

远程干涉型光纤传感系统的非线性相位噪声分析*

陈伟 孟洲[†] 周会娟 罗洪

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年11月30日收到; 2012年2月20日收到修改稿)

以远程干涉型光纤传感系统为背景, 研究了系统非线性相位噪声构成, 对各构成要素的具体影响进行了详细分析和综合评价, 简要讨论了噪声抑制方案. 研究表明, 系统相位噪声主要包括强度噪声转化而来的相位噪声、非线性效应引起激光线宽展宽导致的相位噪声以及自相位调制和交叉相位调制引入的相位噪声. 受激布里渊散射和四波混频可引入强度噪声并转化为相位噪声, 对于探测带宽较窄的光纤传感系统, 四波混频引入的该部分噪声往往可以忽略. 受激布里渊散射、四波混频和调制不稳定性都可引起激光线宽展宽而造成相位噪声的增大. 当系统信道数目较多时, 交叉相位调制对相位噪声的贡献不可忽略. 所得结论对远程干涉型光纤传感系统的实际应用具有重要的指导意义.

关键词: 相位噪声, 非线性效应, 光纤传感, 强度噪声

PACS: 42.65.-k, 42.81.-i, 42.81.Pa

1 引言

近年来, 干涉型光纤传感系统以其高灵敏度、大动态范围和抗电磁干扰等诸多优点在水声信号探测、石油天然气储层勘探、地震监测等领域获得了广泛应用^[1-4]. 相位噪声作为该类系统的一个重要参数, 直接决定了系统的检测灵敏度, 故研究相位噪声构成对系统实际应用具有指导意义. 随着掺铒光纤放大器的普遍使用, 光纤传感系统的传输距离大大增加, 达到几百甚至上千公里^[3]. 远程传输导致光纤中各种非线性效应得到积累增强, 常见的有受激布里渊散射和调制不稳定性, 它们的阈值都随光纤有效长度的增加而降低. 此外, 波分复用技术也被大量应用在该类系统中, 多个波长的光同时在光纤中传输时会产生明显的四波混频效应. 同时由于光克尔效应, 自相位调制和交叉相位调制也很显著^[5]. 这些非线性效应的存在势必给系统带来严重的强度及相位噪声, 最终影响系统的检测灵敏度.

国内外针对光纤传输系统中非线性效应的研究主要集中于通信领域, 详细讨论了各种码型调制下受激布里渊散射、四波混频等效应对传输距离、信道串扰、误码率、功率罚等性能的影响^[6-12], 而鲜见针对传感系统中非线性影响的报道. 由于光纤通信系统中高速率(几十 Gb/s)、短脉冲(ps 级脉宽)的数字光信号不同于传感系统中准连续、窄线宽的模拟光信号, 故有必要对光纤传感领域中的非线性效应进行专门研究. 在我们前期的工作中, 以模拟光信号为研究对象, 对受激布里渊散射引入光纤传输系统的强度和相位噪声进行了理论分析和实验测量^[13,14], 还对波分复用情况下四波混频引入的强度和相位噪声进行了数值模拟和实验测量^[15]. 本文基于远程干涉型光纤传感系统, 对其相位噪声构成进行了详细分析, 着重讨论了包括受激布里渊散射、四波混频、调制不稳定性、自相位调制、交叉相位调制在内的各种非线性效应带来的相位噪声, 并对各噪声构成要素所占的地位进行了综合评价, 简要讨论了各非线性效应的抑制方案, 所得结论对该类传感系统的设计及应

* 国家自然科学基金(批准号: 61177073)、光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室开放研究基金(批准号: gdol201101)、湖南省研究生创新基金(批准号: CX2011B033)和国防科学技术大学研究生院创新基金(批准号: B110703)资助的课题.

[†] E-mail: zhouseng6806@163.com

用具有重要的指导意义.

2 系统结构

常见的远程干涉型光纤传感系统(传感部分以迈克耳孙干涉仪为例)基本结构如图 1 所示. 激光器发出的光经长距离的光纤传输后进入 3 dB 耦合器并分为信号光和参考光两束, 其中信号光接受外界声波调制而参考光不接受调制, 两束光经反射镜反射后回到耦合器并发生干涉, 干涉光信号由光电探测器转化为电信号并通过后续的信号处理最终获得声波信息. 实际系统中为提高传感能力, 往往采用由多个激光器、探测器及传感部分构成的波分复用结构, 但共用传输光纤, 通过波分复用器和解波分复用器实现各个波长光的合束与分束. 对于该类传感系统, 相位噪声本底直接决定了系统性能的好坏, 它源于激光频率的抖动, 可表示为

$$\delta\varphi = \frac{2\pi nl}{c} \delta\nu. \quad (1)$$

其中 nl 对应干涉仪的光程差, c 为真空中光速, $\delta\nu$ 为激光线宽. 考虑到相位噪声可由强度噪声转化而来, 故强度噪声也是系统的一个重要参量. 强度噪声源于光强起伏, 其相对值可表示为

$$\text{RIN} = 10 \lg \frac{|\delta P^2|}{|P|^2}. \quad (2)$$

其中 $|\delta P^2|$ 为功率起伏的均方值的谱密度, $|P|$ 为平

均功率.

当激光器输出功率较大或传输光纤较长时, 传输过程中会发生明显的非线性效应, 给系统带来额外的强度及相位噪声, 实验室中利用图 2 所示的噪声测试系统分析各效应的具体影响. 该测试系统基于非平衡干涉仪以及相位产生载波解调技术^[16,17], 将两臂光程差为 1 m (延时光纤约 0.35 m) 的迈克耳孙干涉仪封装于屏蔽箱内抑制外界环境噪声, 利用法拉第旋镜抑制系统的偏振噪声, 将信号源产生的正弦调制信号作用于—臂的压电陶瓷上, 利用采集卡采集光电探测器转化而来的电压信号并通过计算机中的相位产生载波解调程序得到系统的相位噪声本底. 此外, 采用掺铒光纤放大器和可调光衰减器调节进入传输光纤的光功率从而控制各非线性效应的发生情况, 并采用三台激光器的结构研究四波混频的影响. 当研究系统的强度噪声时, 只需探测解波分复用器分束得到的各个波长的光并利用相应的强度噪声测试程序进行测量.

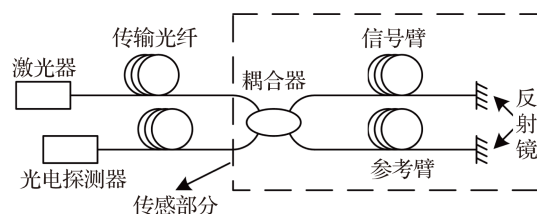


图 1 干涉型光纤传感系统示意图

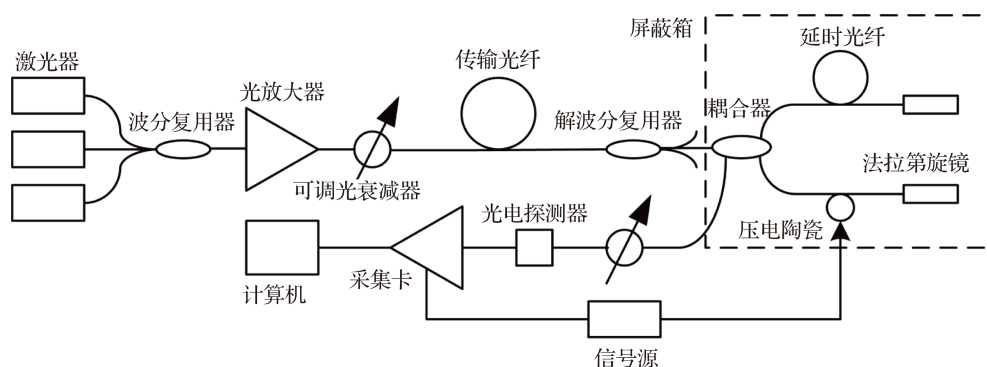


图 2 系统相位噪声测试系统

3 系统相位噪声构成

在远程干涉型光纤传感系统中, 受激布里渊散

射、四波混频、调制不稳定性等非线性效应会带来强度噪声, 并最终转化为相位噪声, 它们还可引起激光线宽的变化, 从而使相位噪声发生相应的变

化. 此外, 自相位调制和交叉相位调制可将强度噪声通过光克尔效应转化为相位噪声. 下面对各非线性效应引入的相位噪声进行详细分析.

3.1 强度噪声转化得到的相位噪声

受激布里渊散射在远程光纤传输时 (50 km 单模光纤) 阈值可低至 4 mW, 是系统实际应用必须考虑的非线性效应. 它源于光波与声波的相互作用, 只在光纤后向发生. 当受激布里渊散射发生时, 大部分光功率被转移至后向散射光, 严重制约了前向光的传输距离. 考虑到受激布里渊散射源于具有热起伏特性的自发布里渊散射 [18], 强度噪声会因热噪声的放大作用首先引入后向散射光, 进而转移至前向光, 故受激布里渊散射还会造成光信噪比的严重下降. 根据 Gordon 和 Mollenauer 的理论 [19], 相位噪声可由强度噪声转化而来, 转化关系式为

$$\langle \delta\varphi^2 \rangle = 1/(2Q). \quad (3)$$

其中 $\langle \delta\varphi^2 \rangle$ 为相位噪声方差, Q 为光信噪比, 其倒数对应相对强度噪声. 在前期的工作中 [14], 我们测量了受激布里渊散射引入的强度及相位噪声, 如图 3 所示. 可见当受激布里渊散射发生后, 相对强度噪声和相位噪声都迅速增大, 前者由 $-102 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 上升至 $-81 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$, 增大 21 dB, 后者由 $-97 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 上升至 $-64 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$, 增大 33 dB, 即受激布里渊散射会造成系统噪声性能的严重劣化.

当频率为 f_i, f_j 和 f_k 的三个光波同时在光纤中传输时, 会产生频率 $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ 的新波, 即所谓的四波混频效应. 对于当前广泛使用的波分复用系统, 相邻信道往往是等间隔的, 导致新波与原波频率重合从而产生相干干涉, 给系统带来强烈的功率起伏, 这点在光纤通信领域已被大量实验所证实 [20]. 但对于光纤传感系统, 我们发现由四波混频引入的强度及相位噪声实际上是可以忽略的^{a)}, 这是由于受限于激光器的制作, 相邻信道并非严格等间隔 (我们的实验中约有 3.75 GHz 的偏离), 且光纤传感系统中使用的光电探测器带宽一般较窄 (约为 kHz/MHz 量级), 从而使新波与原波的拍频噪声被滤掉. 具体测量结果如图 4 所示. 图中噪声开始迅速增大的临界值 (约 6 mW) 对应实验中所使用的 25 km 单模光纤的受激布里渊散射阈值. 未发生受激布里渊散射时, 相对强度噪声和相位噪声分别

为 $-113 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $-104 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$, 与所用激光器本身的相对强度噪声和相位噪声基本一致, 说明四波混频对系统噪声的影响非常微小. 图中两条曲线形状的相似性证实了相位噪声可由强度噪声转化而来这一结论.

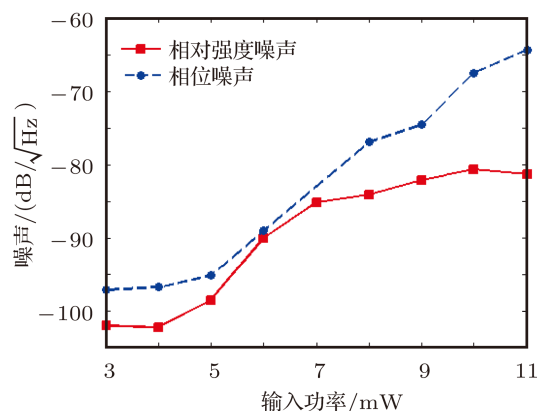


图 3 受激布里渊散射引入的强度及相位噪声

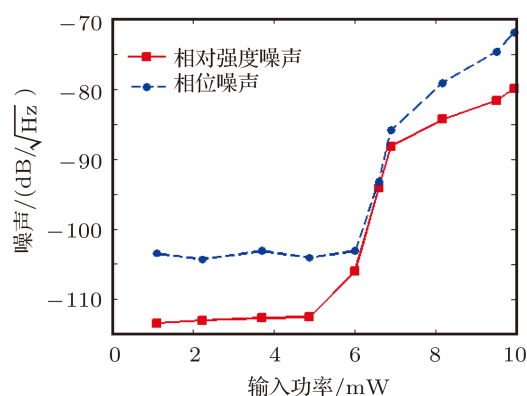


图 4 四波混频存在时的强度及相位噪声

3.2 激光线宽导致的相位噪声

如 (1) 式所示, 相位噪声本质上源于激光频率的抖动, 而各种光纤非线性效应可引起激光线宽的变化, 最终导致相位噪声的变化. 从关系式 $\langle \delta\varphi^2 \rangle = 1/(2Q)$ 可以推断, 由强度噪声转化而来的相位噪声比相应的强度噪声低 3 dB, 但从图 3 和图 4 不难看出, 不同输入功率下的相位噪声反而比强度噪声大, 这就证实了相位噪声还有其他来源. 在前期的工作中, 我们发现受激布里渊散射发生后, 激光线宽显著增大 [21], 文献中也有四波混频使线宽增大的报道 [22], 故二者都可使相应的相位噪声增大.

^{a)} 相关研究已向《Optics Express》投稿

此外, 调制不稳定性作为光纤中另外一种重要的非线性效应, 在频域上表现为产生两个对称的频谱旁瓣^[20]. 在实际的光纤传感系统中, 往往使用 ns 级脉冲实现时分复用, 脉冲峰值功率的典型值为 200—300 mW^[23]. 我们在实验室测量的长距离光纤传输时 (50 km 单模光纤) 调制不稳定性阈值约为 110 mW, 且由于具有极短的响应时间 (约 10 fs), 调制不稳定性可对脉冲峰值功率响应, 故在该类系统中调制不稳定性是较为普遍的现象. 其增益谱可表示为^[20]

$$g(f) = |2\pi f \beta_2| \sqrt{\frac{4\gamma P_0}{|\beta_2|} - (2\pi f)^2}. \quad (4)$$

其中 β_2 为群速度色散参量, γ 为非线性系数, P_0 为输入功率. 取工作波长为 1.55 μm 时普通单模光纤中的参量值 $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma = 2 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 做出 $P_0 = 100, 200, 300 \text{ mW}$ 时的增益谱如图 5 所示, 分别对应频谱范围约为 60, 90, 110 GHz, 即调制不稳定性可引起相当严重的频谱展宽, 势必给系统带来大量的相位噪声.

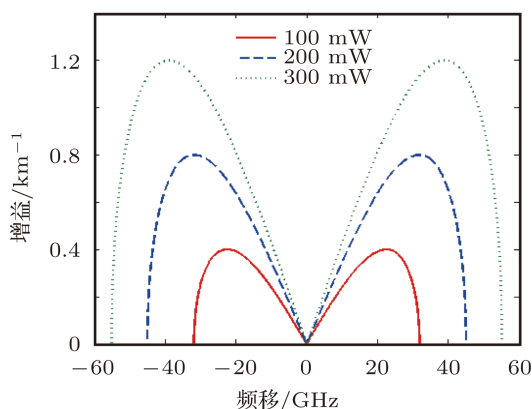


图 5 不同输入功率下的调制不稳定性增益谱

3.3 自相位调制和交叉相位调制引入的相位噪声

由于光克尔效应的存在, 光纤的折射率不再为常数, 而与光纤中的光强有关, 包括光波自身光强及共同传输的其他光波的光强, 由此导致了自相位调制和交叉相位调制^[20]. 当光波具有强度噪声时, 必然引起非线性相位的起伏, 由此带来相位噪声. 该过程可表示为

$$\begin{aligned} \delta\varphi &= n_{NL} k_0 L_{\text{eff}} = n_2 (\delta I + 2\delta I_{\text{other}}) k_0 L_{\text{eff}} \\ &= \gamma (\delta P + 2\delta P_{\text{other}}) L_{\text{eff}}. \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]$ 为光纤有效长度, α 为光纤衰减系数 (典型值 0.2 dB/km), L 为光纤实际长度, n_2 为非线性折射率系数, k_0 为真空中波数. 式中第一项和第二项分别对应自相位调制和交叉相位调制, 因子 2 代表对于相同的光强, 交叉相位调制是自相位调制的两倍. 假设 N 个光波在光纤中传输且其功率相同, 同时利用相对强度噪声的定义式, 可将自相位调制和交叉相位调制引入的相位噪声具体表示如下:

$$\delta\varphi_{\text{SPM}} = \gamma \delta P L_{\text{eff}} = \gamma P \sqrt{\text{RIN}} L_{\text{eff}}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \delta\varphi_{\text{XPM}} &= 2\gamma \delta P_{\text{other}} L_{\text{eff}} \\ &= 2\gamma P \sqrt{N-1} \sqrt{\text{RIN}} L_{\text{eff}}. \end{aligned} \quad (7)$$

我们依据图 3 结果给式中各参量取值, 由此估算自相位调制和交叉相位调制的实际影响. 令 50 km 光纤输出端 $\text{RIN} = -100 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$, $P = 0.4 \text{ mW}$, $N = 3$, 代入 (6) 式和 (7) 式可得 $\delta\varphi_{\text{SPM}} = 1.6 \times 10^{-7} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, $\delta\varphi_{\text{XPM}} = 4.5 \times 10^{-7} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$. 由前文可知, 此时由 RIN 转化而来的相位噪声为 $-103 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 即 $\delta\varphi_{\text{RIN}} = 7.1 \times 10^{-6} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$. 可见对于三波传输而言, 自相位调制和交叉相位调制导致的相位噪声要远小于强度噪声转化而来的相位噪声. 但当传输系统中信道数目比较多时, 交叉相位调制引入的相位噪声不可忽略, 例如 $N = 20$, 可得 $\delta\varphi_{\text{XPM}} = 1.4 \times 10^{-6} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, 可与强度噪声转化得到的相位噪声相比拟.

3.4 相位噪声结构框图

除了上述非线性效应引入的强度及相位噪声外, 掺铒光纤放大器的放大自发辐射光也会带来大量噪声, 此外激光器本身也具有特定的强度和相位噪声^[24], 我们将远程干涉型光纤传感系统相位噪声的主要构成用图 6 表示. 对于使用光放大链的超长距离光纤传输系统, 放大自发辐射光引入的强度及相位噪声占主导地位. 对于非线性效应而言, 受激布里渊散射和四波混频可引入强度噪声并转化为相位噪声, 也可通过增大激光线宽直接引入相位噪声. 此外调制不稳定性也可使频谱展宽从而引入相位噪声. 我们前期研究发现, 相对于强度噪声转化得到的相位噪声, 受激布里渊散射通过增大激光线宽引入的相位噪声起主要作用^[21], 还发现受激布里渊散射对噪声的贡献远大于四波混频的贡献 (见脚注 a). 当系统采用波分复用结构时, 交叉相

位调制通过光克尔效应引入的相位噪声的重要程度取决于信道数目的多少. 了解相位噪声各成分在

系统中所占的地位对于系统的实际应用具有重要意义.

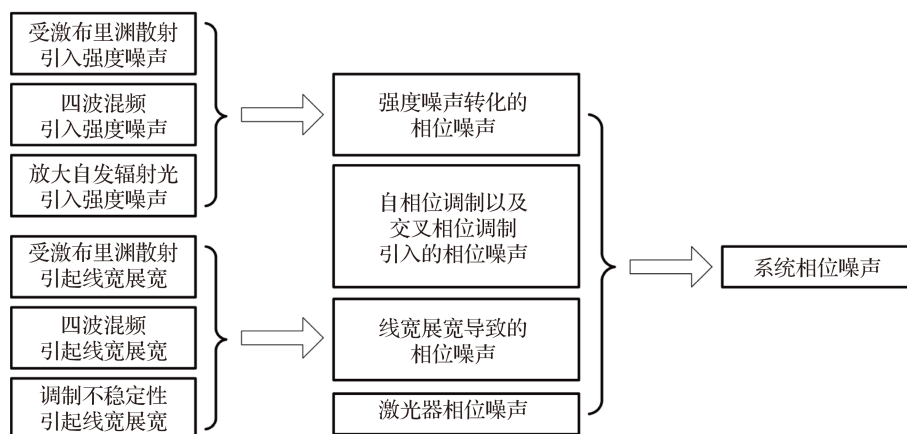


图6 系统相位噪声结构框图

4 抑制方案

由上文的分析可知, 非线性效应的存在将严重降低远程干涉型光纤传感系统的性能, 故在实际应用中有必要对其进行抑制. 我们可以采用控制输入功率的方法防止受激布里渊散射和调制不稳定性的发生. 值得注意的是, 对于系统中为实现时分复用而经常使用的 ns 级脉冲, 受激布里渊散射响应脉冲的平均功率, 而调制不稳定性响应脉冲的峰值功率, 故需控制平均功率在前者阈值以下且峰值功率在后者阈值以下来防止二者的发生. 对于受激布里渊散射, 常见的抑制方法有频率抖动^[25]、相位调制^[26]、沿光纤引入外界或光纤参量的变化^[27-30]、改变光纤横向声场特性等^[31]. 后两种方法实现起来有一定困难, 故常用的是前两种方法. 对于频率抖动法, 要求使用频率可调谐的激光器, 受限于调谐性能, 我们只将受激布里渊散射阈值提高了约 2 dB^[25]. 而通过引入相位调制器, 可将阈值提高约 7 dB^[26], 可见相位调制法是行之有效的方法. 但该法基于激光线宽展宽, 势必增大线宽导致的相位噪声, 故在实际应用中需找到受激布里渊散射抑制和激光线宽展宽的最佳平衡^[32]. 对于

四波混频, 常见的抑制方法有非等信道间隔^[33]、色散管理^[34]、采用两束非相干偏振光等^[35]. 而对于探测带宽为 kHz/MHz 量级的光纤传感系统, 正如前文所述, 只要所用激光器的波长并非理想等间隔, 四波混频引入的强度及相位噪声往往可以忽略, 这点与光纤通信系统是不同的. 对于调制不稳定性, 可采用相位调制或者使工作波长位于光纤正常色散区的方法进行抑制^[23]. 自相位调制和交叉相位调制源于光克尔效应, 一般难以消除, 所幸的是只要信道数目不是很多, 其导致的相位噪声可以不予考虑.

5 结论

本文针对远程干涉型光纤传感系统, 对系统非线性相位噪声构成进行了详细分析和综合评价, 并对其抑制方案进行了简要讨论. 结果表明, 受激布里渊散射、四波混频、调制不稳定性、自相位调制和交叉相位调制都会给系统引入相位噪声, 但各非线性效应在不同条件下所占的地位有所不同. 文中所得结论有助于指导远程干涉型光纤传感系统的结构设计与实际应用.

- [1] Crickmore R, Cranch G A, Kirkendall C K, Daley K, Motley S, Bautista A, Salzano J, Nash P 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 1579
- [2] Clay K K, Dandridge A 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 197
- [3] Kringlebotn J T, Naksrtad H, Eriksrud M 2009 *Proc. SPIE* **7503** 75037U
- [4] Nash P, Strudley A, Crickmore R, DeFreitas J 2009 *Proc. SPIE* **7503** 75037T
- [5] Zhang J, Pan W, Yan L S, Luo B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7002 (in Chinese) [张婧, 潘炜, 闫连山, 罗斌 2010 物理学报 **59** 7002]
- [6] Sugie T 1991 *J. Lightwave Technol.* **9** 1145
- [7] van Deventer M O, van der Tol J J G M, Boot A J 1994 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6** 291
- [8] Waarts R G, Braun R P 1985 *Electron. Lett.* **21** 1114
- [9] Djupsjöbacka A, Jacobsen G, Tromborg B 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 416
- [10] Maeda M W, Sessa W B, Way W I, Yi-Yan A, Curtis L, Spicer R, Laming R I 1990 *J. Lightwave Technol.* **8** 1402
- [11] Inoue K, Nakanishi K, Oda K, Toba H 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 1423
- [12] Du J X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1046 (in Chinese) [杜建新 2009 物理学报 **58** 1046]
- [13] Chen W, Meng Z 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 020603
- [14] Chen W, Meng Z 2011 *Proc. SPIE* **7753** 77532G
- [15] Chen W, Meng Z 2011 *Opt. Laser Technol.* **43** 1270
- [16] Meng Z, Hu Y M, Xiong S D, Stewart G, Whitenett G, Culshaw B 2005 *Appl. Opt.* **44** 3425
- [17] Dandridge A, Tveten A B, Giallorenzi T G 1982 *IEEE J. Quantum Electron.* **18** 1647
- [18] Gaeta A L, Boyd R W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 3205
- [19] Gordon J P, Mollenauer L F 1990 *Opt. Lett.* **15** 1351
- [20] Agrawal G P (Translated by Jia D F et al.) 2002 *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp88–90, 165–166, 488–490 (in Chinese) [阿戈沃著 贾东方等译 2002 非线性光纤光学原理及应用 (北京: 电子工业出版社) 第 88—90 页, 第 165—166 页, 第 488—490 页]
- [21] Chen W, Meng Z, Zhou H J, Luo H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034212
- [22] Hill K O, Johnson D C, Kawasaki B S, MacDonald R I 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 5098
- [23] Alasia D, Herraes M G, Abrardi L, Lopez S M, Thevenaz L 2005 *Proc. SPIE* **5855** 587
- [24] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Li X, Xu X J, Zhao Y J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084203 (in Chinese) [王小林, 周朴, 马阎星, 马浩统, 李霄, 许晓军, 赵伊君 2011 物理学报 **60** 084203]
- [25] Chen W, Meng Z 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 1124
- [26] Chen W, Meng Z 2011 *Chinese J. Lasers* **38** 0305002 (in Chinese) [陈伟, 孟洲 2011 中国激光 **38** 0305002]
- [27] Hansryd J, Dross F, Westlund M, Andrekson P A, Knudsen S N 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 1691
- [28] Yoshizawa N, Imai T 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 1518
- [29] Shiraki K, Ohashi M, Tateda M 1995 *Electron. Lett.* **31** 668
- [30] de Oliveira C A S, Jen C K, Shang A, Saravanos C 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 969
- [31] Li M J, Chen X, Wang J, Gray S, Liu A, Demeritt J A, Ruffin A B, Crowley A M, Walton D T, Zenteno L A 2007 *Opt. Express* **15** 8290
- [32] Chen W, Meng Z 2011 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **44** 165402
- [33] Forghieri F, Tkach R W, Chraplyvy A R 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 889
- [34] Chraplyvy A R, Gnauck A H, Tkach R W, Derosier R M 1993 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 1233
- [35] Inoue K 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 2116

Nonlinear phase noise analysis of long-haul interferometric fiber sensing system*

Chen Wei Meng Zhou[†] Zhou Hui-Juan Luo Hong

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 30 November 2011; revised manuscript received 20 February 2012)

Abstract

Nonlinear phase noise structure is studied in the background of long-haul interferometric fiber sensing system. The influence of each factor is analyzed and evaluated in detail, and suppression methods are discussed briefly. The results show that phase noise of the system mainly includes the phase noise converted from intensity noise, the phase noise caused by nonlinear effects induced laser linewidth variations as well as the phase noise introduced by self phase modulation and cross phase modulation. Stimulated Brillouin scattering and four-wave mixing can cause intensity noise and then it turns into phase noise. For the fiber sensing system which has a narrow detecting bandwidth, the corresponding noise induced by four-wave mixing can always be neglected. Stimulated Brillouin scattering, four-wave mixing and modulation instability can cause laser linewidth broadening, leading to the increase of phase noise. When the number of channels is large, the phase noise introduced by cross phase modulation cannot be ignored. The obtained results provide a good guidance for the practical applications of long-haul interferometric fiber sensing systems.

Keywords: phase noise, nonlinear effect, fiber sensing, intensity noise

PACS: 42.65.-k, 42.81.-i, 42.81.Pa

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61177073), the Open Fund of Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, China (Grant No. gdol201101), Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate, China (Grant No. CX2011B033) and the Fund of Innovation of Graduate School of NUDT, China (Grant No. B110703).

[†] E-mail: zhoumeng6806@163.com