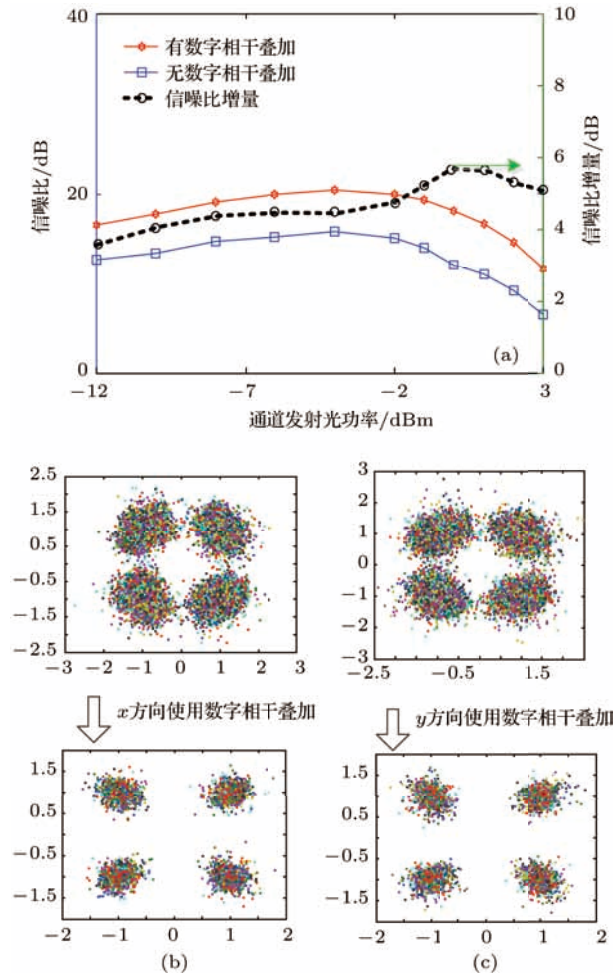


图 4 (网刊彩色) (a) 没有对称色散补偿时测量的 SNR 与通道发射光功率对比; (b), (c) 分别为  $x, y$  方向上 SNR 差值最大处使用 DCS 前后的对比星座图; 虚线表示方案一与方案二测量的 SNR 差值

Fig. 4. (color online) (a) Estimated SNR versus channel launch power without symmetric dispersion compensation; (b), (c) stand for constellations before and after DCS at the maximum SNR improvement in  $x, y$  direction, respectively; the dash lines are the estimated SNR difference between case one and case two.

### 3.2 $\Delta f$ 为 50 GHz 的仿真结果

为了确定 DCS 算法在系统对抗光纤非线性方

面的有效性和一般性, 现将上述方案一和方案二中的通道间隔设置为 50 GHz. 在色散补偿前后的第三通道的光功率与接收端测量的 SNR 对比如图 5 所示.

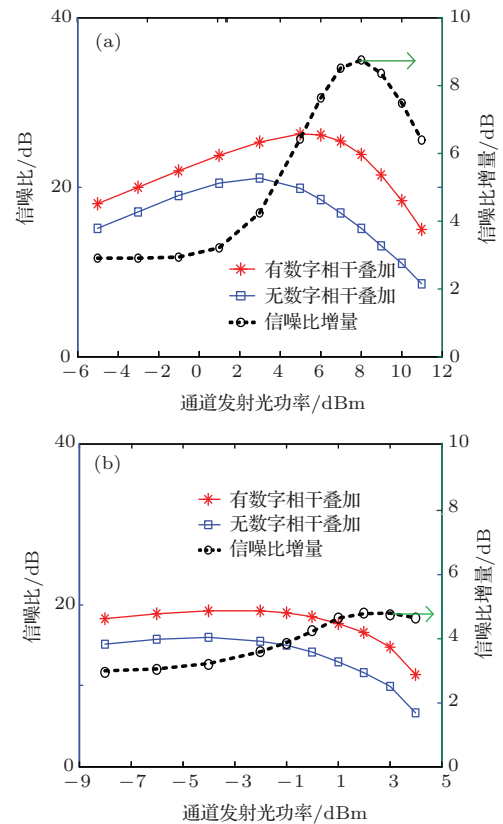


图 5 (网刊彩色) 测量的 SNR 与通道发射光功率的对比 (a) 有对称色散补偿; (b) 无对称色散补偿; 黑色虚线表示方案一与方案二测量的 SNR 差值

Fig. 5. (color online) Estimated SNR versus channel launch power: (a) with symmetric dispersion compensation; (b) without symmetric dispersion compensation; black dash line are the estimated SNR difference between case one and case two.

通过仿真发现, 有色散补偿时, 方案一比方案二最优光功率大 2 dB, 最大测量 SNR 提高 8.75 dB, 对应通道光功率为 1 dBm; 无色散补偿时, 最优光功率相同, 最大测量 SNR 提高 4.9 dB, 对应通道光功率为 3 dBm. 由此可见, DCS 算法在不同的通道间隔的系统中均有助于系统增强对光纤非线性的容忍性.

## 4 结 论

本文通过对 5 通道不同间隔的 WDM-PDM-CO-OFDM 系统进行仿真发现, 由于子载波的一阶非线性项相反, 每个通道的  $x, y$  偏振方向的信号经

过DCS处理后,一阶非线性得以消除,使得在非线性传输中,相比传统的CO-OFDM系统,相应的最佳入纤光功率和SNR均有所提升,星座图也更加收敛.因此,DCS机制使得CO-OFDM系统对光纤非线性的容忍性得以增强.

### 参考文献

- [1] Shieh W, Yi X W, Tang Y 2005 *Electron. Lett.* **43** 183
- [2] Lowery A J, Du L, Armstrong J 2006 *Proceedings of Optical Fiber Communication* Anaheim, CA USA, March 5–10, 2006 PDP39
- [3] Jansen S L, Morita I, Schenk C W, Takeda N, Tanaka H 2008 *Lightw. Technol.* **26** 6
- [4] Qian D, Huang M, Ip E, Huang Y, Shao Y, Hu J, Wang T 2011 *Proceedings of Optical Fiber Communication* Los Angeles, CA USA, March 6–11, 2011 PDPB5
- [5] Dai F, Yang B J 2005 *Physics* **34** 450 (in Chinese) [戴峰, 杨伯君 2005 物理 **34** 450]
- [6] Jansen S L, Al Amin A, Takahashi H, Morita I, Tanaka H 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 802
- [7] Wang R M, Wang X P, Wu Z K, Yao X, Zhang Y Q, Zhang Y P 2014 *Chin. Phys. B* **23** 054209
- [8] Mitra P P, Stark J B 2001 *Nature* **411** 1027
- [9] Essiambre R J, Foschini G J, Kramer G, Winzer P J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 163901
- [10] Shieh W, Chen X 2011 *IEEE Photon. J.* **3** 158
- [11] Roberts K, Li C D, Strawczynski L, O'Sullivan M, Hardcastle I 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 403
- [12] Mateo E F, Zhu L, Li G 2008 *Opt. Express* **16** 16124
- [13] Liu X, Chraplyvy A R, Winzer P J 2013 *Nature Photon.* **7** 560
- [14] Yi X W, Yang Q, Qiu K 2013 *Asia Communications and Photonics Conference* Beijing, China, November 12–15, 2013 AF2F. 76
- [15] Yi X W, Chen X M, Dinesh S, Li C, Luo M, Yang Q, Li Z H, Qiu K 2014 *Opt. Express* **22** 13454
- [16] Louchet H, Hodzic A, Petermann K, Robinson A, Epworth R 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2089
- [17] Yi X W, Shieh W, Tang Y 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 919

# Fiber nonlinearity tolerance research of coherent optical orthogonal frequency division multiplexed system based on digital coherent superposition\*

Chen Xue-Mei Zhang Jing Yi Xing-Wen<sup>†</sup> Zeng Deng-Ke Yang He-Ming Qiu Kun

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

( Received 23 December 2014; revised manuscript received 20 January 2015 )

## Abstract

Fiber nonlinearity of optical orthogonal frequency division multiplexed (OFDM) system restricts the capacity improvement of optical fiber transmission. In this paper, we propose a novel digital coherent superposition (DCS) scheme to improve the tolerance to fiber nonlinearity in a coherent optical orthogonal frequency division multiplexed system. In simulation, 71.53 Gbit/s orthogonal frequency division multiplexed signal per channel with Hermitian symmetry is transmitted over 400 km standard single mode fiber in a wave division multiplexed-polarization-division multiplexed-coherent optical orthogonal frequency division multiplexed system with five channels. The 4-quadrature amplitude modulation is used for symbol mapping. For the receiver, after the conventional OFDM signal processing, we conduct DCS for OFDM subcarrier pairs, which requires only conjugation and summation in the  $x$ ,  $y$  polarization direction, respectively. Firstly, the channel spacing is 25 GHz, the maximum signal-to-noise ratio improvement is 9.05 dB or 6.02 dB with or without symmetric dispersion compensation compared with a conventional orthogonal frequency division multiplexed system. The optimum launch power is increased by 2 dB. Secondly, the channel spacing is changed to 50 GHz to investigate the nonlinearity tolerance at different channel spacings in the wave division multiplexed system, the maximum signal-to-noise ratio improvement is 8.75 dB or 4.9 dB with or without symmetric dispersion compensation, respectively. Theoretical and simulation analysis show that the proposed method in this paper can effectively mitigate the first-order nonlinear distortions and hence improve the tolerance of coherent optical orthogonal frequency division multiplexed system with different channel spacings to fiber nonlinear effects.

**Keywords:** optical communication, optical orthogonal frequency division multiplexed, digital coherent superposition, fiber nonlinearity

**PACS:** 42.65.-k, 42.65.Hw

**DOI:** [10.7498/aps.64.144203](https://doi.org/10.7498/aps.64.144203)

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2013AA01340, 2012AA011302, 2012AA011304), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61405024, 61107060, 61405024), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. ZYGX2014J004).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [xwyi@uestc.edu.cn](mailto:xwyi@uestc.edu.cn)