DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2016.03.006

基于时间相关性的海面小目标检测技术

司　军[1]，赵中兴[1]，吴　俭[1,2]，洪　伟[1]，陈永森[1]
(1.中国船舶重工集团第七二三研究所，江苏扬州 225001；
2.海博威(江苏)科技发展有限公司，江苏扬州 225001)

摘　要：在雷达对海探测中，海杂波往往对小目标检测造成严重的干扰，近年来广泛研究的 TBD、知识辅助、杂波重构等新技术尚未进入工程应用阶段。针对这一问题，提出了一种基于时间相关性的海面小目标检测技术，该技术利用了海杂波和目标在时间相关性上的差异，采用成组非相参积累级联杂波图迭代算法抑制强海杂波，在抑制海杂波的同时有效保留了目标信息，能够很好地实现海面小目标的检测。数据仿真和实测试验结果证明了这种技术的可行性和有效性。

关键词：海杂波抑制；时间相关性；成组非相参积累；杂波图迭代

中图分类号：TN959.72　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-2337(2016)03-0261-06

Detection Technique of Dim Target in Sea Clutter Based on Time-Coherent Characteristic

SI Jun[1], ZHAO Zhongxing[1], WU Jian[1,2], HONG Wei[1], CHEN Yongsen[1]
(1. *No.723 Research Institute of CSIC, Yangzhou* 225001, *China*;
2. *Haibowei (Jiangsu) Technology Development Co., Ltd, Yangzhou* 225001, *China*)

Abstract: In sea detection by radar, the sea clutter often disturbs the dim target detection seriously. In recent years, the new techniques such as TBD, knowledge aid clutter reconstruction have not entered the stage of engineering application. To solve the problem, this paper presents a detection technique of dim target in sea clutter based on time-coherent characteristic. The technique takes advantage of different time-coherent characteristics of sea clutter and dim targets, then adopts grouped non-coherent accumulation cascaded clutter map iterativeness algorithm to suppress sea clutter. The technique suppresses sea clutter while saves target information effectively, which can primely realize dim target detection in sea clutter. Data simulation and experimental results proved the feasibility and efficiency of the technique.

Key words: sea clutter suppression; time-coherent characteristic; grouped non-coherent accumulation; clutter map iterativeness

0　引　言

在海用雷达应用环境中，暗礁、木质渔船等弱小目标隐匿在海杂波中难以探测，时常发生意外的撞击事故，给人民生命财产带来损失。因此，如何探测海面小目标已经成为海用雷达应用领域的研究热点[1-4]。

海面小目标探测的关键是抑制海杂波的同时保留目标信息。目前而言，国内外海用雷达技术日趋成熟，雷达频段一般覆盖范围为 UHF 波段～X 波段，作用距离不等，但缺点集中体现在目标提取技术落后，即在信号处理中广泛采用脉冲间非相参积累技术，在目标回波强度弱于海杂波的条件下，探测性能不佳甚至失效，难以完成对小目标的监视。

针对这一问题，通常的改进方法集中在发射前端上，譬如提高发射信号带宽、增大天线孔径等，改进后在一定程度上提升了回波信杂比，但硬件成本太高，且目标探测效果提升有限。此外，学者们也在通过改进信号和数据处理技术来改善海面小目标探测效果，比如海杂波重构、知识辅助、

收稿日期：2016-02-15；修回日期：2016-05-06
基金项目：科技合作项目(No.2015DFR10560)

检测前跟踪(Trace Before Detect, TBD)等[5-8],但上述技术目前仍停留在算法研究阶段,在实测环境下性能不佳,距离工程化应用还需要一定的时间。

本文提出了一种基于时间相关性的海面小目标检测技术,该技术利用了海杂波与目标在时间相关性上的差异,通过成组非相参积累级联杂波图迭代处理来抑制海杂波、增强小目标,并经自适应门限检测后完成目标提取。

1 海杂波的时间相关性

时间相关性是指同一个雷达距离单元上回波信号在时间测量上表现出的相似性,可通过分析目标和海杂波强度的自相关函数获得其相关系数和对应的相关时间,以获取目标和海杂波的时间相关性。

由于目标的回波强度主要受雷达发射功率、工作频率、极化方式、自身姿态等因素的影响,在雷达工作方式不变的条件下,海面小目标往往表现出较强的时间相关性,这是不可置否的。然而,海况和气象条件瞬息变化,海杂波的时间相关性较弱。

事实上,海面的后向散射特性与海情、风向、雷达频率、极化方式和入射角等因素息息相关。根据相关文献资料显示,起伏的海杂波信号由快起伏、慢起伏两个部分组成,快起伏部分由风的涟波形成,相关时间为 4～8 ms;而慢起伏部分与海浪的结构相关,相关时间较长,为 1～2 s。为了进行海杂波的时间相关特性验证,利用导航雷达平台在东海、黄海等多个海域进行长时间的 X 波段海杂波数据录取,录取条件如下:

(1) 雷达距海平面高度:7.5 m

(2) 温度:−5°～24°

(3) 风速:0～12 m/s

(4) 湿度:50%～85%

(5) 海情:1～4 级

该录取平台的信号带宽为 5 Hz,海杂波相关系数的数学表达式为

$$\rho(t)=\frac{\mathrm{cov}(x(T),x(T+t))}{\sqrt{Dx(T)}\times\sqrt{Dx(T+t)}} \tag{1}$$

式中,$\mathrm{cov}(x(T),x(T+t))$ 表示同一距离单元中不同时刻海杂波幅度的协方差,$Dx(T)$,$Dx(T+t)$ 表示海杂波幅度的方差。录取的海杂波数据分析显示:假定 $\rho=0.2$ 为相关条件,海杂波幅度的相关时间约为 8 ms。

从图 1 可以看出,I 路、Q 路相关系数差别不大,在主瓣区域,海杂波幅度的相关系数要略小于 I/Q 路的相关系数,在 $\rho\geqslant0.2$ 的范围内,相关系数随时间呈指数下降,当 $\rho<0.2$ 时,相关系数进入较长的衰减过程,但是波动范围较大,这时海杂波的时间相关性较弱。

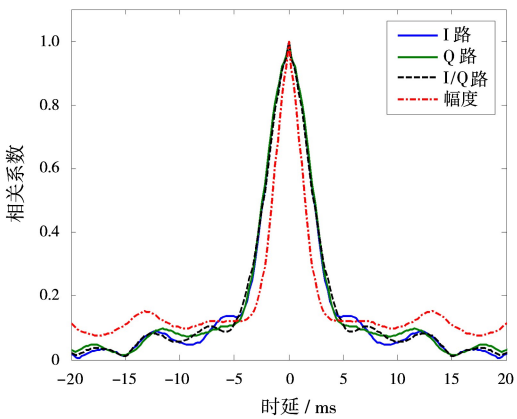

图 1 X 波段海杂波相关时间

2 基于时间相关性的目标检测技术

根据第 1 节的分析结果,海杂波相关时间约为 8 ms,故传统的脉冲间非相参积累处理无法有效抑制海杂波。倘若进行数据率在 125 s 以下的帧间积累方可实现海杂波抑制,能够有效提升回波信杂比,而普通海用雷达的最高转速为 120 r/min,满足数据率的要求。鉴于以上因素,本节提出了基于时间相关性的海面小目标检测技术。

基于时间相关性的目标检测技术在信号处理阶段实现,包括成组非相参积累级联杂波图迭代和自适应门限检测两个部分,下面逐一进行阐述。

2.1 成组非相参积累级联杂波图迭代技术

成组非相参积累级联杂波图迭代技术首先在脉冲间进行成组非相参积累,然后通过杂波图迭代完成帧间积累,增强时间相关性强的目标回波,抑制时间相关性弱的海杂波,大大提升了回波信杂比,有利于海面小目标检测。

(1) 成组非相参积累

成组非相参积累的实现方式是每个距离-方位

单元内若干个脉冲的原始回波数据为一组进行非相参积累运算，作为该距离-方位单元内的脉冲积累数据。假定搜索空域划分为 n 个距离单元、m 个方位单元，则成组非相参积累的数学表达式为

$$D_{n,m}=\frac{1}{J}\sum_{j=0}^{J-1}\max_{i=0,1,\cdots,I-1}(x_{n+i,m+j}) \tag{2}$$

式中，$D_{n,m}$ 为距离-方位单元(n,m) 内的脉冲积累数据，该距离-方位单元占有 I 个距离分辨单元和 J 个脉冲，$x_{n+i,m+j}$ 为该距离-方位单元内第 j 个脉冲、第 i 个距离分辨单元上的原始回波幅值。

从式(2) 不难看出，成组非相参积累首先进行距离分辨单元的回波幅值选大处理，以减小距离误差的影响，再进行若干个脉冲为一组的非相参积累运算。

(2) 杂波图迭代

接下来，将距离-方位单元作为杂波图单元，对每个杂波图单元内的脉冲积累数据 $D_{n,m}$ 进行杂波图迭代处理。杂波图迭代技术是美国学者 Nitzberg 在 1986 年提出的[9]。这种技术将雷达扫描空间分成有限个杂波图单元，根据多次扫描测量值获得杂波背景的强度估计，并根据新的和以前若干次扫描测量值的迭代来实现杂波图更新，作为当前杂波背景的强度估计，原理框图如图 2 所示。

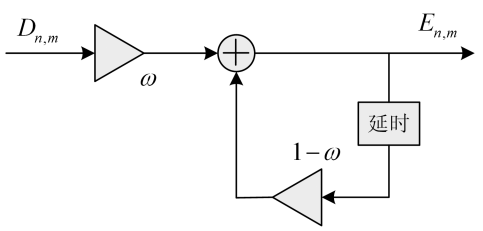

图 2　杂波图迭代技术原理框图

从图 2 可以看到，杂波图迭代采用一阶递归滤波器来实现，$D_{n,m}$ 为成组非相参积累处理后的脉冲积累数据，$E_{n,m}$ 为杂波图迭代处理后的帧间积累数据，其中加权系数 ω 的取值范围为 $0<\omega<1$。杂波图迭代的数学表达式如下：

$$E_{n,m}(l)=(1-\omega)E_{n,m}(l-1)+\omega D_{n,m}(l) \tag{3}$$

将式(3) 进行展开，得

$$E_{n,m}(l)=\omega\sum_{k=0}^{+\infty}(1-\omega)^k D_{n,m}(l-k) \tag{4}$$

式中，$E_{n,m}(l)$ 为杂波图单元(n,m) 内第 l 次扫描得到的迭代处理结果，ω 为加权系数，$D_{n,m}(l)$ 为该杂波图单元内第 l 次扫描的脉冲积累数据，是时变的。

事实上，在杂波图迭代处理的过程中，每个扫描周期内需要每个杂波图单元从乒乓缓冲存储器中读取以前若干个扫描周期的脉冲积累数据，最后输出杂波图迭代处理后的帧间积累数据到普通缓冲存储器中。

2.2　自适应门限检测器

在对原始回波数据进行成组非相参积累级联杂波图迭代处理后，形成二维杂波图数据平面。根据第 1 节所述，在真实海面环境下，海杂波幅度变化受气象条件、海况、雷达参数等因素影响，且不同扫描周期的海杂波与目标均存在时间相关性，造成杂波图数据平面中目标和海杂波起伏模型难以稳定描述，导致传统的参量或非参量 CFAR 检测器性能不佳，本小节提出一种适用于非均匀海杂波背景的自适应门限检测器。

自适应门限检测器采用非参量 CFAR 的思想，将被检测杂波图单元周围杂波(或噪声) 的数据作为对杂波(或噪声) 统计特性的某种估计，用来设置检测阈值。示意图如图 3 所示。

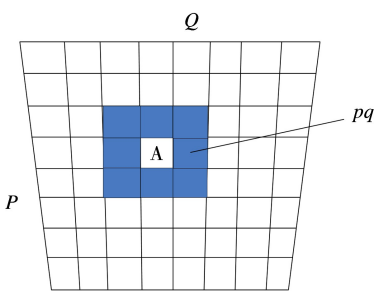

图 3　自适应门限检测器示意图

在图 3 中以被检测杂波图单元 A 为中心，阴影部分的 pq 个杂波图单元作为检测窗，不参与背景杂波功率估计，目的是为了防止目标信号泄露到背景单元中影响杂波功率估计，包含 $P\times Q$ 个杂波图单元的空间区域内其他杂波图单元用来估计被检测杂波图单元 A 所在位置的背景杂波图功率。那么，第 l 次扫描的检测阈值 $DT(l)$ 的数学表达式为

$$DT(l)=K\times\left(\frac{1}{C}\sum_{c=1}^{C}E_c(l)\right) \tag{5}$$

式中，$C=PQ-pq$，E_c 为第 l 次扫描中被检测杂波图单元 A 周围参与背景杂波功率估计的第 c 个杂波图单元，K 为修正系数。随着不同扫描周期杂波图数据平面的更新，阈值也在不断更新。

3 数据仿真与实测试验分析

本节首先通过仿真数据处理对成组非相参积累级联杂波图迭代算法进行验证，然后进行真实海面环境下的实测试验，以验证本文提出的基于时间相关特性的目标检测技术对海面小目标的探测性能。

3.1 数据仿真

根据意大利 IPIX 雷达设备参数进行数据仿真，原始海杂波数据的距离分辨率为 15 m，距离单元 28 个，录取时间 60 s，目标在第 25 个距离单元，信杂比约 2 dB，如图 4 所示。

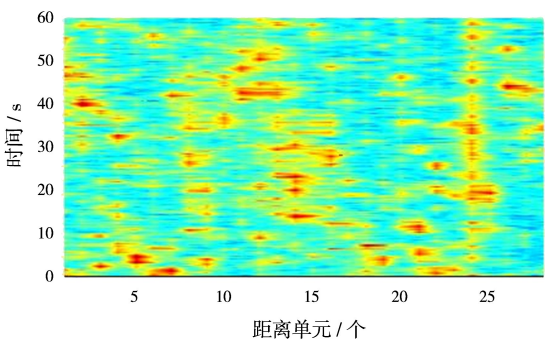

图 4 原始数据

在该算法处理过程中，成组非相参积累脉冲数目 J 为 2，杂波图迭代次数为 16，即采用 16 个扫描周期的脉冲积累数据完成帧间积累，经非相参积累级联杂波图迭代算法处理后，目标回波显著增强，但在其他距离单元上，依然存在一些尖峰，如图 5 所示。

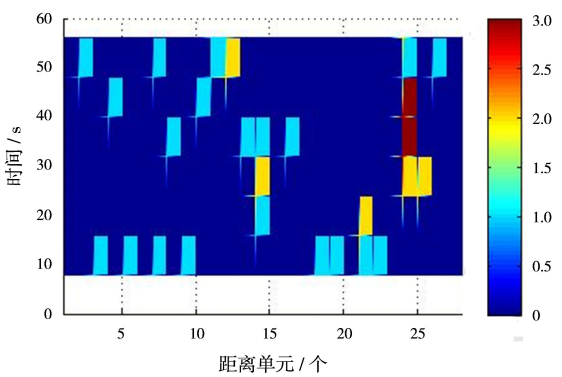

图 5 成组非相参积累级联杂波图迭代处理结果

然后，对图 5 所示的数据平面进行杂波图自适应门限检测处理，得到如图 6 所示的数据结果，第 25 个距离单元上的小目标被提取出来。

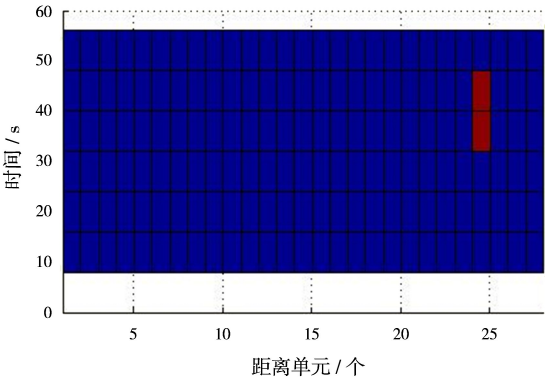

图 6 自适应门限检测后的结果

3.2 真实海面环境试验

本小节利用 X 波段导航雷达在黄海海域进行真实海面环境试验，根据第 2 节所述的信号处理技术来完成小目标探测性能验证，信号处理中的相关参数如表 1 所示。

表 1 信号处理相关参数

参数项	数 值
M	4 096
N	1 024
I	8
J	16
ω	0.8
P	10
Q	10
pq	8
K	1

试验条件如下：风力 5～6 级，海情可按 3 级估算，设备架高约为 10 m，一艘 RCS 约为 20 m^2 的木制渔船拖曳一个 RCS 约为 0.05 m^2 的标准发射体作为探测目标，朝向远离雷达的方向自由航行。试验场景如图 7 所示。

(a) 雷达架设

（b） 海面环境

图 7　试验场景

常规的海杂波抑制技术是非相参积累，采用常规技术处理后，海杂波依然较多，渔船和小目标淹没在海杂波中无法识别，如图 8 所示的视频，渔船和标准发射体目标在方框内，方框表示视频录取波门，仅波门内的点迹数据被检测录取。

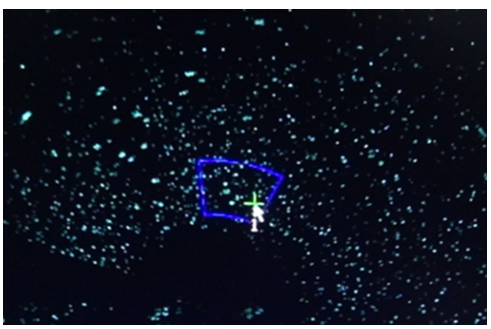

图 8　常规技术处理后的视频

采用本文所采用的成组非相参积累级联杂波图迭代技术处理后，海杂波被完全抑制掉，杂波图迭代次数为 16，如图 9 所示，方框中的强散射点即为渔船和标准反射体目标，方框外的其他散射点为渔网、航灯等固定目标。

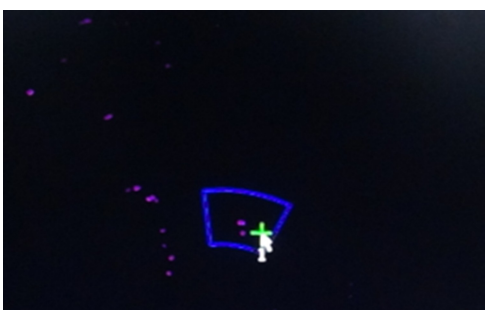

图 9　本文技术处理后的视频

综上所述，采用本文提出的技术进行对海探测，能够改善传统雷达信号处理方法的缺点，海杂波几乎被完全抑制掉，隐匿其中的小目标能够被正确提取。

4　结束语

本文针对海面环境下的小目标探测问题，分析了传统海用雷达的缺陷与不足，提出了一种基于时间相关特性的海面小目标检测技术，尤其是成组非相参积累级联杂波图迭代技术，仅通过改进后端的信号处理方法来实现海杂波抑制与目标信息提取。数据仿真与外场实测试验结果均证实了该技术的可行性和有效性，能够很好地完成海面小目标检测。

参考文献：

[1] CANDAN C. Analysis and Further Improvement of Fine Resolution Frequency Estimation Method from Three DFT Sample[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(9):913-916.

[2] 洪伟，李红虎. 一种舰载毫米波雷达海杂波背景下的慢速小目标检测算法研究[J]. 舰船电子对抗，2014，37(6):60-62，68.
HONG Wei, LI Honghu. Research into a Detection Algorithm of Shipborne Millimeter Wave Radar to Slow and Small Target in Sea Clutter Background[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014, 37(6): 60-62, 68. (in Chinese)

[3] 庞立伟，薛文虎，席泽敏，等. 用于强海杂波中目标检测的自适应波形设计算法[J]. 空军预警学院学报，2013，27(3):177-180.
PANG Liwei, XUE Wenhu, XI Zemin, et al. Algorithm of Adaptive Waveform Design for Target Detection in Strong Sea Clutter[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2013, 27(3):177-180. (in Chinese)

[4] 曾浩，李洁，鉴福升. 强海杂波环境下目标检测方法对比分析[J]. 雷达科学与技术，2015，13(1):33-36.
ZENG Hao, LI Jie, JIAN Fusheng. Comparative Analysis of Target Detection Methods in Strong Sea Clutter Background[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(1):33-36. (in Chinese)

[5] CAPRARO C T, CAPRARO G T, WICKS M C. Knowledge Aided Detection and Tracking[C]// IEEE Radar Conference, Boston, MA: IEEE, 2007: 352-356.

[6] EHRMAN L M, BLAIR W D. Using Target RCS when Tracking Multiple Rayleigh Targets[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2):701-716.

[7] CHEN Zhenxing, KONG Lingjiang. Maneuvering Target Tracking in Weibull Clutter with Amplitude Information[C]// IET Radar Conference, Glasgow UK:IET, 2012: 1-5.

[8] 苏洲阳,程婷,何子述. 一种三维弹道目标跟踪的粒子滤波方法[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(1):44-50.
SU Zhouyang, CHENG Ting, HE Zishu. A Particle Filter for 3D Ballistic Target Tracking[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(1):44-50. (in Chinese)

[9] NITZBERG R. Clutter Map CFAR Analysis[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(4):419-421.

作者简介:

司 军 男,1983 年生,安徽亳州人,2007 年毕业于哈尔滨工业大学,工程师,主要研究方向为阵列雷达设计和微弱目标检测。
E-mail:sijun723@163.com

赵中兴 男,1988 年生,河南平顶山人,工程师,主要研究方向为微弱目标检测。

吴 俭 男,1969 年生,广东人,研究员,主要研究方向为雷达系统总体设计。

洪 伟 男,1983 年生,湖北荆州人,工程师,主要研究方向为宽带信号数字波束形成、复杂信号分选和识别、微弱目标检测。

陈永森 男,1983 年生,河南信阳人,工程师,主要研究方向为数字阵列雷达系统设计及其应用。

(上接第 250 页)

[10] 王小平,曹立明. 遗传算法:理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002:108-109.

作者简介:

段亚楠 女,1991 年生于河北邯郸,电子科技大学电子工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为 SAR 雷达的信号处理。
E-mail:1490748531@qq.com

张晓玲 女,1964 年生于四川,电子科技大学工学博士学位,电子科技大学电子工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为 SAR 成像技术、雷达探测技术。

范小天 男,1990 年生于河南,电子科技大学电子工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为 MIMO-SAR 雷达的信号处理。

吴文俊 男,1991 年生于安徽,电子科技大学电子工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为 MIMO-SAR 雷达的信号处理。

(上接第 260 页)

[58] BAI X, XING M, ZHOU F, et al. Imaging of Micromotion Targets with Rotating Parts Based on Empirical-Mode Decomposition[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.

[59] BAI X, ZHOU F, XING M, et al. High Resolution ISAR Imaging of Targets with Rotating Parts[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4):2530-2543.

[60] BAI X, ZHOU F, XING M, et al. Micro-Doppler Analysis and Imaging of Air-Planes with Rotating Parts[C]// 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an:IEEE, 2009:610-613.

作者简介:

金 胜 男,1973 年 11 月生于江苏,副研究员,主要研究方向为雷达系统总体,雷达信号处理技术。
E-mail:jinsheng@bittt.cn

朱天林 男,1967 年 1 月生于湖北,研究员,主要研究方向为雷达系统总体、数据处理技术。