

## 多模光纤反馈半导体激光器产生无时延特征混沌

蔺玉雪<sup>1</sup>, 高慧<sup>1</sup>, 王龙生<sup>1,2\*</sup>, 李腾龙<sup>4</sup>, 赵彤<sup>1</sup>, 常朋发<sup>1</sup>, 王安帮<sup>1,3</sup>, 王云才<sup>3</sup><sup>1</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室, 山西 太原 030024;<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;<sup>3</sup>广东工业大学广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006;<sup>4</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 提出了一种基于多模光纤模间色散的无时延特征混沌产生方案。在多模光纤长度为 4.4 km、芯径为 62.5  $\mu\text{m}$ 、反馈强度为 0.1 的条件下, 实验获得了无时延特征的混沌信号。进一步理论分析了多模光纤的纤芯直径、相对偏移、长度对混沌光模场的影响, 结果显示: 随着纤芯直径和相对偏移的增大, 模式数量逐渐增多, 模场分布变复杂; 随着光纤长度的增加, 模式分离程度(即模间色散)增大。最终探明了多模光纤相对偏移、反馈强度、长度对时延特征的抑制规律。结果表明, 在与实验相同的纤芯直径和反馈强度下, 消除时延特征的多模光纤的临界长度为 1 km。

**关键词** 光纤光学; 半导体激光器; 混沌激光; 时延特征; 多模光纤

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230808

## 1 引言

混沌激光具有大带宽、类噪声、可同步、自相关类  $\delta$  函数等特性, 被广泛应用于保密通信<sup>[1-2]</sup>、物理随机数产生<sup>[3-4]</sup>、混沌雷达测距<sup>[5]</sup>、密钥分发<sup>[6-8]</sup>等领域。光反馈半导体激光器结构简单、易于集成, 且动力学特性复杂, 是产生混沌激光的主要方法之一<sup>[9]</sup>。然而, 光反馈结构下激光器端面与反射镜之间存在外腔谐振, 使混沌信号存在明显的反馈时延特征(TDS)。该特征泄露了混沌光源外腔长度这一关键参数<sup>[10-11]</sup>, 使系统存在被重构的风险<sup>[12]</sup>, 降低了混沌保密通信、混沌密钥分发的安全性。此外, 时延特征的存在也表明混沌信号存在一定程度的相关性(即弱周期性), 限制了物理随机数的随机性以及混沌雷达的抗干扰能力和分辨率。

国内外学者针对混沌信号时延特征的抑制提出了很多有效的方案<sup>[13-14]</sup>。2005年, Lee等<sup>[15]</sup>在实验上利用双腔反馈半导体激光器抑制了时延特征, 发现增加反馈腔的数目有助于增加时延特征分析难度。2007年, Rontani等<sup>[16]</sup>理论证明了调整激光器反馈强度和工作电流可使弛豫振荡周期接近外腔延迟时间, 时延特征得到抑制, 此方案适用于短外腔激光器。2009年, Wu

等<sup>[17]</sup>构建了双光反馈实验系统, 进一步证明了非相干光反馈可有效消除混沌时延特征。2012年, Li等<sup>[18]</sup>通过数值模拟证明了光纤布拉格光栅(FBG)滤波效应可消除时延特征, 并在2015年通过数值模拟和实验分析了其抑制机理, 即FBG的旁瓣群时延模糊了反馈延迟时间<sup>[19]</sup>。2013年, Zhong等<sup>[20]</sup>数值模拟了两个相互耦合的垂直腔面发射激光器(VCSEL)方案, 证明通过调整合适的耦合强度和频率失谐, 两个激光器可同时获得无时延特征的混沌信号。2014年, Hong等<sup>[21]</sup>通过实验对比四种方案, 证明了将光反馈混沌 VCSEL 输出的混沌激光单向注入另一自由运行 VCSEL, 可获得宽带无时延的混沌激光。2015年, Yang等<sup>[22]</sup>在实验上利用三级级联半导体激光器消除了混沌时延特征; 同年, Li等<sup>[23]</sup>实验研究了激光器线宽增强因子对混沌时延特征的影响, 提出高线宽增强因子有助于抑制时延特征。2016年, Zhong等<sup>[24]</sup>实验研究了FBG反馈 VCSEL对混沌时延特征的抑制作用。2017年, Jiang等<sup>[25]</sup>通过构建时间透镜模块对产生的混沌信号进行后处理, 在数值上消除了时延特征。2018年, Li等<sup>[26]</sup>实验证明, 激光器的混沌输出经过长距离单模光纤传输后, 时延特征得到抑制, 并揭示了光纤的自相位调制等非线性效应是其抑制原因。本课题组也对混沌时延抑

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-07; 录用日期: 2023-07-11; 网络首发日期: 2023-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(62035009, 62105233)、山西省“1331工程”重点创新团队、山西省重点研发计划国际合作项目(201903D421012)、中央引导地方科技发展基金(YDZJSX2021A009)、应用光学国家重点实验室开放基金(SKLAO2022001A09)、中物院创新发展基金(C-2023-CX20230030)

通信作者: \*wanglongsheng@tyut.edu.cn

制进行了研究,先后提出法布里-珀罗滤波反馈<sup>[27]</sup>、单模光纤的散射反馈<sup>[28]</sup>、延迟自干涉<sup>[29]</sup>、光外差法、啁啾光纤布拉格光栅色散反馈<sup>[30]</sup>等方案。

2018年,Zhang等<sup>[31]</sup>理论研究了多模光纤模式空分复用的混沌空间符号变换技术,增强了光纤通信系统的物理安全性。本文提出了一种基于多模光纤(MMF)反馈半导体激光器的无时延特征混沌产生方案:利用MMF的模间色散抑制外腔谐振,进而消除时延特征。实验产生了无时延特征混沌,理论探明了MMF对混沌光模场的影响规律及其抑制时延特征的条件,并与单模光纤(SMF)的反馈结果进行了对比。

## 2 实验装置及典型结果

实验装置如图1所示,其中 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5$ 为各模式的延迟时间。半导体激光器(SL)输出光经过MMF反馈回自身,产生混沌激光。利用偏振控制器(PC)和可变光衰减器(VOA)调节反馈光的偏振态和强度,反馈回SL的光功率由功率计(PM)测得。实验装置是在SMF反馈的基础上通过增加MMF得到的。定义激光器自由运行时输出功率为 $P_m$ ,反馈回激光器的光

功率为 $P_f$ ,反馈强度 $K_f = P_f/P_m$ 。

在实验中,激光器的阈值电流 $I_{th} = 7.7$  mA。通过精度为0.01 mA的电流源控制偏置电流。当偏置电流 $I = 15$  mA时,激光器的静态波长稳定在1550.1 nm处,通过精度为0.01 °C的温度控制器控制其静态波长。掺铒光纤放大器在光路中放大光功率,保证反馈和探测的同时进行,该放大器增益可以达到30 dB,同时带来的噪声水平能够维持在4.3 dB以下。MMF采用纤芯/包层直径为62.5  $\mu\text{m}$ /125  $\mu\text{m}$ 的阶跃式光纤,长度为4.4 km。

为定量表征混沌信号时延特征的大小,采用自相关函数表示信号经过延迟时间 $\tau$ 后的相关性<sup>[32-33]</sup>:

$$\rho = \frac{\langle [x(t) - \langle x(t) \rangle][x(t+\tau) - \langle x(t+\tau) \rangle] \rangle}{\sigma_x^2}, \quad (1)$$

式中: $\rho$ 表示自相关系数; $x(t)$ 和 $x(t+\tau)$ 分别表示初始时刻与延迟后的时序; $\langle \cdot \rangle$ 表示取均值; $\sigma_x$ 表示 $x(t)$ 和 $x(t+\tau)$ 的标准差。自相关系数 $\rho$ 的取值范围为0~1,越接近1,两个信号的相关性就越高,同时时延特征值就越大。

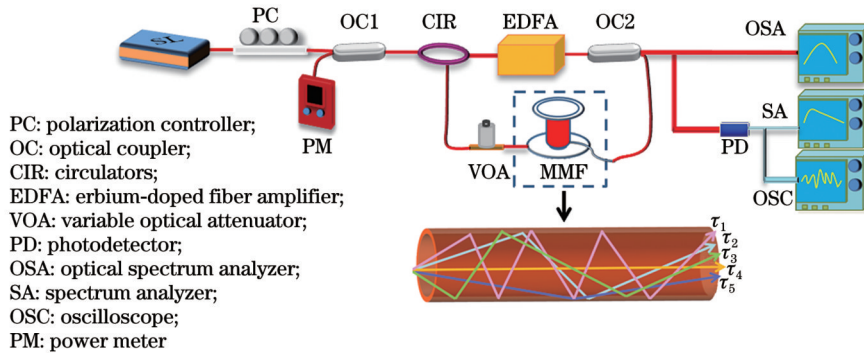


图1 MMF反馈激光器产生无时延特征混沌的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of generating chaos without time-delay signature using MMF feedback laser

如图2所示,首先给出了反馈强度 $K_f = 0.1$ 时SMF和MMF反馈激光器输出的混沌典型结果,包括时序、自相关函数、频谱以及弛豫振荡处的频谱细节。如图2(a)所示,SMF反馈和MMF反馈激光器输出的时序信号均呈无规则随机振荡。对上述时序进行自相关运算,如图2(b)所示,可以发现,SMF反馈激光器在外腔周期 $\tau_0 = 248$  ns处存在明显的时延特征峰。对比之下,MMF反馈激光器在外腔延迟时间 $\tau_m = 22.5$   $\mu\text{s}$ 处无明显时延峰。图2(c)为两种反馈条件下混沌信号的频谱。放大弛豫振荡附近的频谱,如图2(d)所示,可以发现:SMF反馈下的频谱存在周期性调制特征,频率约为4 MHz,等于 $\tau_0^{-1}$ ;MMF反馈下的频谱无周期性调制特征,进一步证明了时延特征的消除。主要原因如下:MMF的模间色散使不同模式光的光程存在差异,反馈回激光器的光信号不再是一致的外腔模式,即消除了外腔谐振,因此时延特征得以消除。此外,对

比图2(c)中的频谱可以发现,MMF反馈激光器的混沌频谱相较于SMF有一定展宽,这主要得益于MMF引入了多个外腔模式。

## 3 数值模拟结果

在实验中难以详尽研究MMF对混沌光场及时延特征的影响规律。因此,我们采用VPIphotonics设计软件<sup>[34]</sup>进行数值仿真。激光器模型选用LaserTLM模块,部分参数如表1所示。激光器阈值电流 $I_{th} = 20$  mA,当工作电流为 $1.8I_{th}$ 时,弛豫振荡频率 $f_{R0} = 4.57$  GHz。在模拟过程中,固定激光器的中心频率为 $V_{s0} = 193.099$  THz(波长为1552.52 nm),通过调整可变光衰减器(VOA)和掺铒光纤放大器(EDFA)来调节反馈强度。数值模拟所用多模光纤的纤芯折射率类型为阶跃式,光纤关键参数如下:纤芯折射率 $n_{core} = 1.492$ ,纤芯-包层相对折射率差 $\Delta = 0.01$ ,群折射率指数 $\eta = 1.48$ 。

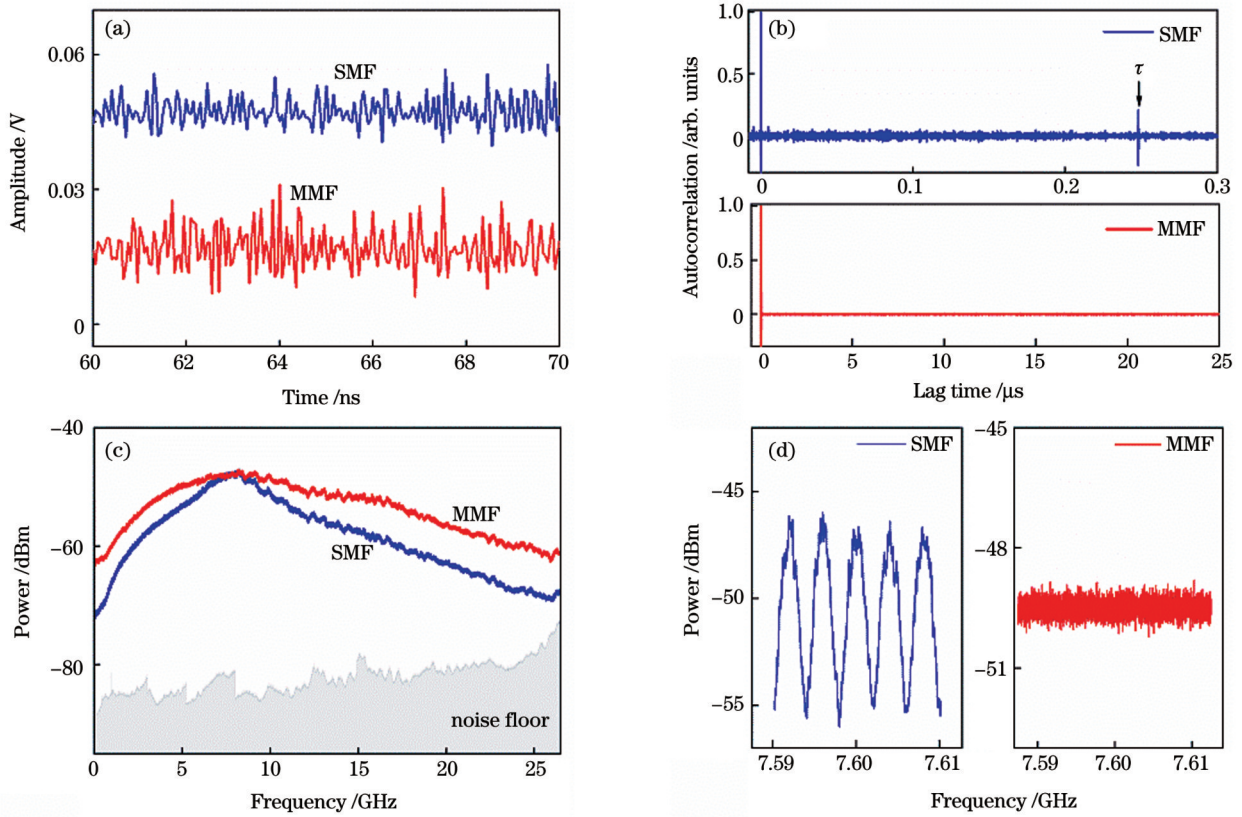


图 2  $K_f=0.1$  时不同光纤反馈混沌信号的典型特性对比。(a) 时序; (b) 自相关; (c) 频谱; (d) 局部频谱

Fig. 2 Comparison of typical characteristics of chaotic signals fed back by different fibers when  $K_f=0.1$ . (a) Time series; (b) autocorrelation; (c) spectrum; (d) local spectrum

表 1 激光器内部参数

Table 1 Internal parameters of laser

Parameter	Symbol	Value
Transparent carrier concentration / $\mu\text{m}^{-3}$	$N_0$	$1.5 \times 10^6$
Linewidth factor	$\alpha$	3.0
Nonlinear gain coefficient / $\mu\text{m}^3$	$G_n$	$1 \times 10^{-5}$
Carrier concentration index / $\mu\text{m}^{-3}$	$N_1$	$0.5 \times 10^6$
Grating period / nm	$T_g$	200
Linear material gain coefficient / $\mu\text{m}^2$	$G_g$	$3 \times 10^{-8}$
Active section length / $\mu\text{m}$	$L$	350
Active section width / $\mu\text{m}$	$W$	2.5
Linear gain coefficient / $\text{m}^2$	$G_l$	$3 \times 10^{-20}$
Group index	$n$	3.7
Interface reflection coefficient	$r$	$1 \times 10^{-12}$

### 3.1 MMF 参数对混沌光模场的影响

MMF 与 SMF 最显著的区别在于光纤的芯径, SMF 芯径通常为  $6 \sim 9 \mu\text{m}$ , 而 MMF 芯径可达  $50 \mu\text{m}$  以上。本文选取商用 SMF (芯径  $D=6 \mu\text{m}$ ) 和 MMF (芯径  $D=50 \mu\text{m}$ ,  $62.5 \mu\text{m}$ ), 研究其在不同参数条件下对混沌信号模式数量及模场分布的影响情况。

图 3 给出了混沌光经不同芯径光纤传输后的模式数量及模场分布。由于 MMF 可传播几百上千个模

式, 按照从低阶到高阶的顺序对众多模式进行标号, 用输出模式 ID 表示。ID 为 0 代表基模  $\text{LP}_{01}$ 。如图 3(a)、(b) 所示, SMF 只传播基模  $\text{LP}_{01}$ , 其光纤截面模场只有单一的亮斑, 能量主要集中在中心。当光纤为  $D=50 \mu\text{m}$  的 MMF 时, 如图 3(c)、(d) 所示, 光纤内的传输模式显著增加, 并且出现了一些较高阶模式, 如  $\text{LP}_{15}$ 、 $\text{LP}_{16}$  模式等, 对应的光纤截面模场的光斑也变大。由于激发了多个导模, 所呈现的光斑为多个模式的能量的叠加, 能量随半径的增大而逐渐变小, 这符合光纤内导模功率的分布规律, 即越靠近纤芯-包层界面, 模式的功率损耗越大。当光纤为  $D=62.5 \mu\text{m}$  的 MMF 时, 如图 3(e)、(f) 所示, 光纤传输的模式数量继续增多, 截面模场向外延伸的区域更大。MMF 能量分布区域基本占满整个纤芯。需注意的是, 图 3(b)、(d)、(f) 的纵坐标表示模式耦合效率, 两种 MMF 的耦合效率明显高于 SMF。以上结果表明, 光纤的纤芯直径越大, 所支持传输的模式越多, 多个模式叠加的混沌光场也就越复杂。

此外, 混沌光相对于芯轴的偏移会影响光纤内模场的空间分布。我们利用两种芯径 MMF 探究上述分布规律。当 MMF 芯径为  $50 \mu\text{m}$  时, 混沌光在不同偏移量 ( $\Delta d$ ) 下入射 MMF, 光纤传输的模式数量及对应的光场分布如图 4 所示。如图 4(a)、(b) 所示, 当  $\Delta d=0$  时, 光纤中激发的模式数量较少, 出现  $\text{LP}_{11}$ 、 $\text{LP}_{12}$  等较

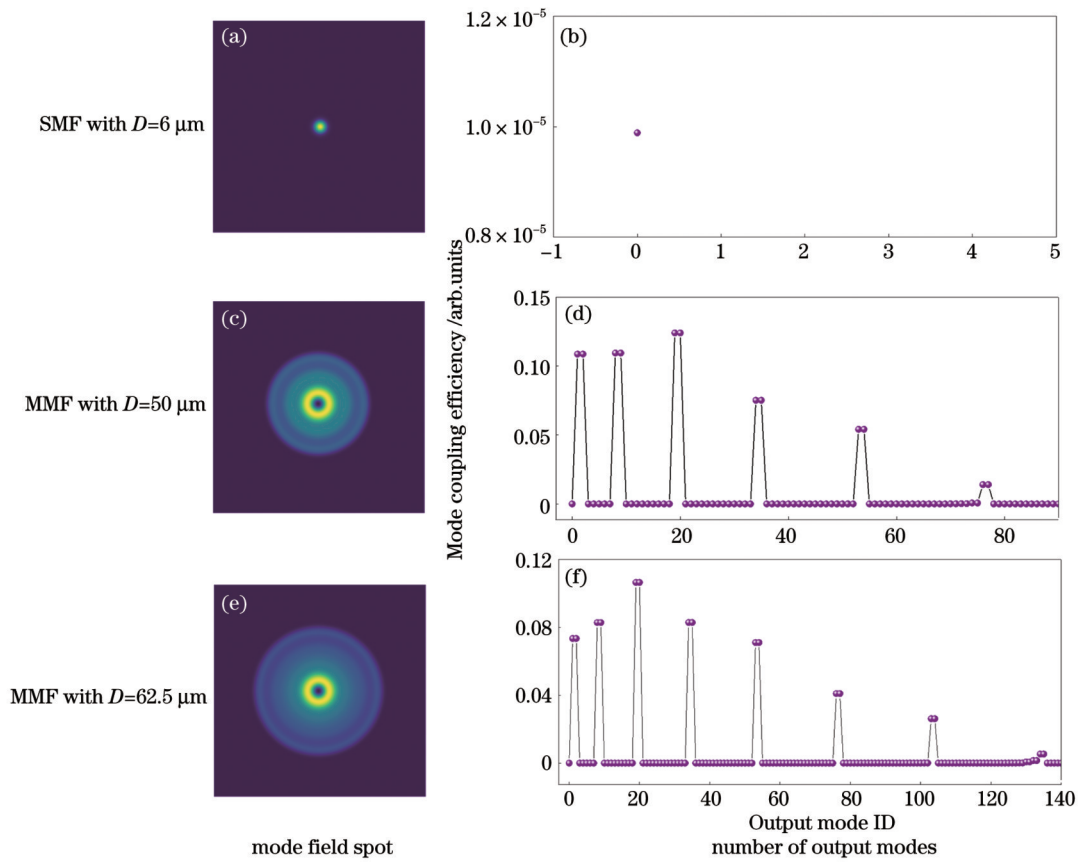


图 3 光纤长度为 1 km 时光纤芯径对模场光斑及模式数量的影响

Fig. 3 Influence of fiber core diameter on mode field spot and number of modes when fiber length is 1 km

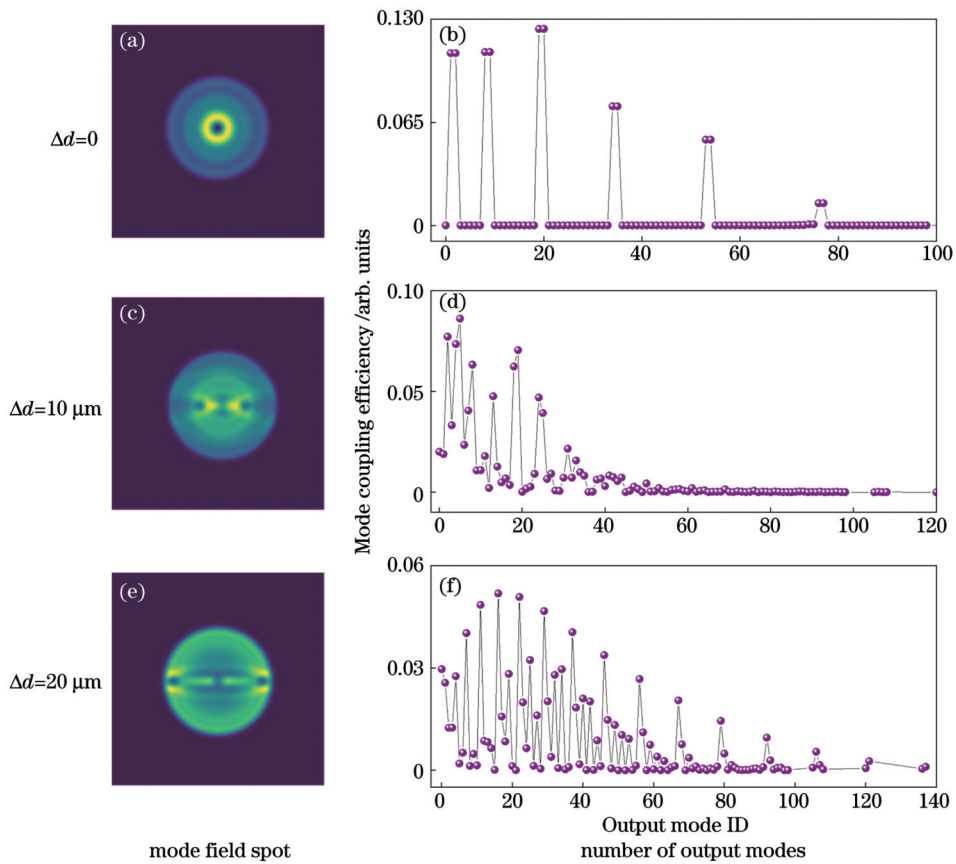


图 4 光纤长度为 1 km 时  $D=50 \mu\text{m}$  的 MMF 的纤芯偏移对模场光斑及模式数量的影响

Fig. 4 Effects of core offset of MMF with  $D=50 \mu\text{m}$  on mode field spot and number of modes when fiber length is 1 km

低阶模式,模场分布简单,呈环状。如图 4(c)、(d)所示,随着  $\Delta d$  增大到  $10\ \mu\text{m}$ ,可以看到,光纤中的模数显著增多,且出现  $\text{LP}_{73}$ 、 $\text{LP}_{54}$ 、 $\text{LP}_{64}$  等较多的高阶模式。当  $\Delta d$  为  $20\ \mu\text{m}$  时,如图 4(e)、(f)所示,光纤中的导模数量进一步增多,其对应的截面光斑更加复杂,纤芯边缘的功率分布也显著增强。这表明混沌光入射 MMF 的位置相较于光纤轴线的偏移量越大,所能激发的导模数量越多,同时出现越多的高阶模式。模式色散与高阶模和基模间的延迟时间差有关,激发出的高阶模群

可带来更大的群延迟,这能更好地抑制外腔模式的谐振,进而更好地抑制混沌时延特征。

当 MMF 芯径为  $62.5\ \mu\text{m}$  时,混沌光在不同偏移量下入射 MMF,光纤传输的模式数量及对应的光场分布如图 5 所示。可以发现,与图 4 类似,随着  $\Delta d$  的增加, $D=62.5\ \mu\text{m}$  的 MMF 激发的导模数量逐渐增多,光纤截面的模场分布复杂化。但二者也存在不同之处,在相同偏移量下, $D=62.5\ \mu\text{m}$  的 MMF 激发的模式数量多于  $D=50\ \mu\text{m}$  的 MMF,且光斑图形更为散乱。

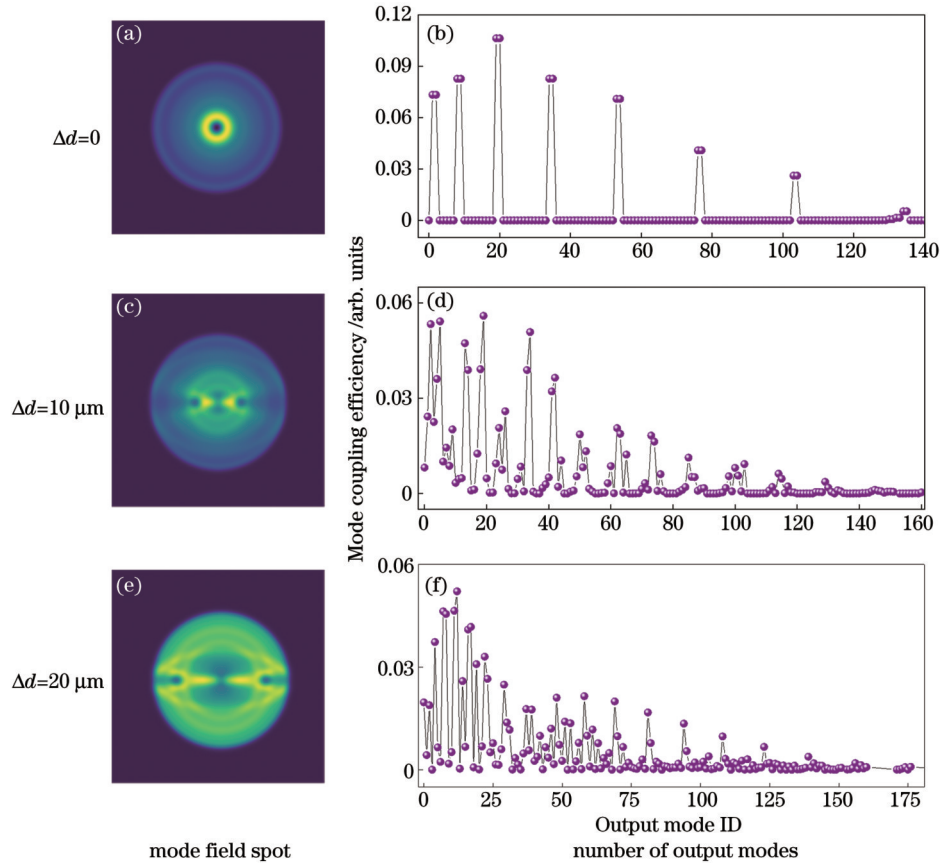


图 5 光纤长度为  $1\ \text{km}$  时  $D=62.5\ \mu\text{m}$  的 MMF 的纤芯偏移对模场光斑及模式数量的影响

Fig. 5 Effects of core offset of MMF with  $D=62.5\ \mu\text{m}$  on mode field spot and number of modes when fiber length is  $1\ \text{km}$

最后,我们研究了 MMF 长度对模式分离程度的影响。如图 6(a)、(b)所示,当 MMF 长度为  $0.1\ \text{m}$  时,各个模式无法分离,此结果类似于 SMF 传输。当长度增加至  $10\ \text{m}$  时,如图 6(c)、(d)所示,各个模式之间出现了一定程度的分离,但这种分离程度对外腔模式谐振的抑制作用较弱。进一步增加长度至  $1\ \text{km}$ ,如图 6(e)、(f)所示,各个模式呈现充分分离的状态,其对外腔模式谐振的抑制作用增强。需要指出的是,同一信号经过芯径相同但长度不同的 MMF 后,模场分布无明显变化,如图 6 中的插图所示。原因如下:光斑是光强度空间分布的呈现,输出光斑的强度分布是多模光纤中传播模式的叠加,光纤的长度并不影响模式数量,因此经一段距离传输后光斑无明显差异。

### 3.2 MMF 对混沌信号时延特征的抑制

基于 3.1 节中 MMF 对混沌光模场的影响分析,我们进一步探索了 MMF 抑制混沌信号时延特征的规律。图 7 为 SMF 与 MMF 反馈混沌激光器的典型信号特征,包括光谱[图(a1)、(b1)、(c1)]、频谱[图(a2)、(b2)、(c2)]、时序[图(a3)、(b3)、(c3)]和自相关曲线[图(a4)、(b4)、(c4)]。此时 MMF 纤芯偏移量  $\Delta d=0$ ,长度  $L=1\ \text{km}$ ,反馈强度  $K_f=0.1$ 。作为对比,普通 SMF 的结果展示在图 7(a1)、(a2)、(a3)、(a4)中。图 7(a2)右上角的插图 of 频谱弛豫振荡处的展开图,其呈周期性振荡,频率约为  $0.2\ \text{GHz}$ 。这与图 7(a4)所示的自相关曲线在  $5\ \text{ns}$  处的峰值一同证明了时延特征的存在。如图 7(b2)、(c2)插图所示,频谱展开图已不存在周期性振荡;同时,如图 7(b4)、(c4)所

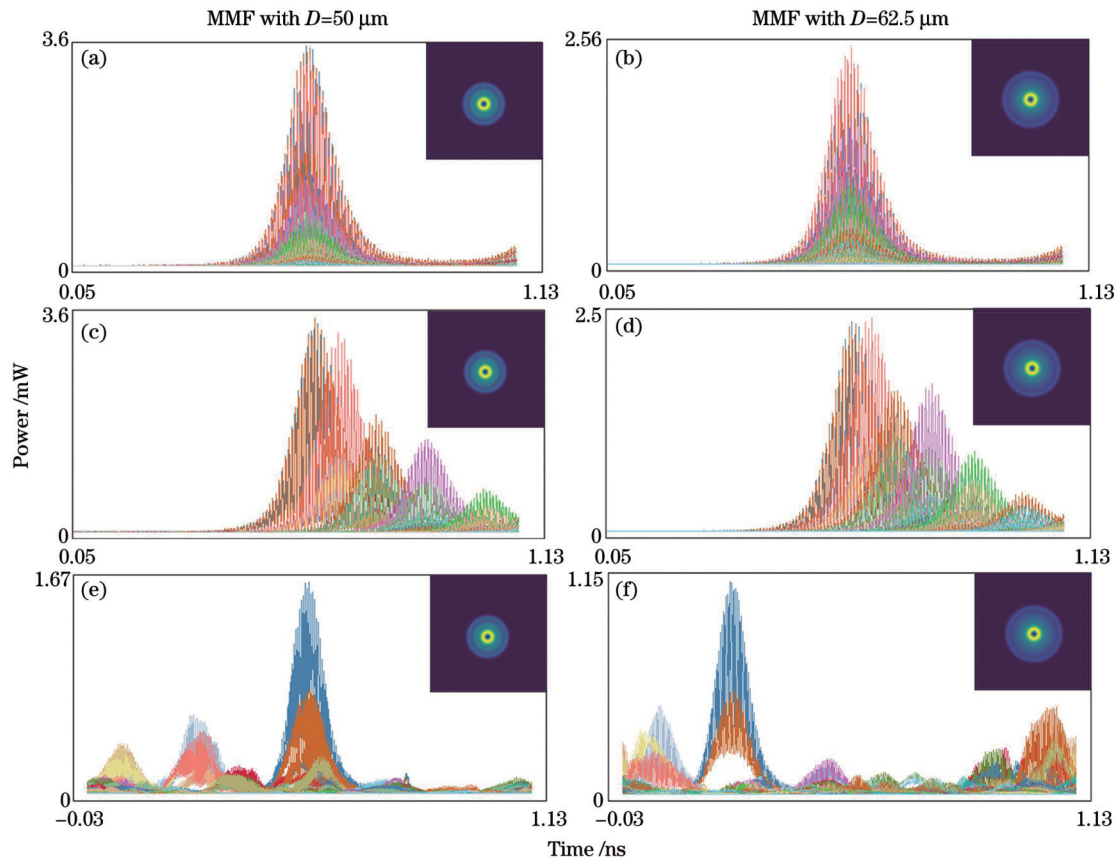


图 6 当  $\Delta d=0$  时 MMF 长度对模式分离程度的影响。(a)(b)  $L=0.1$  m; (c)(d)  $L=10$  m; (e)(f)  $L=1$  km  
 Fig. 6 Effect of MMF length on mode divergence degree when  $\Delta d=0$ . (a)(b)  $L=0.1$  m; (c)(d)  $L=10$  m; (e)(f)  $L=1$  km

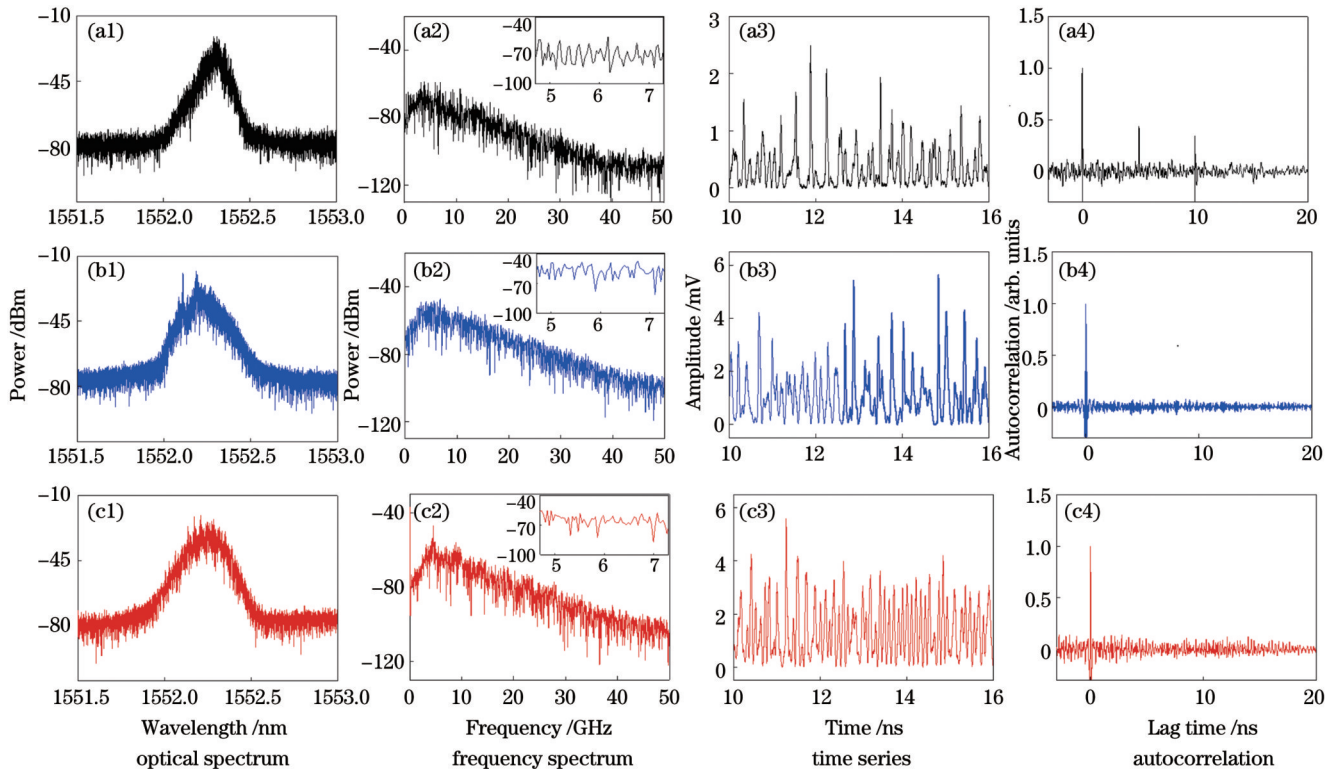


图 7  $K_f=0.1$  时 SMF 与 MMF 反馈混沌激光器的典型信号特征。(a1)~(a4) SMF; (b1)~(b4)  $D=50$   $\mu\text{m}$  的 MMF; (c1)~(c4)  $D=62.5$   $\mu\text{m}$  的 MMF  
 Fig. 7 Typical signal characteristics of chaotic lasers subject to SMF and MMF feedback when  $K_f=0.1$ . (a1)~(a4) SMF; (b1)~(b4) MMF with  $D=50$   $\mu\text{m}$ ; (c1)~(c4) MMF with  $D=62.5$   $\mu\text{m}$

示,自相关曲线也不再存在时延特征峰,证明时延特征得以消除。

首先我们研究了纤芯相对偏移量对时延特征的影响。MMF 的长度分别选取 0.1、1、10、15 km,反馈强度固定为  $K_f=0.1$ 。可以发现,当长度为 0.1 km 时,随着纤芯相对偏移量的增大,两种 MMF 反馈激光器的混沌时延特征曲线呈现下降的趋势,如图 8(a) 所示。 $D=50 \mu\text{m}$  的 MMF 反馈的自相关曲线在  $\Delta d$  为  $9 \mu\text{m}$  时趋于平缓,并在  $\Delta d$  为  $18 \mu\text{m}$  时降至背景噪声以下。 $D=62.5 \mu\text{m}$  的 MMF 反馈的时延特征则在  $\Delta d$  为

$12 \mu\text{m}$  时被消除。当长度增加到 1、10、15 km 时, $D=50 \mu\text{m}$  及  $D=62.5 \mu\text{m}$  的 MMF 反馈的时延特征皆处于背景噪声水平以下,如图 8(b)、(c)、(d) 所示。综上所述,当光纤长度较短时,较大的纤芯偏移量有助于消除时延特征。这是由于长度较短的多模光纤的模间色散小,而增大纤芯的相对偏移量有助于增加模式数量、提高模间色散,进而达到消除时延特征的目的。当光纤长度达到一定的临界值时,其产生的模间色散足以消除时延特征,此时纤芯偏移的影响则相对减弱。

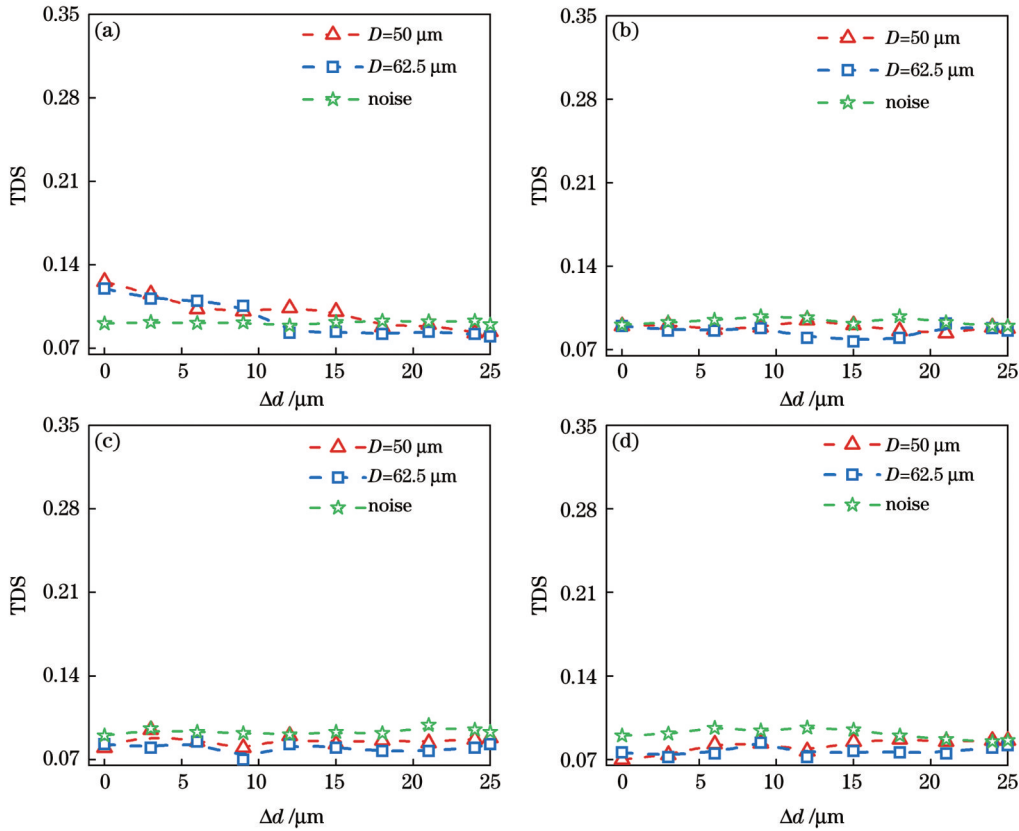


图 8 纤芯相对偏移量对时延特征的影响。(a)  $L=0.1 \text{ km}$ ; (b)  $L=1 \text{ km}$ ; (c)  $L=10 \text{ km}$ ; (d)  $L=15 \text{ km}$

Fig. 8 Influence of relative offset of fiber core on TDS. (a)  $L=0.1 \text{ km}$ ; (b)  $L=1 \text{ km}$ ; (c)  $L=10 \text{ km}$ ; (d)  $L=15 \text{ km}$

图 9 给出了在光纤长度为 0.1、1、10、15 km 的条件下,反馈强度对不同光纤反馈混沌信号的时延特征的影响,此时固定  $\Delta d$  为 0。可以发现,在相同的反馈强度下,SMF 反馈的时延特征值远大于 MMF,且基本都呈现出先减小后增大的变化趋势。此外,MMF 反馈时延特征的演化规律与 SMF 不同:随着  $K_f$  的增大,时延特征值逐渐减小至背景噪声水平,之后不再增大,如图 9(b)、(c)、(d) 所示。这是因为在临界点左侧处反馈强度较弱,时延特征是由激光器的周期或准周期性振荡引起的。在此状态下,随着反馈强度的增大,激光器的周期性动力学特性逐渐减弱,时延特征值减小;而在越过临界点后,激光器进入混沌态,此时时延特征是由外腔谐振造成的。在 SMF 中不存在可以影响外腔谐振的条件,反馈强度增大会造成谐振增强,进而导致

时延特征值继续增大。需要注意的是,在图 9(a) 中,两种 MMF 反馈的时延特征始终存在,不能完全消除,这主要是由于 MMF 的长度不够长,而当 MMF 长度超过 1 km 时即可完全消除时延特征。

进一步研究了光纤长度对混沌信号时延特征的影响。如图 10 所示,在固定反馈强度下,随着光纤长度的增加,SMF 反馈混沌信号的时延特征值基本保持恒定,而 MMF 反馈混沌信号的时延特征值逐渐趋于噪声水平。此外,时延特征消除时的临界长度随  $K_f$  的增大而逐渐减小。例如,在  $K_f$  为 0.05、0.10 的条件下,当 MMF 长度分别为 3 km 和 1 km 时,混沌时延特征得到消除,如图 10(a)、(b) 所示。在  $K_f$  继续增大到 0.25 和 0.39 的条件下,当 MMF 长度为 1 km 时,时延特征很快地降至背景噪声水平,如图 10(c)、(d) 所示。

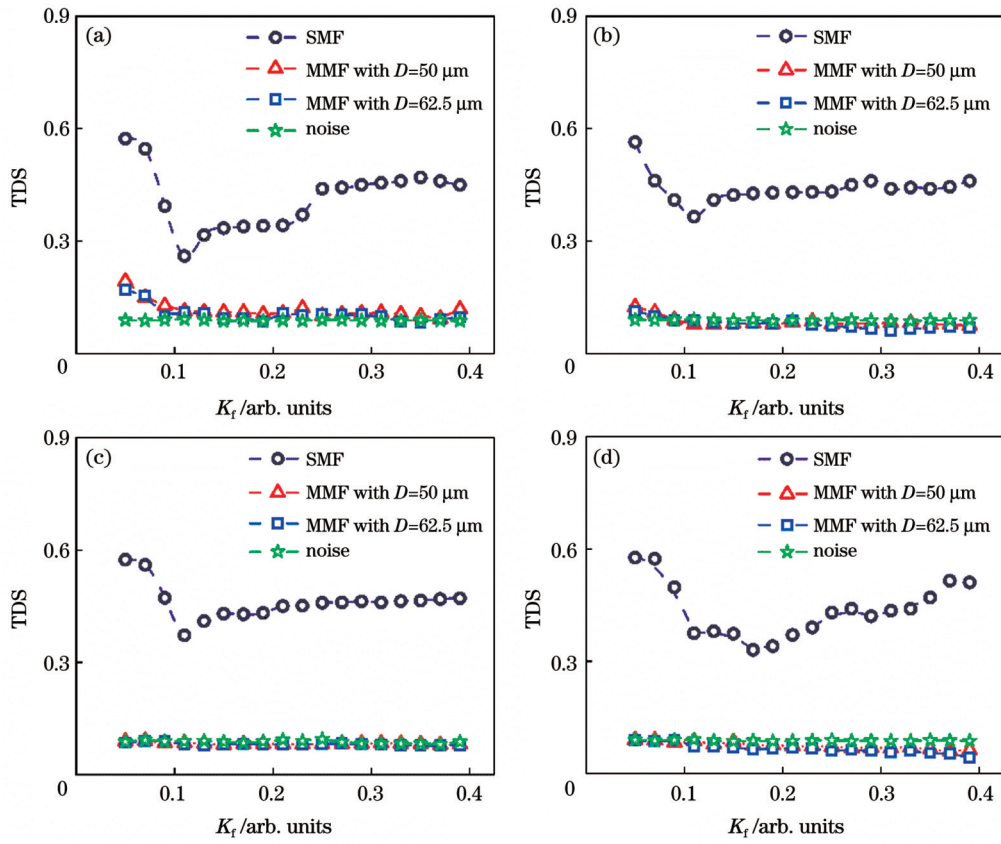


图 9 光纤反馈强度对时延特征的影响。(a)  $L=0.1 \text{ km}$ ; (b)  $L=1 \text{ km}$ ; (c)  $L=10 \text{ km}$ ; (d)  $L=15 \text{ km}$   
 Fig. 9 Influence of fiber feedback strength on TDS. (a)  $L=0.1 \text{ km}$ ; (b)  $L=1 \text{ km}$ ; (c)  $L=10 \text{ km}$ ; (d)  $L=15 \text{ km}$

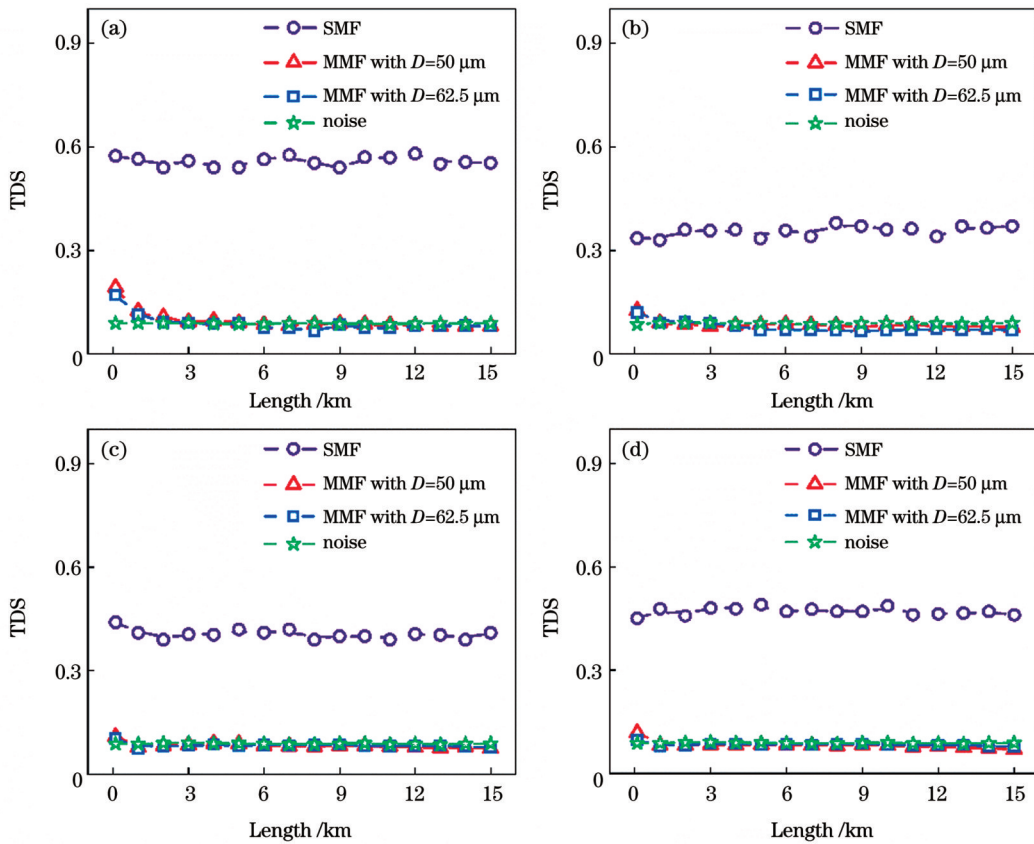


图 10 光纤长度对时延特征的影响。(a)  $K_f=0.05$ ; (b)  $K_f=0.10$ ; (c)  $K_f=0.25$ ; (d)  $K_f=0.39$   
 Fig. 10 Influence of fiber length on TDS. (a)  $K_f=0.05$ ; (b)  $K_f=0.10$ ; (c)  $K_f=0.25$ ; (d)  $K_f=0.39$



## 4 结 论

提出了多模光纤反馈激光器产生无时延特征混沌的方案,在实验上获得了时延特征消除的混沌激光。理论分析了 $D=50\ \mu\text{m}$ 和 $D=62.5\ \mu\text{m}$ 的多模光纤的纤芯直径、相对偏移量及光纤长度对混沌光模场的影响。进一步分析了纤芯偏移、光纤长度和反馈强度对时延特征的抑制规律。最终探明了多模光纤抑制混沌信号时延特征的条件:当纤芯偏移量 $\Delta d=0$ 、光纤长度 $L\geq 1\ \text{km}$ 、反馈强度 $K\geq 0.1$ 时,可产生无时延特征的混沌信号。研究结果为无时延特征的混沌信号在保密通信、密钥分发、物理随机数产生、雷达探测等领域中的应用提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Mirasso C R, Colet P, Garcia-Fernandez P. Synchronization of chaotic semiconductor lasers: application to encoded communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(2): 299-301.
- [3] Uchida A, Amano K, Inoue M, et al. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 728-732.
- [4] 赵安可, 江宁, 王超, 等. 基于生成对抗网络的混沌激光同步优化[J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0114002.  
Zhao A K, Jiang N, Wang C, et al. Chaotic laser synchronization optimization based on generating countermeasure network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0114002.
- [5] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 815-820.
- [6] El-Taher A, Kotlicki O, Harper P, et al. Secure key distribution over a 500 km long link using a Raman ultra-long fiber laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(3): 436-442.
- [7] 杜以成, 张蓉, 王龙生, 等. 共同噪声驱动分布式布拉格反射半导体激光器混沌同步研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(23): 2314003.  
Du Y C, Zhang R, Wang L S, et al. Chaos synchronization of distributed Bragg reflection semiconductor lasers driven by common noise[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(23): 2314003.
- [8] 武超人, 高华, 王龙生, 等. 基于对称相移键控混沌同步的高速密钥安全分发[J]. *中国激光*, 2022, 49(4): 0406001.  
Wu C R, Gao H, Wang L S, et al. High-speed secure key distribution based on symmetric phase-shift-keying chaos synchronization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0406001.
- [9] Zhao Q C, Wang Y C, Wang A B. Eavesdropping in chaotic optical communication using the feedback length of an external-cavity laser as a key[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(18): 3515-3520.
- [10] Zhou C S, Lai C H. Extracting messages masked by chaotic signals of time-delay systems[J]. *Physical Review E*, 1999, 60(1): 320-323.
- [11] 张继兵, 张建忠, 杨毅彪, 等. 外腔半导体激光器随机数熵源的腔长分析[J]. *物理学报*, 2010, 59(11): 7679-7685.  
Zhang J B, Zhang J Z, Yang Y B, et al. Randomness analysis of external cavity semiconductor laser as entropy source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(11): 7679-7685.
- [12] Hegger R, Bünner M J, Kantz H, et al. Identifying and modeling delay feedback systems[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(3): 558-561.
- [13] 郭功名, 郭夔强. 光反馈量子点微柱激光器双模混沌的产生[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 0514003.  
Guo G M, Guo Y Q. Two-mode chaos generation in quantum dot micropillar lasers subject to optical feedback[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0514003.
- [14] 张晓旭, 吴天安, 常凯歌, 等. 单端反馈互耦合垂直腔面发射激光器混沌输出的时延特征和带宽分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501010.  
Zhang X X, Wu T A, Chang K G, et al. Time-delay characteristic and bandwidth analysis of chaotic output from single-ended feedback and mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501010.
- [15] Lee M W, Rees P, Shore K A, et al. Dynamical characterisation of laser diode subject to double optical feedback for chaotic optical communications[J]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2005, 152(2): 97-102.
- [16] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, et al. Loss of time-delay signature in the chaotic output of a semiconductor laser with optical feedback[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(20): 2960-2962.
- [17] 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.
- [18] Li S S, Liu Q, Chan S C. Distributed feedbacks for time-delay signature suppression of chaos generated from a semiconductor laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1930-1935.
- [19] Li S S, Chan S C. Chaotic time-delay signature suppression in a semiconductor laser with frequency-detuned grating feedback[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 541-552.
- [20] Zhong Z Q, Wu Z M, Wu J G, et al. Time-delay signature suppression of polarization-resolved chaos outputs from two mutually coupled VCSELs[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 1500409.
- [21] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A. Wideband chaos with time-delay concealment in vertical-cavity surface-emitting lasers with optical feedback and injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, 50(4): 236-242.
- [22] Yang L, Pan W, Yan L S, et al. Loss of time-delay signature in a ring of three unidirectionally coupled semiconductor lasers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 41403-41407.
- [23] Li N Q, Pan W, Locquet A, et al. Time-delay concealment and complexity enhancement of an external-cavity laser through optical injection[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4416-4419.
- [24] Zhong Z Q, Wu Z M, Xia G Q. Experimental investigation on the time-delay signature of chaotic output from a 1550 nm VCSEL subject to FBG feedback[J]. *Photonics Research*, 2016, 5(1): 6-10.
- [25] 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.
- [26] Li S S, Li X Z, Chan S C. Chaotic time-delay signature suppression with bandwidth broadening by fiber propagation[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4751-4754.
- [27] Wu Y A, Wang B J, Zhang J Z, et al. Suppression of time delay signature in chaotic semiconductor lasers with filtered optical feedback[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 1-7.
- [28] Wang Y C, Wang A B, Zhao T. Generation of the non-periodic and delay-signature-free chaotic light[J]. *IEICE Proceeding Series*, 2014, 1: 126-129.
- [29] Wang A B, Yang Y B, Wang B J, et al. Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8701-8710.
- [30] Wang D M, Wang L S, Zhao T, et al. Time delay signature elimination of chaos in a semiconductor laser by dispersive feedback from a chirped FBG[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10911-10924.
- [31] Zhang K, Zhang J, Gao G J, et al. Physical layer security based on chaotic spatial symbol transforming in fiber-optic systems[J]. *IEEE*

- Photonics Journal, 2018, 10(3): 7202410.
- [32] 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.
- [33] 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): 879-1891.
- [34] VPIphotonics. VPIcomponentMaker photonic circuits user's manual[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.vpi-photonics.com/Tools/PhotonicCircuits>.

## Time-Delay Signature Elimination of Chaos in Semiconductor Lasers with Multimode Fiber Feedback

Lin Yuxue<sup>1</sup>, Gao Hui<sup>1</sup>, Wang Longsheng<sup>1,2\*</sup>, Li Tenglong<sup>4</sup>, Zhao Tong<sup>1</sup>, Chang Pengfa<sup>1</sup>,  
Wang Anbang<sup>1,3</sup>, Wang Yuncai<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

<sup>3</sup>Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

<sup>4</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

### Abstract

**Objective** Chaos laser has important applications in the fields of secure communication, key distribution, physical random number generation, and radar. In these applications, the key is a chaotic source, a common choice for which is a semiconductor laser with optical feedback because it is characterized by simple structure, easy integration, and complex dynamics. However, external-cavity resonance between the laser facet and the reflector in the conventional optical feedback structure gives the chaotic signal an obvious time-delay signature (TDS). This feature leaks the key parameter of the external-cavity length of the chaotic light source, which makes the system at a risk of being reconstructed and reduces the security of chaotic secure communication and key distribution. In addition, a TDS also introduces a weak periodicity to the chaotic signal, which limits the randomness of physical random numbers and the anti-jamming performance and resolution of radar. Therefore, the suppression of the TDS is an important prerequisite for the best use of chaos laser. The main methods of suppressing the TDS are increasing the complexity of the feedback cavity, introducing nonlinear feedback, and post-processing the chaotic signal. In this study, a TDS-free chaos laser generation scheme using inter-modal dispersion of a multimode fiber (MMF) is proposed. This work provides a basis for the application of TDS-free chaos laser in the fields of secure communication, key distribution, physical random number generation, and radar detection.

**Methods** The light output from a semiconductor laser is divided into two paths by an optical coupler. One path is fed back to the laser via the MMF to perturb itself to generate chaos, and the other one is for detection. We utilize a variable optical attenuator and a polarization controller to adjust the strength and polarization state of the feedback light. The feedback strength is defined as the power ratio of the feedback light to the static output of the laser. An erbium-doped fiber amplifier is used to amplify the signal's optical power in the feedback and detection paths. When the bias current and operation temperature are set to 15 mA and 25 °C, respectively, the static wavelength of the laser is stabilized at 1550.1 nm. Numerically, we employ the VPIphotonics design platform to construct the simulation system mentioned above. In the simulation, the bias current of laser is set to 20 mA, giving rise to a central wavelength of 1552.52 nm. Two typical MMFs with core diameters of 50 μm and 62.5 μm are used to analyze the effects of the core diameter ( $D$ ), relative offset, and length of the MMF on the chaotic optical mode field. In addition, the evolution of the TDS as a function of the relative offset, feedback strength, and length of the MMF is explored. Note that, to quantitatively characterize the magnitude of the TDS, the autocorrelation function is used.

**Results and Discussions** First, a TDS-free chaotic signal is obtained experimentally using an MMF with a length of 4.4 km and a core diameter of 62.5 μm while the optical feedback strength is fixed at 0.1 (Fig. 2). Next, we theoretically study the influences of the core diameter (Fig. 3) and relative offset (Figs. 4 and 5) of the MMF on the number of modes and the distribution of chaotic optical mode fields. As the core diameter and relative offset increase, the number of modes gradually increases and the mode field

distributions become more complex. The effect of fiber length on mode separation is also investigated (Fig. 6). Note that the degree of mode separation (that is, the inter-modal dispersion) becomes larger as the fiber length increases. By comparing the typical chaotic characteristics of a laser subject to single-mode fiber and MMF feedback under the same parameter conditions, we find that the approach with MMF feedback can afford the elimination of the TDS, whereas that with single-mode fiber feedback cannot (Fig. 7). Furthermore, the effects of relative offset (Fig. 8), fiber length (Fig. 9), and feedback strength (Fig. 10) on the TDS are given. When the relative offset is 0 and the feedback strength is 0.1, the critical fiber length required to eliminate the TDS can be as short as 1 km.

**Conclusions** In this study, we propose a scheme for TDS-free chaos laser generation using a semiconductor laser with MMF feedback. Chaos laser without the TDS is obtained experimentally. Theoretically, the effects of the core diameter, relative offset, and fiber length of MMFs with  $D=50\ \mu\text{m}$  and  $D=62.5\ \mu\text{m}$  on the chaotic optical mode field are analyzed. Furthermore, we explore the TDS evolution as a function of the relative offset, fiber length, and feedback strength. Finally, the parameter conditions required to suppress the TDS of chaotic signals are ascertained: When the relative offset is 0, the fiber length is greater than or equal to 1 km, and the feedback strength is greater than or equal to 0.1, chaotic signals without a TDS can be generated. This study underlies secure communication, key distribution, physical random number generation, and radar detection using TDS-free laser chaos.

**Key words** fiber optics; semiconductor lasers; chaos laser; time-delay signature; multimode fiber