

## 两种基于 MIMO 雷达体制的鲁棒 CFAR 检测器

王敦勇 马晓岩 袁俊泉 王党卫  
(空军雷达学院 武汉 430019)

**摘要:** 针对MIMO雷达的体制特点, 该文提出了两种有序统计与均值相结合的MIMO雷达CFAR检测器(OSCA-CFAR和LCIOSCA-CFAR), 给出了虚警概率与检测概率的表达式, 然后在各种杂波背景下对检测器性能进行了仿真分析, 并与经典的CA-CFAR检测器进行比较, 仿真结果表明, OSCA-CFAR和LCIOSCA-CFAR检测器在均匀背景下较CA-CFAR有较小损失, 在多目标干扰环境较CA-CFAR性能改善明显, 在实际背景中具有更强的鲁棒性。最后比较了OSCA-CFAR和LCIOSCA-CFAR检测器的优缺点。

**关键词:** MIMO 雷达; OSCA-CFAR; LCIOSCA-CFAR; 检测性能

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0596-05

## Two Kinds of Robust CFAR Detector Based on MIMO Radar System

Wang Dun-yong Ma Xiao-yan Yuan Jun-quan Wang Dang-wei  
(Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Based on the system characteristics of MIMO radar, two kinds of MIMO radar CFAR detectors (termed OSCA-CFAR and LCIOSCA-CFAR) based on order statistic and mean level are presented. Firstly, formulas of false alarm probability and detection probability are given. Then detection performance under various clutter background is compared with classic CA-CFAR by simulating and analyzing. The simulation results show that performance of OSCA-CFAR and LCIOSCA-CFAR has a low-loss under uniform clutter and is improved greatly under multi-target interference compared with the CA-CFAR. So it is more robust than the CA-CFAR in practice. Finally, advantage and disadvantage of the two kinds of CFAR detector are indicated.

**Key words:** MIMO radar; OSCA-CFAR; LCIOSCA-CFAR; Detection performance

### 1 引言

多输入多输出(MIMO)雷达是国际上近几年发展起来的一种新概念雷达体制<sup>[1,2]</sup>。该雷达采用了空间分集与信号分集技术, 较好地克服了目标 RCS 的角闪烁所带来的性能损失, 从而在目标检测方面有其独到优点<sup>[2-5]</sup>, 该新概念雷达已受到了众多学者的广泛关注。

MIMO 雷达系统是由多个发射天线单元和多个接收天线单元构成的, 发射天线单元同时发射相互正交的信号, 每个接收天线单元的接收机利用正交性分离来自不同发射天线单元的信号, 整个雷达系统在接收端形成了多个信号通道。由于 MIMO 雷达系统具有多通道特性, 对目标检测而言, 提高了可供提取的目标信息量, 也使 MIMO 雷达的 CFAR 处理更加复杂。

Sammartino<sup>[6]</sup>根据 MIMO 雷达的数据特点, 提出了一种基于 MIMO 雷达体制的单元平均恒虚警(CA-CFAR)检测器, 然后仿真分析了该检测器在  $k$  分布均匀杂波背景中的检测性能。Sheikhi<sup>[7]</sup>则提出了一种针对高斯白噪声背景的

CFAR 检测方法, 其检测器的结构与文献[6]所提 CA-CFAR 检测器大致相同, 属于均值类 CFAR 检测器, 主要区别是针对多脉冲条件, 即在做 CFAR 处理前在时域上(脉冲间)做积累, 仿真分析了该检测器在高斯白噪声中的检测性能。但是, 文献[6,7]所提 CA-CFAR 检测器虽然在均匀背景中是最优的, 但在多目标干扰环境中性能严重下降, 在实际杂波背景中的应用受到限制。

为克服上述不足, 本文根据 MIMO 雷达 CFAR 处理的特点, 提出了两种有序统计与均值相结合的 MIMO 雷达 CFAR 检测器, 即通道排序加全局单元平均 CFAR 检测器(OSCA-CFAR)和本地通道积累加阵元排序与全局单元平均 CFAR 检测器(LCIOSCA-CFAR), 给出了均匀背景中虚警概率与检测概率的表达式, 并在均匀, 多目标干扰及杂波边缘 3 种典型背景下进行了仿真分析, 验证了本文所提方法的有效性。

### 2 MIMO 雷达体制结构及 CFAR 处理特点

MIMO 雷达的组成结构如图 1 所示, 发射端共有  $M$  个以较大距离分布的发射天线单元, 同时发射  $M$  个相互正交的信号, 接收端共有  $N$  个接收天线单元, 每个接收天线单元

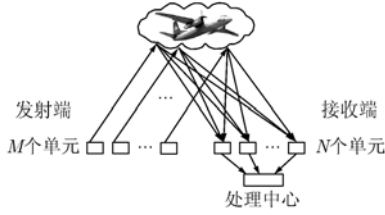


图1 MIMO 雷达组成结构示意图

的接收机利用信号正交性分离来自不同发射天线单元的信号,这样,每个接收天线单元可分离出  $M$  个信号通道,称为本地通道,由于接收天线单元分布距离也是较大的,所以本地通道做完必要的处理及数据压缩后,再将数据送往处理中心进行综合处理。对整部雷达系统而言,共形成了  $MN$  个信号通道,且各天线单元符合空间分集的条件,每个通道的信号是统计独立的<sup>[2]</sup>。

MIMO 雷达的在恒虚警处理方面主要有以下几个体制上的特点:

(1)由于 MIMO 雷达的多通道特性,其数据量比传统雷达要多一维,在单脉冲条件下,MIMO 雷达的数据结构是二维(距离维+通道维)。

(2)设计 MIMO 雷达的 CFAR 检测器时,对于不同接收单元之间数据进行综合前,在不引起大的处理损失的前提下,要对数据进行必要的压缩或预处理,以节省通信带宽,而对于本地通道之间的数据综合,则不需考虑通信问题,以提高目标检测性能为唯一目标。

(3)若 MIMO 雷达各发射信号的带宽相等,则各通道距离单元是相等的。在非均匀背景中,由于本地通道是以同一方向对目标进行观测的,所以本地通道之间表现出相同的非均匀性(如多目标干扰环境下,本地通道干扰目标的数量及占据参考单元的位置相同),但不同接收单元的通道是以不同方向对目标进行观测的,所以它们之间表现出不同的非均匀性。

从上可看出,MIMO 雷达的 CFAR 处理较常规单通道雷达处理更加复杂,与多传感器分布式 CFAR 检测也存在较大差异,设计适合 MIMO 雷达体制特点的 CFAR 检测器是一项很有意义的工作。

### 3 OSCA-CFAR 和 LCIOSCA-CFAR 检测器的基本原理

由于 MIMO 雷达共有  $MN$  个独立的信号通道,若每个通道选检测单元邻近的  $R$  个距离单元作为参考单元,令  $Y_{ijk}$  ( $i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N; k=1,2,\dots,R$ ) 表示平方律检波后第  $i$  个发射天线单元到第  $j$  个接收天线单元的信号通道中第  $k$  个参考单元的观测样本,  $X_{0ij}$  表示平方律检波后第  $i$  个发射天线单元到第  $j$  个接收天线单元信号通道的检测单元样本。

MIMO 雷达 CFAR 检测器的主要思想是先把各通道检

测单元样本相加,作为检测单元的检测统计量,记为  $X$ ,估计出各通道参考单元样本杂波的总平均功率,记为  $Z$ ,最后  $Z$  乘以归一化门限  $T$  后与检测统计量  $X$  作比较来判断目标有无。用公式可表示为

$$\begin{aligned} H_1 \\ &> \\ X - TZ &< 0 \\ H_0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $X = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{0ij}$ , 杂波的总平均功率  $Z$  的估计方法有若干种,对应不同的 CFAR 检测器。下面给出 OSCA-CFAR 和 LCIOSCA-CFAR 中  $Z$  的估计方法。

(1)OSCA-CFAR 首先在每个通道使用有序统计(OS)的方法估计出各通道杂波功率水平,然后在处理中心使用单元平均(CA)的方法对杂波功率估计值进行平均。若  $Y_{ij(1)}, Y_{ij(2)}, \dots, Y_{ij(R)}$  表示第  $i$  个发射天线单元到第  $j$  个接收天线单元的信号通道中  $R$  个参考单元样本的从小到大排序,即  $Y_{ij(r)}$  为参考样本  $\{Y_{ij1}, Y_{ij2}, \dots, Y_{ijR}\}$  中第  $r$  个最小的样本。OSCA-CFAR 检测器中杂波的总平均功率可表示为

$$Z_{OSCA} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{ij(r)} \quad (2)$$

(2)LCIOSCA-CFAR 首先将每个接收单元对应的  $M$  个信号通道的参考单元对应相加,称之为本地通道积累(Local Channel Integration, LCI),然后在每个接收单元使用有序统计(OS)的方法估计出各接收单元杂波功率水平,最后在处理中心使用单元平均(CA)的方法对杂波功率估计值进行平均。若  $\tilde{Y}_{jk} = \sum_{i=1}^M Y_{ijk}$  代表本地通道积累后参考单元的样本,则  $\tilde{Y}_{j(1)}, \tilde{Y}_{j(2)}, \dots, \tilde{Y}_{j(R)}$  表示第  $j$  个接收单元本地通道积累后  $R$  个参考单元样本的从小到大排序,即  $\tilde{Y}_{j(r)}$  为参考样本  $\{\tilde{Y}_{j1}, \tilde{Y}_{j2}, \dots, \tilde{Y}_{jR}\}$  中第  $r$  个最小的样本,LCIOSCA-CFAR 检测器中杂波的总平均功率可表示为

$$Z_{LCIOSCA} = \sum_{j=1}^N \tilde{Y}_{j(r)} \quad (3)$$

### 4 OSCA-CFAR 和 LCIOSCA-CFAR 检测性能的理论分析

为了分析问题的方便,首先作以下假设:

(1)检测单元目标起伏特性为 SwerlingI 型,各通道独立同分布且具有相同的参数<sup>[2]</sup>;

(2)观测背景杂波服从高斯分布,各通道参考单元杂波独立同分布且具有相同的均方差;

(3)基于单脉冲条件,接收机采用平方律检波。

在上述假设下,各通道具有相同的信杂比(或信噪比),且参考单元观测样本  $Y_{ij1}, Y_{ij2}, \dots, Y_{ijR}$  服从指数分布,当参考单元只有噪声时,其均值为  $\lambda$ ; 当参考单元既有噪声又有杂波时,其均值为  $\lambda(1 + \text{CNR})$ ,其中 CNR 代表杂噪比;各通道

检测单元观测样本  $X_{0ij}$  也服从指数分布, 当检测单元无目标时, 其均值为  $\lambda$  或  $\lambda(1 + \text{CNR})$ , 当其有目标时, 其均值为  $\lambda(1 + \text{SNR})$  或  $\lambda(1 + \text{CNR} + \text{SNR})$ , 其中  $\text{SNR}$  代表信噪比。

由于指数分布是伽马分布(用  $G(\alpha, \beta)$  表示)在  $\alpha = 1$  时的特殊情况, 伽马分布的概率密度函数为

$$f(x) = \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} / \Gamma(\alpha), \quad x \geq 0, \quad \alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0 \quad (4)$$

考虑到伽马分布具有如下性质, 若随机变量  $X_1 \sim G(\alpha_1, \beta)$ ,  $X_2 \sim G(\alpha_2, \beta)$ , 那么随机变量  $X_1 + X_2 \sim G(\alpha_1 + \alpha_2, \beta)$ , 因此可得  $X$  的分布为  $G(MN, \lambda)$ , 因此可得虚警概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{fa}} &= \int_0^{+\infty} f_Z(Z) \int_{TZ}^{+\infty} G_X(MN, \lambda) dX dZ \\ &= \int_0^{+\infty} f_Z(Z) e^{-TZ/\lambda} \sum_{k=0}^{MN-1} \frac{(TZ)^k}{k! \lambda^k} dZ \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $f_Z(Z)$  代表总平均功率  $Z$  的概率密度函数, 在传统的 CFAR 检测分析中, 将积分  $\int_0^{+\infty} f_Z(Z) e^{-TZ/\lambda} dZ$  看作为随机变量  $Z$  的矩母函数  $M_Z(u)$  在  $u = T/\lambda$  时的值, 由于  $M_Z(u)$  可看作  $f_Z(Z)$  的 Laplace 变换, 且有性质

$$t^n f(t) \leftrightarrow (-1)^n \frac{d^n}{ds^n} F(s) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 得

$$P_{\text{fa}} = \sum_{k=0}^{MN-1} \frac{(T)^k}{k!} (-1)^k \frac{d^k}{du^k} M_Z(u) \Big|_{u=T/\lambda} \quad (7)$$

下面分别给出 OSCA-CFAR 和 LCIOSCA-CFAR 的虚警概率。

(1) OSCA-CFAR  $Y_{ij(r)}$  的矩母函数<sup>[8]</sup>为

$$M_{Y_{ij(r)}}(u) = r C_R^r \frac{\Gamma(R-r+1+u\lambda)\Gamma(r)}{\Gamma(R+u\lambda+1)} \quad (8)$$

由矩母函数的性质, 任意多个随机变量和的矩母函数为多个随机变量矩母函数的积, 可得

$$M_{Z_{\text{OSCA}}}(u) = \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^N M_{Y_{ij(r)}}(u) = \left( r C_R^r \frac{\Gamma(R-r+1+u\lambda)\Gamma(r)}{\Gamma(R+u\lambda+1)} \right)^{MN} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7), 即可得出 MIMO 雷达 OSCA-CFAR 检测器的虚警概率

$$\begin{aligned} P_{\text{fa}}^{\text{OSCA}} &= \sum_{k=0}^{MN-1} \frac{(T)^k}{k!} (-1)^k \frac{d^k}{du^k} \\ &\cdot \left[ \left( r C_R^r \frac{\Gamma(R-r+1+u\lambda)\Gamma(r)}{\Gamma(R+u\lambda+1)} \right)^{MN} \right] \Big|_{u=T/\lambda} \end{aligned} \quad (10)$$

(2) LCIOSCA-CFAR  $\tilde{Y}_{jk} = \sum_{i=1}^M Y_{ijk}$  服从  $G(M, \lambda)$  分布,

则其概率密度函数与分布函数分别为

$$f_{\tilde{Y}_{jk}}(Z) = \frac{Z^{M-1} \lambda^{-M} e^{-Z/\lambda}}{\Gamma(M)} \quad (11)$$

$$F_{\tilde{Y}_{jk}}(Z) = 1 - e^{-Z/\lambda} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{(Z)^k}{k! \lambda^k} \quad (12)$$

则  $\tilde{Y}_{j(r)}$  的概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_{\tilde{Y}_{j(r)}}(Z) &= r C_R^r (1 - F_{\tilde{Y}_{jk}}(Z))^{R-r} (F_{\tilde{Y}_{jk}}(Z))^{r-1} f_{\tilde{Y}_{jk}}(Z) \\ &= r C_R^r \left( e^{-Z/\lambda} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{(Z)^k}{k! \lambda^k} \right)^{R-r} \left( 1 - e^{-Z/\lambda} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{(Z)^k}{k! \lambda^k} \right)^{r-1} \\ &\cdot \frac{Z^{M-1} \lambda^{-M} e^{-Z/\lambda}}{\Gamma(M)} \end{aligned} \quad (13)$$

$\tilde{Y}_{j(r)}$  的矩母函数为

$$\begin{aligned} M_{\tilde{Y}_{j(r)}}(u) &= \int_0^{+\infty} f_{\tilde{Y}_{j(r)}}(Z) e^{-uZ} dZ \\ &= \int_0^{+\infty} r C_R^r \left( e^{-Z/\lambda} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{(Z)^k}{k! \lambda^k} \right)^{R-r} \\ &\cdot \left( 1 - e^{-Z/\lambda} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{(Z)^k}{k! \lambda^k} \right)^{r-1} \frac{Z^{M-1} \lambda^{-M} e^{-Z/\lambda}}{\Gamma(M)} e^{-uZ} dZ \end{aligned} \quad (14)$$

同样由矩母函数性质可得

$$M_{Z_{\text{LCIOSCA}}}(u) = \prod_{j=1}^N M_{\tilde{Y}_{j(r)}}(u) = (M_{\tilde{Y}_{j(r)}}(u))^N \quad (15)$$

将式(15)代入式(7), 即可得出 MIMO 雷达 LCIOSCA-CFAR 检测器的虚警概率

$$P_{\text{fa}}^{\text{LCIOSCA}} = \sum_{k=0}^{MN-1} \frac{(T)^k}{k!} (-1)^k \frac{d^k}{du^k} [(M_{\tilde{Y}_{j(r)}}(u))^N] \Big|_{u=T/\lambda} \quad (16)$$

因为各信号通道的信杂比相同, 那么令  $T/(1 + \text{SNR})$  代替式(10), 式(16)中的  $T$ , 即可得两种 CFAR 检测器在均匀背景中目标的检测概率  $P_d$ 。

## 5 仿真分析

下面分别对均匀背景、多目标干扰背景和杂波边缘背景下的 MIMO 雷达 CFAR 检测性能进行仿真, 其中在均匀背景中, 直接用数值分析的方法得出性能曲线, 在多目标干扰及杂波边缘背景中, 由于很难得到检测概率  $P_d$  或  $P_{\text{fa}}$  的解析表达式, 本文采用半解析方法, 即归一化门限由式(10), 式(16)得到, 然后再比较检测单元  $X$  与真实门限  $TZ$  的大小, 利用 Monte-Carlo 法统计出  $P_d$  或  $P_{\text{fa}}$ 。

### 5.1 均匀背景下检测性能分析

图2为均匀背景下本文所提 CFAR 与 CA-CFAR 检测性能比较, 其中仿真参数设置如下, 发射天线单元数  $M = 3$ , 接收天线单元数  $N = 3$ , 各通道的参考单元数  $R = 12$ , 序值  $r = 9$ , 虚警概率  $P_{\text{fa}} = 1 \times 10^{-6}$ 。

从图2可看出, 在均匀背景中, OSCA-CFAR 和 LCIOSCA-CFAR 检测器的性能几乎相同, 其相对于 CA-CFAR 的损失非常小, 当检测概率  $P_d = 0.8$  时, OSCA-CFAR 和 LCIOSCA-

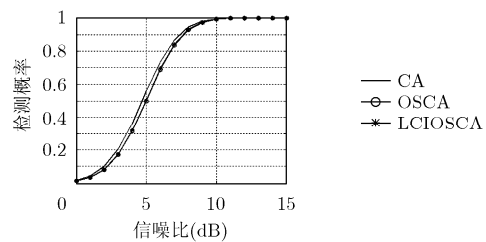


图2 均匀背景下CFAR检测器的检测性能

CFAR较CA-CFAR的损失只有0.25dB。这是由于两种检测器均采用了有序统计(OS)的方法对杂波进行功率估计的缘故。

5.2 多目标干扰背景下检测性能分析

仿真实验参数设置如下,  $M = 3, N = 3, R = 12$ , 序值  $r = 9$ , 虚警概率  $P_{fa} = 1 \times 10^{-6}$ , 假设干扰目标功率与主目标功率相等, 即  $ICR = SCR$ , 且检测单元内不包含干扰目标, 求检测概率时Monte-Carlo次数为  $10^5$ ,  $IN_1, IN_2, IN_3$  分别为3个接收天线单元对应通道所包含的干扰目标数。

图3为多目标干扰背景下本文所提CFAR与CA-CFAR检测性能比较, 其中  $IN_1 = 1, IN_2 = 2, IN_3 = 3$ , 从图3可以看出, 在多目标干扰环境下, OSCA-CFAR和LCIOSCA-CFAR检测性能明显优于CA-CFAR。同时, LCIOSCA-CFAR的检测性能略优于OSCA-CFAR, 如  $P_d = 0.8$  时, OSCA-CFAR较LCIOSCA-CFAR有0.5dB的损失。这是因为LCIOSCA-CFAR在本地通道间的综合是原始数据直接相加, 其数据信息量损失较小。

OSCA-CFAR与LCIOSCA-CFAR由于均采用了有序统计的方法, 所有两种检测器均受干扰目标数最大容量的限制。如本例中, 序值  $r = 9$ , 所以每个通道的多目标容限应为  $12 - 9 = 3$ 。图4给出了干扰目标数对两种CFAR检测性能的影响, 图中OSCA(1,1,2)表示OSCA-CFAR对应  $IN_1 = 1, IN_2 = 1, IN_3 = 2$ 。从图4不难发现, 当所有接收天线单元对应通道的干扰目标数均在容许范围之内时, 两种检测器的性能差别不大, 其中LCIOSCA-CFAR的检测性能略优于OSCA-CFAR; 当部分接收天线单元对应通道的干扰目标数超过容许范围时, 两种检测器的检测性能急剧下降, 其中LCIOSCA-CFAR较OSCA-CFAR性能下降更为明显; 当所有接收天线单元对应通道的干扰目标数均超过容许范围时, LCIOSCA-CFAR丧失了检测能力, 但OSCA-CFAR还保持了一定的检测能力。

5.3 杂波边缘背景下虚警性能分析

假设参考窗由噪声单元和杂波加噪声单元两部分组成, 其中杂波单元为杂波加噪声。仿真实验参数设置如下,

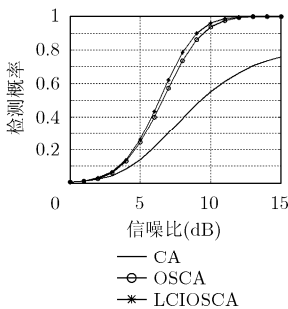


图3 多目标干扰背景下CFAR检测性能比较

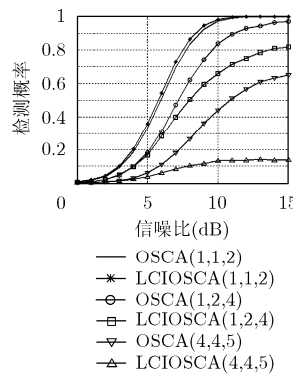


图4 干扰目标数对两种CFAR检测器性能的影响

$M = 3, N = 3, R = 12, r = 9$ , 设计虚警概率  $P'_{fa} = 1 \times 10^{-6}$ , Monte-Carlo次数为  $10^7$ , 每个通道的杂波加噪声单元数为6个, 其余6个单元位于噪声区, 检测单元位于杂波加噪声区, 即检测器在最糟糕的杂波边缘, 此时的虚警概率体现了检测器控制虚警峰值的能力。

图5为杂波边缘背景下3种CFAR检测器的虚警概率与杂噪比的关系。从图5可看出, 当杂噪比小于3dB时, 3种CFAR检测器的虚警概率差别不大, 其中OSCA-CFAR略高, LCIOSCA-CFAR与CA-CFAR相当。当杂噪比大于3dB时, 3种CFAR检测器的虚警概率差异明显, OSCA-CFAR的虚警概率最高, 说明这种检测器的虚警峰值的控制能力最差, CA-CFAR次之, LCIOSCA-CFAR的虚警概率远远低于上述两者, 说明LCIOSCA-CFAR控制虚警峰值的能力最强。

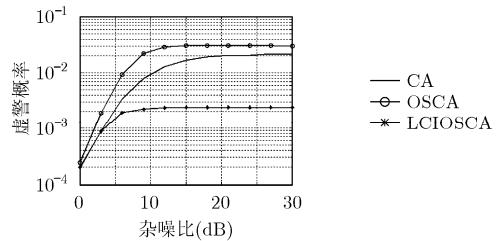


图5 杂波边缘背景下CFAR检测器的虚警概率

6 结束语

本文针对MIMO雷达的体制特点, 提出了两种有序统计与均值相结合的MIMO雷达CFAR检测器, 给出了详细的理论公式及仿真分析, 结果表明, OSCA-CFAR和LCIOSCA-CFAR检测器在均匀背景下较CA-CFAR损失较小, 在多目标干扰环境下较CA-CFAR性能改善明显, 且杂波边缘环境中不会引起虚警峰值的过高, 在实际应用中具有较强的鲁棒性。同时, 本文所提两种CFAR检测器也各有优缺点, 如在均匀背景下, 两种检测器性能相当; 在多目标干扰环境下, 当干扰目标数在容许范围之内时, LCIOSCA-CFAR略优于OSCA-CFAR, 当干扰目标数超过容许范围时, OSCA-CFAR要明显优于LCIOSCA-CFAR; 在杂波边缘环境下, LCIOSCA-CFAR虚警峰值要低于OSCA-CFAR; 从计算量来看, OSCA-CFAR要进行  $MN$  次排序, 而LCIOSCA-CFAR只进行  $N$  次排序, 所以LCIOSCA-CFAR的计算量要低于OSCA-CFAR; 从通信数据量来看, 两者所需通信带宽相等。

值得注意的是, 本文在讨论CFAR检测条件时假设各信号通道杂波独立同分布且具有相同的参数, 信杂比相同等, 实际情况却要比这复杂得多。事实上, 由于MIMO雷达的收发天线单元在空间是较大距离分布的, 每个天线单元与目标的距离不等, 每个信号通道观测目标的角度不同, 对应收发天线与目标的夹角也不相同, 这些因素均会引起各通道信号与杂波参数的不等。设计与分析更加符合实际情况的复杂条件下MIMO雷达CFAR检测器将是下一步的主要工作。

## 参考文献

- [1] Fishler E, Haimovich A, and Blum R, *et al.* MIMO radar: An idea whose time has come [C]. Proc. IEEE Radar Conf. Philadelphia, PA, April 2004: 71-78.
- [2] Fishler E, Haimovich A, and Blum R, *et al.* Spatial diversity in radars—Models and detection performance [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823-838.
- [3] Dai Xizeng, Xu Jia, and Peng Yingning, *et al.* A new method of improving the weak target detection performance based on the MIMO radar [C]. 2006 CIE international conference on radar, Shanghai, 2006: 24-27.
- [4] Sammartino P, Baker C, and Griffiths H. MIMO performance in clutter environment [C]. 2006 CIE international conference on radar, Shanghai, 2006: 32-35.
- [5] Sheikhi A and Zamani A. Model-based adaptive target detection in clutter using MIMO radar [C]. 2006 CIE international conference on radar, Shanghai, 2006: 57-60.
- [6] Sammartino P, Baker C, and Griffiths H. Adaptive MIMO radar system in clutter [C]. IEEE Radar conference, Boston, 2007: 276-281.
- [7] Sheikhi A and Zamani A. Coherent detection for MIMO radars [C]. IEEE Radar conference, Boston, 2007: 302-307.
- [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: 52.
- He You, Guan Jian, and Peng Ying-ning, *et al.* Automatic Radar Detection and CFAR Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 52.
- 王敦勇: 男, 1980年生, 硕士生, 从事多通道雷达信号检测与处理的研究.
- 马晓岩: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达系统、现代信号处理及其应用的研究.