

高速混沌光通信研究进展

吴琼琼, 马子洋, 李启华, 高震森*

(广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006)

摘要: 针对人们对高速、长距、大容量通信和信息安全的迫切需求, 结合当前科研进展, 概述了基于高速混沌光的保密通信系统现状与关键技术, 重点介绍了高速混沌光通信的研究进展, 主要包括提升混沌光系统带宽和安全性、高阶信号调制编码技术以及基于深度学习的神经网络。最后对高速混沌光保密通信的发展进行了展望。

关键词: 混沌光保密通信; 高速; 长距; 大容量; 安全性

中图分类号: TN918 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2021)01-0022-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.01.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of high speed chaotic optical communication

WU Qiongqiong, MA Ziyang, LI Qihua, GAO Zhensen*

(School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In view of the urgent demand for high-speed, long-distance, large-capacity communication and information security, combined with the current scientific research progress, this paper summarizes the status and key technical of secure communication system based on high-speed chaotic optical, and focuses on the research progress of high-speed chaotic optical communication. The research progress mainly includes improving the bandwidth and security of chaotic optical system, high-order signal modulation and coding technology and neural network based on deep learning. Finally, the development of high-speed chaotic optical secure communication is prospected.

Key words: chaotic optical secure communication; high speed; long distance; large capacity; security

0 引言

随着通信技术的迅猛发展, 人们对大容量、高速和安全通信的需求越来越高。由于传统保密通信系统加密是基于应用层上的数字加解密算法实现的, 非法接收者可以凭借类似的数学算法来窃取信息, 所以其安全性存在一定的隐患。混沌信号凭借其宽带大、类噪声和不可长期预测的独特优势^[1], 在保密通信领域吸引了国内外研究学者的广泛关注。

1990 年, 自 Pecora 和 Carroll 提出并验证了混沌

同步理论以来, 混沌通信开启了保密通信领域新纪元^[2]。由于传统电混沌信号带宽小、可搭载的信息速率低, 在信息传输过程中容易被非法接收方窃取, 致使通信速率和安全性能远远达不到现代保密通信的需求。基于物理层加密的混沌光保密通信技术克服了电混沌载波信号的缺陷, 因此在保密通信中越来越受重视。混沌光保密通信系统不仅能实现非线性延迟动力, 而且能提供高复杂性和无限维混沌动力^[3], 具有传输速率高、距离远以及与现有光通信技术相兼容等优势, 被众多国内外学者竞相研究。

本文重点论述高速混沌光保密通信研究进展, 并归纳总结当前该领域的研究热点和相关技术方案的优劣。

1 高速混沌光通信关键技术

混沌光通信技术不仅在国内的研究实验中取得了突破性进展, 在国外正被应用于商用光通信网络, 并取得成功, 实现了在 120 km 商用光纤网络中信息

收稿日期: 2020-05-21。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801301)资助; 国家自然科学基金(11904057)资助; 广东省珠江人才计划引进创新创业团队项目(2019ZT08X340)资助。

作者简介: 吴琼琼(1997—), 女, 江西抚州人, 硕士研究生, 现就读于广东工业大学信息工程学院信息与通信工程专业, 主要研究方向为混沌光保密通信, 研究高阶调制码型在高速混沌光保密通信中的应用。

* 通信作者: 高震森(E-mail: gaozhensen@gdut.edu.cn)。



单向传输的混沌光保密通信。虽然系统误码率低于 10^{-7} ,但是当进一步提高信息传输速率时,收发两端的同步性能变差,致使系统误码率逐渐升高,影响系统通信质量^[4]。近年来,为实现安全、高速和大容量的混沌光保密通信,学者们主要围绕以下关键技术开展了研究^[5-19]:

①副载波调制技术。将模拟基带信号预调制后的射频电载波称为副载波,运用副载波调制技术^[8-9]在合法接收方和窃听方之间提供更高的误码率性能判别优势来提升系统安全性。

②相位调制技术。在发送端,运用相位调制器将搭载着信息(或无信息)的混沌信号进行相位调制,利用光学相位混沌具有的恒定振幅特性,可以有效抑制时延信息,确保信息安全传输^[8-11]。

③带宽增强技术。混沌光保密通信系统传输速率受限,主要是由于混沌系统的带宽受到弛豫振荡的限制。于是,各国研究人员提出用多种带宽增强技术^[17-11,15-19]来增强混沌信号带宽。

④高阶信号调制技术。信号可调制参量主要有偏振态、幅度、频率以及相位,将多个可调参量进行调制/复用,可以有效提升频谱效率,抑制传输过程中的非线性损伤^[12-14]。

⑤深度学习技术。将深度学习运用于混沌光保密通信,对混沌发射机的复杂非线性模型进行学习,可以在数字领域实现宽带混沌同步^[13]。

国内外一些课题组虽然提出了提升带宽的解决方案,但是系统结构都较为复杂、不易实现,且整体信息传输速率仍然低于10 Gb/s。为进一步实现高速、大容量和安全的混沌光保密通信,学者们根据光学相位混沌具有的恒定振幅特性提出了众多相位调制技术来提升系统安全性能,并在不改变波特率的基础上,运用高阶信号调制技术有效提升频谱效率;同时,在系统接收端结合深度学习技术,简化系统接收端结构,在数字环境下实现宽带混沌同步,最终实现高速、大容量和安全的混沌光保密通信。

2 高速混沌光通信研究进展

提升混沌光通信系统的传输速率一直是研究人员所追求的目标。在高速混沌光通信研究进程中,学者们主要专注于提升混沌光系统带宽和安全性、高阶信号调制编码技术和基于深度学习的神经网络这3个主体研究方向。

2.1 提升混沌光系统带宽和安全性

近年来,人们在提高带宽方面做了大量的工作,以搭载高速待传输的信息,使得混沌光通信系统速率得以提升。经研究证实:延迟自干涉技术^[7]、相位调制技术^[8-11,17,19]和光外差技术^[18]等均可以有效提升混沌带宽。国内外研究学者在提升混沌带宽的同时有效地隐藏了时延信息,确保了系统的安全性并且提升了通信系统传输速率。

2.1.1 延迟自干涉技术

2013年,太原理工大学王安帮等人^[7]利用光反馈的分布式反馈半导体激光器(DFB)产生混沌光,实验结构图如图1所示。此方案通过对具有单频率本振的混沌信号进行平衡外差探测处理,使混沌谱中的功率重新分布。图2为基于光反馈半导体激光器(OFSL)和非相干延迟干涉功率谱图,可以明显看出信号带宽由7.81 GHz增加到9.65 GHz,功率谱平坦度从10 dB优化到3 dB,有效提升了混沌信号的带宽。此方案通过对具有单频率本振的混沌信号进行平衡外差探测处理,使混沌谱中的功率重新分布,可获得平滑的功率谱和更宽的有效带宽。然而,光反馈产生的混沌功率

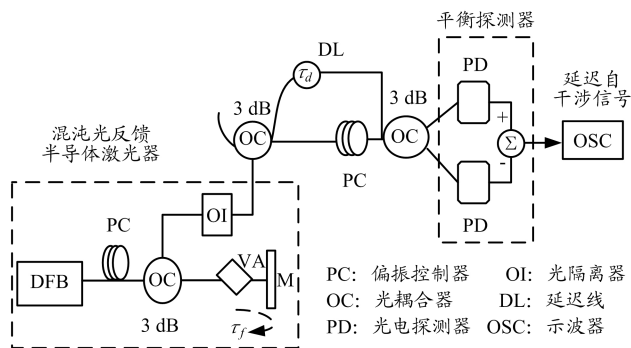


图1 实验结构装置图

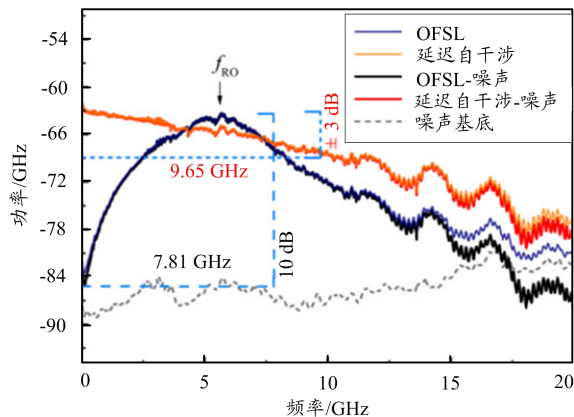


图2 基于 OFSL 和非相干延迟干涉功率谱

谱只有一小部分混沌功率能被有效利用,且所使用的电子元件导致有限采集带宽受限。

2.1.2 相位调制技术

利用非相干延迟技术生成的混沌信号带宽过低,难以搭载高速信息。为解决此问题,2010年,Roman Lavrov 等人^[20]利用差分相位调制技术和电光非线性延迟相位动态特性,将隐藏在混沌光相位的 10 Gb/s 信息在单模光纤中成功传输 70 km。此系统利用光学相位混沌具有的恒定振幅特性,有效提升了系统的安全性,并且在当时该系统信息传输速率为混沌光通信现场演示的最高传输速率。然而,在该系统中通过相位的自相关特性依旧可以获取时延信息,导致系统安全性存在隐患。为了解决由于相位调制的周期特性容易影响系统的安全性这一问题,电子科技大学江宁教授团队^[19]利用光学时间透镜模块,消除了由外腔半导体激光器输出的混沌信号的弛豫振荡和周期特性。图 3 为宽带混沌生成结构示意图^[19]。该系统的射频频谱比原系统更宽、更平坦,但是运用此方式生成的混沌光信号在传输过程中容易受到光纤色散的影响,影响系统的同步性能。

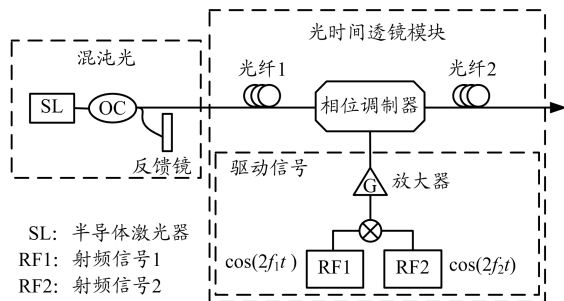


图3 宽带混沌生成系统的原理图

2.1.3 安全性能提升技术

由于在传统的混沌光通信系统中,通过计算混沌载波的自相关、延迟互信息或排列熵,可以很容易地识别出时延信息。因此,对混沌载波进行时延信息隐藏对于提高混沌通信系统的安全性至关重要。国内电子科技大学江宁教授团队^[21]提出利用相位调制技术,在提升混沌光信号带宽的同时,有效隐藏了时延信息。2019年,该团队^[19]提出了一种实现带宽增强和时延抑制的解决方案。图4为光时序加密(OTE)和光时序解密(OTD)混沌保密通信系统原理图。不同于传统的通信方式,发送端加入 OTE 模块,OTE 模块包含一个由随机正弦信号驱动的相位调制器(PM)和一个色散组件。OTE 模块通过相位调制技术在原混沌光输出中引入额外的相位频谱分量,并利用非线性元件实现

相位-强度的转变,这一技术手段不仅有效隐藏了时延信息,使得功率在频谱上重新分配和混沌信号的带宽增强,而且系统安全性能也得到大幅提升。系统在有/无 OTE/OTD 情况下,光注入强度和参数失配对系统同步性能的影响对比情况如图5所示,可以看出通过足够强的光注入,可以很容易地实现高质量的混沌同步,且该系统中引进 OTE 模块和 OTD 模块对弱化混沌同步的影响不大。

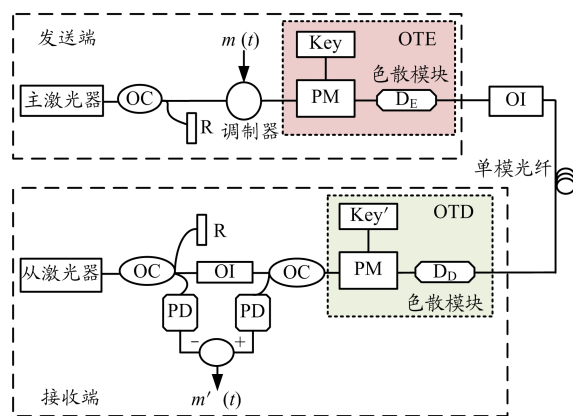


图4 OTE/OTD 混沌保密通信系统原理图

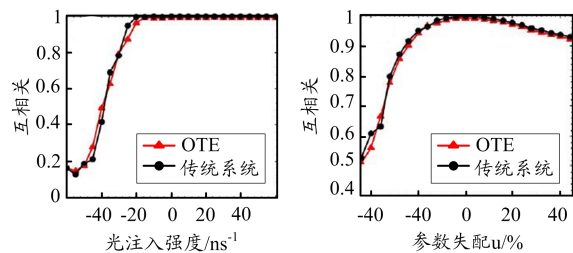


图5 光注入强度和参数失配对系统同步性能的影响

虽然运用相位调制技术可以有效地提升混沌带宽,但相位调制的周期性仍然不可避免,为解决由于相位调制的周期性引发的系统安全性问题。2019年,华中科技大学 YUDI FU 等人^[22]提出基于外部噪声和内部反馈机制的混沌光保密通信系统,利用高复杂度的相位噪声掩盖强度数据信息,有效抑制时延特性,成功实现将 10 Gb/s 开关键控(OOK)信号通过单模光纤传输了 100 km,比特误码率低于 10^{-8} ,实验装置如图6所示。此方案的创新点在于相位噪声模块的使用。首先,噪声信号(如 ASE 噪声)的带宽可能非常大,从一个独立熵源的角度推测一个真正的随机噪声信号的随机性或复杂性比推测混沌噪声信号的随机性或复杂性要高;其次,在反馈环结构中引入外部噪声源可以在很低的调制深度下保持信号的高复杂度,对系统安全性能的提升具有很大的帮助。然而,由于该

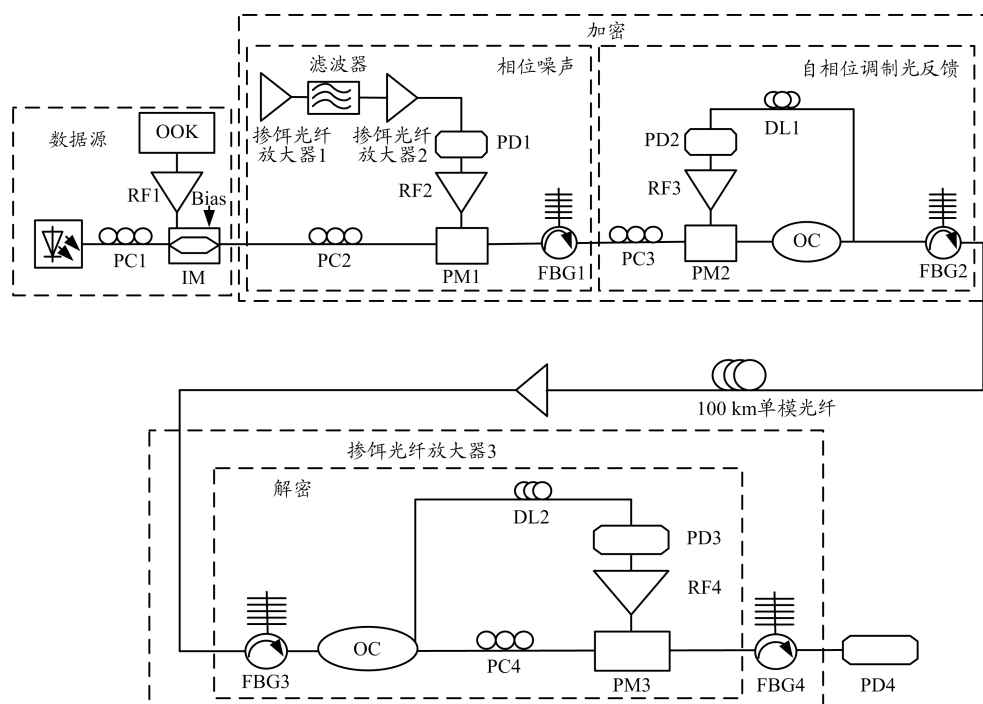


图6 安全通信系统实验装置图

方案整套结构装置使用了较多的光电器件,使得整体设置变得较为复杂,许多参数必须同时控制和优化,操作难度较大,并且该系统的稳定性会受到环境因素(如温度和振动)的影响,这些问题都可能在实际应用中阻碍混沌保密通信,将成为今后研究的重点。

利用外差探测法生成的混沌信号,带宽可有效提升但是混沌光功率利用率较低,并且由于时延抑制是通过在激光腔中引入非线性反馈来实现的,这可能会增加安全通信混沌载波同步的难度和复杂度。由于光电器件高带宽的优良特性,将光电反馈运用于混沌光通信系统可有效提高信息传输速率,实现高速混沌光通信的目标。利用相位调制技术生成的混沌相比于幅度调制技术,可以有效提升系统传输速率,但是相位混沌容易受到光纤色散的影响,导致系统同步性能不佳,且相位调制的周期特性影响系统的安全性能,若想进一步增强混沌带宽需要复杂的系统配置或高速光电子设备。然而,以上操作极大程度地增加了实现安全通信的混沌载波同步的困难性和复杂度。同时,即使克服了混沌带宽提升的困难性,宽带混沌在传输中更容易受到非线性损伤的影响,这使得同步质量变差,且实现宽带混沌同步并不容易,不同步的混沌信号被转化为噪声,导致信噪比变差。

高阶信号调制技术被认为是实现高速光传输的重要方法,可以有效提高系统复杂性、频谱效率,并且

降低成本。因此,一些课题组将研究方向转变为信息调制形式和研究高阶调制码型。

2.2 高阶信号调制编码技术

在高速、长距离和大容量的混沌保密光通信系统中,系统会不可避免地受到非线性损伤的影响,不仅容易破坏传输信号的脉冲波形,而且容易产生不必要的噪声,严重损伤通信质量。采用高阶调制编码技术可以提升信道频谱效率,降低信号在传输过程中由色散引起的脉冲展宽,确保信息安全、高效传输。2017年,华中科技大学 JIANZHOU AI 等人^[14]成功将 5 Gb/s 无载波振幅/相位(CAP-4))信号与 10 Gb/s 的 OOK 信号隐藏在基于电光延迟

反馈的混沌保密光通信系统中,实现了高质量的混沌同步。

为进一步提升混沌光保密通信系统传输速率,2018年,上海交通大学义理林教授团队^[15]根据双二进制码转换规则,将 30 Gb/s 非归零振幅键控随机二进制信号转化为双二进制信号,以光混沌信号作为载体,经光纤传输超过 100 km 后,误码率小于 3.8×10^{-3} 。图 7 为系统装置结构图。该方法中利用光电反馈生成的混沌载波得益于马赫-曾德尔(MZM)调制器的带宽,可以搭载高速率的信息。该系统利用双二进制调制码型,对信号的带宽进行压缩处理来提升混沌保密通信的速率和频谱效率,然而双二进制码在传输过程中抗噪声能力差、产生方式复杂、非线性容忍度较低和对色散敏感,该方案在接收端运用数字信号处理技术补偿中,光纤非线性效应和色散对信号造成损伤,这无疑增加了运算难度和系统成本。

因此,混沌光保密通信结合高阶调制码型,在提升系统速率的同时提升系统容量,但码型接收方式复杂,并且存在非线性容忍度较低、对激光器线宽要求严苛以及在传输过程中存在抗噪声能力差等问题。尽管如此,混沌光保密通信系统结合高阶调制技术打破了由于混沌带宽限制导致信息传输速率低的瓶颈,为后续研究高速混沌光保密通信提供了良好开端。

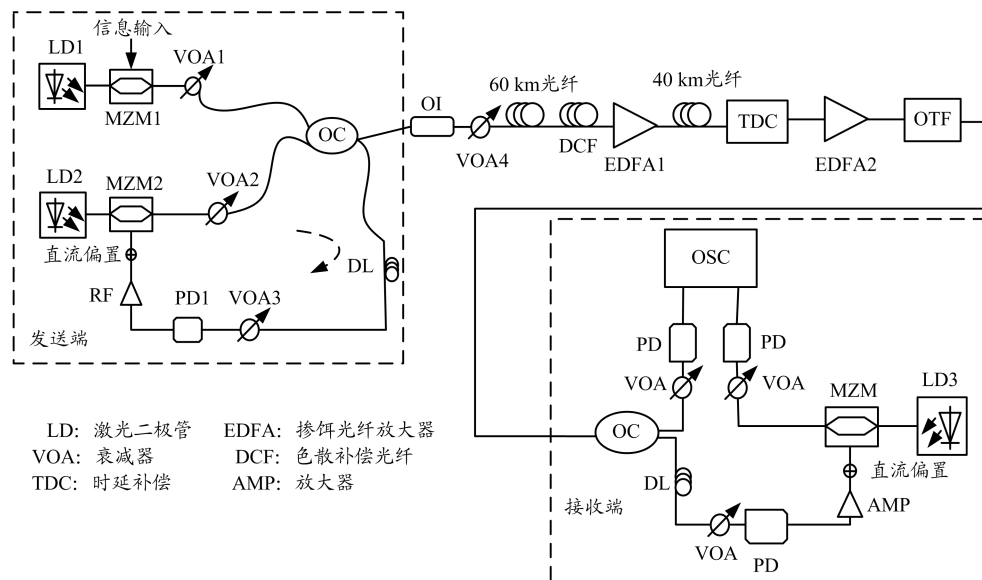


图7 系统装置结构图

保密通信系统结构简单,使混沌光保密通信接收端结构大大简化,并且利用深度学习可以很好地达到收发同步,在接收端减少了色散补偿模块的使用。但是,在实验中利用人工神经网络在 20 km 的光纤中训练是非常不容易的。当消息与混沌的比值足够大时,作为随机变量的消息容易改变非线性函数的参数,因此混沌的非线性动力学特性也会因此受到影响。利用深度学习对混沌发射机的复杂非线性模型进行学习,虽然可以在数字环境下实现宽带混沌同步,但是该方法存在被破译的风险。因此,高阶调制码型与基于深度学习的神经网络技术相结合,必将成为科研人员的主体研究方向之一。

3 结束语

高速保密光通信技术是现代通信不可或缺的一部分,本文就混沌光通信研究与高速混沌光保密通信研究进行了介绍与分析,结果表明:随着科学技术的发展,各类电光元器件带宽有望得到进一步的提升,混沌系统带宽可以得到进一步提高,进而提高混沌光保密通信系统速率。

随着信息化的高速发展,高阶调制码型与深度学习的神经网络相结合的混沌光保密通信系统将会成为各国研究学者的研究方向之一,在今后的高速混沌保密光通信系统中起到重要推动作用。

参考文献:

- [1] 颜森林. 激光混沌并行串联同步及其在中继器保密通信系统中的应用[J]. 光学学报, 2019, 68(17): 61-71.
- [2] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821-824.
- [3] JACQUOT M, LAVROV R, LARGER L. Nonlinear delayed differential

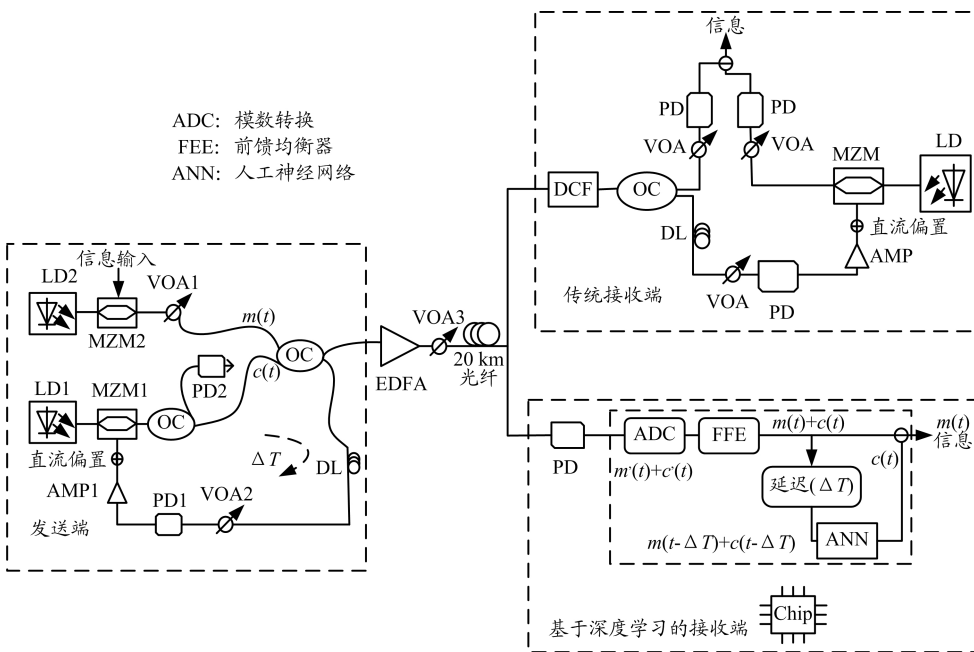


图8 基于深度学习的混沌保密光通信系统结构示意图

2.3 基于深度学习的神经网络

国内外研究团队大多致力于通过提升混沌信号带宽和运用高阶调制码型技术来提升混沌光保密通信系统信息传输速率。2019年,上海交通大学义理林教授团队^[12]首次在系统接收端利用基于深度学习的神经网络技术,将 20 Gb/s 和 32 Gb/s 的 16 阶正交振幅调制(16QAM)信息成功隐藏在以混沌光信号为载体的系统中,实现了宽带混沌同步与点到多点的混沌光网络通信,成功将信息传输速率提升至 32 Gb/s,并在光纤中传输了 20 km。实验装置如图 8 所示。

与传统的混沌同步相比,基于神经网络的混沌光

optical phase feedback for high performance chaos communications[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)/Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), May 16–21, 2010, San Jose, USA. New York: IEEE, 2010: 1–2.

[4] 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.

[5] BOGRIS A, ARGYRIS A, SYVRIDIS D. Encryption efficiency analysis of chaotic communication systems based on photonic integrated chaotic circuits[J]. IEEE Journal Of Quantum Electronics, 2010, 46(10): 1421–1429.

[6] ARGYRIS A, BOGRIS A, I GILES, et al. Subcarrier modulation boosts chaotic optical communication systems to error-free performance [C]//Conference on Optical Fiber Communication (OFC 2009). March 22–26, 2009, San Diego, USA. New York: IEEE, 2009: 384–386.

[7] WANG A B, YANG Y C, WANG B, et al. Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference[J]. Opt Express, 2013, 21(7): 8701–8710.

[8] XUE C P, JING N, LIU D, et al. High-speed independent random phase-modulated dual-loop feedback performing security-enhanced chaos communication[C]// (ACP)COSA, November 2–5, 2016, Wuhan, China, New York: IEEE, 2016: 3659–3661.

[9] XUE C P, JIANG N, LV Y, et al. Security-enhanced chaos communication with time-delay signature suppression and phase encryption [J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3690–3693.

[10] JIANG N, XUE C P, LIU D. Security-enhanced chaotic communications with optical temporal encryption based on phase modulation and phase-to-intensity conversion[J]. OSA Continuum. 2019(12): 3422–3438.

[11] FU Y, CHENG M, JIANG X, et al. Wavelength division multiplexing secure communication scheme based on an optically coupled phase chaos system and PM-to-IM conversion mechanism [J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 94(3): 1949–1959.

[12] KE J X, YI L L, YANG Z, et al. 32 Gbs chaotic optical communications by deep-learning-based chaos synchronization [J]. Optical Letters,

2019, 44(23): 5776–5779.

[13] 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): 1323–1327.

[14] AI J Z, WANG L L. Secure communications of CAP-4 and OOK signals over MMF based on electro-optic chaos[J]. Optical Letters, 2017, 42(18): 3662–3666.

[15] WANG A B, WANG Y C, WANG J F. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection [J]. Optical Letters, 2009, 34(8): 1144–1146.

[16] XIANG S Y, PAN W, LUO B, et al. Wideband unpredictability-enhanced chaotic semiconductor lasers with dual-chaotic optical injections[J]. IEEE J. Quantum Electron, 2012, 48(8): 1069–1076.

[17] YAN S L. Enhancement of chaotic carrier bandwidth in a semiconductor laser transmitter using self-phase modulation in an optical fiber external round cavity[J]. Chin. Sci. Bull, 2010, 55(11): 1007–1012.

[18] WANG A B, WANG L S, LI P, et al. Minimal-post-processing 320-Gbps true random bit generation using physical white chaos [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3153–3164.

[19] JIANG N, WANG C, XUE C P, et al. Generation of flat wideband chaos with suppressed time delay signature by using optical time lens[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14359–14367.

[20] LAVROV R, JACQUOT M, LARGER L. Nonlocal nonlinear electro-optic phase dynamics demonstrating 10Gb/s chaos communications [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 4(10): 1430–1436.

[21] JIANG N, ZHAO A, LIU S, et al. Generation of broadband chaos with perfect time delay signature suppression by using self-phase-modulated feedback and a microsphere resonator [J]. Optics Letters, 2018, 43(21): 5359–5362.

[22] FU Y D, CHENG M G, JIANG X X, et al. High-speed optical secure communication with an external noise source and an internal time-delayed feedback Loop[J]. Photonics Research, 2019, 7(11): 1306–1313.