

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.013

引用格式:毕井章,刘溶,周希辰,等.基于 GRNN 和时间窗方差滤波的海杂波抑制[J].电讯技术,2014,54(7):932-936. [BI Jing-zhang, LIU Rong, ZHOU Xi-chen, et al. Sea Clutter Suppression Based on GRNN and Time-window Variance Filtering[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7):932-936.]

基于 GRNN 和时间窗方差滤波的海杂波抑制*

毕井章**, 刘 溶, 周希辰, 任 渊

(南京船舶雷达研究所, 南京 210015)

摘 要:为实现对海杂波的抑制,根据海杂波混沌动态特性,利用广义回归神经网络(GRNN)进行海杂波预测再对消,最后引入时间窗方差滤波。分析对 McMaster 大学 IPIX 雷达含目标实测数据的处理结果,原始数据信杂比小于等于 0 dB,只采用 GRNN 预测对消后信杂比提高但仍有短时海杂波尖峰的影响,经过方差滤波后短时尖峰基本消失,最终信杂比提高到约 11.67 dB。故所提方法对海杂波有很好的抑制效果,能够检测出湮没在海杂波中的小目标。

关键词:海杂波抑制;广义回归神经网络;时间窗;方差滤波;预测;对消

中图分类号:TN973.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-0932-05

Sea Clutter Suppression Based on GRNN and Time-window Variance Filtering

BI Jing-zhang, LIU Rong, ZHOU Xi-chen, REN Yuan

(Nanjing Marine Radar Institute, Nanjing 210015, China)

Abstract: According to the chaotic dynamics of sea clutter, generalized regression neural network (GRNN) is used for sea clutter prediction and cancellation, and time-window variance filtering is applied to suppress sea clutter. Based on the analysis of processing results of radar data with target measured by Intelligent Pixel-Processing (IPIX) radar of McMaster University, the signal to clutter ratio (SCR) is not more than 0 dB. There are short-time sea clutter peaks after GRNN's prediction and cancellation while the SCR is improved, which can almost all be removed through variance filtering. Finally, the SCR is improved to about 11.67 dB. It is concluded that the proposed method has good cancellation effect to sea clutter, which can detect small target in sea clutter.

Key words: sea clutter suppression; GRNN; time-window; variance filtering; prediction; cancellation

1 引 言

对海面及低空目标探测时,海杂波是雷达的主要杂波源,在 20 世纪 90 年代,加拿大 McMaster 大学 Simon Haykin 教授领导的研究团队对安置在海边悬崖上的 IPIX 雷达获得的大量海杂波回波数据进行了分析,结果显示,海杂波不是传统认为的随机信号,而是满足混沌动力学特性,并从理论上证明海杂

波是具有短期可预测性的^[1-2]。

用于海杂波预测的主要有 BP (Back Propagation) 网络和径向基网络^[3-4],它们预测准确但训练时间较长,而雷达对实时性要求较高。广义回归神经网络 (GRNN) 具有预测精度高且速度快的特点,卢宁等^[5]对将 GRNN 用于海面目标检测进行了简单分析,并取得了较好的效果。本文给出了 GRNN

* 收稿日期:2014-01-28;修回日期:2014-04-08 Received date:2014-01-28;Revised date:2014-04-08

** 通讯作者:bjz2008301817@163.com Corresponding author:bjz2008301817@163.com

预测海杂波并对消的详细过程,并引入了时间窗方差滤波处理,实现了良好的海杂波抑制效果。

本文第 2 部分给出如何对海杂波的相空间进行重构及进行 GRNN 预测的方程;第 3 部分分析了 GRNN,给出学习训练过程;第 4 部分进行实测海杂波数据的预测和对消并进行时间窗方差滤波。

2 重构及预测

海杂波实际是由包含了多变量的一个非线性的系统产生的^[1],而我们雷达采集的回波数据如下:

$$x(t) = x_1, x_2, \dots, x_N \quad (1)$$

其中, N 为总数据点数; $x(t)$ 是产生海杂波系统所有变量间相互作用的结果,它是一个单变量时间序列。要分析这个系统,就需要获得所有的变量相关信息,将 $x(t)$ 重构到多维空间就必须在预测前完成。

Takens 嵌入定理表明由单变量的时间序列来对混沌系统的相空间进行重构是可行的,相空间重构步骤为^[6]:

(1) 计算延迟时间 τ , 它为重构得到的多维相空间提供了独立新坐标。主要计算方法有自相关和互信息法,自相关法计算简单但互信息法更精确,因此本文采用互信息法计算,互信息第一个最小值点即为 τ ;

(2) 计算嵌入维数 d 。常用方法是为最邻近点法,但它对噪声敏感,因此本文采用其改进算法 Cao 法, Cao 法只需延迟时间 τ 一个参数且只使用较少的数据量就能求出 d ;

(3) 利用 τ 和 d 构建海杂波的奇异吸引子,它的轨迹为

$$y_i = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(d-1)\tau}) \quad (2)$$

混沌系统的状态转移方程 F 为

$$y_{i+1} = F(y_i) \quad (3)$$

即

$$(x_{i+1}, x_{i+\tau+1}, \dots, x_{i+(d-1)\tau+1}) = F(x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(d-1)\tau}) \quad (4)$$

对其观察可知, $x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(d-1)\tau}$ 是已知的,只需求出 $x_{i+(d-1)\tau}$:

$$x_{i+(d-1)\tau} = f(x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(d-1)\tau}) \quad (5)$$

这是 GRNN 预测海杂波的方程,利用式(5)预测,进而可以对消海杂波,达到抑制海杂波的目的。

Simon Haykin 提出用下式作为预测方程^[7-8]:

$$x_{i+d\tau} = f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+d\tau-1}) \quad (6)$$

虽然增大了数据量,但为获得更多的系统信息,

本文中采用上式作为预测函数。

3 GRNN 学习训练

GRNN^[9]是径向基网络的一种,它在 1991 年由 Donald. F. Specht 提出。GRNN 的逼近函数能力以及训练的速度比其他网络有一定优势,它有输入层、模式层、求和层、输出层 4 层。

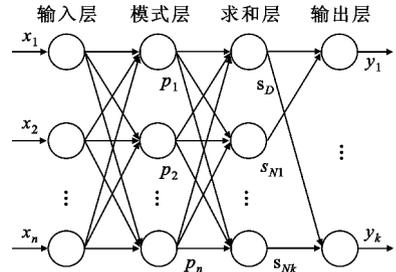


图 1 GRNN 结构
Fig. 1 GRNN's structure

输入向量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 输出为 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_k]^T$ 。

(1) 输入的样本向量维数即是输入层的神经元的数目 n , 输入的变量不作任何处理被直接送到模式层。

(2) 模式层有 n 个神经元, 每个神经元对应于一个不同的样本, 每个神经元的传递函数为

$$p_i = \exp\left[-\frac{(\mathbf{X}-\mathbf{X}_i)^T(\mathbf{X}-\mathbf{X}_i)}{2\sigma^2}\right], i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中, \mathbf{X} 为 GRNN 输入向量, \mathbf{X}_i 是第 i 个网络神经元所对应的输入, σ 是平滑因子, 是高斯函数中宽度系数。

(3) GRNN 的求和层有两种求和方式。一类求和公式为

$$\sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(\mathbf{X}-\mathbf{X}_i)^T(\mathbf{X}-\mathbf{X}_i)}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

它只是算术求和, 其对应的传递函数如下:

$$s_D = \sum_{i=1}^n p_i \quad (9)$$

另一类求和公式为

$$\sum_{i=1}^n Y_i \exp\left[-\frac{(\mathbf{X}-\mathbf{X}_i)^T(\mathbf{X}-\mathbf{X}_i)}{2\sigma^2}\right] \quad (10)$$

它是加权求和, 其对应的传递函数如下:

$$s_{Nj} = \sum_{i=1}^n y_{ij} p_i, j=1, 2, \dots, k \quad (11)$$

其中, y_{ij} 为第 i 个输出样本 Y_i 的第 j 个元素。

(4) 输出向量维数 k 是输出层神经元数目, 本文中 k 取 1, 求和层的各输出进行相除即得到输出

层输出:

$$y_j = \frac{S_{N_j}}{S_D}, j=1, 2, \dots, k \quad (12)$$

本文将非目标距离单元雷达回波时间序列的相空间重构轨迹作为网络的训练样本。训练样本一旦确定下来,GRNN 结构及连接的权值被固定,训练 GRNN 时只需调整高斯函数的宽度系数 σ 这一个参

数,因此 GRNN 有很快的训练速度。

4 预测对消

本文使用 MacMaster 大学 IPIX 雷达的 19931108_213827_starea. cdf 作为仿真数据,雷达工作参数如表 1 所示。

表 1 雷达工作参数
Table 1 Radar operating parameters

雷达工作频率 /GHz	脉冲宽度 /ns	脉冲重复频率 /Hz	天线波束宽度 /($^{\circ}$)	距离扫描	起始距离 /m	终止距离 /m	距离步进 /m	采样持续时间/s	浪高 /m	采样精度 /b	目标主距离单元	目标次距离单元
9.39	200	1 000	0.9	14	2 574	2 769	15	131	0.8~3.8	8	9	7~11

数据集中有 14 个距离单元,在距离单元 9 内有一个直径 1 m 缠绕金属丝的泡沫球,距离单元 7~11 都能观测到目标。每个距离单元有 1 301 072 个采样点,由于仿真所用计算机内存限制,每个距离单元只取前 80 000 个采样数据。

利用互信息法^[4]可得延迟时间 τ 为 10,再将 τ 值应用于 Cao 法^[4],可得嵌入维数 d 为 5。设置 GRNN 输入层数目为 50,输出层数目为 1;对数据进行了归一化,幅度为 0.1~0.9;预测样本为数据集距离单元 1 中起伏较大的 5 000 点数据。

利用预测样本对 GRNN 进行训练,得到训练完成后的权值固定的 GRNN 作为预测器;再用 GRNN 预测器对全部数据预测对消,如图 2 所示。

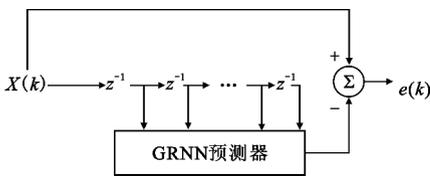


图 2 GRNN 预测对消
Fig. 2 GRNN prediction and cancellation

GRNN 预测对消后残差为 $e(k)$,再乘上时间窗方差函数:

$$v(k) = \text{var}(e(k-M+1), \dots, e(k), e(k+1), \dots, e(k+M)) \quad (13)$$

其中, $\text{var}(\cdot)$ 为对每点所在时间窗求方差;本文中 M 取 50,对采样数据中前 50 点取前 100 点的方差,后 50 点取后 100 点的方差,最终结果为

$$r(k) = e(k)v(k) \quad (14)$$

由于 GRNN 预测对消后海杂波残差尖峰持续时间很短,而目标信号持续时间相对较长。对时间窗取合适大小时,在海杂波短时尖峰处时间窗方差

很小而目标处时间窗方差相对较大,故引入时间窗方差滤波可抑制海杂波短时尖峰。

雷达回波中信号的幅度记作 v_s ,杂波的幅度记作 v_c ,则信杂比为

$$20 \times \lg(v_s/v_c) \quad (14)$$

图 3 是原始数据三维图。由图 3 可看出由于海杂波的影响,完全无法分辨目标所在距离单元。

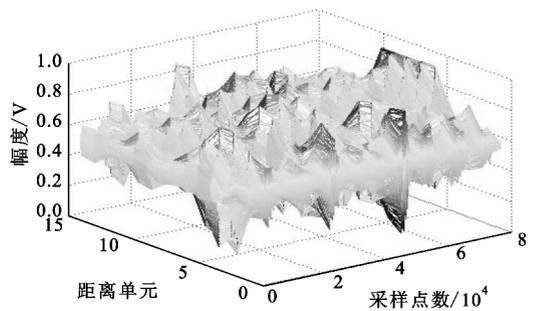


图 3 原始数据三维图
Fig. 3 3-D graph of original data

由图 4 可知,目标距离单元不可分辨,由于距离单元 9 处无法判断最值来自目标还是海杂波,故原始数据信杂比小于等于 0 dB。

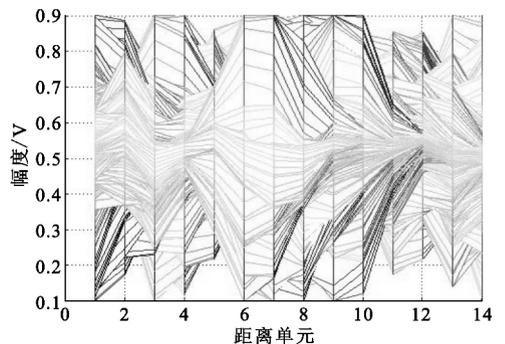


图 4 原始数据距离向
Fig. 4 Range direction of original data

如图 5 所示,GRNN 预测对消后目标在距离单元 9,但仍有海杂波短时尖峰影响判断。

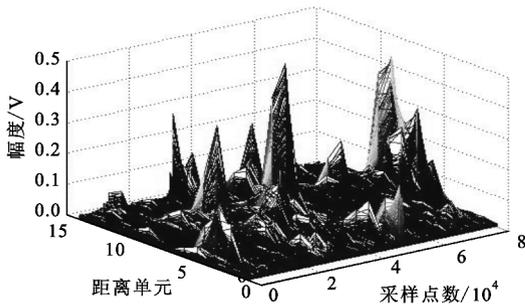


图 5 GRNN 预测对消后三维图

Fig. 5 3-D graph after GRNN prediction and cancellation

如图 6 所示,GRNN 对海杂波预测对消后海杂波被抑制,信杂比提高到大约 4.38 dB。

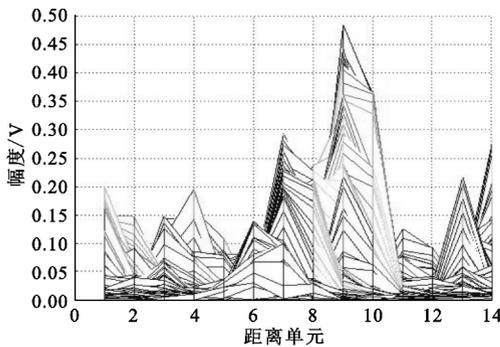


图 6 GRNN 预测对消后距离向

Fig. 6 Range direction after GRNN prediction and cancellation

如图 7 所示,经过时间窗方差函数滤波后,海杂波尖峰基本去除,目标清晰可见。

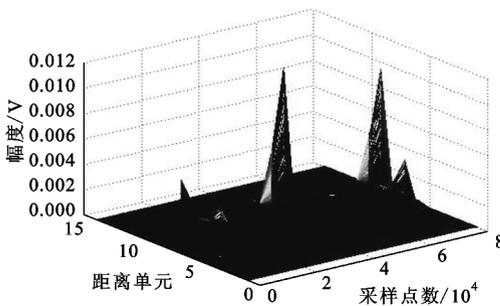


图 7 时间窗方差滤波后三维图

Fig. 7 3-D graph after time-window variance filtering

由图 8 可看出经过时间窗方差滤波后信杂比约为 11.67 dB,海杂波得到了有效抑制。

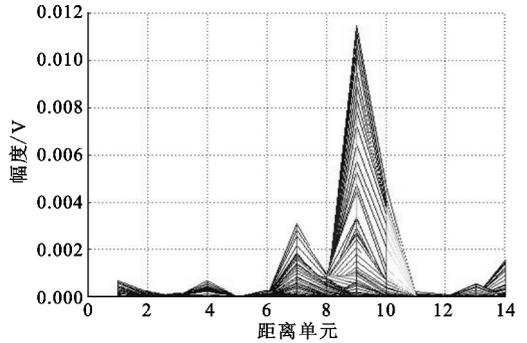


图 8 时间窗方差滤波后距离向

Fig. 8 Range direction after time-window variance filtering

5 结 论

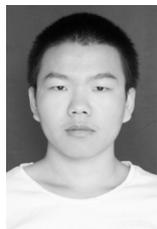
本文给出 GRNN 训练的详细过程,用经过训练的 GRNN 进行海杂波预测对消,并根据对消后的结果提出用时间窗方差函数滤除短时尖峰。与 BP 和径向基网络预测对消相比,GRNN 具有训练调整参数少、训练时间短的优点,有更高的实用性;针对海杂波短时尖峰引入时间窗方差滤波,取得了很好的效果。由仿真结果可看出,经过处理后得到了非常理想的海杂波的抑制效果,信杂比提高到约 11.67 dB,能够满足信号检测的需求,实现对目标的探测跟踪。因为雷达是工作在噪声的环境下,因此以后的工作主要是减少噪声的影响,提高预测精度,降低训练时间,在硬件上验证,以达到实用效果。

参考文献:

- [1] Haykin S, Puthusserypady S. Chaotic dynamics of sea clutter[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Non-linear Science, 1997, 7(4): 777-802.
- [2] Haykin S, Puthusserypady S. Chaos, sea clutter, and neural networks[C]// Proceedings of Thirty-First Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 1997: 1224-1227.
- [3] 林三虎,朱红,赵亦工. 基于神经网络的海杂波模型[J]. 红外与毫米波学报, 2004(1): 55-58.
LIN San-hu, ZHU Hong, ZHAO Yi-gong. Model for Sea Clutter Based on Neural Network[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004(1): 55-58. (in Chinese)
- [4] 梁国良. 基于 RBF 神经网络的海杂波抑制算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
LIANG Guo-liang. Research on Sea Clutter Suppression Algorithm Based on RBF Neural Network[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [5] 卢宁,于才,唐伟. 海杂波背景下的 GRNN 小目标检测[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(2): 4-7.

- LU Ning, YU Cai, TANG Wei. GRNN Small Target Detection Based on Sea Clutter[J]. Fire Control Radar Technology, 2012, 41(2): 4-7. (in Chinese)
- [6] Takens F. Detecting Strange Attraction in Turbulence[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- [7] Haykin S, Li X B. Detection of signals in chaos[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(1): 95-122.
- [8] Li B X, Haykin S. Chaotic detection of small target in sea clutter[C]//Proceedings of 1993 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 1993: 237-240.
- [9] Hagan M T, Demuth H B, Beale M H. 神经网络设计[M]. 戴葵, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
Hagan M T, Demuth H B, Beale M H. Neural Network Design[M]. Translated by DAI Kui. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:



毕井章(1991—),男,安徽寿县人,2012年于西北工业大学获工学学士学位,现为南京船舶雷达研究所硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理;

BI Jing-zhang was born in Shouxian, Anhui Province, in 1991. He received the B. S. degree from Northwestern Polytechnical University in

2012. He is now a graduate student. His research concerns radar signal processing.

Email:bjz2008301817@163.com

刘 溶(1986—),男,湖南衡阳人,2010年于北京理工大学获工学硕士学位,现为南京船舶雷达研究所工程师,主要研究方向为雷达信号处理;

LIU Rong was born in Hengyang, Hunan Province, in 1986. He received the M. S. degree from Beijing Institute of Technology in 2010. He is now an engineer. His research concerns radar signal processing.

周希辰(1960—),男,江苏南京人,1988于清华大学获硕士学位,现为南京船舶雷达研究所研究员,主要研究方向为雷达系统技术、目标综合识别探测技术;

ZHOU Xi-chen was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1960. He received the M. S. degree from Tsinghua University in 1988. He is now a senior engineer of professor. His research concerns radar system and radar target detection and recognition.

任 渊(1964—),男,湖北天门人,2000年于武汉大学获硕士学位,现为南京船舶雷达研究所研究员,主要研究方向为雷达系统总体和雷达信号处理技术。

REN Yuan was born in Tianmen, Hubei Province, in 1964. He received the M. S. degree from Wuhan University in 2000. He is now a senior engineer of professor. His research concerns radar system and radar signal processing.