

分布式拉曼放大对布里渊时域分析的负面影响

秦祖军^{1, 2, 3} 梁国令¹ 张文涛^{1, 3} 叶松^{1, 3} 熊显名^{1, 3}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

²广西信息科学实验中心, 广西 桂林 541004

³广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 为研究拉曼抽运源相对强度噪声(RIN)和布里渊慢光对基于分布式拉曼放大(DRA)的远距离布里渊时域分析仪(BOTDA)的负面影响,分别采用解析法和数值法分析了传感光纤中拉曼抽运光、布里渊抽运光和探测光相互作用的振幅耦合模型。对拉曼抽运源 RIN 传递的研究表明:RIN 强度每增加 1 dB,检测信号信噪比(SNR)降低约 1 dB;当 RIN 值小于-135 dB 时,其影响可忽略不计。对布里渊慢光的研究结果表明:分布式拉曼放大补偿光波线性衰减的同时,增加了由布里渊慢光延迟导致的光学时域反射定位误差。该定位误差使不同扫描频率获取的检测信号时间迹上同一时刻点对应不同的传感光纤空间位置,影响了布里渊谱的三维重构及其布里渊频移的准确提取。

关键词 光纤光学;布里渊时域分析仪;拉曼抽运相对强度噪声;慢光效应;

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s206002

Negative Effects of Distributed Raman Amplification on Long Distance Brillouin Optical Time-Domain Analyzer

Qin Zujun^{1, 2, 3} Liang Guoling¹ Zhang Wentao^{1, 3} Ye Song^{1, 3} Xiong Xianming^{1, 3}

¹ School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology University, Guilin, Guangxi 541004, China

² Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin, Guangxi 541004, China

³ Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract To investigate the negative effects of the relative intensity noise (RIN) of the Raman pump and the Brillouin slow light on the long-distance Brillouin optical time-domain analyzer (BOTDA) assisted by distributed Raman amplification (DRA), the coupled amplitude equations describing the interactions between the Raman pump, Brillouin pump and Brillouin probe have been solved. Results of RIN transmission of the Raman pump show that 1 dB increase in the RIN of the Raman pump leads to about 1 dB decrement in the signal-to-noise ratio (SNR) of the received electrical signal. This undesirable effect can be ignored when the RIN value of the Raman pump is down to -135 dB. Furthermore, results of Brillouin slow light show that compensating the linear loss of the waves in the sensing fiber by DRA results in an increase of position locating error (PLR) induced by Brillouin slow light effect. It's also shown that, at the same time, point in the detected signal traces obtained at different sweeping frequencies corresponds to different spatial locations on account of PLR. The errors will have a significant negative effect on the reconstruction of the 3D Brillouin spectrum and the accurate extracting of the Brillouin frequency shift of the sensing fiber.

Key words fiber optics; Brillouin optical time-domain analyzer; relative intensity noise of Raman pump; slow light

OCIS codes 060.2310; 190.5650; 060.2370; 190.4370

收稿日期: 2015-01-23; **收到修改稿日期:** 2015-03-19

基金项目: 广西省自然科学基金(2013GXNSFBA019269, 2014GXNSFAA118389, 2013GXNSFDA019002, 2014GXNSFGA118003)、广西信息科学实验中心资助项目(20130328)、广西自动检测技术与仪器重点实验室资助项目(YQ14107)

作者简介: 秦祖军(1978—),男,博士,副教授,主要从事非线性光纤光学和光纤传感等方面的研究。E-mail: qinzej@guet.edu.cn

1 引言

布里渊时域分析仪(BOTDA)可以感知整条光纤链路上被测物理场的空间分布和随时间连续变化信息,在重要军民大型基础设施的安全监测领域有广泛的应用前景;同时,它具有体积小、耐强磁场、耐辐射和抗腐蚀、传感距离远、测量精度高等诸多优点,因此得到极大的关注和研究^[1-4]。BOTDA系统中,布里渊抽运光和探测光在传感光纤中相向传输,由电致伸缩效应激发超声波,并通过声波场产生能量转移,能量转移大小与两者光频差相关。通过扫频法和光时域反射(OTDR)技术,便可重构出传感链路的三维布里渊谱,并提取出传感光纤布里渊频移分布。根据传感光纤布里渊频移与待测物理参量之间的线性关系可反演出待测物理量的沿线分布信息^[5]。

测量距离达百公里量级的远距离 BOTDA 是当前该领域关注热点,相关学者为此提出了诸多新颖的科学思路和技术手段^[2-3,6-8]。其中,分布式拉曼放大技术(DRA)是关键的一种方案,它通过补偿传感光纤中布里渊抽运光和探测光的线性衰减实现远距离传感^[9-14]。当前报道的基于 DRA 的 BOTDA 最远测量距离可达150 km 以上,空间分辨率为 5 m,温度分辨率可达 1.4 °C^[15]。DRA 技术延伸了 BOTDA 测量距离,但是也一定程度影响了 BOTDA 性能。首先,拉曼抽运源通常工作在数百毫瓦量级,如此高的功率对布里渊探测信号光存在较强的相对强度噪声(RIN)传递,降低了检测信号信噪比(SNR, R_{SN}),进而增加传感光纤布里渊频移测量不确定度。拉曼抽运源 RIN 对 BOTDA 性能影响已有相关报道^[11],但还缺乏系统性研究,DRA 补偿传感光纤中的光波损耗,同时也增加了由布里渊抽运光和探测光慢光效应引起的空间定位误差,尤其是传感光纤末端或远距离传感情况。2006年,Thévenaz等^[16-18]分析了短传感距离(小于等于10 km)和存在中等程度布里渊抽运消耗情况下的布里渊慢光效应对 BOTDA 空间分辨率影响,结果表明慢光效应对短距离 BOTDA 的空间分辨率影响可忽略不计。然而,基于 DRA 技术的远距离 BOTDA 系统,慢光延迟可导致 OTDR 技术产生百米量级的空间误差。如此大的空间定位误差与当前远距离 BOTDA 追求的高精度理论与应用研究相矛盾,应予以考虑和详尽研究。目前,关于慢光效应对远距离 BOTDA 空间定位精度和布里渊频移测量影响的研究报道不多。综上所述,为获得基于 DRA 技术的高性能 BOTDA,有必要研究分布式拉曼放大对 BOTDA 性能的负面影响。

从传感光纤中受激拉曼散射效应(SRS)和受激布里渊效应(SBS)的光波振幅耦合模型出发,本文从拉曼抽运源 RIN 强度和慢光延迟效应角度研究了 DRA 对拉曼抽运 BOTDA 性能的负面效应;采用解析法研究拉曼抽运源 RIN 强度对检测信号信噪比的影响;采用数值法分析布里渊慢光延迟对 BOTDA 空间定位误差及其对传感光纤三维布里渊谱重构产生的影响。

2 理论分析模型

拉曼抽运 BOTDA 包含正向抽运、反向抽运和双向抽运结构。为一般化,图 1 为双向拉曼抽运结构 BOTDA 简图,正向、反向拉曼抽运功率由同一激光器经分束器产生(设正向拉曼抽运功率所占百分比为 γ ,若 $\gamma=1$,表示正向抽运,若 $\gamma=0$,表示反向抽运,若 $0<\gamma<1$,表示双向抽运),分别从传感光纤两侧注入。布里渊抽运光为脉冲光,沿传感光纤正向传播(+ z 方向);布里渊探测光为连续光,沿传感光纤反向(- z 方向)传输。设布里渊抽运光频率低于探测光频率,则图 1 所示为损耗工作模式 BOTDA,抽运脉冲产生“慢光”效应(反之,则该 BOTDA 为增益工作模式,对应“快光”效应,研究过程与“慢光”相似)。对布里渊抽运光和探测光进行扫频,并在输入端($z=0$)对不同扫描频率获取的探测光进行光电转换、去噪和信号解调即可提取出整条传感链路的布里渊频移分布。

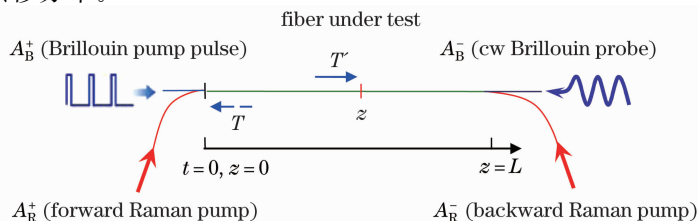


图 1 双向拉曼抽运结构 BOTDA

Fig. 1 BOTDA configuration with bi-directional pumping scheme

为分析方便,忽略传感光纤中的自发辐射噪声和瑞利散射噪声。依据光纤中 SRS 和 SBS 三阶非线性理论,拉曼抽运光、布里渊抽运光和探测光相互作用的振幅耦合方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_R^+}{\partial z} + \frac{1}{v_R} \frac{\partial A_R^+}{\partial t} &= -\frac{\alpha_R}{2} A_R^+ - \frac{g_R}{2} \frac{\omega_R}{\omega_B} A_R^+ (|A_B^+|^2 + |A_B^-|^2), \\ -\frac{\partial A_R^-}{\partial z} + \frac{1}{v_R} \frac{\partial A_R^-}{\partial t} &= -\frac{\alpha_R}{2} A_R^- - \frac{g_R}{2} \frac{\omega_R}{\omega_B} A_R^- (|A_B^+|^2 + |A_B^-|^2), \\ \frac{\partial A_B^+}{\partial z} + \frac{1}{v_B} \frac{\partial A_B^+}{\partial t} &= -\frac{\alpha_B}{2} A_B^+ + \frac{g_R}{2} A_B^+ (|A_R^+|^2 + |A_R^-|^2) - g A_B^+ |A_B^-|^2, \\ -\frac{\partial A_B^-}{\partial z} + \frac{1}{v_B} \frac{\partial A_B^-}{\partial t} &= -\frac{\alpha_B}{2} A_B^- + \frac{g_R}{2} A_B^- (|A_R^+|^2 + |A_R^-|^2) + g^* A_B^- |A_B^+|^2, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $A_{R(B)}^+$ 和 $A_{R(B)}^-$ 分别表示正向拉曼(布里渊)抽运光和反向拉曼抽运光(布里渊探测光)的缓变振幅, ω 、 v 和 α 分别表示它们的角频率、群速度和光纤线性衰减系数, g_R 表示拉曼抽运对 SBS 作用光波的拉曼增益系数(由于布里渊抽运光和探测光光频差仅为 10 GHz 量级,因此假设它们的拉曼增益系数相等)。针对本文研究的两种情况,(1)式中传感光纤的布里渊增益谱 $g(\Omega)$ 分别采用两种不同形式表示:1)研究拉曼抽运源 RIN 对 BOTDA 性能影响时,传感光纤的布里渊增益谱 $g(\Omega)$ 表示为 $g(\Omega) = \text{Re}\{0.5g_B/[1+j\Omega/(\Gamma_B/2)]\}$, 式中 $\text{Re}\{\cdot\}$ 表示取实部, g_B 表示传感光纤峰值布里渊增益系数, $\Gamma_B = 2\pi\Delta\nu_B$, $\Delta\nu_B$ 为传感光纤布里渊增益谱半高全宽线宽(FWHM);2)研究布里渊抽运光与探测光慢光延迟对 BOTDA 性能影响时, $g(\Omega) = 0.5g_B/[1+j\Omega/(\Gamma_B/2)]$ 。(1)式中符号“*”表示取共轭。

2.1 拉曼抽运源 RIN 对 BOTDA 检测信号信噪比的影响

事实上,布里渊抽运光 RIN 对检测信号信噪比也存在一定影响,然而在远距离传感光纤中,布里渊抽运光和探测光的反向传输起到对 RIN 的平均化作用,其 RIN 传递函数可以看作是低通滤波器,截止频率通常不大于 1 MHz^[19]。因此,本文忽略布里渊抽运光 RIN 对检测信号信噪比的影响,仅分析拉曼抽运源 RIN 噪声导致的检测信号信噪比恶化。根据噪声特性,可将 RIN 强度噪声处理成均值为零的高斯随机噪声,则拉曼抽运源 RIN 引起的布里渊探测光光电转换电信号信噪比降低可以表示为

$$\Delta\eta = 10\lg\left[1 + 10^{0.1\times\eta} \int_{\omega_1}^{\omega_2} r_p(\omega) H_{\text{RIN}}(\omega) d\omega\right], \quad (2)$$

式中 η 表示不考虑 RIN 影响时布里渊探测光经光电转换后的电信号信噪比(单位: dB), $r_p(\omega)$ 表示拉曼抽运源的 RIN 噪声, $B=(\omega_2-\omega_1)/2\pi$ 表示光电探测器的探测带宽(ω_1 和 ω_2 对应光电探测器的探测带宽限), $H_{\text{RIN}}(\omega)$ 表示拉曼抽运源的 RIN 传递函数。在拉曼抽运 BOTDA 系统中,拉曼抽运源的功率通常为数百毫瓦,远远大于布里渊抽运光和探测光强度,因此分析拉曼抽运源 RIN 传递函数 $H_{\text{RIN}}(\omega)$ 时采用小信号近似,即布里渊抽运光和探测光对拉曼抽运光的消耗忽略不计。依据(1)式的振幅耦合理论模型,经繁杂推导后可得出双向拉曼抽运条件下的拉曼抽运源 RIN 传递函数解析表达式 $H_{\text{RIN}}(\omega)$, 可表示如下:

$$\begin{aligned} H_{\text{RIN}}(\omega) &= G_R^2 \left\{ \frac{\gamma^2 [1 - 2\exp(-a_R L) \cos(\omega D \Delta \lambda L)]}{(a_R L)^2 + (\omega D \Delta \lambda L)^2} + \frac{(1 - \gamma^2) [1 - 2\exp(-a_R L) \cos(2\omega L/v_B)]}{(a_R L)^2 + 4(\omega L/v_B)^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{2\gamma(1 - \gamma) \{ (a_R^2 v_B^2 - 2\omega^2 D \Delta \lambda v_B) [1 - 2\exp(-a_R L)] \cos(\omega L/v_B) + 2\omega a_R v_B \sin(\omega L/v_B) \}}{[(a_R L)^2 + (\omega D \Delta \lambda L)^2] [(a_R v_B)^2 + 4\omega^2]} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中拉曼增益系数 $G_R = g_R P_{R0} L$, P_{R0} 表示总拉曼抽运功率, L 表示传感光纤长度, D 为传感光纤的色散参量, $\Delta\lambda$ 为拉曼抽运光与布里渊探测光波长差。将(3)式代入(2)式即可量化分析拉曼抽运源 RIN 导致的布里渊探测光光电转换信号信噪比恶化。值得注意的是,在(2)式推导中考虑到 BOTDA 的传感距离为百公里量级,采用的近似关系为 $\exp(-2a_R L) \approx 0$ 。可以看出,(3)式包含了与布里渊探测光同向、反向传输的拉曼抽运光的 RIN 影响:对于反向拉曼抽运光(传播方向为 $-z$ 方向,与布里渊探测光传播方向相同),它与布里渊探测光存在群速度差异,它的影响以色散参量 D 表征;对于正向拉曼抽运光(传播方向为 $+z$ 方向,与布里渊探测光传播方向反向),与布里渊抽运光相似,反向传输降低了其 RIN 对布里渊探测光的影响。

2.2 布里渊慢光延迟对 BOTDA 空间定位精度的影响

结合图 1 所示结构分析布里渊慢光效应对 BOTDA 空间定位精度的影响。设布里渊抽运脉冲从始发端($z=$

0)到达 z 处所需时间为 $T'(z)$, 群速度为 v_{g1} ; 探测光与布里渊抽运光在 z 处作用后, 返回始发端所需时间为 $T(z)$, 群速度为 v_{g0} (由于布里渊慢光效应, $v_{g0} \neq v_{g1}$)。这样, 在实际空间位置为 $z = v_{g0}T = v_{g1}T'$ 处, 由 OTDR 技术确定的传感光纤空间坐标位置为 $z' = 0.5v_{g0}[T'(z) + T]$, 则布里渊慢光效应产生的相应空间定位误差为

$$\Delta\epsilon(z) = z' - z = 0.5v_{g0}[T'(z) - T(z)] = 0.5v_{g0}\Delta T(z), \quad (4)$$

式中 $\Delta T(z)$ 为布里渊抽运光与探测光在 z 长度传感光纤中产生的慢光时间延迟。若无慢光时间延迟, $\Delta T(z) = 0$, 无空间定位误差产生。然而, 由 SBS 的窄带放大机理可知, $v_{g1} < v_{g0}$ 或者 $T'(z) > T$ (考虑到布里渊抽运光和探测光间的频率间隔很小, 忽略了由光纤材料色散产生的群速度差异), 即 $\Delta T(z) > 0$, 布里渊慢光作用致使 BOTDA 产生了空间定位误差。 ΔT 大小与布里渊抽运光和探测光功率密切相关, 在小信号近似条件下两者为正比关系^[20]。因此, 由于 DRA 对光波的放大作用, 使布里渊抽运光和探测光保持较高功率传输, 慢光延迟时间 ΔT 和空间定位误差 $\Delta\epsilon$ 均相应增加。根据布里渊慢光性质可知, 对于确定的 BOTDA 扫描频率, 传感光纤不同位置产生的慢光延时不同, 对应不同的空间定位误差, 传感距离越长空间定位误差越大。此外, 不同的 BOTDA 扫描频率测量传感光纤相同位置也会产生不同的时间延迟。这样, 在不同扫描频率测得的检测信号时间轴上, 同一时刻点并不对应相同的传感光纤位置。该现象将影响传感光纤三维布里渊谱的重构与布里渊频移的准确提取。

3 结果与讨论

根据第 2 节建立的理论模型, 分析了拉曼抽运源 RIN 对检测信号信噪比以及由 DRA 导致的布里渊延时增加对 BOTDA 空间定位精度影响。设传感光纤采用标准单模光纤, 长度为 120 km, 群折射率为 1.45, 布里渊增益线宽 $\Gamma_B/2\pi$ 为 40 MHz, 有效纤芯面积为 $50 \mu\text{m}^2$, 峰值布里渊增益系数为 $2 \times 10^{-11} \text{ m/W}$, 1550 nm 处的色散参量 $D = 17 \text{ ps/nm/km}$; 当无外界物理场影响时, 其布里渊频移分布均匀。拉曼抽运光波长为 1455 nm, 光纤的衰减为 0.29 dB/km, 拉曼增益系数为 $0.40 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。布里渊抽运光波长和功率分别为 1550 nm 和 10 dBm, 布里渊探测光功率为 -10 dBm, 光纤衰减均为 0.2 dB/km。在输入端, 对布里渊探测光采取强度解调方案, 采用的光电探测器带宽 $B = 125 \text{ MHz}$ 以获得米级的空间分辨率。

3.1 拉曼抽运源 RIN 强度对检测信号信噪比影响

拉曼抽运源对布里渊探测光的 RIN 传递特性如图 2 所示, 其中总拉曼抽运功率由 0.6 W 上升至 1.0 W。图中正向拉曼抽运功率所占比重因子 γ 值经多次数值实验后折衷设计为 0.7, 主要考虑了以下两个因素: 1) 反向拉曼抽运光与布里渊探测光在传感光纤中同向传输, 其 RIN 传递对检测信号噪声影响明显, 因此反向拉曼抽运功率要相对较小; 2) 正、反向拉曼抽运功率应确保 120 km 传感光纤中布里渊抽运光和探测光的放大, 同时要使布里渊抽运光在传感光纤中的最大功率值要小于其他有害非线性效应阈值 (约 20 dBm)。由图 2 可知, RIN 传递函数的 3 dB 截止频率接近 10 MHz, 拉曼抽运源 RIN 可有效传递至检测信号并降低其信噪比; 拉曼抽运源功率越高, 影响越明显。同时, 对正向、反向拉曼抽运 RIN 传递特性进行了单独分析, 结果表明正向拉曼抽运光的 RIN 传递函数截止频率远小于 1 MHz, 图 2 所示结果的主要影响源自反向拉曼抽运光。

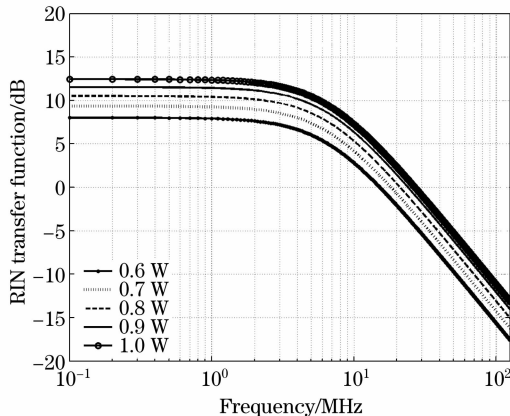


图 2 不同抽运功率的拉曼抽运源的 RIN 传递函数

Fig. 2 RIN transfer function of Raman pump with different pump levels

为进一步分析拉曼抽运源 RIN 对 BOTDA 检测信号信噪比的影响程度,图 3 给出了不同拉曼抽运源 RIN 值导致的检测信号信噪比降低,其中总拉曼抽运功率从 0.5 W 增加至 1.0 W,正向抽运分量比重为 0.7。由图可知,随着拉曼抽运源 RIN 强度降低,其对检测信号信噪比影响迅速减小。拉曼抽运源 RIN 强度每增加 1 dB,检测信号信噪比降低约 1 dB。设传感光纤布里渊频移不确定值 $\delta\nu_B$ 为 3 MHz(对应约 3 °C 的温度测量精度或者约 60 $\mu\epsilon$ 应变测量精度),则无 RIN 影响时检测信号信噪比为 38.9 dB^[3];依据布里渊频移不确定公式 $\delta\nu_B = \Delta\nu_B / [\sqrt{2}(R_{SN})^{1/4}]$ 计算可知,拉曼抽运源 1 dB 的 RIN 增加将使传感光纤布里渊频移不确定值增加 0.2 MHz。当拉曼抽运源的 RIN 值降低至 -135 dB 时,其 RIN 对检测信号信噪比影响可以忽略;需注意的是,与该 RIN 值对应的高功率拉曼抽运源成本相对较高。因此,鉴于拉曼抽运源 RIN 传递降低检测信号信噪比,对拉曼抽运源功率(尤其是与布里渊探测信号光同向传输的反向拉曼抽运光功率)和拉曼抽运源的 RIN 值必须进行优化设计。

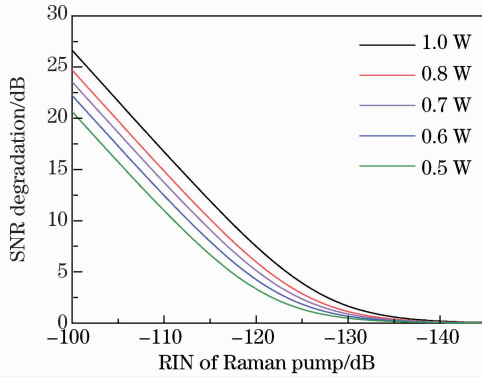


图 3 拉曼抽运光 RIN 对 BOTDA 检测信号信噪比影响

Fig. 3 Degradation of electrical SNR as a function of Raman pump RIN level

3.2 布里渊慢光延迟对 BOTDA 空间定位精度的影响

基于 DRA 技术的 BOTDA 系统,除了拉曼抽运源 RIN 强度影响 BOTDA 检测信号信噪比外,布里渊抽运光和探测光间的慢光效应也将使 BOTDA 产生较大的空间定位误差。由布里渊慢光效应已知,对于特定的布里渊抽运光和探测光光频差 $\Delta\omega$,不同长度的传感光纤产生不同的时间延迟^[20],对应不同的空间误差大小。以下重点研究基于扫频法改变 $\Delta\omega$ 、对传感光纤特定位置测量时产生的空间定位误差。为此,基于有限差分法数值分析了(1)式耦合模型,计算了具有不同 $\Delta\omega$ 的布里渊慢光延迟,并依此确定了 OTDR 定位误差。图 4 为不同光频差 $\Delta\omega$ 测量传感光纤 120 km 处时产生的空间误差大小,其中总拉曼抽运功率为 0.7 W,正向拉曼抽运功率的比重为 0.7。图中横坐标 $\delta\omega = 2(\Omega_B - \Delta\omega) / \Gamma_B$,表示以传感光纤布里渊增益线宽为基准的归一化角频率失谐量, Ω_B 为传感光纤的布里渊频移(取 10.8 GHz)。可以发现,不同扫描频率测量同一空间位置,空间定位误差不相等:布里渊谐振时($\delta\omega = 0$)空间定位误差最大,达到 168 m;当 $\delta\omega = 1$ 时,由布里渊窄带放大机理可知此时无慢光效应,无定位误差产生。为分析比较,图中同时给出了传感光纤中布里渊抽运光和探测光功率保持不变时的空间定位误差(如图 4 虚线所示)。此时布里渊慢光效应强于上述情况,因此空间定位误差更大(布里渊谐振时,定位误差达 198 m)。

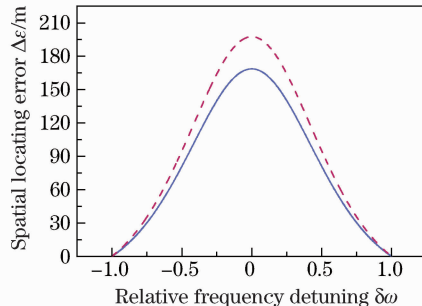


图 4 空间定位误差随归一化频率失谐量变化关系

Fig. 4 Spatial locating error as a function of normalized frequency detuning

布里渊慢光效应产生的空间定位误差,还将影响传感光纤布里渊谱三维重构及其布里渊频移的准确提取。分析光纤慢光性质可知,有多组扫描频率 $\Delta\omega$ 和空间位置坐标 z 的参数组合 $(\Delta\omega, z)$ 可以产生相同延时,对应检测信号时间迹上同一时刻点 τ 。因此,由于布里渊抽运光和探测光间的慢光效应,出现了不同扫描频率获取的检测信号时间迹上同一时刻对应不同空间位置的现象;或者说,同一空间位置由不同扫描频率进行测量,其返回的光电检测信号并非对应时间迹上的相同时刻点。若把不同扫描频率获得的所有光电信号时间迹上 τ 时刻的数据根据 OTDR 原理映射成传感光纤上的同一空间位置坐标 $z=0.5 v_g \tau$ 处的值,将使重构的传感光纤三维布里渊谱发生畸变,并进而使依此提取的布里渊频移产生误差,影响测量结果。

由上面分析与讨论可知,基于 DRA 技术虽然延伸了 BOTDA 传感距离,实现百公里量级的远距离测量,但是其负面效应应予以考虑:1)高功率拉曼抽运源的 RIN 会降低检测信号信噪比,增加布里渊频移测量的不确定度;2)由于 DRA 增强了远距离布里渊慢光延迟效应,产生了百米量级的 OTDR 空间定位误差,会使基于扫频工作机理的 BOTDA 重构的传感光纤三维布里渊谱产生畸变。

4 结 论

基于传感光纤中拉曼抽运光、布里渊抽运光和探测光间的振幅耦合模型,分别分析了拉曼抽运源 RIN 强度、布里渊慢光效应对 BOTDA 性能的负面影响。采用解析方法分析了拉曼抽运源 RIN 强度对 BOTDA 检测信号信噪比影响,结果表明:1)与布里渊探测光传输方向同向和反向的拉曼抽运源 RIN 传递函数截止频率分别约为 10 MHz 和几千赫兹;2)拉曼抽运源的 RIN 强度每增加 1 dB,检测信号信噪比降低约 1 dB,增加了布里渊频移测量的不确定度 0.2 MHz。采用数值法研究了布里渊抽运光和探测光间的慢光延迟产生的 OTDR 空间定位误差,结果表明:对于同一传感距离,不同光频差的布里渊抽运光和探测光在传感光纤中具有不同的布里渊延迟时间和不同的 OTDR 空间位置;慢光效应产生的空间定位误差,将使传感光纤布里渊谱三维重构产生畸变并进而影响其布里渊频移的准确提取。

参 考 文 献

- 1 Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao, *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 650–654.
宋牟平, 鲍 翀, 裘 超, 等. 结合布里渊时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 650–654.
- 2 Jiang Yun, Jia Xinhong, Wang Zinan, *et al.*. 100 km Brillouin optical time domain analyzer based on random distributed feedback fiber laser pumping[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(1): 45–49.
姜 芸, 贾新鸿, 王子南, 等. 基于随机分布式反馈光纤激光器的 100 km 布里渊光时域分析系统[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(1): 45–49.
- 3 Bao X Y, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 4152–4187.
- 4 Jia Zhenan, Wang Hu, Qiao Xueguang, *et al.*. A study for monitoring strain of oil and gas pipeline based on distributed optical fiber Brillouin scattering[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(3): 534–537.
贾振安, 王 虎, 乔学光, 等. 基于分布式光纤布里渊散射的油气管道应力监测研究[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(3): 534–537.
- 5 Huang Wenfa, Wang Xiaochao, Wang Jiangfeng, *et al.*. Temperature characteristic of stimulated Brillouin scattering in single-mode fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0405001.
黄文发, 汪小超, 王江峰, 等. 单模光纤中受激布里渊散射的温度特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405001.
- 6 Yang Wei, Yang Yuanhong. Digital envelope detection technique for Brillouin optical time-domain reflectometry based on generalized harmonic wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506004.
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): 0506004.
- 7 Jin Chongjiu, Zou Weiwen, Li Hao, *et al.*. Distributed fiber-optic sensing system of Brillouin based on Brillouin optical correlation domain analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050602.
金重九, 邹卫文, 李 颢, 等. 基于布里渊增益和损耗级联的高性能布里渊相干域分布式光纤传感系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050602.
- 8 Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 35(1): 106003.
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*, 2014, 35(1): 106003.
- 9 X Jia, Y Rao, K Deng, *et al.*. Experimental demonstration on 2.5 m spatial resolution and 1 °C temperature uncertainty over long-distance BOTDA with combined Raman amplification and optical pulse coding[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(7): 435–437.
- 10 A-Vinuesa X, M-Lopez S, Corredera P, *et al.*. Raman-assisted Brillouin optical time-domain analysis with sub-meter resolution over 100 km[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12147–12154.
- 11 Soto M A, Bolognini G, DiPasquale F. Optimization of long-range BOTDA sensors with high resolution using first-order bi-directional Raman amplification[J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4444–4457.
- 12 Barrios F R, M-Lopez S, C-Sanz A, *et al.*. Distributed Brillouin fiber sensor assisted by first-order Raman amplification[J]. *Journal of*

- Lightwave Technology, 2010, 28(15): 2162–2172.
- 13 M-Lopez S, A-Camas M, Rodriguez F, *et al.*. Brillouin optical time-domain analysis assisted by second-order Raman amplification[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18769–18778.
- 14 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.
- 15 Y Rao, X Jia, Z Wang, *et al.*. 154.4 km BOTDA based on hybrid distributed Raman amplifications[C]. SPIE, 2014, 9157: 91575P.
- 16 Thévenaz L, Song K Y, Herráez M G. Time biasing due to the slow-light effect in distributed fiber-optic Brillouin sensor[J]. Optics Letters, 2006, 31(6): 715–717.
- 17 Zou L F, Bao X Y, Yang S Q, *et al.*. Effect of Brillouin slow light on distributed Brillouin fiber sensors[J]. Optics Letter, 2006, 31(18): 2698–2700.
- 18 Ravet F, Chen L, Bao X Y, *et al.*. Theoretical study of the effect of slow light on BOTDA spatial resolution[J]. Optics Express, 2006, 14(22): 10351–10358.
- 19 Zhou J H, Chen J P, Yves Jaouën, *et al.*. A new frequency model for pump-to-signal RIN transfer in Brillouin fiber amplifiers[J]. IEEE Photon Lett, 2007, 19(13): 978–980.
- 20 Okawachi Y, Bigelow M S, Sharping J E, *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(15): 153902.

栏目编辑: 史 敏