



光通信技术

Optical Communication Technology

ISSN 1002-5561,CN 45-1160/TN

## 《光通信技术》网络首发论文

题目： 高速混沌光通信研究进展  
作者： 吴琼琼，马子洋，李启华，高震森  
网络首发日期： 2020-10-29  
引用格式： 吴琼琼，马子洋，李启华，高震森. 高速混沌光通信研究进展. 光通信技术.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20201029.1657.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 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，重点论述高速混沌光通信系统所面临的机遇、挑战与研究进展，概述了基于高速光混沌的保密通信系统现状以及混沌光保密通信系统速率的关键技术方案，重点分析论述了高速混沌光通信的研究进展，主要包括提升光混沌系统带宽和安全性、高阶信号调制编码技术、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：**光混沌保密通信;高速;长距;大容量;安全性

**中图分类号：** TN918      **文献标志码：** A

## 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)

**Abstract:** In view of people's urgent demand for high-speed, long-distance, large-capacity communication and information security, this paper focuses on the opportunities, challenges and research progress of high-speed chaotic optical communication system in combination with the current research progress. Article has outlined based on the high-speed optical chaotic secure communication system present situation and the key technology of chaotic secret communication system light rate plan, focus on analysis discusses the research progress of the chaotic optical communication, mainly including ascend light chaos system bandwidth and security, high order signal modulation coding technique, neural network based on depth of learning. Based on the current research progress, this paper special emphasizes of the opportunities, challenges and research progresses of high speed chaotic optical communication system.

**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、类噪声和不可长期预测的独特优势<sup>[1]</sup>，在保密通信领域吸引了国内外研究学者的广泛关注。

自 Pecora 和 Carroll 在 1990 年提出并验证了混沌同步以来，混沌保密通信开启了通信领域新纪元<sup>[2]</sup>。传统电混沌信号，由于其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。在数字加密基础上的，基于物理层加密的光混沌保密通信技术，克服了电混沌载波信号的缺陷，在保密通信中愈发流行起来。混沌光保密通信系统不仅具有实现非线性延迟动力学系统的固有能

力,并且提供高复杂性和无限维混沌动力<sup>[3]</sup>。由于混沌保密光通信具有传输速率高、距离远、与现有光通信技术相兼容等优势,引发众多国内外学者竞相研究。本文重点论述高速光混沌保密通信研究进展,并归纳总结了当前研究热点以及相关技术方案的优劣。

## 1 高速混沌通信关键技术

目前的研究表明,混沌具有的宽带、类噪声和不可长期预测的独特优势,将信息搭载在混沌载波上<sup>[4-6]</sup>可以实现高速率、长距离和大容量的安全高效混沌保密通信。起初,借助电路系统实现混沌通信,然而电路系统生成的混沌信号带宽低、传输衰减大且受到较低维度的限制,难以传输高速的数据信息。基于光混沌的保密通信开始进入人们视野。光混沌通信不仅在国内实验研究中取得突破性进展,国外将混沌光通信技术应用于商用光通信网络也取得成功。例如:2005年,D. Syvridis等人<sup>[7]</sup>对一种全光混沌通信系统进行了深入的研究,并成功实现了在120 km商用光纤网络中,信息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会变差,致使系统误码率逐渐升高,影响系统通信质量。近些年来,为实现安全、高速和大容量的混沌光保密通信,学者主要围绕以下关键技术开展研究<sup>[8-22]</sup>。

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<sup>[8][9]</sup>在合法接收方和窃听方之间提供更高的误码率性能判别的独特优势来提升系统安全性。

2) 相位调制技术:运用相位调制器,在发送端将搭载着信息(或无)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<sup>[11-14]</sup>。

3) 带宽增强技术:混沌光保密通信系统传输速率受限,主要是由于激光混沌系统的带宽,受到弛豫振荡的限制,而基于调制器的混沌系统的混沌带宽受电子器件的限制。着眼于上述难点,各国研究人员提出多种带宽增强技术<sup>[10-14][18-22]</sup>来增强混沌信号带宽。

4) 高阶信号调制: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<sup>[15-17]</sup>。

5) 深度学习技术:通过组合低层特征形成更加抽象的高层表示属性类别或特征,以发现数据的分布式特征表示,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<sup>[16]</sup>。

然而,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,利用光学相位混沌具有的恒定振幅特性,学者提出众多相位调制技术来提升系统安全性能,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,随着技术方案的不断推进,混沌光保密通信系统信息传输速率也由1 Gb/s增加至40 Gb/s。总体来看,在高速混沌

光通信研究进程中,学者主要专注于提升光混沌系统带宽、高阶信号调制编码技术和基于深度学习的神经网络3个主体研究方向,下面将这3个研究方向展开论述。

## 2-1 提升光混沌系统带宽和安全性

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<sup>[10]</sup>、相位调制技术<sup>[11-14,20,22]</sup>、光外差技术<sup>[21]</sup>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<sup>[10]</sup>利用光反馈的分布式反馈半导体激光器产生混沌光,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<sup>[10]</sup>为基于光反馈半导体激光器和非相干延迟干涉功率谱图,可以明显看到信号带宽由7.81GHz增加到9.65GHz,功率谱平坦度从10dB优化到3dB,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。

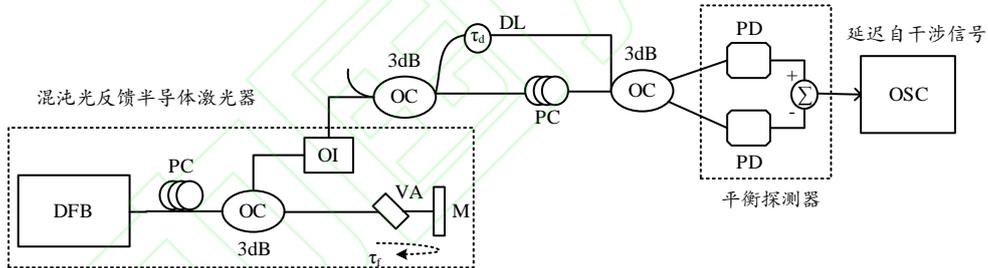


图1 实验结构装置图

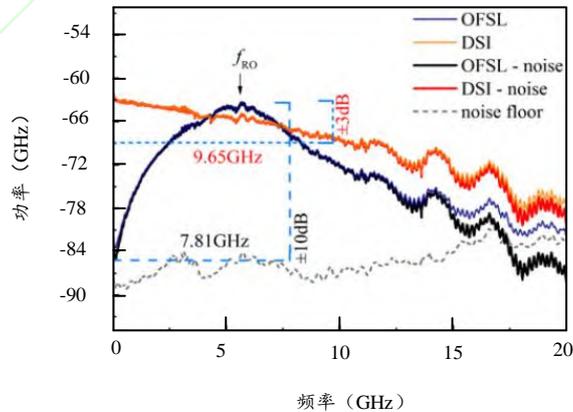


图2 基于光反馈半导体激光器和非相干延迟干涉功率谱

### 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，为解决上述问题，2010年，国外 Roman Lavrov 等人<sup>[23]</sup>利用差分相位调制技术和电光非线性延迟相位动态特性，将隐藏在光混沌相位的 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得时延信息，导致系统安全性存在隐患。因此，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性能问题，电子科技大学江宁教授团队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<sup>[2]</sup>。该系统的射频频谱比原系统更宽、更平坦，但由于时间波形由连续的不同幅度的离散脉冲组成，因此在射频频谱中可以发现混沌信号的周期特性。同时，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。

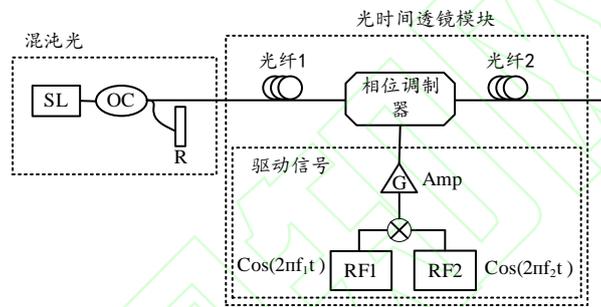


图 3 宽带混沌生成系统的原理图

### 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<sup>[24]</sup>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<sup>[13]</sup>提出了一种实现带宽增强和时延抑制的解决方案。图 4<sup>[13]</sup>为光时序加密/解密混沌保密通信系统原理图，不同于传统的通信方式，发送端加入光时序加密（optical temporal encryption, OTE）模块，光时序加密模块包含一个由随机正弦信号驱动的相位调制器和一个色散组件，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，最终实现混沌信号的带宽增强，系统安全性能也得到大幅提升。图 5<sup>[13]</sup>为比较系统在有光时序加密/解密情况下，光注入强度和参数失配对系统同步性能的影响情况，结果表明：通过足够强的注入，可以很容易地实现高质量的混沌同步，且该系统中引进 OTE 和 OTD（optical temporal decryption, OTD）模块对弱化混沌同步的影响不大。

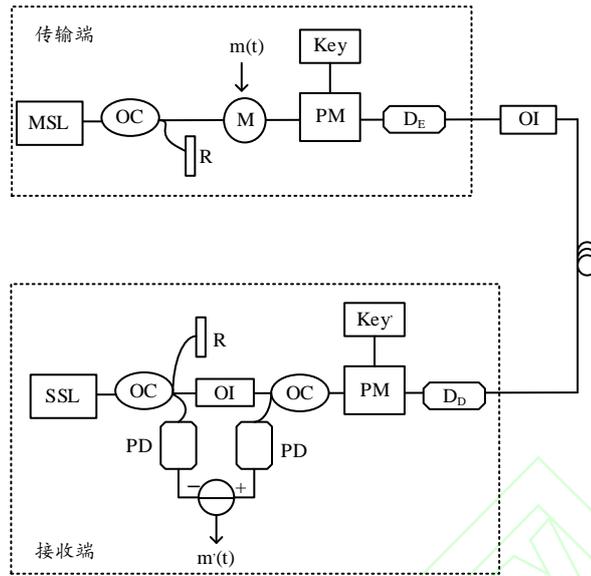


图 4 光时序加密/解密混沌保密通信系统原理图

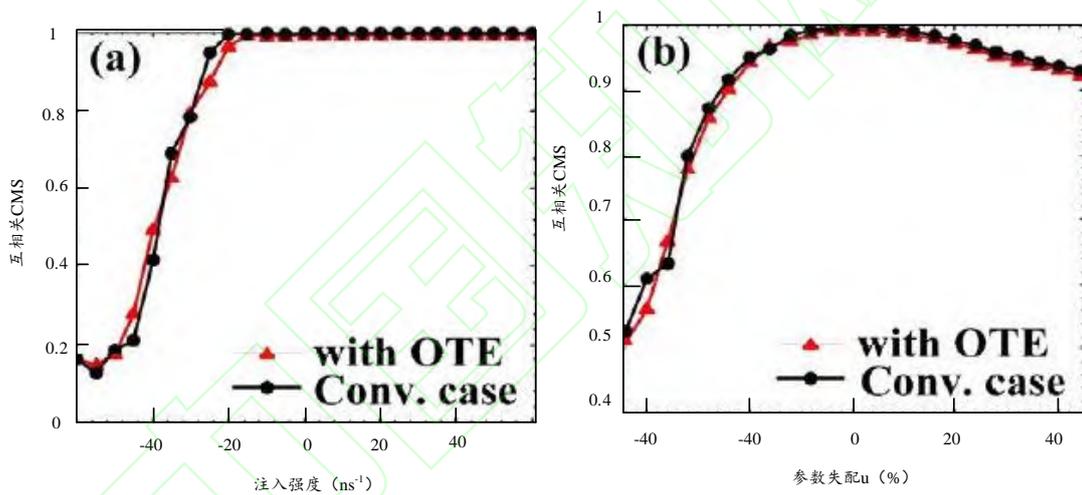


图 5 光注入强度和参数失配对系统同步性能的影响

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，华中科技大学 YUDI FU 等人<sup>[25]</sup>在 2019 年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 (On-off keying, OK) 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低得多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，该问题可能成为实际应用中阻碍混沌保密通信的主要问题，该问题也将成为今后研究的重点。

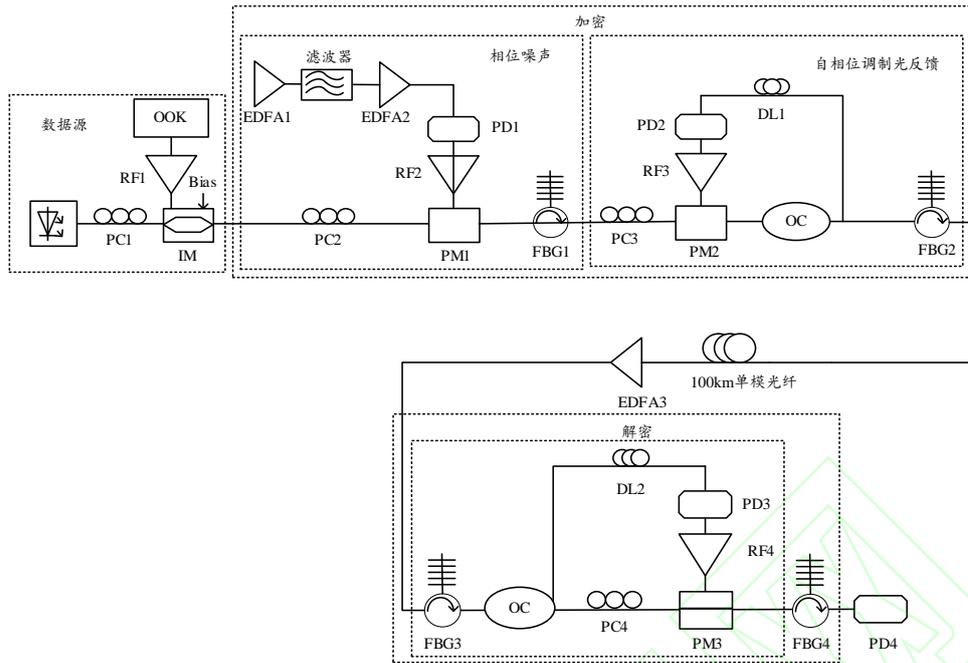


图6 安全通信系统实验装置图

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，这可能会增加实现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，将电光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，并且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。综上所述，在混沌光保密通信系统中，利用调制器产生混沌的方式，相较于利用激光器产生混沌的方式，不仅容易拓宽混沌信号的带宽而且对实现混沌同步更有益。

然而，以上操作极大程度的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。然而，采用高阶信号调制技术，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、长距和大容量的混沌保密光通信系统中，系统会不可避免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<sup>[17]</sup>成功将 5 Gbit/s CAP-4 (carrier less amplitude/phase, 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，并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<sup>[16]</sup>，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 100km，BER 小于  $3.8 \times 10^{-3}$ 。图 7 为系统装置结构图。该方法中利用电光反馈生成的混沌载波得益于马赫-曾德尔调制器的带宽，可以搭载高速率的信息，并且，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，对色散敏感，且该方案在接收端运用数字信号处理技术补偿由于光纤非线性效应和色散对信号引起的损伤，这无疑增加了运算难度和系统成本。

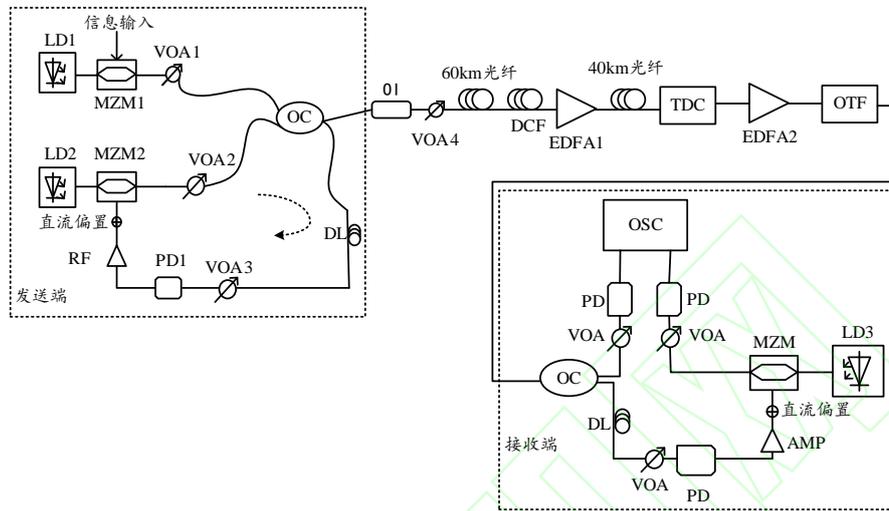


图 7 系统装置结构图<sup>[16]</sup>

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进而提升系统容量，然而高阶调制码产生，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，在传输过程中存在抗噪声能力差等问题。但是，毋庸置疑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。

### 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<sup>[15]</sup>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 QAM 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。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。

和传统的混沌同步相比，基于神经网络的混沌光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的达到收发同步并且在接收端减少了色散补偿模块的使用。然而，在实验中利用神经网络在 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。但结合当代发展进程来看，高阶调制码型结合基于深度学习的神经网络技术，必将成为科研人员的主体研究方向之一。

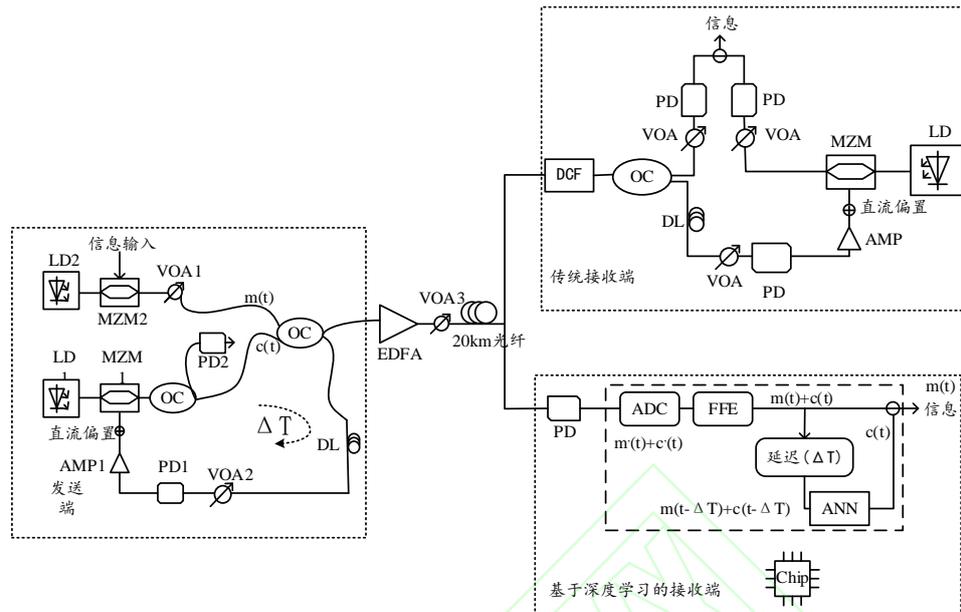


图 8 基于深度学习的混沌保密光通信系统结构示意图<sup>[15]</sup>

### 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展进行论述, 其中重点论述高速混沌光保密通信研究进展, 对当前提升混沌通信系统速率的技术方案进行分析得出以下结论: 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, 高阶调制码型与结合深度学习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): 17052-170511.
- [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 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, CA. New York: IEEE, 2010: 1-2.
- [4] TANG S, LIU J M. Synchronization Of High-Frequency Chaotic Optical Pulses[J]. Optical Letters, 2001, 26 (9): 596-599.
- [5] LUO L, CHU P L, LIU H F. 1-GHz Optical Communication System Using Chaos In Erbium-Doped Fiber Lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12 (3): 269-271.
- [6] KUSUMOTO K, OHTSUBO J. 1.5-GHz Message Transmission Based On Synchronization Of Chaos In Semiconductor Lasers[J]. Optics Letters, 2002, 27 (12): 989-991.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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). Mar 22-26, 2009, San Diego, CA. New York: IEEE, 2009:384-386.
- [10] 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.
- [11] XUE C P, JING N, LIU D, et al. High-Speed Independent Random Phase-Modulated Dual-Loop Feedback Performing Security-Enhanced Chaos Communication. (ACP) ©OSA 2016.
- [12] 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.
- [13] 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, 2 (12) : 3422-3438.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] WANG A B, WANG Y C, AND WANG J F. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection[J]. *Optical Letters*, 2009, 34(8): 1144 - 1146.
- [19] XIANG S Y, PAN W, LUO B, et.al. "Wideband unpredictability-enhanced chaotic semiconductor lasers with dual-chaotic optical injections," *IEEE J. Quantum Electron.* 48(8), 1069 - 1076 (2012).
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] JIANG N, WANG C, XUE C P, et al. Generation Of Flat Wideband Chaos With Suppressed Time DelaySignature By Using Optical Time Lens[J]. *Optics Express*, 2017, 25 (13) : 14359-14367.

- [23] LAVROV R, JACQUOT M, LARGER L. Nonlocal Nonlinear Electro-Optic Phase Dynamics Demonstrating 10/Gbs Chaos Communications[J]. IEEE Journal Of Quantum Electronics, 2010, 4 (10) : 1430-1436.
- [24] 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.
- [25] 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.

**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，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。从事混沌光保密通信系统方面的研究，主要为提升混沌光信号带宽、研究高阶调制码型在高速混沌光保密通信中的应用。

