

doi: 10. 3788/gzxb20164505. 0506001

一种多模 FP 激光器 BOTDR 系统的建模分析

李永倩, 曹翠新, 李晓娟, 安琪

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘 要:根据相干检测理论提出了一种基于多模法布里-珀罗激光器的光纤瑞利与布里渊散射自外差检测的布里渊光时域反射计传感系统, 分析了该系统提高光纤受激布里渊散射阈值和瑞利与布里渊散射自外差检测的原理, 推导出系统信噪比表达式, 分析了纵模数与布里渊谱峰值功率、谱宽和系统信噪比、温度及应变测量准确度之间的关系, 并进行了计算. 结果表明, 选用纵模间隔为 0. 141 nm 的多模法布里-珀罗激光器时, 随着纵模数的增加, 在 25 km 光纤末端系统信噪比、温度和应变测量准确度均得到了较大提升, 当纵模数为 19 时, 温度和应变测量准确度分别达到最佳值 3. 81 °C 和 86. 69 $\mu\epsilon$.

关键词: 光纤光学; 光纤传感; 自外差检测; 多模 FP 激光器; 布里渊光时域反射计系统; 信噪比

中图分类号: TN929. 11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0506001-5

Modeling Analysis and Calculation of a Brillouin Optical Time Domain Reflectometer System Using Multi Longitudinal Mode FP Laser

LI Yong-qian, CAO Cui-xin, LI Xiao-juan, AN Qi

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

Abstract: By using the theory of coherent detection, a Brillouin optical time domain reflectometer sensing system was proposed based on the external modulation of multi-longitudinal mode Fabry-Perot laser and the self-heterodyne detection of Rayleigh and Brillouin scattering. The principles of the stimulated Brillouin scattering threshold improvement by the utilization of the multi-longitudinal mode Fabry-Perot laser, the self-heterodyne detection of Rayleigh and Brillouin scattering were analyzed, the expression of signal-to-noise ratio of the system was deduced, and the longitudinal mode number dependences of peak power and bandwidth of superposed Brillouin spectrum, and signal to noise ratio, temperature and strain measurement accuracy of the system were analyzed and calculated. The results show that with the increasing of the longitudinal mode number, the signal to noise ratio, temperature and strain measurement accuracy 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 the optimal value of temperature and strain measurement accuracy is 3. 81 °C and 86. 69 $\mu\epsilon$ respectively, when the longitudinal mode number takes the number of 19.

Key words: Fiber optics; Optical fiber sensing; Self-heterodyne detection; Multi-longitudinal mode FP laser; Brillouin optical time domain reflectometer; Signal to noise ratio

OCIS Codes: 060. 2310; 060. 3510; 120. 2230; 280. 1350; 300. 6320

0 引言

分布式光纤传感技术利用光纤中的光散射随外部环境变化进行传感, 发挥了光纤空间连续分布的特点,

可实现距离达几十甚至上百千米的全分布式传感, 而且测量空间分辨率高、误差小^[1-3]. 与布里渊光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)系统相比, 布里渊光时域反射计(Brillouin Optical

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61377088)和河北省自然科学基金(Nos. F2014502098, F2015502059)资助

第一作者: 李永倩(1958—), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为光通信与光传感. Email: liyq@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2015-12-16; 录用日期: 2016-02-24

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

Time domain Reflectometer, BOTDR)系统具有可同时测量温度与应变分布、单端工作与可检测光纤断点的优点,受到国内外科研人员广泛关注^[4-6].然而,该系统通常采用窄谱光源,不仅结构复杂、成本高,而且因光纤受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)阈值低致使系统信噪比和传感距离受限^[7].

2009年,Soto M A等^[8]提出利用多模法布里-珀罗(Fabry Perot, FP)激光器的分布式传感系统,使用外调制—电光调制器(Electro Optic Modulator, EOM)及本地外差检测自发布里渊散射信号,在25 km光纤末端实现了分辨率分别为4.5 °C和115 $\mu\epsilon$ 的温度和应变的同时测量;同年,他们又通过使用30个纵模的多模FP激光器及本地外差同时检测喇曼和布里渊散射信号,在25 km光纤末端实现了温度和应变分辨率分别为1.2 °C和100 $\mu\epsilon$ 的同时测量;而在相同系统中,采用分布反馈(Distributed Feed Back, DFB)激光器时,在25 km光纤末端获得的温度和应变分辨率仅为20 °C和470 $\mu\epsilon$ ^[9].2012年,李存磊等^[10]利用窄谱激光器和相位调制产生多波长光源,采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.文献[8-10]虽然采用不同多波长光源的BOTDR系统与单波长光源的BOTDR系统进行了实验研究和对比,验证了多波长光源系统性能优于单波长光源系统,但没有从理论上分析多波长光源对传感系统性能的影响,没有解决基于多波长光源的BOTDR系统的信噪比、温度和应变测量准确度的数学描述问题.

本文基于相干检测理论提出了一种基于多模FP激光器的光纤瑞利与布里渊散射自外差检测的BOTDR传感系统,分析了该系统提高光纤SBS阈值和自外差检测的原理,推导了系统信噪比表达式,仿真计算了在一定纵模间隔下纵模数与布里渊散射谱峰值功率、谱宽和系统信噪比、温度及应变测量准确度的关系.

1 理论分析

1.1 SBS 阈值

为了实现高空间分辨率、高测量准确度和长距离分布式传感,通常希望为光纤注入尽可能大的脉冲光功率.然而,当入纤平均功率达到SBS阈值时,就会在光纤中产生SBS效应,从而使系统不能正常工作.当采用传统单模窄谱光源时,光纤的SBS阈值可以表示为^[11]

$$P_{cr} \approx \frac{21A_{eff}}{\chi_{SBS} g_B L_{eff}} \quad (1)$$

式中, $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ 为光纤的有效作用长度, α 是光纤衰减系数, L 是光纤长度; A_{eff} 为有效纤芯

面积; g_B 为布里渊增益; χ_{SBS} 为偏振因子.对于型号为G.652的光纤, $A_{eff} = 50 \mu\text{m}^2$, $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$, $g_B = 5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$, $\chi_{SBS} = 2/3$ ^[12],当 $L = 25 \text{ km}$ 时,由式(1)可得SBS阈值 $P_{cr} \approx 2.1 \text{ mW}$.因此采用单模窄谱光源时,入纤脉冲功率受SBS阈值限制,从而使提高系统传感性能受限.

当采用多模FP激光器光源时,由文献[13]可知,如果光源纵模间隔大于布里渊谱宽,且在光纤中产生SBS的有效相互作用长度大于激光相干长度,则各纵模独立地产生SBS,传感光纤的SBS阈值与纵模数成正比,而与多模FP激光器的谱宽无关;又由于 L_{eff} 仅与光纤有关,因此在考虑基于多模FP激光器的BOTDR系统的SBS阈值时可单独考虑单个纵模的SBS阈值.也就是说,当BOTDR系统选用输出 M 个功率相同纵模的多模FP激光器时,若使各纵模的入纤功率均低于该纵模下光纤的SBS阈值,则系统的SBS阈值为采用单模光源时的 M 倍,从而可使系统的入纤功率提高,进而可提高系统的传感性能.

1.2 瑞利与布里渊散射自外差检测

本文选用的一个典型多模FP激光器的输出光谱如图1,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^[14].

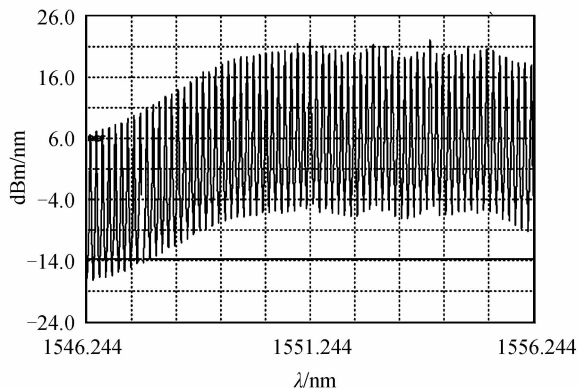


图1 多模FP激光器输出光谱

Fig. 1 Spectrum of multi-longitudinal mode FP laser

多模FP激光器的纵模间隔远大于布里渊谱宽,所输出的各纵模在光纤中独立产生的背向瑞利和布里渊散射谱见图2(a).由于激光器输出各纵模相位的随机性,其在光纤中产生的瑞利和布里渊散射相位也是随机的,因此不同纵模产生的瑞利和布里渊散射不存在相关性,不能通过外差检测得到它们的拍频信号;只有同一纵模产生的瑞利和布里渊散射之间存在确定的相位关系,当光纤色散造成的该纵模产生的瑞利和布里渊散射的时延差小于该纵模的相干时间时,可以通过外差检测得到二者的拍频信号.所以各纵模产生的瑞利散射与相应纵模产生的布里渊散射信号在光电探测器(Photoelectric Detector, PD)中自外差得到的布里

渊差频信号叠加,如图 2(b),叠加谱峰功率远大于单个纵模产生的布里渊谱峰功率,从而可使系统信噪比

(Signal To Noise Ratio, SNR)大大提高。

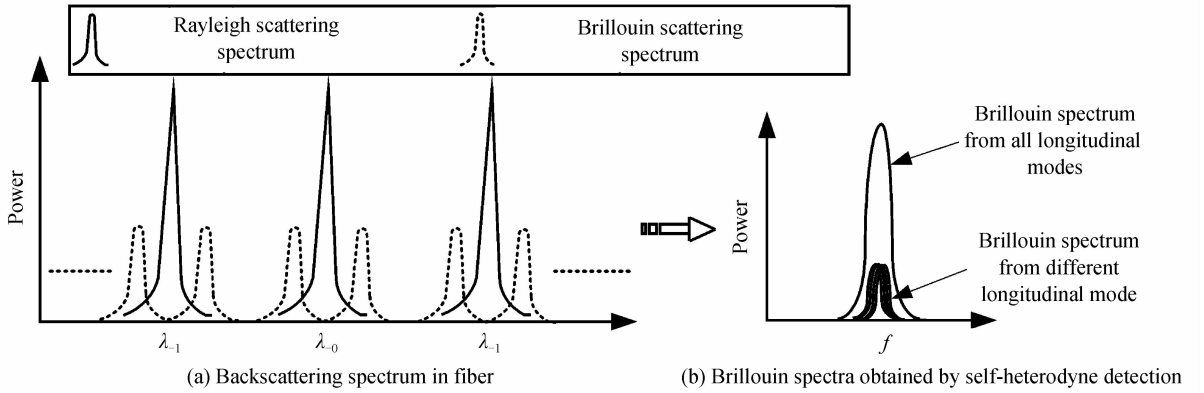


图 2 瑞利与布里渊自外差检测原理

Fig. 2 Principle of self-heterodyne detection of Rayleigh and Brillouin scattering

假设多模 FP 激光器输出 $2N+1$ 个纵模,纵模间隔为 $\Delta\omega$,增益曲线关于中心频率 ω_0 对称;频率 ω_0 的纵模初相位为 0,模序数 $q=0$;多纵模激光脉冲在光纤中产生的背向瑞利、Stokes 和 Anti-Stokes 光在 PD 中进行外差,此时忽略布里渊频移的波长依赖性,则 PD 输出光电流可表示为

$$i(t) = R \overline{[E_R(t) + E_{BS}(t) + E_{BAS}(t)]^2} = R \left\{ \sum_{q=-N}^N \left\{ E_{Rq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega)t + \varphi_{Rq}] + E_{BSq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega - \omega_{BSq})t + \varphi_{BSq}] + E_{BASq} \cos [(\omega_0 + q\Delta\omega + \omega_{BASq})t + \varphi_{BASq}] \right\} \right\}^2 \quad (2)$$

式中, $q(=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N)$ 是激光器输出纵模的序数, E_{Rq} 、 E_{BSq} 和 E_{BASq} 分别是纵模 q 产生的瑞利、斯托克斯(Stokes)和反斯托克斯(Anti-Stokes)散射光场的幅值; φ_{Rq} 、 φ_{BSq} 和 φ_{BASq} 分别是纵模 q 产生的瑞利、Stokes 和 Anti-Stokes 散射光场的相位, ω_{BSq} 和 ω_{BASq} 分别是 Stokes 和 Anti-Stokes 光的布里渊频移的角频率, R 为 PD 响应度. 括号上的横线表示几个光频周期上的时间平均。

传感光纤产生的瑞利和布里渊散射在 PD 中自外差后产生的光电流包括直流、二倍瑞利光频和二倍布里渊光频以及瑞利和布里渊光的和频与差频分量. 其中直流、和频与倍频项不能为 PD 所响应,只有差频项处于 PD 通频带内才能响应. 此外由布里渊散射原理可知 $\omega_{BSq} = \omega_{BASq} = \omega_{Bq}$, 对于自发布里渊散射有 $E_{BSq} = E_{BASq}$, 则式(2)简化为

$$\langle i^2(t) \rangle = \langle 4R^2 \left[\sum_{q=-N}^N \sqrt{P_{BSq}(t)P_{Rq}(t)} \cos(\omega_{Bq}t + \varphi_q(t)) \right]^2 \rangle = 2R^2 \sum_{q=-N}^N P_{BSq}(t)P_{Rq}(t) \quad (3)$$

式中, $\varphi_q(t)$ 为纵模 q 产生的瑞利和布里渊散射的相位差, $P_{BSq}(t)$ 和 $P_{Rq}(t)$ 分别是纵模 q 产生的 Stokes 光和瑞利光功率. 式(3)说明,当采用多模 FP 激光器时,PD 的输出光电流是每个纵模产生的布里渊散射与瑞利散

射自外差后的布里渊信号的叠加. 尽管采用瑞利散射作为本振光与布里渊散射自外差相对于传统本地外差检测获得的本地光功率较小,但由于采用多模 FP 激光器可以大幅度提高系统的入纤功率,因此本文提出的多模自外差 BOTDR 系统可以获得很高的信噪比、测量准确度和较长的传感距离。

2 系统性能建模分析与计算

2.1 多模 FP 激光器 BOTDR 系统

基于多模 FP 激光器外调制和瑞利与布里渊散射自外差的 BOTDR 传感系统如图 3. 光源发出的连续光经偏振控制器(Polarization Controller, PC)进入 EOM 被调制成脉冲光,然后经掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)₁ 放大并经环行器进入传感光纤;脉冲光在光纤中产生的背向散射光由环行器端口 3 输出和 EDFA₂ 放大后进入 PD 进行相干检测. PD 输出频率为布里渊频移的差频信号,直流、二次谐波及和频分量受 PD 带宽限制均被滤除. 因差频信号频率较高无法进行精确的处理,需将其搬移至频率较低的频带内,然后用数据采集及处理单元对信号进

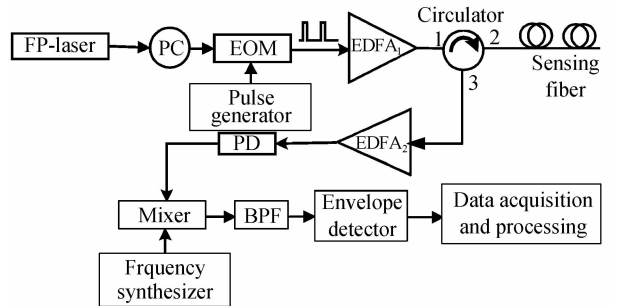


图 3 基于多模 FP 激光器外调制和瑞利与布里渊自外差的 BOTDR 系统

Fig. 3 BOTDR system based on external modulation of multi-longitudinal mode FP laser and self-heterodyne detection of Rayleigh and Brillouin scattering

行处理,通过分析电信号频谱得到布里渊散射信号的频移和强度.

由图 1 可知,多模 FP 激光器的纵模波长间隔为 0.141 nm,即纵模频率间隔约为 17.6 GHz.由测试结果可知,由于多模 FP 激光器各纵模的线宽较窄,相干性较强,各纵模在光纤中产生的瑞利和布里渊散射在 PD 中外差后,PD 输出的差频分量除包含频率 11 GHz 的同一纵模产生的瑞利和布里渊外差信号外,还包含频率为 6.6 GHz 的相邻纵模产生的瑞利和布里渊散射的外差信号,频率为 4.4 GHz 的相邻纵模产生的 Stokes 光和 Anti-Stokes 光的外差信号,通过带通滤波器(Band Pass Filter, BPF)可滤除这些组合频率分量,选出频率为 11 GHz 的有用信号.

2.2 系统输出布里渊散射谱

假设声波以 $\exp(-\Gamma_B t)$ 衰减,则布里渊增益谱服从洛伦兹形谱线分布,其归一化频谱可以表示为^[15]

$$g_B(\Omega) = \frac{(\Gamma_B/2)^2}{(\Omega - \Omega_B)^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad (4)$$

式中, Γ_B 为声子寿命的倒数,即 $\Gamma_B = T_B^{-1}$,声子寿命 T_B 通常小于 10 ns;布里渊自然线宽 $\Delta\nu_B$ 与 Γ_B 的关系为 $\Delta\nu_B = \Gamma_B/(2\pi)$; Ω 为光源的角频率, Ω_B 为布里渊频

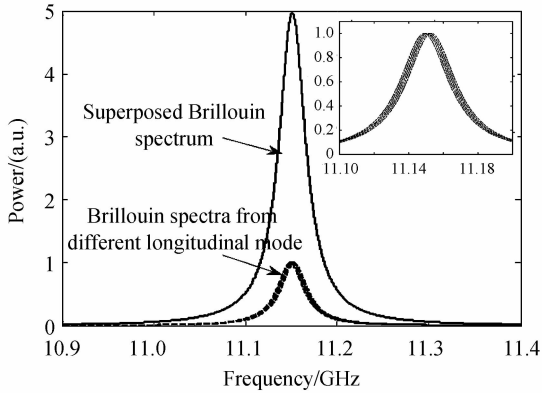


图 4 5 个纵模的布里渊散射叠加谱

Fig. 4 Superposition of Brillouin spectra induced by five longitudinal modes

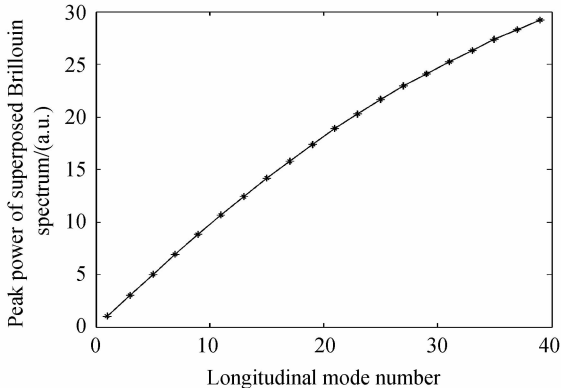


图 5 布里渊叠加谱峰值功率与纵模数的关系

Fig. 5 Peak power of superposed Brillouin spectrum versus longitudinal mode number

移的角频率,布里渊频移 $\nu_B = \Omega_B/2\pi = 2n_p v_A/\lambda$, v_A 为光纤中声速, n_p 为光纤纤芯折射率, λ 为入射光波长.

当激光器中心波长为 1 550 nm 时,选取布里渊自然线宽为 35 MHz,根据式(4)并考虑布里渊频移的波长依赖性,可绘出如图 4 所示的布里渊散射谱;图中插图为 5 个纵模产生的布里渊散射谱的放大图,图中每个散射谱的峰值功率均做归一化处理.由图可知,5 个纵模产生的布里渊散射叠加谱的峰值功率为 4.9661.经计算可得叠加谱峰值功率与纵模数的关系曲线如图 5.由图可知,随着纵模数的增加,叠加谱的峰值功率开始线性增加,当纵模数超过 15 后,叠加谱的峰值功率呈非线性缓慢增长趋势,对计算数据进行三次多项式拟合,可得布里渊谱峰值功率与光源纵模数 $M = 2N+1$ 的关系为

$$P_{FPB} = -1.9 \times 10^{-5} M^3 - 7.4 \times 10^{-3} M^2 + 1.1M - 0.1 \quad (5)$$

式(5)的误差平方和(Sum of Squared Error, SSE)为 0.02349,确定系数(R-square)为 1.

2.3 系统信噪比

基于多模 FP 激光器的 BOTDR 系统中的噪声包括散粒噪声 σ_s^2 、热噪声 σ_T^2 和由自相位调制(Self Phase Modulation, SPM)、交叉相位调制(Cross-phase Modulation, XPM)、四波混频(Four Wave Mixing, FWM)产生的非线性效应噪声. SPM 和 XPM 依赖于脉冲宽度内的功率梯度,当选用上升时间远远小于脉冲宽度的电光调制器时,可获得边沿陡峭和峰值平坦的矩形脉冲,从而可使 SPM 和 XPM 得到很好地抑制;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,在选用性能良好的 EOM 抑制 SPM 和 XPM 后, FWM 也可忽略不计^[16]. 本文在考虑系统噪声时,忽略 SPM、XPM 和 FWM 产生的非线性效应噪声,系统信噪比 R_{SN} 可表示为

$$R_{SN} = \frac{\langle i^2(t) \rangle}{\sigma_s^2 + \sigma_T^2} = \frac{2R^2 \sum_{q=-N}^N P_{BSq}(t) P_{Rq}(t)}{2q(I + I_d)\Delta f + (4kT/R_L)\Delta f} \quad (6)$$

式中, q 为电子电荷量, I 为平均信号光电流, I_d 为暗电流, Δf 为包括 PD、BPF 等的检测单元带宽, k 为玻尔兹曼常量, T 为材料的热力学温度, R_L 为负载电阻.

通常, PD 的暗电流较小可以忽略. 假设每个纵模的布里渊散射功率和频移均相同,即忽略不同纵模的布里渊散射功率和频移的差异,同时考虑到 $P_{Rq} \gg P_{BSq}$, 因此式(6)可表示为

$$R_{SN} = [2R^2(2N+1)P_{0q\alpha_B}(SW\nu/2)\exp(-2\alpha z) \cdot P_{0q\alpha_R}(SW\nu/2)\exp(-2\alpha z)]/[qR(2N+1)P_{0q} \cdot \alpha_R(SW\nu/2)\exp(-2\alpha z)\Delta f + (4kT/R_L)\Delta f] \quad (7)$$

式中, z 为光纤上的不同散射点; α_{α_B} 和 α_R 分别是光纤

损耗系数、布里渊散射损耗系数和瑞利散射损耗系数; S 为背向捕捉系数; W 为脉冲宽度; $v=c/n$ 为光纤中的光速, c 为真空中光速。

为了计算系统的信噪比, 假设传感脉冲宽度为 100 ns, 每个纵模的入纤脉冲峰值功率均为 50 mW, 小于该纵模下光纤的 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, 因此可选用中

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Symbol	q/C	α_B/m	$K/J \cdot K^{-1}$	Symbol	$\alpha_R/dB \cdot km^{-1}$	$R_L/\Omega R/A \cdot W^{-1}$	Symbol	S	$c/m \cdot s^{-1}$	n	
Value	1.6022×10^{-19}	1.1550×10^{-6}	1.38×10^{-23}	Value	0.15	50	1	Value	1.8×10^{-3}	3.0×10^8	1.4652

图 6 是纵模数 M 为 1 和 5 时的系统信噪比, 由图可见, 纵模数为 1 和 5 时, 在 25 km 光纤末端的信噪比分别为 20.36 dB 和 27.35 dB, 纵模数为 5 时的系统信噪比比纵模数为 1 时提高了 6.99 dB. 光纤末端信噪比与纵模数的关系如图 7. 由图可知, 保持叠加平均次数不变, SNR 随纵模数的增加而增大, 纵模数为 40 时比纵模数为 1 时的系统信噪比提高 16.01 dB. 随纵模数的增加, 系统中的散粒噪声会因 PD 输入光功率的增加而增大, 因此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, 然后近似线性缓慢增加的趋势。

心频率为 11 GHz、带宽 Δf 为 500 MHz 的 PD; 为了便于与现有的实验研究结果进行分析比较^[8-10], 选用长度为 25 km 的光纤; 其余参量如表 1. 由于采用自外差检测时作为本振光的瑞利散射功率较低, 因此采用叠加平均的方法提高系统信噪比, 本文选取叠加平均 10^6 次, 可提高信噪比 60 dB.

过 ν_B 的变化量获得, 所以温度和应变的测量准确度取决于 ν_B 的测量准确度 $\delta\nu_B$. $\delta\nu_B$ 可以表示为^[17-18]

$$\delta\nu_B = \Delta\nu_B + \Delta\nu_L \quad (8)$$

式中, $\Delta\nu_B$ 和 $\Delta\nu_L$ 分别为布里渊散射叠加谱的谱宽和光源单个纵模的线宽. 因为 $\Delta\nu_L \ll \Delta\nu_B$, 所以式(8)中的 $\Delta\nu_B + \Delta\nu_L$ 可用 $\Delta\nu_B$ 代替. 由图 4 的考虑布里渊频移波长依赖性的单纵模布里渊谱与多纵模布里渊叠加谱的曲线可知, 随着纵模数的增加, 叠加谱的谱宽也发生相应的变化, 因此由计算可得布里渊散射谱宽与纵模数的关系如图 8.

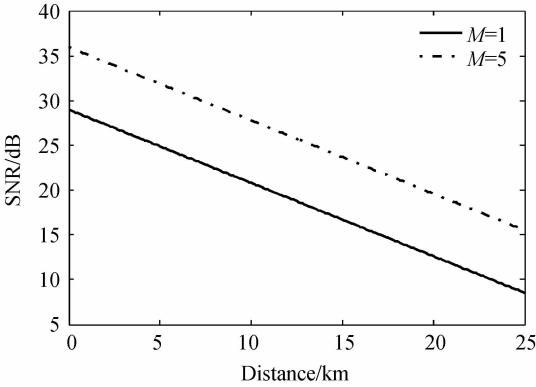
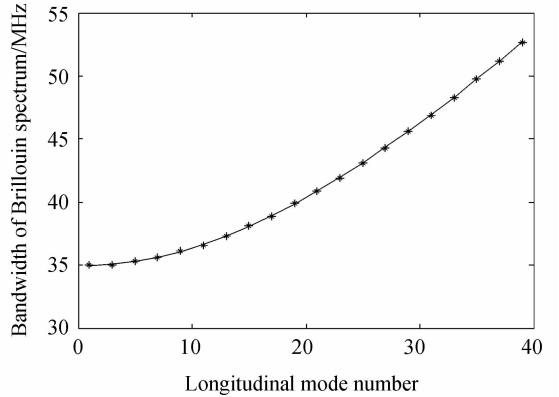
图 6 $M=1$ 和 $M=5$ 时的系统信噪比Fig. 6 SNR of the system with $M=1$ and $M=5$ 

图 8 布里渊散射谱宽与纵模数的关系

Fig. 8 Bandwidth of superposed Brillouin spectrum versus longitudinal mode number

由图可见, 随着纵模数的增加, $\Delta\nu_B$ 非线性增加, 对数据进行三次多项式拟合可得布里渊散射谱宽与纵模数的关系为

$$\Delta\nu_B = -1.3 \times 10^{-4} M^3 + 0.02 M^2 - 2.2 \times 10^{-2} M + 35.0 \quad (9)$$

式(9)的 SSE 为 0.01428, R-square 为 1.

由图 7 和图 8 的光纤末端系统信噪比和布里渊散射谱宽与纵模数的关系可知, 系统温度测量准确度 δT 和应变测量准确度 $\delta\varepsilon$ 与纵模数 M 的关系为^[18]

$$\delta T(M) = \frac{\delta\nu_B}{C_{vT}} = \frac{\Delta\nu_B(M)}{\sqrt{2} C_{vT} (R_{SN}(M))^{1/4}} \quad (10)$$

$$\delta\varepsilon(M) = \frac{\delta\nu_B}{C_{v\varepsilon}} = \frac{\Delta\nu_B(M)}{\sqrt{2} C_{v\varepsilon} (R_{SN}(M))^{1/4}} \quad (11)$$

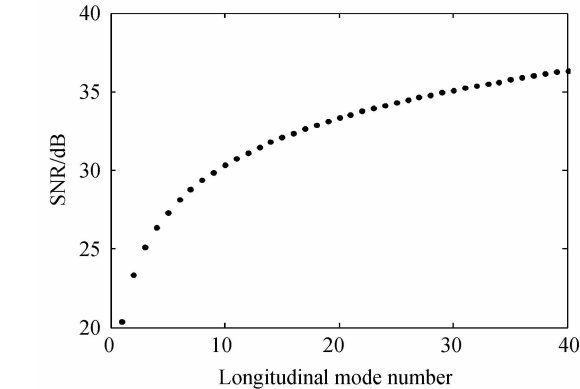


图 7 光纤末端信噪比与纵模数的关系

Fig. 7 SNR versus longitudinal mode number at fiber end

2.4 温度和应变测量准确度

BOTDR 传感系统中, 温度或应变的变化量可以通

式中, C_{vT} 、 $C_{v\epsilon}$ 分别为布里渊频移的温度和应变系数. 对于石英系单模光纤, $C_{vT} = 1.07 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$, $C_{v\epsilon} = 0.048 \text{ MHz}/\mu\epsilon^{[19]}$. 由式(7)、(8)、(10)和(11)可得如图9所示的25 km 光纤末端的 δT 和 $\delta\epsilon$ 与纵模数的关系. 对数据进行有理数逼近拟合可得 δT 和 $\delta\epsilon$ 与纵模数的关系分别为

$$\delta T(M) = (7.1 \times 10^{-4} M^3 - 7.6 \times 10^{-3} M^2 + 3.3M + 14.3) / (M + 1.5) \quad (12)$$

$$\delta\epsilon(M) = (1.6 \times 10^{-2} M^3 - 0.2M^2 + 74.3M + 326.1) / (M + 1.5) \quad (13)$$

式(12)和(13)的 SSE 分别为 2.504×10^{-3} 和 1.352, R-square 分别为 0.9998 和 0.9997.

由图9可知,随着纵模数的增加,温度和应变测量准确度与纵模数均呈非线性关系,当纵模数小于19时,温度和应变测量准确度随纵模数的增加迅速提高;当纵模数为19时,温度和应变测量准确度分别达到最佳值 3.81°C 和 $86.69 \mu\epsilon$;当纵模数大于19后,温度和应变测量准确度随纵模数的增加近似线性缓慢降低. 因此,在多模 FP 激光器瑞利和布里渊自外差 BOTDR 系统中,为了获得高的测量准确度,纵模数应选取在19附近;其次,为了实现高准确度和长距离传感还需根据具体系统考虑光纤类型和长度、激光器中心波长和纵模间隔、布里渊自然线宽和接收机带宽等因素,通过优化计算确定最佳的纵模数.

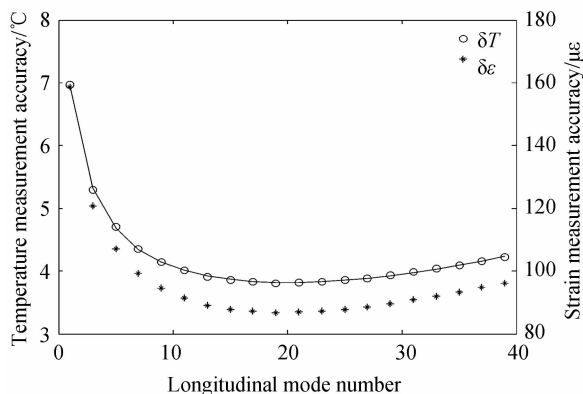


图9 25 km 光纤末端测量准确度与纵模数的关系

Fig. 9 Measurement accuracy versus longitudinal mode number at the end of 25 km long fiber

3 结论

针对传统窄谱光源 BOTDR 系统结构复杂、成本高和性能受 SBS 阈值限制难以进一步提高的问题,本文基于相干检测理论提出了一种基于多模 FP 激光器和瑞利与布里渊自外差检测的 BOTDR 传感系统,分析了系统提高 SBS 阈值、瑞利与布里渊自外差检测的原理,推导了系统信噪比表达式,采用纵模间隔为 0.141 nm 的多模 FP 激光器分析了系统输出布里渊散射谱峰值功率、谱宽及系统信噪比、温度和应变测量准确

度与纵模数的关系,并得到了相应的拟合公式. 结果表明,随着纵模数的增加,系统信噪比、温度和应变测量准确度均得到了较大提高,当纵模数为 19 时,温度和应变测量准确度分别达到最佳值 3.81°C 和 $86.69 \mu\epsilon$. 本文的研究结果不但为分析和评价基于多模 FP 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提供了参考.

参考文献

- [1] BAO Xiao-yi, CHEN Liang. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4152-4187.
- [2] KEE H H, LEES G P, NEWSON T P. All fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(10): 695-697.
- [3] YANG Wei, YANG Yuan-hong. Digital envelope detection technique for Brillouin optical time-domain reflectometry based on generalized harmonic wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(5): 38-46.
杨巍, 杨远洪. 基于广义谐波小波变换的布里渊光时域反射计的数字包络解调技术[J]. *光学学报*, 2013, **33**(5): 38-46.
- [4] BI Wei-hong, YANG Xi-peng, LI Jing-yang, et al. Forward and backward Raman amplification of Brillouin scattering signal in Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(12): 148-153.
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): 148-153.
- [5] LI Yong-qian, ZHAO Xu, ZHAO Li-juan, 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量[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0319002.
- [6] LI Yong-qian, LI Xiao-juan, AN Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(1): 61-70.
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): 61-70.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] LI Cun-lei, LU Yuan-gang, ZHANG Xu-ping. SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometer using multi-wavelength coherent detection[J]. *Electronics Letters*, 2012, **48**(18): 1139-1141.
- [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] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, WANG Zhao-ying, *et al.* Transl. 2nd ed. Beijing: electronic industry press, 2010:245-273.
非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 王肇颖, 等. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010:245-273.
- [13] LIN Dian-yang, GAO Hong-yan, WANG Shuang-yi, *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): 4151-4156.
- [14] LAN Xin-ju. 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.
- [15] ROBERT W B. Nonlinear optics, 2nd [M]. San Dedgo: Academic Press, 2003.
- [16] LV Li-dong, SONG Yue-jiang, ZHU Fan, *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.
- [17] HORIGUCHI T, KURASHIMA T, TATEDA M. Nondestructive measurement of optical fiber tensile strain distribution based on Brillouin spectroscopy[J]. *IEICE of Japan*, 1990, **J73-B-1**(2): 141-152.
- [18] HORIGUCHI T, KURASHIMA T. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1296-1302.
- [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.