

一种利用布里渊谱宽确定光纤 SBS 阈值的新方法

李永倩, 李晓娟, 安琪, 张立欣

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 针对传统的通过功率信息测量所得受激布里渊散射阈值偏高的问题, 提出了一种利用布里渊散射谱宽确定光纤受激布里渊散射阈值的新方法。分析了本地外差检测的原理及布里渊散射谱宽与入纤光功率的关系; 设计了基于本地外差检测的布里渊散射谱测量系统, 在常温下对不同长度标准单模光纤的受激布里渊散射阈值进行了测量。实验结果表明: 当光纤长度分别为 48.8 km 和 9.5 km 时, 根据功率信息获得的受激布里渊散射阈值对应的布里渊散射谱宽均接近恒定值 10 MHz, 此时已发生严重的泵浦耗尽效应。利用布里渊散射谱表现出的低入纤功率时谱宽的线性下降特性和高入纤功率时谱宽的功率无关特性确定的两种光纤长度下的受激布里渊散射阈值分别为 1.12 mW 和 3.8 mW, 对应的布里渊散射谱宽分别为 24.86 MHz 和 23 MHz, 其值近似等于布里渊自然线宽。文中的研究结果对布里渊光时域反射系统最大入纤光功率的确定具有重要的参考价值。

关键词: 光纤; 受激布里渊散射阈值; 外差检测; 布里渊散射谱宽

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0222001

New method for the determination of SBS threshold in an optical fiber by employing Brillouin spectrum width

Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi, Zhang Lixin

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To solve the problem that the obtained stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold from the measurement of backscattered power and forward transmitted power was higher than its real value, a new method employing Brillouin scattering spectrum width for fiber SBS threshold determination was proposed. The principle of local optical heterodyne detection and the relationship of the Brillouin scattering spectrum width with the fiber input power were theoretically analyzed. Experimental setup for Brillouin scattering spectrum measurement based on local optical heterodyne detection was designed, and the SBS thresholds of two standard single-mode fibers with different length were measured at room temperature. The results show that the Brillouin scattering spectrum widths corresponding to the SBS thresholds of 48.8 km and 9.5 km long fibers obtained from the power information are all approximate to a constant value of 10 MHz, and the serious pump depletion effect has occurred. The SBS thresholds are 1.12 mW and 3.8 mW for 48.8 km and 9.5 km long fibers determined by using the characteristics of the linear decline of Brillouin scattering spectrum

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61377088); 河北省自然科学基金(F2014502098, F2015502059);

中央高校基本科研业务费专项资金(2014XS77)

作者简介: 李永倩(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光通信与光传感方面的研究。Email: liyongqian1958@163.com

通讯作者: 李晓娟(1987-), 女, 博士生, 主要从事光通信与光传感方面的研究。Email: dztxlxj@126.com

widths at low fiber input power and the power independence of spectrum widths at high input power presenting in the Brillouin scattering spectra. The corresponding Brillouin spectrum widths are 24.86 MHz and 23 MHz, respectively, which are approximately equal to the natural Brillouin linewidth. The results of this study can provide a theoretical basis for the determination of the maximum fiber input power in Brillouin optical time domain reflectometer system.

Key words: fiber optics; stimulated Brillouin scattering threshold; heterodyne detection; Brillouin scattering spectrum width

0 引言

受激布里渊散射(SBS)是光纤中的泵浦波、斯托克斯(Stokes)波通过声波发生的非线性作用,是光纤中一种常见的非线性现象^[1-2]。当光纤注入功率增加到一定程度时,SBS 将大部分泵浦波功率转移至背向 Stokes 波,从而限制光纤传感和光纤通信距离,降低系统性能。因此,关于光纤 SBS 阈值的深入研究十分必要。近年来,光纤 SBS 在光纤激光器、滤波器和传感器等领域的应用引起了科研工作者极大的关注^[3-10],众多学者开展了 SBS 阈值测量方法的研究。

1972 年,Smith R G 等提出了 SBS 阈值的增益模型^[11],并用通用计算模型 $P_{th}=21KA_{eff}/(g_B L_{eff})$ 对损耗系数为 20 dB/km 的光纤的 SBS 阈值进行了估算,式中 P_{th} 为 SBS 阈值, K 为偏振因子, A_{eff} 为光纤有效纤芯面积, g_B 为布里渊增益峰值, L_{eff} 为光纤有效作用长度,但该理论估计算法不适用于目前光纤传感和光纤通信所用的低损耗光纤。2000 年,Lee C C 等利用布里渊光时域反射(BOTDR)系统测量沿光纤分布的布里渊散射功率,从而确定不同光纤 SBS 阈值的差异,该方法与传统测量方法相比误差小于 0.1 dB^[12],但不能直接测量不同长度光纤的 SBS 阈值。2008 年,Shimizu T 等利用前向传输光载噪比的下降点确定 SBS 阈值^[13],但通过该方法获得的光纤 SBS 阈值近似等于通用计算模型确定的 SBS 阈值。对于实际的基于光纤布里渊散射的传感系统,参考文献[11]和[13]测得的光纤 SBS 阈值偏高,此时系统已发生严重的泵浦耗尽效应,系统性能大幅度降低。

针对传统的通过功率信息测量所得受激布里渊散射阈值偏高的问题,文中提出一种利用布里渊散射谱宽确定光纤 SBS 阈值的新方法。在研究本地外差检测原理的基础上,分析布里渊散射谱宽与入纤

光功率的关系。设计并搭建基于外差检测的布里渊散射谱测量系统,在常温下对 48.8 km 和 9.5 km 标准单模光纤的 SBS 阈值进行测量。

1 理论分析

1.1 本地外差检测

假设分布反馈半导体激光器(DFB-LD)输出光在光纤中传输时产生的布里渊散射光场强为:

$$E_B(t)=E_S(t)+E_{AS}(t)=E_S \exp\{i[2\pi(\nu_0-\nu_B)t+\phi_S]\}+E_{AS} \exp\{i[2\pi(\nu_0+\nu_B)t+\phi_{AS}]\} \quad (1)$$

式中: E_S 和 E_{AS} 分别为 Stokes 光和反斯托克斯(Anti-Stokes)光场强; ν_0 为激光器输出光中心频率; ν_B 为布里渊频移; ϕ_S 和 ϕ_{AS} 分别为 Stokes 光和 Anti-Stokes 光相位。用于外差检测的本振光场强可以表示为:

$$E_L(t)=E_L \exp[i(2\pi\nu_0 t+\phi_L)] \quad (2)$$

式中: E_L 为本振光场强; ϕ_L 为本振光相位。考虑到在自发布里渊散射中有 $E_S=E_{AS}$, 这里仅通过考虑本振光和 Stokes 光的外差信号来分析本振光和布里渊散射光的外差输出。本振光和 Stokes 光在光电检测器(PD)中进行相干检测时的输出光电流为:

$$i(t)=R[\overline{E_L(t)+E_S(t)}][E_L(t)+E_S(t)]=\{\overline{E_L} \exp[-i(2\pi\nu_0 t+\phi_L)]+\overline{E_S} \exp[-i(2\pi(\nu_0-\nu_B)t+\phi_S)]\} \times \{E_L \exp[i(2\pi\nu_0 t+\phi_L)]+E_S \exp[i(2\pi(\nu_0-\nu_B)t+\phi_S)]\} = R\{P_L+P_S+2\sqrt{P_L P_S} \cos[2\pi\nu_B t+\phi_{LS}(t)]\} \quad (3)$$

式中: $\overline{}$ 表示共轭; R 为 PD 响应度; P_L 和 P_S 分别为本振光和 Stokes 光功率; $\phi_{LS}(t)$ 为本振光和 Stokes 光的相位差,其值服从均匀分布^[14]。等号右端第三项为携带布里渊频移及功率信息的交流项。若 PD 为交流耦合,则滤除公式(3)中的直流项后,PD 输出光电流为:

$$i_{AC}(t)=2R\sqrt{P_L P_S} \cos[2\pi\nu_B t+\phi_{LS}(t)] \quad (4)$$

1.2 布里渊散射谱宽

在基于布里渊散射的光纤传感系统中, 泵浦光与 Stokes 光之间 SBS 作用的稳态耦合波方程为^[15]:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dz} &= -\frac{g(v)}{A_{\text{eff}}} P_s P - \alpha P \\ \frac{dP_s}{dz} &= -\frac{g(v)}{A_{\text{eff}}} P_s P + \alpha P_s \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $P(z, v)$ 和 $P_s(z, v)$ 分别为泵浦光功率和泵浦光在光纤散射点 z 处产生的 Stokes 光功率; α 为光纤损耗系数。假设声波以 $\exp(-\Gamma_B t)$ 衰减, 其中 Γ_B 为声子衰减速率, 则布里渊增益谱服从洛伦兹分布, 因而光频 v 处的功率增益 $g(v)$ 可以表示为^[16]:

$$g(v) = \frac{g_B \cdot (\Delta v_B / 2)^2}{(v - v_B)^2 + (\Delta v_B / 2)^2} \quad (6)$$

式中: $\Delta v_B = 16\pi^2 n^2 \eta / (\lambda^2 \rho)$ 为光纤布里渊散射谱自然线宽, 其中 n 为光纤纤芯折射率; η 为石英光纤材料的粘滞系数, 其取值为 $3 \sim 4 \text{ dPa} \cdot \text{s}$; λ 为激光器输出中心波长; ρ 为光纤密度^[17]; 对于标准单模光纤, 在 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时的布里渊自然线宽为 20 MHz ^[18]。当光纤注入光功率小于 SBS 阈值时, SBS 作用对泵浦光的影响可以忽略不计。假设泵浦光为连续光, 线宽远小于 Δv_B , 则光纤 z 处的泵浦光功率为:

$$P(z, v) = P_p \cdot \delta(v - v_0) \exp(-\alpha z) \quad (7)$$

式中: P_p 为 $z=0$ 时的入纤光功率。将公式(6)和公式(7)代入公式(5), 求得光纤始端的 Stokes 光功率谱为:

$$P_s(0, v) = P_s(L, v) \cdot \exp\left\{ \frac{g_B P_p L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} \cdot g(v) \cdot \delta(v - v_0) - \alpha L \right\} \quad (8)$$

式中: $P_s(L, v)$ 为光纤末端 $z=L$ 处的 Stokes 光功率; L 为光纤长度, $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$ 为光纤有效作用长度。根据 $P_s(0, v) = P_s(L, v) \cdot \exp[G(v) - \alpha L]$ 可直接获得 SBS 增益 $G(v)$, 在频域内对 $G(v)$ 进行积分得到 Stokes 光的单通增益 $G = g_B P_p L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}}$ 。在考虑单端 SBS 时, 可将自发布里渊散射看作激励 SBS 的 Stokes 光, 根据参考文献[19]可得 Stokes 光场谱密度函数 $S_B(\omega)$ 的显式表达式为:

$$S_B(\omega) = \frac{8\pi\hbar\omega_s \bar{n}(n+1)}{ncA_{\text{eff}}\Gamma_B} \cdot \left\{ \exp\left[\frac{G(\Gamma_B/2)^2}{\omega^2 + (\Gamma_B/2)^2} \right] - 1 \right\} \quad (9)$$

式中: \hbar 为普朗克常数; ω_s 为 Stokes 光角频率; \bar{n} 为自发布里渊散射光子数; c 为真空中的光速。当入纤光功率较低(增益 $G \ll 1$)时, 公式(9)可以表示为:

$$S_B(\omega) = \frac{2\pi\hbar\omega_s \bar{n}(n+1)G}{ncA_{\text{eff}}} \cdot \frac{\Gamma_B}{\omega^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad (10)$$

由公式(10)可知, 布里渊散射谱服从洛伦兹分布, 具有自发布里渊散射特性; 布里渊散射功率随入纤光功率的增加近似线性增加。当增益 G 远大于 1 且 $|\omega| \ll \Gamma_B$ 时, 公式(9)表示为:

$$S_B(\omega) = \frac{8\pi\hbar\omega_s \bar{n}(n+1)}{ncA_{\text{eff}}\Gamma_B} e^G \exp\left[\frac{4G \cdot \omega^2}{\Gamma_B^2} \right] \quad (11)$$

由公式(11)可知, 当入纤光功率较高时, 布里渊散射谱服从高斯分布, 并且布里渊散射功率随入纤光功率的增加呈非线性增长关系; 由公式(11)可得, 布里渊谱宽 $\Delta v_B'$ 随入纤光功率即 G 的增加按 $\Delta v_B \cdot (\ln 2 / G)^{1/2}$ 的规律变化。

当采用本地外差检测布里渊散射谱时, 由于本地外差布里渊时域信号为本振光和布里渊散射光信号的乘积, 因此外差布里渊散射谱为激光器输出谱与布里渊散射谱的卷积; 又由于激光器线宽较窄, 因此布里渊散射谱特性可通过测量的外差布里渊散射谱来体现。

2 实验结果与分析

为了实现文中提出的利用布里渊散射谱宽的光纤 SBS 阈值测量, 设计了如图 1 所示的基于外差检测的布里渊散射谱测量系统。系统采用线宽 1.86 MHz 、中心波长 1550.12 nm 和输出功率 12.7 dBm 的 DFB-LD 光源, LD 输出的连续光被 95/5 的耦合器 (Coupler) 1 分成两路。95% 的输出光经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大和光栅滤波器 (FBGF) 滤除自发辐射噪声后, 经可调衰减器 (VOA) 1、耦合器 2 和环形器 (Circulator) 1 端注入被测光纤, 被测光纤末端熔接 APC 接头以消除末端反射。两段被测光纤为标准单模光纤 SMF1 和 SMF2, 其参数如表 1 所示。VOA1 用来调节注入单模光纤的泵浦光功率, 并通过光功率计测量 95/5 耦合器 2 的 5% 端的输出功率, 从而获得入纤光功率值; 用光功率计分别测量光纤末端的前向传输光功率及环形器 3 端输出的背向散射光功率, 以便描绘二者与输入光功率的关系曲线。耦合器 1 的 5% 端输出光直接用作外差检测的本振光, 经扰偏器 (PS) 后与背向散射光一起进入带宽 11.9 GHz 的 PD 进行外差检测, 通过频谱分析仪 (ESA) 测量不同入纤光功率时的布里渊散射谱。光路中 PS 的作用是使本振光偏振态接近随机状态, 从而减小偏振衰落的影响。

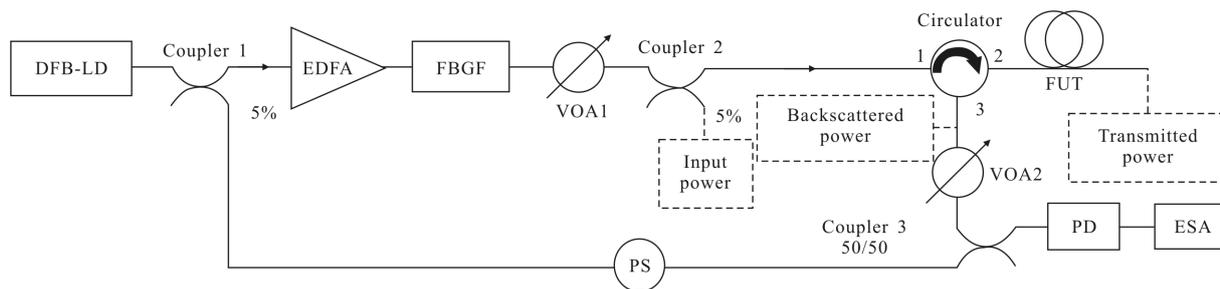


图 1 基于本地外差检测的布里渊散射谱测量系统

Fig.1 Experimental setup for Brillouin scattering spectrum measurement based on local optical heterodyne detection

表 1 测试光纤的参数

Tab.1 Test fiber parameters

| Parameters | SMF1 | SMF2 |
|--|---------|---------|
| Mode field diameter / μm | 10.31 | 10.31 |
| Fiber loss/ $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ | 0.184 1 | 0.184 1 |
| Effective refractive index | 1.467 | 1.467 |
| Fiber length/km | 48.8 | 9.5 |

通过功率测量数据可描绘出如图 2 所示的不同被测光纤长度时的背向散射光功率和前向传输光功率

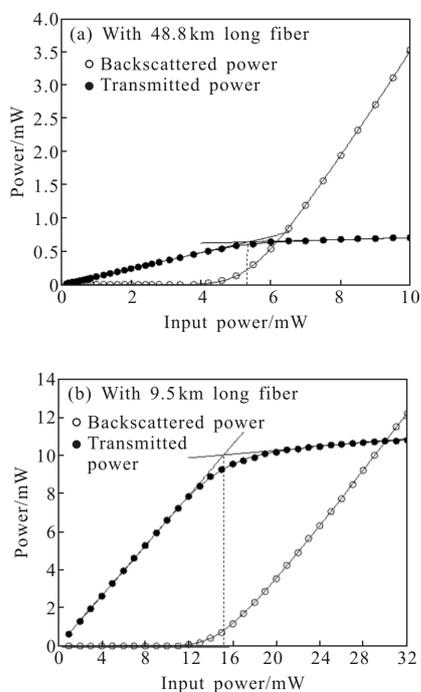


图 2 前向传输光和背向散射光功率与入纤光功率的关系

Fig.2 Forward transmitted and backscattered power versus input power with different fiber length

率与入纤光功率的关系曲线。由图 2 可知,当注入功率较低时,不同长度光纤的背向散射光和前向传输光的功率均随入纤光功率的增加线性增大;而当注入功率增加到一定程度时,光纤的折射率会发生变化,产生电致伸缩效应,由此产生的 SBS 作用将导致绝大部分泵浦光功率转移至背向 Stokes 光,致使背向散射光功率急剧增大,前向传输光功率趋于恒定值。根据图 2 中的拟合曲线,光纤 SBS 阈值可通过 3 种方法判定:背向散射光功率与前向传输光功率相等时对应的入纤光功率 P_{thp1} ^[11];背向散射光功率开始迅速增加时对应的入纤光功率 P_{thp2} ^[2];低入纤光功率部分的前向传输光功率线性拟合曲线与高入纤光功率部分的前向传输光功率线性拟合曲线的交点对应的入纤光功率 P_{thp3} ^[13]。根据上述 3 种光纤 SBS 阈值的判定方法可得,两种长度被测光纤的 SBS 阈值如表 2 所示。

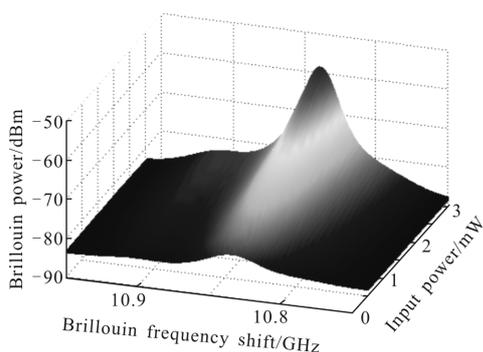
表 2 不同长度光纤的 SBS 阈值

Tab.2 Fiber SBS threshold with different length

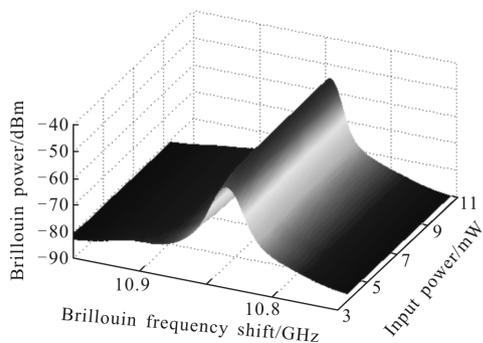
| SBS threshold /mW | SMF1 | SMF2 |
|-------------------|------|-------|
| P_{thp1} | 6.2 | 30.02 |
| P_{thp2} | 5.38 | 14.2 |
| P_{thp3} | 5.38 | 15.14 |

为了说明文中提出的基于布里渊散射谱宽的 SBS 阈值确定方法,利用图 1 所示系统对两种长度光纤的布里渊散射谱进行了测量。当光纤长度为 48.8 km 时,调节 VOA1 使入纤光功率由 0.2 mW 按一定间隔增加至 10 mW。低入纤功率时,由于光纤的注入光波场与弹性声波场之间的耦合作用较弱,ESA 测量得到的布里渊散射谱较宽、峰值功率较低,

峰值功率随入纤光功率的增加近似线性增加且频谱呈洛伦兹型分布,如图 3(a)所示;随着入纤光功率的增加,布里渊散射谱宽变窄,频谱由洛伦兹型向高斯型转变,上述实验结果与公式(10)和(11)相吻合。由于随入纤光功率的增加背向散射光功率急剧增大,考虑到 PD 输入光功率的限制,通过 VOA2 将高入纤光功率时的背向散射光功率衰减至与图 3(a)近似相等的值,此时 ESA 观测到的布里渊散射谱如图 3(b)所示,不同入纤功率时的频谱均近似呈高斯分布。



(a) 低入纤光功率
(a) At low input power



(b) 高入纤光功率
(b) At high input power

图 3 不同入纤功率时的布里渊散射谱

Fig.3 Brillouin scattering spectra at different input power

对两种长度的被测光纤在不同入纤光功率时的外差布里渊散射谱测量数据进行拟合,可得如图 4 所示的布里渊散射谱宽与入纤光功率的关系。由图 4 可知,因低入纤功率时的光波场与声波场的弱耦合作用,布里渊散射谱较宽,其值与入纤光功率近似呈线性下降关系。随入纤光功率的增加,SBS 作用导致布里渊散射谱宽开始按指数规律降低,当入纤光功率增加到一定值(即高增益)时,由于背向布里渊散

射功率的迅速增加导致泵浦耗尽效应,从而限制了高增益时谱宽的窄化,因此布里渊散射谱宽趋近于恒定值 10 MHz。根据表 2 数据、图 2 和图 4 曲线可知,当入纤光功率达到传统方法确定的 SBS 阈值时,3 种判定方法对应的布里渊散射谱宽均近似为 10 MHz,此时已发生严重的泵浦耗尽效应,这将导致布里渊光纤传感系统性能大幅度降低。

利用图 4 所示的光纤布里渊散射谱表现出的低入纤功率时谱宽的线性下降特性和高入纤功率时谱宽的功率无关特性,通过低入纤功率部分的布里渊散射谱宽线性拟合曲线与高入纤功率部分的布里渊散射谱宽线性拟合曲线的交点确定的 SBS 阈值 P_{thw1} 和 P_{thw2} 及对应的布里渊谱宽如表 3 所示。由表 3 可知,不同长度光纤的 SBS 阈值对应的布里渊散射谱宽均接近于布里渊自然线宽 20 MHz^[18],因此通过谱宽信息判定的光纤 SBS 阈值可以克服传统方法确定的 SBS 阈值偏高的问题,适用于在实验设计中确定 BOTDR 系统的最大入纤光功率,从而可在保证不发生单端 SBS 的前提下,获得尽可能高的入纤光功率和系统信噪比。

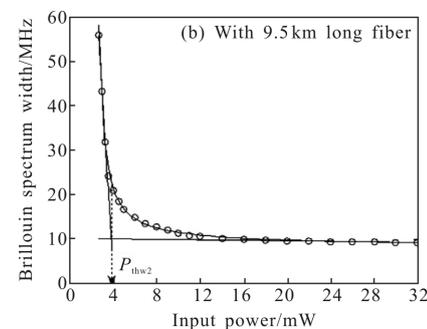
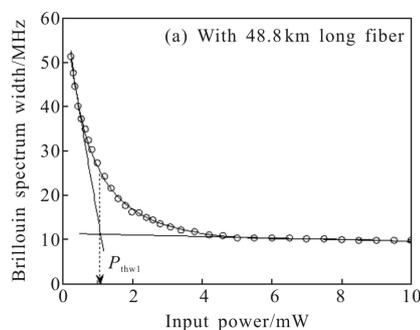


图 4 不同长度光纤布里渊谱宽与入纤光功率的关系

Fig.4 Brillouin scattering spectrum width versus input power with different fiber length

表 3 SBS 阈值及对应的布里渊谱宽
Tab.3 SBS threshold and the corresponding Brillouin spectrum width

| Fiber | SBS threshold/mW | Brillouin spectrum width/MHz |
|-------|------------------|------------------------------|
| SMF1 | 1.12 | 24.86 |
| SMF2 | 3.8 | 23 |

3 结 论

针对传统的通过功率信息测量所得 SBS 阈值偏高的问题,文中提出了一种利用布里渊散射谱宽确定光纤 SBS 阈值的方法。分析了本地外差检测的原理以及布里渊散射谱宽与入纤光功率的关系。设计了基于外差检测的布里渊散射谱测量系统,在常温下对不同长度标准单模光纤的 SBS 阈值进行了测量。实验结果表明,当光纤长度分别为 48.8 km 和 9.5 km 时,根据 3 种功率信息判定方法获得的 SBS 阈值处的前向传输光功率均已发生严重的衰减,且对应的布里渊散射谱宽接近恒定值 10 MHz。利用光纤布里渊散射谱表现出的低入纤功率时谱宽的线性下降特性和高入纤功率时谱宽的功率无关特性,通过低、高入纤功率两部分的布里渊散射谱宽线性拟合曲线的交点确定的两种光纤长度下的 SBS 阈值分别为 1.12 mW 和 3.8 mW,对应的布里渊谱宽分别为 24.86 MHz 和 23 MHz,其值近似等于布里渊自然线宽。因此,利用谱宽信息判定的光纤 SBS 阈值可克服传统 SBS 阈值偏高的问题,适用于 BOTDR 系统最大入纤光功率的确定。

参考文献:

[1] Singh S P, Gangwar R, Singh N. Nonlinear scattering effects in optical fibers [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2007, 74: 379-405.

[2] 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.

[3] Zhao Lijuan, Li Yongqian, Xu Zhiniu. Theoretical calculation of Brillouin scattering spectrum and SBS threshold in multimode fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 93-98. (in Chinese)

赵丽娟,李永倩,徐志钮.多模光纤布里渊散射谱及阈值理论计算[J].*红外与激光工程*, 2015, 44(S): 93-98.

[4] Norcia S, Tonda-Goldstein S, Dolfi D, et al. Efficient single-mode Brillouin fiber laser for low-noise optical carrier reduction of microwave signals [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1888-1890.

[5] Tanemura T, Takushima Y, Kikuchi K. Narrowband optical filter, with a variable transmission spectrum, using stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(17): 1552-1554.

[6] Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian, et al. Application of Brillouin scattering on underwater laser imaging detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 665-668. (in Chinese)

张毅,柏连发,陈钱,等.布里渊散射在水下激光成像探测中的应用[J].*红外与激光工程*, 2009, 38(4): 665-668.

[7] Shi J L, Tang Y J, Wei H J, et al. Temperature dependence of threshold and gain coefficient of stimulated Brillouin scattering in water [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2012, 108(4): 717-720.

[8] Parvizi R, Harun S W, Ali N M, et al. Investigation on threshold power of stimulated Brillouin scattering in photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2012, 123(13): 1149-1152.

[9] Sanchez-Lara R, Alvarez-Chavez J A, Mendez-Martinez F, et al. Threshold and maximum power evolution of stimulated Brillouin scattering and Rayleigh backscattering in a single mode fiber segment[J]. *Laser Physics*, 2015, 25(3): 035103

[10] Hu J H, Xia L, Yang L, et al. Strain-induced vibration and temperature sensing BOTDA system combined frequency sweeping and slope-assisted techniques [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13610-13620.

[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] Lee C C, Chi S. Measurement of stimulated-Brillouin-scattering threshold for various types of fibers using Brillouin optical-time-domain reflectometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(6): 672-674.

[13] Shimizu T, Nakajima K, Shiraki K, et al. Evaluation methods and requirements for the stimulated Brillouin scattering threshold in a single-mode fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2008, 14(1): 10-15.

[14] Li C L, Lu Y G, Zhang X P. SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometer using multi-wavelength

- coherent detection [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48 (18): 1139–1141.
- [15] Bao X Y, Dhliwayo J, Heron N, et al. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1340–1348.
- [16] Iida D, Ito F. Detection sensitivity of Brillouin scattering near Fresnel reflection in BOTDR measurement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(4): 417–424.
- [17] Nguyen-Vo N -M, Pfeifer S J. A model of spontaneous Brillouin scattering as the noise source for stimulated scattering [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(2): 508–514.
- [18] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, et al. Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(3): 185–187.
- [19] Boyd R W, Rzazewski K, Narum P. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering [J]. *Physical Review A*, 1990, 42(9): 5514–5520.