



恒虚警技术处理方法综述

李 丽¹, 王晓玲¹, 桂 杰², 周哲海¹

(1. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室 北京 100192;
2. 北京聚利科技股份有限公司 北京 102206)

摘 要: 恒虚警技术是指采用相关算法根据杂波环境变化而自适应地改变判别门限, 以保证检测概率的最大化以及恒定的虚警率, 其在雷达目标检测领域得到广泛应用, 如预警、目标搜索跟踪、成像、火控、制导、船舶导航、智能交通等方面。算法是恒虚警技术的核心, 也是该技术发展和应用的关键。简单介绍了恒虚警算法的发展历程, 综述了传统恒虚警算法的发展及其适用条件和最近几年发展及应用较为活跃的智能恒虚警算法。

关键词: 恒虚警率; 算法; 目标检测

中图分类号: TN957. 51 文献标识码: A DOI 编码: 10. 14016/j. cnki. jgzz. 2018. 01. 008

Processing method of constant false alarm rate technology

LI Li¹, WANG Xiaoling¹, GUI Jie², ZHOU Zhehai¹

(1. Beijing Key Laboratory for Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
2. Beijing Juli Science&Technology Co., LTD, Beijing 102206, China)

Abstract: Constant False Alarm Rate (CFAR) technology can set threshold adaptively according to different clutter environment by relevant algorithms to ensure the maximum probability of detection and CFAR. It has been widely used in the field of radar target detection, such as early warning, target searching and tracking, imaging, fire control, guidance, ship navigation, intelligent transportation, etc. Algorithm is the core of CFAR, and also the key to its development and application. This paper summarizes the development of the traditional CFAR algorithm and its application conditions, as well as the intelligent CFAR algorithms which have comparatively active progress and application.

Key words: CFAR; algorithm; target detection

1 引言

恒虚警技术是一种通过相关算法来保证在目标检测过程中检测概率最大化, 以及恒定的虚警率的技术。一般而言, 目标总是处在像地物、雨雪、海浪杂波以及接收机内部噪声^[1]等之类的干扰中, 在检测目标存在与否时, 应提前设置一个检测门限, 如果门限固定, 在非平稳杂波环境下, 背景杂波平均功率有所上

升时, 虚警概率会上升, 以致于计算机处理能力饱和, 影响雷达系统的正常工作, 因此非常有必要研究恒虚警技术, 该技术可以根据杂波环境变化自适应地改变检测门限, 提高检测目标的能力。20 世纪 60 年代末, H M Finn 等提出一种经典的恒虚警算法, 其通过被检测单元两侧的参考单元的均值来估计背景杂波的功率, 称为单元平均 CA(Cell Averaging) 算法, 该算法在均匀的杂波背景情况下性能最优, 自此, 恒虚警技术得到了广泛关注, 该技术可以根据杂波变化相应地改变检测门限, 在雷达目标检测领域如预警、目标搜索跟踪、成像、火控、制导、船舶导航、智能交通等方面得到广泛应用^[2-5]。算法是恒虚警技术的核心问题, 也是其研究的主要内容, 从恒虚警技术提出到现在, 恒虚警算法得到很多学者及研究人员的重视, 与此同时也产生了非常重要的研究成果。

收稿日期: 2017-09-11

基金项目: 企业合作项目“微波雷达关键技术研究”; 国家自然科学基金项目(No. 61475021); 北信科大勤信人才培养计划项目(No. QXTCP201701)

作者简介: 李丽(1991-), 女, 河北省石家庄市人, 硕士, 主要研究方向为雷达检测技术。E-mail: 1974528029@qq. com

通信作者: 王晓玲(1968-), 女, 内蒙古包头市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为纳米光学器件设计与制作、光纤光学以及光纤传感技术的应用研究。E-mail: wangxiaoling@bistu. edu. cn

[http : //www. laserjournal. cn](http://www.laserjournal.cn)

简述恒虚警算法的发展历程, 探求其发展规律; 同时阐述了传统恒虚警技术以及恒虚警技术未来发展方向——智能多策略 CFAR 算法; 为恒虚警技术的进一步发展应用提供新的思路, 并推动该技术在多个领域的应用进程。

2 恒虚警技术综述

恒虚警技术的算法研究始于均值类(ML) CFAR 处理方法。作为 ML 类 CFAR 算法中最经典的 CA-CFAR 方法, 其优缺点如表 1 表述, 为克服其缺点, 相继出现了很多其它算法, 其发展历程可简略为图 1。

图 1 中描述的 CA-CFAR、GO-CFAR、SO-CFAR 以及 OS-CFAR 这些算法都属于空域 CFAR 算法, 其仅适用于杂波在空域上比较平缓的情况; 当杂波在空域上变化剧烈时, 传统的空域算法会因可用参考单元数目少出现 CFAR 损失增大的问题。但如果此时同一距离单元的杂波在时间上变化是平缓的, 时序 CFAR 处理方法是一种很好的选择。杂波图法最早于 1986 年被 Nitzberg 等人提出, 其可以很好地解决以上 CFAR 损失问题。随后将各种智能优化算法应用在恒虚警算法中的方法也层出不穷, 如遗传算法和粒子群算法^[6]、模拟退火法^[7]。

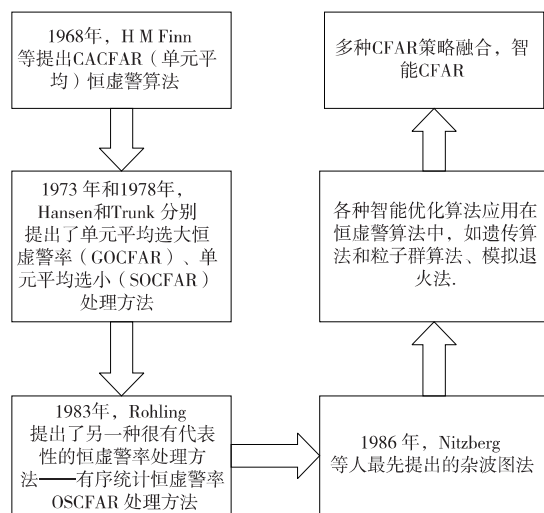


图 1 恒虚警技术大体发展历程

近几年研究人员提出了很多恒虚警算法, 表 1 列出了几种典型算法的优缺点, 由于每种算法的应用场合通常具有局限性, 目前还没有出现可以同时解决所有问题的方法, 随着信号杂波背景的复杂性和不确定性增加, 出现了很多问题, 因此带动了新算法的研究。

表 1 典型恒虚警算法优缺点

算法	优点	缺点
单元平均恒虚警率(CA-CFAR)	在杂波背景均匀情况下检测性能良好。	在多目标、杂波边缘情况下, 检测性能变差。
平均选小恒虚警率(SO-CFAR)	在多目标情况下检测性能良好。	在杂波边缘情况下虚警率升高。
平均选大恒虚警率(GO-CFAR)	具有很好地抗边缘杂波能力。	多目标情况下容易造成漏警, 检测性能下降。
排序统计恒虚警率(OS-CFAR)	具有很好的抗杂波边缘能力, 在多目标情况检测性能良好。	受 K 值影响大, 因此恒虚警损失较大; 排序过程耗时, 系统实时性下降, 硬件要求高。

3 传统恒虚警算法

恒虚警处理是一个动态的过程, 它的门限值是一个随机变量, 与当前杂波背景功率的估计值 Z 有关^[8], 由于估计杂波功率的方法多样化, 对应形成了多种恒虚警方法。

3.1 ML 类 CFAR

ML-CFAR 均值类算法主要包括 CA-CFAR、GO-CFAR、SO-CFAR 三种。这些算法分别通过对前后参考单元均值进行求和、取大、取小处理得到杂波功率水平估计值 Z 。然后将估计值 Z 与门限因子 T 相乘后与门限阈值 VT 相比较, 大于门限阈值时表明有目标存在, 小于该门限阈值则没有目标存在。

均值类中恒虚警算法^[9]通常都在某种特定场合下才会有很好的检测性能, 三种基本算法的特点在表 1 中已经表述。

3.2 OS 类 CFAR

OS-CFAR 是一种排序统计类恒虚警算法, 其杂波功率是以排序后的参考单元的第 K 个值为依据来进行评估, 其优缺点如表 1 所述。为了改善其性能, 针对其两大缺点, 在 OS-CFAR 的基础上又衍生出许多算法。

其中删除平均(CMLD) 和削减平均(TM) 技术^[10]为了让更多的参考样本得到应用、降低恒虚警损失, 运用了预先筛选删除相应样本的方法; 该方法同时也很好的保证了在多目标环境下的优良检测性能^[10]。

为了解决其排序时间长造成的实时性问题, 通过在 CFAR 检测器中运用自动筛选技术^[11], 形成了一

类称为广义有序统计(GOS) 类的 CFAR 检测器;

刘超等人对 OS-CFAR 检测器的排序部分做出了改进,降低了算法的复杂度,提高了系统的实时性^[12];

刘忠祥^[13]等人提出了一种基于 FPGA 的二维 OS-CFAR 算法,其在多目标以及动态杂波环境中,具有较强的抗干扰目标的能力,采用并行寻址以及二元积累判决等结构解决了参考单元寻址困难以及排序运算计算量大、耗时长、实时性不高等问题;杨光^[14]等人提出的 OSGO-CFAR 算法,通过合理的资源优化及流水设计解决了该算法排序计算量较大的问题,同时很好地解决了多目标环境中小目标被遮挡的问题。

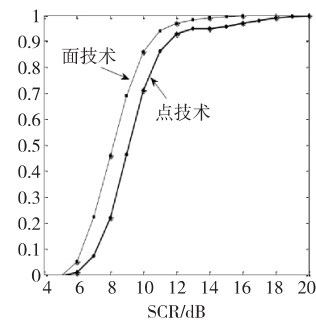
4 智能型 CFAR 恒虚警算法

传统的恒虚警技术一般是在某个特定的杂波环境下表现出较好的检测性能,但是由于在实际应用中杂波环境比较复杂,其不能兼顾多种杂波环境,检测性能会下降。因此,综合基本 CFAR 算法的各种优点从整体上改善性能成为必要,多种策略融合的检测器是未来恒虚警检测器的发展趋势,其可以依据不同杂波环境而自主选择相应合适的算法进行恒虚警检测。本部分重点介绍以下三种有代表性的智能性 CFAR。

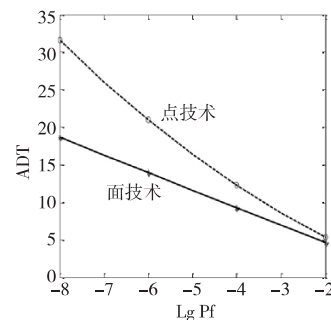
4.1 杂波图与 ML 类结合

当杂波变化比较剧烈时,均值类算法(ML-CFAR) 容易出现虚警或漏警,针对此问题, Nitzberg 等人提出了经典了杂波图 CFAR^[15-16] (Clutter - Map CFAR, CM-CFAR), 又称为杂波图 CFAR 点技术。一般而言,杂波具有时域平稳性,该技术背景杂波功率以多次连续扫描测量值的均值作为参考,依据判决准则来完成检测,该技术为杂波在空间距离单元上非平稳的情况下检测提供了处理方法。该方法存在的问题是空域处理时未将被检测单元附近的信息加以利用,背景杂波的功率基本上仅靠时域处理来估计。文献[17]中黄红平等人提出杂波图 CFAR 面技术,又可称为 CA-CM-CFAR (Cell - average Clutter - map CFAR), 该方法将均值类检测器临近单元的思想与杂波图在空域处理时相结合,背景杂波的功率还会利用被检测单元周边杂波图的信息,然后再进行时域处理,这样同时包含有距离和方位信息。文献[18]中吴静等人依次对杂波图 CFAR 点技术和面技术做了仿真研究,图 2 展示了检测器衰减因子 $w = 1.25$ 时点技

术和面技术检测概率的比较以及二者平均检测门限阈值(Average Detection Threshold, ADT) 的比较。



(a) $w = 1.25$ 时的检测概率比较



(b) ADT 值的比

图 2 杂波图面技术和点技术性能对比

显然,ADT 的值与检测性能成反比。由图 2 可知相同条件下杂波图 CFAR 面技术相对杂波图点技术具有更好的检测性能。

樊小倩^[19]提出一种自适应恒虚警算法,其通过将均值类算法中三种基本算法与杂波图技术结合实现,实现框图如图 3。每个单元的杂波的功率值可以通过一阶递归滤波器得到,其中每个杂波图单元存储的是杂波所在的多普勒通道的该单元的杂波功率估计值。该一阶递归滤波器的表达式如式(1)。

$$\hat{p}_n(k) = (1-\omega)\hat{p}_{n-1}(k) + \omega q_n(k) \quad (1)$$

为了对杂波均匀性做出判断,以便对不同区域选用对应的恒虚警处理方法,要对每个多普勒通道的每个方位单元上的杂波沿着距离做一阶前向差分运算,其结果就是杂波均匀性判断的依据。

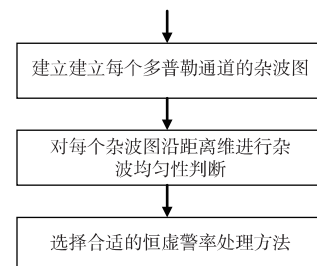
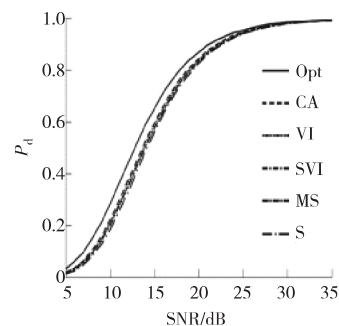


图 3 自适应恒虚警处理方法的实现框图

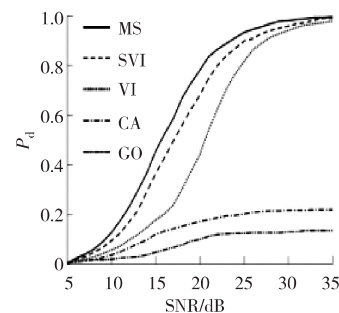
4.2 变指数 VI-CFAR 以及相应改进

文献[20]和[21]中介绍了一种智能检测器 VI(Variability index) - CFAR,该方法基于两个统计量 VI 和 MR 对杂波环境判断继而可以自适应地从 CA-CFAR、SO-CFAR、GO-CFAR 中选择 针对特定杂波环境的算法 其综合了三种基本算法的优点 在三种典型的杂波环境中检测性能优异。但由于 SO-CFAR 仅适合于干扰目标位于参考窗一侧的情况 因此 VI-CFAR 算法在干扰目标位于两侧窗的情况下会受到限制 检测性能下降。针对此问题又出现了一些新的算法 2004 年, Hammoudi 和 Soltani 提出了 IVI - CFAR^[22] 算法; 2007 年胡文琳等人提出了基于 OS 的 VI-CFAR 检测器 即 OSVI-CFAR^[23] 该检测器将 VI - CFAR 检测器中的 ML 算法用 OS 类算法替换 很大程度上提高了抗多目标干扰的能力 但由于其用 OS 类算法全部将 ML - CFAR 算法代替 导致在均匀环境下 CFAR 损失增大; 针对该问题 文献 2014 年姜劼等人提出增强器 OSVI - CFAR 检测器^[24] 即 EOSVI - CFAR 检测器; 2011 年文献[25]中以 TM - CFAR 方法代替 SO - CFAR 形成 MVI - CFAR 检测器; 2012 年 李兵飞^[26]提出的新型检测器 SVI-CFAR 在干扰同时存在两侧窗时 用 S-CFAR^[27]代替 VI-CFAR 检测器中的 SO-CFAR 解除了 VI-CFAR 中干扰仅在单侧参考窗出现的限制 分析结果表明该检测器的抗多目标干扰能力得到了很大提高。2016 年 芮义斌等人提出一种多策略 CFAR(MS-CFAR) 检测器^[28] 相比于 VI-CFAR 的区别是该检测器用单元平均 CFAR(CA-CFAR) 、逼近 CFAR(AC-CFAR) 和交互式 CFAR(S-CFAR) 三种算法代替了 ML-CFAR 算法中三种基本算法。文中通过蒙特卡罗仿真验证了该检测器的性能。仿真次数取 10^6 , 参考窗长度 $N=24$, 参数 $T_{VI}=4.67$, $T_{MR}=2.19$, 虚警概率 $P_{fa}=10^{-6}$, S-CFAR 检测策略中的 $\alpha=0.4$ 。图 4 显示了在三种典型杂波环境下 MS-CFAR、SVI-CFAR、VI-CFAR、CA-CFAR 以及 GO-CFAR 的检测性能。

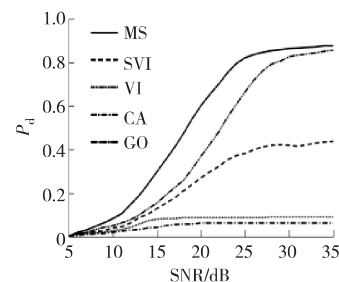
由图 4 可知杂波均匀时 MS-CFAR、SVI-CFAR 以及 VI-CFAR 检测器都将选择 CA-CFAR 作为检测策略 其检测性能几乎相同 比 S-CFAR 检测器性能稍好; 多目标的情况下 各检测器性能有所下降 而多策略 CFAR 检测器 MS-CFAR 检测性能最优; 当虚警概率为 $P_{fa}=10^{-3}$ 时 杂波边缘所处不同位置时 MS-CFAR 检测器在控制虚警方面性能优异。



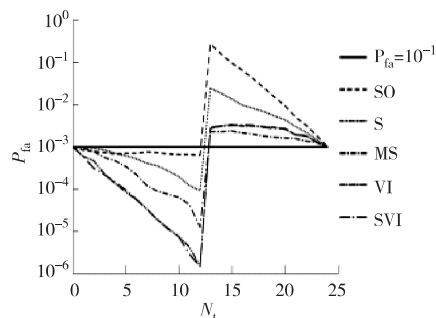
(a) 均匀杂波背景



(b) 前参考窗存在三个干扰



(c) 前后参考窗均存在 3 个干扰



(d) 不同杂波边缘位置的虚警概率

图 4 三种典型情况下性能比较

4.3 模糊恒虚警算法

最近 基于目标检测方法和模糊检测理论的模糊恒虚警检测算法受到了学者们的关注。模糊 CA-CFAR、模糊 OS-CFAR 检测器^[29]是在传统恒虚警思想中应用了模糊逻辑而形成的。宋铁等人^[30]又将 IVI-CFAR 与模糊逻辑结合 提出了模糊 IVI-CFAR 检测器 与传统 IVI-CFAR 使用 K_{VI} 和 K_{MR} 来确定背景杂波是否均匀方法的不同 前者需要使用隶属函数 本文通过阶梯隶属函数将上述两个参数模糊化 该模

糊 IVI-CFAR 检测器通过将传统 CA-CFAR、GO-CFAR、OS-CFAR 检测器用模糊 CA-CFAR、模糊 GO-CFAR、模糊 OS-CFAR 代替实现。

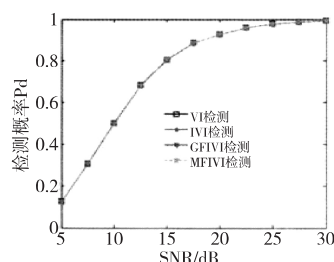
表 2 模糊 IVI-CFAR 自适应逻辑

选择准则	选择检测器
$VI_{ANVAR} > 0, VI_{BNVAR} > 0, M_{MOY} > 0$	模糊 CA-CFAR(A, B)
$VI_{ANVAR} > 0, VI_{BNVAR} > 0, D_{MOY} > 0$	模糊 GO-CFAR(A, B)
$VI_{ANVAR} > 0, VI_{BNVAR} > 0$	模糊 CA-CFAR(A)
$VI_{VAR} > 0, VI_{BNVAR} > 0$	模糊 CA-CFAR(B)
$VI_{VAR} > 0, VI_{BNVAR} > 0$	模糊 OS-CFAR(A, B)

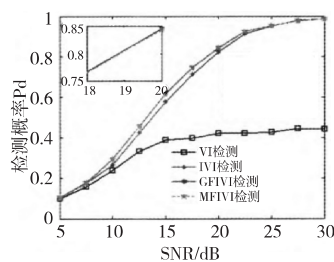
表 2 所示为模糊 IVI-CFAR 自适应逻辑,其中 A 和 B 分别对应前沿滑窗和后沿滑窗, VI_{VAR} 为非均匀环境, VI_{NVAR} 为均匀环境, M_{MOY} 意为前后窗均值相同, D_{MOY} 意为前后滑窗均值不同。

目标存在与否取决于全局隶属函数输出值,根据表 2 中选择准则选择对应的检测器,并计算其隶属函数^[30],最后将结果在融合中心按照融合规则求解全局隶属函数,解模糊,得到其值后与门限比较,便可得目标存在与否。

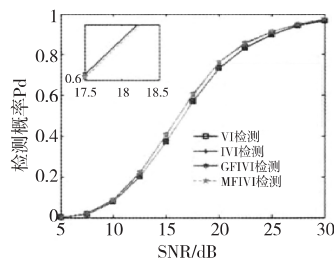
文中分别对选大模糊 MFIVI、加权平均模糊 GFIVI、传统 IVI、传统 VI 四种检测器在三种典型杂波环境下进行了蒙特卡罗仿真,如图 5 所示。



(a) 均匀背景



(b) 前后滑窗各 3 个干扰目标



(c) 杂波边缘环境

图 5 三种典型情况下性能比较

由图 5 可知,均匀背景下 MFIVI 和 GFIVI 和传统检测器性能相当;多目标情况下,模糊类检测器性能明显优于 VI 检测器,从局部大图可知,GFIVI 检测器性能优于 MFIVI;杂波边缘环境情况下,模糊类恒虚警检测器的检测性能优于传统恒虚警检测器,同样局部放大可知,GFIVI 检测器性能优于 MFIVI。

5 结论

与早期通过操作手对显示器监视实现目标检测以及后来的固定阈值检测,本文介绍的恒虚警技术很好地克服了人为因素影响,对杂波背景具有很好的适应性,其可以在变化的杂波背景中保持恒定虚警率,提高了检测目标的能力。恒虚警技术已成为雷达目标检测领域的研究热点,传统类型的 CFAR 技术,如 ML 类、OS 类,每种算法都有对应的特点和适用情况,同时又有其局限和缺点,故用多种算法融合策略来解决问题已经成为一种大趋势。所以在解决问题的时候应该根据杂波环境的具体情况来选择适合的算法。

除了上述算法之外,还有其他一些比如基于变换域如频域、小波域的恒虚警算法、分布式恒虚警算法等,此篇文章主要从高斯背景下传统的检测器到未来发展智能检测器两方面做了简要介绍。

参考文献

- [1] 梁丽. 基于 FPGA 的雷达信号处理系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [2] 徐学发, 林明, 黄斌. 船用导航雷达恒虚警检测的研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2012, (8): 2167-2169.
- [3] 蒋铁珍, 武虎, 吴凯, 等. 毫米波汽车防撞雷达恒虚警率门限设定方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, (3): 217-220.
- [4] 才永杰. 机载火控雷达恒虚警检测计算机仿真[C]. 北京: 中国航空学会电子专业委员会 1985 年年会, 1985.
- [5] 郝迎春. 雷达 CFAR 检测算法及门限判决系数的优化研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2012.
- [6] 何友. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [7] 任新涛, 张宏伟, 田蛟, 等. 雷达信号处理技术及仿真[J]. 现代电子技术, 2012, (3): 8-10.
- [8] 邓超. 杂波干扰环境下雷达恒虚警处理及其实现技术研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2014.
- [9] 柏雪. 基于 Ka 波段安防 LFM CW 雷达信号处理的研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2015.

- [10] 徐从安,何友,简涛,等. 空域 CFAR 处理方法综述[J]. 海军航空工程学院学报 2011 (4):414-418.
- [11] 孙艳丽,李建海,陈贻焕. 基于自动筛选技术的广义有序统计类 CFAR 检测性能分析[J]. 计算机与数字工程 2016 (9):1677-1680.
- [12] 刘超,钱孝桃. 一种低复杂度的 OS-CFAR 排序算法[J]. 电子技术与软件工程 2016 (4):90-92.
- [13] 刘中祥,宋志勇,付强. 基于 FPGA 的二维 OS-CFAR 设计与实现[J]. 全球定位系统 2015 (5):76-80.
- [14] 杨光,潘瑞云,蒋迺侗,等. OSGO-CFAR 算法检测性能分析及 FPGA 实现[J]. 雷达与对抗 2015(3):41-44.
- [15] NITZBERG R. Clutter Map CFAR Analysis [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems ,1986 ,22 (4):419-421.
- [16] 闫修林,阮增苗. 杂波图技术在雷达终端信号处理中的应用[J]. 现代雷达 2004 (5):34-36.
- [17] 黄红平,张晓玲. 一种改进型二维恒虚警参考窗[J]. 航空兵器 2011(1):34-37.
- [18] 吴静. 机场跑道异物检测技术与实现[D]. 西安:电子科技大学,2014.
- [19] 樊小倩. 自适应恒虚警算法研究[D]. 西安:电子科技大学,2014.
- [20] SMITH M E , VARSHNRY P K. Intelligent CFAR processor based on data variability [J]. Aerospace & Electronic Systems IEEE Transactions on ,2000 ,36(3):837-847.
- [21] SMITH M E. Application of the variability index (VI) statistic to radar CFAR processing [J]. 1997.
- [22] HAMMOUDI Z , SOLTANI F. Distributed IVI-CFAR detection in non-homogeneous environments [J]. Signal Processing ,2004 ,84(7):1231-1237.
- [23] 胡文琳,王永良,王首勇. 一种基于有序统计的鲁棒 CFAR 检测器[J]. 电子学报 2007 ,35(3):530-533.
- [24] 姜劼. EOSVI-CFAR 算法研究及硬件设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [25] MENG X W. Comments on ‘constant false-alarm rate algorithm based on test cell information’ [J]. Iet Radar Sonar Navigation ,2009 ,3(6):646-649.
- [26] 李兵飞. 复杂背景下多策略恒虚警检测算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [27] XU C , He Y , Yao Q , et al. A modified robust CFAR detector [C]// International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. IEEE ,2011:4439-4442.
- [28] 芮义斌,魏知寒,NGUYEN KHOASANG,等. 一种非均匀背景下的多策略 CFAR 检测器[J]. 南京理工大学学报 2016 (2):199-203.
- [29] HAMMOUDI Z , SOLTANI F. DISTRIBUTED CA-CFAR and OS-CFAR detection using fuzzy spaces and fuzzy fusion rules [J]. 2004 ,(3):135-142.
- [30] 宋铁,周林,曹婷. 基于 IVI-CFAR 的模糊恒虚警[J]. 电子技术应用 2016 (1):115-118.