

【引用格式】张海波, 苏瑞群, 邹清府, 等. 基于火箭发动机的脉冲信号检测[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(5): 472-477

基于火箭发动机的脉冲信号检测

张海波, 苏瑞群, 邹清府, 胡伟凡, 刘培培, 王 斌
(江南工业集团, 湖南 湘潭 411207)

摘 要 水下火箭发动机工作时, 尾部会产生高强度、宽频带背景噪声。在分析火箭发动机噪声产生机理和物理特性的基础上, 主要研究了火箭发动机噪声背景下脉冲信号的检测流程和方法。采用自适应消噪和滤波, 减弱背景噪声强度并提高了信噪比, 建立了火箭发动机噪声背景下脉冲信号的检测方法, 解决了强背景噪声脉冲信号难以检测的问题, 为火箭发动机水下应用提供了新的思路。

关键词 发动机; 噪声; 自适应; 信号检测

中图分类号 TJ630 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2022)05-0472-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.05.015

Pulse Signal Detection Based on Rocket Engine

ZHANG Haibo, SU Ruiqun, ZOU Qingfu, HU Weifan, LIU Peipei, WANG Bin
(Jiangnan Industries Group Co., Ltd., Xiangtan 411207, China)

Abstract When the underwater rocket engine works, its tail will produce high-intensity and broadband background noises. Based on the analysis of the producing mechanism and physical characteristics of rocket engine noise, the detection process and method for pulse signals under the noise background of rocket engine are mainly studied. Adaptive denoising and filtering are adopted to reduce the intensity of background noise and improve the signal-to-noise ratio. The detection method of impulse signal under the noise background of rocket engine is established to solve the problem that it is difficult to detect impulse signal with strong background noise, which provides a new idea for underwater application of rocket engine.

Key words rocket engine; noise; self-adaption; signal detection

0 引言

当前近海水下防御进入新的阶段, 其他各国也对近海防御表现出很高的关注度。火箭发动机相比传统的电推力等发动机具备结构简单、爆发力强、可快速提高水下装备航行速度等优势, 使其应用较为广泛^[1]。然而, 火箭发动机工作时产生的强背景噪声会淹没任何水下声信号^[2], 传统方法难以检测出高信噪比脉冲信号, 因此固体火箭发动机水下脉

冲信号检测研究具有重要的意义, 这将为水下火箭发动机强背景噪声下目标信号检测提供新的思路。

1 火箭发动机噪声机理分析

固体火箭发动机在水下工作时, 发动机开机后, 由于火药燃烧, 在腔体内产生高能射流。该射流具备较强的压强, 从喷管口喷出^[3], 推动载体向前高速运动, 包裹发动机喷口的水向后方推开。与此同时, 强大的射流产生具有一定速度的

空气气泡^[2], 这种大气泡在水压的作用下不断地破裂, 演变为较大的多个气泡。然后, 这些较大的气泡在沿火箭喷口相反方向高速运动的过程中, 又不断地破裂, 产生更多的小气泡。在此过程中, 气泡破裂会产生复杂的噪声, 这些噪声的频率复杂多变。其中, 噪声强度与火箭发动机能量有关, 发动机振动也会带来低频方面的能量。图 1(a) 包括了火箭发动机开机前后的时域数据变换情况, 发动机开机前, 水下噪声平稳安静, 点火后, 噪声水平迅速抬升。图 1(b) 是对应的本地噪声和发动机开机后噪声的频谱。由图中可以看出, 水下火箭发动机噪声远远高于背景噪声, 且在整个频段均高出本地噪声约 40 dB。

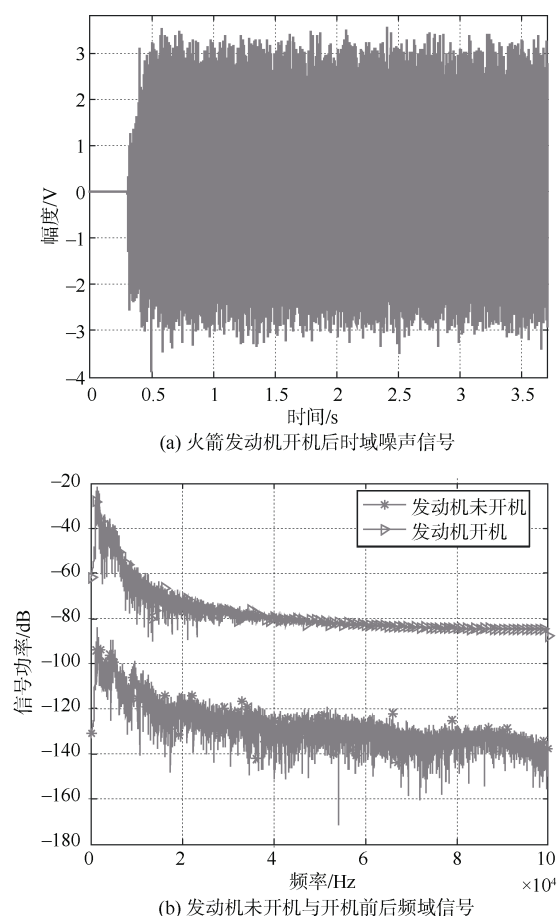


图1 火箭发动机开机前后噪声及频谱

Fig. 1 Noise and frequency spectrum of rocket engine before and after ignition

2 自适应消噪与滤波

自适应滤波器可以根据环境的改变, 使用自适

应算法来改变滤波器的参数和结构, 完成对输入信号的滤波功能。其特征就是可以在未知和复杂环境下有效工作, 并能够跟踪输入信号的时变特征。其中, 自适应消噪和滤波为自适应滤波器的 2 个主要应用方向。

自适应消噪流程如图 2 所示, 期望信号 $d(n)$ 为信号与噪声之和, 即 $d(n) = x(n) + N(n)$, 作为自适应消噪器的输入, 是与噪声相关的另一个噪声。当 $x(n)$ 和 $N(n)$ 不相关时, 利用噪声的相关性, 自适应消噪器自调参数, 以使得 $y(n)$ 成为 $N(n)$ 的最佳估计。此时 $e(n)$ 将逼近信号 $x(n)$, 噪声 $N(n)$ 得到一定程度的抵消。如果参考通道除检测到的噪声 $N'(n)$ 外, 还收到信号分量, 则自适应干扰抵消器输出中将包含信号分量, 从而使噪声抵消效果变坏^[4-5]。因此, 为获得良好的噪声抵消性能, 应使参考通道检测到的信号尽可能小, 在信号不可检测的噪声环境获取参考信号。

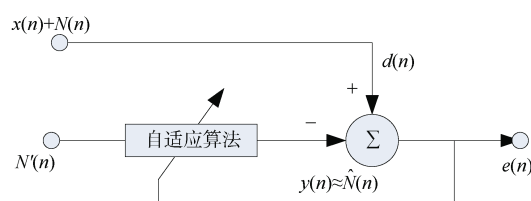


图2 自适应消噪流程图

Fig. 2 Flow chart of adaptive denoising

自适应滤波流程图如图 3 所示, 其中: $[x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L)]$ 为输入信号向量; $d(n)$ 为标准信号; $e(n)$ 为滤波后的误差; $y(n)$ 为最终的输出信号。

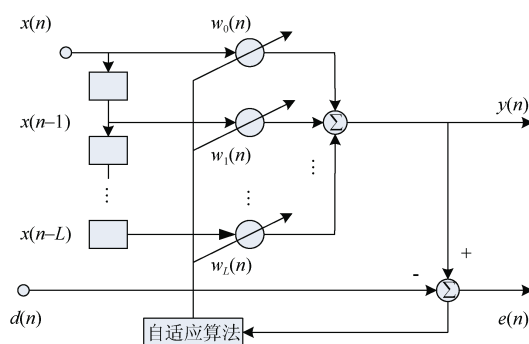


图3 自适应滤波流程图

Fig. 3 Flow chart of adaptive filtering

将上述参数统一用向量表示为

$$\mathbf{x} = [x(n) \ x(n-1) \ \cdots \ x(n-L)]^T$$

$$\mathbf{P} = E[d\mathbf{x}]$$

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^T]$$

$$\mathbf{w} = [w_0 \ w_1 \ \cdots \ w_L]^T$$

$$E[e^2] = E[d^2] + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} - 2\mathbf{P}^T \mathbf{w}$$

采用合适的自适应算法实时更新 $\mathbf{w}$ 权值, 使得 $E[e^2]$ 最小, 即可完成信号的自适应滤波^[6], 最终信号输出为

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}^* \mathbf{x}$$

火箭发动机噪声的处理过程中, 自适应消噪选择发动机实时噪声(不含脉冲信号)作为标准信号, 输入信号为采集到的实时噪声(包含有脉冲信号); 在自适应滤波时, 选择发射脉冲信号作为标准信号, 输入信号为自适应消噪后的输出信号。

3 正交解调与互相关处理

火箭发动机载体可以接收来自外部的脉冲信号。该脉冲信号是通过中频信号加载到基频信号上的, 可以通过正交解调的方法, 减少信号处理时间。之后, 再通过同类型的基频信号与目标信号进行互相关处理, 提取出脉冲信号的基频。

图4为正交解调原理流程图。

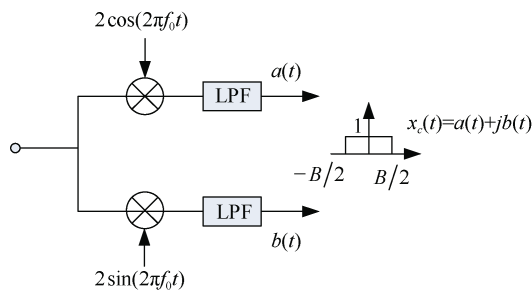


图4 正交解调原理流程图

Fig. 4 Principle flow chart of quadrature demodulation

正交解调处理是将实信号经过复调制, 然后对2个正交分量分别进行低通滤波处理后输出为

$$x_c(t) = [2x(t) \exp(j2\pi f_0 t)]_{LP}$$

上式中 $[\cdot]_{LP}$ 为低通滤波算子^[7]。

互相关接收的原理如图5所示。

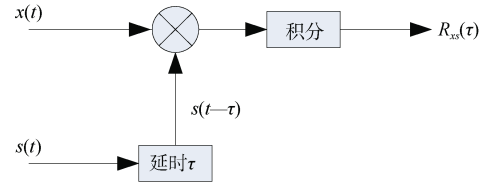


图5 互相关流程图

Fig. 5 Flow chart of cross correlation

图5中, $x(t)$ 为输入信号, 表示为

$$x(t) = s(t - t_r) + n(t)$$

式中: $s(t - t_r)$ 为相对于发射起点, 即为接收到的脉冲信号; $t_r = R/c$ 为信号经历的时间; $n(t)$ 为平稳白噪声过程; $s(t)$ 为参考信号, 通常取为发射信号; τ 为参考信号延迟; 相关接收输出为互相关函数, 即

$$R_{xs}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} [s(t - t_r) + n(t)]s(t - \tau)dt = R_{ss}(\tau - t_r) + R_{ns}(\tau)$$

式中, R_{ss} 和 R_{ns} 分别为信号的自相关函数和信号与噪声的互相关函数。当 $\tau = t_r$ 时, $R_{xs}(\tau)$ 取得最大值^[8]。

4 火箭发动机噪声背景脉冲信号检测及试验验证

4.1 试验方法

火箭发动机噪声背景脉冲信号检测的传统常规处理方法是: 将含有脉冲信号的发动机强噪声信号通过带通滤波器, 再将信号进行正交解调和互相关方法处理。

本文采用自适应处理方法对火箭发动机噪声背景脉冲信号进行检测, 具体操作如下:

1) 将含有脉冲信号的发动机强噪声信号利用自适应消噪算法进行处理。其中, 消噪选取的噪声信号来自于火箭发动机开机后自身产生的强噪声, 参考信号为发动机开机前的安静水纹噪声。

2) 将消噪后的信号利用自适应滤波进行处理。

3) 最后, 将脉冲信号进行正交解调和互相关处理。当自适应滤波和信号解调互相关时, 脉冲信号作为参考输入信号。

对火箭发动机噪声背景下脉冲信号进行检测时, 传统常规方法与本文自适应处理方法流程对比如图6所示。

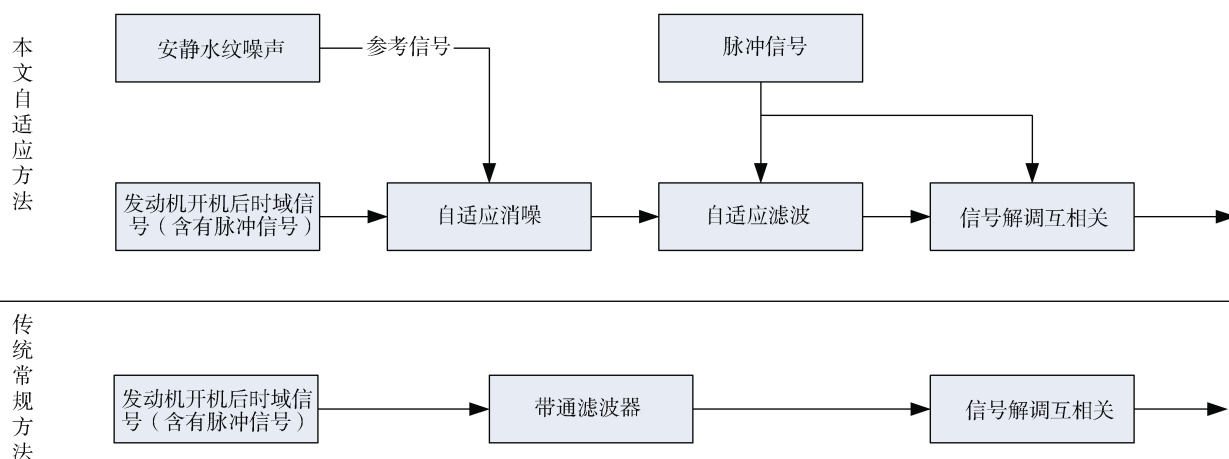


图 6 自适应方法与传统常规方法流程对比图

Fig. 6 Comparative flow chart of adaptive method and traditional conventional method

4.2 试验过程

试验在湖上进行, 水下 20 m 处吊放带有火箭发动机的柱状载体, 头部装有接收水听器, 发射换能器距离接收水听器 10 m, 试验现场布置如图 7 所示。发动机开机后, 每间隔 1 s 发射时宽 5 ms、频率为 15 kHz 的脉冲信号。火箭发动机工作 5 s 左右, 采集到的时域数据见图 8。可以看出, 由于发动机强噪声原因, 噪声迅速增大。经时序分析, 其中有 2 个脉冲信号落在了发动机强噪声背景中, 发动机关闭后才能看到后续的脉冲信号, 但周围混灭的气泡噪声仍然有比较强的背景噪声。

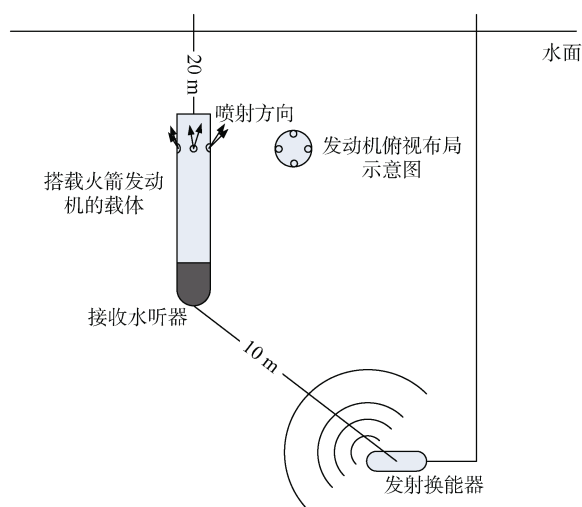


图 7 试验布置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of test layout

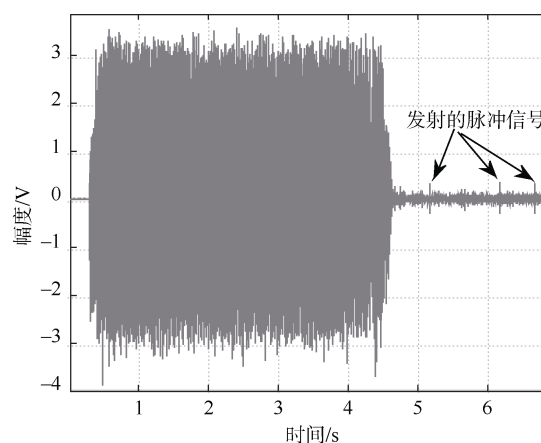
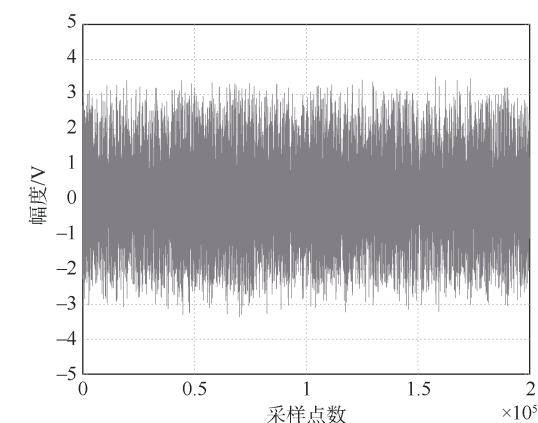


图 8 发动机时域噪声

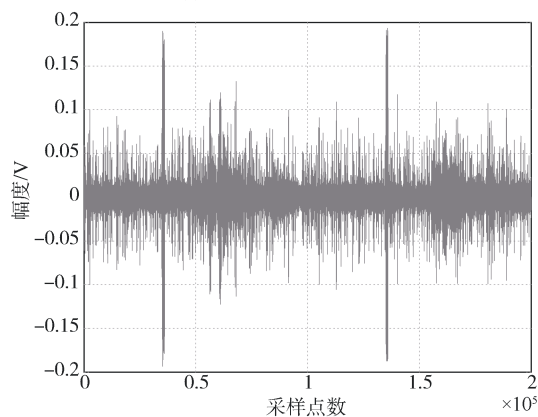
Fig. 8 Engine time domain noise

4.3 结果验证与分析

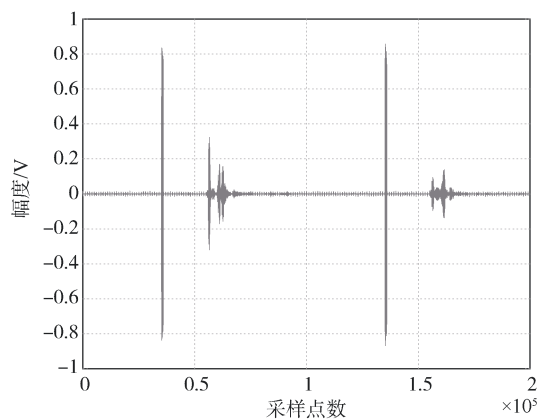
提取含有脉冲信号的火箭发动机强背景噪声信号进行分析, 图 9 (a) 为火箭发动机开机后含有脉冲信号的时域信号, 9 (b) 图为通过自适应消噪后的输出, 9 (c) 是经过自适应滤波后的信号。从图 9 (a) 明显看出发动机强背景噪声完全淹没了脉冲信号。当采用自适应消噪后, 可以清晰地看到脉冲信号, 并且本底噪声降低了 34 倍, 2 组脉冲信号的信噪比分别为 18.9 dB 和 19.0 dB。信号再进行自适应滤波后, 本底噪声有效值降到 0.07, 2 组脉冲信号的幅度有效值分别放大了 22.1 倍和 18.4 倍。结果表明: 通过采用自适应消噪和自适应滤波 2 种方法, 可以显著提高信号的强度、降低强背景噪声干扰。



(a) 发动机开机后的时域信号



(b) 自适应降噪后的时域信号

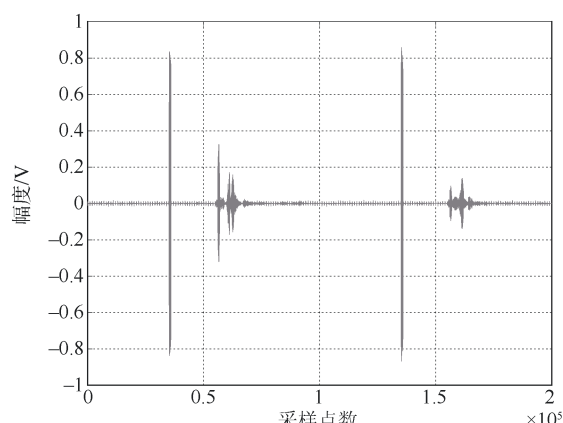


(c) 自适应滤波后的时域信号

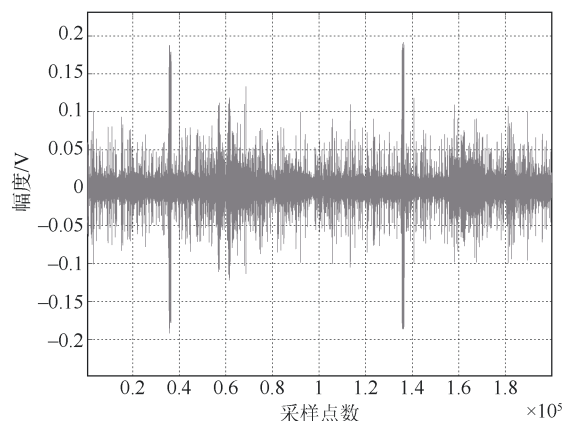
图9 发动机开机后自适应降噪和滤波

Fig. 9 Adaptive denoising and filtering after engine ignition

为了进一步对比自适应降噪和滤波方法与传统常规方法的处理效果,选取发动机开机后含有脉冲的时域信号,分别经过自适应降噪和滤波、带通滤波器。其中,图10(a)是发动机强背景噪声经过自适应降噪和滤波处理后的信号,图10(b)是发动机强背景噪声经过带通滤波器处理后的结果。



(a) 自适应降噪滤波后的时域信号



(b) 传统常规滤波后的时域信号

图10 发动机强背景噪声不同处理方法对比

Fig. 10 Comparison of different processing methods for engine strong background noise

使用了带通滤波的方法在强背景发动机噪声情况下,脉冲信号清晰可见,但时域信号夹杂了复杂的干扰,信噪比低。相比于传统常规的滤波方法,使用自适应降噪和滤波方法处理的脉冲信号,噪声得到极大的抑制,同时脉冲信号得到了放大。对比2种工况环境下2组脉冲信号的信噪比,见表1。计算结果表明:经过自适应降噪和自适应滤波的信号相比于带通滤波器处理的结果,信噪比分别提高了34 dB和33.7 dB。

表1 2种工况条件下的脉冲信噪比

Table 1 Pulse signal-to-noise ratio under 2 working conditions		
发动机噪声	1号脉冲 SNR/dB	2号脉冲 SNR/dB
自适应处理	49.7	49.0
带通滤波器处理	15.7	15.3

依据图6中本文自适应方法与传统常规2种方

法对火箭发动机脉冲信号进行检测的流程,对自适应处理和常规滤波后的2种工况时域信号进行正交解调和互相关处理,得到其目标信号的脉冲检测结果,如图11所示。图中表明:经过自适应消噪和滤波的脉冲信号本底噪声在 -70 dB ,经过带通滤波的信号本底噪声在 -30 dB ,在同等情况下,使用自适应处理方法,脉冲信号检测能力提高了 40 dB 。

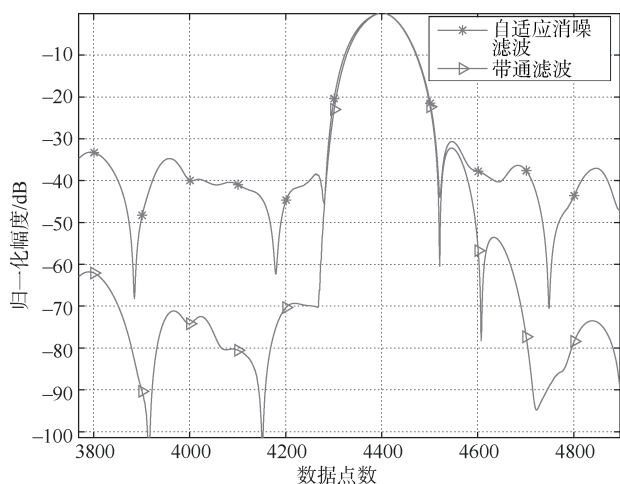


图11 脉冲信号检测结果对比

Fig. 11 Comparison of pulse signal detection results

5 结束语

火箭发动机开机后,噪声信号快速增大,从频率角度可以看出整个噪声频带比发动机开机前平均高出 40 dB 。

淹没在火箭发动机高强度背景噪声中的脉冲

信号通过自适应消噪和自适应滤波级联的方式降低了背景噪声的幅度,提高了脉冲信号的强度。与传统常规带通滤波器处理方法相比,自适应方法可以提高约 30 dB 信噪比。

通过后期信号的正交解调和互相关处理,在降低运算量的同时,仍可以实现提取出包含脉冲信号的有效包络信息,达到了火箭发动机强背景噪声下脉冲信号更优检测的目的,为水下火箭发动机的应用提供了新的思路和可能。

参考文献

- [1] 唐云龙,李世鹏,刘筑,等.水下火箭水平射流初期特征研究[J].物理学报,2015,64(23):193-205.
- [2] 张恒.水下火箭发动机噪声测试与分析[J].水雷战与舰船防护,2016,24(1):28-31.
- [3] 邹延兵,卓长飞,封锋.火箭发动机水下启动过程流场数值模拟研究[J].弹道学报,2016,28(4):30-35,41.
- [4] 张军芳.船舶行驶过程机舱自适应消噪算法研究[J].舰船科学技术,2020,42(12):31-33.
- [5] 李丽.自适应语音消噪算法的研究与应用[J].计算机工程与科学,2014,36(9):1835-1838.
- [6] 张晓亚,刘建勋,倪元相,等.基于反正切函数的LMS自适应滤波算法及应用[J].弹箭与制导学报,2022,42(1):114-117.
- [7] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [8] 万倪,钱相臣,闫勇.多相流互相关测速算法综述[J].电子测量与仪器学报,2022,36(5):1-11.

(责任编辑:曹晓霖)