

引用格式: LUO Tian-ming, CHENG Wei-ren, CHENG Ling-hao, *et al.* Incident Optical Power Limited by Nonlinearities in Distributed Fiber Sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0806003

罗天明,程炜仁,程凌浩,等. 分布式光纤传感中非线性对注入光功率的限制[J]. 光子学报, 2020, 49(8):0806003

分布式光纤传感中非线性对注入光功率的限制

罗天明,程炜仁,程凌浩,周黎明,刘伟民

(暨南大学 光子技术研究院, 广州 511486)

摘要:研究了 G.652 标准单模光纤中的自相位调制和受激布里渊散射两类光纤非线性效应导致的峰值功率限制. 研究表明色散与自相位调制共同作用会引起脉冲波形的畸变, 其作用大小主要取决于脉冲的峰值功率. 受激布里渊散射则引起脉冲功率在光纤中的迅速衰落, 进而限制传感距离, 其作用大小主要取决于脉冲能量. 实验结果表明, 自相位调制对脉冲入射功率的限制作用更加明显. 通过对实验数据的分析, 给出了光纤非线性制约下光脉冲峰值功率上限值的经验性公式, 可据此估算分布式光纤传感系统注入脉冲的最大功率. 对于一个典型 25 km 分布式光纤传感系统, 脉冲峰值入射功率上限值约为 1 W.

关键词: 光纤传感器; 光时域反射计; 非线性效应; 光脉冲; 峰值功率

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204908.0806003

Incident Optical Power Limited by Nonlinearities in Distributed Fiber Sensing

LUO Tian-ming, CHENG Wei-ren, CHENG Ling-hao, ZHOU Li-ming, LIU Wei-min

(*Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 511486, China*)

Abstract: The limitation of peak power caused by two kind of nonlinear effect, self-phase modulation and stimulated Brillouin scattering, in G.652 single-mode fiber is studied. It shows that dispersion and self-phase modulation lead to distortion of optical pulse waveform and its effect is determined by optical pulse peak power. Stimulated Brillouin scattering results in fast decay of pulse power in fiber and further shorter sensing distance, and its effect is determined by optical pulse energy. Experiment data shows that self-phase modulation puts more stringent limit on optical pulse launch power. Based on the analysis of experimental data, empirical formulas for power upper limit are given, which can be used to estimate the maximum optical pulse incident power in distributed fiber sensing systems. For a typical distributed fiber sensing system with range of 25 km, the incident power upper limit of optical pulse peak is about 1 W.

Key words: Fiber optic sensors; Optical time domain reflectometer; Nonlinear effects; Optical pulses; Peak power

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 120.4825; 190.4370

0 引言

分布式光纤传感器利用光纤作为敏感元件, 获取被测信息, 分辨率高、误差小^[1-2]. 此外它还具有抗电磁干扰、耐腐蚀等特点^[3], 可以长距离连续分布式地实时在线监测应变、温度、振动等物理参数^[4-5]. 目前这项技

基金项目: 国家自然科学基金(No.61875246), 广州市科技计划项目(No.201707010338)

第一作者: 罗天明(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式光纤传感和光通信技术. Email: luotmc@163.com

导师: 程凌浩(1977—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为分布式光纤传感和光通信技术. Email: chenglh@ieee.org

收稿日期: 2020-03-13; 录用日期: 2020-06-12

<http://www.photon.ac.cn>

术已经广泛地应用于轨道交通、桥梁隧道和超高压输电线路等大型结构的监测领域^[6-8],具有广阔的应用前景.

当前,相位敏感光时域反射计(Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer, φ -OTDR)和布里渊光时域反射计(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)是两种广泛应用的分布式光纤传感器.其中 φ -OTDR是基于瑞利散射,而BOTDR则基于布里渊散射^[9].这两种分布式光纤传感器一般都能在数十千米长的传感距离内进行精确的测量^[10].在这两类分布式光纤传感系统中,一般采用相干性能较好的超窄线宽激光源,经由光学耦合器分为两路连续光,一路被调制成脉冲光,另一路作为参考光用来与探测光进行相干接收^[11].脉冲光在光纤中传输时,在光纤中沿线各处产生向后传播的瑞利散射和布里渊散射光^[12].这些散射光在接收端通过环形器被接收下来.通过对散射光的强度、相位、频率等参量的分析,就可以获得光纤各处待测物理量的大小及其空间分布^[13].因此,散射光的信噪比是传感系统性能的关键参数之一.由于光纤的损耗非常低,光纤中的散射效应也就非常微弱^[14],为了尽可能地提高散射光强度,就必须在光纤入射端尽可能地提高脉冲光的功率.但是脉冲光的入射功率不能无限制提高,因为随着入射功率的增加,光纤中的非线性效应变得越来越明显,会造成脉冲光波形失真等不利因素,最终使传感性能劣化^[15-17].

在光纤中的非线性效应可分为两类:一类为非弹性散射效应,如受激布里渊散射、受激拉曼散射等;另一类是弹性效应,如克尔效应等.弹性非线性效应是与折射率密切相关的效应,如自相位调制、调制不稳定性、四波混频等^[18].其中,多数的分布式光纤传感系统中主要受到受激布里渊散射和自相位调制这两种非线性效应的影响.一方面,过高的脉冲峰值功率会引发受激布里渊散射,从而使脉冲功率被过快地消耗^[19].另一方面,自相位调制会导致脉冲传输过程中频谱展宽^[20],在色散作用下会引起脉冲波形失真.为了缓解光纤非线性效应带来的不利影响,研究人员已经提出了数字反向传播、非线性傅里叶变换传输、数字相位共轭等方法^[21-24].但是这些基于数字信号处理的技术主要运用于数字光通信系统中,对于分布式光纤传感这类模拟系统还不能直接应用.

因此,研究分布式光纤传感系统中光脉冲的非线性效应,找出脉冲峰值功率的上限,对于该传感系统的设计和性能提升十分重要.为了分析系统中脉冲峰值入射功率的上限问题,即找出系统中最佳的脉冲入射功率,本文首先简述了非线性效应对光脉冲传输的影响,分析了脉冲功率损耗和脉冲波形失真的原因.通过实验研究了自相位调制和受激布里渊散射导致的光脉冲峰值入射功率的限制,并给出了功率上限的经验公式.结果表明,相比于受激布里渊散射,自相位调制导致的功率限制在多数情况下会更加严重.

1 非线性效应

1.1 受激布里渊散射

受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)是一种在光纤内发生的非线性过程,其所需要的入射功率远低于受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)所要求的泵浦水平.SBS过程可被经典地描述为泵浦波、斯托克斯波通过声波进行的非线性相互作用,泵浦波通过电致伸缩产生声波,然后引起介质折射率的周期性调制^[25].当注入光纤的泵浦功率比较大的时候,SBS将把很大部分注入功率转换为后向斯托克斯波.SBS的阈值泵浦功率与泵浦波的谱宽有关,对连续泵浦或是相对较宽的脉冲泵浦,其阈值可低至1 mW,而对脉宽小于10 ns的短脉冲泵浦,SBS几乎不会发生^[26].

光纤中SBS的形成需要考虑泵浦波与斯托克斯波之间的相互作用.在连续波情况下,假设反向传输的泵浦和斯托克斯波沿相同方向线偏振,并且在光纤中的偏振态保持不变,此相互作用遵循下列两个耦合强度方程

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_s - \alpha I_p \quad (2)$$

式中, I_s 、 I_p 分别是斯托克斯光强和泵浦光强; g_B 是布里渊增益系数; α 为斯托克斯和泵浦频率处的光纤损耗.在小信号时,可以忽略泵浦的消耗.设泵浦光于 $z=0$ 处注入光纤,将 $I_p(z) = I_p(0)e^{-\alpha z}$ 代入式(1)中,可以得到光纤位置 L 处的斯托克斯波强度 $I_s(0)$

$$I_s(0) = I_s(L) \exp(g_B P_0 L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}} - \alpha L) \quad (3)$$

式中, $P_0 = I_p(0) A_{\text{eff}}$, A_{eff} 为有效纤芯截面, L_{eff} 为有效作用长度. L_{eff} 的表达式为

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha \quad (4)$$

式(3)表明在 $z = L$ 处, 后向传播的斯托克斯信号的强度呈指数增长, 其主要原因是 SBS 效应而产生了布里渊放大.

斯托克斯信号的放大是以泵浦光的损耗为代价. 因此, 分布式光纤传感系统中的高功率脉冲光, 除了光纤损耗之外, 受激布里渊散射也会带来额外的损耗, 使得脉冲功率迅速衰落, 导致信噪比和传感距离的迅速劣化.

1.2 自相位调制

非线性光学介质中, 介质的折射率与入射光的光强有关, 这一现象通过自相位调制 (Self-phase modulation, SPM) 来实现, 它将导致光脉冲的频谱展宽^[27]. 光脉冲在单模光纤内传输可以由非线性薛定谔方程 (Nonlinear Schrodinger Equation, NLSE) 描述

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\alpha}{2} A + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A \quad (5)$$

式中, A 为脉冲的复振幅, T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度. 方程右边的三项分别对应光脉冲在光纤中传输时的损耗、色散和非线性效应, 其中 α, β_2, γ 分别代表损耗、色散和非线性系数.

若忽略色散的影响, 则脉冲传输方程在 $\beta_2 = 0$ 的条件下变为

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{ie^{-\alpha z}}{L_{\text{NL}}} |U|^2 U \quad (6)$$

对式(6)进行积分处理, 可以得到该方程的通解为

$$\begin{cases} U(L, T) = U(0, T) \exp [i \Phi_{\text{NL}}(L, T)] \\ \Phi_{\text{NL}}(L, T) = |U(0, T)|^2 (L_{\text{eff}} / L_{\text{NL}}) \\ L_{\text{NL}} = 1 / \gamma P_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $U(0, T)$ 是 $z = 0$ 处的场振幅. 通过式(7)可以得出, SPM 产生光的相位随光强的变化而变化, 即光的相位通过 SPM 被光强度所调制. 在没有色散的时候, 这种相位调制并不会被反映在光强上, 因此脉冲的形状保持不变. 但是, 相位调制光的频谱发生了改变. 而色散会使得不同频率的光有不同的传播速度, 从而最终导致光脉冲的形状随着传播距离发生变化. 因此, 在色散环境下, SPM 会导致光脉冲的形状改变, 影响分布式光纤传感系统的性能.

2 实验系统

为了对光脉冲在系统中非线性传输情况进行研究, 设计了如图 1 所示的实验系统. 该系统采用超窄线宽的可调谐激光器 (Laser), 中心波长为 1 550.1 nm, 线宽小于 3 kHz. 激光器的输出功率为 0 dBm, 输出连续光. 该连续光进入开关型半导体光放大器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) 后被调制成脉冲光, 其中 SOA 受脉冲发生器 (Pulse generator) 的控制. 脉冲光经过脉冲型掺铒光纤放大器 (Pulse-Erbium Doped Fiber Amplifier, p-EDFA) 放大后, 通过三端口环形器 (Circulator, CIR) 入射到被测光纤 (Test fiber) 中. 为了获得更好的实验效果, 本次实验采用了脉冲型掺铒光纤放大器, 该放大器针对低占空比脉冲光放大, 其铒纤长度等参数经过优化设计, 具有高可靠性、噪声指数低、输出峰值功率高、脉冲信号变形小等特点. 在被测光纤的另一端, 为了防止输出光脉冲峰值功率过高, 利用可调谐光衰减器 (Variable Optical Attenuator, VOA), 设置衰减量为 25 dB, 对脉冲光进行衰减. 衰减后的脉冲光输入光电探测器 (Photodetector, PD), 然后将得到的电信号输入示波器 (Oscilloscope). 通过示波器记录下光电转换后的脉冲峰值电压以及波形图, 观察脉冲的波形变化. 此外, 测试光纤中返回的散射信号由环形器的 3 端口输出, 经掺铒光纤放大器 (Continuous wave-Erbium Doped Fiber Amplifier, cw-EDFA) 放大后, 输入光谱仪 (Optical Spectrum Analyser, OSA) 进行分析. 利用光谱仪读取瑞利散射和布里渊散射对应的散射功率, 并记录相应的光谱图形数据.

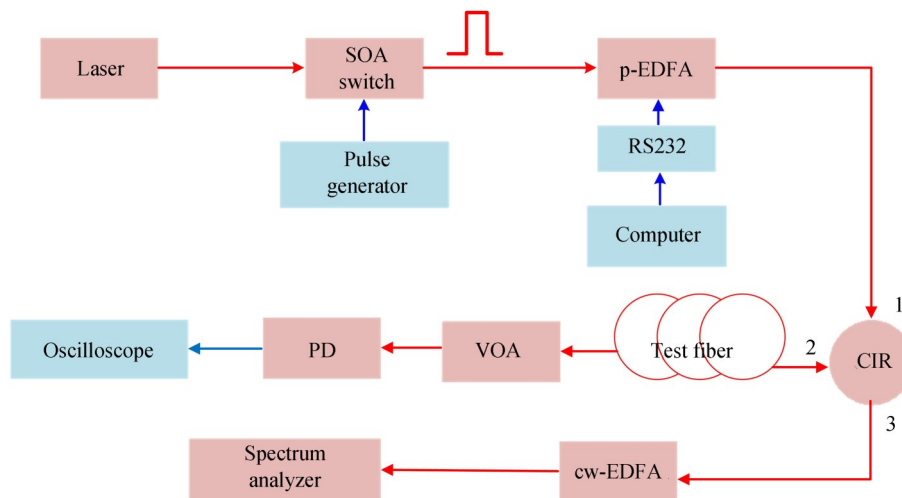


图1 用于实验的分布式光纤传感系统

Fig. 1 Distributed fiber sensing system for experiment

本次实验设置了8组不同长度的测试光纤,分别是1 km、3 km、5 km、8 km、10 km、13 km、20 km、25 km. 脉冲光的重复周期和脉宽通过计算机设置,其中脉冲光的重复周期为260 μ s,脉冲宽度分别是50 ns、100 ns、150 ns、200 ns. 而脉冲的峰值功率则通过调节p-EDFA的增益来实现. 在每组实验前,注入被测光纤的光脉冲功率和脉冲波形都被仔细测定,以便能够对相同实验参数下光脉冲进入光纤和从光纤输出后的状态进行比较.

3 实验结果与分析

3.1 自相位调制的影响

图2为不同的脉冲峰值入射功率的情况下,经被测光纤输出后脉冲波形变化情况. 即,在相同的被测光纤长度下,从图1实验系统的环形器1端口处注入不同峰值功率的脉冲,利用示波器依次采集经被测光纤输出脉冲波形,波形图如图2. 实验中,入射脉冲的脉冲宽度为150 ns,脉冲的重复周期为260 μ s. 图2右上角标注展示了3种不同长度的被测光纤,分别是5 km、10 km、25 km,以及在同一光纤长度下注入的三种脉冲峰值功率,分别是2 349 mW、5 482 mW、13 703 mW. 为了方便比较波形变化,采用Origin数据处理软件将实验所得各组数据制成波形图并叠加于图2上. 图2的纵坐标是光电转换后输出的电信号幅度,代表了光脉冲功率. 从图2中可以得出,在自相位调制和色散共同作用下,会引起脉冲波形失真. 在同样的脉冲峰值入射功率下,随着光纤长度的增加,输出脉冲波形失真的越严重. 而在相同的光纤长度下,随着脉冲峰值入射功率的增大,输出脉冲波形也会失真的越严重. 为了能够对脉冲波形的失真程度进行定量化的分析,定义脉冲波形失真系数 Y 为

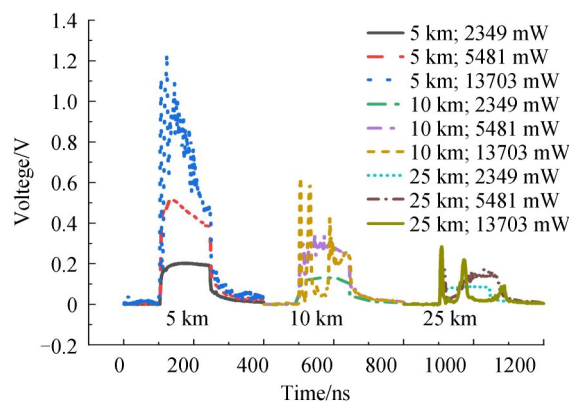


图2 光纤末端光脉冲波形图

Fig. 2 Waveforms of optical pulse at end of fiber

$$\begin{cases} Y = \sqrt{\int_0^T (\bar{X}_{out} - \bar{X}_{in})^2 dt} \\ \bar{X}_{out} = X_{out} / \int_0^T X_{out} dt \\ \bar{X}_{in} = X_{in} / \int_0^T X_{in} dt \end{cases} \quad (8)$$

式中, X_{out} 和 X_{in} 分别是光纤输出和输入光纤的脉冲波形, 其脉冲宽度为 T , 并以脉冲各自的起始位置为 0 时刻点. \bar{X}_{out} 和 \bar{X}_{in} 则是相对于输出和输入脉冲总功率归一化后的脉冲波形. 因此由式(8)定义的脉冲波形失真系数 Y 表征了均方根意义上的波形失真大小.

图 3 为脉冲波形失真系数随脉冲峰值入射功率变化的曲线图. 其中, 输入的脉冲宽度为 150 ns, 脉冲的重复周期为 260 μ s, 并分别给出了 5 km、10 km、25 km 三种光纤长度的脉冲波形失真系数. 从图中可知, 随着脉冲峰值入射功率的逐渐增大, 失真系数曲线先是保持平坦, 在某个阈值功率之后迅速增大. 另外, 在相同的峰值入射功率下, 随着光纤长度的增加, 输出脉冲的失真系数随之增加. 以 5 km 光纤为例, 在脉冲峰值入射功率为 0~5 500 mW 时, 脉冲的失真系数曲线是基本平坦的; 在脉冲峰值入射功率为 5 500~14 000 mW 时, 脉冲的失真系数曲线则随脉冲峰值入射功率的增大而增大. 因此, 在光纤长度为 5 km 时, 5 500 mW 的脉冲峰值入射功率是脉冲失真曲线的一个阈值功率.

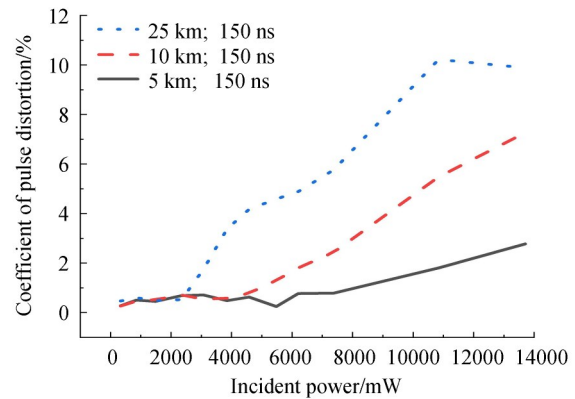


图 3 脉冲波形失真系数变化曲线

Fig. 3 Distortion coefficient of the pulse waveform versus launch power of pulse peak

脉冲峰值入射功率阈值代表了自相位调制对脉冲发射功率的限制, 对分布式光纤传感系统的设计有着重要的指导意义. 因此进行进一步研究了入射脉冲的脉冲宽度以及光纤长度与功率阈值的关系. 图 4(a) 为 4 种不同脉冲宽度的实验结果, 分别是 50 ns、100 ns、150 ns、200 ns. 光纤长度分别设置为 5 km、10 km、13 km、20 km 和 25 km. 由图 4(a) 可以看到, 尽管脉冲宽度最大变化了 4 倍, 但是对于同一光纤长度, 功率阈值的波

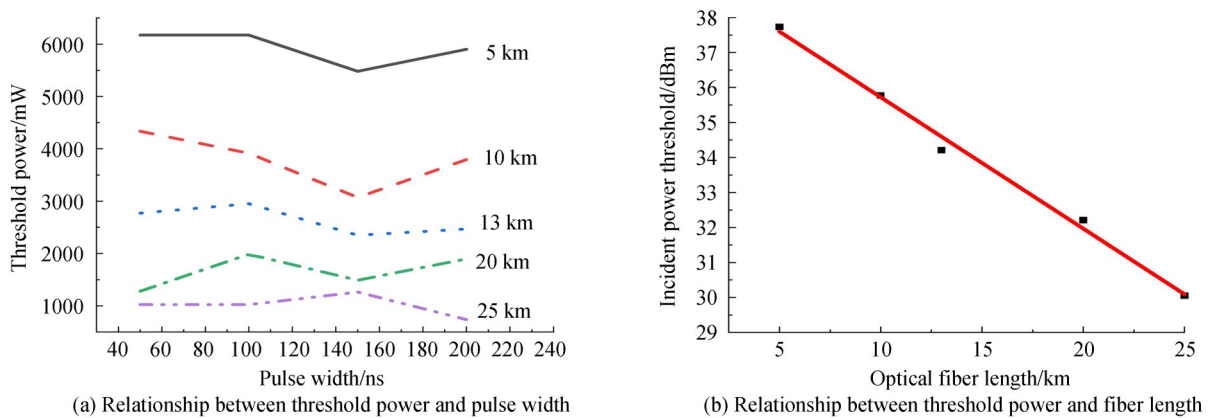


图 4 脉冲峰值入射功率阈值与脉宽和光纤长度的关系曲线

Fig. 4 Incident power threshold of pulse peak versus pulse width and optical fiber length

动不大, 在 $\pm 10\%$ 左右. 考虑到实验中的测量误差, 基本可以认为功率阈值与脉冲宽度的关系不大. 相反, 功率阈值与光纤长度密切相关, 光纤长度越长, 功率阈值越低. 因此, 对同一光纤长度, 取 4 个脉冲宽度下测得的功率阈值的平均值作为该光纤长度下的功率阈值, 结果如图 4(b). 可以看到, 在对数坐标下, 不同光纤长度的功率阈值表现出较好的线性度. 根据图 4(b) 中线性拟合的结果, 可以得到自相位调制限制下, 由功率阈值确定的脉冲入射功率上限值的经验公式.

$$P_{th} = 39.5 - 0.37L \text{ (dBm)} \quad (9)$$

式中, L 是光纤以千米为单位计算的长度.

3.2 受激布里渊散射的影响

由于受激布里渊散射对脉冲发射功率的限制, 主要是通过强烈的后向散射使得脉冲功率在光纤中过度衰减导致信噪比和传感距离的迅速劣化, 因此在实验中, 主要利用光谱仪通过环形器 3 端口观测传感光纤的

散射信号光谱来进行分析. 散射光谱中, 包含有瑞利散射和布里渊散射. 其中瑞利散射功率与脉冲功率是线性关系, 可以作为一个很好的参考信号来衡量布里渊散射的强烈程度.

图5为光纤长度为20 km和脉冲宽度为150 ns时, 不同入射脉冲能量时的散射信号光谱图. 该入射脉冲能量为图1系统图中环形器1端口处注入光纤的脉冲能量. 入射脉冲能量主要根据脉冲的波形图求出, 即通过峰值电压先求出脉冲的峰值功率, 再与脉冲宽度相乘, 从而求得脉冲能量具体数值. 实验中光谱仪存在一定的插损, 实际测得的瑞利散射和布里渊散射波长分别为1549.724 nm和1549.812 nm. 图5(a)在脉冲能量为496 nJ时, 瑞利散射光强度为-18 dBm, 布里渊散射光强度为-35 dBm. 此时受激布里渊散射所带来的影响并不明显, 后向散射光中的主要成分是瑞利散射光, 布里渊散射光的强度相对较小. 随着脉冲能量的增加, 超过了布里渊阈值而产生受激布里渊散射时, 如图5(b)、(c)所示, 瑞利散射和布里渊散射的功率差值迅速缩小, 甚至布里渊散射光功率超过了瑞利散射光功率.

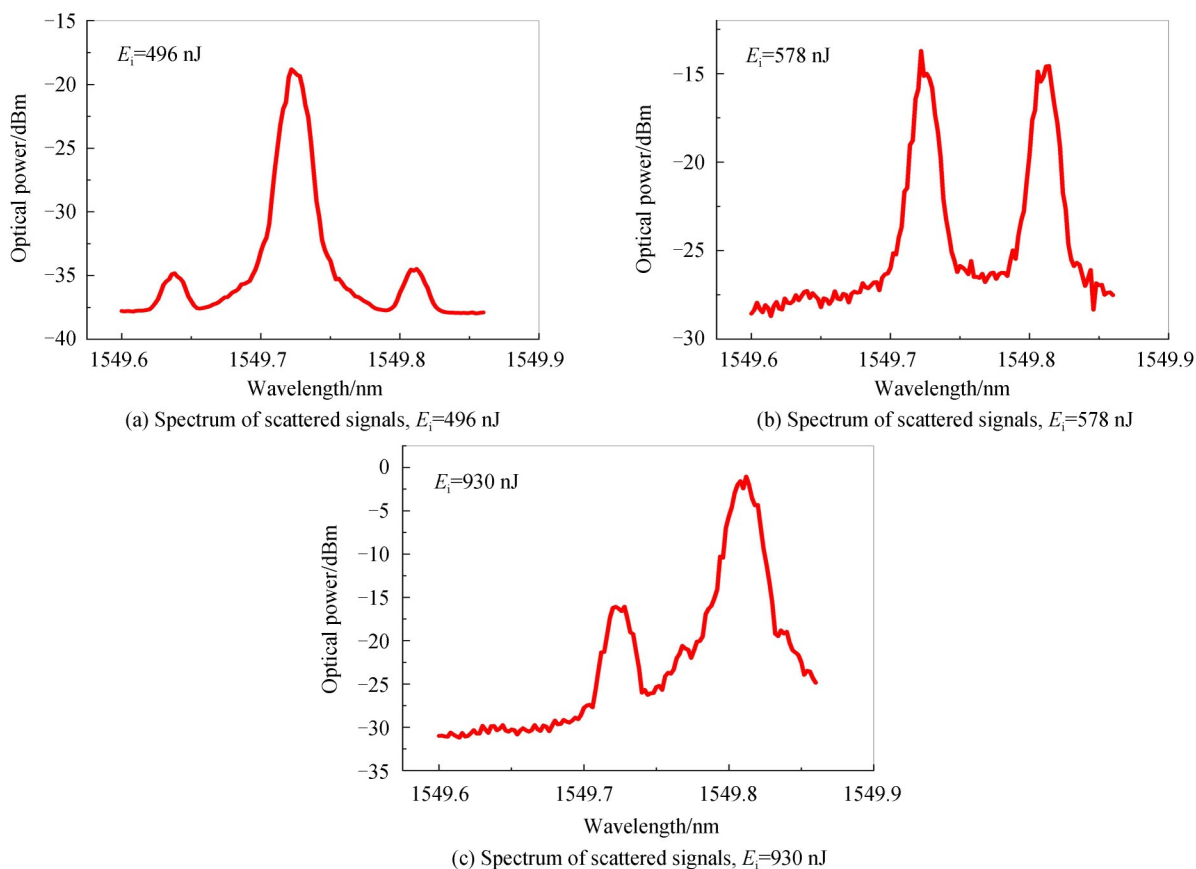


图5 光纤中散射信号光谱

Fig. 5 Spectrum of scattered signals in optical fiber

图6为光纤中瑞利散射与布里渊散射功率比值随脉冲能量的变化曲线. 图中展示了3种不同光纤长度的实验结果, 分别是5 km、10 km、25 km. 由图6可以看到, 尽管光纤长度由5 km增加到了25 km, 但是相同的入射脉冲能量下, 两种散射的功率比值基本一致, 在 $\pm 2\%$ 左右. 考虑到实验中的测量误差, 基本可以认为散射功率比值与光纤长度的关系不大. 同时, 在对数坐标下, 散射功率比值随入射脉冲能量变化表现出较好的线性关系, 入射脉冲能量越大, 散射功率比值越小. 因此, 分别对三种光纤长度的实验数据进行了线性拟合, 可以看到图中三条拟合曲线之间的差异很小. 根据图6中线性拟合的结果, 取三条拟合曲线的平均曲线参数, 可以得到在受激布里渊散射限制下, 由入射脉冲能量确定的散射功率比值的经验公式

$$D_{rb} = 17.1 - 16E_i \text{ (dB)} \quad (10)$$

式中, D_{rb} 是光纤中瑞利散射与布里渊散射功率比值, 以分贝为单位. E_i 是经环形器1端口注入光纤中的脉冲能量, 以 μJ 为单位. 当瑞利散射与布里渊散射强度相等时, 瑞利散射与布里渊散射功率比值 D_{rb} 为0, 根据式

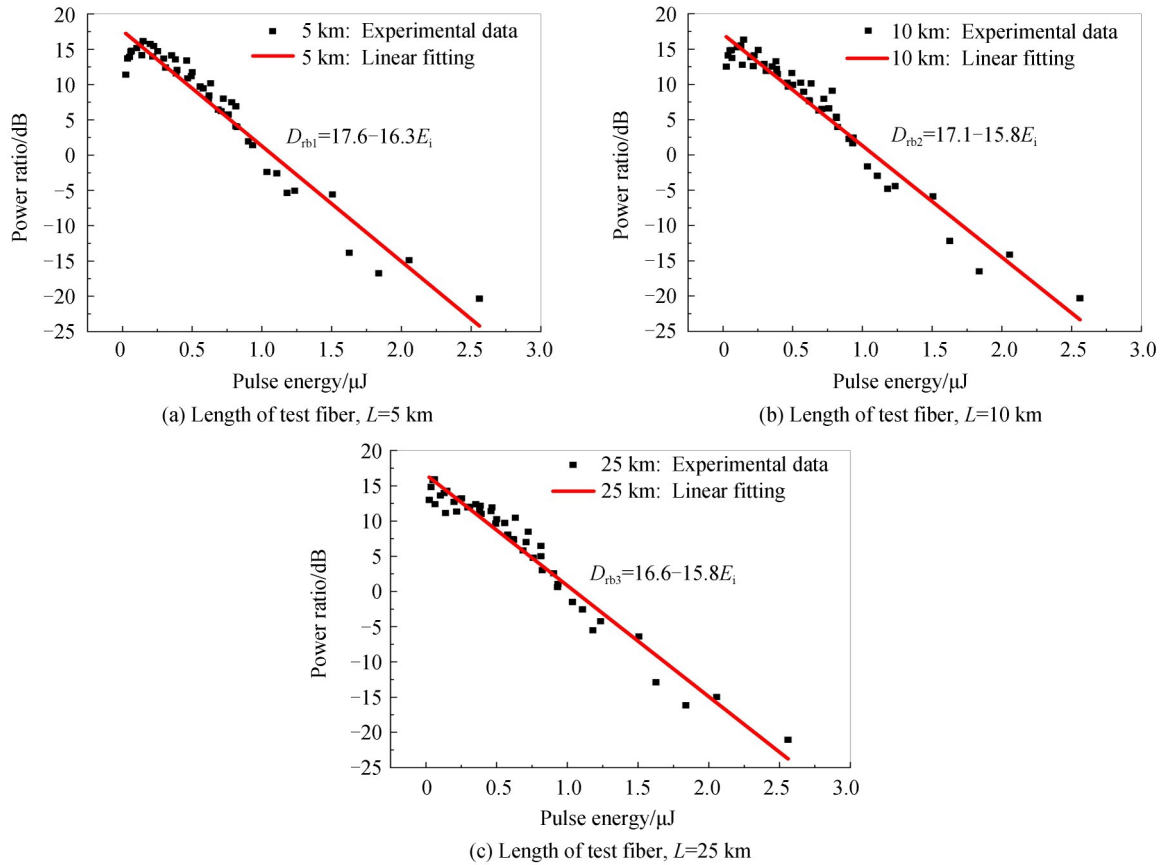


图6 瑞利散射与布里渊散射功率比值随脉冲能量的变化曲线
Fig. 6 Power ratio between Rayleigh scattering and Brillouin scattering

(10)可得脉冲能量为 $1.069 \mu\text{J}$. 此时其所对应的 50 ns 和 100 ns 脉冲的峰值功率分别为 21.38 W、 10.69 W. 以典型的 25 km 分布式光纤传感系统为例,根据式(9)可得自相位调制的功率阈值为 1.06 W. 由上述计算结果可知自相位调制的功率阈值远小于受激布里渊散射对功率的限制,所以自相位调制带来的功率限制更加明显.

4 结论

本文研究了非线性条件下分布式光纤传感系统中脉冲峰值发射功率上限的问题,对分布式光纤传感系统中光脉冲受自相位调制和受激布里渊散射的影响开展了实验研究. 实验结果表明,自相位调制与色散现象的共同作用导致了脉冲波形失真,并且与脉冲入射功率和传感距离有关. 而受激布里渊散射则会导致脉冲功率的过度衰减和信噪比劣化,且主要与脉冲能量有关. 通过对实验数据的分析处理,分别给出了两种非线性对注入到光纤内光脉冲峰值功率上限值的经验公式. 对于一个典型 25 km 长的分布式光纤传感系统,自相位调制导致的功率阈值为 1.06 W,比受激布里渊散射导致的功率限制还要小,因此是主要的发射功率限制因素.

参考文献

- [1] SAISSY A. Spontaneous Raman scattering and polarization mode coupling in polarization-maintaining optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **5**(8): 1045-1049.
- [2] LI H, LIU Q, CHEN D, et al. High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor based on Φ -OFDR with enhanced crosstalk suppression[J]. *Optics Letters*, 2020, **45**(2): 563-566.
- [3] FAN L, BAO Y, CHEN G. Feasibility of distributed fiber optic sensor for corrosion monitoring of steel bars in reinforced concrete[J]. *Sensors*, 2018, **18**(11): 3722.
- [4] RAO Yun-jiang. Recent process in ultra-long distributed fiber optic sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(7): 158-176. 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, **66**(7): 158-176.
- [5] LUO L, SEKIYA H, SOGA K. Dynamic distributed fiber optic strain sensing on movement detection[J]. *IEEE Sensors*

- Journal*, 2019, **19**(14): 5639-5644.
- [6] ZHOU Zi-chao, WANG Xiao-lin, SU Rong-tao, *et al.* Application of distributed fiber sensing in fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(8): 43-52.
周子超, 王小林, 粟荣涛, 等. 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(8): 43-52.
- [7] FEO G, SHARMA J, KORTUKOV D, *et al.* Distributed fiber optic sensing for real-time monitoring of gas in riser during offshore drilling[J]. *Sensors*, 2020, **20**(1): 267.
- [8] MA P, SUN Z, LIU K, *et al.* Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, **124**: 105966.
- [9] LI Wei, LIU Wei-ming, ZHOU Li-ming, *et al.* Separation of Brillouin stokes scattering and anti-stokes scattering based on orthogonal coherent receiving[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(7): 0706003.
李威, 刘伟民, 周黎明, 等. 基于正交相干接收的布里渊斯托克斯与反斯托克斯散射光分离技术[J]. *中国激光*, 2018, **45**(7): 0706003.
- [10] LI Xiao-yu, WU Hui-juan, PENG Zheng-pu, *et al.* A novel time sequence singular spectrum analysis method for Φ -OTDR disturbance detection system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0428001.
李小玉, 吴慧娟, 彭正谱, 等. 基于时间序列奇异谱特征的 Φ -OTDR扰动检测方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0428001.
- [11] SMITH R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 1972, **11**(11): 2489-2494.
- [12] HE Yu-jun, YIN Cheng-qun, LI Yong-qian, *et al.* A novel BOTDR system based on all fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 721-724.
何玉钧, 尹成群, 李永倩, 等. 一个新型的基于全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 BOTDR 系统[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 721-724.
- [13] HE Cun-fu, HANG Li-jun, WU Bin. Application of distributed optical fiber sensing technique in pipeline leak detection [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, **25**(9): 8-11.
何存富, 杭利军, 吴斌. 分布式光纤传感技术在管道泄漏检测中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(9): 8-11.
- [14] CHEN Wei, YUAN Jian, HE Zuo-wei, *et al.* Design and development on the low-loss single-mode optical fibers for 100G high-rate optical fiber communication[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, **13**(6): 34-36.
陈伟, 袁健, 贺作为, 等. 100G 高速光纤通信用低损耗单模光纤的设计与开发[J]. *光学与光电技术*, 2015, **13**(6): 34-36.
- [15] IZUMITA H, KOYAMADA Y, FURUKAWA S, *et al.* The performance limit of coherent OTDR enhanced with optical fiber amplifiers due to optical nonlinear phenomena[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, **12**(7): 1230-1238.
- [16] NESTEROV E T, ZHIRNOV A A, STEPANOV K V, *et al.* Experimental study of influence of nonlinear effects on phase-sensitive optical time-domain reflectometer operating range[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2015, **584**(1): 012028.
- [17] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. New York: Academic Press, 2013.
- [18] SHEN Yi-chun, SONG Mu-ping, ZHANG Xian-min, *et al.* Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber [J]. *Chinese Journal of 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.
- [19] ADRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. JIA Dong-fang, YU Zheng-hong, TAN Bin, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [20] STOLEN R H, LIN C. Self-phase-modulation in silica optical fibers[J]. *Physics Review*, 1978, **14**(4): 1448-1453.
- [21] AL-KHATEEB M, TAN M, ZHANG T, *et al.* Combating fiber nonlinearity using dual-order Raman amplification and OPC[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **31**(11): 877-880.
- [22] DONG Z, HARI S, GUI T, *et al.* Nonlinear frequency division multiplexed transmissions based on NFT [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(15): 1621-1623.
- [23] DAR R, WINZER P J. Nonlinear interference mitigation: methods and potential gain [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(4): 903-930.
- [24] AMARI A, LIN X, DOBRE O A, *et al.* A machine learning-based detection technique for optical fiber nonlinearity mitigation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **31**(8): 627-630.
- [25] BOYD R W. Nonlinear Optic[M]. San Diego: Academic Press, 1992.
- [26] AOKI Y, TAJIMA K, MITO I. Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, **6**(5): 710-719.
- [27] WANG Zhen-bao, WU Yong, WANG Ping, *et al.* Research on nonlinear effects in fiber-optic communication systems [J]. *Study on Optical Communications*. 2011, **165**(3): 25-28.
王振宝, 吴勇, 王平, 等. 光纤通信系统中的非线性效应研究[J]. *光通信研究*, 2011, **37**(3): 25-28.