DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.02.001

混沌光纤通信研究进展与展望

姚俊良，孙郁哲，任海鹏

（西安理工大学 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室，陕西 西安 710048）

摘要： 光纤以超高带宽、超大容量、超长距离等突出优点，在有线高速信息传输中发挥了无可替代的作用。近年来，随着非线性混沌理论的不断发展，基于混沌理论的安全高效通信方法是光纤通信领域的研究热点。本文通过对近年来提出的混沌光源生成方法、基于同步的混沌光纤传输方案、混沌加密方法及相关技术的实验室测试和商用光纤测试情况进行全面回顾，系统分析了各类方法的特点及适用范围。在此基础上，结合光纤通信的需求状况和混沌理论的最新进展，讨论了未来混沌光纤通信领域的进一步研究思路与发展前景。

关键词： 光纤通信；混沌光源；混沌保密；商用光纤网络

中图分类号： TN929.11 **文献标志码：** A **文章编号：** 1006-4710(2018)02-0127-07

Chaotic optical fiber communication system: a survey and prospect

YAO Junliang, SUN Yuzhe, REN Haipeng

(Shaanxi Key Laboratory for Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Optical fiber plays an important role in the high-speed wired communication because of its outstanding properties, such as high bandwidth, large capacity and low interference, etc. Recently, chaos-based communication methods have become a research focus in the area of optical fiber communication due to the development of nonlinear chaotic theory. The motivation lies in the advantages provided by the chaotic signal. In this paper, several communication schemes and test results are given for the design of chaotic optical communication systems with generation of chaotic optical source, chaotic synchronization methods and chaotic encryption considered. On this basis, the characteristics and application scopes of existing methods are analyzed and the future research direction on the chaotic optical communication is pointed out.

Key words: optical fiber communication; chaotic optical source; chaotic encryption; commercial optical fiber network

随着人们对高信息传输速率的需求和信息量的急剧增长，信息的高速、高效和安全传输，成为通信领域的核心问题。

目前通信的骨干网、接入网等均采用光纤作为传输载体。近日，烽火科技在国内首次实现 560 Tb/s 超大容量波分复用及空分复用的光传输系统试验，可以实现一根光纤上 67.5 亿对人（135 亿人）同时通话，这标志着我国在“超大容量、超高速率、超长距离”光通信领域迈向了新的台阶[1]。然而，传统的光通信系统将信息调制在周期载波上，通过数值方法在网络应用层（接入层、网络层、应用层）对信息进行加密，由于系统自身原因或人为因素，数据信息可能出现外泄或被非法篡改，从而造成严重的安全隐患。因此，人们开始关注更高安全性的光通信技术。

混沌是确定性非线性动力学系统产生的一类随

收稿日期： 2018-02-14

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（61502385，61172070，61703334）；陕西省重大基础研究资助项目（2016ZDJC-01）；陕西省重点科技创新团队资助项目（2013KCT-04）；陕西省自然科学基础研究资助项目（2016JQ6015）；陕西省教育厅重点实验室资助项目（17JS086）

作者简介： 姚俊良，男，讲师，博士，研究方向为非线性理论、光纤通信。E-mail：yaojunliang@xaut.edu.cn

机现象,它具有伪随机、宽频带和长期不可预测等特性。将信息隐藏在混沌波形中可以提升信息传输的安全性。与高层加密算法相比,基于混沌的保密通信是一种物理层的加密技术,只有当接收者拥有与发射机相同的参数时,才能够恢复出信息。

自从 1990 年混沌同步[2]被提出以来,基于同步的混沌安全通信成为研究的热点。最近研究表明,当接收端采用简单硬件实现的匹配滤波器时,混沌波形能够最大化输出信噪比[3-4],这为基于混沌的低误码、高可靠传输奠定了基础。但同时,混沌也对通信系统提出了更高的要求:载波级同步、超大带宽、高动态高维度硬件设备等。从以上描述可以看出,混沌能够提供光传输所需的安全性和可靠性,光纤能够满足混沌通信所需的高带宽、高动态、易生成、易同步等要求。因此,混沌光传输系统成为近年来光纤通信领域的研究热点[5-10]。

本文将结合混沌光纤通信研究的几大主要问题,对近年来提出的相关方法进行全面总结,具体包括混沌光源的生成、基于同步的传输方案和混沌加密方案三方面内容。针对不同问题,分析各类方法的特点,最后结合混沌理论的最新发展情况,讨论了未来混沌光纤通信领域的进一步研究内容。

1 混沌光源的生成

传统光纤通信采用的激光器工作在连续波的稳定状态,因此,需要通过抑制光反馈或减少外光注入来减少激光器的输出不稳定。而混沌激光器刚好相反,通过对激光器施加不同的外部扰动,使激光器的输出可以表现为周期、准周期、混沌的特性,这也是所有混沌光源生成的理论基础。

目前,混沌光源设计主要基于两类基本模型:一是 Lang-Kobayashi(LK)半导体激光器速率方程,二是非线性时延动态方程。

1.1 基于 Lang-Kobayashi 半导体激光器速率方程的混沌光源生成

1980 年 Lang 和 Kobayashi 通过实验[11]研究光反馈情况下,半导体激光器的输出光强和载波密度随反馈时延、反馈强度、反馈速率的变化。发现在不同的反馈参数下,输出光强和载波密度分别满足方程:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}(E\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t})}{\mathrm{d}t} = \left\{\mathrm{i}\omega_{\mathrm{N}}(n) + \dfrac{1}{2}(G(n)-\Gamma_0)\right\}E\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} + \\ \qquad k\cdot E(t-\tau)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega(t-\tau)} \\ \dfrac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{n}{\tau_n} - G(n)\,|\,E\,|^2 + \dfrac{1}{qV} \end{cases} \tag{1}$$

式中,E 和 n 分别为输出光强和载流子密度;$\mathrm{i}=\sqrt{-1}$ 为虚数单位;Ω 为激光器角频率;$\omega_{\mathrm{N}}(n)$ 为激光管腔纵膜谐振频率;$G(n)$ 为光增益;Γ_0 为管腔损耗;k 为半导体激光器的反馈强度;τ_n 为载流子寿命;τ 为反馈时延;q 为电子电荷;V 为有源区体积;t 为时间。

通过对式(1)分析可知,不同的反馈参数使得激光器输出具有不同特性,包括稳定的周期性和不稳定的混沌特性。基于 LK 速率方程及其扩展形式,学者们设计了不同形式的混沌激光器。

1) 外腔反馈半导体激光器

这种方式是在激光器外部放置反馈器件,将激光器发出的激光再反射回激光器,通过控制反馈的幅度、相位和时延,从而产生混沌激光[5,12-13]。图 1 为外腔反馈半导体激光器原理图。

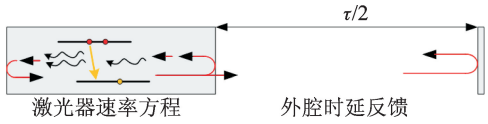


图 1 外腔反馈半导体激光器原理图

Fig. 1 Schematic of external cavity feedback semiconductor laser

2) 光纤环激光器

光纤环激光器[6,14]原理图如图 2 所示。这种方式是在激光器外部利用一个幅度、极化、时延可控的光纤环路与激光器输出进行耦合,来产生混沌激光。

图 2 光纤环激光器

Fig. 2 Fiber ring laser

1.2 基于非线性时延动态方程的混沌光源生成

非线性时延动态可用一阶微分方程来进行数学描述:

$$y(t) + \tau_{\mathrm{p}}\cdot\frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t} = \beta\cdot f[y(t-\tau_{\mathrm{R}})] \tag{2}$$

式中,$y(t)$ 为输出信号;β 为放大因子;τ_{p} 为响应时间;τ_{R} 为时延间隔;$f[\cdot]$表示作用于时延动态变量 $y(t-\tau_{\mathrm{R}})$上的非线性函数。

式(2)所描述的动态输出展示出非常复杂的混沌特性(具有任意高维度的吸引子),并且非线性函数的不同表示,使得输出具有不同的混沌特性。基于上述非线性时延动态方程,学者们给出了对应的

混沌光源设计。

1）基于环形腔的混沌光源设计

最早的基于非线性时延动态方程[15]的混沌光源结构如图3所示。图中各个模块与式(2)的一阶微分方程严格对应。实验结果表明，利用该结构能够得到足够高维度(大于80)的混沌输出。图3中，$x(t)$为反馈信号。

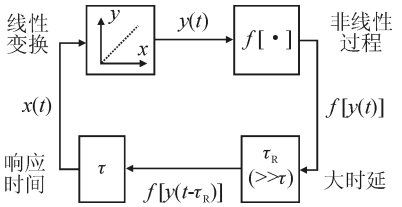


图3 环形腔结构框图

Fig. 3 Block diagram of the ring cavity

2）基于Ikeda结构和光电反馈的混沌光源设计

该类光源设计原理[16]如图4所示，J为初始输入电流。从半导体激光器(LD)输出的光，首先被光电二极管(PD)转换成电流$J_T(t)$，该电流经过时延τ_R和非线性函数$f[\cdot]$后输出为$J_F(t)=f[J_T(t-\tau_R)]$，再与初始电流合并，作为LD的输入。

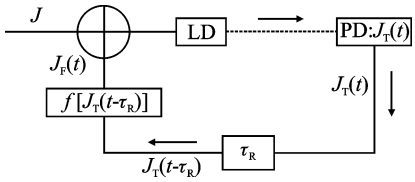


图4 光电反馈混沌激光器原理图

Fig. 4 Schematic of optoelectronic feedback chaotic laser

3）基于Ikeda结构、光电反馈和MZ干涉仪的混沌光源设计

Mach—Zehnder interferometer (MZ)是一个集成的光电干涉仪。将MZ干涉仪和图3所示结构进行结合，是目前应用最广泛的光电反馈混沌激光器[7,10,17]。

4）基于逆时间混沌的混沌光源设计

文献[18]给出一种新的混沌光源实现方法。可调激光源生成的光信号经过极化控制后，与高速二进制信息比特一起注入光电干涉仪MZM进行调制，光电干涉仪工作在线性状态，其输出为周期光载波。再通过混沌匹配滤波器，将周期光载波转换为具有混沌特性的光载波，从而实现混沌光源的生成。本方案的关键是设计一个具有混沌特性的匹配滤波器，得益于高速光滤波器技术的发展，混沌匹配滤波器得以实现。

2 基于同步的混沌光纤传输方案

2.1 混沌光同步

混沌传输的前提是收发端同步，按照发射机和接收机的参数是否完全一致，可以分为完全同步和广义同步。实际中，由于收发端激光器参数不可避免存在一定偏差，因此完全同步几乎不可能，更多的是使用广义同步。广义同步根据接收机是否带有外部反馈，又可分为开环同步和闭环同步。

文献[19]利用基于外腔反馈半导体激光器的通信系统，对混沌光通信系统的闭环同步性能进行了分析。从分析结果可以看出，收发端反馈相位差对闭环系统的同步性能影响很大。文献[20]利用仿真比较了开环和闭环两种系统的同步性能，结果显示，相比于开环系统，闭环系统具有更好的同步性能，并且不易受载波偏差的影响，但缺点是达到同步态的时间太慢(50～200 ns)，开环系统达到同步态的时间为50～350 ps，两者差了1 000倍。文献[21]利用实验对上述两种系统进行了比较，结果表明，在实际系统中，开环的鲁棒性要优于闭环系统，原因是实际中，闭环系统的收发端参数很难完全一致，这给闭环系统同步性能带来较大影响。

综上所述，实际系统中，开环同步的实现相对简单，并且其鲁棒性要优于闭环性能，因此后续的大部分实验系统都采用开环同步。

2.2 混沌光通信系统的信息编解码方法

通信的主要目的是传递信息，因此在建立收发同步的基础上，需要研究利用信息比特对混沌光载波进行编码以及接收端的对应解码方法。目前混沌光通信的信息编解码都采用相干调制解调[22]，具体算法包括：混沌隐藏[23]、混沌调制[7]和混沌键控[24-25]。

1）混沌隐藏

混沌隐藏原理如图5所示，它将输入的信息$s(t)$与光发射机输出的混沌载波$c(t)$进行叠加得到$r(t)$，当信息功率远小于载波功率时，达到信息隐藏的目的。

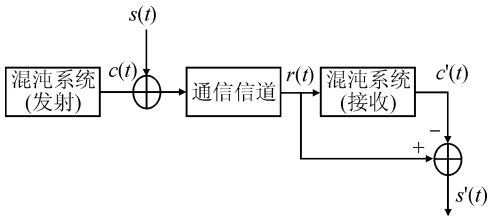


图5 混沌隐藏系统模型

Fig. 5 Chaotic masking system model

上述编码过程结构简单,是混沌光通信中最常见的方式。接收端输出为不包含信息的混沌载波 $c'(t)$,通过与来自光纤的接收信息相减,即可恢复出源信息 $s'(t)$。

2) 混沌调制

混沌调制原理如图6所示。与混沌隐藏不同的是,模拟信息信号 $m(t)$ 被注入到混沌发射机以改变其动态过程,因此,混沌载波中包含了信息。接收端通过探测动态信息的改变,来恢复出 $m'(t)$。

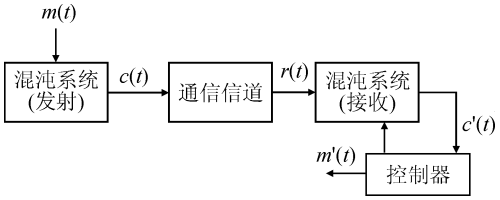


图6 混沌调制系统模型

Fig. 6 Chaotic modulation system model

3) 混沌键控

混沌键控的原理如图7[25]所示。其基本思想是用两个不同的混沌生成器来表示不同的信息比特,同一时刻只有一个混沌生成器被激活。考虑到不同混沌生成器之间的切换延时会大大降低信息速率,光系统中通常是利用输入符号 s_i 来改变激光器的泵浦电流,从而得到不同的混沌输出,来达到混沌键控的目的。图中接收机实现信息的解调和解码,最终恢复出源信息符号的估计 s'_i。

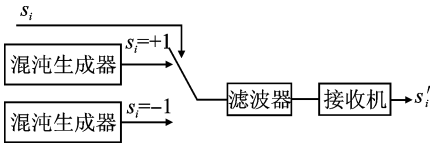


图7 混沌键控系统模型

Fig. 7 Chaos shift keying system model

三种混沌编码方法的具体比较如表1所示。

表1 三种信息编码方法的比较

Tab. 1 Comparison of three methods for information encoding

名称	结构	信息速率	保密性
混沌隐藏	简单	高	低
混沌调制	复杂	中	中
混沌键控	中等	低	高

3 混沌加密方案

混沌用于光纤通信的首要目的是提升通信安全性,主要途径是物理层混沌加密。目前混沌加密方案主要分为模拟加密、数字加密和混合加密三类。模拟加密方法利用混沌作为载波,接收端基于载波同步来提取信息;数字加密方法是利用混沌来生成密钥,对信息的不同层面进行加密,但载波依然是正弦光载波;混合加密是两者的结合。以下分别对这三类加密方案的研究情况进行描述。

3.1 模拟加密

前文介绍的所有基于混沌载波的光通信,都属于模拟加密方法[26-27],因此这里就不再赘述。但模拟加密存在一个不足,即时延签名(Time Delay Signature,TDS)。窃密者利用统计处理方法可以很容易从接收信号中提取TDS,进而获取载波的同步信息,因此如何消除TDS是模拟加密的主要研究内容[10,26]。

3.2 数字加密

该类加密方法并非采用混沌载波,而是利用混沌生成密钥,对信息的不同层面进行加密[28-32]。总结目前的文献内容发现,数字加密一般都与正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)系统相结合。这主要有两方面原因,一是因为OFDM系统的频带利用率高,被现有光纤通信广泛采用;二是OFDM的可调维度较多(子载波、同步码、数字调制符号等),更能发挥混沌密钥的保密性。

文献[28]利用Chen电路来生成3D混沌序列,分别用于OFDM帧的时间同步、载波相位隐藏和控制分数阶傅里叶变换的阶数,这三个维度都可以提升安全性。结果发现,加密后的OFDM传输性能要优于非加密OFDM,这是因为混沌加密降低了OFDM系统的峰均比,并且存在编码增益。另外,可以采用混沌序列对OFDM符号进行交织,降低特定载波上的干扰。

文献[29]在正交幅度调制的同相和正交两路对应符号上分别乘以混沌密钥。传输方式为OFDM,无线载波频率为4.25 GHz,然后将上载波信号再放到传统光载波上进行安全光纤传输。

文献[30]~[32]利用数字混沌序列对数字调制后的星座图、子载波顺序进行重新排列来达到加密的目的。

此类加密方法与传统算法密钥比较接近,区别在于可以生成维度更高的混沌密钥,但数字混沌也存在周期性,仍无法做到绝对安全。最近有学者提出用混合加密方法来克服模拟混沌时延签名和数字混沌周期性的缺点。

3.3 混合加密

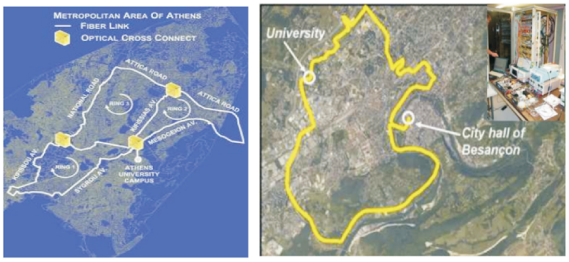
由上文可以看出,模拟加密和数字加密有各自

的优缺点，因此，文献[33]研究提出综合利用两者特性的混合加密方案，数字混沌的周期性被模拟混沌隐藏，模拟混沌的时延签名被数字混沌消除。利用这个思想，进行上下行的保密传输，但上下行加密的思路不同，下行是在光域加密，上行是在电域加密。

综上，基于混沌的模拟加密和数字加密区别在于，前者采用混沌载波，而后者采用正弦载波。从加密层次来讲，模拟加密主要是对通信波形进行加密，而数字加密是对通信信息进行加密。从实现复杂度来讲，模拟加密需要接收端进行混沌同步，因此实现复杂度更高，数字加密类似传统的算法加密，不需要混沌同步，实现复杂度相对较低。

4 商用光纤网络性能测试

从目前所掌握的文献资料来看，已有两个商用光纤网络成功进行了混沌光通信实验，分别是位于希腊雅典的三环光纤网络和法国贝桑松的单环光纤网络，如图 8 所示。



(a) 三环光纤网络(120 km)　　(b) 单环光纤网络(22 km)

图 8　混沌光纤通信测试场景

Fig. 8　Test scenarios of chaotic optical communication

4.1 实验一(2005 年)

2005 年，在图 8(a)所示的三环光纤网络[7]中对基于混沌的高速率光纤通信性能进行测试，比较了光电反馈和全光反馈两种混沌光载波生成方案的性能。在光电反馈方案中，发射端采用光电反馈和混沌调制来生成混沌激光和信息编码，系统带宽为 7 GHz，信息速率为 3 Gbps。在全光反馈方案中，发射端采用光反馈和混沌隐藏来生成混沌激光和信息编码，系统带宽为 5 GHz，信息速率为 1 Gbps。两种方案的接收端都采用混沌同步技术来产生与发射端一致的混沌载波，实现信息的相干解调和解码。通过在图 8(a)所示的网络中进行传输，两种方案的系统误码率都低于 1×10^{-7}。随着信息速率的提升，实测系统误码率性能恶化明显，这主要是因为收发端混沌同步性能下降，影响了系统接收性能。进一步的实验发现，混沌传输对于信道变化和外界扰动更加具有鲁棒性，更加适用于实际网络的高速信息传输。

4.2 实验二(2009 年)

2009 年秋，在图 8 两个商用光纤网络[34]中对相位混沌的性能进行了测试。

在图 8(b)所示网络中，收发端采用相位混沌编解码方法，实现了信息速率 10 Gbps，误码率小于 3×10^{-10} 的传输。该实验证实了光纤色散特性对传输性能影响很大，需要精确调节色散补偿模块和功率放大才能够实现信息的正确恢复。实验进一步评估了链路极化对传输的影响，在实际系统中一定要合理使用极化控制器。此外，没有发现光纤信道其它特性对混沌信号传输的影响。

同年，在图 8(a)所示网络中，收发端采用相位混沌编解码方法，实现了速率 10 Gbps，误码率小于 1×10^{-6} 的传输。网络中包含两个掺铒光纤放大器(EDFA)和两个色散补偿模块，传输中需要保证所有光纤固定，极化状态不能改变。当信息速率为 3 Gbps 时，误码率小于 1×10^{-10}。

比较上述两组实验可以发现，相位混沌(混沌调制)相比于幅度调制能够达到更高的传输速率，但其受光纤信道特性影响(特别是光纤色散)较大，而基于光电反馈和混合调制编码的方法在实际网络中具有更好的鲁棒性。

5 结语与展望

综上所述，经过二十多年的研究，基于同步的混沌光纤通信理论与方法已经相对比较成熟，许多实用化的技术在实际网络中取得了不错的效果。但依然存在两个重要的问题需要解决：一是基于同步的方法对系统的精度和复杂度提出了很高的要求，从已有文献分析可以看出，即使在实验室测试环境中，混沌同步性能受光纤信道及收发端参数不一致的影响已经很大，正是由于这个原因，商用光纤网络中混沌通信的速率要低于实验室测试速率；二是混沌载波具有宽频特性，在相同带宽下的通信速率反而不如传统正弦载波通信方式。

为了更加有效地发挥混沌光纤通信的技术优势，在已有研究基础上，可从两个方面开展未来的研究。

1) 非同步传输方案。目前混沌光纤通信都是基于收发同步，这虽然能够提升安全性能，但从现网测试结果看，载波级的精确同步实际中很难完全实现，使得其实际性能要远远低于实验室测试性能。而非同步的传输不需要收发端同步，接收端利用混沌匹配滤波器或差分混沌键控等方式就能够恢复信

息,避免了上述问题。因此,研究适用于光纤信道的高速率非同步混沌通信系统,是一个重要的研究方向。

2)基带混沌及其信道自适应均衡技术。为了提升混沌光纤通信的频带利用率,使用混沌作为基带波形是一个比较好的解决思路。另外,在长距离传输过程中,光纤信道特性对其中传输的信号波形有较大的影响,如何根据信道特性来自适应调节收发端算法,进一步提升系统的频带利用率,是混沌光纤通信另一个研究方向。

参考文献:

[1] 胡贵军,常玉鑫,韩悦羽,等. 基于少模光纤布拉格光栅的模分复用系统实验研究[J]. 电子学报,2017,45(3):626-631.
HU Guijun, CHANG Yuxin, HAN Yueyu, et al. Experimental research of mode division multiplexing system based on few-mode FBG[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(3): 626-631.

[2] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821-824.

[3] YAO J L, LI C, REN H P. Chaos-based wireless communication resisting multipath effects[J]. Physical Review E, 2017, 96: 032226.

[4] CORRON N J, COOPER R M, BLAKELY J N. Analytically solvable chaotic oscillator based on a first-order filter[J]. Chaos, 2016, 26(2): 023104.

[5] COLET P, ROY R. Digital communication with synchronized chaotic laser[J]. Optics Letters, 1994, 19(24): 2056-2058.

[6] VANWIGGEREN G D, ROY R. Communication with chaotic lasers[J]. Science, 1998, 279: 1198-1200.

[7] ARGYRIS A, SYVRIDIS D, LARGER L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic link[J]. Nature, 2005, 438: 343-346.

[8] LI N Q, SUSANTO H, CEMLYN B, et al. Secure communication systems based on chaos in optically pumped spin-vcsels[J]. Optics Letters, 2017, 42(17): 3494-3497.

[9] LI Q, LU S, BAO Q, et al. Simultaneous trilateral communication based on three mutually coupled chaotic semiconductor lasers with optical feedback[J]. Applied Optics, 2018, 57(2): 251-257.

[10] JIANG X X, CHENG M F, LUO F G, et al. Electro-optic chaotic system based on the reverse-time chaos theory and a nonlinear hybrid feedback loop[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28804-28814.

[11] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.

[12] 王永胜,王云才,郭龑强. 光子集成混沌激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(10):100005.
WANG Yongsheng, WANG Yuncai, GUO Yanqiang. Research progress of the photonic integrated chaotic lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100005.

[13] SYVRIDIS D, ARGYRIS A, BOGRIS A, et al. Integrated devices for optical chaos generation and communication applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(11): 1421-1428.

[14] AMIRI I S, NIKOUKAR A, ALI J. Nonlinear chaotic signals generation and transmission within an optical fiber communication link[J]. IOSR Journal of Applied Physics, 2013, 3(1): 52-57.

[15] IKEDA K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system[J]. Optics Communications, 1979, 30(2): 257-261.

[16] ABARBANEL H D I, KENNEL M B, ILLING L, et al. Synchronization and communication using semiconductor lasers with optoelectronic feedback[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(10): 1301-1311.

[17] LARGER L, GOEDGEBUER J P, UDALTSOV V. Ikeda-based nonlinear delayed dynamics for application to secure optical transmission system using chaos[J]. Comptes Rendus Physique, 2004, 5: 669-681.

[18] JIANG X X, LIU D, CHENG M F, et al. High-frequency reverse-time chaos generation using an optical matched filter[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1157-1160.

[19] PEIL M, HEIL T, FISCHER I, et al. Synchronization of chaotic semiconductor laser systems a vectorial coupling-dependent scenario[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(17): 174101.

[20] VICENTE R, PEREZ T, MIRASSO C R. Open-versus closed-loop performance of synchronized chaotic external-cavity semiconductor laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1197-1204.

[21] LEE M W, PAUL J, SIVAPRAKASAM S, et al. Comparison of closed-loop and open-loop feedback schemes of message decoding using chaotic laser diodes[J]. Optics Letters, 2003, 28(22): 2168-2170.

[22] KADDOUM G. Wireless chaos-based communication

systems: a comprehensive survey [J]. IEEE Access, 2016, 4: 2621-2648.

[23] LIU J M, CHEN H F, TANG S. Synchronized chaotic optical communications at high bit rates [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1184-1196.

[24] PAUL J, SIVAPRAKASAM S, SPENCER P S, et al. GHz bandwidth message transmission using chaotic diode lasers [J]. Electronics Letters, 2002, 38(1): 28-29.

[25] PARLITZ U, CHUA L O, KOCAREV L, et al. Transmission of digital signals by chaotic synchronization [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1992,2(4): 973-977.

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

[27] HEIL T, MULET J, FISCHER I, et al. ON-OFF phase shift keying for chaos-encrypted communication using external-cavity semiconductor lasers [J]. Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1162-1170.

[28] CHENG M F, DENG L, WANG X, et al. Secure OFDM-PON system based on chaos and fractional Fourier transform techniques [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(15): 2629-2635.

[29] ZHANG W, ZHANG C F, JIN W, et al. Chaos coding-based QAM IQ-encryption for improved security in OFDMA-PON [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1964-1967.

[30] ZHANG L J, XIN X J, LIU B, et al. Secure OFDM-PON based on chaos scrambling [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(14): 998-1000.

[31] ZHANG L J, LIU B, XIN X J, et al. A novel 3D constellation-masked method for physical security in hierarchical OFDMA system [J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15627-15633.

[32] LIU B, ZHANG L J, XIN X J, et al. Piecewise chaotic permutation method for physical layer security in OFDM-PON [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(21): 2359-2362.

[33] CHENG M F, DENG L, GAO X J, et al. Security-enhanced OFDM-PON using hybrid chaotic system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(3): 326-329.

[34] LAVROV R, JACQUOT M, LARGER L. Nonlocal nonlinear electro-optic phase dynamics demonstrating 10 Gb/s chaos communications [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(10): 1430-1435.

（责任编辑　周　蓓）