

# 混沌光在光纤中的布里渊散射光特性

刘 慧<sup>1,2</sup> 张建忠<sup>1,2</sup> 张明江<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西 太原 030024

<sup>2</sup>太原理工大学物理与光电工程学院光电工程研究所, 山西 太原 030024

**摘要** 分析了混沌光注入功率和单模光纤长度对布里渊散射斯托克斯光线宽的影响,发现随着注入混沌光功率的增大,斯托克斯光线宽逐渐减小;当注入的混沌光功率达到一定值时,斯托克斯光线宽几乎不变。分析了注入混沌光功率和单模光纤长度对后向散射功率的影响,发现当注入混沌光功率一定时,后向散射功率随着光纤长度的增加而迅速增大,当光纤长度超过 15.41 km 时,后向散射功率趋于饱和。讨论了混沌受激布里渊散射光阈值的影响因素,结果表明,混沌受激布里渊散射光阈值很高,比传统的连续光注入光纤产生的受激布里渊散射阈值高约 19 dB。

**关键词** 光纤光学; 混沌; 布里渊散射; 斯托克斯线宽; 光纤长度; 受激布里渊散射阈值

中图分类号 O437 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0406004

## Brillouin Scattering Light Characteristics of Chaotic Laser in Optical Fibers

Liu Hui<sup>1,2</sup> Zhang Jianzhong<sup>1,2</sup> Zhang Mingjiang<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics & Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** The effect of the chaotic laser power and the single mode fiber length on the linewidth of Brillouin backscattering Stokes light is analyzed. It is found that along with the growing of input chaotic laser power, the Stokes linewidth decreases gradually and then nearly remains unchanged when the input chaotic laser power reaches a certain value. The effect of the input power and fiber length on the backscattering light power is analyzed. It is found that under the same input chaotic laser power, the backscattering light power grows rapidly with the increase of the fiber length and then tends to be saturated when the fiber length is beyond approximately 15.41 km. The influence factors of the chaotic stimulated Brillouin backscattering light threshold are also studied. The experimental results show that the chaotic stimulated Brillouin backscattering light has a high threshold, which is approximately 19 dB higher than that of the conventional continuous-wave laser.

**Key words** fiber optics; chaos; Brillouin scattering; Stokes linewidth; fiber length; stimulated Brillouin scattering threshold

**OCIS codes** 060.2370; 060.5565; 140.1540; 290.5830; 290.3700; 290.5900

收稿日期: 2015-09-21; 收到修改稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61377089, 61227016, 61527819, 61205142)、国家国际科技合作专项(2014DFA50870)、山西省自然科学基金(2015011049)

作者简介: 刘 慧(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事基于布里渊散射的分布式光纤传感方面的研究。

E-mail: lh9126@126.com

导师简介: 张明江(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事混沌激光的产生及其在光纤传感和微波光子雷达中的应用等方面的研究。E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn(通信联系人)

## 1 引 言

分布式光纤传感技术发展迅速,其最显著的一个特点就是可以准确测量光纤沿线上任意一点的温度、应变、振动和损伤等,这对大型民用建筑如桥梁、道路、隧道、大坝、管道和电缆等结构的健康监测具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。迄今为止,基于布里渊散射的分布式光纤传感技术主要分为时域技术<sup>[3-7]</sup>和相关域技术<sup>[8]</sup>。布里渊时域系统测量范围大,可达几十千米<sup>[9]</sup>,但其较低的空间分辨率(大于1 m)和较长的测量时间(约几分钟)使其在一些结构健康监测中应用受限<sup>[10-11]</sup>。布里渊相关域系统有较高的空间分辨率,但受相关峰性能的影响,其测量范围局限于几百米。

目前,基于布里渊散射的分布式光纤传感系统,根据信号的相干特性,光源信号可分为相干态信号和非相干态信号。相干态信号主要由正弦信号调制激光器的注入电流产生,其测量范围和调制频率成反比。空间分辨率和布里渊增益线宽成正比,和光源的调制频率及调制幅度成反比<sup>[12]</sup>。非相干态的信号主要包括自发辐射噪声光和混沌光,具有随机态的相关布里渊谱,已被应用于分布式光纤传感技术。Zadok课题组利用掺铒光纤放大器滤波后得到的自发辐射噪声产生的宽带布里渊抽运光和信号光,在5 m的传感范围内得到了4 mm的空间分辨率<sup>[13]</sup>。本课题组设计了一种基于宽带混沌激光的具有随机态相关布里渊谱的非相干布里渊光时域反射仪,在155 m的传感范围内得到了0.96 m的空间分辨率<sup>[14]</sup>。对于非相干态信号的分布式光纤传感系统,其空间分辨率由光源的相干长度决定,和光源的线宽成反比。因此,光源的光谱线宽越宽,其相干长度越短,系统的空间分辨率就越高。虽然高分辨率分布式光纤传感已经实现,但非相干态信号的光在光纤中的布里渊散射特性并没有被详细研究,分析其特性对提高系统的空间分辨率和增加传感距离具有重要的指导意义。因此,研究光纤中基于非相干态信号的布里渊散射光的特性,对于进一步改善传感系统的性能,具有重要的应用价值。

本文以混沌光为例,系统研究了基于非相干态信号的分布式布里渊光纤传感的影响因素,详细分析了在不同混沌注入光功率和光纤长度条件下,布里渊散射斯托克斯光线宽、后向散射光功率和混沌受激布里渊散射光阈值的变化趋势。

## 2 实验装置

图1为研究混沌布里渊散射光特性的实验装置。单反馈光对无内置隔离器(ISO)的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)进行扰动后产生混沌光,如图1虚线框所示。DFB-LD输出光后注入到光纤环形器1(OC1),通过可调光衰减器(VA)和偏振控制器(PC)控制反馈光的强度,选取一个合适的反馈光注入DFB-LD以实现混沌光的输出。产生的混沌光经由3 dB光纤耦合器输出。ISO用来避免不必要的光进入反馈环而影响混沌光的产生。输出的混沌光经过一个20/80的光纤耦合器,20%一路用来实时监测混沌光的输出状态,80%一路作为抽运光注入待测光纤。混沌光在光纤中传输时,其偏振态极易发生改变,因此实验中使用了扰偏器(PS,

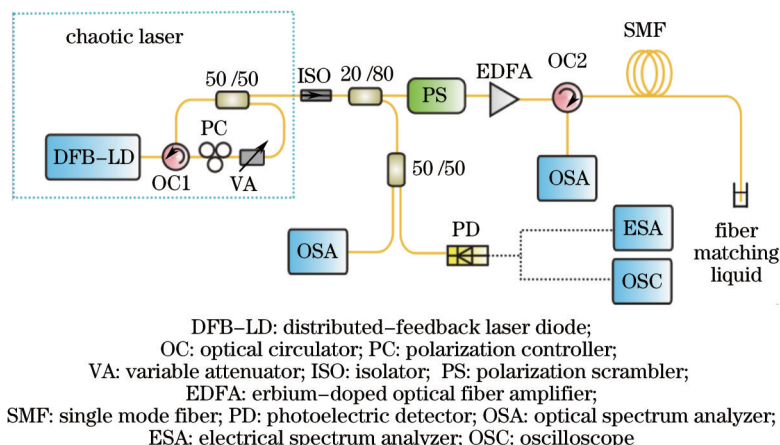


图1 混沌布里渊散射光特性实验装置

Fig.1 Experimental setup of chaotic Brillouin backscattering light system

PCD-104)。注入单模光纤(SMF,G.655)的混沌光功率大小由掺铒光纤放大器(EDFA, KEOPSYS CEFA-C-PB-HP-33)控制。光纤折射率匹配液用来吸收光纤末端强的菲涅耳反射。5 MHz分辨率的光谱分析仪(OSA, APEX AP2041B)用来测量和分析混沌光和布里渊散射光的光谱。26.5 GHz带宽的频谱仪(ESA, Agilent N9010A)和36 GHz带宽、80 GS/s采样率的示波器(OSC, LeCroy LabMaster 10Zi)分别用来分析混沌光的功率谱和时序。

### 3 实验结果

实验中DFB-LD的偏压控制在33 mA(1.5倍阈值电流),中心波长为1550 nm,光反馈强度约为-10 dB。在此条件下,混沌光的输出功率为0.79 dBm。混沌光的特性如图2所示。通过调节可调光衰减器和偏振控制器,可得到相干长度不同、频谱带宽和中心频率可控的混沌态。通过测试,比较不同反馈强度下混沌光的谱宽大小,选取谱宽相对较窄、较宽的两种混沌态。图2(a1)、(a2)为5 MHz高分辨率光谱仪测得的光谱,可知混沌光的-3 dB线宽分别为1.7 GHz和3.2 GHz,该结果和利用延迟外差法<sup>[15]</sup>测得的光谱的-3 dB线宽一致。混沌光的-10 dB线宽分别为3.9 GHz和14.38 GHz,-20 dB线宽分别为15.9 GHz和26.77 GHz。图2(b1)、(b2)为混沌光的频谱,几乎覆盖了0~18 GHz的频率范围,其带宽分别为3.9 GHz和7.5 GHz。图2(c1)、(c2)为混沌

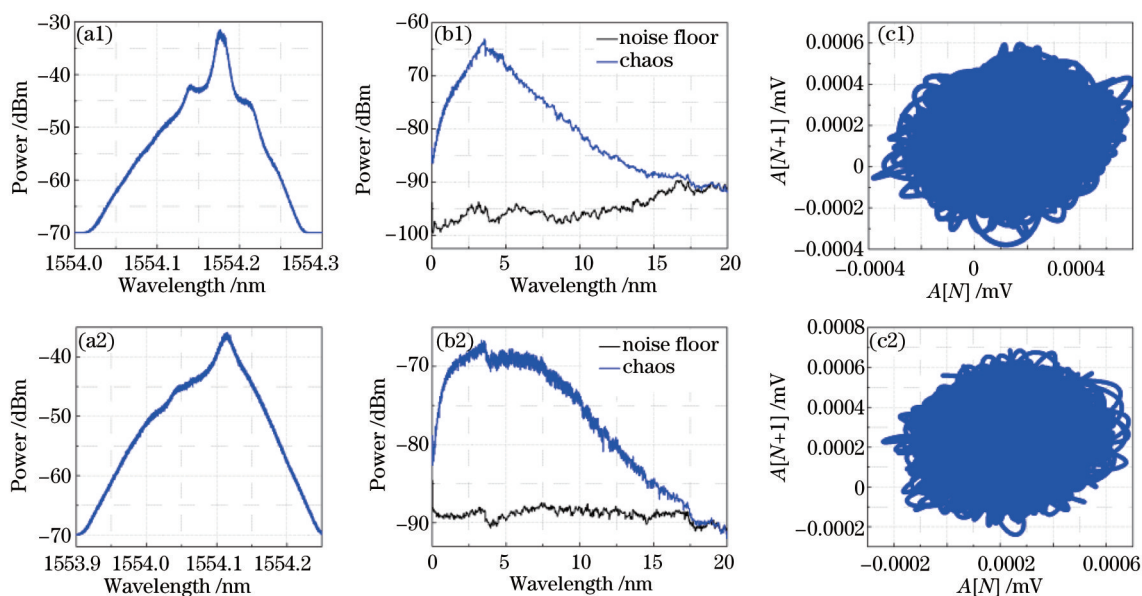


图2 混沌光的特性。(a1) 1.7 GHz线宽的光谱;(b1) 1.7 GHz线宽的频谱;(c1) 1.7 GHz线宽的相图;(a2) 3.2 GHz线宽的光谱;(b2) 3.2 GHz线宽的频谱;(c2) 3.2 GHz线宽的相图

Fig.2 Properties of the chaotic laser. (a1) Optical spectrum with 1.7 GHz linewidth; (b1) radio frequency spectrum with 1.7 GHz linewidth; (c1) phase portrait with 1.7 GHz linewidth; (a2) optical spectrum with 3.2 GHz linewidth; (b2) radio frequency spectrum with 3.2 GHz linewidth; (c2) phase portrait with 3.2 GHz linewidth

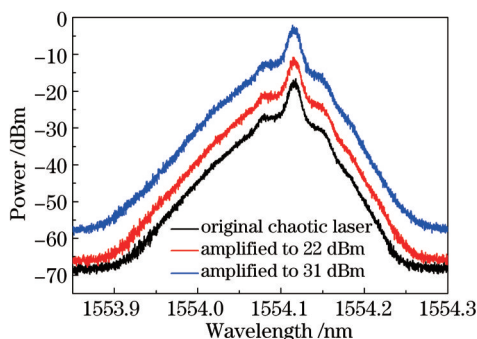


图3 原始混沌光谱和EDFA放大后的混沌光谱

Fig.3 Original chaotic spectrum and EDFA amplified chaotic laser spectra

光的相图,表明混沌光存在无规则振荡。

混沌光由EDFA放大后注入不同长度的单模光纤时,可得到不同的布里渊散射谱。基于布里渊散射的分布式光纤传感系统,光源的线宽直接决定了系统的空间分辨率。因此,确保混沌光经EDFA放大后其特性不发生改变,这一点极其重要。如图3所示,实验监测了由EDFA放大到不同倍数的混沌光谱。黑线代表线宽为1.7 GHz的原始混沌光谱,其他均为由EDFA分别放大到22 dBm和31 dBm的混沌光谱。从图中可以看出,不同放大倍数的混沌光谱均表现为整体放大。经5 MHz的高分辨率光谱仪测量,放大后的混沌光谱的线宽和中心波长均与原始混沌光谱相同,且3.2 GHz线宽的混沌光经EDFA放大后性质也没有发生改变。

### 3.1 布里渊散射斯托克斯光线宽

如图4所示,实验研究了不同混沌光功率注入5.05 km光纤中的布里渊散射光谱。黑线为1.7 GHz线宽的混沌抽运光,其余曲线为不同混沌光功率注入光纤时得到的布里渊散射光谱。布里渊频移为10.27 GHz。当混沌注入光功率较低时,布里渊反斯托克斯光很弱,甚至很难辨认。随着混沌注入光功率的增大,布里渊散射光强迅速增大,尤其是斯托克斯光,甚至超过了瑞利散射光。

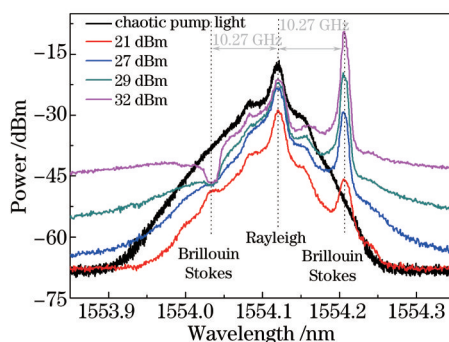


图4 原始混沌抽运光谱和不同功率混沌光注入5.05 km单模光纤中的布里渊后向散射光谱

Fig.4 Original chaotic pump light spectrum and Brillouin backscattering spectra with different input powers injected into 5.05 km single mode fiber

经过数据处理,得到布里渊散射斯托克斯光线宽和混沌注入光功率的关系如图5(a)中红线所示。随着混沌注入光功率的增大,布里渊散射斯托克斯光线宽几乎不变;继续增大混沌注入光功率,斯托克斯光的线宽逐渐减小;当混沌光功率达到一定值时,继续增大注入光功率,布里渊散射斯托克斯光线宽趋于不变。其原因可从能量保持的角度解释:在自发布里渊散射阶段,斯托克斯光的线宽随着混沌注入光功率的增大变化很小;随着混沌注入光功率的增大,发生受激布里渊散射,混沌抽运光几乎都转变为斯托克斯光,此时斯托克斯光的能量越来越集中,因此线宽逐渐减小;当混沌注入光功率远大于受激布里渊散射光阈值时,斯托克斯光功率趋于饱和,其能量几乎不变,因此其线宽也趋于不变。实验还研究了3.18、10.35、15.41、21.64、24.82 km不同光纤长度下,混沌光注入功率对布里渊斯托克斯光线宽的影响,并且得到了同样的变化关系。鉴于变化趋势类似,仅选取3种不同长度的光纤,如图5所示。然而,由于混沌光的宽带宽,若要得到较强的布里渊散射光则需要较大的混沌注入光功率,如果注入的混沌光功率相对较低,得到的布里渊散射斯托克斯光很弱,不能测得其-3 dB线宽,短光纤更是如此。因此,对于3.2 GHz线宽的混沌光,当注入的混沌光功率低于23 dBm时,图中没有对应的测量点。

经过分析,同样也得到了布里渊散射斯托克斯光线宽和不同光纤长度的关系,如图6所示。当注入的混沌光功率相同时,布里渊散射斯托克斯光线宽随着光纤长度的增加而变小;当光纤长度超过10.35 km时,布里渊散射斯托克斯光线宽趋于不变。其原因如下:光纤越长,布里渊散射斯托克斯光功率越大,能量越集中,致使其线宽变小;继续增加光纤长度使其超过有效光纤作用长度时,布里渊散射斯托克斯光功率趋于饱和,其线宽也趋于不变。由图5(a)、(b)和图6(a)、(b)对比可得,光纤长度和混沌注入光功率相同时,线宽为1.7 GHz的混沌光得到的布里渊散射斯托克斯光线宽比线宽为3.2 GHz的混沌光更窄,表明布里渊散射斯托克斯光线宽的变化和光源线宽的变化一致。这是因为信号光的增益谱  $g(v)$  等于受激布里渊散射本征增益谱  $g_B(v)$  与抽运功率谱  $I_p(v)$  的卷积,  $g(v) = g_B(v) \otimes I_p(v)$ <sup>[10]</sup>。当抽运功率谱的带宽远大于受激布里渊散射本征增益

谱带宽时,  $g(v)$  的带宽近似等于  $I_p(v)$  的带宽。因此,加宽抽运光源带宽可实现受激布里渊散射增益谱带宽的展宽。

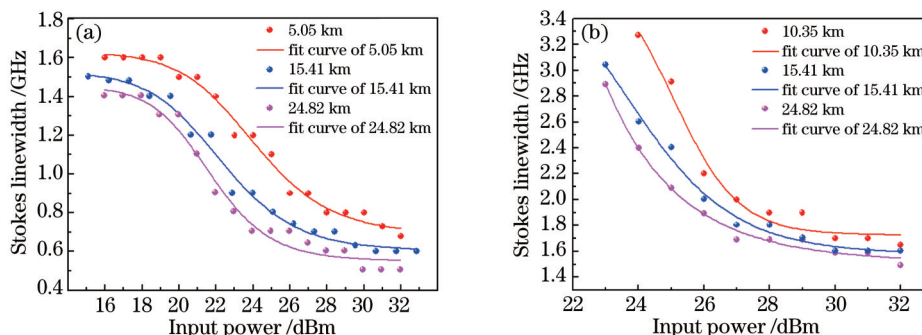


图5 不同光纤长度下布里渊斯托克斯光线宽和注入光功率的关系。(a) 1.7 GHz线宽的混沌光; (b) 3.2 GHz线宽的混沌光  
Fig.5 Brillouin Stokes light linewidth versus input power under different fiber lengths. (a) Chaotic laser with 1.7 GHz linewidth; (b) chaotic laser with 3.2 GHz linewidth

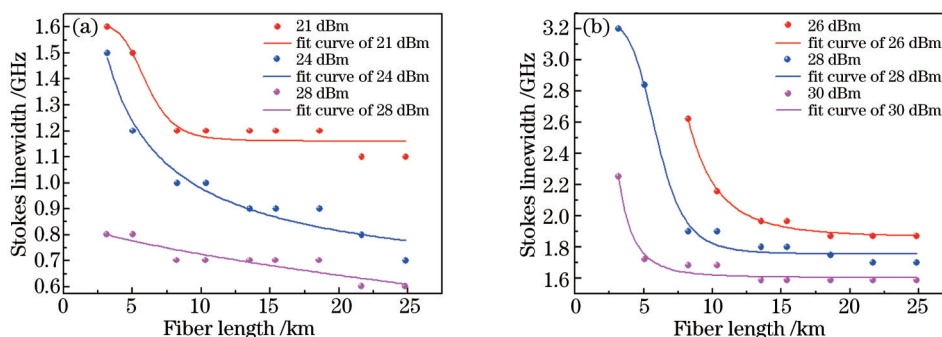


图6 不同注入光功率下布里渊斯托克斯光线宽和光纤长度的关系。(a) 1.7 GHz线宽的混沌光; (b) 3.2 GHz线宽的混沌光  
Fig.6 Brillouin Stokes light linewidth versus fiber length under different injected light powers. (a) Chaotic laser with 1.7 GHz linewidth; (b) chaotic laser with 3.2 GHz linewidth

为了确保传感系统的空间分辨率,注入的光功率不能过大,否则会导致布里渊散射斯托克斯光线宽变小。但是,注入的光功率过小会导致系统信噪比降低,因此,根据图5可以选择一个合适的注入光功率。当注入光功率一定时,光纤长度越短,布里渊散射斯托克斯光线宽越大,空间分辨率越高。但传感系统需要较长的传感距离,当传感光纤较长时,即使注入光功率较低,仍可获得较强的布里渊散射光功率。因此,根据布里渊散射斯托克斯光线宽与注入光功率和光纤长度的关系,可较为方便地选择一个合适的注入光功率和光纤长度。

### 3.2 后向散射光功率

图7为不同光纤长度下,后向散射光功率和注入光功率的关系。从图7(a)可以看出,后向散射光功率随着注入光功率的增大而逐渐增大;当注入光功率达到一定值(受激布里渊散射阈值)时,后向散射光功率开始急剧增大。这是由于受激布里渊散射效应会导致更多的功率补充到后向散射波中。不同长度光纤对应拐点处的注入光功率值不同。对于3.2 GHz线宽的混沌光,后向散射光功率随着注入光功率的增大一直增大,如图7(b)所示。若要得到和图7(a)相同的变化趋势,宽带宽的混沌光需要更高的注入光功率,受限于EDFA的最大输出光功率(33 dBm),其后向散射光功率不能继续增大,因此在图7(b)中没有后向散射光功率急剧增大的拐点值。

不同注入光功率下,后向散射光功率和光纤长度的关系如图8所示。注入光纤的混沌光功率一定时,后向散射光功率随着光纤长度的增加而增大;当光纤长度超过15.41 km时,后向散射光功率趋于饱和。在混沌布里渊散射的光纤传感中,期望得到较强的携带温度和应变信息的布里渊散射光信号,从而解调出光纤上任何一点参量的变化。因此,当传感光纤的长度超过某一长度时,不能仅依靠增加光纤长度来提高布里渊散射光功率。

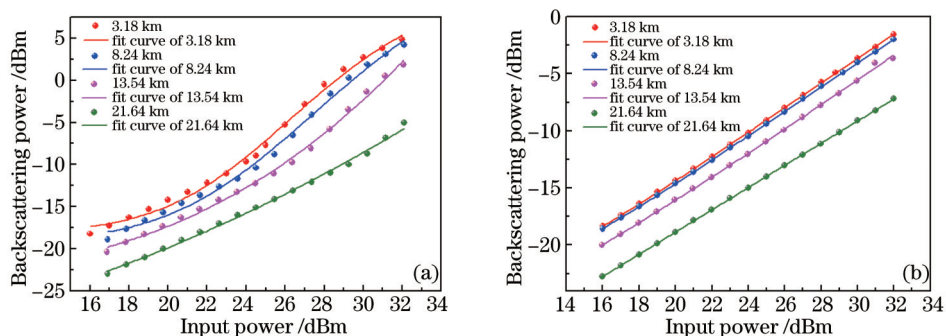


图 7 不同光纤长度下后向散射光功率和注入光功率的关系。(a) 1.7 GHz 线宽的混沌光; (b) 3.2 GHz 线宽的混沌光  
Fig.7 Backscattering light power versus input light power under different fiber lengths. (a) Chaotic laser with 1.7 GHz linewidth; (b) chaotic laser with 3.2 GHz linewidth

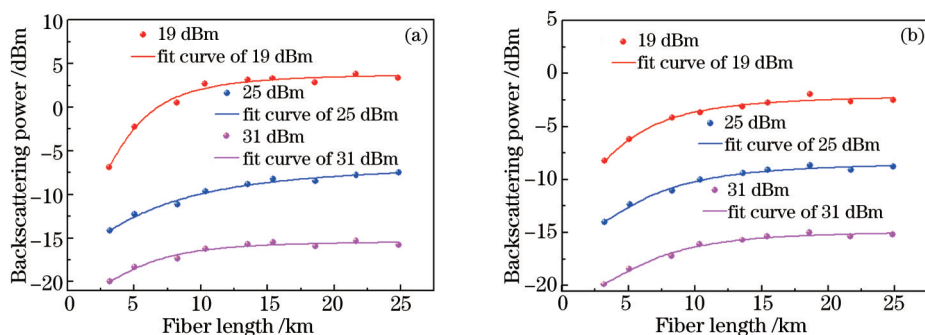


图 8 不同注入光功率下后向散射光功率和光纤长度的关系。(a) 1.7 GHz 线宽的混沌光; (b) 3.2 GHz 线宽的混沌光  
Fig.8 Backscattering light power versus fiber length under different injected light powers. (a) Chaotic laser with 1.7 GHz linewidth; (b) chaotic laser with 3.2 GHz linewidth

### 3.3 受激布里渊散射光阈值

关于受激布里渊散射光阈值的定义有很多种<sup>[17-21]</sup>,本文选择一种最常见的定义:受激布里渊散射阈值为布里渊后向散射光功率是注入光功率的  $\mu$  倍时的注入光功率<sup>[22]</sup>,其中  $\mu = 0.001$ 。受激布里渊散射阈值可近似表示为<sup>[23]</sup>

$$P_{th} \approx 21 \frac{A_{eff} b}{g_B L_{eff}} \left( 1 + \frac{\Delta v_{source}}{\Delta v_B} \right), \quad (1)$$

式中  $P_{th}$  为布里渊散射阈值,  $A_{eff}$  为光纤有效面积,修正因子  $b$  介于 1~2 之间,取决于抽运波与斯托克斯波的相对偏振方向,  $\Delta v_{source}$  为光源线宽,  $L_{eff}$  为光纤有效作用长度,  $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ , 其中  $L$  为光纤长度,  $\alpha$  为光纤衰减系数,  $g_B$  为布里渊增益系数,其值接近于  $4 \times 10^{-11}$  m/W 且与波长无关。由(1)式可知,受激布里渊散射阈值功率会随着光源线宽的变宽而上升。

图 9 为布里渊散射光阈值和光纤长度的关系。受激布里渊散射光阈值随光纤长度的增加而减小。当混

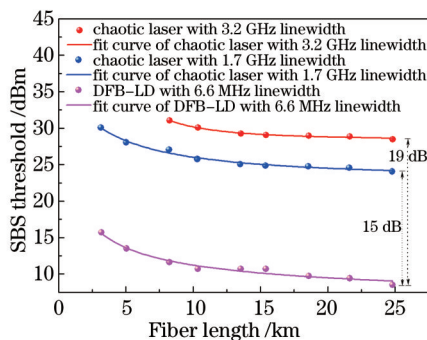


图 9 受激布里渊散射光阈值和光纤长度的关系

Fig.9 Relationship between stimulated Brillouin scattering light threshold and fiber length

混沌光注入相同长度的光纤中时,宽带混沌光的受激布里渊散射光阈值要比窄带混沌光的高。因此,受限于实验中EDFA的最大输出光功率,对于3.2 GHz线宽的混沌光,3.18 km和5.05 km长度的光纤无法达到受激布里渊散射光阈值功率,所以图中没有相应的阈值测量点。

实验还测量了DFB-LD的受激布里渊散射光阈值功率,如图9所示。1.7 GHz线宽和3.2 GHz线宽的混沌光产生的受激布里渊散射光阈值功率比DFB-LD产生的受激布里渊散射光阈值功率分别高约15 dB和19 dB。因此,具有高受激布里渊散射光阈值功率的混沌光在基于自发布里渊散射的分布式光纤传感系统中具有重要的应用价值。

## 4 讨 论

实验主要分析了混沌光的布里渊散射光谱和后向散射光功率的特性。DFB-LD的布里渊散射光谱如图10所示。当注入光功率较低时,混沌抽运光(图4中21 dBm曲线)和DFB-LD抽运光(图10中4.3 dBm曲线)对应的布里渊散射光谱反斯托克斯的位置均表现为1个峰。当注入光功率足够高时,混沌布里渊散射光谱反斯托克斯的位置出现凹陷(图4中32 dBm曲线),但DFB-LD布里渊散射光谱的反斯托克斯光消失(图10中16.5 dBm曲线)。光纤中的受激布里渊散射可描述为抽运光和斯托克斯光通过声波而发生的非线性效应。当抽运光功率增加到一定程度时,抽运光和斯托克斯光发生干涉,绝大多数抽运光转化为斯托克斯光。混沌光具有自相似特性,即反斯托克斯光位置处的混沌光和中心波长处的混沌光具有相似的性质。而且,混沌光覆盖了整个反斯托克斯光区域,如图4所示。因此,在受激布里渊散射过程中,反斯托克斯光位置处的混沌光转化为斯托克斯光,反斯托克斯光的位置处出现凹陷。对于DFB-LD产生的布里渊散射光谱,当抽运光功率增大时,由EDFA引发的放大自发辐射噪声(ASE)也会随之增大。但ASE噪声不满足受激布里渊散射发生的条件,故其不参与受激布里渊散射,且其功率高于反斯托克斯光功率的部分将反斯托克斯光覆盖,所以在受激布里渊散射过程中只表现为斯托克斯光。

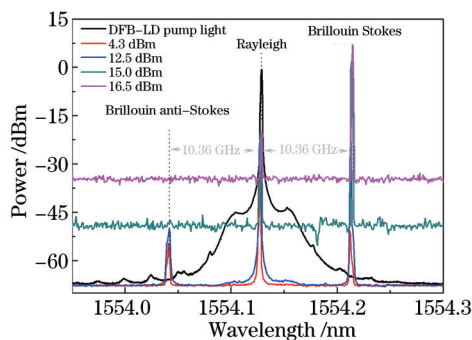


图10 原始DFB-LD抽运光 and 不同功率的光注入5.05 km单模光纤中的布里渊后向散射光谱

Fig.10 Original DFB-LD pump light and Brillouin backscattering spectra with different DFB-LD pump light powers injected into 5.05 km SMF

## 5 结 论

实验研究光纤中混沌布里渊散射光的特性发现,布里渊散射斯托克斯光线宽与注入光功率和光纤长度成反比。随着注入混沌光功率的增大,布里渊散射斯托克斯光的线宽逐渐减小;当注入的混沌光功率达到一定值时,斯托克斯光线宽趋于不变。当注入的混沌光功率相同时,后向散射光功率随着光纤长度的增加迅速增大;当光纤长度超过15.41 km时,后向散射光功率开始缓慢增大。1.7 GHz线宽的混沌光在光纤中的受激布里渊散射光阈值比传统的连续光高约15 dB,3.2 GHz线宽的混沌光在光纤中的受激布里渊散射光阈值比传统的连续光高约19 dB。因此,具有高受激布里渊散射光阈值的混沌光可以更好地应用在基于布里渊散射的分布式光纤传感系统中,尤其是基于自发布里渊散射的传感系统,该实验结果也为进一步改善分布式光纤传感系统的空间分辨率和传感距离提供了依据和指导。

- 1 Leung C, Wan K, Inaudi D, *et al.*. Review: Optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(4): 871–906.
- 2 Duan Shaohui, Tian Jie, Zhou Zhengxian, *et al.*. Application of distributed optical fiber sensing technology to power cable[J]. *Laser Journal*, 2014, 35(3): 47–48.  
段绍辉, 田 杰, 周正仙, 等. 分布式光纤传感技术在电力电缆监测的应用[J]. *激光杂志*, 2014, 35(3): 47–48.
- 3 Bao X, Webb D, Jackson D. 32-km distributed temperature sensor based on Brillouin loss in an optical fiber[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(18): 1561–1563.
- 4 Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, *et al.*. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1296–1302.
- 5 Niklès M, Thévenaz L, Robert P. Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(10): 758–760.
- 6 Cho Y, Alahbabi M, Gunning M, *et al.*. 50-km single-ended spontaneous-Brillouin-based distributed-temperature sensor exploiting pulsed Raman amplification[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(18): 1651–1653.
- 7 Soto M, Bolognini G, Pasquale F. Enhanced simultaneous distributed strain and temperature fiber sensor employing spontaneous Brillouin scattering and optical pulse coding[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(7): 450–452.
- 8 Hotate K, Tanaka M. Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1-cm spatial resolution by correlation-cased continuous-wave technique[C]. *SPIE*, 2000, 4185: 647–650.
- 9 Peng Yingcheng, Qian Hai, Lu Hui, *et al.*. New research progress on distributed optical fiber sensor technique based on BOTDA[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100005.  
彭映成, 钱 海, 鲁 辉, 等. 基于 BOTDA 的分布式光纤传感技术新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100005.
- 10 Hayashi N, Mizuno Y, Nakamura K. Alternative implementation of simplified Brillouin optical correlation-domain reflectometry[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(6): 6803108.
- 11 Jeong J, Lee K, Jeong J, *et al.*. Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation domain analysis using multiple correlation peaks[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2012, 16(3): 210–214.
- 12 Mizuno Y, Zou W, He Z, *et al.*. Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR)[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12148–12153.
- 13 Cohen R, London Y, Antman Y, *et al.*. Brillouin optical correlation domain analysis with 4 millimeter resolution based on amplified spontaneous emission[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12070–12078.
- 14 Ma Z, Zhang M, Liu Y, *et al.*. Incoherent Brillouin optical time-domain reflectometry with random state correlated Brillouin spectrum [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 6100407.
- 15 Chai Yanjie, Zhang Hanyi, Zhou Bingkun, *et al.*. Linewidth reduction of semiconductor lasers and study of linewidth property[J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, 9(9): 775–779.  
柴燕杰, 张汉一, 周炳琨, 等. 半导体激光器线宽压窄及其特性研究[J]. *光学学报*, 1989, 9(9): 775–779.
- 16 Zhao Junfa. Study on stimulated Brillouin scattering and its applications in optical fibers[D]. Tianjin: Nankai University, 2010: 5–9.  
赵军发. 光纤中受激布里渊散射效应及其应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2010: 5–9.
- 17 Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(8): 1170–1176.
- 18 Esman R D. Brillouin scattering: Beyond threshold[C]. *Optical Fiber Communications*, 1996: 227–228.
- 19 Wang Rugang. Study of Brillouin scattering mechanism in optical fiber and its application[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012: 23–29.  
王如刚. 光纤中布里渊散射的机理及其应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2012: 23–29.
- 20 Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin, *et al.*. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(4): 497–500.  
沈一春, 宋牟平, 章献民, 等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(4): 497–500.
- 21 Zhang Cong, Yu Wenfeng, Li Zhenglin, *et al.*. Numerical study on scattering properties for the stimulated Brillouin scattering fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0319005.  
张 聪, 余文峰, 李正林, 等. 光纤受激布里渊散射的散射特性数值研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0319005.
- 22 Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(1): 1–59.
- 23 Gerd K. *Optical fiber communications*[M]. Pu Tao, Xu Junhua, Su Yang, Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 377–379.  
格尔德. *光纤通信*[M]. 蒲 涛, 徐俊华, 苏 洋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012: 377–379.