

相参雷达时频域 CFAR 检测门限获取方法研究

陈建军^{1,2}, 黄孟俊¹, 赵宏钟¹, 付 强¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073; 2. 63620 部队, 甘肃酒泉 732750)

摘 要: 相参雷达体制下采用时频域处理的 CFAR 检测器面临的一个共性问题就是由于时频域杂波模型与实际不匹配, 以及数据样本有限导致的模型参数无法准确估计, 进而导致实际检测器性能总是与理论设计有较大差距. 为此, 本文通过分析相参雷达时频域恒虚警(CFAR)检测门限与虚警概率的函数关系, 提出一种基于最小二乘拟合的检测门限获取方法, 并给出了其工程实现途径. 最后, 采用实测数据对该方法进行检测性能仿真实验, 实验结果表明, 提出的检测门限获取方法有效可行, 具有很好的工程应用前景.

关键词: 相参雷达; 恒虚警; 距离-多普勒; 海杂波; 最小二乘法

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 08-1634-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.029

Research on Estimated Threshold of CFAR Detection in Time-Frequency Domain for Coherent Radar

CHEN Jian-jun^{1,2}, HUANG Meng-jun¹, ZHAO Hong-zhong¹, FU Qiang¹

(1. ATR Lab, National Univ. of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China; 2. Unit 63620, Jiuquan, Gansu 732750)

Abstract: For the constant false alarm rate(CFAR) detector of coherent radar in time-frequency domain, there is always a wide performance gap between the theoretical model and the practical result. Ultimately, this problem is caused by the imperfect model of the clutter, as well as the limited samples. A novel method of estimating the detection threshold is proposed in this paper. The method is based on the least square criteria and derived from the relationship between the CFAR detection threshold and the probability of false alarm. The implementation for the proposed method is given as well. Simulation results confirm the validity of the proposed method.

Key words: coherent radar; constant false alarm rate(CFAR); range-Doppler; sea clutter; least square method

1 引言

海杂波下雷达目标的恒虚警检测问题是反舰末制导雷达研制面临的一个重要课题. 所谓恒虚警(CFAR, Constant False Alarm Rate)检测技术其思想是在雷达检测系统中, 检测器的阈值能够适应背景杂波的变化, 并使杂波起伏对虚警概率的影响最小化. 根据检测阈值的形成方法不同, 一般可将恒虚警检测分为^[1,2]固定阈值 CFAR 检测、自适应阈值 CFAR 检测、非参量 CFAR 检测. 从已有的关于 CFAR 处理方法的文献来看^[1-8], 早期的非相参雷达中恒虚警处理大部分都是在时域上进行的. 相参雷达出现后, 恒虚警处理由早期非相参雷达中的时域处理发展到频域处理^[9]. 有关相参雷达 CFAR 处理技术的文献中, 大多是针对机载脉冲多普勒雷达和高频雷达应用背景的, 其中文献[10, 11]研究了基于 FFT 滤波器组的 CFAR 检测结构和检测门限; 文献[12, 13]分别报道了 F-15 \ F-16 战机的机载 PD 雷达已经采用频域 CFAR 处理技术; 文献[14]提出了一种应用于机载雷达

系统针对 Rice 分布干扰的双参数恒虚警处理方法; 文献[15, 16]结合图像处理技术来实现杂波边缘估计, 并据此设计出相应的 CFAR 检测器. 实际上在相参雷达中经过相参处理后, 目标回波分布在距离-多普勒二维空间(即时频域), 若充分利用目标时频信息将更有利于目标检测. 为此, 文献[17~20]在研究二维 CFAR 检测问题时, 分别提出了在距离-多普勒二维空间构造矩形窗、十字窗、列窗作为背景参考窗来实现背景估计, 如图 1 所示; 对于这三种二维检测器来讲, 都属于参量 CFAR 方法, 其应用前提都是假设其局部背景参考窗内样本符合某一种已知的统计分布模型, 如瑞利分布、威布尔分布统计模型等, 并据此来实现检测器设计和检测门限获取.

从统计决策理论出发的参量 CFAR 检测器设计, 检测门限获取与杂波的统计分布特性密切相关, 因此检测器设计的一个核心问题是雷达背景杂波和噪声统计特性的准确描述^[21], 具体的分布参数可由背景参考窗内各样本值估计得到. 但是, 如果假设的背景分布模型与背景参考窗内样本的实际分布不匹配, 或者由于参考样

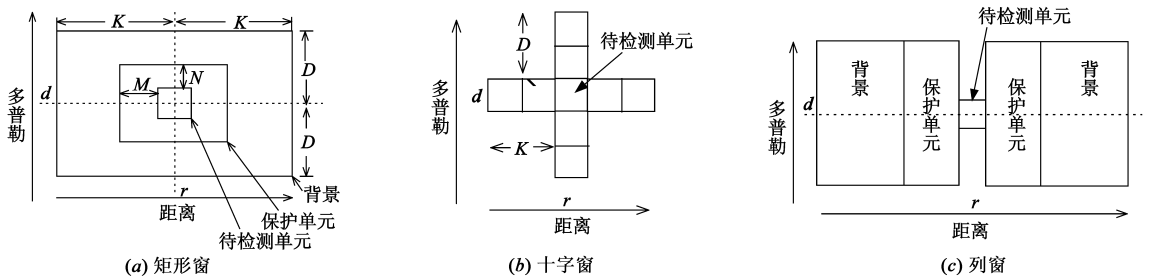


图1 二维检测器

本数有限导致的模型参数估计误差较大,都将导致相应的检测器失去恒虚警能力,这是参量 CFAR 检测器的特点.文献[19]基于高频雷达实测数据研究了海杂波相参处理后在时频域的统计分布特性,指出海杂波经相参处理后已经不能简单采用一种已知常见的统计分布模型来准确描述,本文在第 3 节通过分析 X 波段相参雷达实测数据,也得到相同的结论.因此在相参雷达体制下采用时频域处理的 CFAR 检测器面临的一个共性问题就是由于时频域杂波模型与实际不匹配,以及数据样本有限导致的模型参数无法准确估计,进而导致实际检测器性能总是与理论设计有较大差距.针对上述问题,本文提出一种不需要对杂波背景进行统计模型假设的检测门限获取方法,其思想是直接利用背景参考窗内的短样本数据拟合出背景杂波数据右截尾概率与上分位点^[22]之间的函数关系,并据此得到检测门限,完成检测.实测数据检验表明本文的方法性能稳健,达到了预期目的.

2 相参雷达目标检测模型

对于相参雷达,回波脉冲序列经过傅立叶变换可实现相参积累,同时获取雷达波束照射区域的距离-多普勒二维图像(RD图).显然,RD图中第 \$m\$ 个距离单元对应的多普勒谱等 \$X_r(k, m)\$ 于第 \$m\$ 个距离单元目标的多普勒谱 \$S_r(k, m)\$、海杂波的多普勒谱 \$C_r(k, m)\$ 以及接收机噪声的多普勒谱 \$N_r(k, m)\$ 的矢量和.于是

$$X_r(k, m) = S_r(k, m) + C_r(k, m) + N_r(k, m) \quad (1)$$

则,相参积累后恒虚警检测可采用如下假设检验模型:

$$\begin{cases} H_0: z_{km} = |X_r(k, m)| \\ \quad = |C_r(k, m) + N_r(k, m)| \\ H_1: z_{km} = |X_r(k, m)| \\ \quad = |S_r(k, m) + C_r(k, m) + N_r(k, m)| \end{cases} \quad (2)$$

检测概率 \$P_d = \int_T^{+\infty} f(z_{km} | H_1) dz\$, 虚警概率 \$P_{fa}\$

\$= \int_T^{+\infty} f(z_{km} | H_0) dz\$. 其中 \$f(z_{km} | H_1)\$、\$f(z_{km} | H_0)\$ 分别表示目标出现时、无目标时检验统计量的概率密度分布函数, \$T\$ 为检测门限.

CFAR 检测能够根据杂波分布的改变自适应地调整检测门限,从而使虚警概率维持在一个固定水平.若假设背景杂波相参积累后样本幅度分布的概率密度函数为 \$f(x)\$,检测门限为 \$T_{CFAR}\$,则其对应的右截尾概率即为虚警概率

$$P_{fa} = \int_{T_{CFAR}}^{\infty} f(x) dx = Q(T_{CFAR}) \quad (3)$$

那么,检测器的检测门限

$$T_{CFAR} = Q^{-1}(P_{fa}) \quad (4)$$

\$Q^{-1}(\cdot)\$ 为 \$Q(\cdot)\$ 的逆函数.易知,建立检测门限 \$T_{CFAR}\$ 与虚警概率 \$P_{fa}\$ 之间的函数关系是设计 CFAR 检测器的关键.显然,对于参量 CFAR 方法,通常都要求假设背景杂波的统计分布模型已知,并利用其来建立检测门限 \$T_{CFAR}\$ 与虚警概率 \$P_{fa}\$ 之间的函数关系,依此获取检测门限 \$T_{CFAR}\$ 实现检测的.

3 实测海杂波相参积累后幅度的统计特性分析

为获取海杂波相参积累后的幅度统计特性,需要对实测数据进行统计分析,这里采用直方图法给出其概率密度函数估计,并采用拟合优度检验方法来检验其是否服从常见统计分布模型,如瑞利分布、威布尔分布、对数正态分布、\$K\$ 分布.数据录取实验参数为:雷达载频 10GHz,脉冲重复频率 1kHz,雷达运动速度 200m/s,相参积累脉冲数为 64.参与拟合的数据量为 64000 个样本,相应的分布参数采用最大似然估计方法获得.拟合优度检验方法为 KS 拟合优度检验,显著性水平取为 0.05,检验结果如表 1 所示.检验结果中:Acceptance 表示接受零假设,即可以认为数据样本符合假设分布模型;Rejection 表示拒绝接受零假设,即不能认为数据样本符合假设分布模型.从拟合优度检验结果来看,假设检验拒绝接受使用瑞利分布、威布尔分布、对数正态分

表 1 KS 拟合优度检验结果

分布模型	瑞利分布	威布尔分布	对数正态分布	\$K\$ 分布
拟合优度	0.4449	0.1350	0.0702	0.4208
检验结果	Rejection	Rejection	Rejection	Rejection

布、 K 分布这四种常见已知统计分布模型来描述海杂波相参积累后的幅度统计分布特性。

图 2 给出海杂波相参积累后的幅度数据的概率密度估计曲线与各统计模型概率密度曲线对比图示。对比图中各曲线可以直观的看出,各分布模型概率密度曲线与实测数据概率密度估计有较大差异,因而拒绝接受使用上述四种统计分布模型来描述海杂波相参积累后的幅度统计分布特性的拟合优度检验结果是合理的。也就是说,对于相参雷达,不能简单地用一种已知常见的统计分布模型来准确描述背景海杂波相参积累后的统计分布特性,这与文献[19]对实测高频雷达海杂波数据相参积累后的统计特性分析结论一致。

4 相参雷达时频域 CFAR 检测门限获取方法

4.1 相参雷达时频域 CFAR 检测门限获取原理

尽管难以通过常见的统计分布模型来描述海杂波相参积累后的幅度统计分布特性,但是,根据式(3)、式(4)式易知,已知背景杂波的统计分布模型,即已知其概率密度函数 $f(x)$ 的解析表达式是获取检测门限 T_{CFAR} 与虚警概率 P_{fa} 之间的函数关系的充分条件,而非必要条件,也就是说,如果可以直接获取检测门限 T_{CFAR} 与虚警概率 P_{fa} 之间的函数关系,则无需已知背景杂波的真实统计分布模型——概率密度函数 $f(x)$ 的解析表达式。特别地,在雷达系统设计时,虚警概率设计指标值通常都很小,因此,一般只考虑 $P_{fa} \leq P_{FA}$ 时,检测门限 T_{CFAR} 与虚警概率 P_{fa} 之间的函数关系即可,本节中取 $P_{FA} = 0.02$ 。为分析检测门限 T_{CFAR} 与虚警概率 P_{fa} 之间的函数关系,首先利用实测数据(入射余角 α 分别为 5° 、 10° 、 15°)估计出公式(4)表述的函数曲线的样本数对 $P_{fa}(n) T_{CFAR}(n)$, $n = 1, 2, \dots, N_0$, N_0 为样本数对个数。然后,在直角坐标系下画出其散点图如图 3 所示。根据离散点呈现出的形状特点,且从简化模型以便于工程应用考虑,若将因变量和自变量互换,则虚警概率 P_{fa} 与检测门限 T_{CFAR} 可近似为高斯曲线形状,即

$$P_{fa} \approx \exp\left(-\frac{(T_{CFAR} - k_b)^2}{k_a^2}\right), P_{fa} \leq P_{FA} \quad (5)$$

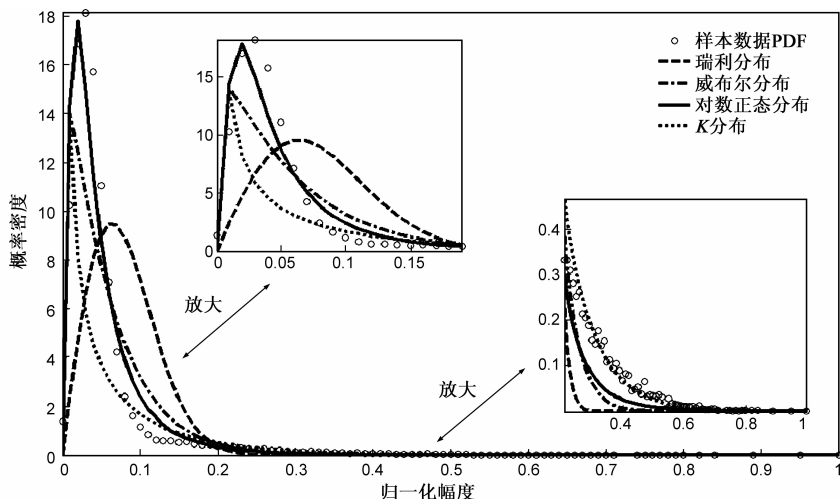


图2 概率密度曲线对比

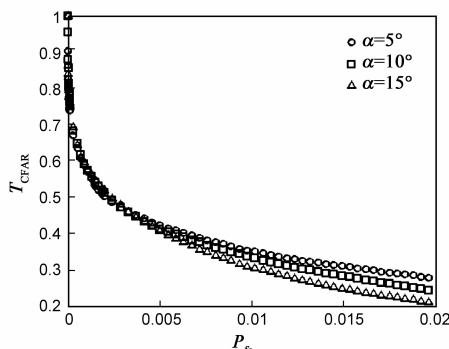


图3 $(P_{fa}(n), T_{CFAR}(n))$ 散点图

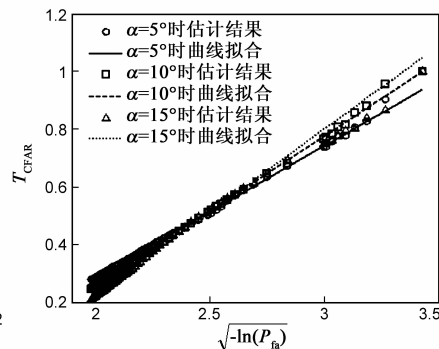


图4 $(\sqrt{-\ln P_{fa}(n)}, T_{CFAR}(n))$ 散点图以及曲线拟合结果

因此,将样本数对 $(P_{fa}(n), T_{CFAR}(n))$, $n = 1, 2, \dots, N_0$ 转换成 $(\sqrt{-\ln P_{fa}(n)}, T_{CFAR}(n))$, $n = 1, 2, \dots, N_0$ 重新在直角坐标系中画出,如图 4 所示。易知,检测门限 T_{CFAR} 与 $\sqrt{-\ln P_{fa}}$ 之间近似成线性关系,可采用一次多项式来拟合。

假设待拟合曲线为 $T_{CFAR} = k_a \sqrt{-\ln P_{fa}} + k_b$, 其中 k_a 为拟合多项式一次项系数, k_b 为常数项。拟合参数 k_a 、 k_b 可以通过最小二乘法求解,即选择拟合参数 k_a 、 k_b 的估计值、满足式(6)。

$$\min_{k_a, k_b} \sum_n [T_{CFAR}(n) - k_a \sqrt{-\ln P_{fa}(n)} - k_b]^2 \quad (6)$$

具体求解过程可参阅文献[22],这里仅给出拟合参数估计结果,如公式(7)。

$$\hat{k}_a = \frac{N_0 \left(\sum_{n=1}^{N_0} T_{CFAR}(n) \sqrt{-\ln P_{fa}(n)} \right) - \left(\sum_{n=1}^{N_0} T_{CFAR}(n) \right) \left(\sum_{n=1}^{N_0} \sqrt{-\ln P_{fa}(n)} \right)}{N_0 \left(\sum_{n=1}^{N_0} T_{CFAR}(n) \right) - \left(\sum_{n=1}^{N_0} T_{CFAR}(n) \right)^2}$$

$$\hat{k}_b = \frac{1}{N_0} \left(\sum_{n=1}^{N_0} T_{CFAR}(n) \right) - \frac{\hat{k}_a}{N_0} \left(\sum_{n=1}^{N_0} \sqrt{-\ln P_{fa}(n)} \right) \quad (7)$$

根据实测数据估计出拟合参数得到拟合曲线,如

图 4 所示,从图中拟合曲线与样本数对在直角坐标系中的位置关系,可知,虚警概率 P_{fa} 比较小 ($P_{fa} \leq P_{FA}$) 时,一次曲线函数可以较好的表示检测门限 T_{CFAR} 与 $\sqrt{-\ln P_{fa}}$ 之间的函数关系,这也是相参雷达时频域 CFAR 检测时,检测门限的获取依据,即

$$T_{CFAR} = \hat{k}_a \sqrt{-\ln P_{fa}} + \hat{k}_b \quad (8)$$

4.2 相参雷达时频域 CFAR 检测器及工程实现

根据上述分析,相参雷达时频域 CFAR 检测器如图 5 所示. 在进行 CFAR 检测时,运算量主要体现 CFAR 检测门限估计上,这里则主要表现在曲线拟合处理上. 为此,从曲线拟合中函数值序列和自变量序列的选取与构造方法两方面提出了降低运算量的工程实现方法.

因为用于曲线拟合的样本为参考窗内 N_1 个样本中最大的 $N_0 = N_1 P_{FA}$ 个,所以,在数据样本选取时需要进行排序处理. 考虑到 CFAR 检测过程中背景参考窗内的样本是逐渐更新的,即当检测窗口滑动时,对于参考窗来说,既有数据滑入,也有数据滑出,这使得每次滑入参考窗的新数据数量比较少,因此,只需在原来已排序的顺序数列中删除滑出参考窗的数据,同时将滑入的新数据在顺序数列中排序即可,从而避免对参考窗内的全部数据重新排序,降低工程实现运算量.

此外,根据虚警概率的定义,可知将最大的 N_0 个样本值作为检测门限则其对应的虚警概率可近似表示为 $\hat{P}_{fa}(n) = P(X_{km} \geq X_n) \approx n/N_1, n = 1, 2, \dots, N_0$, 则 $\ln \hat{P}_{fa}(n) \approx \ln(n/N_1), n = 1, 2, \dots, N_0$. 当给 N_1 定时,序列 $\{\ln \hat{P}_{fa}(n) | n = 1, 2, \dots, N_0\}$ 可以提前计算好并做成存储表. 当利用公式(7)计算拟合参数时,只需查表就可获取到 $\ln \hat{P}_{fa}(n)$ 的值,从而达到降低运算量的目的.

5 性能分析

为验证本文提出相参雷达时频域 CFAR 检测方法,对其检测性能进行蒙特卡洛仿真实验分析. 仿真实验中,检测器参考单元选取方式采用处理简单的列窗方式,即背景参考窗的多普勒维度为相参积累脉冲数,这里取为 64.

5.1 虚警性能

对单侧背景参考窗的距离维长度 L 分别为 10、20、30、40、50,即参考样本数 N_1 分别为 640、1280、1920、2560、3200 时,设定不同的虚警概率进行 CFAR 检测,统计 CFAR 检测器的虚警概率;蒙特卡洛仿真实验次数为

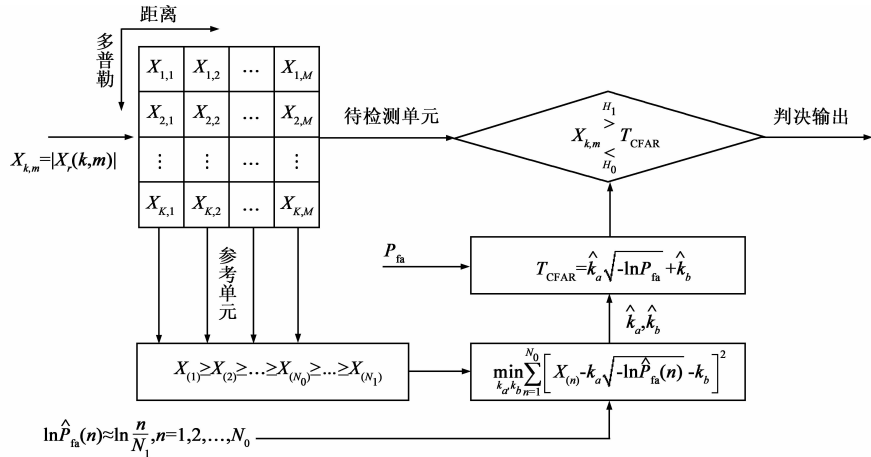


图5 相参雷达时频域CFAR检测器

1280000 次. 其结果如图 6 所示. 图示虚警性能曲线表明,检测器的虚警性能与设定的虚警性能基本处于相同的数量级水平上,但稍大于设定值,且这种偏大趋势随着设定虚警概率的减小而增大,随着背景参考单元数的增大而减小. 其主要原因在于设定虚警概率对应的检测门限本质上是通过对样本数对 $(\sqrt{-\ln P_{fa}(n)}, T_{CFAR}(n)), n = 1, 2, \dots, N_0$ 内插或外推得到,而用于内插或外推的样本数对本身为估计结果,而且样本量有限,从而导致内插或外推获取的检测门限偏小. 因此,实际应用时,可通过适当放大来进行修正. 尽管这种 CFAR 检测方法的虚警性能无法完全达到设定值,但基本与设定值处于相同的数量级水平上,与杂波模型失配的参量 CFAR 方法相比,仍不失为一种较好的检测策略.

5.2 检测性能

仿真实验中,在不同多普勒通道不同距离单元随机产生 Swerling 起伏目标回波信号. 积累前信杂比为 -12dB ~ 30dB,相参积累增益约为 18dB. 在保持虚警概率为 $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ 的前提下,基于实测海杂波,对 Swerling V 型、Swerling I 型、Swerling III 型目标的检测性能曲线分别如图 7 ~ 图 9, 图示中 SCR 为积累前信杂比. 检测器对应的单侧保护窗距离维长度为 5,单侧背景参考窗距离维长度为 20,蒙特卡洛仿真次数为 1000 次.

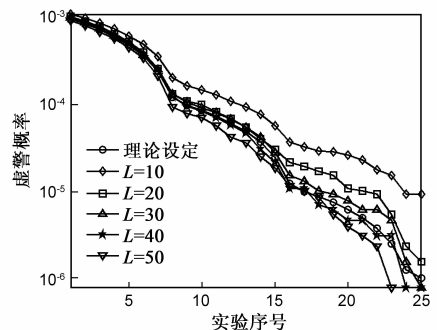


图6 相参雷达时频域CFAR检测器的虚警性能

图中不同虚警概率水平下,检测概率曲线的变化趋势表明,随着定虚警概率的减小,检测门限逐渐增大,达到相

同检测性能所需要的积累前信杂比也逐渐增大。

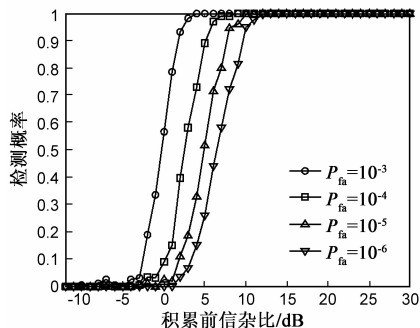


图7 不同虚警概率下, Swerling V型目标的检测性能

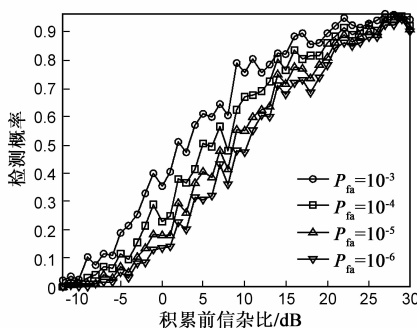


图8 不同虚警概率下, Swerling I型目标的检测性能

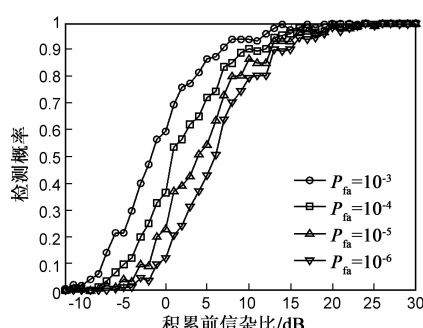


图9 不同虚警概率下, Swerling III型目标的检测性能

5.3 检测性能对比

本文在仿真实验中检测器的参考单元选取为列窗方式,这里将其与文献[20]提出的列窗检测器进行检测性能比较.在保持虚警概率为 10^{-5} 的前提,参考样本数 N_1 为 1280,即参考窗距离维长度为 20,检测性能结果如图 10.图示 SV 表示 Swerling V 型目标,SI 表示 Swerling I 型目标,SIII 表示 Swerling III 型目标,M-W 表示本文提出的检测方法,W 表示文献[20]提出的检测方法.由于文献[20]中检测方法的检测门限无法直接计算得到,这里采用蒙特卡洛实验方法进行仿真获得.图中曲线表明,在相同的虚警概率下,两种检测器对于 Swerling V 型、Swerling I 型、Swerling III 型目标的检测性能基本相当.这说明,基于最小二乘法来拟合出检测门限与虚警概率之间的关系曲线,并将其作为检测门限时获取的依据是有效可行的。

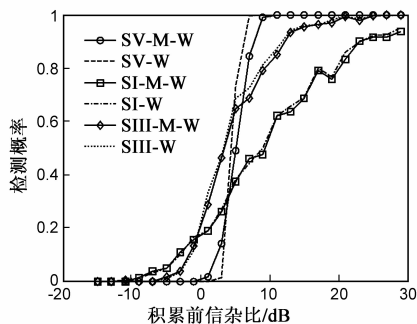


图10 虚警概率为 10^{-5} 时,检测性能对比曲线

6 结论

实测数据表明海杂波相参积累后的幅度的统计特性在时频域上不能简单地用一种已知常见的统计分布模型来准确描述.为解决相参雷达时频域 CFAR 检测问题,本文基于实测数据,研究了相参雷达时频域 CFAR 检测门限与虚警概率之间的函数关系,提出了检测门限获取方法,并给出了其工程实现方法.最后,通过仿

真实验验证了本文方法的有效性和可行性.考虑到本文中研究所用实测数据为低海情、小入射余角、中低分辨率条件下录取得到的,并不能代表所有应用条件下雷达导引头探测回波的特点,这使得进一步研究本文提出的检测方法在不同海情条件下的适应性是很有必要的.同时,本文基于背景杂波相参积累后在整个时频域的统计特性的思路来分析 CFAR 检测门限估计方法,实现目标检测,除此之外,还可以从背景杂波相参积累后在频域各多普勒通道分别建立不同的统计模型的思路来实现 CFAR 检测器设计.因此,下一步工作可从以上两个方面展开研究。

参考文献

- [1] Nitzberg R. Constant-false-alarm-rate signal processors for several types of Interferences[J]. IEEE Trans on AES, 1972, 8(1): 27 - 34.
- [2] 何友,关键,孟祥伟,等.雷达自动检测和 CFAR 处理方法综述[J].系统工程与电子技术,2001,23(1): 9 - 14.
He You, Guan Jian, Meng Xiang-wei, et al. Survey of automatic radar detection and CFAR processing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(1): 9 - 14. (in Chinese)
- [3] Zhao Lei, et al. A novel approach for CFAR processors design [A]. Proceedings of the 2001 IEEE Radar Conference[C]. Piscataway, NJ, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2001: 284 - 288.
- [4] Zaimbashi A, Taban M R, Nayebi M M. Order statistic and algebraic product CFAR detector for weibull clutter[A]. Proceedings of 2006 CIE International Conference on Radar[C]. Piscataway, NJ, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006: 208 - 211.
- [5] Bandiera F, Maio A D, Ricci G. Adaptive CFAR radar detection with conic rejection [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(6): 2533 - 2541.
- [6] Lehtomaki J J, et al. CFAR strategies for channelized radiome-

- ter[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(1): 13 - 16.
- [7] 孟祥伟. 韦布尔杂波下非参数量化秩检测器的性能[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 2030 - 2034.
Meng Xiang-wei. Performance of rank quantization (RQ) non-parametric detector in weibull background[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 2030 - 2034. (in Chinese)
- [8] 胡文琳, 等. 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.
Hu Wenlin, et al. A robust CFAR detector based ordered statistic[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 530 - 533. (in Chinese)
- [9] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
He You, Guan Jian, Peng Yingning, et al. Automatic Radar Detection and Constant False Alarm Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [10] Wang S, Patenaude F, Inkol R. Upper and lower bounds for the threshold of the FFT filter bank-based summation CFAR detector[A]. Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. Piscataway, NJ, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2006. 289 - 292.
- [11] Inkol R, Wang S, Patenaude F. FFT filter bank-based CFAR detection schemes[A]. Proceedings of 2007 50th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems[C]. Piscataway, NJ, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007. 409 - 412.
- [12] Leroy C P, et al. The development of airborne pulse doppler radar[J]. IEEE Trans on AES, 1984, AES - 20(3), 292 - 303.
- [13] Melvin B R, David H M, William H L. F-16 Pulse doppler radar (AN/APG - 66) performance[J]. IEEE Trans on AES, 1983, AES-19(3), 147 - 158.
- [14] 徐俊毅, 等. AMTD 系统频域双参数恒虚警性能分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(7): 945 - 949.
Xu Jun-yi, Wang Xiu-tan, Peng Ying-ning. Performance analysis of frequency domain BP-CFAR in AMTD systems[J]. Journal Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2002, 42(7): 945 - 949. (in Chinese)
- [15] 张弓, 朱兆达, 周亦南. 局部熵算法在机载 PD 雷达杂波跟踪中应用[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1295 - 1298.
Zhang Gong, Zhu Zhao-da, Zhou Yi-nan. Application of local entropy algorithm on clutter tracking [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1295 - 1298. (in Chinese)
- [16] 张弓, 朱兆达. 基于杂波跟踪的 CFAR 检测研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1824 - 1827.
Zhang Gong, Zhu Zhao-da. Research on CFAR based on clutter tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1824 - 1827. (in Chinese)
- [17] Turley M D E. Hybrid CFAR techniques for HF radar[A]. Proceedings of the 1997 Radar Edinburgh International Conference[C]. London, UK: Institution of Electrical Engineers, 1997. 36 - 40.
- [18] 杨强, 等. 复杂背景下的二维检测研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(1): 34 - 37.
Yang Qiang, Liu Yong-tan. 2-D detection in complex background[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(1): 34 - 37. (in Chinese)
- [19] 童健, 等. 强海杂波背景下的舰船目标检测[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 2005, 51(3): 370 - 374.
Tong Jian, et al. Ship target detection in strong sea clutter background[J]. Journal Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2005, 51(3): 370 - 374. (in Chinese)
- [20] 潘清云, 李飞. 末制导雷达目标检测快速算法[J]. 制导与引信. 2007, 28(2): 16 - 20.
Pan Qing-yun, Li Fei. Fast algorithm of target detection for terminal guidance radar[J]. Guidance and Fuze, 2007, 28(2): 16 - 20. (in Chinese)
- [21] Li J, Zelnio E G. Target detection with synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(2): 613 - 627.
- [22] 盛骤, 等. 概率论与数理统计(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
Sheng Zhou, et al. Probability Theory and Mathematical Statistics(2nd) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989. (in Chinese)

作者简介



陈建军 男, 1981 年出生, 天津武清人. 现为 63620 部队工程师. 主要研究方向: 雷达信号处理、雷达目标检测与识别.
E-mail: jjchen@nudit.edu.cn



黄孟俊 男, 1982 年出生, 湖南益阳人. 现为国防科技大学 ATR 实验室博士研究生. 主要研究方向: 雷达信号处理、雷达抗干扰技术研究.