文章编号:1001-5078(2010)10-1048-05

· 激光应用技术 ·

激光水下探测光尾流回波信号提取方法的研究

郭虎生¹,刘启忠¹,佟明宸²,徐 翔³
(1.海军工程大学兵器工程系,湖北 武汉 430033;2.海军91245部队,辽宁 葫芦岛 125001;
3.海军装备部驻广州地区军事代表局,云南 昆明 650031)

摘 要:激光应用于水下目标探测时,受水体后向散射的影响,目标信号被强噪声信号所淹没。 针对这一问题,采用基于 RLS 算法的自适应抵消法对水体后向散射回波信号进行抑制。并根 据水下探测信号非平稳的特点,在传统 RLS 算法的基础上引入可变遗忘因子λ,改善对目标信 号的快速跟踪能力。对实验数据进行分析表明,该方法可以有效抑制水体后向散射回波信号, 并具有较快的收敛速度和跟踪速度,对水下激光探测的应用具有一定的实际意义。 **关键词:**自适应抵消;光尾流;后向光散射;RLS;变遗忘因子

中图分类号:TN241 文献标识码:A

Study on laser underwater light of bubbles signal detections extraction technology

GUO Hu-sheng¹, LIU Qi-zhong¹, TONG Ming-chen², XU-Xiang³

(1. Department of Weapon, Naval University of Engineering, Wuhan 43003, China;

2. Navy 91245 Military, Huludao 125001, China;

3. Guangzhou Representative Office of the Equipment Department, Kunming 650031, China)

Abstract: When detecting underwater target by using laser, the useless backscattering envelope is much stronger than the useful target-reflected signal which makes signal detecting and processing very difficult. In terms of this problem, an adaptive interference canceling method use RLS algorithm has to be found to eliminate the useless backscattering envelope. Based on this method, we proposed a variable forgetting factor to measuring time-varying parameters. It increases the tracking performance in the non-stationary environment. By applying this method to measured data, the water backscattering noise can be effective eliminated and the object signal can be extracted, and has high tracking velocity, which is of much practical significance to underwater target detection.

Key words: adaptive interference canceling; detection of light wake; light backward scattering; RLS; variable forgetting factor

1 引 言

激光尾流制导鱼雷就是通过激光探测舰船尾流 中气泡的后向光散射信号来识别尾流,并据此判断 鱼雷所处目标尾流的相对位置,进而实施制导。与 传统的自导方式相比,具有灵敏度高且不易受传统 干扰方式影响的优点^[1]。但激光在水下传输时会 受到水体尤其是近距离水体后向散射的影响,并且 其能量远大于尾流散射信号,使得接收的尾流散射 信号可能会淹没在水体散射信号中,严重影响了尾 流散射信号的探测,因此有效地抑制水体后向散射 信号,对提取尾流散射信号具有十分重要的作用。

目前不少学者对抑制水体的后向散射信号进行 了广泛的研究,采用的方法主要有距离选通法^[2]、

作者简介:郭虎生(1986 -),男,硕士研究生,研究方向为探测 与制导。E-mail:tigerborn@yeah.net

收稿日期:2010-05-29;修订日期:2010-07-16

频域滤波法^[3]等,但是应用在鱼雷系统上具有一定的局限性。鉴于此,本文提出采用自适应的方法对 水体后向散射进行抑制,自适应算法作为自适应抵 消的核心,我们选取具有较快收敛速度的 RLS 算 法,但是它只适用于平稳环境,对于非平稳环境,跟 踪能力不能满足要求。为了解决这个问题,本文提 出一种易于实现的可变遗忘因子的 RLS 算法,并通 过实测数据对该方法进行性能分析,结果显示新算 法也具有较快的跟踪能力和收敛速度。

2 后向散射光信号特征

本文假设激光探测系统接受的回波信号近似认 为是由式(1)所示的几部分线性叠加而成^[4],即:

$$H = s + d + n \tag{1}$$

其中,n 表示测量以及系统引起的随机噪声;d 为水体后向散射回波信号;s 为目标的回波信号。图1 所示为一典型的后向散射光信号波形图,其中 x 轴为时间,y 轴为接收强度。其中第一个波形起伏最大的是海水水体回波信号,其光强随着传输距离呈指数衰减,而图中所出现的第二个波形起伏位置则是目标舰船尾流的回波信号。当然探测器所接受到的信号还包含了杂散光、探测系统自身噪声等噪声信号。





由信号模型可以看出,我们可以通过直接相减 法对水体回波信号进行去除,因为在一定的探测范 围和相同的探测环境下,探测系统接收的回波信号 具有一定的相关性,因此可选取不含目标的接收回

波信号 d(n),作为对水体回波信号的估计信号 d(n),然后从接受信号中减去该估计信号,最后得 到的结果可近似认为只包含有目标的回波信号,即:

$$\Delta e = s(n) + d(n) - d(n) + \Delta n \approx s(n) \tag{2}$$

直接相减法计算简单具有很强的实时性,缺点 是不能适应回波信号的变化,由于系统存在的固有 偏差和探测距离的变化,回波采样信号和参考信号 的时间起点会有一定时间的漂移,采取直接相减法 可能会产生干扰信号,影响对目标信号的判断。



图 2 直接相减法得到的结果

Fig. 2 the target signal gained by direct subtracting method

在图 2 中数据 1 是选取的参考信号,数据 2 是 回波信号,它比参考信号延迟了 2 ns,数据 3 是采用 直接相减法得到的结果,可以看出在回波信号和参 考信号时间起点不同的情况下,结果会有干扰峰值 的出现,这给目标回波的提取带来了很大的困难。 于是我们引入了自适应抵消技术来去除水体回波信 号即将水体回波信号和其他非感兴趣区域信号当作 噪声,并作为自适应抵消器的参考输入,通过自适应 滤波器的设计与调整,将水体回波信号进行对消得 到有用信息。

3 自适应抵消法水体去除水体后向散射

3.1 自适应抵消的原理

自适应抵消法去除水体回波信号的原理是通过 一路与水体回波信号强相关而与目标回波信号弱相 关或不相关的参考信号,通过调整自适应抵消器的 参数,使得回波信号与参考信号相关的成分即水体 回波信号能完全对消掉^[5]。自适应抵消法去除水 体回波的原理框图如图3所示。



图 3 自适应抵消原理图

Fig. 3 $\,$ working principle of adaptive noise canceling $\,$

如图 3 所示的滤波器有两个输入:一个输入是 目标回波信号和水体回波信号的混合信号 s(n) + d(n)(在这里我们不考虑随机信号带来的影响),另

一个则是对水体回波信号的估计参考输入 d(n),对

输入 d(n)进行自适应滤波,使其输出 y(n)与 d(n) 相匹配,系统的输出 e(n)误差即是对目标回波信号 (5)

s(n)的最佳估计。

3.2 固定遗忘因子 RLS 算法

固定遗忘因子的 RLS 算法,即是使用指数加权 的误差平方和作为代价函数:

$$J(n) = \sum_{i=0}^{n} \lambda^{n-i} |h(i) - w^{\mathrm{T}}(n)x(i)|^{2}$$
(3)

式中, λ 称作加权遗忘因子,且 $0 \leq \lambda \leq 1$;n为迭代次 数;x(i)为第 n 次的参考信号输入信号矢量;w(n)为第 n 次的迭代权系数矢量;h(i)为带目标信号;推 导可得固定遗忘因子的 RLS 算法^[6]:

算法初始化: $w(0) = 0, p(0) = \sigma^{-1}I,$ 其中 I 为 单位矩阵,M为滤波器阶数。

滤波器输入向量为:

$$x(n) = [d(n) \cdots d(n - M + 1)]^{\mathrm{T}}$$
(4)
滤波器的抽头加权向量为.

$$w(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \quad \cdots \quad w_{M-1}(n)]^{\mathrm{T}}$$

误差估计:
$$e(n) = h(n) - y(n) = h(n) - w^{T}(n)x(n)$$
 (6)

$$g(n) = r(n-1)x(n)/\lfloor x + x(n)r(n-1)$$

$$x(n) \rceil$$
(7)

x(n)

更新权向量:
$$w(n) = w(n-1) + g(n)e(n)$$
 (8)

更新逆矩阵:

$$P(n) = \lambda^{-1} [P(n-1) - g(n)x^{\mathrm{T}}(n)P(n-1)]$$
(9)

其中,P(n)为自相关矩阵 $R_{rrr}(n)$ 的逆矩阵。

在 RLS 算法中引入了遗忘因子 $\lambda_{\circ}\lambda = 1$ 相当 于各时刻的误差被"一视同仁",即无任何遗忘功 能,或具有无穷记忆功能^[8]。此时,指数加权的最 小二乘方法退化为一般的最小二乘方法。 $\lambda = 0, 则$ 只有现时刻的误差起作用,而过去时刻的误差完全 被遗忘。激光在进行水下探测时由于海水环境的复 杂,接收的回波信号有可能出现在水体回波信号的 拖尾之中,在这个情况下,我们希望λ足够小,只需 要有限的最近时刻的误差起作用,使算法能够很快 地跟踪上非平稳信号的局部趋势;而在对水体回波 进行抵消时,系统进入平稳状态后,具有较大的 λ 可以获得较小的稳态误差,水体回波信号的成分消 除效果更好。所以对固定遗忘因子的 RLS 算法进 行改进以达到快速跟踪系统的目的,解决跟踪速度 和稳态误差的矛盾。

3.3 变遗忘因子的 RLS 算法

因为遗忘因子 λ 对整个系统的性能起很大的

作用,所以采用可变遗忘因子可以改善 RLS 算法的 性能,文献[8]提供的 GVFF-RLS 算法,利用最陡梯 度调整遗忘因子,可以在低信噪比的情况下保持良 好性能,但是不能很好的区分噪声和突变信号的影 响,都会导致遗忘因子的变化。文献[9]提出了根 据环境改变遗忘因子的 VFF-RLS 算法,虽然在不同 的环境下都具有很好的表现,但是计算复杂度高,降 低了算法的实时性,因此我们提出了一种新的变贵 忘因子 RLS 算法,该算法特点是:在系统发生突变 或在初级阶段时,即误差较大时, λ 值相应减小,以 获得较快的跟踪速度和收敛速度;而在系统进入平 稳状态后,即误差较小时,λ增大,以获得较小的稳 态误差。故提出可变遗忘因子λ:

$$\lambda(n) = \lambda_{\min} + (1 - \lambda_{\min})^{10^{L(n)}}$$
$$L(n) = \rho e^{2}(n)$$
(10)

式中, ρ 为敏感增益,控制 $\lambda(n)$ 接近1的速率,其取 值由实验确定。当估计误差 e(n) 趋于无穷时,得到 λ 的最小值 $\lambda_{(min)}$; 当 e(n) 趋于 0 时, $\lambda = 1$ 。我们可 以得到遗忘因子 $\lambda(n)$ 与 $\rho e^2(n)$ 的关系示意图如图 4 所示。可以看出与其他算法比较,计算的复杂度 没有提高很多,具有很强的实时性。根据实测数据 计算,文中参数取值 $\lambda_{\min} = 0.7, \rho = 20_{\circ}$



4 实验结果及性能分析

对自适应回波的抵消效果评估主要有两个方 面:一是目标信号提取的信噪比,即尽量减少水体回 波信号的成分,并有效提高信干比(SIR):二是能否 很快的跟踪上非平稳信号的局部趋势,有效地提取 出目标回波信号。

本文所使用的实验数据为在某海域进行的海洋 环境下舰船尾流探测试验中获取的。试验中,探测 系统通过平台放置在海底,采用的激光器中心波长 为532 nm。在本探测系统中,激光脉冲持续时间很 短,约为10 ns。目标船从探测系统上方海面驶过 时,探测系统向海面发射激光脉冲探测目标船尾流 回波信号,后向散射光经光学系统接受并转为电压 信号。探测系统接受的完整信号,由水体的后向散 射信号、气泡的反射回波信号、噪声等组成,从时间 关系上看,光学接收系统首先接收的是水体的后向 散射,其次是气泡的后向散射,而噪声始终叠加在测 量信号上。





Fig.5 original signal collected and the result curve by experiment 图 5(a)中数据为接收的带目标的回波信号图,
图 5(b)中数据为不含任何目标信息的回波信号,可以看出水体后向散射回波信号出现采样点 1500~
1700 ns 之间,目标的回波信号出现在采样点 1860~1980 ns之间,目标信号与水体回波信号的信 干比 SIR = -9.7313 dB,可见若不对水体回波进行 抑制,则很难提取目标信号。图 5(c) 是以图 5(b) 中数据作为参考输入信号,对图5(a)采用自适应抵 消法得到的结果,可以发现自适应抵消法可以有效 提取出目标的回波信号,目标信号与水体回波信号 的信干比 SIR = 5.7410 dB。在时基未偏移的情况 下,采用直接相减法也可以的得到很好的提取效果, 但是在实际探测中回波信号会出现时基偏移,在这 种情况下,采用直接相减法显然失效。激光应用实 际的水下探测时,由于水下的环境不同,每次接受到 的探测信号在时间和幅度上都会不同,为了进一步 说明自适应抵消法能动态的跟踪回波信号时间和幅 度的变化,我们以图5(b)中数据作为参考数据,将图 5(a)中数据时间分别延迟 10,20,30 个采样点以及幅 度衰减10%后分别采用自适应抵消法去除水体后向 散射信号,得到目标信号与水体回波信号的信干比 SIR 结果(如表1 所示)。

表1 不同时间与幅度的信干比结果 Tab.1 the SIR in different situation

 $\overline{}$

| 时间延迟 | 正常幅度 | | | 幅度衰减 10% | | |
|--------|------|-----|-----|----------|-----|-----|
| /ns | 2 | 4 | 6 | 2 | 4 | 6 |
| SIR/dB | 5.7 | 5.3 | 4.8 | 5.9 | 5.1 | 4.5 |

可以看出采用本文所提的方法,即使在信号变 化未知的情况下,也具有良好运行并跟踪输入统计 量随时间变化的能力,通过不断调整抽头权系数来 适应发生变化的信号和干扰的统计特性,达到消除 水体后向散射信号干扰的目的。

图 6 为本文提出算法的遗忘因子变化曲线,从 图 6 可以看出,在系统稳定的时候,λ 值保持在很接 近 1 的范围内,获得较小的稳态误差,有利于信号中 的水体回波信号成分的抵消;在接收到目标信号时, λ 迅速减小到很小的值,可以使算法有很快的跟踪 速度,有利于提取目标的回波信号。



如图 7(a) 所示结果为目标回波信号与水体回 波信号信号的重叠或目标回波信号比较微弱,采用 固定遗忘因子的 RLS 算法对其进行自适应抵消的 结果,可以看出此时不易对目标回波信号进行提取, 而采用本文的算法的结果如图 7(b) 所示,可以有效 地去除水体信号,改善追踪能力,提高提取目标信号 的能力。





5 结 论

自适应回波抵消系统通过滤波器自身权系数的 调节来适应发生变化的回波信号和噪声的统计特 性,具有自学习能力强、计算量小、实时处理的优点, 并以传统的 RLS 算法为基础,提出变遗忘因子的 RLS 算法,改善了其跟踪能力。通过具体实验验证 了自适应水体回波抵消法的有效性。不足的是,由 于是利用了参考信号对水体回波信号部分进行了抵 消,而参考信号的拖尾部分去除得不干净,如果参考 信号的拖尾和目标信号幅度相差不大时,则很容易 把目标的回波信号成分也进行了抵消,所以参考信 号的选择具有着很大的重要性。当然,如果能掌握 水体后向散射回波信号性质,得到水体后向散射回 波信号的先验条件,将有利于解决上述问题,相关问 题有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Liu Hui-kai, Yang L, et al. The laser scattering properties of the ship wake [J]. Laser & Infrare, 2003, 33(4): 265 267. (in Chinese)
 刘慧开,杨立,等. 舰船尾流的激光散射特性[J]. 激光 与红外, 2003, 33(4): 265 267.
- [2] Wang X K, Zhang H, Zheng Z Q. Analysis of back-scattering restraining of range-gated imaging technique [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 1997 2000. (in Chinese)
 王祥科,张辉,等. 距离选通技术对后向散射抑制作用的理论分析[J]. 强激光与离子束, 2007, 19(12): 1997 2000.
- [3] Zhu Xiao, Wang Hu, et al. Frequency analyzing of back-scattering signals in airborne laser bathymetr[J]. Laser & Infrare, 2003, 33(1):25 27. (in Chinese)
 朱晓, 王华, 等. 机载激光测深海水后向散射包络的频域分析[J]. 激光与红外, 2003, 33(1):25 27.
- [4] Xia M, Yang K C, Zheng Y, et al. Study on the influences of different water optical parameters on underwater bubble layer lidar detection[J]. Laser Technology, 2008, 29(1): 72 74. (in Chinese)
 夏珉,杨克成,等.水体光学参数对水中气泡场激光雷达探测影响的研究[J].激光技术, 2008, 29(1):72 74.
- [5] Xie S L, et al. The self-adaption theory of signal processing[M]. Beijing: Science Press, 2006:60 - 66. (in Chinese)

谢胜利,等.信号处理的自适应理论[M].北京:科学 出版社,2006:60-66.

- [6] Zhu Bin, Fan Xian, et al. An improved algorithm of infrared weak and small targets detection based on self-adaptive background predictio[J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (7):683-686. (in Chinese)
 朱斌, 樊祥,等. 一种改进的自适应背景预测红外弱小目标检测算法[J]. 激光与红外,2007,37(7):683-686.
- [7] D J Park, B E Jun. Self perturbing recursive least squares algorithm with fast tracking capability [J]. Electronics Letters, 1992, 28(6):558 - 559.
- [8] S HLeung, C F So. Gradient-based variable forgetting factor's algorithm in time-varying environments [J]. IEEE Trans. Signal Process, 2005, 53(8):3141-3150.
- [9] Jacob Benesty, Silviu Ciochina. A robust variable forgetting factor recursive least-squares algorithm for system Identification[J]. IEEE. Signal Process, 2008, 15 (5): 597-600.