

多模光纤布里渊散射谱及阈值理论计算

赵丽娟¹, 李永倩¹, 徐志钮²

- (1. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003;
2. 华北电力大学 河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 从受激布里渊散射耦合波导方程出发建立了多模光纤布里渊频移、泵浦波、斯托克斯波和声场理论模型, 分析对比了多模光纤与单模光纤布里渊散射谱的频移、增益、线宽和受激布里渊散射阈值, 并进一步分析了光纤长度、衰减系数、数值孔径对多模光纤受激布里渊散射阈值的影响。结果表明, 多模光纤多个模式布里渊散射谱叠加造成其总的布里渊散射谱展宽, 不再满足洛伦兹分布, 其线宽增加至原来数倍、峰值增益和频移降低; 渐变折射率多模光纤 SBS 阈值一般在 80 mW 以上, 远大于单模光纤; 纤芯直径相同时, 相比于阶跃折射率多模光纤, 数值孔径对渐变折射率多模光纤 SBS 阈值的影响较大, 后者更易发生受激布里渊散射效应。理论计算与已报道测量结果比较验证了理论分析的正确性。文中研究为建立基于多模光纤的布里渊散射分布式传感系统奠定了理论基础。

关键词: 多模光纤; 布里渊散射谱; 受激布里渊散射阈值; 数值孔径

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0093-06

Theoretical calculation of Brillouin scattering spectrum and SBS threshold in multimode fiber

Zhao Lijuan¹, Li Yongqian¹, Xu Zhiniu²

- (1. Department of Electronics & Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Based on the coupled wave equation of Stimulated Brillouin Scattering (SBS), the models of Brillouin frequency shift, the pump wave, Stokes wave and the acoustic field in multimode fiber were built. Analysis and comparison of the Brillouin spectrum frequency, peak gain, linewidth and SBS threshold between the multimode and single mode fiber were conducted. And then the influences of optical fiber length, attenuation coefficient and numerical aperture on the SBS threshold were discussed. The results show that, multiple modes of the Brillouin scattering superposition lead to spectrum broadening, linewidth increase, peak gain decrease and frequency shift reduce. The SBS threshold of the graded index multimode optical fiber is larger than 80 mW, which is far larger than the single mode fiber. When the core diameter is same, the graded index multimode fiber is more susceptible to take

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(61377088); 河北省自然科学基金(F2015502059); 河北省教育厅项目(2014182);
中央高校基本科研业务费专项资金(13MS61)

作者简介: 赵丽娟(1981-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事光纤通信与传感技术方面的研究。Email: hdzlj@126.com

place the SBS effect, whose numerical aperture has more influences on SBS threshold than the step index multimode fiber. The reported measurement results validate the theoretical analysis. The studies in this paper laid a theoretical foundation for the distributed Brillouin scattering sensing system based on multimode fiber.

Key words: multimode fiber; Brillouin scattering spectrum; Stimulated Brillouin Scattering threshold; numerical aperture

0 引言

分布式光纤传感技术利用光纤中的光散射或非线形效应随外部环境的变化进行传感,充分发挥了光纤空间连续分布的特点,可实现全分布式传感^[1],且同时具有一般光纤传感器抗电磁干扰、耐腐蚀以及电绝缘性好等优点。目前,瑞利散射和拉曼散射分布式光纤传感技术研究已趋于成熟;由于布里渊散射分布式光纤传感技术可实现温度和应变的长距离连续测量,且测量精度、空间分辨率均高于上述两种传感技术,因此得到了国内外广泛关注和研究^[2-3]。

目前针对光纤布里渊散射分布式传感技术的研究主要集中在单模光纤,而对多模光纤的研究较少。但是,随着人们对网络信息容量的需求急剧增加,单模光纤通信容量已达到香农极限^[4]。若能充分利用光纤中可利用的所有自由度,尤其是利用多模光纤中的多种模式彼此分离地承载信号,充分利用光纤带宽,则可能给光纤容量带来新的飞跃。因此多模光纤重新走进人们的视野,如何利用其提升传输容量和提高系统性能的研究已引起世界范围的广泛关注^[5-6],相应地,基于多模光纤布里渊散射分布式传感技术的研究也必将开始吸引更多学者的更大兴趣。但是,目前针对光纤布里渊散射分布式传感技术的研究主要集中在单模光纤,而对多模光纤的研究较少。由于多模光纤中存在多个传输模式,其布里渊散射谱及其阈值特性与单模光纤存在很大区别,因此迫切需要开展深入地理论研究。

1998年,S. S. Sodhi等^[7]首次利用现有布里渊光时域反射仪测量了多模光纤的布里渊频移以及布里渊散射谱的应变特性。2007年,P. Lenke等^[8]研究了渐变折射率光纤基模在1319 nm波长的弯曲损耗和布里渊散射谱,并实验测量了布里渊散射谱的温

度和应变特性。2011年,L. I. Victor等^[9]实验研究了瑞典抗高温多模光纤的受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)阈值、布里渊散射谱及其温度特性。三人只是针对多模光纤布里渊散射特性进行了实验测量,没有相应的理论分析。

文中理论分析和计算了多模光纤的布里渊散射谱及SBS阈值特性,从多模光纤存在多个传输模式的角度出发,建立了多模光纤布里渊频移、泵浦波、斯托克斯波声波场理论模型。针对多个模式导致的布里渊散射谱展宽进行了详细的分析,并根据多模光纤布里渊峰值增益计算得到多模光纤SBS阈值与光纤长度、衰减系数、数值孔径之间的变化关系曲线。理论分析结果与他人报道测量结果进行了对比,既验证了理论分析的合理性,同时也验证了已报道实验结果的可靠性。文中研究为建立基于多模光纤的布里渊分布式传感系统奠定了理论基础。

1 多模光纤布里渊散射理论模型

SBS过程可以经典地描述为泵浦波和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,反过来声波调制介质的折射率。泵浦波感应的折射率光栅通过布拉格衍射散射泵浦波,由于以声波 V_a 移动的光栅的多普勒位移,散射光产生了频率下移。同样,在量子力学中,这个散射过程可以看成是一个泵浦光子的湮灭,同时产生一个斯托克光子和一个声学声子。

对于多模光纤,当波长为 λ 的泵浦光耦合进其中后,激发了多个传导模式,光纤中的光学光子和光纤中的声学声子发生非弹性碰撞而产生斯托克斯光同样激发了多个传导模式,泵浦光任一传导模 x (其有效折射率为 n_x)与斯托克光任一传导模 y (其有效折射率为 n_y)会通过声波进行非线性相互作用产生自

发布里渊频移 ν_{By} , 且两个模式之间的夹角为 θ_{xy} 。

$$\nu_{By} = \frac{V_a}{\lambda} (n_x + n_y) \sin \frac{\theta_{xy}}{2} \quad (1)$$

忽略光纤中的其它非线性效应, 通过解光在光纤中传输满足的麦克斯韦方程组, 以及电致伸缩引起声波满足的纳维斯托克斯方程得到 SBS 耦合波方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \tilde{E}_p}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{E}_p}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_{NL,p}}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \tilde{E}_s}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{E}_s}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_{NL,s}}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \tilde{\rho}}{\partial z^2} - \Gamma \nabla^2 \left(\frac{\partial^2 \tilde{\rho}}{\partial z^2} \right) - v_A^2 \nabla^2 \tilde{\rho} = \nabla \cdot L \end{cases} \quad (2)$$

式中: 符号 p 和 s 分别代表泵浦波和斯托克斯波; \tilde{E} 为磁场矢量; $\tilde{\rho}$ 为介质的波动密度; P_{NL} 为非线性偏振; Γ 为声波的消逝系数; ∇^2 为拉普拉斯算子, $L = \nabla p_{st} = \nabla \left(-\frac{\gamma}{8\pi} \langle (E_p E_s^*) \rangle \right)$ 为本征噪声项, 用来描述声波的热激励, 其中表示电致伸缩系数。

当泵浦光耦合进多模光纤时, 会激励出多种模式的光并在该光纤中传输, 如果多模光纤足够长可假设泵浦光能量平均分配到各个模式中, 当产生 SBS 时, N 个模式的泵浦光对应产生 N 个模式的斯托克斯光, 因此泵浦波、斯托克斯波和声波的表达式分别表示为:

$$E_p(z, t) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_y \tilde{E}_{p,x}(z) \exp(i\omega_{p,x}t - i\beta_{p,x}z) + c.c. \right\} \quad (3)$$

$$E_s(z, t) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_y \tilde{E}_{s,y}(z) \exp(i\omega_{s,y}t - i\beta_{s,y}z) + c.c. \right\} \quad (4)$$

$$\rho(z, t) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_x \sum_y \tilde{\rho}_{xy}(z) \exp(i2\pi\nu_{By}t - i\beta_{xy}z) + c.c. \right\} \quad (5)$$

式中: $E_{p,s}(z, t)$ 、 $\rho(z, t)$ 分别为泵浦波、斯托克斯波和声波的幅度; ρ_0 为平均介质密度; $\omega_{p,x}$ 、 $\omega_{s,y}$ 分别为泵浦波和斯托克斯波频率, $\beta_{p,x}$ 、 $\beta_{s,y}$ 和 β_{xy} 分别为泵浦波、斯托克斯波和声波的传播常数; $c.c.$ 为复共轭。将公式(3)、(4)和(5)分别代入 SBS 耦合波方程(2)中, 建模并求解方程, 从而可得到各个模式的布里渊散射谱的分布情况。

2 布里渊散射谱

2.1 单模光纤布里渊散射谱

对于单模光纤, 其布里渊散射谱满足洛伦兹分布

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (6)$$

式中: ν 为频率值, GHz; ν_B 为布里渊频移, 它表征布里渊谱的中心频率相对入射光频率的变化量 GHz; $\Delta\nu_B$ 为布里渊谱的 3dB 带宽, 它与声子寿命有关, GHz; g_0 为布里渊散射谱的峰值增益, 即当 $\nu = \nu_B$ 时:

$$g_0 = g_B(\nu_B) = \frac{2\pi^2 n^7 p_{12}^2}{c \lambda^2 \rho_0 V_a \Delta\nu_B} \quad (7)$$

式中: c 为真空中光速; V_a 为光纤中声波的纵模声速; p_{12} 为光纤的弹光系数; ρ_0 为光纤材料的密度; λ 为注入光纤泵浦光波长; n 为泵浦波长 λ 处的光纤折射率。对于普通单模光纤, 其纤芯折射率为 1.46, 布里渊线宽 $\Delta\nu_B$ 为 38.4 MHz, 布里渊频移约为 10.8 GHz。其布里渊散射峰值增益为 5×10^{-11} m/W, 其布里渊散射谱如图 1 所示。

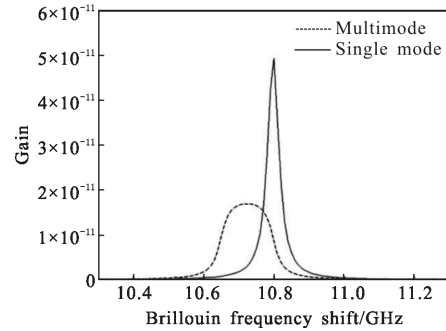


图 1 单模光纤与多模光纤布里渊散射谱

Fig.1 Brillouin scattering spectrum of single mode fiber and multimode fiber

2.2 多模光纤布里渊散射谱

对于多模光纤, 当波长为 λ 的泵浦光耦合进其中后, 激发了多个传导模式, 光纤中的光学光子 and 光纤中的声学声子发生非弹性碰撞而产生斯托克斯光同样激发了多个传导模式, 泵浦光任一传导模 x 与斯托克斯光任一传导模 y 两个模式之间的夹角为 θ_{xy} 。由于数值孔径 NA 的限制, θ_{xy} 在一定范围内发生变化, 最大散射角 θ_{max} 发生在入射泵浦光的背向, 此时 $\theta_{max} = \pi$; 最小散射角 $\theta_{min} = \pi - 2\theta_c$, 其中 θ_c 为全反射临界角的余角:

$$\theta_c = \arcsin \left(1 - \frac{n_{cl}^2}{n_{co}^2} \right)^{1/2} = \arcsin(NA/n_{co}) \quad (8)$$

当 θ_{xy} 取最大值时, 布里渊频移达到最大值:

$$\nu_{B0} = \nu_B(\pi) = \frac{2n_{co}V_a}{\lambda} \quad (9)$$

当 θ_{xy} 取最小值时, 布里渊频移达到最小值:

$$\nu_{Bc} = \nu_B(\pi - 2\theta_c) = \frac{2n_{co}V_a \sqrt{1 - \frac{(NA)^2}{n_{co}^2}}}{\lambda} \quad (10)$$

多个模式、多个散射角的布里渊散射谱叠加在一起, 造成总的布里渊散射谱展宽, 不再满足洛伦兹分布。但是目前针对多模光纤的布里渊散射谱理论计算公式推导较复杂, 未见公开报道, 文中借鉴了光纤波导不均匀导致其布里渊谱展宽公式^[10]来描述多模光纤布里渊散射谱, 其表达式为:

$$g(\nu) = g_0 \frac{\Delta\nu_B/2}{\nu_{B0} - \nu_{Bc}} \times \left[\arctan\left(\frac{\nu_{B0} - \nu}{\Delta\nu_B/2}\right) - \arctan\left(\frac{\nu_{Bc} - \nu}{\Delta\nu_B/2}\right) \right] \quad (11)$$

由图 1 可知, 50/125 μm 多模光纤布里渊散射谱线宽约为 130 MHz, 约为单模光纤布里渊散射谱线宽的 3 倍; 但其布里渊峰值增益约为单模光纤峰值增益的 1/3, 其布里渊中心频移为 10.72 GHz, 相比于单模光纤布里渊频移 10.8 GHz 降低了 80 MHz (忽略了各个模式折射率改变和声速改变对布里渊频移的影响)。参考文献[9]报道的实验测量多模光纤布里渊散射谱线宽是单模光纤的 2.1 倍。因此, 文中理论计算多模光纤线宽展宽倍数和实验测量结果比较吻合。二者的差距主要由于如下原因导致: 实验系统所使用的光谱仪采用单模光纤接入, 多模光纤布里渊散射光需要透镜耦合进入单模光纤, 由于多模光纤纤芯直径远大于单模光纤纤芯直径, 大量的高阶模式被衰减掉, 只有少量低阶模式耦合进光谱仪。

以上理论分析与他人实验测量结果比较吻合也在一定程度上验证了文中将光纤波导不均匀导致布里渊展宽引入到多模光纤布里渊散射谱计算的合理性, 同时也验证了前人实验结果的可靠性。

3 SBS 阈值

SBS 阈值特性是光纤通信和传感系统中一种非常重要的非线性特性, 当泵浦激光强度超过一定的激励阈值后, 就会发生 SBS 效应。光纤中的 SBS 效应是强感应声波场对泵浦光作用的结果。目前, SBS 阈值的理论估算有 Smith 模型和 Küng 模型。但是, 通常情况下这些阈值估算都可以用一个通用计算模型:

$$P_{th} = GA_{eff}/g_0L_{eff} \quad (12)$$

式中: P_{th} 为 SBS 阈值; G 为阈值增益系数 (但在一定的条件下近似为一常数, $G \approx 21$); A_{eff} 为光纤有效截面积; g_0 为光纤布里渊峰值增益; L_{eff} 是光纤的有效作用长度 $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$, L 是光纤长度, α 是光纤衰减系数。

A_{eff} 为光纤有效截面积, 通常采用高斯模场半径来计算, 阶跃折射率光纤理想高斯光束模场半径 w 可通过公式(13)来计算; 而对于渐变折射率光纤, 其理想高斯光束模场半径 w 可通过公式(14)来计算:

$$\frac{w}{a} = 0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \quad (13)$$

$$\frac{w}{a} = \sqrt{\frac{2}{V}} + \frac{0.23}{V^{3/2}} + \frac{18.01}{V^6} \quad (14)$$

式中: a 为光纤纤芯半径; V 为归一化频率, $V = k_0 a (NA)$, 其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_p$; NA 为光纤的数值孔径。

3.1 普通单模光纤 SBS 阈值

根据 ITU-T G.655 单模光纤标准建议中指出普通单模光纤的模场直径在 1 550 nm 波长范围内为 8~11 μm , 衰减系数最大值为 0.35 dB/km。为了保证单个模式的传输, 单模光纤归一化频率必须小于 2.404 83。普通单模光纤其模场半径 ω 为 4~5.5 μm 。当取普通单模光纤其模场半径 ω 为 4.5 μm 时, 根据公式(12)求得单模光纤不同长度和衰减系数下单模光纤的布里渊散射阈值随长度和衰减系数变化曲线如图 2 所示。单模光纤 SBS 阈值随着光纤衰减系数

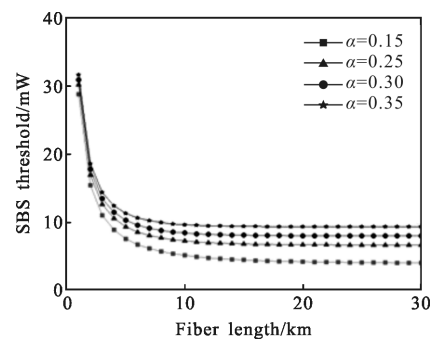


图 2 普通单模光纤 SBS 阈值变化曲线

Fig.2 SBS threshold curves of single-mode fiber

的增加而增加, 随着光纤长度的增加而下降。当衰减系数为 0.15 dB/km 时, 光纤长度对单模光纤 SBS 阈值影响较大, 随着光纤长度的增加, SBS 阈值下降趋势非常明显, 当光纤长度为 30 km 时, 普通单模光纤的 SBS 阈值低至 4 mW, 非常容易产生 SBS。当光纤

衰减系数增加至 0.35 dB/km, 光纤长度为 10 km 时, SBS 阈值功率趋向一常数 10 mW, 不再随光纤长度发生改变。所以通过以上分析可知, 光纤衰减系数和光纤长度对光纤 SBS 阈值影响明显, 衰减系数越大, SBS 阈值越容易趋向一常数。

3.2 渐变折射率多模光纤 SBS 阈值

对于多模光纤由于其纤芯直径远大于单模光纤, 其布里渊散射谱是多个模式布里渊散射谱的叠加, SBS 增益也发生了较大变化, 因此有必要分析多模光纤布里渊散射原理获得多模光纤布里渊散射增益谱计算公式, 进一步计算得到多模光纤布里渊散射谱峰值增益为 1.6675×10^{-11} m/W。

针对渐变折射率多模光纤, 其数值孔径为 0.2, 则其归一化频率为 $V = k_0 a (NA) = 20.26$, 通过公式(14)计算得其理想高斯光束模场半径 w 为 $7.9179 \mu\text{m}$, 其有效截面积 $A_{\text{eff}} = \pi w^2 = 196.9563 \mu\text{m}^2$ 。通过公式(12)求得普通 50/125 μm 渐变折射率多模光纤的布里渊散射阈值随长度和衰减系数变化曲线如图 3 所示。

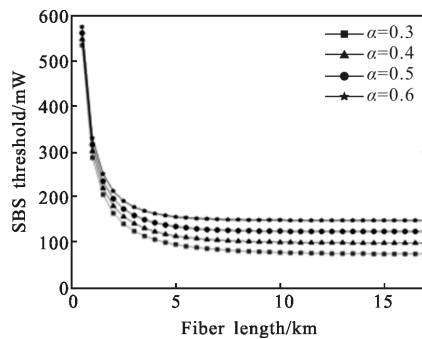


图 3 渐变折射率多模光纤 SBS 阈值变化曲线

Fig.3 SBS threshold curves of graded-index multimode fiber

由图 3 可知, 渐变折射率多模光纤 SBS 阈值随光纤长度和衰减系数的变化规律与单模光纤基本类似, 但其衰减系数较大, 当光纤长度大于 5 km 后, SBS 阈值基本不随光纤长度增加而改变。当衰减为 0.3 dB/km 时长度为 5 km 渐变折射率多模光纤的 SBS 阈值约为 95.8 mW, 而衰减为 0.3 dB/km 时长度为 5 km 单模光纤的 SBS 阈值约为 10.3 mW, 此时, 渐变折射率多模光纤的 SBS 阈值为单模光纤的 9.3 倍。当衰减系数为 0.35 dB/km 时长度为 5 km 渐变折射率多模光纤的 SBS 阈值约为 105.07 mW, 这与参考文献[9]报道的 5 km Fibertronix 渐变折射率光纤(纤芯为 $50 \mu\text{m}$, NA 为 0.2)的测量结果 105 mW 相吻合;

当衰减系数为 0.3 dB/km 时长度为 4.4 km 渐变折射率多模光纤的 SBS 阈值约为 101.54 mW, 这与参考文献[14]报道的 5 km 康宁公司生产的渐变折射率光纤(纤芯为 $50 \mu\text{m}$, NA 为 0.2)测量结果 100 mW 相吻合, 从而验证了理论分析计算的可靠性。

因此, 通过对比图 2 和图 3 可知, 多模光纤较单模光纤 SBS 阈值较高, 因此可以尽可能大地注入泵浦光, 获得较强的自发布里渊散射信号, 提高基于自发布里渊散射布里渊分布式光纤传感系统信噪比。

3.3 数值孔径对多模光纤 SBS 阈值的影响

光纤的数值孔径不同, SBS 阈值也会发生相应的改变, 纤芯直径相同的情况下, 阶跃折射率多模光纤和渐变折射率多模光纤 SBS 阈值随数值孔径的变化趋势明显不同, 如图 4 所示。当数值孔径增加到 0.05 时, 阶跃折射率多模光纤和渐变折射率多模光纤 SBS 阈值功率均急剧下降, 渐变折射率光纤下降趋势明显大于阶跃折射率光纤。当数值孔径从 0.05 增加到 0.35 时, 阶跃折射率光纤 SBS 阈值基本维持在 500 mW, 不再继续下降; 而渐变折射率光纤 SBS 阈值功率逐渐降低, 当数值孔径为 0.35 时, 其 SBS 阈值接近于 0。渐变折射率光纤相比于阶跃折射率光纤越容易发生 SBS 效应。

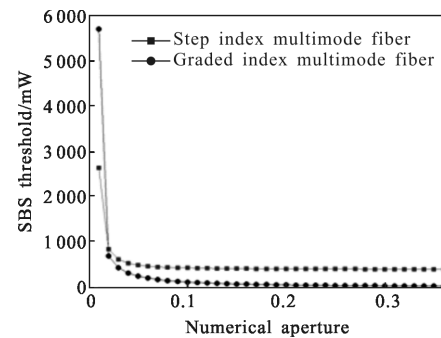


图 4 数值孔径对多模光纤 SBS 阈值影响分析

Fig.4 Effect of numerical aperture on the SBS threshold of multimode fiber

4 结论

文中针对多模光纤布里渊散射谱及 SBS 阈值进行了深入的理论分析和计算, 并利用已报道测量数据验证了理论分析结果, 为设计多模光纤布里渊分布式光纤传感系统奠定了理论基础。相关结论如下:

(1) 多模光纤由于其纤芯远大于单模光纤, 且存

在多个传输模式,因此其布里渊散射过程较复杂,明显区别于单模光纤。当泵浦光耦合进多模光纤时,会激励出多种模式的光在该光纤中传输,文中假设光能量平均分配,建立了多模光纤泵浦波、斯托克斯波和声波场理论计算模型,并认为多个模式多个散射角布里渊散射谱叠加造成多模光纤总的布里渊增益谱展宽,其线宽约为单模光纤的 3 倍,通过与他人实验结果比较,验证了理论分析的合理性,同时也验证了前人实验结果的可靠性。

(2) 多模光纤布里渊峰值增益理论计算值约为单模光纤的 1/3,由其计算得到多模光纤 SBS 阈值与光纤长度、衰减系数、数值孔径的关系曲线。理论计算结果同他人实验测量结果相吻合,从而验证了理论分析的准确性。

(3) 通过数值孔径对 SBS 阈值影响分析表明,纤芯直径相同时,数值孔径对渐变折射率多模光纤影响较大,相比于阶跃折射率多模光纤,渐变折射率多模光纤更容易发生 SBS 效应。

参考文献:

- [1] Lv Anqiang, Li Yongqian, Li Jing, et al. Distinguish measurement of temperature and strain of laid sensing optical fibers based on BOTDR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2952-2958. (in Chinese)
吕安强,李永倩,李静,等. BOTDR 的已敷设传感光纤温度和应变区分测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2952-2958.
- [2] Gao Yesheng, Liu Zhiming, Han Zhengying, et al. Characteristic study on strain distribution in polarization maintaining fiber coil based on Brillouin scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4056-4060. (in Chinese)
高业胜,刘志明,韩正英,等. 基于布里渊散射的保偏光纤环应力分布特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4056-4060.
- [3] Zhang Chunxi, Zhong Xiang, Li Lijing, et al. Long-distance intrusion sensor based on phase sensitivity optical time domain reflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 742-746. (in Chinese)
张春熹,钟翔,李立京,等. 基于相位敏感光时域反射计的长距离入侵探测系统 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 742-746.
- [4] Ji Rui. Theoretical and technical research about multi-mode transmission based on mode multiplexing [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
及睿. 基于模式复用的多模传输理论与技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [5] Stuart H R. Dispersive multiplexing in multimode optical fiber[J]. *Science*, 2000, 289(5477): 281-283.
- [6] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6 × 6 MIMO processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521-531.
- [7] Sodhi S S, Jackman W S. Strain measurement in multimode fibers using Brillouin optical time-domain reflectometry[C]// OFCCE, 1998: 181-182.
- [8] Lenke P, Nöther N. Stimulated Brillouin scattering in graded index multimode optical fiber by excitation of the fundamental mode only [C]//ICOO/ISOP, 2007: 658213-1-658213-7.
- [9] Victor L I, Sébastien L, Aissa H, et al. Stimulated Brillouin scattering in multi-mode fiber for sensing applications[C]// WFOPC, 2011: 1-4.
- [10] Kovalev V I, Harrison R G. Waveguide-induced inhomogeneous spectral broadening of stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 2022-2024.