第 21 卷　第 2 期
2023 年 2 月

太赫兹科学与电子信息学报
Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

Vol.21，No.2
Feb.，2023

文章编号：2095-4980(2023)02-0208-08

水下脉冲激光探测后向散射噪声自适应滤波算法

钟　昆，苏　伟*，彭　波，黄莎玲，刘松林

(中国工程物理研究院 电子工程研究所，四川 绵阳 621999)

摘　要： 在信号处理中抑制水体传输中带来的后向散射噪声，是水下脉冲激光探测的关键技术之一。基于同一水域相邻2次探测后向散射的相关性，提出一种改进的归一化最小均方(NLMS)自适应滤波算法。根据后向散射的强度和滤波后目标信号大小控制步长因子，使其对不同距离、不同强度的目标信号均能取得良好的滤波效果。通过计算机仿真和水池实验对算法进行验证，结果表明，对不同距离、不同反射强度的目标，该滤波器算法均能以较低的阶数有效滤除后向散射噪声，保留目标回波信号。与现有的自适应滤波方法相比，大大减少了滤波所需的计算资源，在水下脉冲激光探测系统上具有一定的应用价值。

关键词： 水下探测；后向散射；自适应滤波；归一化最小均方算法

中图分类号： O436；TN911.7　　**文献标志码：** A　　**doi：** 10.11805/TKYDA2020461

An adaptive filter algorithm of underwater pulse laser detection based on backscattering correlative characters

ZHONG Kun，SU Wei*，PENG Bo，HUANG Shaling，LIU Songlin

(Institute of Electronic Engineering，China Academy of Engineering Physics，Mianyang Sichuan 621999，China)

Abstract: It is one of the key technologies of underwater pulsed laser detection to suppress the backscattered noise caused by water transmission in signal processing. Based on the correlation between two adjacent detections of backscattering in the same water area, an improved Normal Least Mean Square (NLMS) adaptive filtering algorithm is proposed. The step factor is controlled according to the intensity of backscattering and the size of the filtered target signal to make it achieve good filtering effect for target signals at different distances and intensities. The algorithm is verified by simulation and swimming pool experiment. The results show that the filter algorithm can effectively filter the backscattered noise with a lower order for targets with different reflection strengths at different distances, and retain the target echo signal. Compared with the existing adaptive filtering method, it greatly reduces the computing resources required for filtering, and has certain application value in underwater pulsed laser detection systems.

Keywords: underwater detection；backscattering；adaptive filter；Normal Least Mean Square

激光具有单色性强、亮度高、方向性好等特点，而水对处于蓝绿波段的光吸收系数最小，因此蓝绿激光在水下目标探测识别、水下无线通信等领域得到广泛应用[1-7]。但水体后向散射将引起上述系统的工作性能下降，为抑制水体后向散射，在水下探测系统中，经常采用时间窗距离选通方式[8-11]或窄视场方式[12-13]屏蔽水体后向散射对探测造成的影响。但在非合作目标的单脉冲探测中，上述2种方式会带来较大的近程盲区，因而在水下脉冲测距系统中，仍须将该近程盲区纳入探测范围，并通过滤波消除后向散射对信号的影响。如果对单脉冲探测进行对消滤波，由于放大电路的不确定性，后向散射信号将残留较大的噪声，当目标信号较弱时，甚至比目标信号更加强烈。因此，程藻等发展了可变遗忘因子递推最小二乘(Variable Forgetting Factor Recursive Least Square，VFF-RLS)自适应滤波算法[14]，该算法可对后向散射信号进行有效滤波，但滤波器阶数高达400~500阶，计算开

收稿日期： 2020-09-15；**修回日期：** 2020-12-24

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(61505184)

***通信作者：** 苏伟　email:john4546@126.com

销较大；谭亚运提出了可变遗忘因子最小均方（Variable Forgetting Factor Least Mean Square, VFF–LMS）自适应滤波算法[15]，只需要8阶滤波器就可以取得较好的滤波效果，但其滤波器结构对近距离强信号会有明显的抑制作用，步长因子迭代参数也需要随信号变化测试调整。

本文基于后向散射的相关分析，去除信号采集过程产生的随机抖动，并通过后向散射峰值对比得到一个接近维纳解的初值，提出一种优化滤波器初值W的归一化最小均方(Optimized Initial W Normal Least Mean Square，OIW–NLMS)自适应滤波算法。该算法可通过低阶滤波器对不同距离的目标回波信号进行后向散射信号噪声滤波，仿真信号滤波和水下实验信号滤波，验证了该滤波方法可以提取不同材质目标在不同探测距离下的回波信号，对动态变化水体环境具有一定的适应能力。

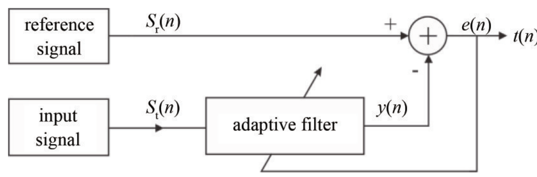

Fig.1 Schematic of adaptive filter in signal enhancing

图1 信号增强中自适应滤波器原理示意图

1　滤波器算法设计

1.1 自适应滤波原理

用于信号增强问题的自适应滤波器工作流程如图1所示。$S_r(n)$为未探测到目标时的后向散射信号，作为参考信号；$S_t(n)=S_{r1}(n)+t(n)$表示探测到目标时的后向散射信号和目标回波信号混合的输入信号；$y(n)$为自适应滤波后的估计信号；$e(n)$为$y(n)$与$S_r(n)$间的误差信号。不考虑测量噪声，同一水域相邻2次测量中$S_r(n)$和$S_{r1}(n)$相关，若假设$t(n)$和$S_r(n)$无关，则当取得最小均方误差(Minimum Mean Square Error，MMSE)时，滤波后误差信号$e(n)$最逼近期望的$t(n)$。

$S_t(n)$和$S_r(n)$的总长度均为N，滤波器w抽头数为M：$\boldsymbol{w}(k)=\left[w(k),w(k-1),\cdots,w(k-M+1)\right]$。则滤波器的迭代过程如式(1)所示：

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}_t(k)=\left[S_t(k),S_t(k-1),\cdots,S_t(k-M+1)\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{S}_t(k)\\ \boldsymbol{e}(k)=\boldsymbol{S}_r(k)-\boldsymbol{y}(k)\\ \boldsymbol{w}(k+1)=\boldsymbol{w}(k)+2\mu\boldsymbol{S}_t(k)\boldsymbol{e}(k)\end{cases}\tag{1}$$

式中μ为步长因子。

1.2 OIW–NLMS滤波器算法设计

LMSE定义为[16]：

$$\xi(k)=E\left[\boldsymbol{e}^2(k)\right]=E\left[\boldsymbol{S}_r{}^2(k)-2\boldsymbol{S}_r(k)\boldsymbol{y}(k)+\boldsymbol{y}^2(k)\right]\tag{2}$$

在信号确定的情况下，可以求取滤波器的维纳解。代入$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{S}_t(k)$，则

$$\begin{aligned}\xi(k)=&E\left[\boldsymbol{S}_r{}^2(k)\right]-2\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(k)E\left[\boldsymbol{S}_r(k)\boldsymbol{S}_t(k)\right]+\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}E\left[\boldsymbol{S}_t(k)\boldsymbol{S}_t{}^{\mathrm{T}}(k)\right]\boldsymbol{w}(k)=\\ &E\left[\boldsymbol{S}_r{}^2(k)\right]-2\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{p}(k)+\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}\boldsymbol{w}(k)\end{aligned}\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{p}(k)=E\left[\boldsymbol{S}_r(k)\boldsymbol{S}_t(k)\right]$为期望信号与输入信号之间的互相关向量；$\boldsymbol{R}=E\left[\boldsymbol{S}_t(k)\boldsymbol{S}_t{}^{\mathrm{T}}(k)\right]$为输入信号的自相关矩阵。$\boldsymbol{R}$为非奇异矩阵时，若MSE关于抽头系数向量的梯度向量等于$\boldsymbol{0}$，则得到最优抽头系数$\boldsymbol{w}_0=\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{p}(k)$。当输入信号与参考信号的后向散射信号部分完全相同时，此时若探测范围内不含目标，忽略测量噪声，任意阶的$\xi(k)=0$；而含有目标信号$t(n)$时，$\boldsymbol{S}_t(k)=\boldsymbol{S}_{r1}(k)+\boldsymbol{t}(k)$，若信号与后向散射信号不相关，则$\xi(k)=E\left[\boldsymbol{t}^2(k)\right]$，平移输入信号与参考信号取得最大的相关性，因此最优阶数为1，维纳解为$\boldsymbol{w}_{\mathrm{opt}}=[1]^{\mathrm{T}}$。由于不考虑测量噪声，任意阶的MSE最小值均为0，任意M阶滤波器的最优解为$\boldsymbol{w}_{\mathrm{o}M}=[1,0,0,\cdots,0]^{\mathrm{T}}$。当仅存在放大电路带来的幅值差异时，若光电倍增管(Photoelectron Multiplier Tube，PMT)对参考信号采样时的倍增电压为对含目标信号采样时的α倍，则维纳解变为$[\alpha]^{\mathrm{T}}$，任意M阶滤波器的最优解为$\boldsymbol{w}_{\mathrm{o}M1}=[\alpha,0,0,\cdots,0]^{\mathrm{T}}$。

信号噪声由后向散射噪声S_r和测量噪声S_d两部分组成，$S_n=S_r+S_d$。任意的2次测量中，测量噪声为零均值的广义平稳随机过程，后向散射信号则具有很强的相关性。在单次测量的时间范围内，后向散射噪声的能量远大于测量噪声。

考虑测量噪声，$\boldsymbol{p}(k)$保持不变，$\boldsymbol{R}_1=E\left[\boldsymbol{S}_t(k)\boldsymbol{S}_t{}^{\mathrm{T}}(k)+\sigma^2_{\boldsymbol{x}(k)}\right]$，最优解将引入输入误差，在后向散射信号刚进入

接收视场时，其信号较弱，测量噪声可与之比拟，$\boldsymbol{w}(k)$迭代解第1个权系数可能偏离α，但此时$\boldsymbol{e}(k)$处于测量噪声水平，与参考信号对消后不会引起滤波信号的明显起伏。随着后向散射信号强度的提升，$\boldsymbol{w}(k)$迭代解第1个权系数的值迅速逼近α，$S_{\mathrm{t}}(n)$中的$S_{\mathrm{r1}}(n)$部分迅速接近参考信号$S_{\mathrm{r}}(n)$，取得良好的抵消效果。

当不存在后向散射信号时，2次探测的测量噪声为2个零均值的不相关信号，这2个信号是正交的，其最优系数$\boldsymbol{w}_{0\mathrm{n}}=\boldsymbol{0}$。则当滤波系数为$\boldsymbol{w}_{0M1}$时，方差为$\left(\sqrt{\alpha+1}\right)\sigma$，输出的平均噪声强度为测量噪声的$\sqrt{\alpha+1}$倍。

当自适应滤波器MSE为最小时，实际上逼近的是滤波器维纳解，目的是尽量减轻水体后向散射影响，故对一个有确定结构的信号，可以计算其维纳解。当测量噪声远小于水体后向散射时，同一水域的后向散射信号几乎一致，用后向散射信号的维纳解作为滤波结构初值，可避免选择$\boldsymbol{0}$初值给滤波带来的不利影响。

由于电路时钟等因素影响，每次接收的后向散射信号触发时刻并不一致，这将引起整体的提前或延迟。为了在2次测量的后向散射信号上产生最大的互相关，必须对信号进行一定的平移处理。根据参考信号的上升沿，在2次测量信号的头部截取相同长度进行卷积相关运算，相关运算的峰值坐标减去接收信号的长度，即为2次测量的时间偏差。

$$l=\mathrm{peak\_position}\left\langle \boldsymbol{S}_{\mathrm{r\_rise}},c*\boldsymbol{S}_{\mathrm{t\_rise}}\right\rangle-\mathrm{length}\left(\boldsymbol{S}_{\mathrm{t\_rise}}\right) \tag{4}$$

若第i次探测未发现目标，则将此次探测信号作为第i+1次探测的参考信号，以适应水体散射特性的连续变化。当脉冲展宽时，信号展宽导致后向散射信号的下降沿出现延迟，平移对齐信号上升沿后，低阶的滤波器在后向散射噪声信号下降沿位置不能较好地滤波，需要扩充到一定的阶数。对后向散射信号峰值进行比较，比值作为起始的滤波器初值，$\boldsymbol{w}_{oM1}=\left[a,0,0,\cdots,0\right]^{\mathrm{T}}$。

为使接收信号中强后向散射信号部分快速迭代，迅速逼近参考信号，非强后向散射信号部分迭代缓变，保留可能的目标信号，在强后向散射信号部分需较大的步长因子，其他区域则需较小的步长因子。在NLMS算法中，使用输入信号能量来约束变步长因子，用于调节滤波器系数，其公式为$\mu_k=2/\left\|\boldsymbol{S}_{\mathrm{t}}(k)\right\|^2$。白噪声阶段输入能量很小，步长因子较大，在后向散射峰值位置，滤波器取得最小的步长因子$\mu_{k,\min}$。为控制白噪声段的收敛速度，引入固定的步长收敛因子$\mu_{\mathrm{n}}=2/\left\|\boldsymbol{S}_{\mathrm{t}}\right\|^2$，取后向散射信号部分的当前幅值和其最大值的比值调节步长，令$\tilde{\mu}(k)=\mu_{\mathrm{n}}\left|\boldsymbol{S}_r(k)\right|/\max\left|\boldsymbol{S}_r(k)\right|$，保证滤波器系数在$\boldsymbol{w}_{oM1}=\left[\alpha,0,0,\cdots,0\right]^{\mathrm{T}}$附近变化，在接收信号的后向散射信号部分取得较好的滤波效果。

当目标信号较弱时，它与测量噪声和接收信号的后向散射信号部分相关性都很弱，因而能较好地保留下来。但当强反射目标出现在近距离，目标信号的形状与接收信号后向散射信号部分具有相似性，此时$\boldsymbol{e}(k)$较大，步长因子也较大，这将导致强信号被滤波算法滤除掉。由于探测中并不具备非合作目标距离信息的先验知识，为了对近距离的强反射目标仍保留有效提取目标信号的能力，增加1个步长因子判别阈值。若误差信号与接收信号的后向散射信号部分比值大于该阈值，步长因子置0，滤波器保持上一状态。通过该设置，近距离的强反射目标信号可以保留，而接收信号中的后向散射信号部分仍能得到良好滤除。

最终的滤波器输入信号和滤波器的初值为：

$$\begin{cases}\alpha=\max\left[\boldsymbol{S}_{\mathrm{r}}(k)\right]/\max\left[\boldsymbol{S}_{\mathrm{t}}(k)\right]\\ \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(0)=\left[\alpha,0,\cdots,0\right]^{\mathrm{T}}\\ l=\mathrm{peak\_position}\left\langle \boldsymbol{S}_{\mathrm{r\_rise}},c*\boldsymbol{S}_{\mathrm{t\_rise}}\right\rangle-\mathrm{length}\left(\boldsymbol{S}_{\mathrm{t\_rise}}\right)\\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{t}}'(k)=\boldsymbol{S}_{\mathrm{t}}(k-l)\end{cases} \tag{5}$$

滤波器迭代公式为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}_{\mathrm{t}}'(k)=\left[S_{\mathrm{t}}'(k),S_{\mathrm{t}}'(k-1),\cdots,S_{\mathrm{t}}'(k-M+1)\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{S}_t'(k)\\ \boldsymbol{e}(k)=\boldsymbol{S}_{\mathrm{r}}(k)-\boldsymbol{y}(k)\\ \tilde{\mu}(k)=\begin{cases}\mu_{\mathrm{n}}\left|\boldsymbol{S}_r(k)\right|/\max\left|\boldsymbol{S}_r(k)\right| & \text{when } \left|\boldsymbol{e}(k)/\max\left|\boldsymbol{S}_{\mathrm{r}}\right|\right|<0.5\\ 0 & \text{other conditions}\end{cases}\\ \boldsymbol{w}(k+1)=\boldsymbol{w}(k)+2\tilde{\mu}(k)\boldsymbol{S}_{\mathrm{t}}'(k)\boldsymbol{e}(k)\end{cases} \tag{6}$$

2　仿真与实验

2.1　仿真信号滤波

目标信号采用水下激光雷达方程仿真，根据文献[17]给出的方法，仿真不同距离的后向散射强度。考虑测量噪声后，信号如式(7)所示：

$$S_{\mathrm{r}}(t)=\frac{P_0\exp\left(-2tc_{\mathrm{w}}/AL\right)}{\left(\left(t+\tau\right)/K_1\right)^{-2}+\left(\left(t+\tau\right)/K_2\right)}+S_{\mathrm{d}},\quad t>t_0 \tag{7}$$

式中：c_{w}为水中的光速；AL为水体的衰减长度(Attenuation Length)；准直的光束截面与接收视场交叠部分面积的增长与光束传播距离的关系为平方反比，增长系数为$1/K_1^2$；远场水体后向散射对接收镜头的张角与光束传播距离呈反比，增长系数为$1/K_2$；S_{d}为测量噪声；τ为器件延迟引起的探测时间随机波动。

当存在目标时，接收信号一般存在2个峰：后向散射信号峰和目标回波信号峰。在同一水域，后向散射信号相对稳定，而信号大小因目标距离变化，其强度会发生较大变化。若仿真中接收倍增电压相同，不考虑饱和带来的畸变，16 m外的目标和4.5 m外的目标，在探测中接收到的信号包络如图2所示。

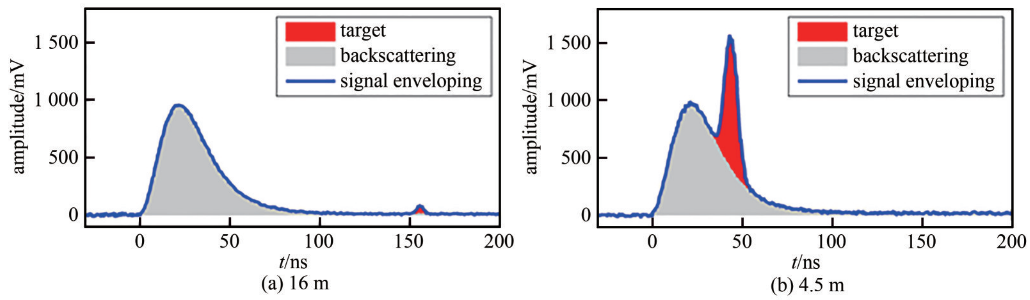

Fig.2 Received echo signals when target at different distances

图2 目标位于不同距离的接收回波信号

仿真4种场景：a) 无目标时的后向散射信号，并作为参考信号；b) 同一水域，具有相同后向散射信号部分形状的远程目标回波信号；c) 邻近水域，后向散射信号部分具有一定展宽变化的远程目标回波信号；d) 邻近水域，后向散射信号部分具有一定展宽变化的近程目标回波信号，该场景中PMT管倍增电压U_{t}为参考场景倍增电压U_{r}的1/2。4种场景接收信号如图3所示。

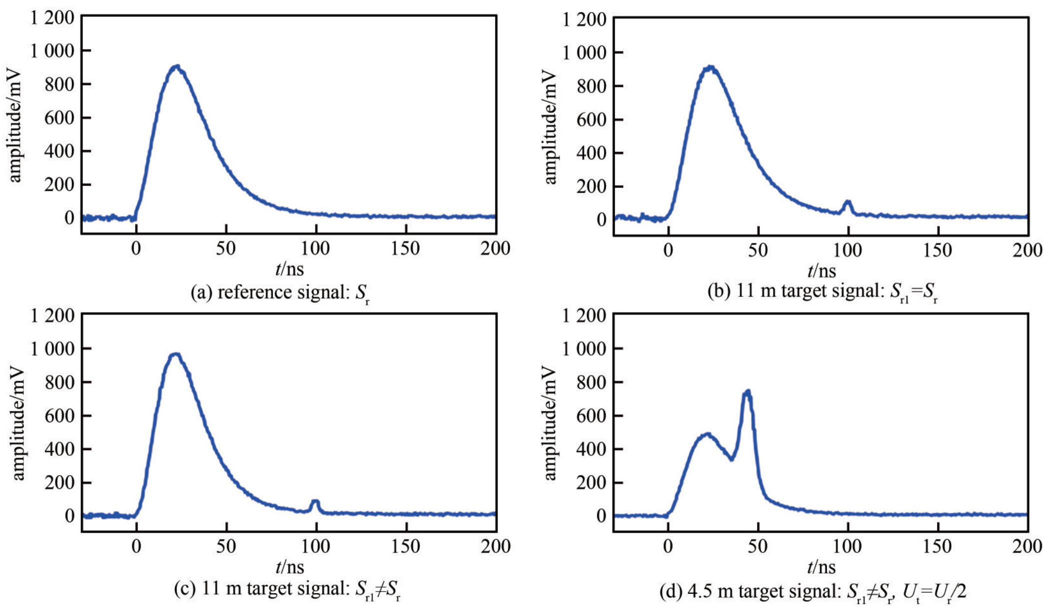

Fig.3 Simulation signals for algorithm evaluation

图3 评估算法的仿真信号

由于实验验证使用的PMT在信号较强时可能发生饱和，造成波形失真，在测量中需要调低倍增电压。仿真中为了模拟这一情况，在近距离目标的强回波信号仿真中，模拟倍增电压为弱信号的1/2，因此其后向散射信号部分的峰值强度为弱信号的一半。仿真中，K_1取值4.5，K_2取值1 500。S_d为零均值，方差0.01的高斯随机噪声。t采用0.4 ns的采样间隔，与实验保持一致。τ取值范围[−2,2] ns。图3(a)~3(b)中AL为8 m，图3(c)~3(d)中AL为7 m。为模拟实验中PMT放大电压的调整，图3(d)中含目标回波信号的倍增电压的仿真值只设置为图3(a)~3(c)仿真值的一半。。

以无目标的仿真回波信号作为参考信号，对含目标的仿真回波信号进行自适应滤波。比较NLMS,VFF–LMS, OIW–NLMS 3种算法生成滤波器的滤波效果。其中，NLMS算法和VFF–LMS算法均采用16阶滤波器，OIW–NLMS算法采用4阶滤波器，3种算法生成滤波器的滤波结果如图4所示。

常规的NLMS滤波器在后向散射信号上升沿起始阶段滤波效果较差；VFF–LMS滤波器对远距离弱信号的检测效果较好，但是对近距离强信号无法有效滤波；本文提出的OIW–NLMS算法则能有效地对不同距离的强弱信号进行检测，对后向散射信号展宽也有一定的适应能力。

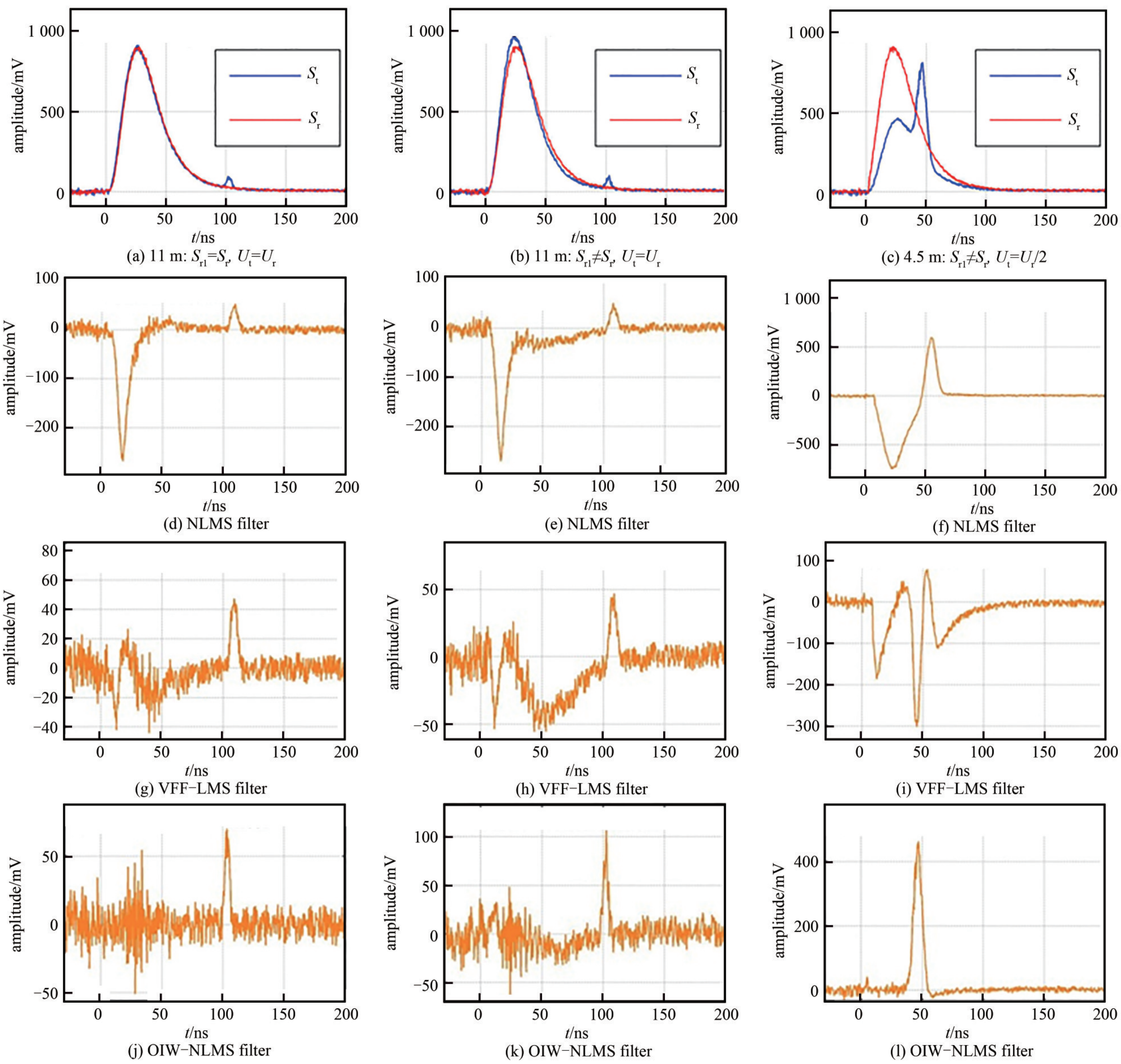

Fig.4 Filter results of simulation signals

图4 仿真信号的滤波结果

2.2 实验信号滤波

为验证算法在现实中的实际效用，实验装置和现场试验照片如图 5 所示。发射和接收组件放置在装有配重的玻璃缸中，缸体浸入水下的深度约 0.5 m，发射和接收组件之间使用隔板进行隔离，避免玻璃缸内部反射对信号探测产生干扰。目标分别选择未涂漆铝板和涂漆铝板，二者反射率存在显著差异[17−19]。

实验中激光发射脉冲的半峰全宽约 15 ns，单脉冲能量 5 μJ，光束直径 1 mm，发散角 2 mrad。光束发射后由分光镜分为 2 束，1 束进入光电二极管(PIN)作为示波器的触发信号，1 束进入水池照射目标，产生目标回波信号。经过接收透镜后，使用 PMT 对目标回波进行探测，PMT 型号为滨松 R9880U；接收信号通过示波器进行记录，示波器采样间隔 0.4 ns；最后将回波信号输入计算机进行滤波处理。回波数据处理中，OIW−NLMS 滤波器选为 4 阶。

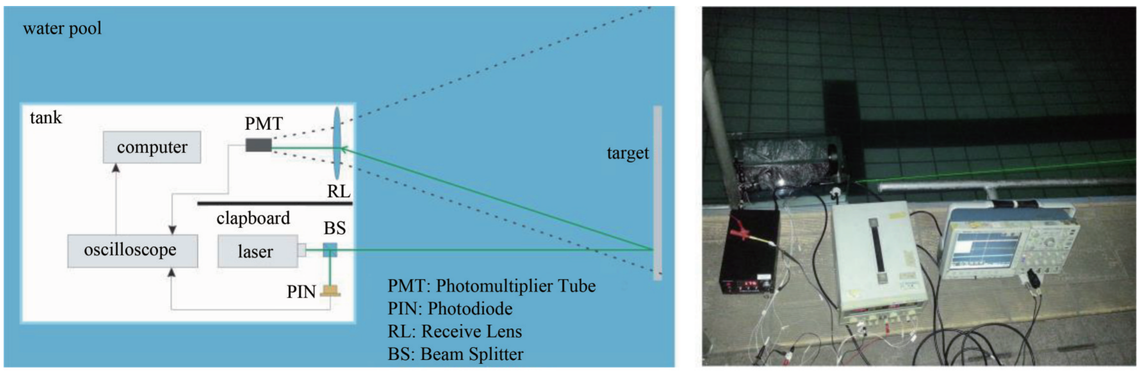

Fig.5 Experimental setup for underwater pulse laser detection

图 5 水下脉冲激光探测实验装置图

将未涂漆铝板作为目标，6 m,8 m,10 m 距离处的 PMT 接收信号及其 OIW−LMS 算法滤波处理结果如图 6 所示。图 6(a)~6(c)中采用了同一参考信号，由于 6 m,8 m 处目标回波信号较大，PMT 倍增电压低于参考信号，10 m 处目标的 PMT 倍增电压等于参考信号。图 6(d)~6(f)为滤波结果。

将涂军绿漆铝板作为目标，4 m,5 m,6 m 距离处 PMT 接收信号及其 OIW−LMS 算法滤波处理结果如图 7 所示。图 7(a)~7(c)中使用同一参考信号，由于涂漆铝板反射信号强度较小，3 个距离目标的 PMT 倍增电压均等于参考信号倍增电压。图 7(d)~7(f)为滤波结果。

未涂漆铝板的反射率高，在 6 m,8 m 距离处产生了非常强烈的回波信号，在 10 m 处由于水体衰减，回波变得比较微弱。但无论是强信号还是弱信号，算法均取得良好的滤波效果，有效地对后向散射信号进行了抵消。涂漆铝板的反射率较低，在强后向散射区也只能产生微弱的回波信号，OIW−LMS 算法在滤除后向散射信号的同时，对强后向散射区的微弱信号仍能有效保留。算法几乎不受目标反射率影响，对后向散射信号主要时间区间内外的强弱目标回波信号均有良好的滤波提取效果。

2.3 讨论

为了量化算法滤波效果，引用文献[7]的信噪比公式对滤波前后的信噪比进行计算。

$$R_{\mathrm{SN}}=10\lg\left\{\frac{\dfrac{1}{\Delta t_{\mathrm{T}}}\int\left|S_{\mathrm{T}}(t)\right|^{2}\mathrm{d}t}{\dfrac{1}{\Delta t_{\mathrm{B}}}\int\left[\left|S_{\mathrm{B}}(t)\right|^{2}\right]\mathrm{d}t+\dfrac{1}{\Delta t_{\mathrm{d}}}\int\left[\left|S_{\mathrm{d}}(t)\right|^{2}\right]\mathrm{d}t}\right\} \tag{8}$$

式中：$\Delta t_{\mathrm{T}},\Delta t_{\mathrm{B}},\Delta t_{\mathrm{d}}$ 分别为目标、后向散射噪声、背景探测噪声的相关响应持续时间；$S_{\mathrm{T}}(t),S_{\mathrm{B}}(t),S_{\mathrm{d}}(t)$ 分别为接收波形中的目标回波信号部分、后向散射信号部分、背景探测噪声信号部分。

不同铝板目标回波信号滤波前后信噪比如图 8 所示。

滤波后，目标信号的信噪比提升接近 30 dB。由于在某些对抗场景中，要求系统对目标信号快速响应，因此缩短算法运算时间非常重要。M 阶 LMS 算法的每次迭代需要 $2M+1$ 次乘法，$2M$ 次加法。本文算法仅在 $\mu(k)$ 更新处增加了 1 次乘法和除法运算。在水体散射性质均一的条件下，算法最低可简化到 4 阶。

此外，步长因子仅依赖于参考信号后向散射信号部分的强度变化，避免了面对不同目标时的参数调整，对

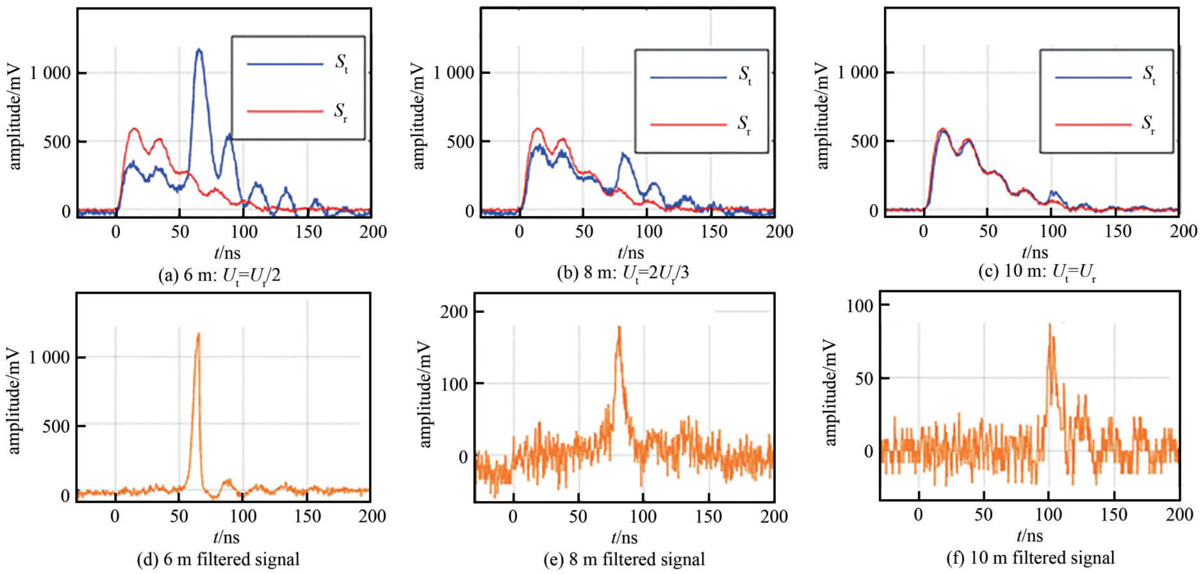

Fig.6 Filter results for aluminum board

图 6 对未涂漆铝板的滤波结果

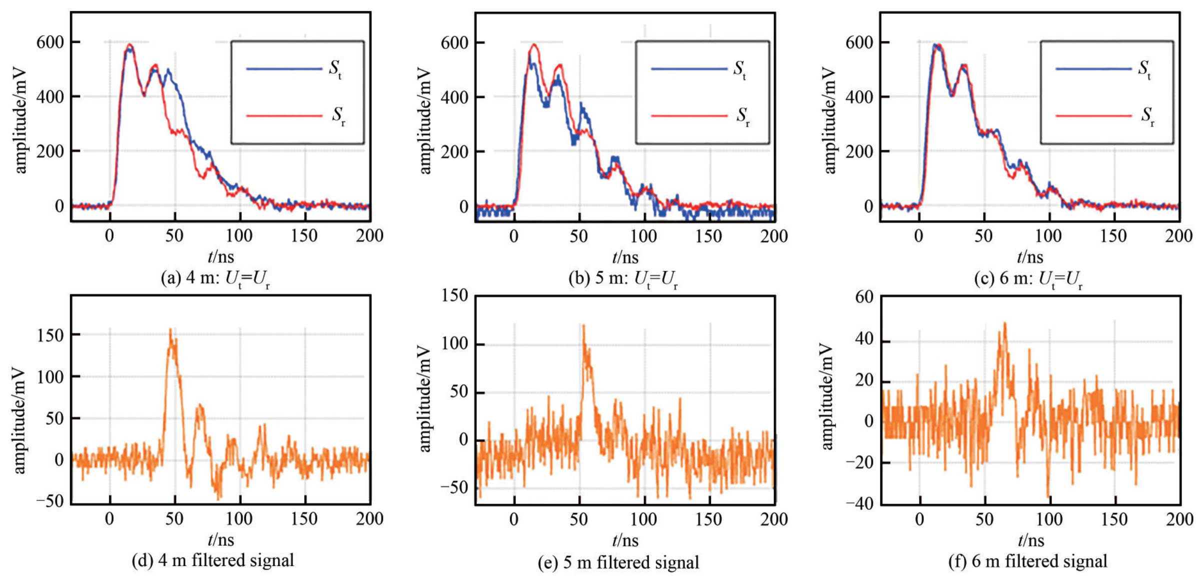

Fig.7 Filter results for coating aluminum board

图 7 对涂漆金属板的滤波结果

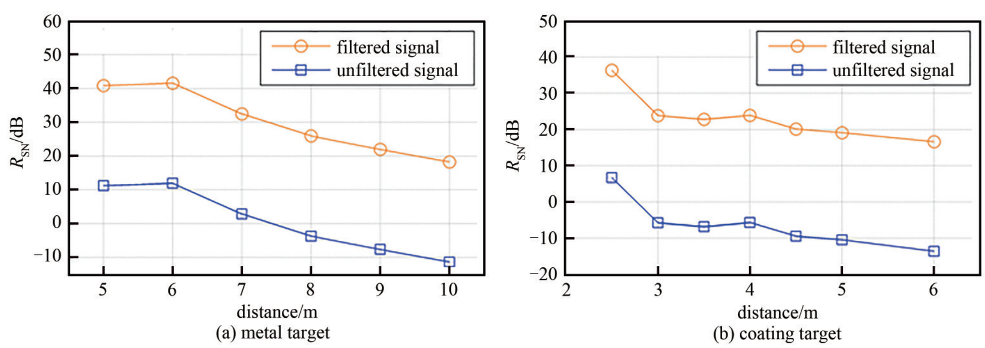

Fig.8 R_{SN} of different targets

图 8 不同目标的信噪比

各种目标都具有良好的适应性。实际应用中，缺乏目标的先验信息，无论目标信号强弱，均需要系统能够探测处理，只需设置好步长因子更新阈值，算法即可适应不同强度的目标信号的滤波需求。

3　结论

由于同一水域的散射性质相似，同一脉冲激光探测系统探测脉冲产生的后向散射信号具有较高的相关性，其有限冲击响应滤波器的维纳解，接近完全相关的2个后向散射信号的解。据此，提出一种改进的NLMS滤波器算法，按照后向散射信号上升沿相关计算结果对齐信号，并以后向散射信号的峰值比作为滤波器向量非零元素初值，通过归一化约束，算法对不同强度的回波信号均能取得良好的滤波结果。仿真和实验表明，该算法能够自动处理器件延迟导致的脉冲触发跳动，通过4阶滤波器即可对多种目标场景进行滤波，滤波后目标信号的信噪比提高30 dB左右。该算法消耗的计算资源较低，通用性强，有利于系统对水下非合作目标的探测和在线处理。

参考文献：

[1]　DUAN Zheng,YUAN Ye,LU Junchen,et al. Underwater spatially,spectrally,and temporally resolved optical monitoring of aquatic fauna[J]. Optics Express, 2020,28(2):2600-2610.

[2]　WANG Jingjing, TIAN Changfeng, YANG Xinghai, et al. Underwater wireless optical communication system using a 16QAM modulated 450 nm laser diode based on an FPGA[J]. Applied Optics, 2019,58(16):4553-4559.

[3]　WANG Jiemei,LU Chunhui,LI Shangbin,et al. 100 m/500 Mbps underwater optical wireless communication using an NRZ-OOK modulated 520 nm laser diode[J]. Optics Express, 2019,27(9):12171-12181.

[4]　刘娜,柯杰耀,杨苏辉,等. 载波调制高斯脉冲激光水下传输特性的仿真分析[J]. 光学学报, 2018,38(4):24-31. (LIU Na,KE Jieyao, YANG Suhui, et al. Simulation and analysis on underwater transmission characteristics of Gaussian pulse lasers with carrier modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2018,38(4):24-31.)

[5]　SAHU S K, SHANMUGAM P. A theoretical study on the impact of particle scattering on the channel characteristics of underwater optical communication system[J]. Optics Communications, 2018(408):3-14.

[6]　JAMALI M V, NABAVI P, SALEHI J A. MIMO underwater visible light communications: comprehensive channel study, performance analysis,and multiple-symbol detection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018,67(9):8223-8237.

[7]　TAN Yayun,ZHANG He,ZHA Bingting. Underwater single beam circumferentially scanning detection system using range-gated receiver and adaptive filter[J]. Journal of Modern Optics, 2017,64(16):1648-1656.

[8]　MACCARONE A,ROCCA F M D,MCCARTHY A,et al. Three-dimensional imaging of stationary and moving targets in turbid underwater environments using a single-photon detector array[J]. Optics Express, 2019,27(20):28437-28456.

[9]　钟炜,张晓晖,韩宏伟. 水下距离选通成像雷达激光照明模型[J]. 光学学报, 2016,36(4):47-52. (ZHONG Wei,ZHANG Xiaohui, HAN Hongwei. Irradiance spatial distribution model of laser source for underwater range-gated imaging radar[J]. Acta Optica Sinica, 2016,36(4):47-52.)

[10]　黄子恒,李微,杨克成,等. 水下激光距离选通三维成像方法[J]. 激光与红外, 2016,46(11):1315-1319. (HUANG Ziheng,LI Wei,YANG Kecheng,et al. Underwater laser range-gated 3D imaging method[J]. Laser & Infrared, 2016,46(11):1315-1319.)

[11]　韩宏伟,张晓晖,葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. 中国激光, 2011,38(1):226-232. (HAN Hongwei,ZHANG Xiaohui,GE Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011,38(1):226-232.)

[12]　TU Dawei, XIAO Guoliang, ZHANG Xu, et al. Laser stripe matching algorithm with coplanar constraint in underwater laser scanning systems[J]. Optical Engineering, 2019,58(11):114108.

[13]　OUYANG Bing,HOU Weilin. Compressive line sensing imaging system in a controlled hybrid scattering environment[J]. Optical Engineering, 2019,58(2):023102.

[14]　程藻,夏珉,李微,等. 基于可变遗忘因子RLS算法的水下激光雷达回波提取[J]. 激光与光电子学进展, 2016,53(1):38-45. (CHENG Zao,XIA Min,LI Wei,et al. Target echo extraction method in underwater lidar system based on variable forgetting factor RLS algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016,53(1):38-45.)

[15]　谭亚运. 水下脉冲激光近程周向扫描探测技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2017. (TAN Yayun. Research on underwater laser proximity circumferential scanning detection technology[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science and Technology, 2017.)

[16]　张旭东,崔晓伟,王希勤. 数字信号分析和处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2014. (ZHANG Xudong,CUI Xiaowei,WANG Xiqin. Digital signal analysis and processing[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2014.)

（下转第224页）