

# 光纤水听器远程传输中相干瑞利噪声的抑制

曹春燕 胡正良 熊水东 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 在使用窄线宽光源的干涉型光纤水听器远程传输系统中,瑞利散射通过多光束干涉引入了严重的相干噪声。分析了光纤远程传输产生的单次瑞利后向散射(RB)和双重瑞利散射(DRS)对干涉系统的影响,并使用隔离器对 RB 进行抑制。推导了 DRS 引入的相位噪声的模型,通过讨论 DRS 的调制特性,得出相位产生载波(PGC)技术在消除相位衰落的同时也可以大大抑制 DRS 产生相干噪声的结论。实验结果表明,在光纤水听器往返各 25 km 的传输系统中,隔离器对 RB 产生的相位噪声抑制最大达 20 dB,PGC 技术对 DRS 噪声的抑制最大达 10 dB。在同时抑制 RB 和 DRS 后,50 km 光纤传输系统中相干瑞利散射噪声的影响基本消除。

**关键词** 光纤光学;相干瑞利噪声抑制;相位产生载波调制解调;光纤水听器;远程传输

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1005005

## Suppression of Rayleigh Scattering Induced Coherent Noise in Remotely Interrogated Fiber-Optic Hydrophones

Cao Chunyan Hu Zhengliang Xiong Shuidong Hu Yongming

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hu'nan 410073, China)

**Abstract** Rayleigh scattering induces serious coherent noise in remotely interrogated fiber-optic interferometric hydrophones especially when high coherence laser sources are used. The impacts of Rayleigh backscatter (RB) and double Rayleigh scattering (DRS) on hydrophone systems are analyzed and optical isolators are used to eliminate noise due to RB. Then the phase noise due to DRS and its characteristics are investigated, and it is inferred that phase generation carried (PGC) technique can suppress these coherent noises besides its general function of overcoming bias induced signal fading. In an experimental setup with 25 km input and output fibers, a maximal 20 dB decrease of phase noise is achieved by the use of isolators. A further decrease of maximal 10 dB is achieved by PGC technique. Thus when RB and DRS are suppressed simultaneously, Rayleigh scattering induced coherent noise in a 50 km system is almost eliminated.

**Key words** fiber optics; suppression of Rayleigh scattering induced coherent noise; phase generation carried technique; fiber-optic hydrophones; remote interrogation

**OCIS codes** 060.2370; 290.5870; 280.4788; 060.5060

## 1 引言

随着光纤水听器阵列<sup>[1]</sup>朝着大规模、远程传输的方向发展,瑞利散射的影响逐步显现。根据散射次数不同可以将瑞利散射分为单次瑞利后向(RB)和双重瑞利散射(DRS),由于它们在数十甚至上百

千米的光纤上被多次反射和累积,其影响不容忽视。此外,干涉型光纤水听器系统中常使用高相干光源,如超窄线宽环型腔光纤激光器<sup>[2,3]</sup>,相干长度可达 100 km,此时信号光与同向传输的瑞利散射光将在很长的距离上发生多光束寄生干涉,由此产生的相

收稿日期: 2012-06-26; 收到修改稿日期: 2012-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(60908004)资助课题。

作者简介: 曹春燕(1979—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: ccy\_nudt@hotmail.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和光学设计等方面的研究。

E-mail: sdss@21cn.com

干噪声将使系统性能急剧恶化。

在已有的研究中, Marrone 等<sup>[4]</sup>在光纤干涉仪中加隔离器消除了 2 km 光纤中 RB 产生的相干噪声, Rønnekleiv 等<sup>[5]</sup>使用光源相干调制和频移调制消除了光纤光栅传感系统中 1.1 km 光纤产生的 RB 噪声。但由于他们研究的传输光纤距离偏短, DRS 的影响不明显, 因此未对其进行分析。目前对远程传输中 DRS 的研究多集中在光纤通信<sup>[6]</sup>和分布式拉曼光纤放大<sup>[7]</sup>等领域, 讨论 DRS 强度对系统噪声指数(NF)的影响。在光纤传感系统中, 相位噪声是衡量系统性能的重要指标, 而 DRS 通过寄生干涉后直接转换为系统相位噪声, 因此对 DRS 的研究尤为重要。为抑制 25 km 传输光纤中 DRS 产生的相位噪声, Cranch 等<sup>[8]</sup>在光纤上加入了相位调制器, 但该方案还需与其他消相位衰落方法配合使用, 增加了光学和电学系统的复杂性。相位产生载波(PGC)技术<sup>[9~11]</sup>常用于消除干涉仪的相位衰落, 它产生的相位调制可同时作用在信号光和 DRS 上, 通过 DRS 特有的调制特性, PGC 解调后系统噪声将大大降低。其抑制原理与 PGC 通过差频检测对低频非相干噪声的抑制有本质差别, 但目前尚无报道。

论文分析了光纤水听器远程传输中 RB 和 DRS 噪声的产生机理及其对系统的影响, 讨论了在迈克耳孙结构的光纤水听器远程双向传输系统中加上隔离器(ISO)滤除 RB 的合理位置, 研究了 PGC 技术对 DRS 噪声进行抑制的原理, 并给出了往返各 25 km 的远程传输实验系统中相位噪声的抑制结果, 对理论分析进行了验证。

## 2 理论分析

### 2.1 瑞利散射强度

光纤远程传输中的 RB 和 DRS 主要来源于分布在光纤中的随机反射, 如图 1 所示。为考虑它们对系统的影响, 首先对其强度进行了计算。假设传输光纤总长度  $L$ , 入射光强度  $P_{IN}$ , 光纤损耗为  $\alpha$ , RB 发生在图 1 光纤中任意一点  $Z_1$ , 且各点有相等的瑞

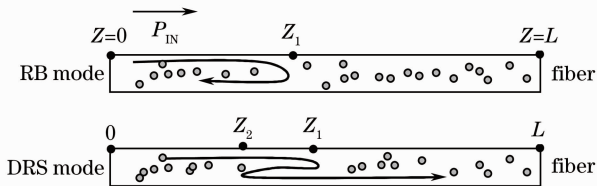


图 1 光纤远程传输时随机反射产生的 RB 和 DRS

Fig. 1 RB and DRS due to random reflections in long-haul fibers

利散射率  $r = \alpha_r S^{[7]}$  (其中  $\alpha_r$  和  $S$  分别为瑞利散射系数和重新捕获因子)。通过积分可得入射端  $Z=0$  处总的瑞利散射强度  $P_{RB}$  为

$$P_{RB} = \int_0^L P_{IN} r \exp(-2\alpha Z_1) dZ_1 = P_{IN} r \frac{1 - \exp(-2\alpha L)}{2\alpha}, \quad (1)$$

则入射端 RB 光功率与入射光强比值  $R_1$  为

$$R_1 = \frac{P_{RB}}{P_{IN}} = r \frac{1 - \exp(-2\alpha L)}{2\alpha}. \quad (2)$$

假设 DRS 的两次散射分别发生在图 1 中  $Z_1$  和  $Z_2$  点, 通过双重积分可得出射端  $Z=L$  处总的瑞利散射强度  $P_{DRB}$  为

$$P_{DRB} = \int_0^L \int_0^{Z_1} P_{IN} r^2 \exp[-\alpha(L + 2Z_1 - 2Z_2)] dZ_2 = P_{IN} r^2 \exp(-\alpha L) \frac{2\alpha L + \exp(-2\alpha L) - 1}{4\alpha^2}, \quad (3)$$

则出射端 DRS 光功率与输出光强比值  $R_2$  为

$$R_2 = \frac{P_{DRB}}{P_{IN} \exp(-\alpha L)} = r^2 \frac{2\alpha L + \exp(-2\alpha L) - 1}{4\alpha^2}. \quad (4)$$

考虑单模光纤损耗  $\alpha = 0.2$  dB/km, 瑞利散射率  $r = 4.8 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ , 则  $R_1$  和  $R_2$  随  $L$  的变化曲线如图 2 所示。

在图 2(a)中, 随着  $L$  的增加,  $R_1$  逐渐增大并在 50 km 以后趋于稳定, 其值约为  $5.5 \times 10^{-4}$ ; 在图 2(b)中,  $R_2$  与  $L$  的关系近似呈线性增加, 50 km 后  $R_2$  的值大于  $10^{-6}$ 。若 RB 和 DRS 与信号光发生寄生干涉, 噪声光与信号光的振幅比将由  $\sqrt{R_1}$  和  $\sqrt{R_2}$  决定。由于  $R_1$  和  $R_2$  的值较大, 该寄生干涉将在光纤水听器系统中产生较大幅度的相位噪声。此外 RB 和 DRS 产生的相位噪声是非稳定的, 它的幅度与多光束干涉的偏振态、相位以及光纤受到的外界干扰等多重因素有关。因此, RB 和 DRS 产生的大幅度非稳定噪声将对光纤水听器高灵敏度的相位探测产生影响。

### 2.2 瑞利散射噪声抑制

在采用迈克耳孙结构的光纤水听器远程双向传输系统中, 可能产生的瑞利散射如图 3 所示。

由图 3 可知, 输入信号光  $I_{IN}$  在输入光纤中产生单次散射  $R_{R_{BIN}}$  和双重散射  $R_{R_{DRSIN}}$ 。由于迈克耳孙干涉仪结构的互易性, 水听器输出光将分为两支, 并分别从 A、B 两端分别进入输入光纤和返回光纤。从 A 点进入输入光纤的光束  $I_R$  为噪声光, 它将在输入

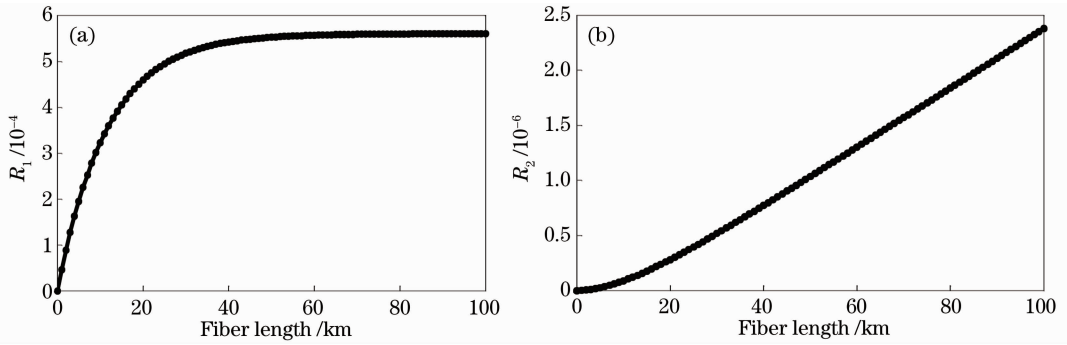


图 2  $R_1$  (a) 和  $R_2$  (b) 随光纤长度  $L$  的变化曲线  
Fig. 2 (a)  $R_1$  and (b)  $R_2$  versus fiber length  $L$

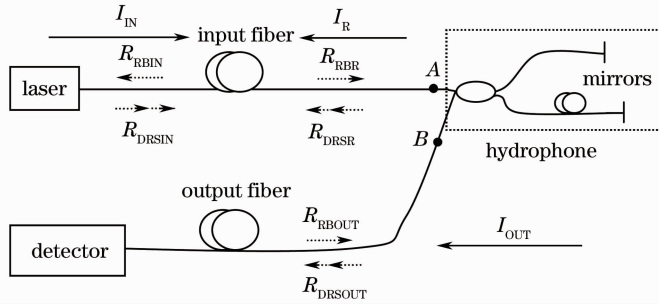


图 3 光纤水听器远程双向传输系统中可能产生的 RB 和 DRS 示意图

Fig. 3 Diagram of possible RB and DRS components in a two-fiber interrogated Michelson hydrophone system

光纤中反向传输, 并产生单次散射  $R_{RBR}$  和双重散射  $R_{DRSR}$ ; 从  $B$  点进入返回光纤的信号光  $I_{OUT}$  产生单次散射  $R_{RBOUT}$  和双重散射  $R_{DRSOUT}$ 。这 6 种瑞利散射光中, 与  $I_{IN}$  传输方向相同有  $R_{DRSIN}$  和  $R_{RBR}$ ; 与  $I_{OUT}$  方向一致的为  $R_{DRSOUT}$ 。另外反向传输的  $R_{RBOUT}$  由  $B$  处返回入水听器, 经过干涉仪端面反射后部分光也混入  $I_{OUT}$  中。这些散射光都将与信号光发生寄生

干涉引入相干噪声。另外  $R_{RBIN}$  和  $R_{DRSR}$  返回入光源, 也会对其性能和稳定性产生影响。

为消除瑞利散射的影响, 在系统中 3 个位置分别加入光隔离器, 如图 4 所示。其中 VOA 为可调光衰减器, PZT 为压电陶瓷, FRM 为法拉第旋光镜。

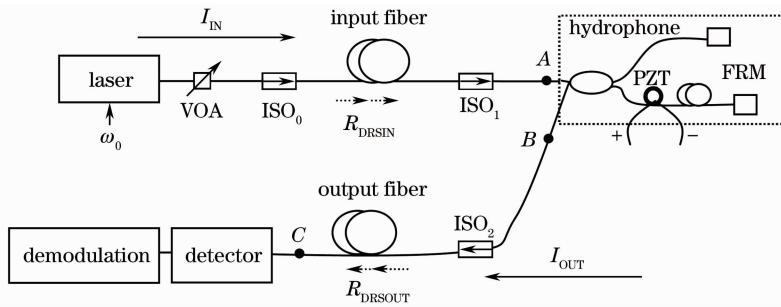


图 4 光纤水听器远程双向传输系统中相干瑞利散射的抑制

Fig. 4 Setup for suppression coherent noises due to RB and DRS in a two-fiber interrogated Michelson hydrophone system

在图 4 中光源输出端接  $ISO_0$  滤除  $R_{RBIN}$ , 防止它对光源产生影响; 传输光纤与水听器之间分别接  $ISO_1$  和  $ISO_2$ , 其中  $ISO_1$  滤除  $I_R$ , 直接阻止了  $R_{RBR}$  和  $R_{DRSR}$  的产生;  $ISO_2$  滤除了  $R_{RBOUT}$ , 防止它经水听器反射后混入  $I_{OUT}$ 。由此隔离器滤除了系统中所有的 RB 和部分 DRS, 仅剩往返光纤中产生的  $R_{DRSIN}$

和  $R_{DRSOUT}$ 。

由于光源的高相干性, 系统中沿光纤分布散射的  $R_{DRSIN}$  和  $R_{DRSOUT}$  与信号光  $I_{IN}$  和  $I_{OUT}$  将形成多光束干涉。将多路 DRS 光合并考虑并用  $E_b$  表示, 水听器参考光和传感光的波矢分别用  $E_r$  和  $E_s$  表示。忽略偏振态的影响, 则水听器的干涉光强表达式为

$$P = (\mathbf{E}_r + \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_b) \cdot (\mathbf{E}_r + \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_b)^* = |\mathbf{E}_r|^2 + |\mathbf{E}_s|^2 + |\mathbf{E}_b|^2 + 2E_r E_s \cos(\varphi_s + \varphi_{sn} - \varphi_{rn}) + 2E_r E_b \cos(\varphi_{bn} - \varphi_{rn}) + 2E_s E_b \cos(\varphi_s + \varphi_{bn} - \varphi_{sn}), \quad (5)$$

式中  $\varphi_{sn}$ 、 $\varphi_{rn}$  和  $\varphi_{bn}$  为各信号光、参考光和 DRS 光的随机相位,  $\varphi_s$  为水听器的待测信息。(5)式展开后共有 6 项,其中第 3 项为 DRS 引入的光强度噪声,与其余项相比,它的影响可以忽略。第 4 项为主干涉信号项,第 5、6 项为 DRS 产生的寄生干涉,它们

与信号项幅度的比值分别为  $E_b/E_s$  和  $E_b/E_r$ 。

光源经频率为  $\omega_0$ 、幅度为  $\Delta\nu$  的 PGC 内调制后,在主干涉和寄生干涉中都将引入相移,由此(5)式变为

$$P = |\mathbf{E}_r|^2 + |\mathbf{E}_s|^2 + |\mathbf{E}_b|^2 + 2E_r E_s \cos[c^{-1}4\pi n(l_s - l_r)\Delta\nu \cos \omega_0 t + \varphi_s + \varphi_{sn} - \varphi_{rn}] + 2E_r E_b \times \cos[c^{-1}4\pi n(l_b - l_r)\Delta\nu \cos \omega_0 t + \varphi_{bn} - \varphi_{rn}] + 2E_s E_b \cos[c^{-1}4\pi n(l_b - l_s)\Delta\nu \cos \omega_0 t + \varphi_s + \varphi_{bn} - \varphi_{sn}], \quad (6)$$

式中  $l_r$  和  $l_s$  分别为参考光和信号光经远程干涉系统的传输距离,  $l_b$  为 DRS 的等效传输距离。以(6)式中第 6 项对第 4 项的影响为例,将它们分别用 Bessel 函数展开为

$$P_4 = 2E_s E_r \left\{ \left[ J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t \right] \cos(\varphi_s + \varphi_{sn} - \varphi_{rn}) - 2 \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos[(2k+1)\omega_0 t] \right\} \sin(\varphi_s + \varphi_{sn} - \varphi_{rn}) \right\}, \quad (7)$$

$$P_6 = 2E_s E_b \left\{ \left[ J_0(C_{bs}) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C_{bs}) \cos 2k\omega_0 t \right] \cos(\varphi_s + \varphi_{bn} - \varphi_{sn}) - 2 \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C_{bs}) \cos[(2k+1)\omega_0 t] \right\} \sin(\varphi_s + \varphi_{bn} - \varphi_{sn}) \right\}, \quad (8)$$

式中  $C = c^{-1}2\pi n(l_r - l_s)\Delta\nu$  和  $C_{bs} = c^{-1}2\pi n(l_b - l_s)\Delta\nu$  分别为主干涉和寄生干涉的调制深度,  $c$  为真空中光速,  $n$  为纤芯折射率。从(7)、(8)式得出,通过光频调制,  $P_4$  和  $P_6$  的相位信息分散到了  $\omega_0$  及其倍频的边带上,其幅度由相应频率的 Bessel 系数决定。由 PGC 解调原理可知,(7)、(8)式将分别乘以  $G \cos \omega_0 t$  和  $H \cos 2\omega_0 t$ ,经低通滤波后,提取出  $\omega_0$  和  $2\omega_0$  频率边带上的相位信息

$$\begin{cases} P'_{41} = -2E_s E_r G J_1(C) \sin(\varphi_s + \varphi_{sn} - \varphi_{rn}) \\ P'_{42} = -2E_s E_r H J_2(C) \cos(\varphi_s + \varphi_{sn} - \varphi_{rn}) \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} P'_{61} = -2E_s E_b G J_1(C_{bs}) \sin(\varphi_s + \varphi_{bn} - \varphi_{sn}) \\ P'_{62} = -2E_s E_b H J_2(C_{bs}) \cos(\varphi_s + \varphi_{bn} - \varphi_{sn}) \end{cases}. \quad (10)$$

显然,当通过微分交叉相乘解调(9)式中  $\varphi_s$  时,(10)式将引入信号频段内的噪声。对比(9)、(10)式,在  $\omega_0$  和  $2\omega_0$  频率处,噪声项和信号项的幅度比值分别为  $[E_b J_1(C_{bs})]/[E_r J_1(C)]$  和  $[E_b J_2(C_{bs})]/[E_r J_2(C)]$ 。同理推导得出(6)式中第 5 项的噪声和信号的幅度比值为  $[E_b J_1(C_{br})]/[E_s J_1(C)]$  和  $[E_b J_2(C_{br})]/[E_s J_2(C)]$ ,其中  $C_{br} = c^{-1}2\pi n(l_b - l_r)\Delta\nu$ 。在使用 PGC 调制解调的系统中,水听器信号臂与参考臂的差值( $l_r - l_s$ )通常在 1~10 m 之间,并通过设置  $\Delta\nu$  使  $C = 2.4$  rad,则(9)式中 Bessel 系数  $J_1(C) = 0.52$ ,  $J_2(C) = 0.43$ 。

DRS 经过了几十甚至上百千米的多点和多次反射的累积后,等效传输距离  $l_b \gg l_r, l_s$ ,因此  $C_{bs}, C_{br} \gg 1$ 。由 Bessel 函数性质,当  $C$  值增大时, Bessel 系数  $J_1$  和  $J_2$  振荡下降。若将 DRS 干涉等效为长度  $L/2$ 、反射系数  $R \ll 1$  的弱法布里-珀罗(F-P)腔<sup>[8]</sup>,当  $L > 20$  km 时,  $C_{bs}, C_{br} \gg 2000$ ,则  $J_1(C_{bs}), J_2(C_{bs}), J_1(C_{br})$  和  $J_2(C_{br})$  的绝对值均降至 0.02 以下。相比未调制时, PGC 解调频段内 DRS 噪声的幅值将大大降低。

### 3 实验及结果分析

根据以上分析,搭建如图 4 所示实验系统对瑞利散射噪声抑制效果进行验证。系统中采用线宽小于 1 kHz 的环型腔光纤激光器,通过调节光衰减器使注入远程光纤的光功率在受激布里渊散射(SBS)阈值之下<sup>[12]</sup>。传输光纤为 G652 单模光纤,往返各 25 km,损耗为 0.2 dB/km。系统中 ISO 的隔离度大于 50 dB,插入损耗小于 0.5 dB。光纤水听器由臂差 5 m 的非平衡迈克耳孙干涉仪构成,干涉仪两臂接 FRM 以消除偏振衰落<sup>[13]</sup>。水听器置于水声屏蔽罐中屏蔽外界声信号。远程传输的干涉信号经光电转换后进行采样率为 256 kHz 的模/数(A/D)

转换。

实验采用 PGC 技术和工作点控制<sup>[14]</sup>两种信号解调方案。PGC 方案中,光源加 32 kHz 频率调制,在水听器两臂中引入的相位差  $C=2.4$  rad。工作点控制方法通过对水听器中内置的 PZT 加反馈控制来实现。由于瑞利散射噪声随外界环境的变化存在一定的波动,每次测试时取 30 次平均值作为测试结果。为对比远程传输噪声结果,首先使用 PGC 和工作点控制方法对短距离(1 m)传输系统的本底噪声进行了测试,结果如图 5 所示。

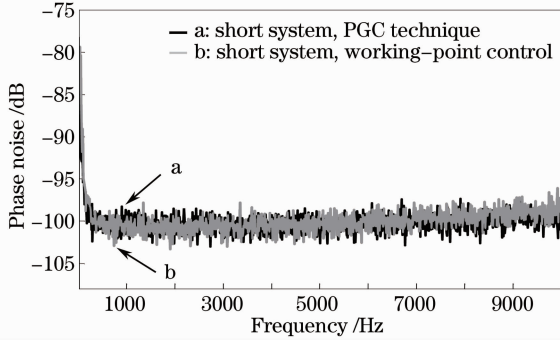


图 5 (a) PGC 和(b)工作点控制解调的短程系统相位噪声比较

Fig. 5 Comparison of phase noises in a short system with (a) PGC and (b) working-point control methods

在图 5 中,由于系统本底噪声较低,PGC 方案的优势不明显,两种方案有近似相同的噪声频谱。300 Hz 频率以上噪声在  $-100$  dB 左右,300 Hz 以下噪声增加主要由光源和外部环境噪声引入。

其次,50 km 传输系统中瑞利散射噪声的测试和抑制实验分以下几个步骤进行:1) 直接测试 RB 和 DRS 导致的相位噪声。即不加  $ISO_1$  和  $ISO_2$ ,仅在光源输出端接  $ISO_0$  以保证光源正常工作,并采用工作点控制方法解调相位噪声。2) 加入  $ISO_1$  和  $ISO_2$  抑制 RB 噪声,仍然采用工作点控制方法。3) 保留  $ISO_0$ ,并采用 PGC 方案测试系统噪声。各次实验得到的系统相位噪声结果与短距离传输的噪声对比如图 6 中 a~d 所示。

在图 6a 中 RB 和 DRS 共同引入的相位噪声频率覆盖 10 kHz 以下,并且随频率的降低噪声近似呈线性增加。在 300 Hz 附近噪声约  $-70$  dB,比本底噪声高出约 30 dB。图 6b 中加入 ISO 后,RB 噪声得到极大地抑制,最大在 300 Hz 处噪声降低了约 20 dB。根据理论分析,此时残余的噪声主要由 DRS 引入。图 6b 中的 DRS 噪声主要集中在 3 kHz 以下,且随频率降低而增加,3 kHz 以上与短距离的

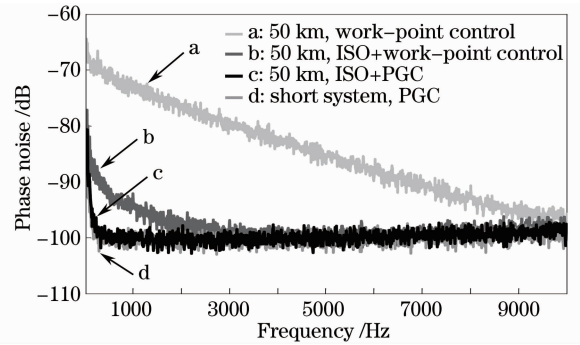


图 6 50 km 远程传输系统中 RB 和 DRS 导致的相位噪声及抑制效果

Fig. 6 Phase noises caused by RB and DRS in a 50 km system and the suppression results

本底噪声图 6d 基本重合。图 6c 中经 PGC 调制解调后 DRS 噪声大大降低,最大在 300 Hz 附近降低了约 10 dB。此时经 50 km 光纤远程传输后,系统噪声与图 6d 基本一致,相干瑞利散射的影响已经消除。

在以上实验结果中,RB 引入的噪声幅度比 DRS 最大高 20 dB(1 个量级),与 2.1 节计算结果一致。另外,PGC 调制解调后,DRS 残留的噪声已经很弱,此时的噪声主要由系统本底噪声决定,因此 PGC 技术对 DRS 噪声的实际抑制结果应优于实验测试结果。

## 4 结 论

研究了光纤迈克耳孙水听器远程传输中 RB 和 DRS 对干涉系统的影响,分析了系统中加上隔离器消除 RB 的合理位置,推导了 DRS 与信号光干涉的模型,得出 PGC 调制解调可大大降低 DRS 相干噪声的结论。实验结果表明,在光纤水听器往返各 25 km 的传输系统中,隔离器对 RB 噪声的抑制最大达 20 dB,PGC 技术对 DRS 噪声的抑制最大达 10 dB。两种方法同时作用后,50 km 远程传输系统的噪声与短距离传输结果基本一致,消除了相干瑞利散射对系统的影响。该研究结果对光纤水听器远程传输的噪声抑制有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 G. A. Cranch, P. J. Nash, C. K. Kirkendall. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. *IEEE Sensors J.*, 2003, **3**(1): 19~30
- 2 M. Zhou, G. Stewart, G. Whitenett. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2179~2183

- 3 Cao Chunyan, Yao Qiong, Rao Wei *et al.*. Linewidth measurement using unbalanced fiber-optic interferometer for narrow linewidth lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508005  
曹春燕, 姚琼, 饶伟等. 窄线宽激光器线宽的非平衡光纤干涉仪测量法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0508005
- 4 M. J. Marrone, A. D. Kersey, C. A. Villamel *et al.*. Elimination of coherent Rayleigh backscatter induced noise in fiber Michelson interferometers [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(19): 1803~1804
- 5 E. Ronnekleiv, O. H. Waagaard. Suppression of Rayleigh scattering noise in a TDM multiplexed interferometric sensor system[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2008. OMT4
- 6 P. Wan, J. Conradi. Impact of double Rayleigh backscatter noise on digital and analog fiber systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3): 288~297
- 7 Cui Sheng, Ma Xiaoming, Liu Jinsong. Impact of double Rayleigh scattering induced multiple-path interference on noise figure of fiber Raman amplifiers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 835~838  
崔晟, 马晓明, 刘劲松. 双重瑞利散射导致的多路干涉噪声对光纤喇曼放大器噪声系数的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 835~838
- 8 G. A. Cranch, A. Dandridge, C. K. Kirkendall. Suppression of double Rayleigh scattering-induced excess noise in remotely interrogated fiber-optic interferometric sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(11): 1582~1584
- 9 N. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Technol.*, 1982, **30**(10): 1635~1641
- 10 Wang Lin, He Jun, Li Fang *et al.*. Ultra low frequency phase generated carrier demodulation technique for fiber sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405001  
王林, 何俊, 李芳等. 用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405001
- 11 Shi Qingping, Zhang Huayong, Wang Liwei *et al.*. A new phase generated carrier demodulation method based on fixed phase delay [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805002  
施清平, 张华勇, 王利威等. 基于固定相位延迟的相位生成载波检测方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805002
- 12 Wei Cheng, Zhou Meng. Effects of modulation amplitude and frequency of frequency-modulated fiber lasers on the threshold of the stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(12): 1124~1126
- 13 Wang Jianfei, Wang Xiao, Luo Hong *et al.*. Influence of rotation angle and working wavelengths of Faraday rotation mirror on Michelson fiber optic interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1042~1046  
王建飞, 王潇, 罗洪等. 法拉第旋光镜旋转角和工作波长对单模光纤迈克耳孙干涉仪性能的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1042~1046
- 14 Ni Ming, Zhang Renhe, Hu Yongming *et al.*. Implement of controlling the working point of an interferometric fiber-optic hydrophone by closed loop and pick-up of the signal[J]. *Applied Acoustics*, 2001, **20**(6): 13~18  
倪明, 张仁和, 胡永明等. 干涉型光纤水听器闭环工作点控制的实现与信号的获取[J]. *应用声学*, 2001, **20**(6): 13~18

栏目编辑: 王晓琰