

多模布里渊光时域反射系统的建模分析与计算

李永倩 李晓娟* 张淑娥 曹翠新

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

摘要 提出了一种基于多模法布里-珀罗激光器外调制的移频本地外差检测布里渊光时域反射系统,分析了系统提高光纤受激布里渊散射阈值和移频本地外差检测的原理;推导了系统信噪比的数学表达式,研究了布里渊叠加谱峰功率和谱宽、系统信噪比和频移测量精度与纵模数的关系,以及实现最优测量精度时纵模数与脉冲宽度的关系,得到了相应的拟合公式。结果表明,选用纵模间隔 0.141 nm 的多模激光器和单纵模峰值功率 100 mW、脉冲宽度 50 ns 的入纤脉冲时,随着纵模数的增加,25 km 光纤末端的系统信噪比、温度和应变测量精度均得到了明显提高,且纵模数为 20 时,系统信噪比相对于单纵模增加 11.73 dB,温度和应变测量精度分别达到最佳值 3.2 °C 和 70.8 $\mu\epsilon$;最佳频移测量精度随脉冲宽度的增大先快速提高,后趋近于恒定值 2.9 MHz。

关键词 光纤光学; 布里渊散射; 多纵模法布里-珀罗激光器; 布里渊谱; 系统信噪比; 最佳纵模数

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1006001

Modeling Analysis and Calculation of Multi-Mode Brillouin Optical Time Domain Reflectometer System

Li Yongqian Li Xiaojuan Zhang Shu'e Cao Cuixin

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

Abstract A Brillouin optical time domain reflectometer sensing system is proposed based on external modulation of the multi-longitudinal mode Fabry-Perot laser and frequency-shifted local optical heterodyne detection. The principles of stimulated Brillouin scattering threshold improvement and heterodyne detection of frequency-shifted local light from the same laser and Brillouin scattering from the sensing fiber are analyzed, and the mathematical expression of signal-to-noise ratio of the system is deduced. The dependence of the peak power and bandwidth of superposed Brillouin spectrum, the signal-to-noise ratio and the measurement accuracy of Brillouin frequency shift on the longitudinal mode number, and the relationship between the longitudinal mode number and the optimal measurement accuracy for different pulse widths are theoretically studied. The corresponding fitting formulas are obtained by calculation. The results show that with the increase of longitudinal mode number, the signal-to-noise ratio, temperature and strain measurement accuracies of the system at the end of 25 km long fiber are improved significantly for a multi-longitudinal mode Fabry-Perot laser with a mode interval of 0.141 nm and a pulse with a peak power of 100 mW and a width of 50 ns for single-longitudinal mode. Especially, compared with single longitudinal mode, the signal-to-noise ratio increases by 11.73 dB, and the optimal temperature and strain measurement accuracies of 3.2 °C and 70.8 $\mu\epsilon$ are achieved, respectively, when the longitudinal mode number is 20. The optimal measurement accuracy of Brillouin frequency shift rises rapidly with the increasing pulse width, and the optimal measurement accuracy tends to a constant of 2.9 MHz for pulse width larger than 100 ns.

Key words fiber optics; Brillouin scattering; multi-longitudinal mode Fabry-Perot laser; Brillouin spectrum; system signal-to-noise ratio; optimal longitudinal mode number

OCIS codes 060.2370; 290.5830; 290.5900

收稿日期: 2016-03-29; **收到修改稿日期:** 2016-05-05

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,博士,教授,主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: liyongqian1958@163.com

* **通信联系人.** E-mail: dztxlxj@126.com

1 引 言

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术可实现温度和应变分布的长距离连续测量,而且空间分辨率和测量精度均高于其他分布式光纤传感技术,得到了广泛关注和研究^[1-5]。其中,基于布里渊光时域反射计(BOTDR)的分布式光纤传感系统利用光纤中后向自发布里渊散射的频移和强度与温度和应变的线性变化关系,结合光时域反射技术,可实现温度和应变的同时测量。在传统 BOTDR 系统中,由于自发布里渊散射产生于光波与热激励声波的相互作用,传感信号微弱,检测难度大,因此,研究人员通常采用窄谱光源^[6]、脉冲编码^[7]和拉曼放大^[8-9]等技术提高系统的布里渊散射效率,增大散射信号强度。

近年来,有学者开展了基于多波长光源的分布式光纤传感技术的研究。2009年,Soto等^[10]提出采用多模法布里-珀罗(F-P)激光器的分布式传感系统,利用电光调制器(EOM)外调制和本地外差检测在25 km 光纤末端实现了空间分辨率为35 m,温度和应变分辨率分别为4.5 °C、115 $\mu\epsilon$ 的同时测量;同年,使用30个纵模的多模F-P激光器和本地外差同时检测拉曼和布里渊散射信号,在25 km 光纤末端实现了空间分辨率为35 m,温度、应变分辨率分别为1.2 °C、100 $\mu\epsilon$ 的同时测量;而在相同结构的系统中采用分布反馈式(DFB)激光器时,相同空间分辨率下25 km 光纤末端获得的温度和应变分辨率仅为20 °C和470 $\mu\epsilon$ ^[11]。2012年,Li等^[12]采用窄谱激光器和相位调制产生多波长光源,利用同源外差检测布里渊信号,使三波长 BOTDR 系统的信噪比比单波长系统提高了4.2 dB。上述研究对采用不同多波长光源的 BOTDR 系统与采用单波长光源的 BOTDR 系统进行了实验研究和对比,验证了多波长光源系统的性能优势,但未从理论上全面地分析多波长光源对传感系统性能的影响,没有对基于多波长光源的 BOTDR 系统的频移测量精度进行数学描述,影响了基于多波长光源的 BOTDR 系统的建模分析和优化设计。

本文通过微波强度调制对同源本地光的移频来降低布里渊散射谱的中心频率,提出一种基于多模 F-P 激光器外调制和移频本地外差检测的 BOTDR 传感系统,分析系统提高光纤受激布里渊散射(SBS)阈值和移频本地外差检测的原理,推导系统信噪比的数学表达式,通过计算得到某一纵模间隔时布里渊散射叠加谱峰功率和谱宽、系统信噪比和频移测量精度与纵模数关系的拟合公式,以及实现最优测量精度时纵模数与脉冲宽度的关系曲线。

2 理论分析

2.1 SBS 阈值

为了实现高空间分辨率和高测量精度的长距离分布式传感,通常希望在不发生单端 SBS 的前提下尽可能增大入纤脉冲光功率。采用传统单模窄谱光源时,光纤 SBS 阈值可以表示为^[13]

$$P_{th} = \frac{21\gamma A_{eff}}{g_B L_{eff}}, \quad (1)$$

式中 γ 为偏振因子; A_{eff} 为光纤有效纤芯面积; g_B 为布里渊增益; L_{eff} 为光纤有效作用长度, $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$, α 为光纤衰减系数, L 为光纤长度。对于标准单模光纤, $\gamma = 3/2$, $A_{eff} = 50 \mu\text{m}^2$, $g_B = 5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$, $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$ ^[13], 当 $L = 25 \text{ km}$ 时,由(1)式可得 SBS 阈值 $P_{th} \approx 2.12 \text{ mW}$ 。因此采用单模窄谱光源时,入纤脉冲功率较低,传感系统性能的提高受限。

当采用多模 F-P 激光光源时,光源输出是具有相同横模结构的多纵模线偏振光,当产生布里渊散射时, M 个纵模的抽运光对应产生 M 个纵模的布里渊散射光,且布里渊散射光各纵模分量的相位分布是相对随机的。当光源输出纵模间隔远大于布里渊自然线宽且相干长度小于 SBS 有效相互作用长度时,光纤 SBS 阈值与纵模数成正比,与光源谱宽无关^[14], SBS 阈值的提高量为

$$\Delta P_{th} = \begin{cases} -10\lg[\max(P_p/P_t)], & P_p \neq P_q \\ 10\lg M, & P_p = P_q \end{cases}, \quad (2)$$

式中纵模序数 $p, q = 1, 2, \dots, M$, P_p 和 P_q 分别为第 p 阶和第 q 阶纵模的功率, P_t 为光源输出总功率。当 BOTDR 系统选用多模 F-P 激光器时,若光源输出各纵模功率不完全相同,光纤 SBS 阈值取决于单个纵模功率的最大值;当光源输出的 M 个纵模功率相同时,若使各纵模的入纤功率均低于该纵模下的光纤 SBS 阈

值,则系统的 SBS 阈值为采用单模光源时的 M 倍,从而使系统的入纤功率得到大幅度提升,进而大大提高传感系统性能。

2.2 移频本地外差检测

选用的典型多模 F-P 激光器的输出光谱如图 1 所示,其中各纵模的振幅及相位均不固定,激光输出随时间的变化是各纵模无规则叠加的结果,是一种时间平均的统计值^[15]。由图 1 可知,在波长范围 1549.244~1556.244 nm 内各纵模的功率近似相等,且比波长 1546.244 nm 处的功率高 13 dB 左右,因此在分析中可取光源输出中心波长为光谱平坦区域的中点 1552.744 nm。

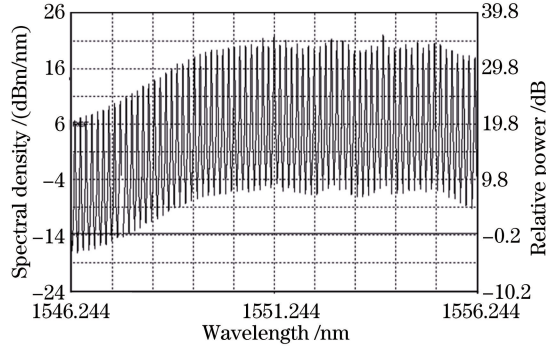


图 1 多纵模 F-P 激光器输出光谱

Fig. 1 Spectrum of multi-longitudinal mode F-P laser

经 EOM 脉冲调制产生的多模激光脉冲在光纤中传输时, M 个纵模的抽运光对应产生 M 个纵模的散射光,散射光各纵模分量的相位分布是相对随机的,但与相应纵模抽运光的相位分布具有相同的特性。为了降低系统中光电检测器(PD)带宽,减小系统热噪声和散粒噪声,采用 EOM 对同源本地连续光进行抑制载波的双边带强度调制,并利用移频后的双边带本振光与背向散射光外差的方式来检测布里渊信号。移频后的双边带本振光场强可以表示为

$$E_L(t) = E_{Ll}(t) + E_{Lu}(t) = \sum_{q=-N}^N \{ E_{Llq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega - \omega_L)t + \phi_{Llq}] + E_{Luq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega + \omega_L)t + \phi_{Luq}] \}, \quad (3)$$

式中 $E_{Ll}(t)$ 和 $E_{Lu}(t)$ 分别为下边带和上边带本振光场强, E_{Llq} 和 E_{Luq} 分别为纵模 q 本振光的下边带场强和上边带场强; ω_0 为光源输出光中心频率, $\Delta\omega$ 为纵模角频率间隔, ω_L 为 EOM 射频端所加微波调制信号的角频率; ϕ_{Llq} 和 ϕ_{Luq} 分别为本振光下边带和上边带的相位; 光源纵模数 $M = 2N + 1$ 。多模激光脉冲在光纤中传输时产生的布里渊散射光场强可以表示为

$$E_B(t) = E_S(t) + E_{AS}(t) = \sum_{q=-N}^N \{ E_{Sq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega - \omega_{Bq})t + \phi_{Sq}] + E_{ASq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega + \omega_{Bq})t + \phi_{ASq}] \}, \quad (4)$$

式中 $E_S(t)$ 和 $E_{AS}(t)$ 分别为斯托克斯和反斯托克斯光场强, E_{Sq} 和 E_{ASq} 分别为纵模 q 产生的斯托克斯和反斯托克斯光场强; ω_{Bq} 为纵模 q 产生的布里渊频移角频率; ϕ_{Sq} 和 ϕ_{ASq} 分别为纵模 q 的斯托克斯和反斯托克斯光相位。考虑到 $E_{Llq} = E_{Luq}$ 且自发布里渊散射中 $E_{Sq} = E_{ASq}$, 仅考虑斯托克斯光和本振光下边带的外差信号来分析布里渊散射光和移频本振光的外差输出,二者在 PD 中进行相干检测时的输出光电流为

$$i(t) = R [\bar{E}_S(t) + \bar{E}_{Ll}(t)] [E_S(t) + E_{Ll}(t)] = R \left\{ \sum_{q=-N}^N E_{Sq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega - \omega_{Bq})t + \phi_{Sq}] + \sum_{q=-N}^N E_{Llq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega - \omega_L)t + \phi_{Llq}] \right\}^2 = i_{Ll}(t) + i_S(t) + i_{LS}(t), \quad (5)$$

式中 $\bar{}$ 表示共轭; R 为 PD 响应度; i_{Ll} 和 i_S, i_{LS} 分别为本振光下边带和斯托克斯光产生的光电流、二者的交叉光电流项。多模光源输出的单个纵模线宽较窄,具有很强的相干性,但不同纵模的相位在时间上无关,是独立和随机的,因此,由本振光某一纵模与其在光纤中产生的布里渊散射光外差能获得携带布里渊频移信息的

单频信号, 而由本振光某一纵模与不同纵模产生的布里渊散射光的外差信号将以组合频率的形式表现为一种随机的背景噪声。为了降低外差检测信号的频率, 本振光路中 EOM 的微波调制信号频率接近布里渊频移, 可选用具有低通滤波特性的 PD 滤除外差信号中的和频项、倍频项、本振光各纵模与不同纵模产生的布里渊散射光的外差信号, 故 PD 输出的光电流为

$$i_{\text{det}}(t) = R \sum_{q=-N}^N [P_{Liq} + P_{Sq}(t)] + 2R \sum_{q=-N}^N \sqrt{P_{Liq} P_{Sq}(t)} \cos[(\omega_{Bq} - \omega_L)t + \phi_q(t)], \quad (6)$$

式中 P_{Liq} 和 $P_{Sq}(t)$ 分别为第 q 个纵模的本振光下边带和 t 时刻纵模 q 产生的斯托克斯光的功率; $\phi_q(t)$ 为本振光纵模 q 与其产生的布里渊散射光的相位差, 其值服从均匀分布。由 (6) 式可知, 当采用多模 F-P 激光器时, PD 输出的中频光电流是每个纵模产生的布里渊散射光与本振光外差后的布里渊信号的叠加, 因此多模本地外差 BOTDR 系统可获得很高的信噪比、测量精度和较长的传感距离。

3 系统性能建模分析与计算

3.1 多模 F-P 激光器 BOTDR 系统

基于多模 F-P 激光器外调制的移频本地外差检测 BOTDR 传感系统如图 2 所示。光源发出的连续光通过保偏(PM)耦合器进行功率分配, 一路光被脉冲发生器(PG)驱动的 EOM1 调制成脉冲光, 然后经掺铒光纤放大器(EDFA)放大和可调光衰减器(VOA)衰减后通过环形器进入传感光纤; 另一路作为本振光, 经 EOM2 进行抑制载波的双边带强度调制实现移频, 然后经过扰偏器(PS)与经传感光纤返回的布里渊散射光进行相干检测。PD 输出信号为直流信号和携带布里渊频移的差频信号, 和频项和倍频项等受 PD 带宽限制均被滤除。利用数据采集及处理单元对差频信号进行处理, 分析电信号频谱得到布里渊散射信号的频移和强度。

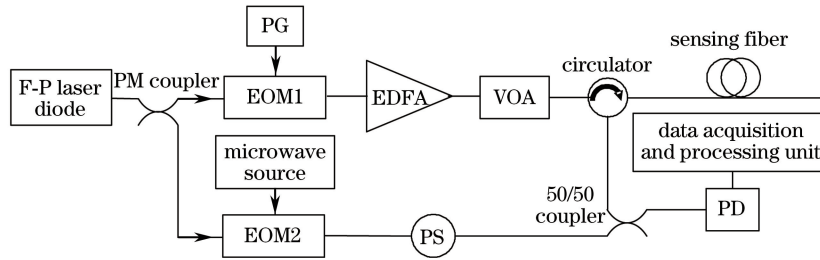


图 2 基于多纵模 F-P 激光器外调制的移频本地外差 BOTDR 系统

Fig. 2 BOTDR system based on external modulation of multi-longitudinal mode F-P laser and frequency-shifted local heterodyne detection

系统采用中心波长 1552.744 nm、纵模间隔 0.141 nm 的多模 F-P 激光器, 由于光源输出各纵模的线宽较窄、相干性较强, 各纵模在光纤中产生的布里渊散射光和移频本振光在 PD 中外差后, PD 输出信号包含直流分量和同一纵模本振光与其产生的布里渊散射光的外差信号, 而本振光各纵模与不同纵模产生的布里渊散射光的外差信号均被滤除。

3.2 布里渊散射谱

假设声波以 $\exp(-\Gamma_B t)$ 衰减, 布里渊增益谱服从洛伦兹分布, 因而频率 ν 处的功率增益 $g(\nu)$ 可表示为^[16]

$$g(\nu) = \frac{\gamma g_B (\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2}, \quad (7)$$

式中 Γ_B 为声子寿命的倒数, 即 $\Gamma_B = \Delta\tau^{-1}$ ($\Delta\tau \approx 10$ ns); $\Delta\nu_B$ 为布里渊自然线宽, $\Delta\nu_B = \Gamma_B/2\pi$; ν_B 为布里渊频移, $\nu_B = 2nV_A/\lambda$, n 为纤芯折射率, V_A 为光纤中的声速, λ 为入射光波长。若入纤光为脉冲光, 则布里渊散射谱为脉冲功率谱与布里渊增益谱的卷积, 其表达式为

$$H(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_p(f) \frac{\gamma g_B (\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - f - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} df, \quad (8)$$

式中 $P_p(f)$ 为传感脉冲的功率谱。假设光源输出各纵模功率近似相等, 选取入纤光脉冲宽度为 50 ns, 每个纵模的脉冲峰值功率为 100 mW, 布里渊自然线宽为 35 MHz, 对应中心波长 1552.744 nm 的光纤布里渊频移为 11.103 GHz, 根据(8)式并考虑布里渊频移的波长依赖性, 可绘出图 3 所示移频外差后的布里渊散射谱; 插图 7 个纵模产生的布里渊散射谱的放大图, 图中每个散射谱的谱峰功率均作归一化处理。由图 3 可知, 7 个纵模产生的布里渊散射叠加谱峰功率为 6.95。

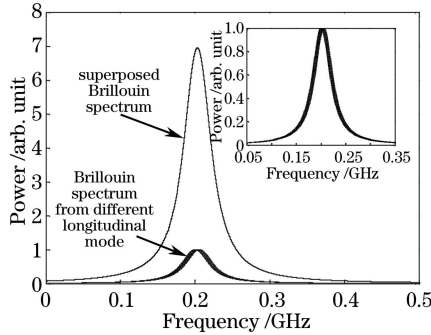


图 3 布里渊散射谱

Fig. 3 Brillouin scattering spectra

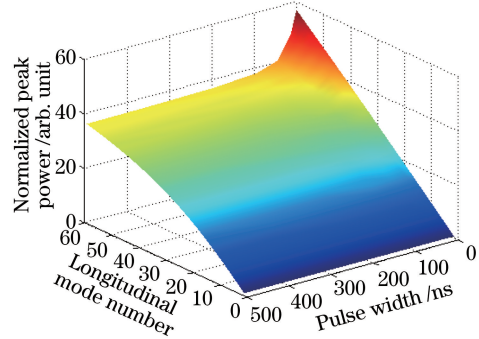


图 4 归一化的叠加谱峰功率与纵模数和脉冲宽度的关系

Fig. 4 Normalized peak power of superposed spectrum versus longitudinal mode number and pulse width

经计算可得归一化的布里渊叠加谱峰功率与光源纵模数和脉冲宽度的关系如图 4 所示。由图可知, 当脉冲宽度小于声子寿命时, 由于布里渊散射谱宽远大于 $\Delta\nu_B$ 且布里渊频移的波长系数为 7 MHz/nm^[12], 故布里渊频移的波长依赖性对叠加谱影响不明显, 因此布里渊叠加谱峰功率与纵模数近似呈线性增加关系; 而随着脉冲宽度的增加, 布里渊散射谱宽逐渐趋近于 $\Delta\nu_B$, 布里渊频移的波长依赖性对叠加谱的影响相对增大, 叠加谱峰功率与纵模数的关系由线性增加变为非线性缓慢增加。当脉冲宽度为 50 ns 时, 对计算数据进行多项式拟合, 可得归一化的叠加谱峰功率与纵模数 M 的关系为

$$P_{BP} = 9.4 \times 10^{-7} M^3 - 6.8 \times 10^{-3} M^2 + 1.1 M - 0.26. \quad (9)$$

(9) 式的确定系数为 1, 均方根误差 (RMSE) 为 0.0776。

3.3 系统信噪比

基于多模 F-P 激光器的 BOTDR 系统中的噪声包括热噪声、散粒噪声和由自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM)、四波混频 (FWM) 产生的非线性效应噪声。SPM 和 XPM 依赖于光脉冲宽度内的功率梯度, 当选用上升时间远小于脉冲宽度的 EOM 作调制器件时, 可获得边沿陡峭、峰值平坦的矩形脉冲, 从而使 SPM 和 XPM 得到很好的抑制; 另外, FWM 的产生要求相互作用的光波满足相位匹配条件且主要取决于 SPM 和 XPM, 选用性能良好的 EOM 抑制 SPM 和 XPM 后, FWM 也可忽略不计^[17]。假设光源输出各纵模功率近似相等, 在考虑系统噪声时, 忽略 SPM、XPM 和 FWM 产生的非线性效应噪声, 系统信噪比可表示为

$$R_{SN} = \frac{\langle i_{AC}^2(t) \rangle}{\sigma_T^2 + \sigma_S^2} = \frac{4R^2 MP_{LI} P_S(t)}{4kT\Delta f/R_L + 2q[2i_{det}(t) + I_d]\Delta f}, \quad (10)$$

式中 $i_{AC}(t)$ 为 PD 输出的中频光电流; σ_T^2 和 σ_S^2 分别为热噪声和散粒噪声; P_{LI} 和 $P_S(t)$ 分别为单个纵模的本振光下边带和 t 时刻产生的斯托克斯光功率; k 为玻尔兹曼常数, T 为材料的热力学温度, Δf 为 PD 带宽, R_L 为负载电阻; q 为电荷电量, I_d 为暗电流。由于 $P_{LI} \gg P_S$, 且暗电流噪声较小, (10) 式可表示为

$$R_{SN} = \frac{4R^2 MP_{LI} P_0 \alpha_B (SWc/2n) \exp(-2\alpha z)}{4kT\Delta f/R_L + 4qRMP_{LI}\Delta f}, \quad (11)$$

式中 P_0 为单个纵模的脉冲峰值功率, α_B 为布里渊散射系数, S 为背向捕捉系数, W 为脉冲宽度, c 为真空中光速; z 为光纤上的不同散射点。为了计算系统信噪比, 假设入纤光脉冲宽度为 50 ns, 每个纵模的脉冲峰值功率为 100 mW, 小于该纵模下的光纤 SBS 阈值; 光纤温度和应变变化引起的布里渊频移变化不超过 500 MHz, 因此可选用频率范围为 0~500 MHz 的 PD; 为了便于与现有的实验结果进行比较^[10-12], 选用长度为 25 km 的光纤, 其他参数如表 1 所示。为了减小热噪声和散粒噪声对系统性能的影响, 采用叠加平均的方法提高系统信噪比, 选取叠加平均次数为 2^{15} , 可使信噪比提高 45.15 dB。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	$k / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	q / C	T / K	$\alpha_{\text{B}} / \text{m}^{-1}$	n	S	R_{L} / Ω	$R / (\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$
Value	1.38×10^{-23}	1.6×10^{-19}	300	1.155×10^{-6}	1.45	1.8×10^{-3}	50	0.95

图 5 为纵模数 M 为 1 和 7 时的系统信噪比。由图可知,纵模数为 1 和 7 时,25 km 光纤末端的信噪比分别为 28.02 dB 和 36.31 dB,纵模数为 7 时的系统信噪比较纵模数为 1 时提高了 8.29 dB。由(11)式可知,保证各纵模入纤光脉冲能量不变时,光纤末端信噪比仅与纵模数 M 有关,保持叠加平均次数不变,二者的关系如图 6 所示。由图可知,信噪比随纵模数的增加非线性增大,且纵模数为 60 时系统信噪比比纵模数为 1 时提高 14.62 dB。随着纵模数的增加,PD 输入光功率增大,系统中的散粒噪声也相应增大,使得系统信噪比随纵模数的变化呈现出开始非线性迅速增加,而后近似线性缓慢增加的趋势。利用比例多项式对计算数据进行拟合,可得系统信噪比与纵模数 M 的关系为

$$R_{\text{SN}} = \frac{45.2 M^2 + 725.1 M + 573.9}{M^2 + 20.38 M + 26.59} \quad (12)$$

(12)式的确定系数为 1, RMSE 为 0.005884。

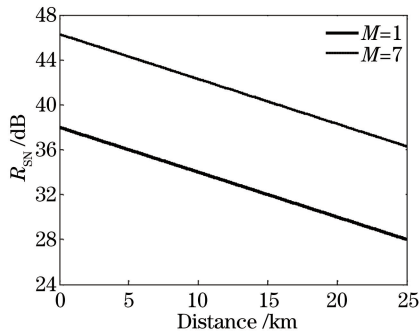


图 5 $M=1$ 和 $M=7$ 时的系统信噪比

Fig. 5 Signal-to-noise ratios with $M=1$ and $M=7$

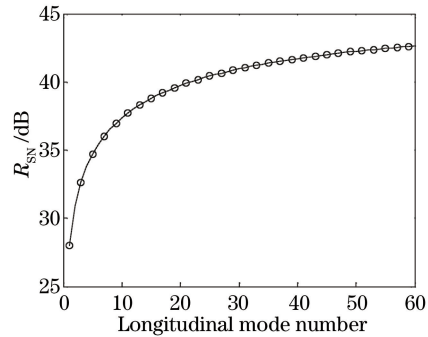


图 6 光纤末端信噪比与纵模数的关系

Fig. 6 Signal-to-noise ratio versus longitudinal mode number at fiber end

3.4 温度和应变测量精度

空间分辨率和频移测量精度是布里渊光纤传感系统中的两个主要指标。BOTDR 系统中,空间分辨率取决于传感脉冲宽度 W ,而频移测量精度 $\delta_{\nu_{\text{B}}}$ 则由传感脉冲产生的自发布里渊散射谱宽 $\Delta\nu_{\text{B}}'$ 和系统信噪比决定,可表示为^[18]

$$\delta_{\nu_{\text{B}}} = \frac{\Delta\nu_{\text{B}}'}{\sqrt{2}R_{\text{SN}}^{1/4}} \quad (13)$$

由于布里渊频移存在波长依赖性,同时根据图 3 中单纵模布里渊谱与多纵模布里渊叠加谱可知,随着纵模数的增加,叠加谱的谱宽也会发生相应的变化,计算可得图 7 所示不同脉冲宽度时布里渊散射谱宽与纵模数的关系。

由图 7 可知,当脉冲宽度小于声子寿命时,因布里渊散射谱宽远大于 $\Delta\nu_{\text{B}}$ 且布里渊频移的波长依赖性较小,布里渊叠加谱宽几乎不随纵模数的增加而发生变化;随着脉冲宽度的增大,布里渊散射谱宽逐渐趋近于 $\Delta\nu_{\text{B}}$,布里渊频移的波长依赖性对叠加谱的影响相对增大,布里渊叠加谱宽与纵模数开始呈现非线性增加关系。当脉冲宽度为 50 ns 时,对计算数据进行多项式拟合,可得布里渊叠加谱宽与纵模数的关系为

$$\Delta\nu_{\text{B}}' = -6 \times 10^{-5} M^3 + 0.012 M^2 - 0.014 M + 43.38, \quad (14)$$

(14)式的确定系数为 1, RMSE 为 0.007278。

根据(11)式和(13)式计算可得图 8 所示不同脉冲宽度下 25 km 光纤末端布里渊频移测量精度与纵模数的关系。由图可知,在某一脉冲宽度时,频移测量精度值(测量误差)随纵模数的增加呈现出先降低后提高的趋势,且脉冲宽度越大,该趋势越明显;确定脉冲宽度后,频移测量精度在某一纵模数下达到最佳值。根据图 8 中不同脉冲宽度时的频移测量精度与纵模数的关系,计算可得图 9 所示最佳频移测量精度和最佳纵模

数与脉冲宽度的关系。由图可知,当脉冲宽度小于声子寿命时,布里渊散射谱宽主要取决于脉冲宽度,而不同脉冲宽度时叠加谱宽相差较大,故最佳纵模数和最佳频移测量精度值均随脉冲宽度的增大快速减小;当脉冲宽度大于 100 ns 时,布里渊散射谱宽均接近 $\Delta\nu_B$,故最佳纵模数和最佳频移测量精度分别趋近于恒定值 17 和 2.9 MHz。

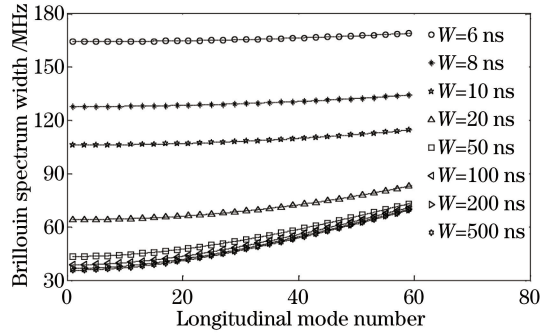


图 7 不同脉冲宽度时布里渊叠加谱宽与纵模数的关系

Fig. 7 Bandwidth of superposed Brillouin spectrum versus longitudinal mode number for different pulse width

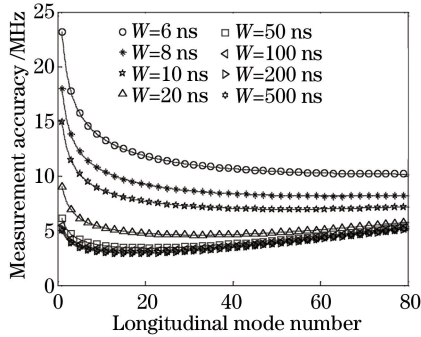


图 8 布里渊频移测量精度与纵模数的关系

Fig. 8 Measurement accuracy of Brillouin frequency shift versus longitudinal mode number

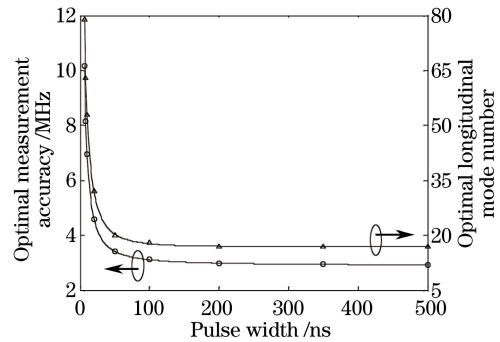


图 9 最佳测量精度和纵模数与脉冲宽度的关系

Fig. 9 Optimal measurement accuracy and longitudinal mode number versus pulse width

对图 8 和图 9 中的计算数据进行比例多项式拟合,可得最佳纵模数 M_{opt} 与脉冲宽度 W 、最佳测量精度 $\delta_{\nu_{Bopt}}$ 与 M_{opt} 的关系分别为

$$M_{opt} = \frac{17.22 W^2 + 543.3 W + 2.22 \times 10^4}{W^2 + 39.98 W + 54.55}, \quad (15)$$

$$\delta_{\nu_{Bopt}} = \frac{680.1 M_{opt} - 849.7}{M_{opt} + 66.5}. \quad (16)$$

(15)式的确系数为 0.9999, RMSE 为 0.2298; (16)式的确系数为 0.9996, RMSE 为 0.5388。当脉冲宽度为 50 ns 时,最佳频移测量精度和最佳纵模数分别为 3.4 MHz 和 20。对于标准单模光纤,布里渊频移的温度和应变系数分别为 $C_{\nu_T} = 1.07 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 和 $C_{\nu_\epsilon} = 0.048 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ ^[19],故温度和应变测量精度的最佳值分别为 $3.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $70.8 \mu\epsilon$ 。为了与文献[10]进行比较,选取纵模间隔 0.3 nm、入纤光脉冲宽度 350 ns、单个纵模的脉冲峰值功率 1.05 mW 和本振光功率 0.26 mW、叠加平均次数 1.5×10^5 ,计算可得纵模数为最佳值 5 时系统的温度和应变测量精度分别为 $2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60.2 \mu\epsilon$,优于文献[10]获得的指标。因此,在基于多模 F-P 激光器的移频本地外差检测 BOTDR 系统中,为了实现高测量精度和长距离传感,需根据实际系统考虑光源输出纵模间隔、入纤光脉冲参数和传感光纤参数、接收机带宽等因素,通过优化计算来确定最佳纵模数。

4 结 论

针对传统窄谱光源 BOTDR 系统性能受 SBS 阈值限制难以进一步提高的问题,提出了一种基于多模 F-P 激光器外调制和移频本地外差检测的 BOTDR 传感系统,分析了系统提高光纤 SBS 阈值和移频本地外

差检测的原理,推导出系统信噪比的表达式,采用纵模间隔 0.141 nm 的多模 F-P 激光器,分析了布里渊叠加谱峰功率和谱宽、系统信噪比和频移测量精度与纵模数的关系,以及实现最优测量精度时纵模数与脉冲宽度的关系,并得到了相应的拟合公式。结果表明,当单纵模峰值功率和脉冲宽度分别为 100 mW 和 50 ns 时,随着纵模数的增加,25 km 光纤末端的系统信噪比、温度和应变测量精度均得到了很大的提高,且纵模数为 20 时,相对于单纵模的系统信噪比增加量为 11.73 dB,温度和应变测量精度分别达到最佳值 3.2 °C 和 70.8 $\mu\epsilon$;脉冲宽度小于声子寿命时,最佳频移测量精度随脉冲宽度的增大而快速提高,当脉冲宽度逐渐增加且大于 100 ns 时,最佳测量精度趋近于恒定值 2.9 MHz。

研究结果不但为分析和评价基于多模 F-P 激光器的 BOTDR 系统性能提供了理论依据,而且对基于多波长光源的 BOTDR 系统的建模分析和优化设计具有参考价值。

参 考 文 献

- Adachi S. Distributed optical fiber sensors and their applications[C]. SICE Annual Conference, Tokyo, 2008: 329-333.
- Bao X Y, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. Sensors, 2011, 11(4): 4152-4187.
- Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106003.
李永倩, 李晓娟, 安琪. 提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106003.
- Wang Xue, Lu Yuangang, Zhang Xuping, *et al.* Calculation method of strain and temperature coefficients for fibers with multimode acoustic waveguide structure[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0606003.
王 雪, 路元刚, 张旭苹, 等. 多模声波导结构光纤的应变与温度系数计算方法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0606003.
- Li Yongqian, Zhao Xu, Zhao Lijuan, *et al.* Brillouin scattering parameters of different modes in multimode optical fibers [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(3): 0319002.
李永倩, 赵 旭, 赵丽娟, 等. 多模光纤不同模式布里渊散射参数[J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0319002.
- Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, *et al.* Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(5): 730-736.
- Hao Y Q, Ye Q, Pan Z Q, *et al.* Digital coherent detection research on Brillouin optical time domain reflectometry with simplex pulse codes[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(11): 110703.
- Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(6): 1321-1324.
- Bi Weihong, Yang Xipeng, Li Jingyang, *et al.* Forward and backward Raman amplification of Brillouin scattering signal in Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205007.
毕卫红, 杨希鹏, 李敬阳, 等. 布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205007.
- Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D. Distributed optical fibre sensors based on spontaneous Brillouin scattering employing multimode Fabry-Perot lasers[J]. Electronics Letters, 2009, 45(21): 1071-1072.
- Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D. Use of Fabry-Perot lasers for simultaneous distributed strain and temperature sensing based on hybrid Raman and Brillouin scattering[C]. SPIE, 2009, 7503: 750328.
- Li C L, Lu Y G, Zhang X P, *et al.* SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometer using multi-wavelength coherent detection[J]. Electronics Letters, 2012, 48(18): 1139-1141.
- 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.
- Lin Dianyong, Gao Hongyan, Wang Shuangyi, *et al.* Threshold of stimulated Brillouin scattering pumped by a multi-longitudinal mode laser[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(9): 4151-4156.
林殿阳, 高洪岩, 王双义, 等. 多纵模受激布里渊散射阈值[J]. 物理学报, 2005, 54(9): 4151-4155.
- Lan Xinju. Laser technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995: 93-96.
蓝信钜. 激光技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995: 93-96.
- 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.
- Lv L D, Song Y J, Zhu F, *et al.* Performance limit of a multi-frequency probe based coherent optical time domain

- reflectometry caused by nonlinear effects[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(4): 040604.
- 18 Cui Q S, Pamukcu S, Lin A X, *et al*. Performance of double sideband modulated probe wave in BOTDA distributed fiber sensor[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(12): 2713-2717.
- 19 Maughan S M, Kee H H, Newson T P. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7): 834-842.