

# 海杂波下的双门限恒虚警目标检测新方法

陈建军, 黄孟俊, 邱 伟, 赵宏钟, 付 强

(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)

**摘 要:** 相参雷达海杂波实测数据拟合结果表明, 其能量在多普勒域的分布是变化的. 各多普勒频率分量的幅度可分别用瑞利分布和威布尔分布来描述其分布规律. 据此提出一种双门限恒虚警 (CFAR) 检测器, 其采用级联结构实现, 具有恒虚警性能, 运算量与列窗检测器相当, 但检测性能得到大大提升. 采用实测海杂波与仿真目标信号进行蒙特卡洛实验, 在保持虚警概率  $10^{-5}$ , 检测概率大于 90% 的条件下, 相对列窗检测器, 信噪比改善大于 9dB, 具有很好的工程应用前景.

**关键词:** 恒虚警; 相参雷达; 距离-多普勒; 海杂波

**中图分类号:** TN957. 51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2135-07

## A Novel Method for CFAR Detector with Bi-Thresholds in Sea Clutter

CHEN Jian-jun, HUANG Meng-jun, QIU Wei, ZHAO Hong-zhong, FU Qiang

(ATR Laboratory, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** It is confirmed by the field test that the power density of sea clutter received by the coherent radar varies in the Doppler domain, while the distribution of the amplitude of the Doppler frequency component can be mathematically modeled by the Rayleigh distribution or the Weibull distribution. A novel method for the constant false alarm rate (CFAR) detector with bi-thresholds is proposed. The proposed detector is implemented with a serial structure and has the ability for both threshold estimation and the CFAR. In addition, the proposed detector can tremendously outperform the traditional column window detector with nearly the same computational complexity. The simulation results show that the proposed method can achieve a gain of 9 dB in the term of the signal-to-noise ratio (SNR) compared to the column window detector with the false alarm probability of  $10^{-5}$  and the detection probability of 90%.

**Key words:** constant false alarm rate (CFAR); coherent radar; range-doppler; sea clutter

## 1 引言

海杂波下雷达目标的恒虚警检测问题一直是雷达信号处理领域的研究热点之一. 所谓恒虚警 (CFAR) 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<sup>[1,2]</sup>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<sup>[1,7]</sup>, 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 CFAR 发展到频域处理<sup>[8]</sup>. 文献[9,10]研究基于 FFT 滤波器组的 CFAR 检测结构和检测门限; 文献[11,12]分别报道的 F-15 \ F-16 战机机载 PD 雷达已采用频域 CFAR 处理技术; 文献[13]分析了机载 PD 雷达频域 CA-CFAR 检测器的性

能; 文献[14]在假设各多普勒通道噪声分布相同的前提下, 设计了二维滑窗检测器结构; 文献[15]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. 实际上相参雷达进行相参处理后, 回波能量分布在距离-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[16]研究了气象杂波数据的时频域二维 CFAR 处理问题; 文献[17,18]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; 文献[19]研究了高频雷达二维 CFAR 处理问题, 提出了二维矩形窗检测结构, 针对回波能量分布在距离-多普勒二维空间的特点, 构造二维矩形窗, 如图 1, 通过合理设置距离维窗长和多普勒维窗长来保证背景估计的准确有效; 文献[20]将二维矩形窗结构用于海杂波二维 CFAR 检测; 文献[21]针对高频地波雷达舰船目标检测, 提出了二维十字窗结构用于 CFAR 处理, 如图 2 所示. 以上二维检测无论是矩

形窗还是十字窗,都要遍历整个距离-多普勒二维平面,运算量非常大,在工程中很难得到应用.因此,文献[22]提出相参雷达二维列窗检测结构,如图3所示.二维列窗检测结构只需一维搜索,运算量小,适合于工程实现.列窗检测器在计算阈值时将所有多普勒维的参考单元进行统一处理,而实测的相参雷达海杂波数据表明,海杂波能量在多普勒域的分布是变化的.列窗检测

器由于没有考虑不同多普勒通道的能量分布特性差异,检测阈值易受不同杂波背景起伏的影响,导致检测性能不高.针对上述问题,本文首先从实测数据出发,研究了相参雷达海杂波回波幅度在不同多普勒通道的分布规律,并给出了两种杂波分布拟合模型,进而提出了一种双门限恒虚警(CFAR)目标检测器,不仅易于工程实现,且不受杂波背景起伏影响.

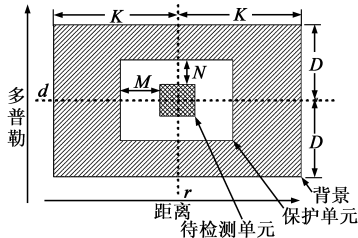


图1 二维检测矩形窗结构

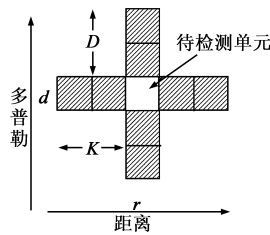


图2 二维检测十字窗结构

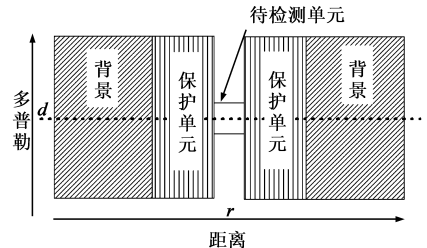


图3 二维列窗检测结构

相参雷达距离多普勒图表

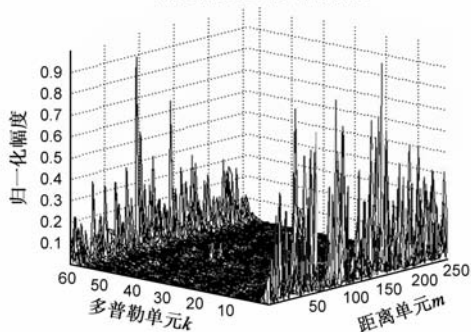


图4 相参积累后海杂波对应的RD图

## 2 基于实测数据相参雷达海杂波特性分析

对于相参雷达,通过对回波脉冲序列进行相参处理(即进行傅立叶变换),可以获取雷达波束照射区域的距离-多普勒二维图像(RD图).外场试验中,经某型X波段相参雷达照射海面获得回波数据,进行速度补偿(因外场试验平台为运动平台,所以需要进行运动补偿)后,相参处理得到的RD图如图4.相参雷达照射擦地角约为 $7^\circ$ ,脉冲重复频率为1kHz.由图中不同多普勒通道的幅度变化可知,将雷达平台运动速度引起的多普勒频率偏移补偿后,天线波束主瓣照射的海杂波能量主要集聚在零多普勒通道附近的少数几个多普勒通道内,在这几个多普勒通道的海杂波能量远大于接收机热噪声,是主杂波区,而其他多普勒通道内的海杂波能量较接收机热噪声要小很多,属于旁瓣杂波区,此时背景以热噪声为主,其概率密度分布拟合结果应符合瑞利分布,这在本文后续进行分布拟合时得到验证.对背景杂波幅度分布存在差异的不同多普勒通道数据简单应用一维检测方法,会造成较大的虚警和漏警,因此,有必要设计二维检测器,以便合理地进行背景估计,改善检测性能.

表1 分布拟合检验表

多普勒通道号	瑞利分布(R)		威布尔分布(W)		最优分布	
	KS	$\chi^2$	KS	$\chi^2$	KS	$\chi^2$
1	0.0305	18.5177	0.0098	3.8066	W	W
2	0.0248	9.8217	0.0159	6.0516	W	W
3	0.0841	77.1342	0.0282	13.2779	W	W
4	0.0864	99.8991	0.0345	32.2266	W	W
5	0.0161	5.3803	0.0112	4.8005	W	W
6	0.0140	6.4136	0.0163	4.4058	R	W
7	0.0189	11.9628	0.0185	11.6871	W	W
8	0.0286	16.9367	0.0242	16.0712	W	W
9	0.0252	7.3851	0.0117	3.2407	W	W
10	0.0182	8.1260	0.0163	4.7938	W	W
11	0.0127	7.1973	0.0126	7.1815	W	W
12	0.0210	6.0195	0.0189	6.1838	W	R

假设相参雷达照射海面获得的回波采样序列  $x(k, m)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , 其中  $x(k, m)$  表示第  $m$  个距离单元对应的第  $k$  个回波脉冲采样值, 则补偿过平台运动效应并相参处理后得到第  $m$  个距离单元对应的多普勒谱幅度  $X(k, m)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . 对不同多普勒通道的数据幅度进行概率密度分布拟合(参与拟合的数据量为1500个样本,多普勒通道数为64).这里采用瑞利和威布尔分布模型进行拟合,相应的分布参数采用最大似然估计方法获得.并分别应用  $\chi^2$  检验与KS检验对拟合结果进行拟合优度检验,并将具有最小检验值的分布作为最优分布拟合结果.表1给出第1~12多普勒通道数据拟合优度检验结果,易知:各通道的最优分布拟合大多为威布尔分布,其中,第5~12通道的两种分布检验结果相差不大表明两种分布都可以很好的描述样本数据.图5给出了第1、3、10、12多普勒通道数据幅度拟合对比曲线,其中图(a)、(b)对应的第1、3多普勒通道海杂波属于主杂波区,考虑到实测数据的拖尾现状,

结合拟合优度检验结果,本文对主杂波区数据采用威布尔分布描述,同时两图中威布尔分布概率密度曲线的形状存在明显差异说明,主杂波区内不同多普勒通道数据的威布尔分布参数不同;图(c)、(d)对应第 10、12 多普勒通道属于旁瓣杂波区,考虑到两种分布都适合描述数据分布特性,且没有表现出长拖尾现象,为数

据处理上简便,本文对属于旁瓣杂波区的多普勒通道数据采用瑞利分布描述.对这样的多普勒通道数据进行瑞利分布参数估计,估计结果的均值为 0.0297,均方差为 0.0015,说明这些多普勒通道数据的分布参数非常相近,可以采用相同的瑞利分布来统一描述其幅度分布特性.

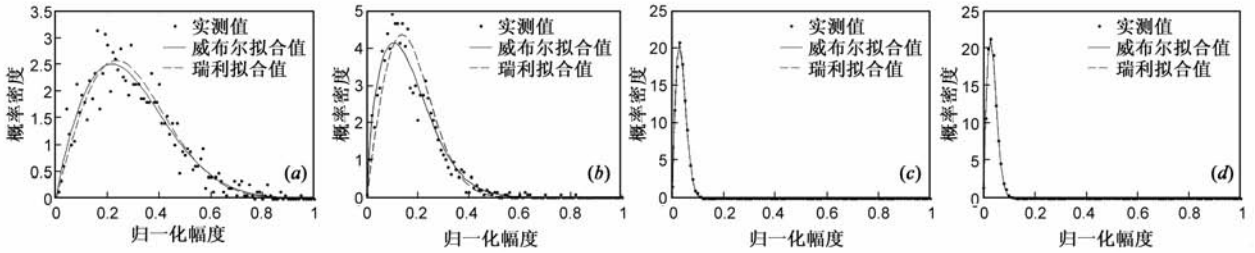


图5 典型多普勒通道数据幅度概率密度拟合对比图;(a) 多普勒通道1概率密度拟合;(b) 多普勒通道3概率密度拟合;(c) 多普勒通道10概率密度拟合;(d) 多普勒通道12概率密度拟合

### 3 双门限恒虚警(CFAR)目标检测器

#### 3.1 双门限恒虚警(CFAR)目标检测器结构设计

根据第 2 节关于不同多普勒通道数据幅度分布特性分析的结论,旁瓣杂波区内各多普勒通道数据幅度服从瑞利分布,其概率密度函数为

$$f_{rayl}(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, & x > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\sigma$  为瑞利分布参数,且

$$E(x) = \sqrt{\pi/2}\sigma, E(x^2) = 2\sigma^2 \quad (2)$$

主杂波区内各多普勒通道数据幅度服从威布尔分布,其概率密度函数为

$$f_{wbl}(\eta, \beta) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}, & x > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\eta$  为威布尔分布的尺度参数, $\beta$  为威布尔分布的形状参数,且

$$E(x) = \eta\Gamma(1 + 1/\beta), E(x^2) = \eta^2\Gamma(1 + 2/\beta) \quad (4)$$

其中,  $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$

针对不同多普勒通道数据的幅度分布特性,设计双门限二维 CFAR 检测结构如图 6.

假设待检测单元为 RD 图中第  $m$  行第  $k$  列元素  $X(k, m)$ . 首先估计各多普勒通道幅度均值并对估计结果排序,取较小的  $J$  个通道均值的平均值  $Z_0$  作为服从瑞利分布的所有通道幅度均值的估计,进而

确定瑞利分布对应的判决门限

$$S_0 = T_0 Z_0 \quad (5)$$

其中  $T_0$  为判决门限系数.对于幅度服从威布尔分布的多普勒通道,为避免待检测单元与附近距离单元之间的相关性对杂波幅度矩估计的影响,设定待检测单元左右各  $b$  个保护单元不参与估计.利用其余距离单元进行杂波幅度均值和二阶原点矩估计,通过均值  $Z_1$ 、二阶原点矩  $D_1$  与门限判决系数之间的函数关系,确定出威布尔分布判决门限系数  $T_1$ ,进而确定出判决门限

$$S_1 = T_1 Z_1 \quad (6)$$

对于主杂波区中的待检测单元,由于主杂波区的幅度明显强于旁瓣杂波区,且其幅度概率密度分布具有较长拖尾,所以对一定虚警概率要求下,由旁瓣杂波区(其幅度概率密度分布拖尾比较小,采用瑞利分布描述)估计得到的检测门限  $S_0$  进行检测判决会造成大量虚警,而通过长拖尾的威布尔模型估计获得的检测门限  $S_1$  可以较好控制虚警.显然,两个检测门限满足  $S_1 > S_0$ ,于是判决门限  $S = S_1 = \max(S_0, S_1)$ .

而对于旁瓣杂波区的待检测单元,考虑到瑞利分布是威布尔分布的一种特例,在相同虚警概率要求下,

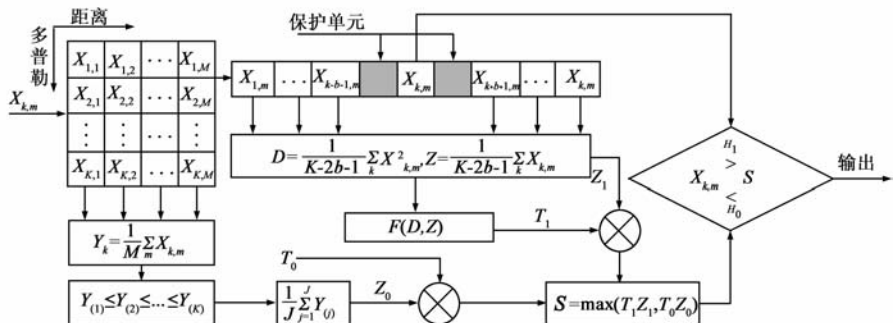


图6 二维CFAR检测器结构(1)

应用两种分布模型估计获得的两个判决门限应当保持一致,为尽可能降低因估计误差引起虚警概率增大,保证虚警概率不大于设定的虚警概率要求,取判决门限  $S = \max(S_0, S_1)$ .

综上所述,对主杂波区和旁瓣杂波区的不同多普勒通道待检测数据,可以确定统一的判决准则,即为

$$X(k, m) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \max(T_0 Z_0, T_1 Z_1) = S \quad (7)$$

其中,  $H_1$  表示有目标的假设,  $H_0$  表示没有目标的假设.

### 3.2 性能分析

对于上一节提出的 CFAR 检测结构,其发生虚警的可能情况包括:瑞利分布杂波过门限和威布尔分布杂波过门限两种情况.假设  $A$  表示事件“瑞利分布杂波过判决门限”,  $B$  表示事件“威布尔分布杂波过判决门限”,  $C_1$  表示事件“待检测单元服从瑞利分布”,  $C_2$  表示事件“待检测单元服从威布尔分布”,显然,  $C_1, C_2$  是对待检测空间的一个划分,且有  $P(C_1) + P(C_2) = 1$ . 于是,待检测单元发生虚警的概率为

$$P_f = P(A|C_1)P(C_1) + P(B|C_2)P(C_2) \quad (8)$$

显然,要实现恒虚警,只需概率  $P(A|C_1), P(B|C_2)$  与杂波分布参数无关即可. 特别地,当  $P(A|C_1) = P(B|C_2)$  时,有

$$P(A|C_1) = P(B|C_2) = P_f \quad (9)$$

一般两种分布模型参数都未知,所以,可由(2)、(4)获得相应的参数估计

$$\hat{\sigma} = \hat{E}(x) / \sqrt{\pi/2} = Z_0 / \sqrt{\pi/2} \quad (10)$$

$$\hat{\eta} = \hat{E}(x) / \Gamma(1 + 1/\beta) = Z_1 / \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (11)$$

若令  $g(\beta) = \Gamma(1 + 2/\beta) / \Gamma^2(1 + 1/\beta) = E(x^2) / E^2(x)$ , 则

$$\hat{\beta} = g^{-1}(E(x^2) / E^2(x)) \quad (12)$$

其中  $g^{-1}(\cdot)$  表示  $g(\cdot)$  的逆函数.

此时,由公式(1)~(8),可得

$$P(A|C_1, \hat{\sigma}) = \exp\left\{-\frac{S_0^2}{2\hat{\sigma}^2}\right\} = \exp\left\{-\frac{\pi T_0^2}{4}\right\} \quad (13)$$

$$P(B|C_2, \hat{\eta}, \hat{\beta}) = \exp\left\{-\left(\frac{S_1}{\hat{\eta}}\right)^\beta\right\} = \exp\left\{-\left(T_1 \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^\beta\right\} \quad (14)$$

考虑到上述瑞利分布参数估计  $\hat{\sigma}$  和威布尔分布尺度参数估计  $\hat{\eta}$  为渐近无偏估计,因此,概率  $P(A|C_1)$  不依赖于瑞利分布参数  $\sigma$ , 概率  $P(B|C_2)$  不依赖威布尔分布的尺度参数  $\eta$ , 只与形状参数  $\beta$  有关. 为实现  $P(B|C_2)$  与形状参数  $\beta$  无关,只需自适应调整门限  $T_1$ , 使  $(T_1 \Gamma(1 + 1/\beta))^\beta$  保持恒定即可.

当给定虚警概率  $P_f$ , 且有公式(9)成立时,则根据式(12)、(14),可得

$$T_1 = \frac{(-\ln P_f)^{1/\beta}}{\Gamma(1 + 1/\beta)} = f\left(g^{-1}\left(\frac{E(x^2)}{E^2(x)}\right)\right) = f\left(g^{-1}\left(\frac{\Gamma(1 + 2/\beta)}{\Gamma^2(1 + 1/\beta)}\right)\right) \quad (15)$$

给定虚警概率  $P_f$  等于  $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$  时,  $T_1$  与  $E(x^2)/E^2(x)$  的关系曲线如图 7 所示. 根据实时估计出的  $E(x^2)/E^2(x)$  自适应的选择  $T_1$ , 即可实现概率  $P(B|C_2)$  恒定,进而保证虚警概率恒定. 具体工程应用时,  $T_1$  与  $E(x^2)/E^2(x)$  的函数关系可以通过多项式拟合或查表的方式实现, 本文在仿真实验时,采用二次多项式函数拟合方式实现.

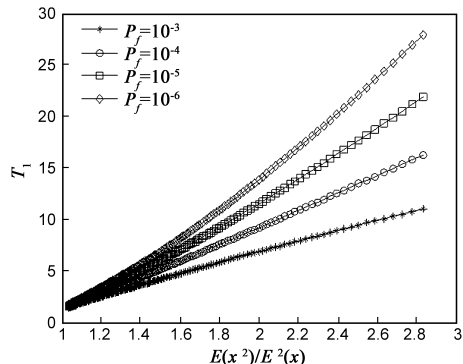


图7 给定虚警概率时,  $T_1$  与  $E(x^2)/E^2(x)$  的关系曲线

考虑到工程实现对运算量的要求,图 6 所示检测器结构可以通过图 8 所示检测器结构来等价实现并降低运算量. 对比两种检测器结构,可知,图 6 中每个待检测单元都需要进行威布尔模型参数估计与门限计算,而图 8 中各待检测单元在与第一检测门限(由瑞利分布参数估计获得)进行比较判决后,只对高于第一检测门限的待检测单元进行威布尔模型参数估计与第二检测门限计算. 这样通过第一次检测判决就减少了需要进行威布尔模型参数估计与第二检测门限计算的待检测单元数,从而降低运算量. 对  $K \times M$  维的待检测单元总数,单侧保护单元数为  $b$ , 单侧参考单元数为  $c$ , 列窗检测器中用于参与背景噪声计算的单元数为  $M + 2b + 2c$ , 考虑到各距离单元做一次乘法后可将结果保存,因此总的乘法次数为  $K(M + 2b + 2c)$ . 图 8 所示检测

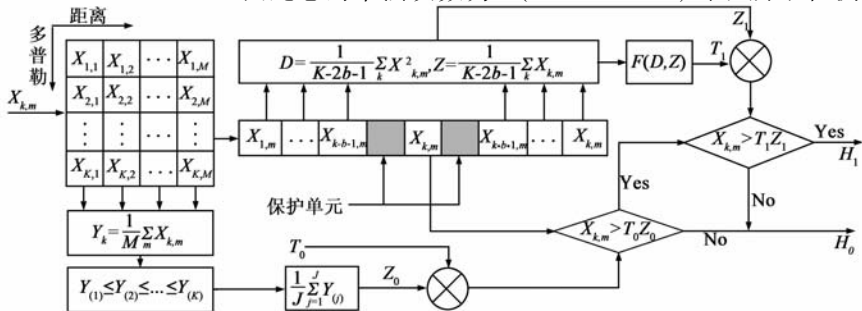


图8 二维CFAR检测器结构(2)

器结构计算背景噪声需要乘法次数为  $KM$ , 进行第二次门限判决所需的乘法次数为第二次门限参数估计所需的乘法次数  $2c$  与需要二次门限判决的单元数  $KMP_f$  的乘积, 因此, 总的乘法次数为  $KM + 2cKMP_f$ . 对于  $M < 500$ , 只要第一级判决虚警概率  $P_f < 2 \times 10^{-3}$ , 就可以得到  $KM + 2cKMP_f < K(M + 2b + 2c)$ , 可见, 图 8 所示检测器的计算量与列窗检测器基本相当, 在一定条件下还会略有减小, 因而更利于工程实现.

### 4 实验性能分析

为验证本文提出的检测器性能, 进行仿真实验分析.

#### 4.1 参考单元数与门限的关系

由于无法准确获知不同多普勒通道海杂波幅度的分布参数, 因此, 需要用其估计值来代替, 这样获得的虚警概率  $P_f$  比公式 (8) 确定的虚警概率要大些, 相应地, 要保持虚警概率一定, 判决门限系数  $T_0, T_1$  要比公式 (13)、(15) 计算出的大些, 且其与参与估计的参考单元数有关. 以下通过仿真给出单侧参考单元数为 10 ~

50 时, 保持虚警概率为  $10^{-5}$ , 门限系数随单侧参考单元数的变化曲线如图 9, 图 (a)、(b) 中判决门限系数随单侧参考单元数的增加而整体水平有减小趋势, 这主要是因为随参考单元数的增加, 背景分布参数估计越准确, 其波动越小, 从而判决门限系数表现出减小趋势. 图 (b) 中判决门限系数  $T_1$  明显较图 (a) 判决门限系数  $T_0$  大, 这是因威布尔分布拖尾较瑞利分布拖尾大, 在相同的虚警概率要求下, 其判决门限系数相应要高的缘故.

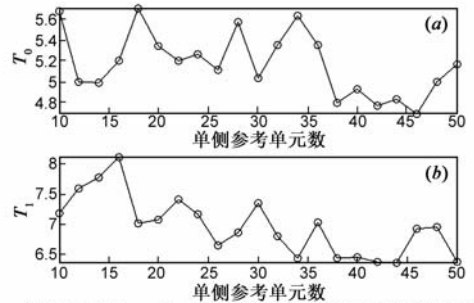


图9 虚警概率为 $10^{-5}$ 时, 门限系数随参考单元数的变化曲线; (a) 门限系数 $T_0$ 随参考单元数变化曲线; (b) 门限系数 $T_1$ 随参考单元数变化曲线

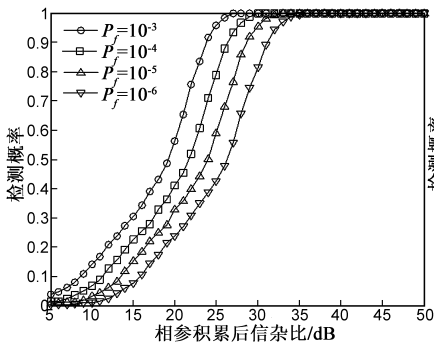


图10 不同虚警概率时, 对Swerling V型目标的性能曲线

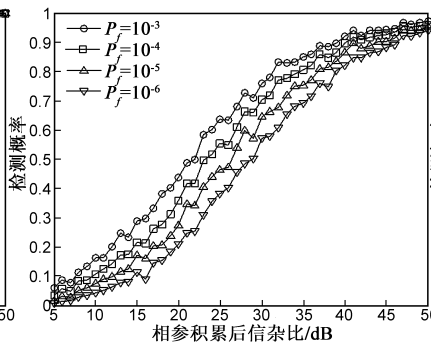


图11 不同虚警概率时, 对Swerling I型目标的性能曲线

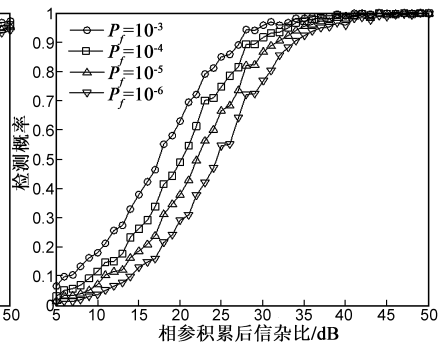


图12 不同虚警概率时, 对Swerling III型目标的性能曲线

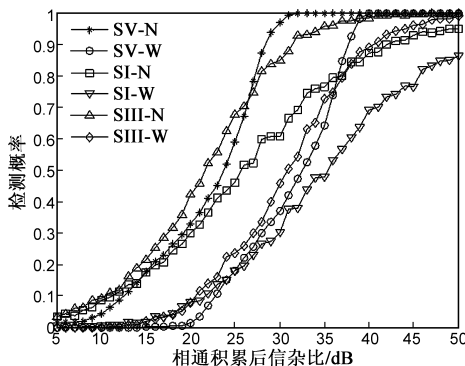


图13 虚警概率为 $10^{-5}$ 时, 检测性能对比曲线

#### 4.2 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目标信号, 相参积累后信杂比为 5dB ~ 50dB, 相参积累增益大约为 18dB, 杂波背景为实测海杂波数据. 在保持虚警概率为  $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$  的前提下, 对

Swerling V 型、Swerling I 型、Swerling III 型目标应用本文提出的检测器的检测性能曲线分别如图 10、图 11、图 12. 检测器对应的单侧保护单元设置为 10, 单侧参考单元设置为 20. 检测门限依 (13) (15) 获得, 并根据 4.1 节参考单元数与门限的关系曲线适当放大.

#### 4.3 检测性能对比

在保持虚警概率为  $10^{-5}$  的前提下, 对本文提出的检测器和文献 [22] 提出的列窗检测器进行检测性能比较, 结果如图 13, 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, N 表示本文提出的双门限 CFAR 检测器, W 表示文献 [22] 提出的列窗检测器. 图中曲线表明, 相比文献 [22] 提出的列窗检测器, 本文提出的检测器对于 Swerling V 型、Swerling I 型、Swerling III 型目标的检测性能都有显著提高, 在虚警概率为  $10^{-5}$ , 检测概率高于 90% 的条件下所需的信杂比较列窗检测器达到相同性能所需信杂比要降

低约 9dB 以上. 这说明, 利用两种模型分别来描述距离-多普勒平面上不同多普勒通道的数据比列窗检测采用统一模型能更好的描述真实数据, 因而检测性能有较明显的提高.

## 5 结束语

相参雷达接收到的海杂波幅度在不同多普勒通道的分布不同, 针对这种特点, 分别以瑞利分布和威布尔分布对其建模, 并结合两种分布模型设计出不依赖于表征能量大小的参数的检测器结构. 该检测器可通过两级检测结构实现, 能够有效降低工程实现运算量, 较好满足工程实时性要求. 最后, 对提出的检测器与运算量相当的列窗检测器结构进行检测性能比较: 仿真实验结果表明本文提出的检测器, 在保持相同虚警概率的条件下, 检测性能较列窗检测器有显著提高. 考虑到本文分析的海杂波幅度分布特性为低擦地角下海杂波特性, 进一步的工作可针对高擦地角下海杂波背景目标检测问题进行展开研究.

## 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, Liu Weixian, Wu Xin, 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, Juntti M, Saarnisaari H. CFAR strategies for channelized radiometer[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] 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.
- [9] 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.
- [10] Inkol R, Wang S, Patenaude F. FFT filter bank-based CFAR detection schemes[A]. Proceedings of 2007 50<sup>th</sup> IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems[C]. Piscataway, NJ, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2007. 409-412.
- [11] Leroy C P, Harry B S, David H M. The development of airborne pulse doppler radar[J]. IEEE Trans on AES, 1984, AES-20(3):292-303.
- [12] 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.
- [13] 朱兆达, 叶蔡如, 黄新平. 机载 PD 雷达频域 CFAR 处理性能分析[A]. 第四届全国雷达会议文集[C]. 长沙, 1987. 76-79.
- [14] 葛建军, 赵为, 熊年生, 等. 二维滑窗检测性能分析及其实现[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 20(12):34-37.  
Ge Jian-jun, Zhao Wei, Xiong Nian-sheng, et al. Analysis on two dimensional slide window detection and its completion[J]. Systems Engineering and Electronics, 1998, 20(12):34-37. (in Chinese)
- [15] 徐俊毅, 王秀坛, 彭应宁. 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)
- [16] Li Daojing, Yu Guilong. 2D-OS-CFAR detector for cloud clutter suppression[A]. 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings[C]. Piscataway, NJ, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2001. 350-353.
- [17] 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)
- [18] 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

ter tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1824 - 1827. (in Chinese)

[19] 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

[20] 杨强,刘永坦. 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)

[21] 童健,文必洋,王颂. 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, Wen Bi-yang, Wang Song. Ship target detection in strong sea clutter background[J]. Journal Wuhan Univ(Nat Sci Ed), 2005, 51(3): 370 - 374. (in Chinese)

[22] 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)

## 作者简介



**陈建军** 男, 1981 年生, 天津武清人. 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、雷达目标检测与识别.

E-mail: jjchen@nudt.edu.cn



**黄孟俊** 男, 1982 年生, 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.

**邱伟** 男, 1985 年生, 浙江临安人, 国防科技大学 ATR 实验室博士研究生, 研究方向为雷达信号处理、雷达目标识别.

**赵宏钟** 男, 1971 年生, 山西寿阳人, 国防科技大学 ATR 实验室副教授, 研究方向为精确制导、雷达信号处理与自动目标识别.

**付强** 男, 1962 年生. 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 解放军总装备部精确制导技术专家组成员. 主要从事雷达信号处理、毫米波目标识别方面的研究.