

激光与光电子学进展

基于光域补偿的远距离光混沌同步

张宇坤¹, 李沼云^{1,2**}, 陶智勇¹, 樊亚仙^{1*}¹桂林电子科技大学广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004;²中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541004

摘要 光混沌信号受限于光纤中的色散和非线性效应,难以实现远距离同步。同时,由于光注入混沌同步采用纯光域信号处理,无法与现有通信系统中的电域非线性补偿融合。因此,从非线性薛定谔方程出发,提出色散管理与基于光域的非线性管理相融合的技术方案,实现激光混沌远距离同步。然后,详细研究了不同传输距离、不同注入强度下的同步和传输特性。结果表明,在传输距离为 1000 km、注入强度为 0.5 mW 情况下,系统能够实现信息速率为 1 Gb/s 的保密通信,同步载波相关系数能够达到 0.97 以上。

关键词 光通信; 光混沌同步; 非线性补偿; 光域补偿; 远距离传输

中图分类号 TN012

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222405

Long-Range Optical Chaos Synchronization Based on Optical Domain Compensation

Zhang Yukun¹, Li Zhaoyun^{1,2**}, Tao Zhiyong¹, Fan Yaxian^{1*}¹Guangxi Key Laboratory of Wireless Windband Communication and Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;²The 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract Because of dispersion and nonlinear effects in optical fibers, chaotic signals are difficult to obtain long-range synchronization. Meanwhile, due to the characteristics of pure optical domain signal processing used for optical injection chaos synchronization, it cannot be fused with existing communication systems' electric domain nonlinear compensation. As a result, this paper proposes a technical solution for realizing laser chaotic long-distance synchronization by combining dispersion management with optical domain-based nonlinear management based on the NLS equation. The synchronization and transmission characteristics at various transmission distances and different injection intensities are studied in detail. The findings demonstrate that the system is capable of achieving secure communication at a 1 Gb/s information rate, 1000 km of transmission distance, and 0.5 mW of injection intensity. The synchronous carrier correlation coefficient can exceed 0.97.

Key words optical communications; optical chaos synchronization; nonlinear compensation; optical field compensation; long-range transmission

1 引言

随着量子计算、超级计算等技术的不断发展,信息在长距离传输过程中的数字加密方式存在较大的安全漏洞^[1-3],信息安全受到了威胁。为了应对这一挑战,研究学者提出了多种安全通信方案^[4-7]。其中,混沌通

信由于其类似于噪声的波形、长期的不可预测性和较大的带宽而受到广泛的关注。自混沌同步方案提出以来^[8],研究者对混沌展开大量研究^[9-13],2005年雅典大学利用商用光通信网络在雅典进行了 100 km 的混沌光保密通信实验,验证了混沌光通信的长距离同步和安全通信的可行性^[14]。混沌安全通信向着速率更快,

收稿日期: 2022-08-28; 修回日期: 2022-09-24; 录用日期: 2022-10-09; 网络首发日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(12064005)、广西自然科学基金(2021GXNSFDA075006, 2021GXNS-FAA220086)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(2021YCX030)

通信作者: *yxfan@guet.edu.cn; **13557231066@163.com

传输距离更长,安全性更高的方向发展^[15-16],2018年上海交通大学实现了100 km范围内32 Gb/s的混沌安全通信^[17],2022年西南交通大学在100 km长度上将速率提升至56 Gb/s^[18]。早期的基于激光器内部的非线性效应产生的混沌光可以被特别的算法破解^[19-23],比如自相关函数计算^[24]、延迟互信息函数^[25]。上述算法可以破解以延迟签名(TDS)作为密钥的混沌光通信系统。因此抑制TDS变得异常重要,主要的方法之一就是利用多个反馈回路来抑制TDS^[26-27]。2015年华中科技大学通过引入三个电光反馈回路^[28]来抑制TDS。2017年华中科技大学提出了一种利用电光反馈环和光耦合器^[29]的耦合相位混沌系统。还有其他抑制TDS的方法,如基于量子噪声^[30]的TDS隐藏,使用滤波光反馈模式^[31]。然而,与混沌传输速率和安全性的相关研究相比,系统的远距离同步研究相对较少。光混沌信号在远距离传输的过程中,会受到来自光纤的衰减、色散和非线性效应等影响,导致光混沌波形失真,接收系统无法同步,从而限制了混沌光的远距离传输。2016年西南大学利用垂直腔面激光器实现了180 km、速率为10 Gb/s的传输效果^[32],2018年西南大学利用一个带反馈的激光器同时注入到两个从激光器中从而实现了速率为1 Gb/s、140 km双向传输的结果^[33]。混沌信号在传输的过程中因为非线性效应导致的相位变化可能出现接收端无法同步的现象,所以补偿非线性失真变得尤为重要。现在的非线性失真补偿分为光域补偿和电域补偿^[34],光域补偿有信号预失真^[35]、后置非线性管理技术(PNC)^[36]等,电域补偿包括数字后向传输^[37]等。随着近几年数字信号处理技术的发展,电域补偿成为当前研究热点。但是这种基于电域补偿的后处理方法不适用于光混沌通信系统。

针对混沌信号在长距离光纤信道传输引起的色散和非线性失真而无法实现混沌光信号同步问题,本文

提出了基于光域变换的非线性补偿方案。数值研究了不同传输距离、不同注入强度、不同补偿方式下,器件噪声对信号传输性能的影响。研究表明,使用此方法在1000 km的传输距离上信号互相关系数能够达到0.97以上,在较远距离上可以进行光混沌通信。

2 基本原理

如图1所示,首先将传输半导体光源T-LD输出的一部分光通过可调光延时线VODL1反馈回激光器中,从而产生混沌光并注入光纤,其激光混沌特性^[38]可表示为

$$\frac{dE_t}{dt} = \frac{1}{2} (1 + i\alpha) [G_t - \gamma] E_t + \delta E_t(t - \tau) \exp(-i\omega_t \tau) + \sqrt{2\beta N_t \sigma_t}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_t}{dt} = \frac{I_t}{e} - \gamma_e N_t - G_t |E_t|^2, \quad (2)$$

$$G_t = \frac{g(N_t - N_0)}{1 + \epsilon |E_t|^2}, \quad (3)$$

式中: E_t 是半导体激光器的慢变电场振幅; t 是时间; α 是线宽增强因子; G_t 是非线性增益; γ 是衰减常数; δ 是反馈系数; τ 是外腔反馈时间; ω_t 是激光器频率; β 是自发射率; N_t 是平均载流子数量; σ_t 是高斯白噪声; I_t 是泵浦电流; e 是电子电荷量; γ_e 是载流子衰减率; g 是增益因子; N_0 是透明载流子密度; ϵ 是增益饱和系数。混沌信号在光纤中传输经过色散补偿DCF和相位调制器PM后到达接收端,注入R-LD然后经过同样的一个延迟时间后,右端R-LD输出同步波形,其接收特性可表示为

$$\frac{dE_r}{dt} = \frac{(1 + i\alpha)}{2} [G_r - \gamma] E_r + \delta E_r(t - \tau) \exp(-i\omega_r \tau) + \kappa_r S_{en} + \sqrt{2\beta N_r \sigma_r}, \quad (4)$$

式中: κ_r 是耦合系数; S_{en} 是接收到的混沌信号。

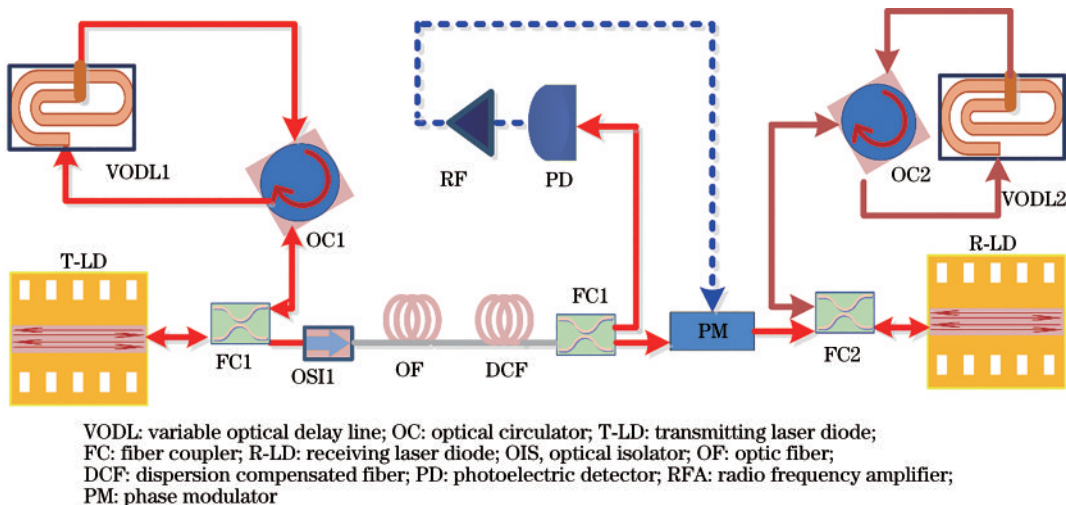


图1 远距离混沌同步系统结构

Fig. 1 Structure of long-range chaotic synchronization system

当混沌信号在光纤中传输时,传播特性遵循非线性薛定谔方程^[39],表示为

$$i \frac{\partial A}{\partial L} + \frac{i\alpha_1}{2} A - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma_1 |A|^2 A = 0. \quad (5)$$

仅考虑色散效应作用时,利用归一化振幅 $U(L, T)$,可得

$$i \frac{\partial U}{\partial L} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2}. \quad (6)$$

利用傅里叶变换法对式(6)进行求解可得

$$\tilde{U}(L, \omega) = \tilde{U}(0, \omega) \exp\left(\frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 L\right), \quad (7)$$

式中: β_2 表示二阶色散系数; T 表示随脉冲以群速度移动的参考系中的时间量度; L 表示传输距离; ω 表示脉冲频率; γ_1 表示非线性系数; A 表示光波; α_1 表示衰减。式(7)表明,色散会改变每个频谱分量的相对延时,这将导致信号时域波形的失真。同时,光纤介质的折射率与输入信号的强度有关,这一现象通过自相位调制(SPM)来体现。若仅考虑非线性效应,则利用归一化振幅 $U(L, T)$ 与式(5),信号在光纤中传输时来自 SPM 的影响可表示为

$$U(L, T) = U(0, T) \exp[i\varphi_{\text{NL}}(L, T)], \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{NL}}(L, T) = |U(0, T)|^2 (L_{\text{eff}}/L_{\text{NL}}), \quad (9)$$

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_1 L)]/\alpha_1, \quad (10)$$

式中: L_{NL} 表示非线性长度; L_{eff} 表示有效传输距离。式(8)~(10)表明,由 SPM 导致的相移随着光强和传输距离的增大而增大,同时,SPM 致使频谱展宽,出现了新的频率分量,这是影响系统的同步性能的主要因素。

由以上分析可知,对于光纤色散效应,可以在传输光纤后接一段与传输光纤色散系数相反的色散补偿光

纤,使整个传输系统的平均色散趋近于零,从而抵消色散带来的信号失真。对于非线性失真,由于非线性效应与输入脉冲的幅度有关,可在同步前通过光电探测器测得信号的幅值,经放大后作为相位调制器的调制信号,调整畸变的相位信息。在该过程中,相位调制的幅度与检测到的光源信号强度成正比,符号与自相位调制引起的非线性相移相反。

3 分析与讨论

模拟的相关参数如下:激光器频率 $f=193.4 \times 10^{12}$ Hz,增益因子 $g=1.58 \times 10^{-8}$,增益饱和系数 $\epsilon=5 \times 10^{-7}$,线宽增强因子 $\alpha=5$,自发辐射率 $\beta=1.5 \times 10^{-9}$ ps⁻¹,反馈时间 $\tau=200$ ps,透明载流子密度 $N_0=1.5 \times 10^8$,电荷电量 $e=1.602 \times 10^{-19}$ C,反馈因子 $\delta=0.02$ ps⁻¹,载流子衰减率 $\gamma_c=0.5$ ns⁻¹,光纤色散 $D=16.75$ ps/km,非线性系数 $\gamma_1=0.01$ mW/km。

图 2 为混沌系统背靠背传输效果,从图 2(a)可以看出,在没有干扰的情况下,系统的同步性较好,其信号同步的质量可以由互相关系数表示,相关系数定义为

$$C = \frac{\langle [x_1(t) - \langle x_1(t) \rangle] \cdot [y_1(t) - \langle y_1(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [x_1(t) - \langle x_1(t) \rangle]^2 \rangle \cdot \langle [y_1(t) - \langle y_1(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (11)$$

式中: $x_1(t)$ 表示发送端的混沌信号; $y_1(t)$ 表示接收端的同步信号; $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均。图 2(b)显示其互相关系数达到 0.999,此时是解调信号最好的状态。若混沌信号进入光纤中传输,则不可避免地带来信号的失真。为了研究本文提出方案的效果,将未经补偿的混沌信号与补偿后的混沌信号进行对比,结果如图 3 所示。

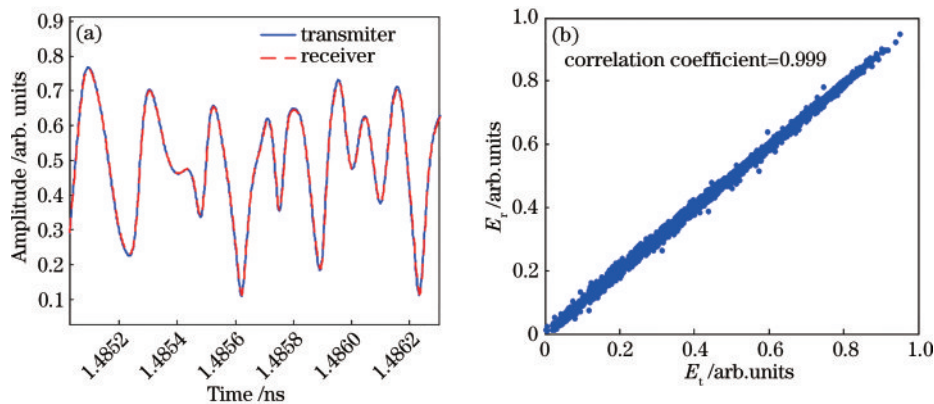


图 2 背靠背传输。(a)同步波形;(b)散粒图

Fig. 2 Back-to-back transmission. (a) Synchronized waveforms; (b) scattered grain diagram

图 3 为传输 100 km 时,系统对信号进行补偿前后的混沌波形对比图。从图 3(a)可以看出,信号未经补偿的同步波形在传输 100 km 后已经与发送波形有很

大不同,具体体现为幅值的增大和波形振荡。而经过补偿后,如图 3(b)所示,同步波形与原有波形相差不大。这说明了使用色散补偿和非线性补偿对于光混沌

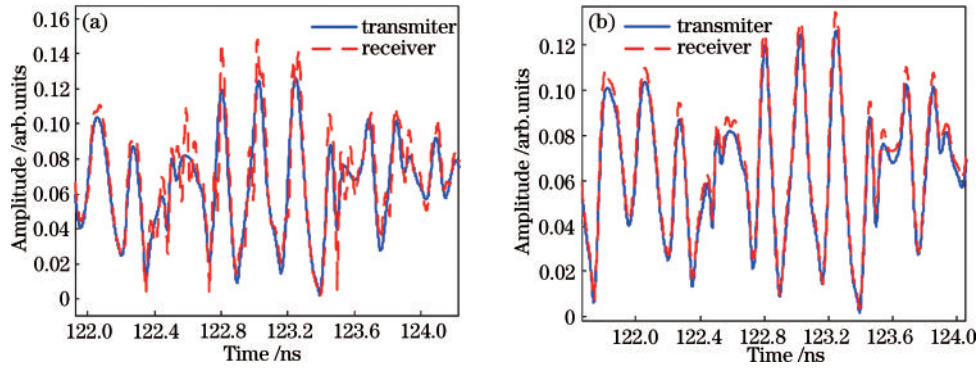


图3 发送端与同步端波形对比。(a)信号补偿前;(b)信号补偿后

Fig. 3 Waveform comparison between transmitter and synchronizer. (a) Before signal compensation; (b) after signal compensation

的远距离同步是有效果的。其中,为了研究色散补偿和本文方案的补偿方式对于混沌信号传输的影响,将两者分别对传输系统进行补偿。

图4分别表示在无补偿、仅有色散补偿、色散补偿叠加光域非线性补偿三个方案下,注入光纤功率为 3.3 mW 时,接收端与发送端的互相关系数。根据多次模拟测试可知,互相关系数在 0.97 以下时系统解调

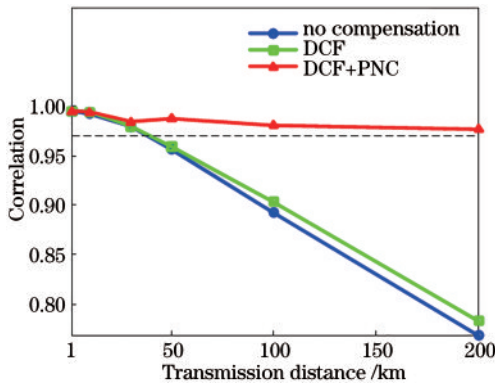


图4 不同失真补偿方案下信号传输距离与互相关系数的关系
Fig. 4 Relationship between signal transmission distance and interrelationship number under different distortion compensation schemes

眼图接近闭合,该阈值在图中以虚线表示。可以看出,无补偿方案在色散效应不明显时信号互相关系数大于 0.97,随着传输距离的增加,在 50 km 处信号互相关系数低于 0.97,这意味着接收端解调得到的眼图接近闭合。相比之下,色散补偿方案可以部分弥补色散效应带来的失真,但是随着传输距离积累,非线性失真同样会使同步无法完成。在将色散补偿与非线性补偿结合后,信号能够传输较远距离,在 200 km 时依然能有 0.97 以上的互相关系数。这说明,因非线性效应造成的相位偏移对于系统的同步有着巨大影响。在经过本系统的非线性效应补偿后能够将畸变的相位部分恢复,从而延长了同步距离。

在传输过程中,来自光电探测器和射频放大器的噪声也会造成信号的失真,具体表现为噪声会在混沌波形波峰上叠加一个高频振荡,不利于信号的解调,如图5所示。可以看到,图5(a)的同步波形比较符合原始波形,但在振幅上略大于原始波形。图5(b)中在波峰处的同步信号发生了明显变形,不利于信号的同步解调。光纤链路中每 50 km 放置一个放大器进行光中继放大,为了使仿真贴近实际,传输系统中光电探测器和放大器的噪声都会被添加。

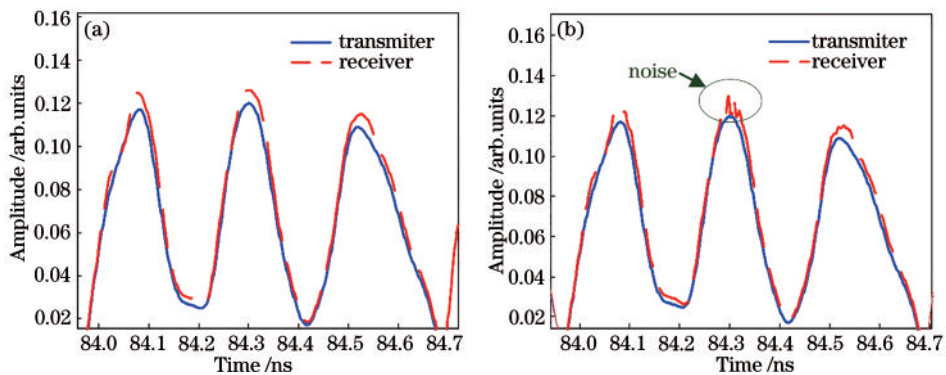


图5 传输 330 km 后噪声带来的影响。(a)无噪声;(b)有噪声

Fig. 5 Impact of noise after 330 km transmission. (a) Without noise; (b) with noise

根据式(9)可知,注入功率的不同影响着信号的传输质量,混沌信号也是如此。将混沌信号注入光纤中

的平均功率分别降至 1.38 mW 和 0.5 mW,从图6可以看到,信号的传输距离进一步增加,随着传输距离的

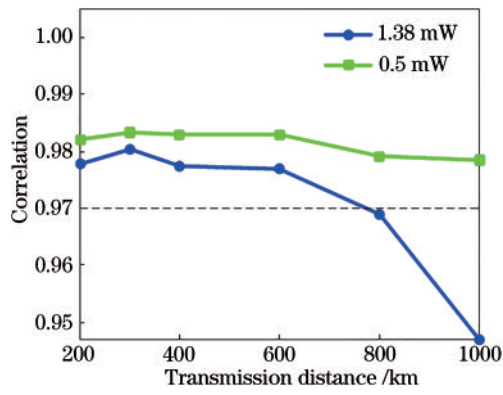


图 6 信号注入功率对信号传输的影响

Fig. 6 Effect of signal injection power on signal transmission

增加,同步误差逐渐增大。1.38 mW 的混沌信号在 800 km 左右时信号互相关系数低于 0.97,而 0.5 mW

的信号在 1000 km 的距离上依然能保持 0.978 的互相关系数。

互相关系数并不能完整反映系统性能,无法展现传输失真的细节。为了更进一步说明本系统对于传输距离的提升状况,将归一化信号注入幅值设置为 0.03,并与混沌信号耦合,查看接收端眼图的张开程度,以此来判断系统的远距离传输性能。图 7 为在注入光纤平均功率为 0.5 mW、信息速率为 1 Gb/s 时,系统眼图张开情况,依次是 550~1050 km 的传输效果。可以看出,混沌信号功率的降低对于系统的同步距离增加是十分有益的。当信号平均功率为 0.5 mW 时,在前向纠错编码允许误差极限 (3.8×10^{-3}) 下依旧可以传输 1050 km,与没有补偿系统相比传输距离增加了 21 倍,这说明本文方案极大增加了系统的同步距离。

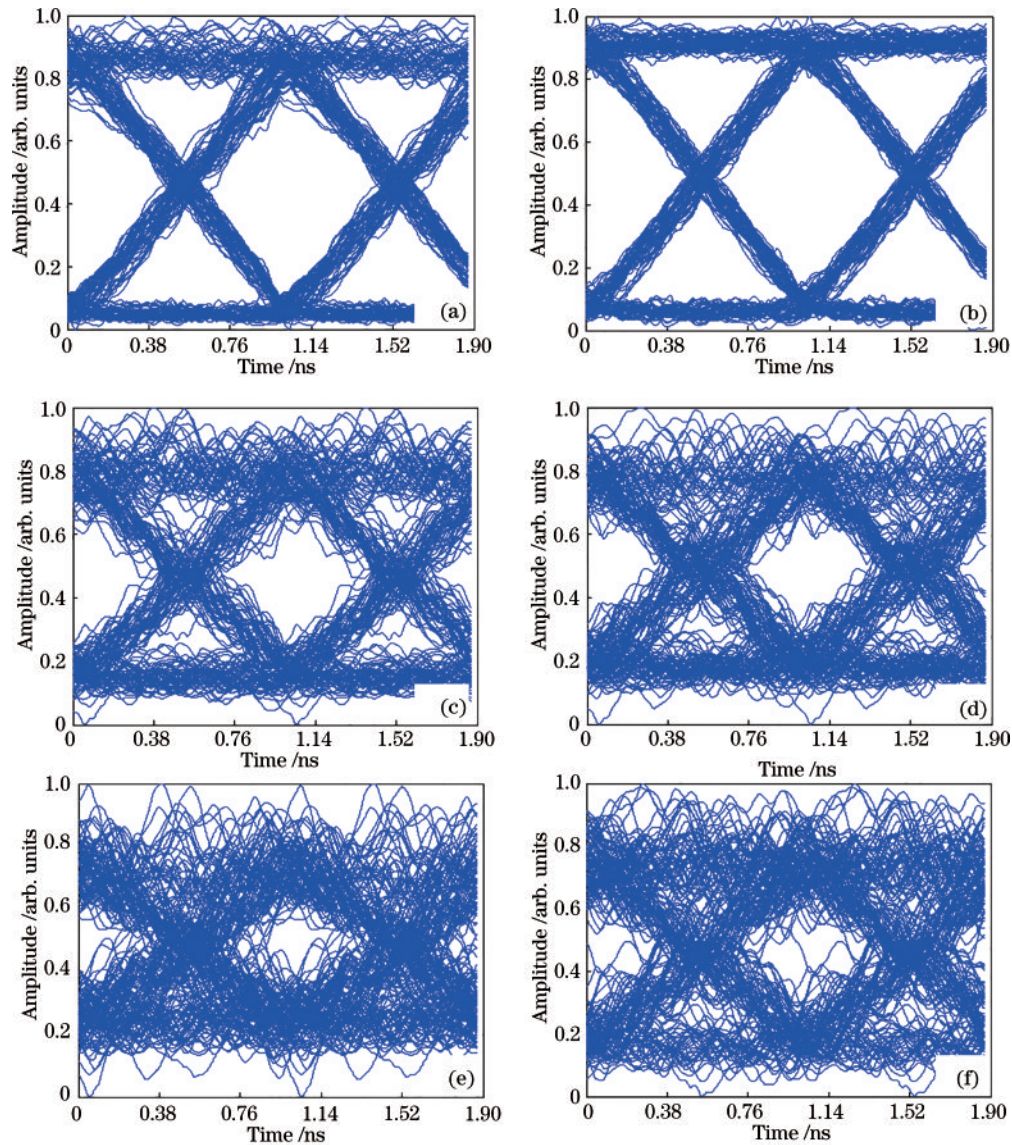


图 7 信息传输不同距离得到的解调眼图。(a)550 km;(b)660 km;(c)770 km;(d)880 km;(e)990 km;(f)1050 km

Fig. 7 Demodulation eye diagrams obtained by information transmission at different distances. (a) 550 km; (b) 660 km; (c) 770 km; (d) 880 km; (e) 990 km; (f) 1050 km

4 结 论

针对混沌通信因为光纤色散和自相位调制效应而导致无法远距离同步问题,本文提出了光域非线性补偿方案。该方案基于色散管理系统,利用光电探测器和放大器来产生与光瞬时功率成正比的电调制信号,将其作用于相位调制器弥补光传输中产生的非线性失真。然后,详细研究了无色散管理系统、单色散管理系统和色散管理系统结合光域非线性补偿方案对混沌通信同步距离的影响,系统内噪声对信号的影响以及注入光功率对传输距离的影响。结果表明,注入光纤平均功率为 0.5 mW、信息速率为 1 Gb/s 时,色散管理结合光域非线性补偿方案能够将光混沌同步距离增大到 1000 km 以上,其互相关系数达到 0.978。本文方案在速率上略有不足,没有探究在高速率下系统的解调情况,这是下一步将要进行的工作。需要说明的是,该方案不仅限于本文使用的混沌光源,对于其他的混沌通信系统的远距离同步也有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 姚俊良, 孙郁哲, 任海鹏. 混沌光纤通信研究进展与展望[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(2): 127-133, 124.
Yao J L, Sun Y Z, Ren H P. Chaotic optical fiber communication system: a survey and prospect[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(2): 127-133, 124.
- [2] 郑亮, 李秀玲, 王瑛剑. 半导体激光器混沌通信研究进展[J]. 光通信技术, 2020, 44(1): 1-5.
Zheng L, Li X L, Wang Y J. Research progress on chaotic communication of semiconductor lasers[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(1): 1-5.
- [3] Chen X, Tanizawa K, Winzer P, et al. Experimental demonstration of a 4, 294, 967, 296-QAM-based Y-00 quantum stream cipher template carrying 160-Gb/s 16-QAM signals[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5658-5664.
- [4] Futami F, Guan K, Gripp J, et al. Y-00 quantum stream cipher overlay in a coherent 256-Gbit/s polarization multiplexed 16-QAM WDM system[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33338-33349.
- [5] 陈毓镨, 蒲涛, 郑吉林, 等. 相位调制量子噪声随机加密系统的仿真验证[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1606001.
Chen Y K, Pu T, Zheng J L, et al. Simulation verification of phase-shift keying quantum-noise randomized cipher system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1606001.
- [6] Ren S Y, Wang Y, Su X L. Hybrid quantum key distribution network[J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(10): 200502.
- [7] Kanakidis D, Bogris A, Argyris A, et al. Numerical investigation of fiber transmission of a chaotic encrypted message using dispersion compensation schemes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(10): 2256-2263.
- [8] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821-824.
- [9] Hu J J, Jia K H, Ma J S. Chaos synchronization and encoding in coupled semiconductor lasers of multiple modulated time delays[J]. Optik, 2011, 122(23): 2071-2074.
- [10] Argyris A, Hamacher M, Chlouverakis K E, et al. Photonic integrated device for chaos applications in communications[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(19): 194101.
- [11] Zhang J Z, Wang A B, Wang J F, et al. Wavelength division multiplexing of chaotic secure and fiber-optic communications[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6357-6367.
- [12] Kudryashov N A, Lavrova S F. Dynamical properties of the periodically perturbed Triki-Biswas equation[J]. Optik, 2022, 253: 168553.
- [13] Chen Q, Fan Y Y, Cheng M F, et al. Secure spread spectrum communication using super-orthogonal optical chaos signals[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 3035506.
- [14] Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. Nature, 2005, 438(7066): 343-346.
- [15] 周玉鑫, 毕美华, 滕旭阳, 等. 基于混沌映射的 OFDM-PON 物理层加密及系统性能增强算法[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1606002.
Zhou Y X, Bi M H, Teng X Y, et al. Physical layer encryption and system performance enhancement algorithm based on chaos mapping in OFDM-PON[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1606002.
- [16] 张艺腾, 贾志伟, 李青天, 等. 基于光反馈双模 DFB 激光器的宽带混沌信号产生[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2114001.
Zhang Y T, Jia Z W, Li Q T, et al. Broadband chaos signal generation based on dual-mode DFB laser with optical feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2114001.
- [17] Ke J X, Yi L L, Xia G Q, et al. Chaotic optical communications over 100-km fiber transmission at 30-Gb/s bit rate[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1323-1326.
- [18] Jiang L, Feng J C, Yan L S, et al. Chaotic optical communications at 56 Gbit/s over 100-km fiber transmission based on a chaos generation model driven by long short-term memory networks[J]. Optics Letters, 2022, 47(10): 2382-2385.
- [19] Büchner M J, Popp M, Meyer T, et al. Tool to recover scalar time-delay systems from experimental time series [J]. Physical Review E, 1996, 54(4): R3082-R3085.
- [20] Fowler A C, Kember G. Delay recognition in chaotic time series[J]. Physics Letters A, 1993, 175(6): 402-408.
- [21] Büchner M J, Meyer T, Kittel A, et al. Recovery of the time-evolution equation of time-delay systems from time series[J]. Physical Review E, 1997, 56(5): 5083-5089.
- [22] Hegger R, Büchner M J, Kantz H, et al. Identifying and

- modeling delay feedback systems[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(3): 558-561.
- [23] Ortín S, Gutiérrez J M, Pesquera L, et al. Nonlinear dynamics extraction for time-delay systems using modular neural networks synchronization and prediction [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2005, 351(1): 133-141.
- [24] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, et al. Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: a dynamical point of view[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(7): 879-891.
- [25] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20124-20133.
- [26] Nguimdo R M, Colet P, Larger L, et al. Digital key for chaos communication performing time delay concealment [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(3): 034103.
- [27] Nguimdo R M, Colet P. Electro-optic phase chaos systems with an internal variable and a digital key[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25333-25344.
- [28] Gao X, Cheng M, Deng L, et al. A novel chaotic system with suppressed time-delay signature based on multiple electro-optic nonlinear loops[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 82(1): 611-617.
- [29] Zhu X H, Cheng M F, Deng L, et al. An optically coupled electro-optic chaos system with suppressed time-delay signature[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 6601009.
- [30] Guo Y Q, Fang X, Zhang H J, et al. Chaotic time-delay signature suppression using quantum noise[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4888-4891.
- [31] 姬玉林, 郭晓敏, 李璞, 等. 滤波对激光混沌信号时延特征抑制与随机统计特性增强的研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1008001.
- Ji Y L, Guo X M, Li P, et al. Suppression of time-delay signature and enhancement of stochastic statistical properties of chaotic laser by filtering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1008001.
- [32] Xie Y Y, Li J C, He C, et al. Long-distance multi-channel bidirectional chaos communication based on synchronized VCSELs subject to chaotic signal injection [J]. *Optics Communications*, 2016, 377: 1-9.
- [33] 李琼, 邓涛, 吴正茂, 等. 安全性增强的双向长距离混沌保密通信[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0106001.
- Li Q, Deng T, Wu Z M, et al. Security-enhanced bidirectional long-distance chaos secure communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0106001.
- [34] 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.
- [35] Goeger G. Modulation format with enhanced SPM-robustness for electronically pre-distorted transmission [C]//2006 European Conference on Optical Communications, September 24-28, 2006, Cannes, France. New York: IEEE Press, 2006.
- [36] Xu C, Liu X. Postnonlinearity compensation with data-driven phase modulators in phase-shift keying transmission[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1619-1621.
- [37] Rafique D, Zhao J, Ellis A D. Digital back-propagation for spectrally efficient WDM 112 Gbit/s PM m-ary QAM transmission[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5219-5224.
- [38] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [39] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 5th ed. New York: Academic Press, 2013: 44.