# 基于非线性自适应滤波器的海杂波抑制 技术

翟东奇<sup>1</sup>,江朝抒<sup>1,\*</sup>,邓晓波<sup>2</sup>,罗旌胜<sup>2</sup>,胡雯<sup>1</sup>
1. 电子科技大学 信息与通信工程学院,四川 成都 611731
2. 航空工业雷华电子技术研究所,江苏 无锡 214063

摘 要:海杂波会严重影响雷达对海洋表面目标的检测。为了提高海洋表面目标的检测性能,基于非线性自适应滤波器, 提出了海杂波抑制方法,实现了海杂波抑制。介绍了非线性自适应滤波器的原理以及利用梯度下降法训练滤波器的方法。 利用 IPIX 雷达实测海杂波数据,分别针对岸基雷达和机载雷达,进行了此方法的仿真试验,从均方预测误差(MSE)和信杂 比改善因子(IF)两个方面,分析了此方法的性能。并与基于线性预测的LMS 算法进行了比较,得出了此方法对慢速目标的 检测性能优于线性方法。

关键词:海杂波抑制,非线性预测,自适应滤波,动目标检测,梯度下降法

## 中图分类号: TN959.1+2 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.06.073

当雷达波束照在海面上,海面上会反射回来类似噪声 的海杂波。由于海面会受到海风、海浪、环境湿度、浪涌等多 种自然因素的影响,海杂波信号比较复杂,也给我们在海杂 波背景下检测目标带来了难度。为了有效地检测海面上的 目标就需要进行海杂波抑制。

最常用的杂波抑制方法就是脉冲间的对消,利用动目标与海杂波在多普勒频率上的区别消除杂波,但是海面并不 是静止的,海杂波中心频率往往有多普勒偏移,同时脉冲对 消的方法也抑制了慢速目标的检测能力。近年来,提出了很 多海杂波抑制方法<sup>[1-5]</sup>,但是大都在抑制杂波后残留大部分 海杂波信号,容易淹没目标。本文利用短时间杂波数据对海 杂波进行预测,提出了一种基于非线性自适应滤波器的海杂 波抑制方法,然后利用实测海杂波数据进行了测试,验证了 此方法的海杂波抑制能力。与基于线性预测的最小均方算 法(LMS)进行比较,并对其杂波抑制能力进行了分析。

### 1 非线性自适应滤波器

采用线性预测模型,可以较好地预测海杂波,并抑制海

杂波。线性预测利用线性自适应滤波器,其原理图如图1所示。线性预测模型认为海杂波是一个离散的随机过程,对海杂波进行自回归(AR)模型建模。然后利用已知训练数据训练线性自适应滤波器,得到一组滤波器的权值。可以利用LMS 算法<sup>[6]</sup>等获取滤波器的权值。



非线性滤波器<sup>[7,8]</sup>就是在线性滤波器后连接一个连续的非线性激活函数,其结构如图2所示。需要注意的是,要处理的海杂波数据为复数数据,既包含了幅度信息又包含了相位信息。下面给出梯度下降法求解非线性滤波器的方法,称为非线性梯度下降法(Nonlinear Gradient Descent, NGD)。滤波器的输出可以表示为:

收稿日期: 2018-03-23; 退修日期: 2018-04-23; 录用日期: 2018-06-05 基金项目: 航空科学基金 (20162080012); 国家自然科学基金 (61271009) \* 诵信作者 . Tel.: 13547868256 E-mail: chshijiang@uestc.edu.cn

引用格式: Zhai Dongqi, Jiang Chaoshu, Deng Xiaobo, et al. Sea clutter suppression technique based on nonlinear adaptive filter [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (06): 73-78. 翟东奇,江朝抒,邓晓波,等.基于非线性自适应滤波器的海杂波抑制 技术 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (06): 73-78. (1)



图 2 非线性滤波器 Fig.2 Nonlinear adaptive filter

 $y(k) = \Phi(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{w}(k))$ 

式中:上标 T 表示转置。

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k) = [\boldsymbol{x}(k), \cdots, \boldsymbol{x}(k-N+1)]^{\mathrm{T}}$$
(2)

$$\mathbf{w}(k) = [w_1(k), w_2(k), \cdots, w_N(k)]^{\mathrm{T}}$$
 (3)

令:

 $\Phi(k) = u(\sigma(k), \tau(k)) + jv(\sigma(k), \tau(k)) = u(k) + jv(k)$ (4)

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{w}(k) = \boldsymbol{\sigma}(k) + j\boldsymbol{\tau}(k)$$
(5)

代价函数为:

$$J(k) = \frac{1}{2} |e(k)|^2$$
(6)

有:

$$\nabla_{w}J(k) = \frac{\partial J(k)}{\partial w_{r}(k)} + j\frac{\partial J(k)}{\partial w_{i}(k)} = \nabla_{w_{r}}J(k) + j\nabla_{w_{i}}J(k)$$
(7)

其中:

$$\begin{cases} \nabla_{w_r} J(k) = \frac{1}{2} e(k) \nabla_{w_r} e^*(k) + \frac{1}{2} e^*(k) \nabla_{w_r} e(k) \\ \nabla_{w_i} J(k) = \frac{1}{2} e(k) \nabla_{w_i} e^*(k) + \frac{1}{2} e^*(k) \nabla_{w_r} e(k) \end{cases}$$
(8)

输出误差为:

 $e(k) = d(k) - \Phi(\mathbf{x}^{\mathrm{T}}(k)\mathbf{w}(k))$ (9)

对于式 (5) 中的偏导数可以写为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma(k)}{\partial w_r(k)} = \mathbf{x}_r(k), & \frac{\partial \sigma(k)}{\partial w_i(k)} = -\mathbf{x}_i(k) \\ \frac{\partial \tau(k)}{\partial w_r(k)} = \mathbf{x}_i(k), & \frac{\partial \tau(k)}{\partial w_i(k)} = \mathbf{x}_r(k) \end{cases}$$
(10)

因此,实部和虚部的梯度分别为:

$$\begin{cases} \frac{\partial J(k)}{\partial w_{r}(k)} = -e_{r}(k)[u_{\sigma}(k)\mathbf{x}_{r}(k) + u_{\tau}(k)\mathbf{x}_{i}(k)] - \\ e_{i}(k)[v_{\sigma}(k)\mathbf{x}_{r}(k) + v_{\tau}(k)\mathbf{x}_{i}(k)] \\ \frac{\partial J(k)}{\partial w_{i}(k)} = -e_{r}(k)[-u_{\sigma}(k)\mathbf{x}_{i}(k) + u_{\tau}(k)\mathbf{x}_{r}(k)] - \\ e_{i}(k)[-v_{\sigma}(k)\mathbf{x}_{i}(k) + v_{\tau}(k)\mathbf{x}_{r}(k)] \end{cases}$$
(11)  
$$\vec{x} \div : u_{\sigma} = \frac{\partial u}{\partial \sigma}, u_{\tau} = \frac{\partial u}{\partial \tau}, v_{\sigma} = \frac{\partial v}{\partial \sigma}, v_{\tau} = \frac{\partial v}{\partial \tau},$$
$$\vec{y} = \vec{y} + \vec{$$

所以,梯度为:

$$\nabla_{w}J(k) = -\mathbf{x}^{*}(k)[\Phi^{*}(k)e_{r}(k) + j\Phi^{*}(k)e_{i}(k)] = -\mathbf{x}^{*}(k)\Phi^{*}(k)e(k)$$
(13)

式中:
$$\Phi'(k) = \Phi'(\mathbf{x}^{T}(k)\mathbf{w}(k))_{\circ}$$
  
最终,可以得到 NGD 的权值更新公式为:  
 $\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu e(k)\Phi^{*}(k)\mathbf{x}^{*}(k)$  (14)

## 2 海杂波抑制

海杂波抑制的过程如图 3 所示。首先,利用现有的海杂波 数据建立一个时间序列的训练集,其次利用 NGD 的方法训练 得到一组滤波器的权值,然后将雷达回波信号通过已经训练好 的滤波器,最后与原雷达回波信号作差,即可完成海杂波抑制。





#### 2.1 激活函数的选择

这里要处理的是复数数据,和实数域上的情况有些不同,不能进行简单的搬移。主要挑战是在复数域上缺乏有界并解析的非线性激活函数,如Liouville定理所述<sup>[9]</sup>。因此,在实际应用中就需要在激活函数的有界性和解析性中做出选择。一种组合的复数激活函数,即 $\Phi(z) = \Phi(x) + j\Phi(y)$ ,其中, $\Phi(x)$ 和 $\Phi(y)$ 为实激活函数,常作为复数的激活函数。但是这种激活函数并不是解析的。这里选用 tanh(z) 作为激活函数,有:

$$\Phi(z) = \tanh(z) \quad \Phi'(z) = \operatorname{sech}^2(z) \tag{15}$$

2.2 数据预处理

由于输入数据的范围会影响处理的性能。为了复信号 处理过程有更大的自由度,通常需要标准化输入数据,这里 对输入数据做了如下的归一化处理:

$$x = \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \tag{16}$$

#### 2.3 海杂波抑制性能评估

对于海杂波抑制性能的评估,使用预测均方误差(MSE) 和信杂比改善因子(IF)。

MSE 的定义如式 (17) 所示。其中, N 为数据量,  $y_t$  为 原海杂波数据,  $\hat{y}_t$ 为预测海杂波数据。

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} |\hat{y}_t - y_t|^2$$
(17)

由于 NGD 算法是非线性预测,杂波抑制后的信号与噪 声在时域中不易区分,因此采用在频域积分的方法求信号与 杂波的功率,进而求出信杂比和改善因子。信杂比改善因子 表达式如式 (18) 所示。其中, SCR<sub>a</sub> 和 P'(f) 分别是杂波抑 制后的信杂比和功率谱, SCR<sub>b</sub> 与 P(f) 分别是杂波抑制前的 信杂比和功率谱, f<sub>HS</sub> 和 f<sub>LS</sub> 分别是信号在频域分布的上下限 范围, f<sub>HC</sub> 和 f<sub>LC</sub> 分别是杂波在频域分布的上下限范围。

IF = SCR<sub>a</sub> -SCR<sub>b</sub> = 
$$\frac{\int_{f_{LS}}^{f_{HS}} P'(f) df}{\int_{f_{LC}}^{f_{HC}} P'(f) df} - \frac{\int_{f_{LS}}^{f_{HS}} P(f) df}{\int_{f_{LC}}^{f_{HC}} P(f) df}$$
 (18)

## 3 基于岸基雷达的仿真结果

仿真所使用实测海杂波数据为 McMaster IPIX 雷达<sup>[10]</sup> 在加拿大东海岸 Dartmouth 所得到的试验数据。

利用上文所提的方法设计程序,并利用实测海杂波数 据进行海杂波抑制的仿真试验。选取第17#号海杂波数据。 首先,选取连续时间海杂波序列前4000个点作为训练数据, 然后利用接下来的1000个数据点进行进一步预测。

图 4 和图 5 分别是利用实测数据对海杂波时间序列预测的结果图 (前 500 个点)。可以看到 LMS 算法比较精准地预测到了海杂波下一时刻的幅值。而图 5 中使用的是文中所提到的NGD 算法,也非常精准地预测到了下一个时刻的海杂波。从预测效果上来看,线性和非线性预测都可以准确地预测下一个时刻的海杂波。从两者的预测均方误差上来看,二者预测性能差别不大。表 1 是利用 5 组数据分别得到的预测均方误差。



为了进一步检测此方法的海杂波抑制性能,在实测海杂 波数据中加入仿真的动目标信号,其中动目标的多普勒频率 为100Hz。图6是未经处理的海杂波的功率谱,可以看到海 杂波的主要能量集中在零频附近,由于海浪并不是完全静止 的,而是相对运动的,所以海杂波中心频率相对零频有一个小



表 1 5 组数据的预测均方误差 ( imes 10 $^{-3}$ )

Table 1 Prediction MSE of five sets of datas ( $\times 10^{-5}$	3,	)
---	----	---

MSE	1组	2 组	3 组	4 组	5 组
LMS	1.6	1.7	2.0	5.1	2.0
NGD	1.5	2.0	2.2	5.1	2.6

偏移,在频率100Hz附近有一个单频的信号为仿真的动目标。然后分别利用 NGD 算法和 LMS 算法对海杂波进行抑制。抑制之后的信号的功率谱如图 8 和图 9 所示,可以看到海杂波的能量被抑制掉,而目标依然存在。与 LMS 算法进行比较, NGD 抑制后的目标能量与 LMS 相差不大。然后改变目标的多普勒频率,降到-10Hz,仿真结果如图 10 和图 11 所示。比较 NGD 算法和 LMS 算法,可以看出在-10Hz 时 NGD 算法的海杂波抑制能力要优于 LMS 算法。

改变目标的多普勒频率,分析不同多普勒频率的 IF,如 图 12 所示,可以看到在零频附近时,NGD 算法的杂波抑制 性能要优于 LMS 算法,IF 高出 2~3dB。在高频处,两种算 法的杂波抑制性能差别不大。



图 6 海杂波抑制前功率谱 ( $f_d$ =100Hz) Fig.6 Power spectrum before sea clutter suppression ( $f_d$ =100Hz)



图 7 海杂波抑制前功率谱 ( $f_d$ =-10Hz) Fig.7 Power spectrum before sea clutter suppression ( $f_d$ =-10Hz)









Fig.9 Power spectrum after sea clutter suppression by LMS algorithm ( $f_d$ =100Hz)





Fig.10 Power spectrum after sea clutter suppression by NGD algorithm ( $f_d$ =-10Hz)



图 11 LMS 算法抑制后功率谱 (f<sub>d</sub>=-10Hz)

Fig.11 Power spectrum after sea clutter suppression by LMS algorithm ( $f_d$ =-10Hz)



图 12 信杂比改善因子与多普勒频率关系 Fig.12 Relationship between SCR IF and Doppler frequency

## 4 基于机载雷达的海杂波抑制仿真

## 4.1 机载雷达杂波特性

对于平台固定不动的脉冲雷达来说,海洋表面的杂波频谱 在零多普勒频率附近的一个小范围内。对于机载雷达<sup>[11]</sup>而言, 由于平台是运动的,海洋表面相对飞机有一个相对的径向速度, 因此,机载雷达的海杂波的多普勒频率不在零多普勒频率附近。 同时,由于机载雷达天线的主瓣有一定的宽度,雷达波束照在海 面上,在同一个距离单元不同距离的海面相对飞机运动产生的 多普勒频率不同,这就导致了机载雷达的海杂波频谱被展宽。

## 4.2 机载雷达海杂波抑制性能

利用机载雷达海杂波的特性,即不同距离多普勒频率 不同的性质,通过 IPIX 雷达海杂波数据(第54#号数据)构 建了模拟的机载雷达海杂波数据。

利用 NGD 算法对机载雷达海杂波进行抑制。图 13 为 模拟的机载雷达海杂波的功率谱,机载雷达的海杂波频谱中 心大约在多普勒频率 180Hz 附近,并且与地基雷达相比,海 杂波频谱明显被展宽。图 14 为利用 NGD 算法对海杂波抑 制后的功率谱,与图 13 中未处理的海杂波功率谱相比,可以 明显看出绝大部分的海杂波能量被抑制掉。









将 NGD 算法与 LMS 算法进行对比。采用独立的 200 次仿真,取平均得到 NGD 与 LMS 算法的平均预测误差分 别为 6.93×10<sup>-4</sup> 和 7.39×10<sup>-4</sup>。发现 NGD 和 LMS 杂波抑 制算法的预测均方误差差别不大。在海杂波中加入不同多 普勒频率的仿真目标,得到两种海杂波抑制方法的 IF。通 过图 15 可以得到 NGD 海杂波抑制算法在杂波频率附近杂 波抑制性能要优于 LMS 海杂波抑制算法。





## 5 结束语

本文介绍了一种非线性自适应滤波器,并将其运用到 海杂波抑制。通过实测数据的仿真分析,与线性滤波器的 LMS 算法进行比较,最终得出利用本文所讲的非线性滤波 器能够有效抑制海杂波。并且在杂波能量集中的频率附近, 本文所述的海杂波抑制性能要优于线性算法,信杂比改善因 子与线性的 LMS 算法相比,提高达 3dB。但此方法需要训 练数据对滤波器进行训练,如何提高机载雷达利用少量数据 的训练性能需要接下来继续研究。同时也需要深入研究其 他的非线性滤波器,包括神经网络等,并将其运用到海杂波 抑制中,提高海杂波抑制能力。

#### 参考文献

- Darry M, William M, Stephen H. A subspace-based approach to sea clutter suppression for improved target detection[C]//2006 ACSSC Fortieth Asilomar Conference, 2006.
- [2] Liu Jingyao, Meng Huadong, Wang Xiqin. Radar sea clutter suppression and target detection with α-β-γ filter[C]// ICSP Proceedings, 2008.
- [3] Ren Lei, Shi Chaojian, Ran Xin. Target detection in maritime search and rescue using SVD and frequency domain characteristics [C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2011.

- [4] Veena G, Jeffrey K. A performance evaluation of autoregressive clutter mitigation methods for over-the-horizon radar[J].Signal, Systems and Computer, 2004 (1): 937–941.
- [5] Manuel R. Coherent detection of swerling 0 targets in sea-ice weibull-distributed clutter using neural networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 2010, 59 (12): 3139–3151.
- [6] 何子述,夏威.现代数字信号处理及其应用[M].北京:清华 大学出版社,2009.
  He Zishu, Xia Wei. Modern digital signal processing and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [7] Mandic D P, Goh V S L. Complex valued nonlinear adaptive filters[M].John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
- [8] Hanna A I, Mandic D P. A fully adaptive normalized nonlinear gradient descent algorithm for complex-valued nonlinear adaptive filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51 (10): 2540-2549.
- [9] Kim T, Adali T. Approximation by fully complex MLP

using elementary transcendental activation functions[C]// Neural Networks for Signal Processing XI: Proceedings of the 2001 IEEE Signal Processing Society Workshop, 2001: 203–212.

- [10] Greco M, Bordoni F, Gini F. X-band sea clutter nonstationarity influence of long wave[J].IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29 (2): 269–283.
- [11] 张明友,汪学刚. 雷达系统 [M].4 版. 北京: 电子工业出版社,
  2013.
  Zhang Mingyou, Wang Xuegang. Radar systems[M].4th

Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)

## 作者简介

翟东奇(1993-) 男,硕士研究生。主要研究方向:海杂波 背景下低空弱目标检测。
江朝抒(1973-) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:雷达系统及信号处理。
Tel:13547868256 E-mail: chshjiang@uestc.edu.cn

## Sea Clutter Suppression Technique Based on Nonlinear Adaptive Filter

Zhai Dongqi<sup>1</sup>, Jiang Chaoshu<sup>1,\*</sup>, Deng Xiaobo<sup>2</sup>, Luo Jinsheng<sup>2</sup>, Hu Wen<sup>1</sup> 1. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

2. AVIC Leihua Electronic Technology Resarch Institute, Wuxi 214063, China

**Abstract:** Sea clutter can seriously affect the radar's detection of ocean surface targets. In order to improve the detection performance of ocean surface targets, a sea clutter suppression method was proposed based on a nonlinear adaptive filter, and sea clutter suppression was achieved. The principle of nonlinear adaptive filter and the method of training filter by gradient descent method were introduced. Using IPIX radar sea clutter data, considering shore-based radar and airborne radar, the simulation experiment of this method was carried out. The performance of this method was analyzed from the two aspects of Mean Square Error (MSE) and SCR Improvement Factor (IF). And compared with LMS algorithm based on linear prediction, it is concluded that this method is better than linear method for detecting slow targets.

Key Words: sea clutter suppression; nonlinear prediction; adaptive filters; moving targets detection; gradient descent

 Received:
 2018–03–23;
 Revised:
 2018–04–23;
 Accepted:
 2018–06–05

 Foundation item:
 Aeronautical Science Foundation of China (20162080012);
 National Natural Science Foundation of China (61271009)

 \*Corresponding author.Tel.:
 13547868256
 E-mail:
 chshjiang@uestc.edu.cn