

匹配干涉型光纤水听器中的动态不连续性瑞利散射噪声研究

戚悦, 尚凡, 马丽娜*, 熊水东

国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073

摘要 构建了短程传输链路的瑞利寄生干涉模型, 利用干涉可见度的参数特性, 得出系统背向瑞利散射噪声与询问脉冲宽度、传输链路光纤长度、瑞利散射率等参数的关系。理论与实验结果均表明: 短程传输状态下瑞利散射并不会随着传输光纤长度的增加和瑞利散射率的提高而线性增强, 而是呈现出不连续特征。短程传输状态下的瑞利散射还与询问系统的调制解调参数密切相关, 随着调制解调参数的变化而动态变化。该研究结果定量揭示了短程传输链路状态下光纤水听器阵列的性能随瑞利散射的恶化情况, 为短程传输状态下的系统优化设计提供关键支撑。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 瑞利散射噪声; 光纤水听器; 短程传输

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2306005

Dynamic and Discontinuous Rayleigh Scattering Noise in Path-Matching Interferometric Fiber-Optic Hydrophones

Qi Yue, Shang Fan, Ma Lina*, Xiong Shuidong

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract In this paper, a spurious interference model of Rayleigh scattering for short-range transmission link is constructed, and the relationship between Rayleigh backscattering noise of the system and parameters such as interrogation pulse width, fiber length of transmission link, and Rayleigh scattering rate is summarized by using the parameter characteristics of interference visibility. Both theoretical and experimental results show that the effect of Rayleigh scattering under the short-range transmission does not increase linearly as the fiber length of the transmission link or Rayleigh scattering rate increases. Instead, it tends to be discontinuous. The Rayleigh scattering under the short-range transmission is also closely related to the modulation and demodulation parameters of the interrogation system and changes dynamically as these parameters vary. The research results quantitatively reveal the degradation of fiber-optic hydrophone array with Rayleigh scattering under short-range transmission links and provide significant support for the optimal design of the system under short-range transmission.

Key words fiber optics; optical fiber sensing; Rayleigh scattering noise; fiber-optic hydrophone; short-range transmission

1 引言

匹配干涉型光纤水听器利用相位检测方式实现对微弱水声信号的获取, 具有灵敏度高、动态范围大、抗干扰能力强、易于大规模组阵等优点, 在水下目标探测、海底地震监测及能源勘探等领域有着广泛的应用^[1-2]。

瑞利散射噪声属于光纤波导的固有损耗, 按反射

次数可分为单次背向瑞利散射(RB)和双重瑞利散射(DRS), 是一种最基本、最重要的本征散射噪声, 无法通过改进光纤制备工艺完全消除, 其决定了系统散射损耗的理论值下限^[3]。随着光纤水听器技术向深远海方向发展, 在大规模远距离传输的水听器阵列应用中, 瑞利散射光在传输链路光纤上被多次反射和累积, 由此产生的寄生干涉噪声使得系统信噪比急剧降低。瑞利散射光强的数量级较小, 相较于输入光强值(仅为

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-06-01; 录用日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(61901488)

通信作者: *mln_c7@nudt.edu.cn

$10^{-6} \sim 10^{-7}$ [4]), 需要经历较远传输距离的累积才会导致系统本底噪声急剧恶化, 因此当前对这一关键技术的研究多针对 km 以上量级。文献[5]采用光隔离器方案消除了 25 km 光纤中 RB 相干噪声, 抑制效果达到 20 dB; 文献[6]通过合理设计光源的射频调制深度并结合法布里-珀罗(F-P)干涉仪结构, 基本消除了 100 km 传输的光纤 F-P 干涉系统中的单次和双重瑞利散射的影响; 文献[7]提出了基于光隔离器的单向传输抑制方案, 消除了 2 km 光纤中的 RB 噪声; 文献[8]使用光源相干调制和频移调制基本消除了光纤光栅传感系统中 1.1 km 传输产生的 RB 噪声, 抑制幅度达到 40 dB 以上。而在拖曳阵声纳等实际应用中, 由于短程传输情况(几十米到几百米量级)下的瑞利散射的积累效应不明显, 系统噪声研究通常会忽略瑞利散射噪声的影响或者直接对噪声进行抑制, 并未关注过其机理。然而, 在短程传输状态下, 由瑞利散射导致的寄生干涉现象仍然会使得干涉结果、相位解调结果等出现异常; 此外, 对于最小空分结构中的最后一个传感单元, 包括之前所有传感腔光纤在内的光纤, 均可认为是共模传输光纤, 寄生干涉影响限制了系统最短共模传输光纤长度和复用数。综上可知, 研究短程传输瑞利散射噪声问题对系统结构设计和性能提升具有重要价值。

本文构建了短程传输状态下的瑞利寄生干涉模型, 利用干涉可见度的参数特性, 分析系统背向瑞利散射噪声与询问脉冲宽度、传输光纤长度、瑞利散射率等参数的关系。通过理论仿真和实验分析阐明了短程传

输状态下瑞利散射随着传输光纤长度的增加和瑞利散射率的提高呈现出不连续特征, 当传输光纤长度大于 500 m 时, 随着传输光纤长度的增加, 系统本底噪声呈阶跃式增加。此外, 实验中测得的系统本底噪声范围为 $-90 \text{ dB} \sim -56.03 \text{ dB}$, 其噪声水平与海洋背景噪声水平相近, 在实际应用中会给水下目标探测带来较大困难 [9]。本文的研究结果可为短程状态下的噪声抑制和系统优化设计提供关键支撑。

2 动态不连续性瑞利散射噪声模型

2.1 动态不连续性瑞利散射点分析

匹配干涉型光纤水听器的传感端光学结构如图 1 所示, 主要采用迈克耳孙(Michelson)干涉仪和 F-P 干涉仪两种基本结构。Michelson 干涉仪由法拉第旋镜(FRM)和光纤耦合器构成, F-P 干涉仪则通过一对光纤光栅(FBG)构成 F-P 腔结构 [10]。以基于 Michelson 干涉仪的匹配干涉型光纤水听器为例, 如图 1 所示, 当脉冲间隔与相邻 FRM 间的往返时间相同的双询问光脉冲注入阵列时, 每个 FRM 均反射一对光脉冲, 其反射的第二个光脉冲会与后继相邻 FRM 反射的第一个光脉冲在光路上完全重合, 发生干涉, 干涉相位中携带两 FRM 间传感光纤所拾取的外界传感信息。其中将 FRM 和光耦合器替换为 FBG, 即可得到匹配干涉型光纤光栅水听器结构。上述两种结构的工作原理相同, 均满足匹配干涉条件。定义向干涉仪方向传输的询问光为下行光, 由干涉仪返回的光为上行光 [11]。

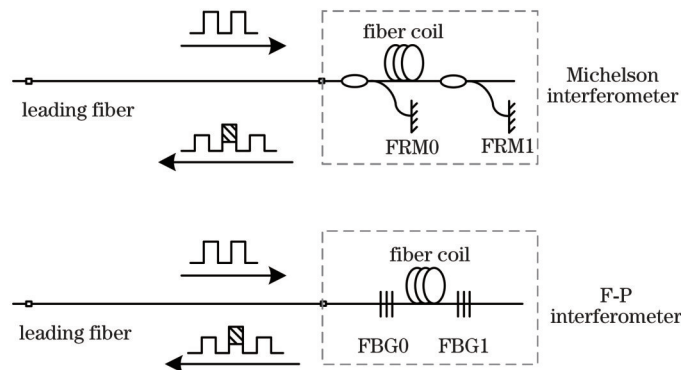


图 1 匹配干涉型光纤传感系统结构示意图

Fig. 1 Structure of path-matching interferometric optical fiber sensing system

仍然以基于 Michelson 干涉仪的匹配干涉型光纤水听器为例说明瑞利散射点的分布特征。如图 2 所示, 由于下行光及上行光共用同一段传输光纤, 当传输光纤足够长或询问频率足够高时, 前序询问脉冲对的上行脉冲串与后序询问脉冲的下行脉冲串在传输光纤上某处相遇, 如图 2 中的 CP1 所示位置, CP1~CP3 分别对应返回光主脉冲与后序第 1~3 个询问脉冲对的相遇位置, 将上述点定义为脉冲碰撞点(CP)。在碰撞点附近, 后序询问脉冲产生的背向瑞利散射光也是上行光, 与前序干涉脉冲经干涉仪后返回的上行光具有高相干性, 在时间及空间上重叠, 产生寄生干涉, 而其余位置处的背向瑞利散射光则不会对干涉信号及系统

解调相位产生影响。

为分析对光纤水听器系统产生影响的瑞利散射作用过程, 建立图 3 所示的上行与下行光时域分析模型, 图中 E_{11} 、 E_{12} 分别表示前序询问脉冲对中的第一、二个脉冲, E_{21} 、 E_{22} 分别表示后序询问脉冲对中的第一、二个脉冲, E_{31} 表示 E_{21} 后一个序列的询问脉冲对中的第一个脉冲, E_1 表示返回序列的第一个脉冲。

设某一个询问脉冲对开始进入传输光纤下行传输时刻为 0 时刻, 将此询问脉冲对称为前序询问脉冲对, 下一个询问脉冲对称为后序询问脉冲对。激光传播的群速度为 v_g , 脉冲宽度为 T , 脉冲间隔为 τ_s , 询问频率为 f_{AOM} , 询问周期 $T_i = 1/f_{AOM}$, 光纤有效折射率为 n_{eff} ,

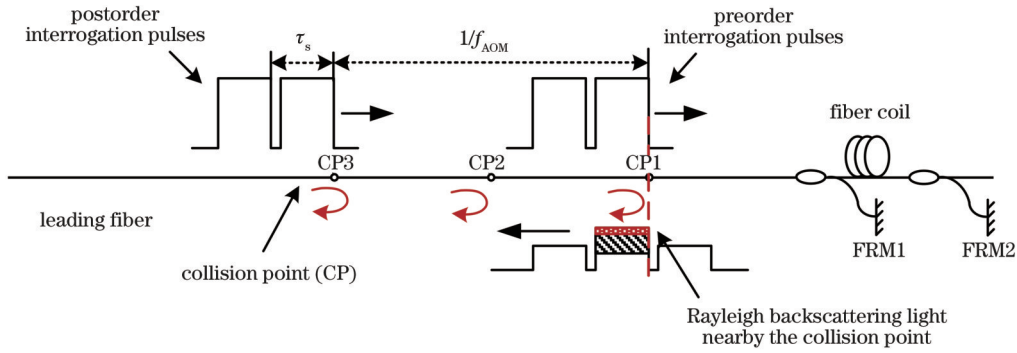


图 2 匹配干涉型光纤水听器的瑞利散射噪声产生原理示意图

Fig. 2 Principle of Rayleigh scattering noise generation in path-matching optic-fiber interferometric hydrophone

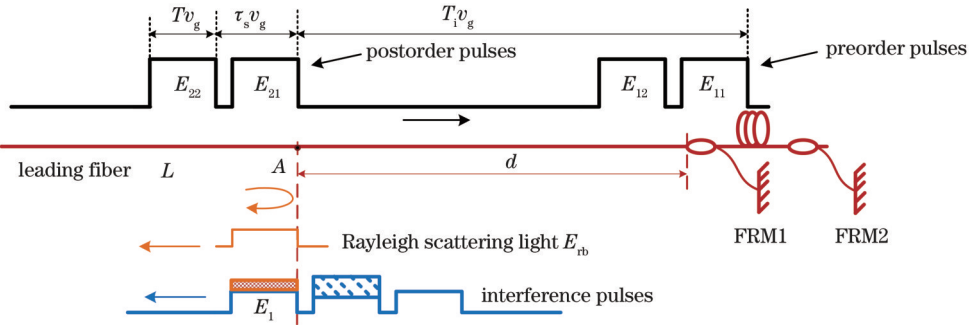


图 3 传输光纤脉冲碰撞点位置示意图

Fig. 3 Diagram of positions of pulse collision points in transmission fiber

相邻两个 FRM 的距离差为 $\tau_s v_g/2$, 链路光纤长度为 L , 不计 FRM 到相邻耦合器的光纤长度。

定义图 3 中的 A 点为脉冲碰撞点, 该点处 E_{21} 与 E_1 在时空上完全重叠, E_{21} 的背向瑞利散射光与 E_1 发生干涉。当传输光纤上只存在一个脉冲碰撞点时, A 点距传感端的长度为 $d = \frac{c}{2n_{\text{eff}} f_{\text{AOM}}}$, 其中 c 为真空中光速; 以此类推, 则第 q 个脉冲碰撞点与传感端的距离为

$$d_q = q \frac{c}{2n_{\text{eff}} f_{\text{AOM}}}, \quad q = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (1)$$

当传输光纤长度一定时, 其中的碰撞点个数可表示为

$$N = \left\lfloor \frac{2n_{\text{eff}} f_{\text{AOM}} l_0}{c} \right\rfloor, \quad (2)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 是向下取整运算; l_0 是传输光纤长度。式 (2) 表明: 当系统其他参数确定时, 碰撞点个数与传输光纤长度和询问脉冲频率呈正相关关系。令 $n_{\text{eff}} = 1.481$, 分别设置 $f_{\text{AOM}} = 250 \text{ kHz}$, $l_0 = 1700 \text{ m}$, 得到碰撞点个数随传输光纤长度和询问频率的变化关系, 如图 4 所示。

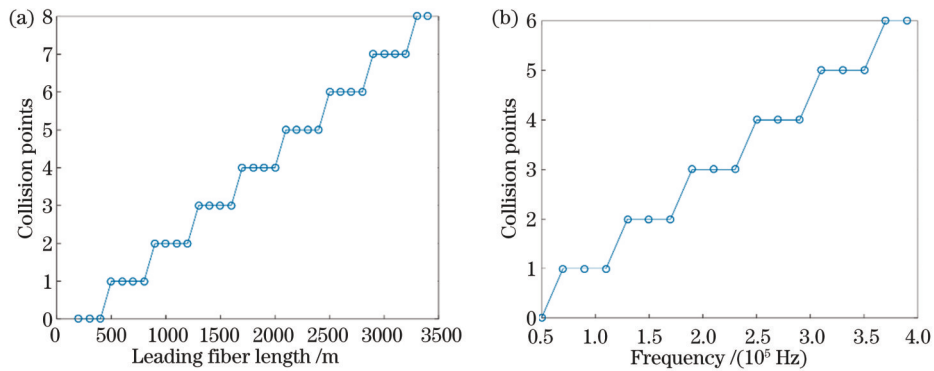


图 4 碰撞点个数的动态变化图。(a) 碰撞点个数与传输光纤长度的变化关系; (b) 碰撞点个数与询问频率的变化关系

Fig. 4 Dynamic changes of number of collision points. (a) Relationship between number of collision points and leading fiber length; (b) relationship between number of collision points and interrogation frequency

理论上, 瑞利散射噪声强度与瑞利散射率、传输光纤长度、系统询问频率和脉冲宽度等参数有关, 并随之

改变, 即瑞利散射噪声具有动态性; 同时, 传输光纤上脉冲碰撞点的个数及位置由传输光纤长度与系统询问

频率共同决定,当光纤长度增加以及询问频率提高时,脉冲碰撞点个数将呈阶跃式增长,即瑞利散射噪声具有分立性。综上,定义上述情况产生的瑞利散射噪声为动态不连续性瑞利散射噪声,碰撞点为动态不连续性瑞利散射点。

2.2 动态不连续性瑞利散射寄生干涉模型

2.1 节分析了对匹配干涉型光纤水听器系统产生影响的瑞利散射点在传输链路上的分布位置。为定量描述瑞利散射噪声的影响,构建基于等效弱反射镜假设

的离散背向瑞利散射光的光场模型,如图 5 所示:将长度为 L 的单模光纤离散为 N 段长度为 Δl 的基元,将第 n 段光纤基元产生的背向瑞利散射光定义为由两个长度为 $\Delta l/2$ 的等效弱反射镜对入射光反射形成的反射光,第 n 个弱反射镜的瑞利散射率和相位统计值分别为 $r_{b,n}$ 和 $\phi_{b,n}$,其中 $r_{b,n} = a_r S(a_r$ 和 S 分别表示瑞利散射系数和重捕获因子)^[12]。定义脉冲碰撞点处背向瑞利散射光强度是光脉冲传播到该处时脉冲宽度内 $2N$ 个等效弱反射镜的背向瑞利散射光的光场相互干涉叠加的结果^[13-14]。

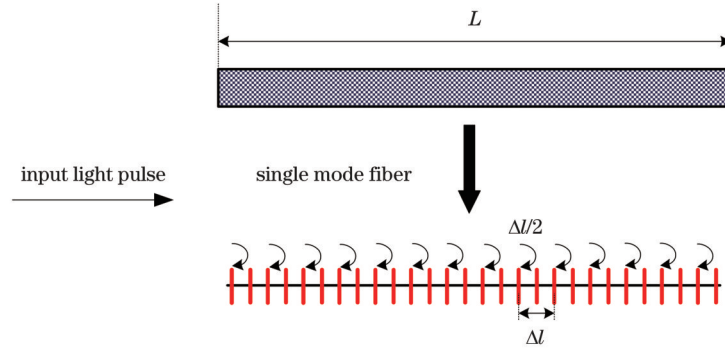


图 5 基于等效弱反射镜假设的离散背向瑞利散射光光场模型

Fig. 5 Discrete Rayleigh backscattering light field model based on assumption of equivalent weak mirror

设任意入射光的脉冲光场 E_{in} 的表达式为

$$E_{in}(t) = \begin{cases} \epsilon_0 \exp\{j[\omega_0 t + \varphi_n(t) + \varphi_0]\}, & 0 < t < T \\ 0, & T < t < T_i \end{cases}, \quad (3)$$

式中: j 为虚数单位; ϵ_0 是初始入射光的幅值,单位为 V ; ω_0 是激光角频率; $\varphi_n(t)$ 是随机相位噪声,符合维纳过程; φ_0 是初始相位。

图 3 中 A 点处 E_{21} 与 E_1 相互叠加干涉,此时两光场的表达式为

$$E_1(t) = \sqrt{r} E_{in}(t) \exp\{j[C \cos(\omega_c t)]\}, \quad (4)$$

$$E_{21}(t) = \epsilon_0 \exp\{j[\omega_0(t + T_i) + \varphi_n(t + T_i) + \varphi_2]\} \exp\{j[C \cos[\omega_c(t + T_i)]]\}, \quad (5)$$

式中: r 为 FRM 所在输出端口的光功率占总输出功率的比值。光纤耦合器分光比为 $(1-r):r$; $C \cdot \cos(\omega_c t)$ 为引入的相位生成载波 (PGC) 调制信号, C 为相位调制幅度, ω_c 为调制角频率; φ_2 为询问脉冲对第二个脉冲的初始相位。

E_{21} 产生的背向瑞利散射光的光场可表示为

$$E_{rb}(t) = r_{b,0} \exp(j\phi_{b,0}) E_{21}(t) + r_{b,1} \exp(j\phi_{b,1}) E_{21}(t - \Delta t) \exp(-\alpha_l \Delta l) + r_{b,2} \exp(j\phi_{b,2}) E_{21}(t - 2\Delta t) \exp(-2\alpha_l \Delta l) + \dots = \sum_{n=0}^{2N} r_{b,n} \exp(j\phi_{b,n}) E_{21}(t - n\Delta t) \exp(-\alpha_l v_g n\Delta t), \quad (6)$$

式中: α_l 为每个 Δl 微元的瑞利散射系数; $\Delta t = \Delta l/v_g$ 是光在等效弱反射镜的往返时间,求和区间长度 $l = 2N \cdot \Delta l = v_g \cdot T$ (其中 v_g 为激光传输群速度, T 为脉冲宽度)^[15-16]。式(6)说明背向瑞利散射光强度随传播距离呈指数衰减,幅值取决于 $r_{b,n}$,其取值范围介于

$10^{-6} \sim 10^{-7}$ ^[17]。考虑背向瑞利散射光强度最大时, $r_{b,n} = r_r$, $\phi_{b,n} = 0$,此时 E_{rb} 幅值与瑞利散射率 r_r 成正比。

因此,当传输光纤上只存在一个碰撞点时,可探测到 E_1 的输出光强 I 为

$$I = (E_1 + E_{rb})(E_1 + E_{rb})^* = E_1^2 + E_{rb}^2 + 2E_1 E_{rb}^* = \epsilon_0^2 r + \epsilon_0^2 r^2 + 2r_r \sqrt{r} \epsilon_0^2 \sum \exp(-\alpha_l v_g n\Delta t) \cos(\varphi_A - \varphi_B), \quad (7)$$

式中: $*$ 表示共轭; $\varphi_A = \omega_0 t + \varphi_0 + C \cos(\omega_c t) + \varphi_n$, $\varphi_B = \omega_0(t - n\Delta t + T_i) - C \cos[\omega_c(t - n\Delta t + T_i)] - \varphi_2$ 。

以此类推,当存在多个碰撞点 ($n \geq 2$) 时, E_1 的光强 I 为

$$I = (E_1 + E_{rb1} + E_{rb2} + \dots + E_{rbn})(E_1 + E_{rb1} + E_{rb2} + \dots + E_{rbn})^*, \quad (8)$$

式中: E_{rbn} 为第 n 个碰撞点处的瑞利散射光场。式(8) 表明,若没有瑞利散射项 E_{rbn} 时,探测器探测到的第一

个脉冲为直流项 E_1^2 , 不存在干涉情况; 随着碰撞点(瑞利散射点)个数的增多, 相干叠加信号数目增多, 干涉信号产生。

图 3 描述了返回脉冲串第一个脉冲的瑞利散射点位置, 而在脉冲传输过程中, 链路上也会出现返回脉冲串第二个脉冲(主干涉脉冲)的瑞利散射点, 该位置处的光干涉过程如图 6 所示。

图 6 中主干涉脉冲 E_2 是由被 FRM1 反射的光场

E_{12} 和被 FRM2 反射的光场 E_{11} 两光束相干叠加形成, 即 $E_2 = E_{11} + E_{12}$, 其中

$$\begin{cases} E_{12}(t) = \sqrt{r} E_{in}(t) \\ E_{11}(t) = \sqrt{(1-r)r} E_{in}(t) \exp\left\{j\left[C \cos(\omega_c t) + \varphi_s\right]\right\} \end{cases} \quad (9)$$

式中: φ_s 为传感相位。则当 E_2 与 E_{21} 相遇且只有一个碰撞点时, E_2 的光强 I_0 记为

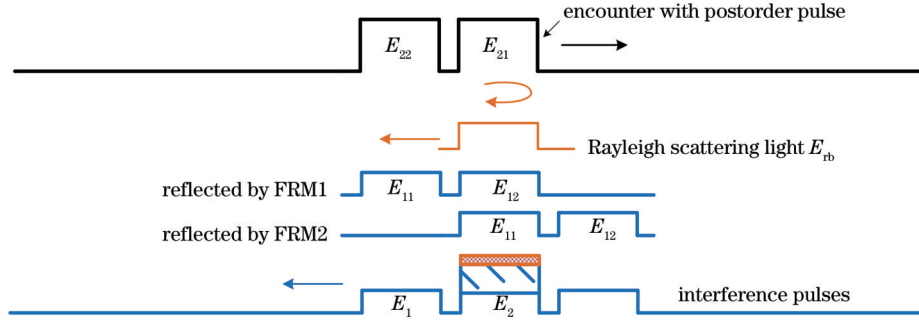


图 6 主干涉脉冲与瑞利散射光干涉过程

Fig. 6 Interference process of main interference pulse and Rayleigh scattering light

$$I_0 = (E_{12} + E_{11} + E_{rb})(E_{12} + E_{11} + E_{rb})^* = \epsilon_0^2 r + \epsilon_0^2 r_r^2 + \epsilon_0^2 (1-r)r + 2r\sqrt{1-r}\epsilon_0^2 \cos[C \cos(\omega_c t) + \varphi_s] + 2\sqrt{r}\epsilon_0^2 \cos \varphi_a + 2\sqrt{1-r}\epsilon_0^2 \cos[\varphi_a + C \cos(\omega_c t) + \varphi_s], \quad (10)$$

式中: $\varphi_a = \omega_0 t - \omega_0(t - n\Delta t + T_i) - C \cos[\omega_c(t - n\Delta t + T_i)] + \varphi_0 - \varphi_2$ 。

式(10)中: 当没有瑞利散射项 E_{rb} 时, 则输出光强仅为两束光的干涉强度; 当存在瑞利散射项 E_{rb} 时, 输出光强为三束光的干涉强度。

综上所述: 当碰撞点个数随传输光纤长度的增加呈阶跃式增加时, 干涉叠加的背向瑞利散射光光场数目也随之增多, 寄生干涉强度增强; 同时, 由于脉冲宽度是发射光脉冲持续的时间, 理论上系统探测到的散射信号是脉冲宽度内所有散射点信号的叠加^[12], 脉冲宽度越大说明脉冲在光纤内占的空间长度越大, 测量长度也越长, 任意一个碰撞点上叠加后的瑞利散射光越强; 瑞利散射率 r_r 决定了背向瑞利散射光的幅值大小, 其大小与重捕获因子 S 有关^[18-19], 当 r_r 增大时, 背向

瑞利散射光强度增强。

2.3 数值仿真

根据式(7), 对返回脉冲串第一个脉冲进行数值仿真, 参数值设置如表 1 所示。仿真模型为简化模型, 令激光角频率 $\omega_0 = 0$; ω 为服从 $[0, 1]$ 区间平均分布的随机变量, PGC 调制信号 $C \cos(\omega_c t)$ 中调制深度 $C = 2.37$, 调制角频率 $\omega_c = 2\pi f_{PGC}$, 调制频率 $f_{PGC} = 15.625 \text{ kHz}$; 为保证传感阵列中返回光功率均衡, 光耦合器分光比取 95:5, 即反射率 $r = 5\%$ 。由此得到的仿真输出信号在有/无瑞利散射噪声情况下的时域、频域特征如图 7 所示。图 7(a)、(b) 表明引入的瑞利散射光与信号之间发生了干涉, PGC 调制解调时相位中存在 f_{PGC} 倍频项; 图 7(c)、(d) 表明无瑞利散射噪声时, 信号近似直流光, 无 PGC 调制项影响。

表 1 模拟光信号仿真参数

Table 1 Simulation parameters of analog optical signal

ϵ_0 / V	f_{AOM} / kHz	φ_0 / rad	φ_2 / rad	r_r	T / ns	L / m
1.3	250	$(1 + 0.001\omega)\pi/3$	$(1 + 0.001\omega)\pi/4$	0.01	480	500

仿真中分析系统询问脉冲宽度 T 、光纤长度 L 以及瑞利散射率 r_r 这三个参数对背向瑞利散射噪声强度的影响。由于系统背向瑞利散射噪声作用效果直接反映在输出信号相位上, 而信号的干涉可见度可以评价不同参量改变时的时间响应曲线的波动幅度^[20], 因此, 可采用输出光强的干涉可见度即 $k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ (其中

I_{\max} 为最大干涉光强, I_{\min} 为最小干涉光强) 这一参数衡量系统背向瑞利散射噪声强度大小。仿真结果如图 8 所示, 图 8(a)~(c) 分别描述了在 $L = 500 \text{ m}$ 、 $r_r = 0.01$ 时 T 对 k 的影响, 在 $T = 480 \text{ ns}$ 、 $r_r = 0.01$ 时 L 对 k 的影响, 以及在 $L = 500 \text{ m}$ 、 $T = 480 \text{ ns}$ 时 r_r 对 k 的影响。

图 8(a) 中, 当脉冲宽度 T 线性增加时, 背向瑞利散射光强度呈非线性增强, 干涉程度增大, 干涉度呈

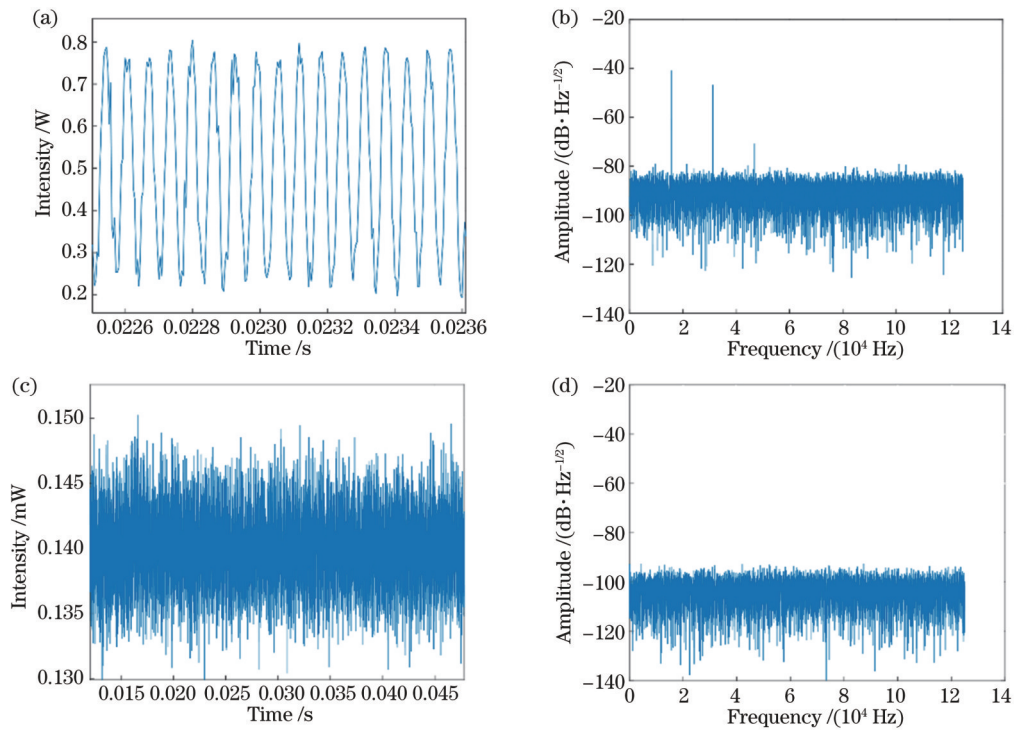


图 7 有/无瑞利散射时仿真信号时域图和频域图。(a)有瑞利散射时仿真信号时域图；(b)有瑞利散射时仿真信号频域图；(c)无瑞利散射时仿真信号时域图；(d)无瑞利散射时仿真信号频域图

Fig. 7 Time and frequency domain plots of simulated signals with or without Rayleigh scattering. (a) Simulated signal time-domain plot with Rayleigh scattering; (b) simulated signal frequency-domain plot with Rayleigh scattering; (c) simulated signal time-domain plot without Rayleigh scattering; (d) simulated signal frequency-domain plot without Rayleigh scattering

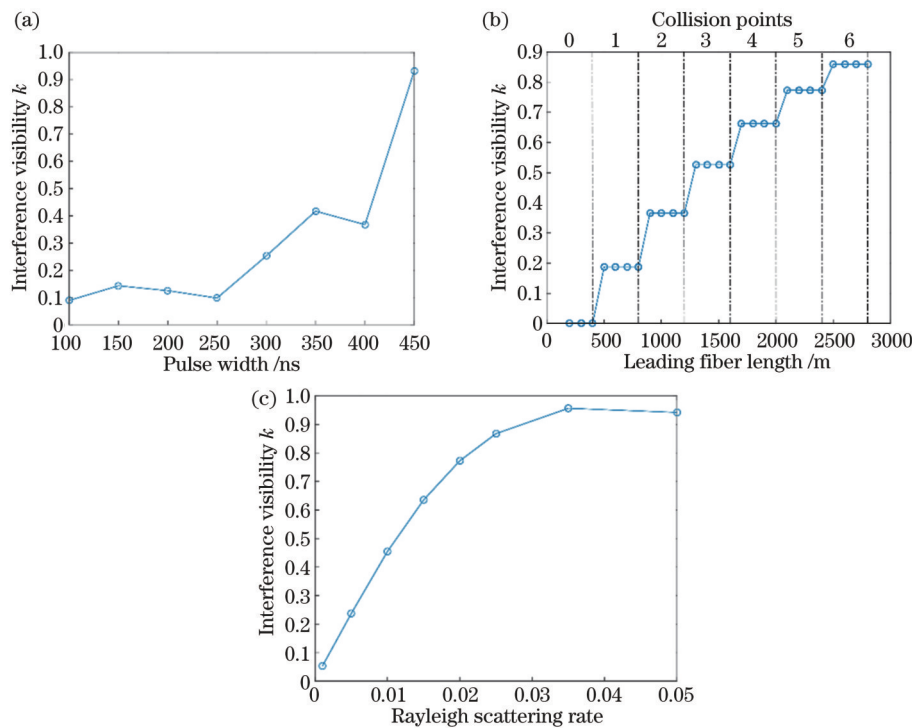


图 8 不同参数条件下返回序列第一个脉冲的干涉可见度的示意图。(a)脉冲宽度与干涉可见度的关系；(b)传输光纤长度与干涉可见度的关系；(c)瑞利散射率与干涉可见度的关系

Fig. 8 Diagrams of interference visibility k of the first returned optical pulse under different parameter conditions. (a) Relationship between pulse width and interference visibility k ; (b) relationship between leading fiber length and interference visibility k ; (c) relationship between Rayleigh scattering rate and interference visibility k

曲线式增长;图 8(b)中,传输光纤长度 L 增大时,脉冲碰撞点个数增加使得背向瑞利散射噪声强度项个数增加,最终导致输出信号中的背向瑞利散射噪声强度的阶跃性增长,干涉度也呈现阶跃性增长趋势;图 8(c)中,当瑞利散射率 r_r 增加时,背向瑞利散射噪声强

度增强,干涉现象增强,瑞利散射率与干涉度呈正相关关系。

采用同样的方法对探测器接收的返回序列的第二个脉冲(主干干涉脉冲)进行仿真,过程和参数设置与返回第一个脉冲测试相一致,结果如图 9 所示。

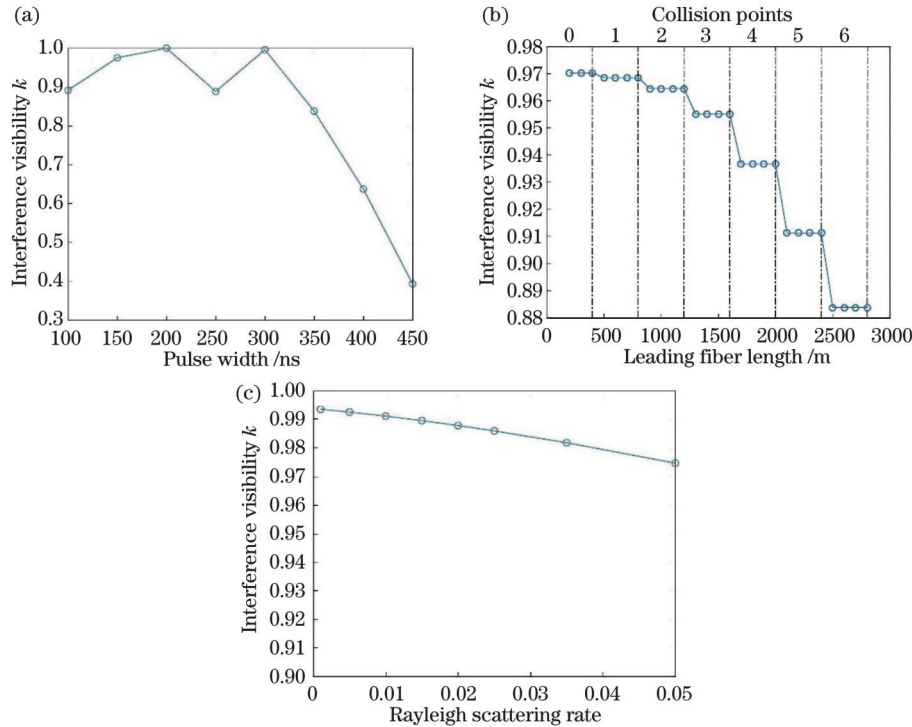


图 9 不同参数条件下主干干涉脉冲干涉可见度示意图。(a)脉冲宽度与干涉可见度的关系;(b)传输光纤长度与干涉可见度的关系;(c)瑞利散射率与干涉可见度的关系

Fig. 9 Interference visibility k of main interference pulse under different parameter conditions. (a) Relationship between pulse width and interference visibility k ; (b) relationship between leading fiber length and interference visibility k ; (c) relationship between Rayleigh scattering rate and interference visibility k

图 9 中,主干干涉脉冲干涉度 k 随着脉冲宽度 T 、传输光纤长度 L 及瑞利散射率 r_r 的增加整体呈下降趋势,这与图 8 中结论完全相反。其原因在于:主干干涉脉冲是由瑞利散射光和同一询问周期两束强相干光的三束光干涉形成的,瑞利散射光与其余两束光分属不同询问周期,相干性较差,而干涉度降低表明信号光相干性降低,即瑞利散射噪声强度增大。综上所述,可得到以下结论:背向瑞利散射光强随着脉冲宽度的增加、瑞利散射率的提高而动态增大,随着传输光纤长度的增加而呈阶跃性增加,其变化趋势与碰撞点增加情况保持一致。该结论与理论模型相符合。

3 实验及结果分析

3.1 实验系统描述

搭建的匹配干涉型光纤水听器实验系统光路如图 10 所示,系统参数设置如表 2 所示。光源采用线宽为 5 kHz 的窄线宽激光器,声光调制器(AOM)将激光器输出的连续光调制为脉冲光,调制频率为 f_{AOM} 。将经屏蔽处理的干涉仪两干涉臂光纤长度差为 101.28 m (长度等于 $\tau_s v_g$) 的全保偏马赫-曾德尔干涉仪作为匹

配干涉仪(CIF),用来将输入光脉冲转换成询问光脉冲对。将 CIF 短臂中的部分光纤缠绕在压电陶瓷环(PZT)上以产生 PGC 信号,系统调制解调方案采用微分相乘(DCM)算法。实验设备干端均采用抗弯熊猫保偏光纤,型号为 PM15G-125-U25,衰减小于 0.5 dB/km,从 CIF 输出的光脉冲对较光源光偏振态保持不变,经环形器进入传感阵列,环形器的三个端口尾纤和传感阵列之间的连接光纤均为普通单模光纤。湿端传感阵列选用 Michelson 干涉仪结构,其中光纤耦合器分光比为 95:5,相邻两个光纤耦合器之间的光纤长度差为 50.64 m,是 CIF 臂差的一半,忽略相邻光纤耦合器到 FRM 之间的光纤长度。

表 2 实验主要参数设置

Table 2 Setting for main parameters in experiment

f_{AOM} / kHz	f_{PGC} / kHz	T_1 / ns	T / ns	τ_s / ns	n_{eff}
250	15.625	500	100-490	500	1.481

实验中根据需求选取不同长度、类型的光纤进行具体操作,研究脉冲宽度、传输光纤长度、瑞利散射率对输出信号光强干涉可见度的影响,分别通过调整脉

冲宽度大小、改变光纤长度、采用不同类型光纤来进行测试,光纤主要性能指标如表 3 所示,其中 Fiber1 采用

非抗弯单模光纤, Fiber2 采用抗弯光纤。

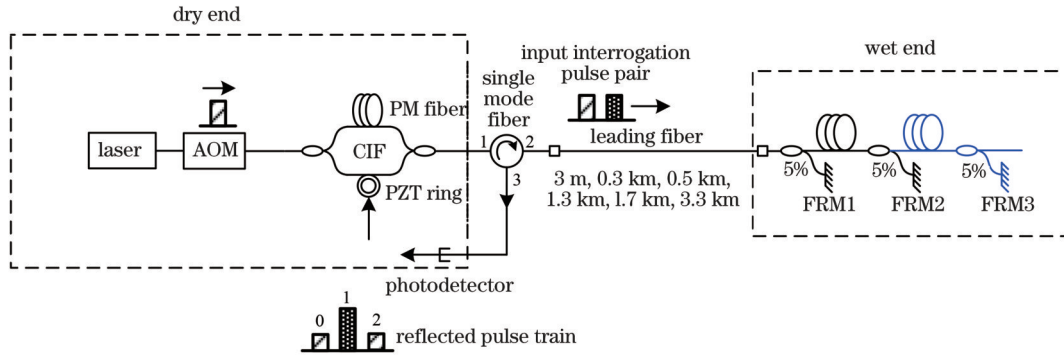


图 10 实验系统示意图

Fig. 10 Diagram of experimental system

表 3 两种传输光纤的性能指标

Table 3 Performance indicators of two leading fibers

Fiber	Type	Parameter	Length
Fiber1	ITU-T G652D	Attenuation is smaller than $0.22 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$;	3 m, 0.3 km, 0.5 km, 1.3 km, 1.7 km, 3.3 km
		fiber core diameter is $125 \mu\text{m}$; mode field diameter is $(9.2 \pm 0.4) \mu\text{m}$	
Fiber2	BI15-80-U16	Attenuation is smaller than $0.5 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$;	0.3 km, 0.5 km, 1.3 km, 1.7 km, 3.3 km
		fiber core diameter is $80 \mu\text{m}$; mode field diameter is $(6.4 \pm 0.5) \mu\text{m}$	

3.2 瑞利散射对返回脉冲序列中第一个脉冲的影响

将实验参数值代入式(1)中,可得第一个脉冲碰撞点位置与传感端位置的距离 $d = 400 \text{ m}$,则当光纤长度为 300 m 时,传输链路上无碰撞点出现,观察图 11 的返回光脉冲光强电压时域图像。理论上:若不存在背向瑞利散射光影响,则首个返回光脉冲应为直流光脉冲,第二个返回光脉冲为携带外界传感信号的干涉脉冲;若背向瑞利散射光的影响增大,其会与返回光脉冲串发生寄生干涉。

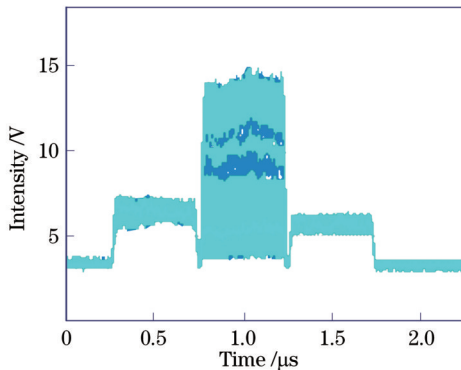


图 11 输出返回光脉冲光强电压时域信号

Fig. 11 Time domain signal of returned optical pulse intensity voltage

图 12 描述了返回序列第一个脉冲在 Fiber1 和 Fiber2 中的干涉度随询问脉冲宽度的变化,随着脉冲宽度的增加,输出信号干涉度增大。

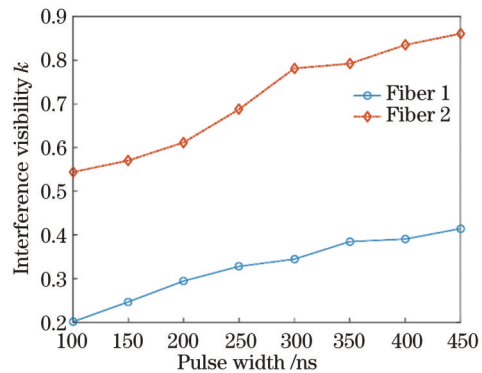


图 12 Fiber1 和 Fiber2 中脉冲宽度与返回第一个脉冲的干涉可见度的关系

Fig. 12 Relationship between interference visibility k of the first returned pulse and pulse width in Fiber1 and Fiber2

接下来研究传输光纤长度对瑞利散射的影响,此时 $T = 480 \text{ ns}$,当传输光纤长度为 0.3 km 、 0.5 km 、 1.3 km 、 1.7 km 和 3.3 km 时,分别对应 0 、 1 、 3 、 4 、 8 个碰撞点。图 13 中,当传输光纤上依次出现 0 、 1 、 4 、 8 个碰撞点时,背向瑞利散射光与返回光脉冲串之间的寄生干涉强度不断增强,信噪比严重下降。

图 14 中:当传输光纤长度增加时,背向瑞利散射噪声强度累加效果增强,干涉度阶跃式提升;Fiber2 的干涉可见度总是大于 Fiber1,这是由于 Fiber2 采用的抗弯光纤的模场直径较小、数值孔径较大、重捕获因子较大,瑞利散射率大于 Fiber1,会诱导更大比例的背向

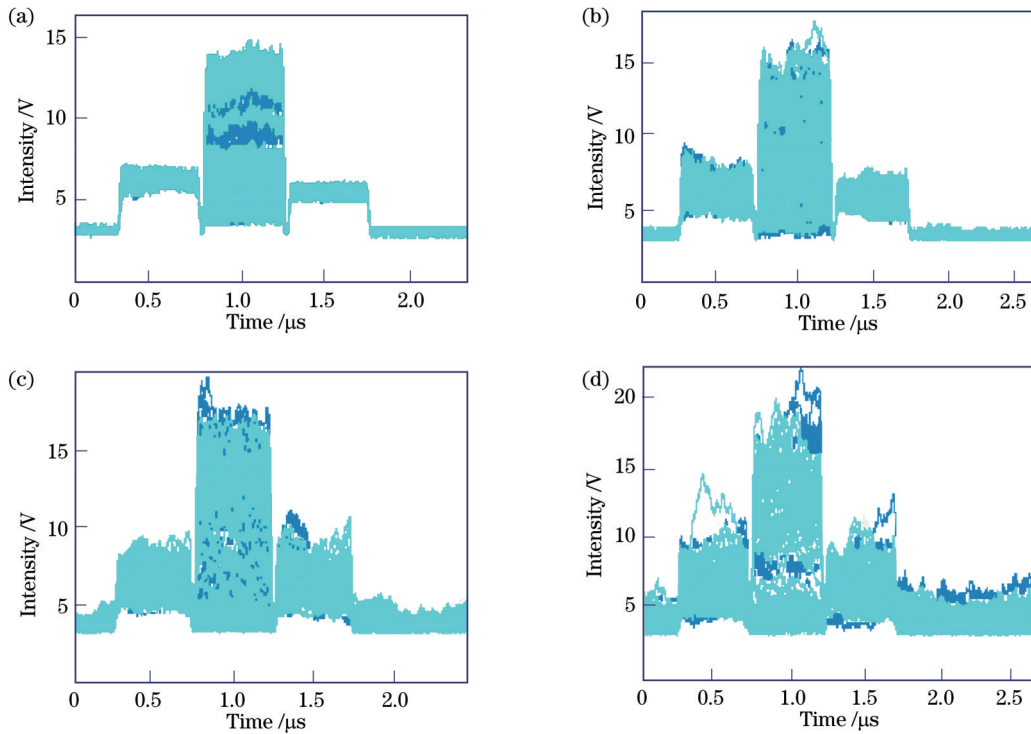


图 13 存在 0~8 个脉冲碰撞点时返回光脉冲光强电压时域信号。(a) 0 个碰撞点 ($L=0.3\text{ km}$); (b) 1 个碰撞点 ($L=0.5\text{ km}$); (c) 4 个碰撞点 ($L=1.7\text{ km}$); (d) 8 个碰撞点 ($L=3.3\text{ km}$)

Fig. 13 Time domain signals of returned optical pulse intensity voltage with 0-8 pulse collision points. (a) 0 collision point ($L=0.3\text{ km}$); (b) 1 collision point ($L=0.5\text{ km}$); (c) 4 collision points ($L=1.7\text{ km}$); (d) 8 collision points ($L=3.3\text{ km}$)

瑞利散射光, 由此导致更为显著的寄生干涉^[21]。

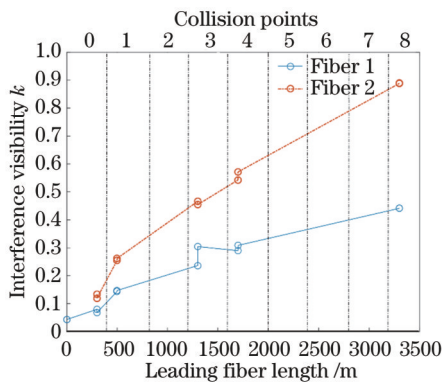


图 14 Fiber1 和 Fiber2 中传输光纤长度与返回第一个脉冲的干涉度的关系示意图

Fig. 14 Relationship between interference visibility k of leading fiber length and the first returned pulses in Fiber1 and Fiber2

3.3 瑞利散射对返回脉冲序列中第二个脉冲的影响

探测器接收到的返回序列第二个脉冲为主干涉脉冲, 是光纤水听器的干涉结果, 通过研究其与询问光脉冲宽度、光纤长度和光纤类型之间的关系, 分析其受瑞利散射的影响, 实验结果如图 15 所示。

图 15 表明, 在不同情况下返回序列主脉冲光强干涉度均稳定在 0.9 以上, 且变化程度较小, 这是由于主干涉脉冲是由两束强度相近的相干光干涉叠加形成的, 其光强远大于瑞利散射光强度; 同时, 相干的两束光

之间会发生相互抵消, 由此导致干涉度呈现不稳定性。

图 16 进一步分析了瑞利散射对系统本底噪声的影响, 此时 $T=480\text{ ns}$, 其中 short、0-CP、1-CP、3-CP、4-CP 和 8-CP 分别指短光纤、0 个碰撞点、1 个碰撞点、3 个碰撞点、4 个碰撞点和 8 个碰撞点的情况。图 16(a) 中, 当 Fiber1 长度为 300 m 时, 链路光纤上没有脉冲碰撞点, 此时解调信号的本底噪声与短光纤 (3 m) 时的本底噪声相当接近, 而与有 1 个碰撞点时的本底噪声相差较大, 这表明本底噪声变化主要受碰撞点情况影响, 而非简单的光纤传输损耗; 当光纤上分别存在 0、1、3、4、8 个碰撞点时, Fiber1 在 4 kHz 频点处的解调信号相位本底噪声分别为 -88.5 dB 、 -81.11 dB 、 -72.85 dB 、 -71.3 dB 、 -66.56 dB , 相较于短光纤跳线本底噪声均有所提高; 图 16(b) 中 Fiber2 在 4 kHz 频点处的本底噪声分别为 -88.52 dB 、 -75.17 dB 、 -65.89 dB 、 -64.9 dB 、 -56.57 dB , 本底噪声大小逐个增大。

综合图 16(a)、(b) 可知, 不同类型光纤中的背向瑞利散射噪声强度均随着光纤长度的增加而呈阶跃式增大; 相同长度条件下, Fiber2 较 Fiber1 会得到更多的瑞利散射噪声, 其本底噪声整体上大于 Fiber1; 随着碰撞点个数的增多, 两种光纤的本底噪声增量均出现减小、噪声水平增速均变慢, 其原因在于不同询问周期之间的询问光脉冲相干度下降。

图 17 展示了不同脉冲宽度下的传感相位本底噪声性能, 传输光纤长度为 3.3 km (有 8 个脉冲碰撞点)。

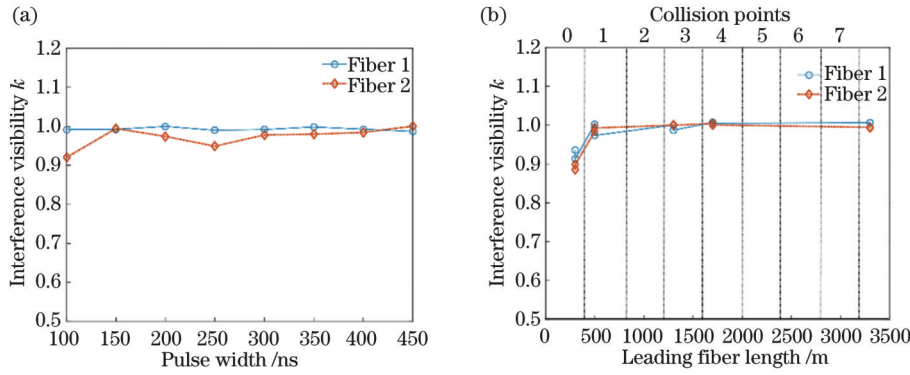


图 15 返回主干扰脉冲不同条件下 Fiber1 和 Fiber2 的干涉可见度示意图。(a) 脉冲宽度与干涉可见度的关系; (b) 传输光纤长度与干涉可见度的关系

Fig. 15 Interference visibility k of main returned pulses in Fiber1 and Fiber2 under different conditions. (a) Relationship between pulse width and interference visibility k ; (b) relationship between leading fiber length and interference visibility k

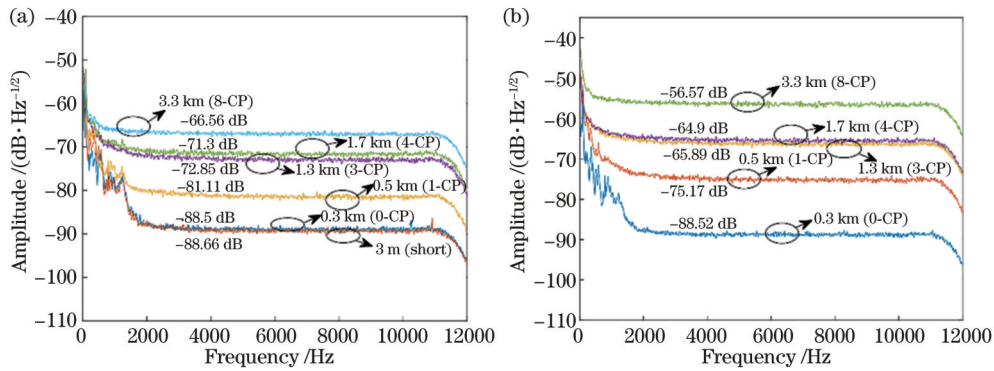


图 16 两种光纤在不同传输光纤长度时的解调信号平均相位谱密度 (PSD) 图。(a) Fiber1; (b) Fiber2

Fig. 16 Average phase spectral density (PSD) of demodulated signals of two fibers with different leading fiber length. (a) Fiber1; (b) Fiber2

当采用 100~400 ns 脉宽的询问光脉冲时, 图 17(a) 中 Fiber1 的解调信号相位本底噪声 (4 kHz 频点处谱级) 分别为 -73.77 dB、-69.88 dB、-66.93 dB、-66.97 dB, 最大相差 6.8 dB; 图 17(b) 中的 Fiber2 的解调信号相位本底噪声 (4 kHz 频点处谱级) 分别为 -64.29 dB、-61.86 dB、-56.96 dB、-56.03 dB, 最

大相差 8.26 dB。对比两图可知, 询问光脉冲宽度的增加会使得背向瑞利散射光场导致的寄生干涉现象加剧, 从而诱导更大幅度的背向瑞利散射噪声强度, 该结论具有普遍性; 在相同脉冲宽度情况下, Fiber2 的本底噪声较 Fiber1 整体要高 10 dB 左右。上述实验结论与理论模型和仿真结果相符。

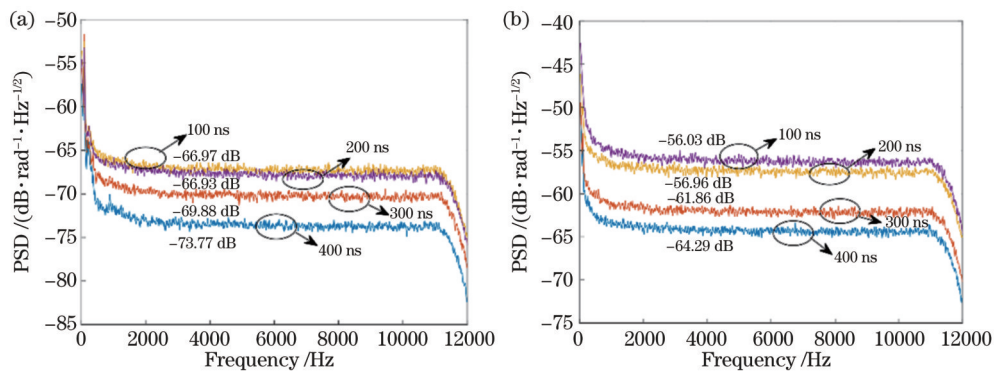


图 17 两种光纤在不同脉冲宽度情况下的解调信号平均相位谱密度图。(a) Fiber1; (b) Fiber2

Fig. 17 Average phase spectral density of demodulated signals of two fibers with different pulse widths. (a) Fiber1; (b) Fiber2

4 结 论

深入研究了短程匹配干涉型光纤水听器中传输光纤动态不连续瑞利散射噪声特性,利用干涉可见度的参数特性,得到了系统背向瑞利散射噪声与询问脉冲宽度、传输光纤长度、瑞利散射率等参数的内在关系。实验中发现:当传输光纤长度大于 500 m 时,随着传输光纤长度的增加,系统本底噪声呈阶跃式增长;当光纤长度从 300 m 增长到 500 m 时, Fiber1 和 Fiber2 在 4 kHz 处的本底噪声分别增加了 4.37 dB 和 9.8 dB;当脉冲宽度从 100 ns 增加至 400 ns 时, Fiber1 和 Fiber2 在 4 kHz 处的本底噪声分别增加了 6.8 dB 和 8.26 dB,系统本底噪声变化情况受光纤类型和脉冲宽度等参数的影响。理论仿真和实验结果均表明:短程传输状态下瑞利散射噪声与询问系统的调制解调参数密切相关,其噪声影响随着传输光纤长度的增长、瑞利散射率的提高呈现不连续变化特性,信号本底噪声水平也呈阶跃式增加,使得实际应用中系统探测难度加大。该研究成果对短程光纤水听器系统结构设计和最短共模传输光纤理论研究具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 马丽娜. 光纤激光水听器技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010: 41-42.
Ma L N. Fiber laser hydrophone[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010: 41-42.
- [2] 丁朋, 吴晶, 康德, 等. 采用弱反射光纤布拉格光栅的声波方向检测[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0506002.
Ding P, Wu J, Kang D, et al. Detection of acoustic wave direction using weak-reflection fiber Bragg gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0506002.
- [3] 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.
Liu D M, Sun Q Z. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(11): 29-33.
- [4] 曹春燕, 胡正良, 熊水东, 等. 光纤水听器远程传输中相干瑞利噪声的抑制[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005005.
Cao C Y, Hu Z L, Xiong S D, et al. Suppression of Rayleigh scattering induced coherent noise in remotely interrogated fiber-optic hydrophones[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1005005.
- [5] 曹春燕. 光纤水听器阵列超远程光传输低噪声光放大链关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 11-14.
Cao C Y. Study on key techniques of high performance fiber-optics hydrophone array based on ultra-remotely optical transmission and cascaded amplifiers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 11-14.
- [6] Chow J H, McClelland D E, Gray M B. Rayleigh backscatter mitigation by RF modulation in a 100-km remote fiber sensing system[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6538: 65381O.
- [7] Marrone M J, Kersey A D, Villarruel C A, et al. Elimination of coherent Rayleigh backscatter induced noise in fibre Michelson interferometers[J]. Electronics Letters, 1992, 28(19): 1803-1804.
- [8] Ronnekleiv E, Waagaard O H, Thingbo D, et al. Suppression of Rayleigh scattering noise in a TDM multiplexed interferometric sensor system[C]//OFC/NFOEC 2008-2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [9] 孟洲, 陈伟, 王建飞, 等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306009.
Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306009.
- [10] 丁朋, 黄俊斌, 姚高飞, 等. 二次涂覆增敏型弱反射光纤布拉格光栅水听器[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906003.
Ding P, Huang J B, Yao G F, et al. Weak reflection fiber Bragg grating hydrophone with secondary coating sensitization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906003.
- [11] 尚凡, 戚悦, 马丽娜, 等. 基于光纤光栅的时分复用传感阵列相位噪声研究[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306011.
Shang F, Qi Y, Ma L N, et al. Background phase noise of interferometric TDM sensing array based on fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306011.
- [12] 马国旗, 曹丹平, 尹教建, 等. 分布式声传感井中地震信号检测数值模拟方法[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(2): 311-320.
Ma G Q, Cao D P, Yin J J, et al. Numerical simulation of detecting seismic signals in DAS wells[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2): 311-320.
- [13] Park J, Lee W K, Taylor H F. Fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time-domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3555: 49-56.
- [14] Park J, Taylor H F. Fiber optic intrusion sensor using coherent optical time domain reflectometer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(6R): 3481-3482.
- [15] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [16] Bao X Y, Zhou D P, Baker C, et al. Recent development in the distributed fiber optic acoustic and ultrasonic detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3256-3267.
- [17] Jiang P, Ma L N, Hu Z L, et al. An 8-TDM inline fiber fabry-perot sensor array based on ultra-weak fiber Bragg gratings[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2015, November 19-23, 2015, Hong Kong,

- China. Washington, D.C.: OSA, 2015: AM1D.4.
- [18] Ronnekleiv E, Waagaard O H, Blotekjaer K, et al. Active coherence reduction for interferometer interrogation: US7433045[P]. 2008-10-07.
- [19] Nakazawa M. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(9): 1175-1180.
- [20] 钟翔, 赵世松, 邓华夏, 等. 基于脉冲调制的 Φ -OTDR 研究综述[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20200166.
- Zhong X, Zhao S S, Deng H X, et al. Review of research on Φ -OTDR system based on pulse modulation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20200166.
- [21] Hartog A, Gold M. On the theory of backscattering in single-mode optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, 2(2): 76-82.