

文章编号: 2095-4980(2023)01-0030-06

基于检测前识别的 MTS-CFAR 检测方法

汪亚东, 胡文, 王启霞, 张弓

(南京航空航天大学 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 在复杂的强地杂波中检测静止目标时极易产生漏检, 因此一直是检测领域中的难题。在双参数恒虚警(DP-CFAR)检测方法的基础上提出了基于检测前识别的多时间尺度恒虚警(MTS-CFAR)检测方法。在检测前基于各类型目标在多时间尺度统计结果上的不同, 区分和识别运动目标、静止目标和杂波, 减少杂波统计量和目标统计量的干扰, 提高对静止目标的检测性能。以交通雷达应用为背景, 通过仿真和实测数据定量分析和对比了 MTS-CFAR、DP-CFAR、截断统计量恒虚警、改进型单元平均恒虚警等检测算法的性能, 证明了本文算法对于静止目标检测效果的优越性和工程应用价值。

关键词: 强地杂波; 时间统计; 双参数恒虚警; 目标检测; 检测前识别

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020636

A method of Multi-Time-Scale Constant False Alarm Rate detection based on pre-detection identification

WANG Yadong, HU Wen, WANG Qixia, ZHANG Gong

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics of the Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: The miss detection is liable to occur when detecting stationary targets in complex strong ground clutter. Based on the Double-Parameter-Constant-False-Alarm-Rate(DP-CFAR) detection method, this paper proposes a Multi-Time-Scale Constant False Alarm Rate(MTS-CFAR) detection based on pre-detection recognition. Before the detection, based on the difference in the multi-time-scale statistical results of various types of targets, the moving targets, stationary targets and clutter are distinguished and identified, the interferences of clutter statistics and target statistics are reduced, and the detection performance of stationary targets is improved. Based on the application of traffic radar, the performance of MTS-CFAR algorithm and DP-CFAR, TS-CFAR and CAG-CFAR are analyzed and compared quantitatively through simulation and measured data, which proves the superiority and engineering application value of static target detection of the proposed algorithm.

Keywords: strong ground clutter; time statistics; Double Parameter Constant False Alarm; target detection; identification before detection

现如今雷达所面临的检测环境愈发复杂多变, 无论是车辆缓停在交通路口还是无人机的超低空悬停, 对此类特定目标的检测都属于在强地杂波干扰的复杂环境下检测静止目标的问题^[1-2]。由于强地杂波大多集中在多普勒零频率附近, 与静止目标在多普勒域重合, 无法利用传统的动目标检测技术进行区分。而且城市、山地等复杂地形的地杂波强度通常大于或远大于目标反射强度, 目标很容易被掩盖在杂波背景下, 导致传统检测技术难以适用, 因此如何在此类环境下稳定有效地实现检测显得愈发重要^[3-4]。

尽管很多恒虚警方法对运动目标和静止干扰目标可以做出有效区分^[5-7], 但一般都是针对单个参数进行的统计或改进, 往往会将静止的真实目标也作为干扰目标一并滤除。同时杂波通常在空间中不服从同一分布, 此时依据其分布特性得出门限的方法^[8-9]不再适用, 本文采用可以适应背景杂波的变化, 自适应地提供相应门限的 DP-CFAR 检测器^[10-11]。结合近年来由跟踪前检测而引申出来检测前跟踪的概念^[12-14], 本文类比检测前跟踪提出了检测前识别的概念, 利用对背景环境的杂波统计提出基于检测前识别的多时间尺度双参数恒虚警检测方法, 通过对目标进行初步

检测与识别，区分目标类型与杂波信息，利用识别的结果进行反馈，用基于时间尺度与反馈系统结合的循环检测器结构来提升检测效果，使得在强杂波环境下的静止真实目标也可以被有效检测，同时规避了干扰目标带来的影响。

1 基于检测前识别的 MTS-CFAR 检测算法分析

1.1 DP-CFAR 算法基本流程

传统 DP-CFAR 算法流程包括图像数据导入、设计滑窗、边缘赋值以及目标判决 4 个部分。检测时需要利用滑窗对图像数据内的分辨单元进行逐点判决，滑窗由目标窗口、保护窗口和背景窗口三部分组成^[15]。其中目标窗口内是待检测的点，背景窗口用于获取背景信息，保护窗口用于确保目标所在区域不被背景窗口所覆盖^[16]。

DP-CFAR 检测算法的重点在于背景窗口上均值和标准差的计算，统计二维图像数据里背景窗口所对应的数据，计算其均值与标准差，当背景窗口随滑窗移动时所统计的数据随之变化。DP-CFAR 检测时图像数据用于阈值门限检测的背景窗口均值和标准差计算方法为：

$$\mu_b = \sum_{i=1}^N x_i / N \quad (1)$$

$$\sigma_b = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\mu_b - x_i)^2 / N} \quad (2)$$

式中： N 为背景窗口的总点数； x_i 为第 i 个点的数值大小； μ_b 为背景窗口均值； σ_b 为背景窗口的标准差。

将 DP-CFAR 检测下的目标窗口的均值与背景窗口均值作差值，并除以背景窗口标准差，将结果与阈值门限作比较，判决目标窗口内的点是否为目标点：

$$(\mu_c - \mu_b) / \sigma_b > t \quad (3)$$

式中： μ_c 为目标窗口的均值； t 为标称因子，经验值为 2~3。若满足式(3)，则输出 1 表示有目标，反之输出 0 表示没有目标。

1.2 MTS-CFAR 检测算法基本流程

考虑到临时静止的目标在短期内会抬高其目标窗口所在区域的均值，但长期统计其目标窗口的均值仍处于一个合理范围，而干扰目标的长期存在会导致其目标窗口所在区域的统计均值明显高于没有干扰目标的区域，因此基于检测前识别的 MTS-CFAR 检测算法把多时间尺度统计和背景杂波统计考虑进来，将传统 DP-CFAR 的结果结合短时间统计和长时间统计下的 CFAR 结果，通过不同类型目标在不同时间尺度下的检测结果的差异进行区分。具体实施步骤为：

- 1) 计算当前帧目标窗口的均值 μ_c 、背景窗口的均值 μ_b 和标准差 σ_b ；
- 2) 计算短时间统计下目标窗口的均值 μ'_c 、背景窗口的均值 μ'_b 和标准差 σ'_b ；
- 3) 计算长时间统计下目标窗口的均值 μ''_c 、背景窗口的均值 μ''_b 和标准差 σ''_b ；
- 4) 分别对不同时间尺度下的目标窗口进行检测，从 3 种检测的初次判决的结果中识别运动目标、静止目标、干扰目标与杂波；
- 5) 根据目标类型把目标窗口中会影响检测效果的部分真实目标对应的区域剔除后，对目标窗口中剩余的分辨单元均值和标准差计算结果反馈给短时间统计双参数恒虚警(Short Time Statistical Double Parameter Constant False Alarm Rate, SSDP-CFAR)中下一帧的背景窗口均值和标准差的计算；
- 6) 根据目标类型把目标窗口中会影响检测效果的部分物体对应的图像区域剔除后，对目标窗口中剩余的分辨单元均值和标准差计算结果统计到多帧目标窗口均值和标准差的平均值中，再将统计的结果反馈给长时间统计双参数恒虚警(Long Time Statistical Double Parameter Constant False Alarm Rate, LSDP-CFAR)中下一帧的背景窗口均值和标准差的计算。

SSDP-CFAR 检测时用于判决的均值和标准差除第 1 帧图像数据是直接进行 DP-CFAR 检测外，从第 2 帧图像数据开始考虑短时间统计下的均值和标准差，第 p 帧图像数据用于阈值门限检测的均值和标准差均由当前滑窗的背景窗口的均值和标准差与前 $p-1$ 帧时间统计下的均值和标准差加权求得。第 p 帧用于阈值门限检测的背景窗口均值和标准差为：

$$\mu'_b = k \times \sum_{i=1}^{p-1} \mu_i / (p-1) + (1-k) \times \mu_{bp} \quad (4)$$

$$\sigma_b' = k \times \sum_{i=1}^{p-1} \sigma_i / (p-1) + (1-k) \times \sigma_{bp} \tag{5}$$

式中： μ_{bp} 为第 p 帧图像数据的背景窗口均值，计算方法与式(1)相同； μ_i 为第 i 帧目标窗口的均值； μ_b' 为短时间统计下用于阈值门限检测的背景窗口均值； σ_{bp} 为第 p 帧图像数据的背景窗口标准差，计算方法与式(2)相同； σ_i 为第 i 帧目标窗口的标准差； σ_b' 为短时间统计下用于阈值门限检测的背景窗口标准差， k 为 0.7~0.99 的一个固定权值系数， $p \geq 2$ 。

LSDP-CFAR 时用于判决的均值和标准差除第一帧图像数据是直接进行 DP-CFAR 检测外，第 p 帧图像数据用于阈值门限检测的背景窗口均值和标准差的理论计算方法为：

$$\mu_b'' = k' \times \bar{\mu}_{bn} + (1-k') \times \mu_{bp} \tag{6}$$

$$\sigma_b'' = k' \times \bar{\sigma}_{bn} + (1-k') \times \sigma_{bp} \tag{7}$$

式中： $\bar{\mu}_{bn}$ 为 n 帧目标窗口所统计的均值， n 趋于无穷大； μ_b'' 为理想条件下用于长时间统计下阈值门限检测的背景窗口均值； $\bar{\sigma}_{bn}$ 为 n 帧目标窗口所统计的标准差， n 趋于无穷大； σ_b'' 为理想条件下用于长时间统计下阈值门限检测的背景标准差； k' 为 0.7~0.99 的一个固定权值系数， $p \geq 2$ 。

不同时间尺度下的判决方式都如式(3)所示，因此 3 种方法对于每一个目标窗口内的点会产生各自的判决结果。显然传统 DP-CFAR 无论对于何种目标都会做出有效检测，但也因此会将干扰目标误判为真实目标而导致虚警。短时间统计运用了当前帧及其之前几帧乃至数十帧的数据进行分析，随着帧数逐渐累积，临时静止目标和干扰目标会逐渐被滤除，只在最初几帧数据时会被检测到。长时间统计运用了 n 帧所统计的均值和标准差，且 n 趋于无穷大，即拥有对于背景环境的杂波统计，因此干扰目标由于其背景均值很大且标准差很小，会被有效滤除，但临时静止目标由于静止帧数有限，对整体背景杂波统计影响很小，不会被滤除。将所有判决可能出现的情况列出，见表 1。

表 1 多时间尺度判决规则

Table1 Multiple time scale decision rule

different time scale	decision under different methods							
DP-CFAR	0	0	0	0	1	1	1	1
SSDP-CFAR	0	0	1	1	0	0	1	1
LSDP-CFAR	0	1	0	1	0	1	0	1
comprehensive judgment result	0	\	\	\	0 (interfere target)	1 (temporary stationary target)	0 (interfere target)	1 (conventional target)

对任意分辨单元进行目标判决后，根据逻辑判决器输出的目标类型，将目标窗口中部分目标对应的图像区域(如静止目标)数据予以滤除，保留剩余的图像数据，利用剩余的数据计算该分辨单元背景窗口的均值和标准差。对于 SSDP-CFAR 直接将结果反馈到下一帧的背景窗口均值和标准差的计算，由式(4)、式(5)的反馈公式可知，总帧数有限时当前帧仍占有一定比例，因此将反馈的加权值设为 0.8 来保证短时间尺度积累的合理性。对于 LSDP-CFAR 需要将结果统计到多帧的平均值中再反馈到下一帧的背景窗口均值和标准差的计算，反馈公式见式(6)、式(7)。由于 LSDP-CFAR 中总帧数足够，当前帧占比极小，因此将反馈的加权值设为 0.9 即可满足反馈需要，反馈系统具体流程图如图 1 所示。通过上述流程即可完成对导入数据的基于检测前识别的 MTS-CFAR 检测。

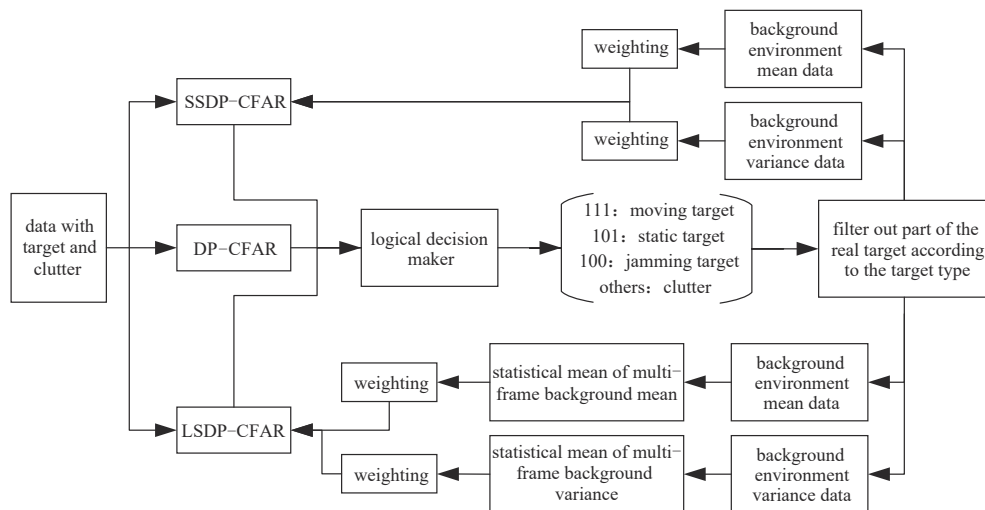


Fig.1 Feedback system of MTS-CFAR
图 1 MTS-CFAR 的反馈系统

2 仿真与性能分析

本文仿真部分在第 50 个距离单元分别设置了长期静止的干扰点目标、临时静止的真实点目标和运动的真实点目标，经过不同检测器处理后的检测门限分布如图 2 所示。

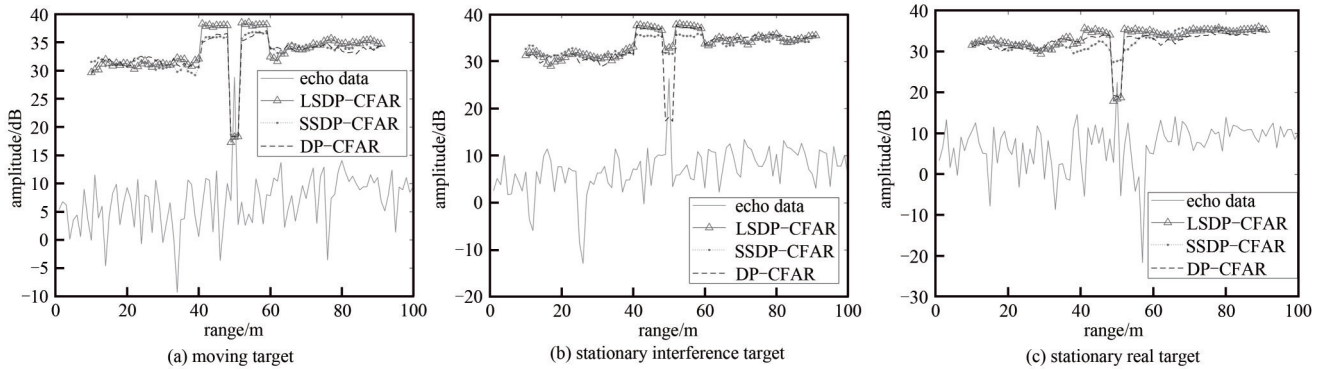


Fig.2 Detection threshold distributions of different statistical filters for different types of targets

图 2 不同统计滤波器对不同类目标的检测门限分布

从检测结果可以看出，DP-CFAR 对于 3 种目标都会检测出来；短时间统计因为帧间关联的数据不够多且集中在当前帧的前几帧至几十帧数据，所以随着帧数的累加会逐渐抬高对于静止目标的阈值，但无法区分长期静止的干扰目标和临时静止的真实目标，阈值的抬高会导致对于临时静止目标的漏检；长时间统计因其统计时间足够长，积累的数据足够多，对长期静止的干扰目标可以有效滤除，同时保留临时静止的真实目标和运动的真实目标。

3 实测结果分析

为了验证本算法的有效性以及在适用环境下的优越性，将参考文献[5-6]提出的截断统计量恒虚警(Truncated Statistic Constant False Alarm Rate, TS-CFAR)检测器和基于格拉布准则的改进单元平均恒虚警(Grubbs Criterion Cell Averaging Constant False Alarm Rate, CAG-CFAR)检测器运用于车辆的实测数据中与本文算法进行对比。

表 2 MIMO 系统参数

Table2 MIMO system parameters

carrier frequency/GHz	pulse width/ μ s	bandwidth/MHz	number of transmitting antennas	number of receiving antennas	number of pulses sampling	number of pulses
60	50	540	3	4	64	128

车辆实测数据通过 TI 公司的 XWR6843 板卡采集，系统参数见表 2。对于车辆的检测选取了四车道下的交通路口数据，将回波采集后进行信号处理形成多帧数据。本文选取了同一帧下不同算法的检测结果，如图 3 所示，左上角的目标为车道线外的背景中的干扰目标，最右侧车道存在一辆从检测开始就已静止的车辆，可以看出图 3(a)对真实目标都可以检测出来；图 3(b)对干扰目标和真实目标都检测了出来；图 3(c)和图 3(d)虽然滤除了干扰目标，但是对于静止车辆做不到有效检测。

对多帧数据中的 150 个目标在不同 CFAR 下的实测结果进行统计，结果见表 3。

表 3 不同 CFAR 的实测结果统计

Table3 Statistics of measured results of different CFAR

detecting algorithm	correct target number	residual number	false-alarm number	leakage alarm rate/%	false alarm rate/%
DP-CFAR	147	3	11	2.00	6.96
TS-CFAR	144	6	1	4.00	0.69
CAG-CFAR	143	7	2	4.67	1.38
MTS-CFAR	148	2	1	1.33	0.67

通过 MTS-CFAR 进行检测的算法可以有效滤除干扰目标，检测概率明显提升。2 种对比算法与 MTS-CFAR 比之 DP-CFAR 的虚警率都明显降低，但 2 种对比算法也会因为漏掉静止时间较长的真实目标，从而导致漏警，对交通路口的停车检测效果不够理想，可以判断堵车时的漏警率会进一步抬升。综合检测结果来看，在该背景环境下 MTS-CFAR 对真实目标的检测效果最佳。

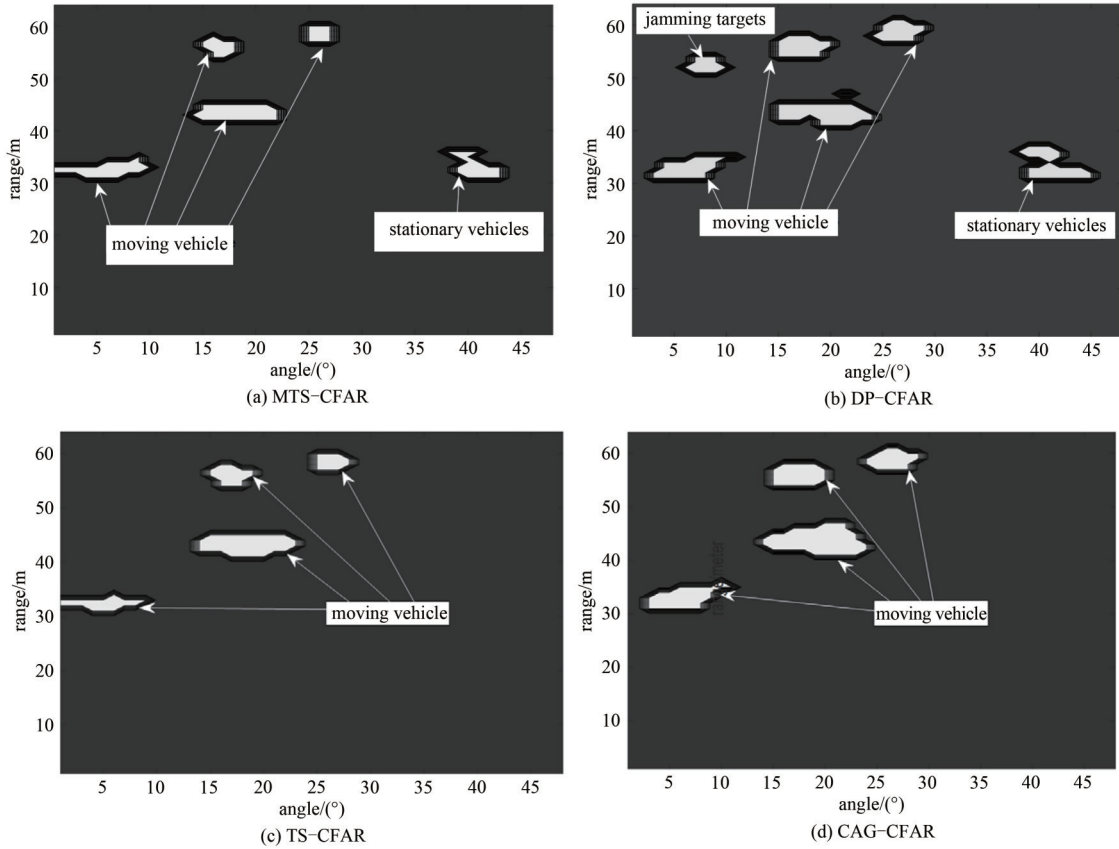


Fig.3 False alarm rate under different conditions

图3 同一帧数据下不同算法车辆检测效果

实测场景如图4所示,通过实测结果可知,MTS-CFAR检测算法可以有效滤除干扰目标;DP-CFAR会将干扰目标也检测到从而导致虚警;2种对比算法会因为漏掉静止时间较长的真实目标,从而导致漏警,对道路路口的停车检测效果不够理想,可以判断堵车时的漏警概率会进一步抬升。综合检测结果来看,在该类背景环境下MTS-CFAR对真实目标的检测效果最佳。

4 结论

本文研究了一种基于检测前识别的多时间尺度恒虚警检测方法,目的是为了消除在检测范围内的背景杂波和干扰目标,同时保留运动目标和临时静止目标,对长时间存在的静止干扰物体的滤除效果好,对短时间内存在的静止真实目标可以有效保留,在固定的应用场景下效果尤为明显,具有很高的实时性、通用性和简捷性。最后通过仿真和实测数据对比了本文方法与传统DP-CFAR、TS-CFAR和CAG-CFAR检测算法的异同,验证了本文方法的优越性和工程应用价值。

参考文献:

- [1] JALIL Ahsan, YOUSAF Hassan, BAIG Muhammad Iram. Analysis of CFAR techniques[C]// International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology. Islamabad, Pakistan: IEEE, 2016: 654-659.
- [2] MAMGAIN Reena, JAIN Rashi, DEB Debasish, et al. Two level CFAR algorithm for multiple target detection[C]// International Conference for Convergence in Technology. Pune, India: IEEE, 2018: 1-4.
- [3] YANG Xiaoliang, WEN Gongjian, MA Conghui. CFAR detection of moving range-spread target in white Gaussian noise using waveform contrast[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(2): 282-286.
- [4] JIN Yuanwei, FRIEDLANDER Benjamin. A CFAR adaptive subspace detector for second-order Gaussian signals[J]. IEEE

Fig.4 Traffic radar measurement scenario
图4 交通雷达实测环境

- Transactions on Signal Processing, 2005,53(3):871–884.
- [5] TAO Ding, ANFINSEN Stian Normann, BREKKE Camilla. Robust CFAR detector based on truncated statistics in multiple-target situations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016,1(54):117–134.
- [6] ZHOU Wei, XIE Junhao, XI Kun, et al. Modified cell averaging CFAR detector based on Grubbs criterion in non-homogeneous background[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019,1(13):104–112.
- [7] WANG C Y, PAN R Y, LIU J H. Clutter suppression and target detection based on biparametric clutter map CFAR[C]// IET International Radar Conference. Hangzhou, China: IET, 2015, 14–16.
- [8] 樊小倩. 自适应恒虚警算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014. (FAN Xiaoqian. Research on adaptive constant false alarm algorithm[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.)
- [9] 刘长远, 马俊虎, 甘露. 基于压缩感知的 CFAR 目标检测在机会雷达中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(4): 630–636. (LIU Changyuan, MA Junhu, GAN Lu. Application of CFAR target detection based on compressed sensing in opportunity radar[J]. Terahertz Journal of Science and Electronic Information, 2018, 16(4):630–636.) doi:10.11805/TKYDA201804.0630.
- [10] EL-DARYMLI Khalid, MCGUIRE Peter, POWER Desmond, et al. Target detection in synthetic aperture radar imagery: a state-of-the-art survey[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1):1–35.
- [11] NALDI M. False alarm control and self-masking avoidance by a Double Parametric clutter map in a mixed interference environment[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar & Navigation, 1999, 146(4):195–200.
- [12] 石志广, 周剑雄, 张焱. 图像目标检测前跟踪的广义多伯努利滤波算法[J]. 红外与毫米波学报, 2018(3):371–377, 384. (SHI Zhiguang, ZHOU Jianxiong, ZHANG Yan. A generalized multi-Bernoulli filtering algorithm for image target tracking before detection[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2018(3):371–377, 384.)
- [13] WEN Ming, YI Wei, LI Wujun. Multi-frame track-before-detect algorithm for disambiguation[J]. The Journal of Engineering, 2019, 21(11):7726–7729.
- [14] ÚBEDA-MEDINA Luis, GARCÍA-FERNÁNDEZ Ángel F, GRAJAL Jes ú s. Adaptive auxiliary particle filter for track-before-detect with multiple targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(5):2317–2330.
- [15] 张临杰, 张杰, 张晰, 等. 任务分配均衡的双参数 CFAR 舰船检测并行算法[J]. 遥感学报, 2016, 20(2):344–351. (ZHANG Linjie, ZHANG Jie, ZHANG Xi, et al. A two-parameter CFAR parallel algorithm for ship detection[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2):344–351.)
- [16] 刘伊丽, 张临杰, 张晰, 等. 双参数 CFAR 舰船检测算法两种实现方法之分析与比较[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017(A1):136–142. (LIU Yili, ZHANG Linjie, ZHANG Xi, et al. Analysis and comparison of two implementation methods of two-parameter CFAR ship detection algorithm[J]. Journal of Ocean University of China(natural science edition), 2017(A1):136–142.)

作者简介:

汪亚东(1997–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达波形设计与信号处理. email: wyd0322@foxmail.com.

王启霞(1996–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达阵列信号处理.

胡文(1979–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为混沌神经网络、雷达信号处理.

张弓(1963–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理、目标探测与识别、图像分析与处理.