

# 100 km 传输光纤水听器系统低频噪声自适应消除技术\*

钟秋文<sup>1\*\*</sup>, 程 壮<sup>2</sup>, 乔正明<sup>1</sup>, 陈志法<sup>1</sup>, 夏文杰<sup>1</sup>, 赵 翔<sup>1</sup>, 朱 忆<sup>1</sup>

(1. 国家海洋技术中心漳州基地筹建办公室, 福建 厦门 361000; 2. 91668部队, 上海 200083)

**摘 要:** 首次引入自适应递归最小二乘法(RLS)抑制 100 km 传输光纤水听器系统低频(0~500 Hz)本底噪声, 并与直接相减法(DS)作比较。结果表明: DS 基本噪声抑制作用不佳; RLS 自适应消除法对系统噪声具有明显抑制作用, 可达 16 dB @ 40 Hz, 20 dB @ 100 Hz, 15 dB @ 200 Hz, 18 dB @ 300 Hz, 13 dB @ 400 Hz。经 RLS 自适应噪声抑制后, 系统在 350 Hz 以上的噪声稳定在 -95 dB, 与高频部分噪声水平相当; RLS 自适应消除可以在噪声抑制的同时, 完整保留传感探头中的有用信号。

**关键词:** 光纤水听器; 低频噪声; 自适应消除; 递归最小二乘法

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)01-0032-04

## Adaptive Elimination of Low Frequency Noise in Remote Optical Fiber Hydrophone System\*

ZHONG Qiuwen<sup>1</sup>, CHENG Zhuang<sup>2</sup>, QIAO Zhengming<sup>1</sup>, CHEN Zhifa<sup>1</sup>, XIA Wenjie<sup>1</sup>, ZHAO Xiang<sup>1</sup>, ZHU Yi<sup>1</sup>

(1. Office for Establishing Zhangzhou Base Department, National Ocean Technology Center, Xiamen Fujian 361000, CHN; 2. 91668 Troops, Shanghai 200083, CHN)

**Abstract:** The adaptive recursive least square (RLS) method was introduced for the first time to suppress the low-frequency (0 ~ 500 Hz) background noise of 100 km transmission optical fiber hydrophone system, and compared with the direct subtraction (DS). The results showed that DS had poor basic noise suppression effect for fiber-optic hydrophone system, and RLS adaptive algorithm had obvious noise suppression effect: 16 dB@40 Hz, 20 dB@100 Hz, 15 dB@200 Hz, 18 dB@300 Hz and 13 dB @400 Hz. After RLS adaptive noise suppression, the noise level of the system above 350 Hz was stable at -95 dB, which was equivalent to that of the high frequency part. RLS adaptive cancellation could suppress the noise and retain the useful signal in the sensor probe.

**Key words:** optical fiber hydrophone; low frequency noise; adaptive elimination; recursive least square method

收稿日期: 2021-06-26

\* 基金项目: 国家重点实验室基金(SKLGIE2019-M-1-1)

作者简介: 钟秋文(1992-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为光纤传感与水声探测技术; (E-mail: 445124770@qq.com)

程 壮(1996-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为水声信号处理;

乔正明(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为海洋工程与技术。

\*\* 通讯作者

## 引言

光纤水听器系统因其自噪声低,无中继探测距离远、易成阵、易复用、抗电磁干扰能力强等特点,在海底地震检波、油气能源探测、水下目标侦察预警等领域有着广泛的应用。低频(500 Hz以下)水声信号传播损失小,是水听器进行远程探测的主要波段。水听器系统本底噪声决定了系统的探测距离,因此本底噪声抑制具有十分重要的意义。

当前实用化最多的光纤水听器采用的探头结构是迈克尔逊干涉仪<sup>[1-5]</sup>,已有不少学者研究了系统本底噪声的抑制方法,并取得一定成果<sup>[6-11]</sup>。但是这些方法大多是从硬件角度出发,噪声抑制能力受限于元器件本身质量。国内外许多学者利用参考探头获取系统自身噪声,从而进行本底噪声抑制,已在光纤传感领域得到应用<sup>[12-14]</sup>。A. D. Kersey等<sup>[15]</sup>将传感探头信号与参考探头信号相减,一定程度上消除了系统噪声。牛嗣亮<sup>[16]</sup>采用参考光源和参考传感器的方法提高了法布里-珀罗光纤传感系统信号比高达40 dB。但水听器系统各探头受环境影响不同,且远程传输系统噪声复杂多样,直接相减的降噪方法效果不佳。自适应滤波器能在目标信号不失真的前提下,通过参考信号抑制系统噪声,已经逐渐被应用到光纤传感领域中<sup>[14,17]</sup>。吴艳群、曹春燕、Cai Yunfei等<sup>[18-21]</sup>用最小均方算法(LMS)和基于归一化最小均方误差法(NLMS)的自适应算法对光纤水听器系统噪声进行抑制,也取得了一定的成果,但未对递归最小二乘法(RLS)的自适应算法进行探索。

文章构建100 km无放大器传输的光纤水听器模拟系统,首次引入RLS算法抑制系统低频本底噪声,并与直接相减法(DS)作比较。探测器是一个迈克尔逊干涉仪(SI)和一个与SI结构相同,但对环境不敏感的聋子干涉仪(RI)。RI和SI获得的由光源与传输光纤等引入的噪声具有强相关性,可用RLS自适应噪声消除方法进行抑制,降低系统本底噪声。

## 1 基本原理

自适应噪声抑制原理<sup>[22]</sup>如图1所示。

系统输入信号由参考信号 $u(n)$ 和探测信号 $d(n)$ 组成。 $u(n)$ 由对外界环境不敏感的聋子探头

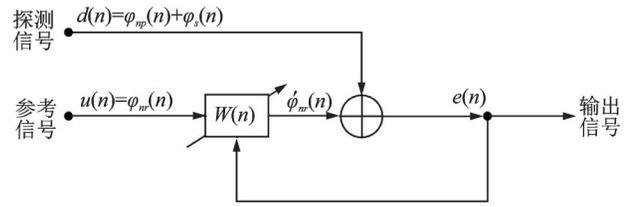


图1 自适应消除原理图

Fig.1 Schematic of adaptive elimination principle

获得,仅包含系统自噪声 $\varphi_{nr}(n)$ 。 $d(n)$ 由传感探头获取,包含系统自噪声 $\varphi_{np}(n)$ 和外界环境信息 $\varphi_s(n)$ 。对于光源噪声和传输光纤引入的干扰噪声而言, $\varphi_{nr}(n)$ 和 $\varphi_{np}(n)$ 应具有相关性, $\varphi_{nr}(n)$ 经自适应滤波器 $W(n)$ 处理后可实现对 $\varphi_{np}(n)$ 的估计,即 $\varphi'_{nr}(n)$ , $e(n)$ 为 $d(n)$ 与 $\varphi'_{nr}(n)$ 相减的误差信号,通过自适应算法实现 $e(n)$ 对 $W(n)$ 进行反馈控制,使得 $\varphi'_{nr}(n)$ 逐渐逼近 $\varphi_{np}(n)$ 。最终得到:

$$e(n) = d(n) - \varphi'_{nr}(n) \approx d(n) - \varphi_{np}(n) = \varphi_s(n) \quad (1)$$

即可视 $e(n)$ 为外界环境信号 $\varphi_s(n)$ 的最优估计。

文中主要探究RLS自适应算法,并和直接相减法进行比较。RLS算法流程如图2所示。

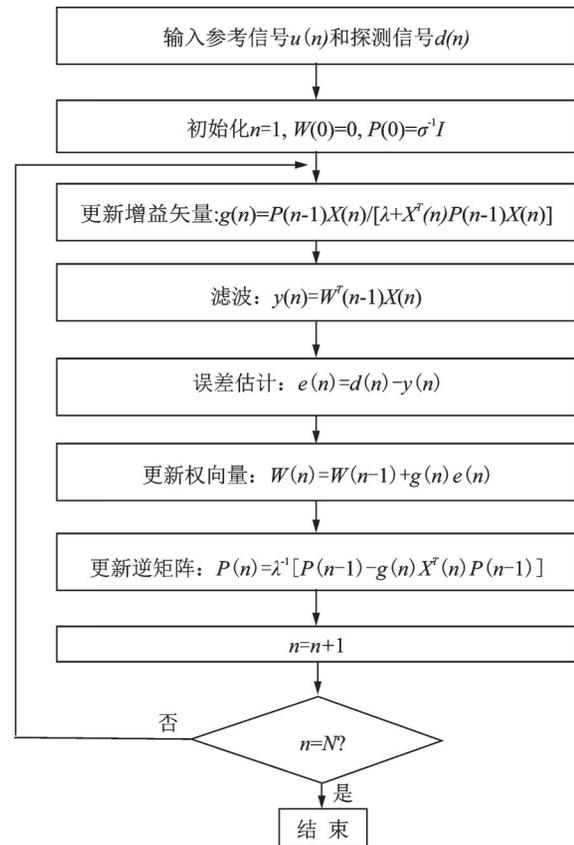


图2 RLS算法流程图

Fig.2 Flow chart of RLS algorithm

其中： $I$ 为单位矩阵， $\sigma$ 为正则化参数，取值为0.99。 $\lambda$ 为遗忘系数， $0 < \lambda < 1$ 。 $M$ 为滤波器阶数， $X(n)=[u(n), u(n+1), \dots, u(n+M-1)]^T$ 为在时刻 $n$ 时的 $M \times 1$ 阶输入矢量，通过调整参数 $\lambda$ 和 $M$ 可以改变RLS自适应算法的收敛速度和误差。 $W(n)$ 是滤波器的权矢量， $T$ 为转置。

## 2 实验系统

研制了如图3所示的光纤水听器系统，并编写直接相减法(DS)和RLS算法分别对系统噪声进行滤除。

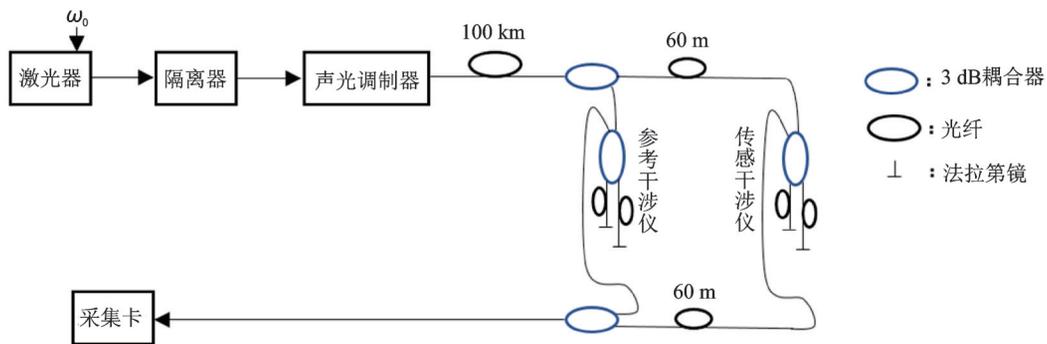


图3 100 km 光纤水听器系统图

Fig. 3 System diagram of 100 km fiber optic hydrophone

系统中，光源为波长1550 nm的低噪声窄线宽RIO激光器，激光功率控制在1 mW，激光经隔离器可阻止反射光返回激光器。传输光纤为长度100 km、直径250 nm的单模传输光纤。参考干涉仪(RI)和传感干涉仪(SI)均由臂差为0.343 m、臂长为14 m的迈克尔逊干涉仪构成，采用法拉第镜作为干涉仪反射镜，两者物理结构完全一致。RI置于真空屏蔽桶(图4(a))中，可以很好地隔绝外界环境噪声。SI置于抗震水桶中(图4(b))，可探测水中的信

号，同时也受水中环境噪声的影响。两干涉仪中间传入和传出各有一段延时光纤，长度均为60 m，利用时分系统可将两路信号分开，光电转换后，由A/D进行采集。系统采用相位产生载波内调制解调方式(PGC)<sup>[11]</sup>，加载在激光器的调制频率 $\omega_0 = 24$  kHz，解调后，参考干涉仪获取信号作为参考信号，传感干涉仪获取信号为探测信号，并通过直接相减(DS)和RLS自适应滤波进行处理，获得降噪后的有用信息。



(a) 真空屏蔽桶



(b) 抗震水桶

图4 RI和SI所处环境

Fig.4 Environment of RI and SI

## 3 实验结果及分析

实验系统采样率为192 kHz，充分考虑到信噪

比、算法收敛速度及噪声抑制效果，设置RLS滤波器参数遗忘因子 $\lambda$ 为0.998，阶数 $M$ 为200，进行RLS的自适应噪声消除，效果如图5。

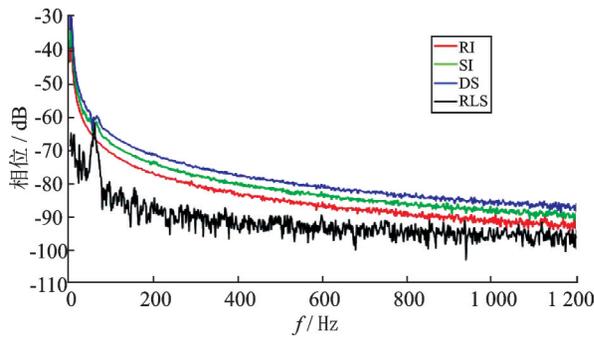


图5 0~1 200 Hz频段DI和RLS噪声抑制效果图

Fig. 5 Diagram of DI and RLS noise suppression effect in 0~1 200 Hz band

图5中,纵坐标  $0 \text{ dB} = 1 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。可以看出,在噪声的低频部分自适应滤波器的降噪效果十分明显,因此取  $0\sim 500 \text{ Hz}$  频段进行详细观察,如图6所示。

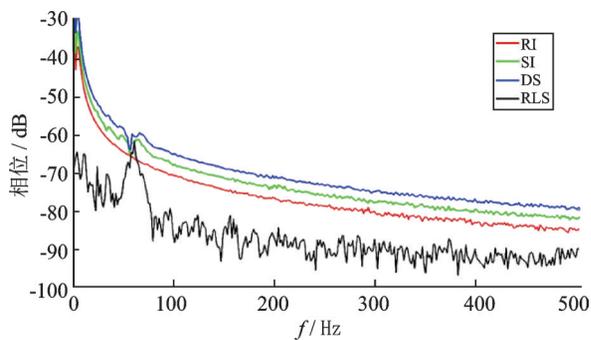


图6 0~500 Hz频段DI和RLS噪声抑制效果图

Fig. 6 Diagram of DI and RLS noise suppression effect in 0~500 Hz band

观察图6可得以下结论:

①对比SI和DS可以发现,DS方法已经失去了降噪作用。

②对比SI和RLS可以发现,RLS的噪声抑制作用明显,具体抑制能力约为  $16 \text{ dB} @ 40 \text{ Hz}$ ,  $20 \text{ dB} @ 100 \text{ Hz}$ ,  $15 \text{ dB} @ 200 \text{ Hz}$ ,  $18 \text{ dB} @ 300 \text{ Hz}$ ,  $13 \text{ dB} @ 400 \text{ Hz}$ 。

③经RLS自适应噪声抑制后,系统在  $350 \text{ Hz}$  以上的噪声等级稳定在  $-95 \text{ dB}$ ,与高频部分相当。

④对比RI、SI和RLS还可以发现,在SI中,  $60 \text{ Hz}$  处有个不起眼的小线谱,容易被忽视,而在RI中并没有该线谱,经过RLS处理后,  $60 \text{ Hz}$  处线谱尤其明显,该线谱可能是SI置于水中的水体噪声,原本几乎淹没在系统本底噪声中,经RLS处理后,该部分噪声就显现出来了。这正是系统本底噪声RLS自适应消除的意义所在。

为验证RLS能在噪声抑制的同时完整保留有用的外界信号,在程序中给RI和SI同时加入频率为  $500 \text{ Hz}$ 、幅度为  $0.005$ 、相位差为  $10$  的模拟公共噪声,另给SI加入频率为  $400 \text{ Hz}$ 、幅度为  $0.005$  的模拟探测信号,经RLS自适应消除后,效果如图7。

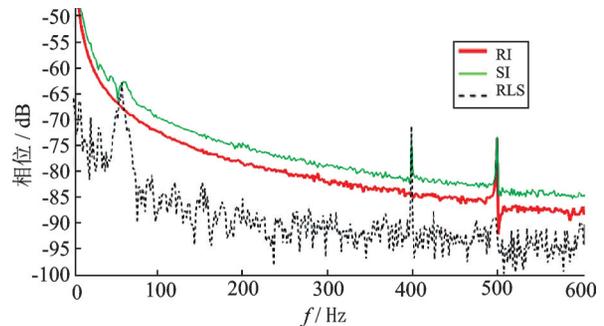


图7 引入模拟共同噪声和探测信号的RLS噪声抑制效果图

Fig. 7 Diagram of RLS noise suppression effect with introducing analog common noise and detection signal

观察图7可得,在  $500 \text{ Hz}$  处,RLS对RI和SI的公共噪声抑制能力达  $15 \text{ dB}$ ,基本降低到了本底噪声的水平,而  $400 \text{ Hz}$  有用探测信号幅度几乎不受影响。可见RLS自适应消除只抑制由光纤水听器系统本身引起的、在RI和SI共同存在的系统自噪声,并且能在噪声抑制的同时完整地保留外界有用探测信号。

## 4 结论

论文针对  $100 \text{ km}$  传输干涉型光纤水听器系统,提出用RLS自适应噪声消除方法对系统低频本底噪声进行抑制。实验中搭建光纤水听器模拟系统,实现基于RLS自适应消除的系统本底噪声抑制。实验结果表明,RLS自适应算法对系统低频本底噪声有较好的抑制效果,且自适应滤波后能较完整保留外界环境信号。

水听器系统中各光学元件和传输光纤引入的多种系统自噪声在传感探头和参考探头中具有高度的相关性,适用自适应消除进行噪声抑制。自适应消除法可以采用不同的算法和具体参数以适应不同结构、不同环境中的水听器系统,且不占硬件资源,不影响系统工作,具有良好的市场应用前景,RLS自适应算法噪声抑制效果好,但同时计算量较大,不利于实时处理分析数据,使用者应该根据系统的使用需求统筹考虑。 (下转第40页)