

利用复单脉冲比的平面阵列雷达群目标检测方法*

王罗胜斌,徐振海,刘兴华,王国玉

(国防科技大学 电子科学学院 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室,湖南长沙 410073)

摘要:针对平面阵列雷达群目标检测问题,以矩形阵为例,详细分析方位向和俯仰向复单脉冲比虚部的统计特性;建立平面阵列雷达群目标检测模型,根据恒虚警检测原理推导复单脉冲比虚部的椭圆判决域,并利用复单脉冲比实部辅助判决,综合提出基于复单脉冲比的平面阵列雷达群目标检测算法。针对双目标情形进行仿真实验,结果表明:在较高信噪比、较大角度间隔以及幅度相当且相位差较大的条件下算法能够有效检测群目标。

关键词:群目标检测;平面阵列;复单脉冲比;椭圆判决域;辅助判决

中图分类号:TN821.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)03-076-06

Detection for unresolved targets by using complex monopulse ratio on planar array radar

WANG Luoshengbin, XU Zhenhai, LIU Xinghua, WANG Guoyu

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the detection of unresolved targets on the planar array radar, a rectangle array was taken as example to analyze the statistical distribution of imaginary of complex monopulse ratios in azimuth and elevation firstly. The detection model was given for planar array and an ellipse decision domain for the imaginary part of the monopulse ratios was set according to the constant false alarm theory. Besides, the real part of the monopulse ratios was used to assist the decision. By combining the two decisions, the detection algorithm for unresolved targets based on complex monopulse ratio was proposed. Simulation results based on the rectangle array for two targets demonstrate that the proposed algorithm performs well in the conditions of high signal to noise ratio, wide angle separate and suitable complex amplitude ratio.

Key words: unresolved targets detection; planar array; complex monopulse ratio; ellipse decision domain; assistant decision

当多个目标位于同一距离单元、角度单元和多普勒单元内,在任何一维利用常规线性处理都难以分辨时,称该多目标集合为群目标^[1],学术上称为不可分辨目标。在雷达探测领域,群目标现象普遍存在。在防空背景下,编队飞机可构成群目标;在反导背景下,弹道导弹突防时释放的有源或无源诱饵、箔条以及分离过程中产生的碎片等也可构成群目标。群目标检测是研究群目标的基础,是分辨与跟踪的先决条件。需要指出,此处的“检测”是指发现并跟踪目标后,对该目标是“单目标”或“群目标”的统计判决。若能对来袭目标提供属性信息,对早期预警以及防御均有重要意义。

关于群目标检测问题,国内外开展了大量的研究。Sherman^[2]早在1965年就利用单脉冲比的虚部进行门限检测,当虚部超过某门限值时,判

定为群目标,但此方法受噪声扰动极大。在目标回波幅值不变的条件下,McAulay等^[3]基于广义似然比检测提出了对群目标的检测方法,但要求信号有较高的信噪比并且目标幅度相差在3 dB以内。Blair等^[4-6]提出了基于Neyman-Pearson准则的广义似然比检测方法。文献[4]中以两个目标为例,推导了和信号测量幅值的条件概率密度函数。文献[5]和文献[6]针对两个不可分辨的瑞利目标,结合和信号的概率密度函数,利用单脉冲比的实部和虚部提出了Neyman-Pearson群目标检测算法。该算法无须目标信噪比及目标波达角(Direction Of Arrival, DOA)等先验信息,在给定虚警率的条件下,只需4个信噪比为7 dB的脉冲就能对角度间隔为半波束宽度的两个瑞利目标进行检测。针对拖曳式诱饵与飞机

* 收稿日期:2017-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61471372)

作者简介:王罗胜斌(1992—),男,江西吉安人,博士研究生,E-mail:wangluoshengbin@163.com;

徐振海(通信作者),男,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:drxzh930@sina.com

构成群目标的情况,文献[7]应用已有的群目标检测理论,提出了基于单脉冲比虚部的拖曳式诱饵检测方法。文献[8]考虑线性调频信号,重点研究了群目标条件下线性调频信号相位差的统计特性,提出了一种基于线性调频信号相位差的群目标检测算法。最近,文献[9]基于一维线阵从复单脉冲比统计特性出发,利用复单脉冲比实现群目标检测。上述工作大多为原理方法层面,距离实际装备的应用还有一定差距。本文在文献[9]的基础上,提出一种平面阵列雷达群目标检测算法。

1 平面阵列雷达群目标回波模型

考虑 $N_1 \times N_2$ 元的均匀半波长矩形阵列雷达,群目标条件下接收信号为多个目标回波的线性叠加。忽略信号放大、变频、采样等物理过程,群目标回波模型可表示为:

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^M A_i \mathbf{S}(u_i, v_i) + \mathbf{N} \quad (1)$$

式中:下标 i 表示第 i 个目标; A_i 表示回波复幅度; $\mathbf{S}(u_i, v_i) = \mathbf{s}(u_i) \mathbf{s}^T(v_i)$, $\mathbf{s}(u_i)$ 和 $\mathbf{s}(v_i)$ 分别表示方位和俯仰上的阵列导向矢量,写为

$$\mathbf{s}(u_i) = \frac{1}{\sqrt{N_1}} [e^{-j\pi \frac{(N_1-1)}{2} u_i}, e^{-j\pi \frac{(N_1-3)}{2} u_i}, \dots, e^{j\pi \frac{(N_1-1)}{2} u_i}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{s}(v_i) = \frac{1}{\sqrt{N_2}} [e^{-j\pi \frac{(N_2-1)}{2} v_i}, e^{-j\pi \frac{(N_2-3)}{2} v_i}, \dots, e^{j\pi \frac{(N_2-1)}{2} v_i}]^T \quad (3)$$

j 表示纯虚数, $u_i = \sin\theta_i \cos\varphi_i$ 与 $v_i = \sin\theta_i \sin\varphi_i$ 为正弦空间坐标, θ_i 和 φ_i 分别为目标在方位和俯仰向与阵面法向的夹角,根据定义有 $\theta_i \in [-\theta_{3dB}/2, \theta_{3dB}/2]$, $\varphi_i \in [-\varphi_{3dB}/2, \varphi_{3dB}/2]$, θ_{3dB} 和 φ_{3dB} 为阵列雷达方位和俯仰向的波束宽度; $\mathbf{N} \in \mathbf{C}^{N \times N}$ 表示阵列接收机热噪声矩阵,服从零均值高斯分布,热噪声功率为 σ^2 ,阵元的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)定义为 $SNR = |A_i|^2 / \sigma^2$; M 为群目标数目,当 $M=1$ 时,信号模型退化为单目标情况。

2 平面阵列单脉冲比虚部的统计特性

2.1 平面阵列单脉冲处理

平面阵列雷达应用单脉冲技术时,将阵面划分为4个对称子阵(阵面划分如图1所示),利用4个子阵形成和波束、方位差波束和俯仰差波束,利用方位、俯仰向单脉冲比分别测量目标的方位角和俯仰角。

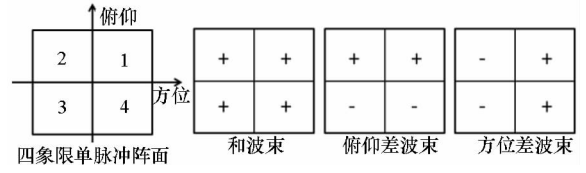


图1 四象限单脉冲阵面

Fig. 1 Four quadrant monopulse planar array

上述单脉冲处理方法本质上是相位和差单脉冲^[10]。不考虑热噪声, u, v 与单脉冲比之间近似呈线性关系:

$$\frac{\Delta_A}{\Sigma} = \frac{\mathbf{w}_{\Sigma_A}^T \mathbf{X} \mathbf{w}_{\Delta_A}}{\mathbf{w}_{\Sigma_A}^T \mathbf{X} \mathbf{w}_{\Sigma_A}} = \tan\left(\frac{N_1 \pi}{4} u\right) \approx K_A u \quad (4)$$

$$\frac{\Delta_E}{\Sigma} = \frac{\mathbf{w}_{\Delta_E}^T \mathbf{X} \mathbf{w}_{\Sigma_E}}{\mathbf{w}_{\Sigma_E}^T \mathbf{X} \mathbf{w}_{\Sigma_E}} = \tan\left(\frac{N_2 \pi}{4} v\right) \approx K_E v \quad (5)$$

其中, $\frac{\Delta_A}{\Sigma}$ 与 $\frac{\Delta_E}{\Sigma}$ 表示方位和俯仰向的单脉冲比, $K_A = N_1 \pi/4$, $K_E = N_2 \pi/4$ 为两方向的鉴角斜率, \mathbf{T} 表示转置运算。 \mathbf{w}_{Σ_A} 和 \mathbf{w}_{Σ_E} 分别表示方位和俯仰向的和权值, \mathbf{w}_{Δ_A} 和 \mathbf{w}_{Δ_E} 分别表示方位和俯仰向的差权值,写为:

$$\mathbf{w}_{\Sigma_A} = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{w}_{\Sigma_E} = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{w}_{\Delta_A} = j \left[\underbrace{-1 \quad \dots \quad -1}_{N_1/2} \quad \underbrace{1 \quad \dots \quad 1}_{N_1/2} \right]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{w}_{\Delta_E} = j \left[\underbrace{1 \quad \dots \quad 1}_{N_2/2} \quad \underbrace{-1 \quad \dots \quad -1}_{N_2/2} \right]^T \quad (9)$$

考虑热噪声存在,当信噪比较高时,单脉冲比可近似为如式(10)~(11)所示结果,详细推导参见文献[9]和文献[10]。

$$\frac{\Delta_A}{\Sigma} \approx \begin{cases} K_A u + \frac{n_{\Delta_A} + K_A u n_{\Sigma}^*}{s} & \text{单目标} \\ K_A \tilde{u} + \frac{n_{\Delta_A} + K_A \tilde{u} n_{\Sigma}^*}{s'} & \text{群目标} \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta_E}{\Sigma} \approx \begin{cases} K_E v + \frac{n_{\Delta_E} + K_E v n_{\Sigma}^*}{s} & \text{单目标} \\ K_E \tilde{v} + \frac{n_{\Delta_E} + K_E \tilde{v} n_{\Sigma}^*}{s'} & \text{群目标} \end{cases} \quad (11)$$

其中: $n_{\Delta_A} = \mathbf{w}_{\Sigma_E}^T \mathbf{N} \mathbf{w}_{\Delta_A}$, $n_{\Delta_E} = \mathbf{w}_{\Delta_E}^T \mathbf{N} \mathbf{w}_{\Sigma_A}$, $n_{\Sigma} = \mathbf{w}_{\Sigma_E}^T \mathbf{N} \mathbf{w}_{\Sigma_A}$; \tilde{u} 和 \tilde{v} 分别为方位和俯仰向的复指示角^[9],与目标的角度和相对复幅度有关; s 和 s' 分别为单目标和群目标条件下的和通道电压; $(\cdot)^*$ 表示取共轭运算。

2.2 二维单脉冲比虚部的统计特性

由式(10)、式(11)可以看出,单目标和群目标条件下两方向上的单脉冲比虚部均服从实高斯分布,均值与方差分别为:

$$E(r_{AI}) = \begin{cases} 0 & \text{单目标} \\ K_A \text{Im}(\tilde{u}) & \text{群目标} \end{cases} \quad (12)$$

$$E(r_{EI}) = \begin{cases} 0 & \text{单目标} \\ K_E \text{Im}(\tilde{v}) & \text{群目标} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{VAR}(r_{AI}) = \begin{cases} \frac{1 + K_A^2 u^2}{2\text{SNR}'_Y} & \text{单目标} \\ \frac{1 + K_A^2 |\tilde{u}|^2}{2\text{SNR}'_Y} & \text{群目标} \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{VAR}(r_{EI}) = \begin{cases} \frac{1 + K_E^2 v^2}{2\text{SNR}'_Y} & \text{单目标} \\ \frac{1 + K_E^2 |\tilde{v}|^2}{2\text{SNR}'_Y} & \text{群目标} \end{cases} \quad (15)$$

其中: $r_{AI} = \text{Im}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right)$, $r_{EI} = \text{Im}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right)$, $\text{Im}(\cdot)$ 表示取虚部运算; SNR_Y 和 SNR'_Y 分别表示单目标和群目标条件下的和通道信噪比, SNR_Y 可改写为 $\text{SNR} \cdot F_Y(u, v)$, $F_Y(u, v)$ 为阵列和方向图。

实际上,方位和俯仰向的单脉冲比并非相互独立,其协方差不为零。单目标条件下, u 和 v 为实数,易求得协方差为:

$$\text{Cov}(r_{AI}, r_{EI}) = \frac{K_A K_E uv}{2\text{SNR}'_Y} \quad (16)$$

而群目标条件下, \tilde{u} 和 \tilde{v} 为复数,所以协方差为:

$$\begin{aligned} \text{Cov}(r_{AI}, r_{EI}) &= E\left[\frac{K_A K_E \text{Im}(\tilde{u} \tilde{v}^*) \text{Im}(\tilde{v} \tilde{u}^*)}{|s'|^2}\right] \\ &= \frac{K_A K_E \text{Re}(\tilde{u} \tilde{v}^*)}{2\text{SNR}'_Y} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部运算。通过上述分析可知:方位和俯仰向单脉冲比虚部服从二维联合高斯分布,均值与复指示角有关,方差和协方差与复指示角以及和通道信噪比有关,方位向和俯仰向单脉冲比统计不独立。

3 平面阵列雷达群目标检测算法

实际中,群目标通常在方位向与俯仰向均无法分辨。对于平面阵列雷达的群目标检测而言,最主要的问题是检测模型的建立以及如何有效利用两个方向的复单脉冲比。

3.1 平面阵列雷达群目标检测模型

通过对方位和俯仰向单脉冲比虚部的统计特性分析,参照文献[9]建立二维平面阵列群目标

检测模型:

$$\begin{cases} H_0: \mathbf{r}_1 \sim \text{RN}_2(\mathbf{0}, \mathbf{C}_0) \\ H_1: \mathbf{r}_1 \sim \text{RN}_2(\mathbf{m}, \mathbf{C}_1) \end{cases} \quad (18)$$

其中, H_0 假设表示单目标, H_1 假设表示群目标, $\mathbf{r}_1 = [r_{AI}, r_{EI}]^T$, RN_2 表示二维实高斯分布, $\mathbf{0}$ 为二维零向量, $\mathbf{m} = [K_A \text{Im}(\tilde{u}), K_E \text{Im}(\tilde{v})]^T$, \mathbf{C}_0 和 \mathbf{C}_1 分别表示两种假设条件下的二维高斯分布协方差矩阵,写为:

$$\mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} \frac{1 + K_A^2 u^2}{2\text{SNR}'_Y} & \frac{K_A K_E uv}{2\text{SNR}'_Y} \\ \frac{K_A K_E uv}{2\text{SNR}'_Y} & \frac{1 + K_E^2 v^2}{2\text{SNR}'_Y} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1 + K_A^2 |\tilde{u}|^2}{2\text{SNR}'_Y} & \frac{K_A K_E \text{Re}(\tilde{u} \tilde{v}^*)}{2\text{SNR}'_Y} \\ \frac{K_A K_E \text{Re}(\tilde{u} \tilde{v}^*)}{2\text{SNR}'_Y} & \frac{1 + K_E^2 |\tilde{v}|^2}{2\text{SNR}'_Y} \end{bmatrix} \quad (20)$$

由上可知,二维群目标检测更加复杂,方位向和俯仰向单脉冲比存在相关性,协方差与目标角度成正比、与和通道信噪比成反比。在这种情况下,无法将文献[9]的群目标检测算法直接拓展至面阵,所以接下来重点研究二维群目标检测算法。

3.2 基于复单脉冲比的群目标检测算法

3.2.1 单脉冲比虚部的群目标判决

考虑复单脉冲比的虚部。观察群目标检测模型,两种假设条件下单脉冲比虚部的协方差矩阵未知且不同,难以运用广义似然比检验^[11]。一种可行的方法是:在单目标假设下根据恒定虚警概率设定判决域。 H_0 假设下 r_{EI} 和 r_{AI} 的联合概率密度函数为:

$$f(r_{AI}, r_{EI} | H_0) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2(1-\gamma^2)}\left(\frac{r_{AI}^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\gamma r_{AI} r_{EI}}{\sigma_1 \sigma_2} + \frac{r_{EI}^2}{\sigma_2^2}\right)\right]}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\gamma^2}} \quad (21)$$

式中, $\sigma_1^2 = \frac{1 + K_A^2 u^2}{2\text{SNR}'_Y}$, $\sigma_2^2 = \frac{1 + K_E^2 v^2}{2\text{SNR}'_Y}$, $\gamma = \frac{K_A K_E uv}{\sqrt{(1 + K_A^2 u^2)(1 + K_E^2 v^2)}}$ 分别表示 r_{AI} 和 r_{EI} 的方差以及相关系数。

在 H_1 假设的均值和方差均未知的条件下,为了获得更大的检测概率,保证虚警率恒定的同时判决域面积越小越好。图 2 给出了单目标复单脉冲比虚部的概率密度函数,由式(21)和图 2 可知,判决域为椭圆时可获得最大的检测概率。此椭圆中心位于 r_{AI} 和 r_{EI} 平面上的原点,形状取决于 σ_1^2 、 σ_2^2 、 γ , 大小取决于虚警概率 P_{fa} 。椭圆判决域表示为:

$$\frac{r_{AI}^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\gamma r_{AI} r_{EI}}{\sigma_1 \sigma_2} + \frac{r_{EI}^2}{\sigma_2^2} \stackrel{H_1}{\leq} \alpha \stackrel{H_0}{\leq} \alpha \quad (22)$$

其中,门限 α 与 P_{fa} 有关。 P_{fa} 可写为:

$$P_{fa} = 1 - \int_{\frac{r_{AI}^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\gamma r_{AI}r_{EI}}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{r_{EI}^2}{\sigma_2^2} \leq \alpha} f(r_{AI}, r_{EI} | H_0) dr_{AI} dr_{EI} \quad (23)$$

式(23)中的积分项为一般二维高斯分布概率函数,求解的主要步骤为:首先需要将坐标轴进行旋转变换使椭圆域正规,计算对应参数,再用极坐标方法求解积分值。经过推导,得到门限 α 的闭式解为:

$$\alpha = -2(1 - \gamma^2) \ln P_{fa} \quad (24)$$

将式(24)代入式(22)可得:

$$\frac{r_{AI}^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\gamma r_{AI}r_{EI}}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{r_{EI}^2}{\sigma_2^2} \leq -2(1 - \gamma^2) \ln P_{fa} \quad (25)$$

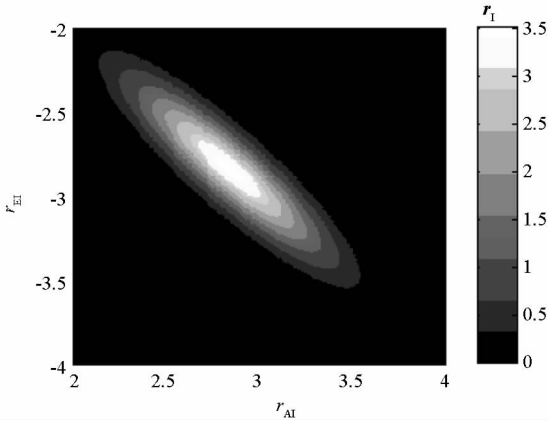


图2 单目标复单脉冲比虚部概率密度函数

Fig.2 Probability density function of complex monopulse ratio imaginary part of single target

但是,式(25)中 σ_1^2 、 σ_2^2 、 γ 包含的参数 u 、 v 和 SNR_S 均未知,此处用其极大似然估计代替。文献[10]严格导出了阵列单脉冲处理时角度的极大似然估计, u 和 v 的极大似然估计为 $\text{Re}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right)$ 和

$\text{Re}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right)$, 则 SNR_S 的极大似然估计为 $SNR \cdot F_S\left(\text{Re}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right), \text{Re}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right)\right)$ 。所以,二维面阵复单脉冲比虚部的判决表达式为:

$$\frac{r_{AI}^2}{\hat{\sigma}_1^2} - \frac{2\hat{\gamma}r_{AI}r_{EI}}{\hat{\sigma}_1\hat{\sigma}_2} + \frac{r_{EI}^2}{\hat{\sigma}_2^2} \leq -2(1 - \hat{\gamma}^2) \ln P_{fa} \quad (26)$$

式中,

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{1 + K_A^2 \text{Re}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right)^2}{2SNR \cdot F_S\left(\text{Re}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right), \text{Re}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right)\right)} \quad (27)$$

$$\hat{\sigma}_2^2 = \frac{1 + K_E^2 \text{Re}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right)^2}{2SNR \cdot F_S\left(\text{Re}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right), \text{Re}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right)\right)} \quad (28)$$

$$\hat{\gamma} = \frac{K_A K_E \text{Re}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right) \text{Re}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right)}{\sqrt{\left[1 + K_A^2 \text{Re}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right)^2\right] \left[1 + K_E^2 \text{Re}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right)^2\right]}} \quad (29)$$

3.2.2 单脉冲比实部的群目标判决

利用复单脉冲比实部可以进行辅助判决。受到群目标角度和相对复幅度的影响,可能出现虚部极小而实部极大的群目标“野值”。单脉冲测角的前提是目标位于波束指向附近,所以当目标估计角度远超出雷达主波束时判定为群目标。二维面阵复单脉冲比实部的判决表达式为:

$$\left| \text{Re}\left(\frac{\Delta_A}{\Sigma}\right) \right| \leq \frac{H_1 K_A u_{3dB}}{H_0} \quad (30)$$

$$\left| \text{Re}\left(\frac{\Delta_E}{\Sigma}\right) \right| \leq \frac{H_1 K_E v_{3dB}}{H_0} \quad (31)$$

其中, u_{3dB} 、 v_{3dB} 分别为 u 、 v 方向的波束宽度。

复单脉冲比实部的辅助判决实际上弥补了虚部判决的缺陷。根据文献[2],双目标的复指示角可写为:

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= \frac{u_1 + \rho u_2}{1 + \rho} \\ &= \frac{[u_1 + p \cos \Delta \phi (u_1 + u_2) + p^2 u_2] + j [p \sin \Delta \phi (u_1 - u_2)]}{1 + 2p \cos \Delta \phi + p^2} \end{aligned} \quad (32)$$

式中, $\rho = p e^{j\Delta\phi}$ 为复幅度比, p 为幅度比, $\Delta\phi$ 为相位差。可以看出,当两目标幅度相等、相位差为 $\pm\pi$ 时,复单脉冲比的虚部为零而实部为无穷,此时只有由式(30)、式(31)才能检测到群目标。

3.2.3 算法流程

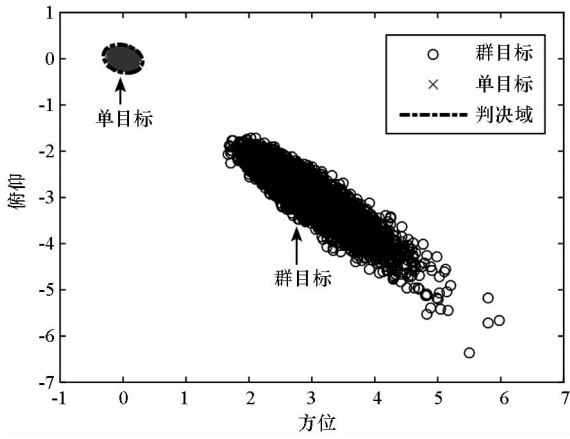
综合复单脉冲比虚部和实部的群目标判决,本文提出了基于复单脉冲比的平面阵列雷达群目标检测算法,可总结为以下步骤:

步骤1:通过和差加权得到目标方位向和俯仰向的单脉冲比。

步骤2:取单脉冲比实部估计目标角度,代入式(30)、式(31)中,如果超出波束宽度,判定为群目标,否则进行步骤3。

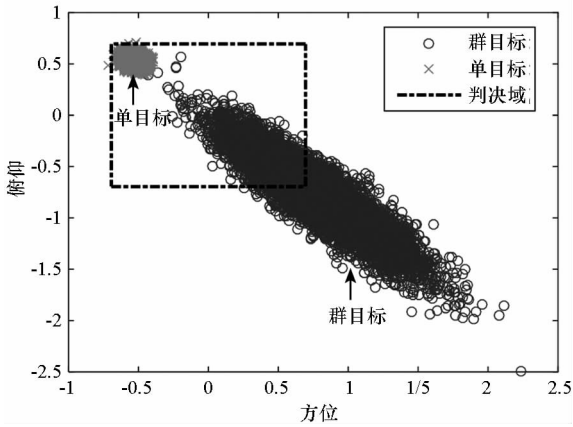
步骤3:利用步骤2估计的目标角度分别计算式(27)~式(29)中的 $\hat{\sigma}_1^2$ 、 $\hat{\sigma}_2^2$ 、 $\hat{\gamma}$,然后代入式(26),若超出判决域,判定为群目标,否则为单目标。

以 16×16 元均匀半波长矩形阵列为例,图3给出了在 $SNR = 5$ dB 条件下群内两个目标的单脉冲比分布以及 $P_{fa} = 10^{-4}$ 时的判决域, $\Delta u = 0.5u_{3dB}$, $\Delta v = 0.4v_{3dB}$, $\rho = 0.9e^{j\pi}$ 。



(a) 虚部

(a) Imaginary part



(b) 实部

(b) Real part

图 3 复单脉冲比分布以及判决域

Fig. 3 Distribution of complex monopulse ratio and decision domain

4 仿真实验

考虑 16×16 阵元的均匀矩形阵, 阵元间距为半波长。假设存在两个目标组成的群目标, 定义 u, v 方向的角度间隔分别为 $\Delta u = |u_1 - u_2|$ 和 $\Delta v = |v_1 - v_2|$, SNR 表示较强目标对应的阵元信噪比。为了分析算法的检测性能, 进行 10^6 次蒙特卡洛仿真计算检测概率 P_d 。

4.1 检测性能与信噪比的关系

图 4 给出了算法在不同信噪比下算法的检测性能。在该实验中, 两目标关于阵列法线对称分布, $\Delta u = 0.5u_{3dB}$, $\Delta v = 0.6v_{3dB}$, $\rho = 0.8e^{j2\pi/3}$, P_{fa} 分别设置为 10^{-4} 、 10^{-5} 和 10^{-6} 。可以看出, 随着信噪比增加检测概率逐步上升。在阵元信噪比高于 -2 dB 时, 能够实现有效检测。虚警概率降低时, 椭圆判决域面积减小, 此时检测性能将受损失, 所以虚警概率越低, 检测概率越低。

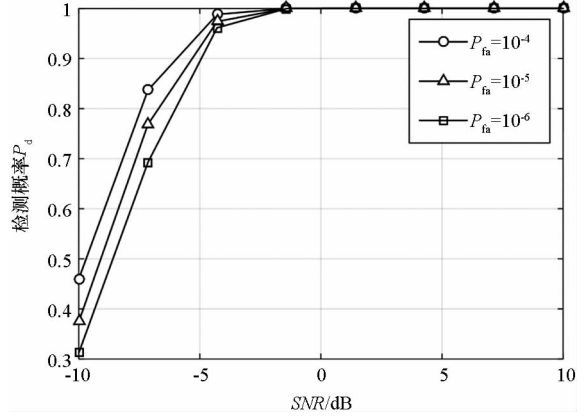
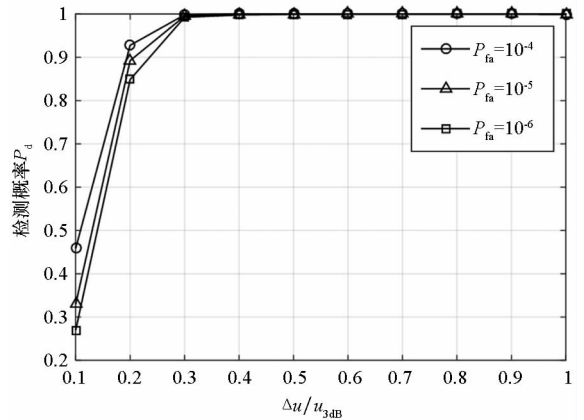


图 4 检测性能与 SNR 的关系

Fig. 4 Performance of detection versus SNR

4.2 检测性能与角度间隔的关系

图 5 给出了算法在不同角度间隔下算法的检测性能。在该实验中, $SNR = 0$ dB, 两目标关于阵列法线对称分布, $\Delta u = \Delta v$, $\rho = 0.8e^{j2\pi/3}$, P_{fa} 分别设置为 10^{-4} 、 10^{-5} 和 10^{-6} 。可以看出, 随着目标角度增加检测概率上升。当两目标角度间隔低于 $0.2u_{3dB}$ 时, 矩形阵列不能实现有效检测。由式 (32) 可知, 角度间隔与群目标复单脉冲比的虚部成正比, 所以两目标角度间隔越小越难检测。

图 5 检测性能与 Δu 的关系Fig. 5 Performance of detection versus Δu

4.3 检测性能与复幅度比的关系

图 6 给出了算法在不同复幅度比下的检测性能。在该实验中, $SNR = 0$ dB, 两目标关于阵列法线对称分布, $\Delta u = 0.5u_{3dB}$, $\Delta v = 0.6v_{3dB}$, $P_{fa} = 10^{-5}$ 。可以看出, 复幅度比是影响算法检测性能的重要因素, 当 $|p| > 0.5$ 并且 $|\Delta\phi| > \pi/3$ 时, 矩形阵才能实现有效检测。由式 (32) 可知, 群目标复单脉冲比的虚部与 $p \cdot \cos\Delta\phi$ 成正比, 当 p 或者 $\Delta\phi$ 趋于 0 时复单脉冲比的虚部极小, 算法难以检测群目标。

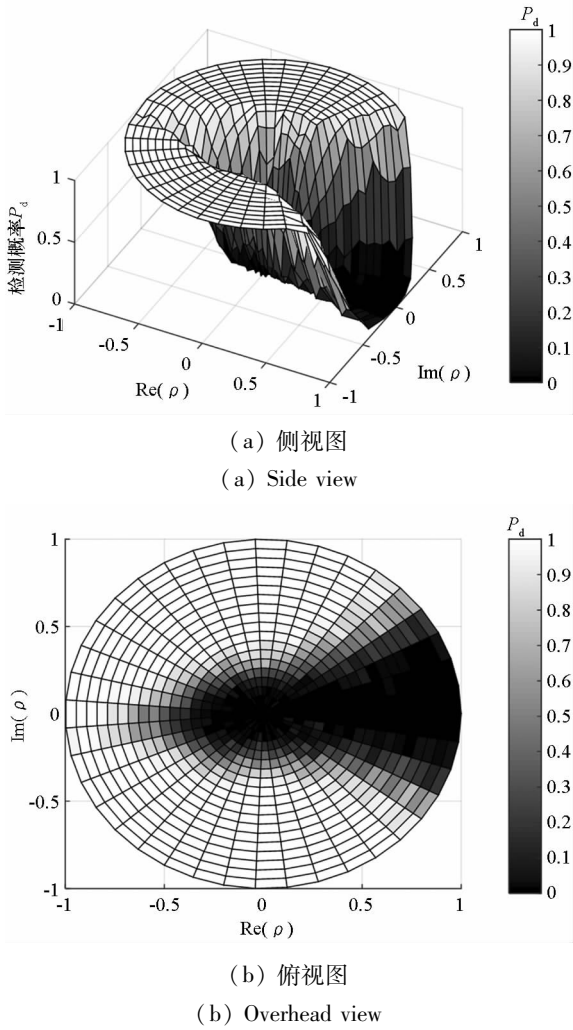


图 6 检测性能与 ρ 的关系

Fig. 6 Performance of detection versus ρ

4.4 检测性能与目标数的关系

表 1 给出了算法在不同目标数下的检测性能。在该实验中,各目标功率相同, $SNR = 0$ dB,各目标关于阵列法线对称分布。为了保证不同目标数条件下各参数相同,设定:角度间隔 $\Delta u = 0.25u_{3dB}$, $\Delta v = 0.25v_{3dB}$,相邻目标之间的相位差为 $\Delta\phi = \pi/3$,虚警概率 $P_{fa} = 10^{-5}$ 。可以看出,随着目标数的增多,群目标检测概率提升;当目标数超过 3 时,可实现高性能的群目标检测。当目标数较多时,单脉冲比的虚部会很大,远远超过门限阈值。所以,该检测算法适用于群内多个目标。

表 1 不同目标数下的检测性能

Tab. 1 Performance of detection versus targets number

目标数	2	3	4	5
检测概率	0.792	0.984	1	1

5 结论

本文提出基于复单脉冲比的平面阵列雷达群

目标检测算法,通过仿真实验分析了其在双目标条件下的检测性能,研究表明:信噪比越高、角度间隔越大、目标回波幅度相当且相位差较大,算法检测性能越好。此算法只需利用方位向和俯仰向的单脉冲比即可实现群目标的检测,计算复杂度低,易工程化,具有较强的实用性。对于矩形阵列而言,目标导向矢量矩阵可分解,因此单脉冲比具有解析解,得出的性能结论也适用于其他非矩形阵。

参考文献 (References)

- [1] 周万幸. 空间导弹目标的捕获和处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2013.
ZHOU Wanxing. Capture and processing of spatial missile[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [2] Sherman S M. Complex indicated angles in monopulse radar[D]. Pennsylvania, USA: University of Pennsylvania, 1965.
- [3] McAulay R J, McGarty T P. Maximum likelihood detection of unresolved radar targets and multipath[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1974, AES - 10(6): 821 - 829.
- [4] Blair W D, Brandt-Pearce M. Statistical description of monopulse parameters for tracking Rayleigh targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1998, 34(2): 597 - 611.
- [5] Blair W D, Brandt-Pearce M. Unresolved Rayleigh target detection using monopulse measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1998, 34(2): 543 - 552.
- [6] Blair W D, Brandt-Pearce M. Detection of multiple unresolved Rayleigh targets using quadrature monopulse measurements[C]. Proceedings of the Twenty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory, IEEE, 1996: 285 - 289.
- [7] 付孝龙, 白渭雄, 李兴成. 基于复单脉冲比的拖曳式诱饵存在性检测[J]. 现代防御技术, 2013, 41(5): 129 - 134.
FU Xiaolong, BAI Weixiong, LI Xingcheng. Detection of towed decoy based on complex monopulse ratio[J]. Modern Defence Technology, 2013, 41(5): 129 - 134. (in Chinese)
- [8] 赵锋, 毕莉, 闵涛, 等. 一种空间不可分辨多目标存在性检测的新方法[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2258 - 2263.
ZHAO Feng, BI Li, MIN Tao, et al. A new method for detecting the presence of multiple unresolved targets[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2258 - 2263. (in Chinese)
- [9] 徐振海, 王罗胜斌, 熊子源. 利用复单脉冲比的群目标检测算法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(2): 96 - 100.
XU Zhenhai, WANG Luoshengbin, XIONG Ziyuan. Detection of multiple unresolved targets using complex monopulse ratio[J]. Journal of National University of Defence Technology, 2017, 39(2): 96 - 100. (in Chinese)
- [10] 徐振海, 黄艳刚, 熊子源, 等. 阵列雷达单脉冲与极大似然估计的一致性[J]. 现代雷达, 2013, 35(10): 32 - 35.
XU Zhenhai, HUANG Yangang, XIONG Ziyuan, et al. On the consistency of mono-pulse and maximal likelihood estimation with array radar [J]. Modern Radar, 2013, 35(10): 32 - 35. (in Chinese)
- [11] Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing[M]. Newyork, USA: Prentice Hall, 1998.