

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209065

动态杂波条件下非合作辐射源目标检测研究*

阎宇嘉¹ 吉琳娜¹ 宋杰² 杨风暴¹

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 海军航空大学 烟台 264001)

摘要: 针对非合作雷达辐射源采用不可控的第三方辐射源导致杂波趋于复杂的问题,提出了根据杂波协方差矩阵特点进行杂波动态化的方法,设计了对杂波动态化处理的非合作雷达辐射源目标检测系统。结果显示:所设置的辐射源与目标信息在杂波动态化处理后,可以通过非合作雷达辐射源目标检测系统提取到准确的辐射源、目标的位置、速度、角度信息。结果表明该动态化杂波不会轻易淹没功率较大的目标,该目标检测系统可以对目标进行数据采集处理,且位置速度误差均不超过1%,对目标跟踪、实际情况下的雷达信号处理有参考作用。

关键词: 复杂杂波;非合作辐射源;目标检测

中图分类号: TN957;TN953 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.7

Target detection of non-cooperative radiation source in dynamic clutter environment

Yan Yujia¹ Ji Linna¹ Song Jie² Yang Fengbao¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the complexity of clutter caused by the uncooperative radar emitter using an uncontrollable third party emitter, a dynamic method of clutter is proposed according to the characteristics of clutter covariance matrix, and a target detection system for uncooperative radar emitter is designed. The results are as follows: After clutter dynamic processing, accurate information of radiation source, target position, velocity and Angle can be extracted by non-cooperative radar radiation source target detection system. The results show that the dynamic clutter can not easily submerge the target with high power, and the target detection system can collect and process the target data, and the errors of position and velocity are less than 1%, which can be used as reference for target tracking and radar signal processing in actual situations.

Keywords: complex clutter; non-cooperative radiation source; target detection

0 引言

常规双基地雷达接收端与发射端二者协同工作,而非合作运动雷达辐射源系统中^[1],利用第三方发射信号作为照射源进行被动的目标探测^[2],发射端和接收端彼此分离,布置在不同的平台上,并且接收端只负责接收,属于无源系统。该雷达系统可将发射端预警机,接收端可配置高精度雷达,通过固定的接收系统接收直达波参考信号和目标回波,实现对目标的探测与定位^[3]。该系统灵活多变,截取信号概率低,抗电磁干扰强,使得探测目标能力多样化。

非合作雷达辐射源系统带来诸多便利的同时也对目标探测提出新的难题。辐射源预警机的快速移动,导致杂波

多普勒展宽复杂化,进而导致目标检测的准确性下降。为进一步改善对目标检测的性能,杂波的研究已经成为现代雷达信号处理领域的重要研究方向,对如何从复杂的杂波背景中将感兴趣的可能目标提取出来是目标检测中不可缺少的部分。文献[4-5]都以杂波的空时特性进行分析,或者对其抑制杂波脊。文献[6]则对杂波特性规律总结、杂波处理,并结合物理散射理论确定了多种海杂波幅度的模型。文献[7]提出了多通道正确评价雷达信号处理机的性能,为选择信号处理方案提供理论依据,可以真实地反映对目标检测的环境。所以如何利用和研究杂波特性引入动态杂波中,对雷达系统有着重大的意义。

基于此,本文首先利用当前状态的辐射源所造成的杂波

收稿日期:2022-02-23

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(61971433)、机载脉冲无源双基地雷达对海探测技术与实验验证(61971433)项目资助

协方差矩阵,然后根据该杂波协方差的空时特性确定杂波分布函数,研制高精度动态杂波模拟系统,模拟精确杂波回波特性,提供复杂的、逼近实战的电磁环境,为雷达系统的研制和内外场的电子对抗试验提供坚实的基础,对目标定位、目标跟踪,开展相关雷达抗干扰技术的研究的试验提供参考。

1 多源信号模型

非合作雷达辐射源实际背景如图 1 所示,多元线性调频信号由辐射源发出,接收端会接收 3 部分信息,分别为直达波、目标回波、杂波回波,根据背景图设置接收端位置为 $R(0,0,Z_R)$,辐射源位置为 $T(x_T,y_T,z_T)$,速度为 $VT(vx_T,vy_T,0)$,目标位置为 $P(x_P,y_P,z_P)$,速度为 $VP(vx_P,vy_P,0)$ 。

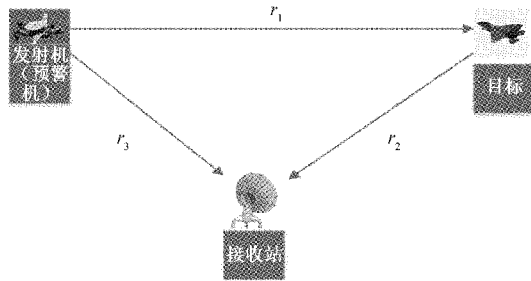


图 1 非合作辐射源雷达几何关系

根据以上背景,接收端单个天线的接收信号 s^R 可表示为:

$$S = s_{RT}(t_f, t_n) + \sigma_z \cdot s_{RP}(t_f, t_n) + \sigma_c \cdot s_c(t_f, t_n) + \sigma_n \cdot s_n \quad (1)$$

其中, $s_{RT}(t_f, t_n)$ 为目标回波信号, $s_{RP}(t_f, t_n)$ 为直达波信号, $s_c(t_f, t_n)$ 为杂波信号, σ_n 为噪声幅度, $\sigma_n = (\sqrt{10^{SNR/10}})^{-1}$, SNR 为信噪比, s_n 为噪声信号, σ_z 为直达波幅度, $\sigma_z = (\sqrt{10^{SJR/10}})^{-1}$, SJR 为信干比, σ_c 为参考信号幅度。

目标回波信号、直达波信号与杂波信号的表达式如下:

$$s_{rd}(t_f, t_n) = \text{rect}\left(\frac{t_f - \tau_b}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi f_c \tau_b) \cdot \exp(j\pi K(t_f - \tau_b)^2) = \text{rect}\left[\frac{1}{T_p}\left(t_f - \frac{r_1 + v_1 t_n + r_2 + v_2 t_n}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j2\pi f_c \left(\frac{r_1 + v_1 t_n + r_2 + v_2 t_n}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j\pi K \left(t_f - \frac{r_1 + v_1 t_n + r_2 + v_2 t_n}{c}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$s_{rd}(t_f, t_n) = \text{rect}\left(\frac{t_f - \tau_d}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi f_c \tau_d) \cdot \exp(j\pi K(t_f - \tau_d)^2) = \text{rect}\left[\frac{1}{T_p}\left(t_f - \frac{r_3 + v_3 t_n}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j2\pi f_c \left(\frac{r_3 + v_3 t_n}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j\pi K \left(t_f - \frac{r_3 + v_3 t_n}{c}\right)^2\right] \quad (3)$$

$$s_{rd}(t_f, t_n) = \sum_i \sigma_{ci} \text{rect}\left(\frac{t_f - \tau_{ci}}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi f_c \tau_{ci}) \cdot \exp(j\pi K(t_f - \tau_{ci})^2) \quad (4)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数, f_c 为载频, T_p 为脉冲宽度, K 为调频斜率,且 $K = B/T_p$, B 为信号带宽, t_f 为距离向快时间, t_n 为慢时间, τ 为相对时延, v_1 为目标与辐射源之间的相对速度, v_2 为目标与接收端之间的相对速度, v_3 为辐射源与接收端之间的相对速度, σ_{ci} 为第 i 个杂波的幅度大小。

由于接收端可配置的高精度雷达,并假设均匀阵列有 M 个阵元,天线之间的距离假设为 d , N 个信号需要处理^[9],构造导向矢量:

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1 \quad e^{j\frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda}} \quad \dots \quad e^{j\frac{2\pi(N-1)d \sin\theta}{\lambda}} \right] \quad (5)$$

设置第 1 根天线为基线,可根据以上接收阵列信号模型和导向矢量,则可得最终信号合成之后的信息,如下:

$$x(t) = s_0(t) * \mathbf{a}(\theta) \quad (6)$$

该信号即为所建立的多元阵列信号,其中 s_0 表示第 1 根天线的回波。

2 信号杂波模型以及杂波动态化处理

杂波模型如图 2 所示,杂波点 C 的位置为 $(x_c, y_c, 0)$ 。由于接收端是位于 z 轴的,电磁波从 T 出发,经过 C 点最后被接收端 R 所接收。图 2 中 θ_T, θ_R 分别为杂波相对于辐射源和接收端的方位角; ϕ_R, ϕ_T 分别为杂波相对于辐射源和接收端俯仰角; ψ_T, ψ_R 分别为杂波相对于辐射源和接收端的杂波入射锥角。设辐射源的运动状态可以随意改变,位置也可以随机改变,它们的天线均为 M 维的天线阵列,阵元与阵元之间均为等间隔。

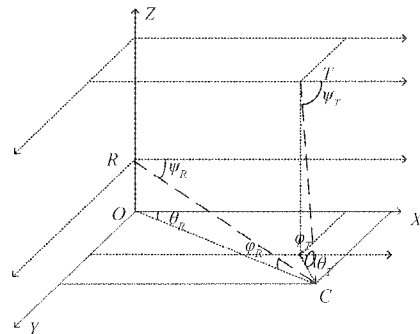


图 2 杂波几何模型

设 C 点的坐标可用参数坐标 $(\rho \cos\varphi, \rho \sin\varphi)$ 表示,散射单元的具体表达式可用 $P_i(n, k)$ 表示,理想情况下第 n 路(列子阵)的第 k 个脉冲对第 i 个杂波距离环的采样数据,公式如下:

$$P_i(n, k) = \oint \frac{g_{TC}(\theta_T) g_{RC}(\theta_R)}{R_{TC} R_{RC}} \cdot \exp(jn\omega_s(\theta_R, \phi_R) + k\omega_i(\theta_R, \phi_R)) d\theta_R \quad (7)$$

式中: k 表示为子阵的第 k 个脉冲接收到的信号; $R_{TC}R_{RC}$ 表示双基地与杂波点的距离之积; $g_{TP}(j_T), g_{RP}(j_R)$ 表示发射天线增益和接收天线增益^[10]; 则发射端和接收端的接收增益可以用如下公式表示:

$$g_{TC}(j_T) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_n I_m \exp[j \frac{2\pi d}{\lambda} (n-1)(\cos\phi_T - \cos\phi_{T0}) + (m-1)(\sin\phi_T - \sin\phi_{T0})] \quad (8)$$

$$g_{RC}(j_R) = \sum_{m=1}^M I_m \exp(j \frac{2\pi d}{\lambda} (m-1)(\sin\phi_R - \sin\phi_{R0})) \quad (9)$$

其中, I_m, I_n 分别为固定的列, 行子阵加权。 w_s 和 w_i 分别是空域角频率和时域角频率^[11], 由于只是接收端进行数据处理, 并根据杂波 C 的参数表达式, 亦可将俯仰角进行改变, 则可得出式(7)。用 $NM \times 1$ 维矢量 $\mathbf{C} = [C_{11}, C_{12}, \dots, C_{N1}, \dots, C_{1M}, C_{2M}, \dots, C_{NM}]$ 表示空时二维杂波样本^[12], M 为接收天线的阵元数, N 表示相干脉冲个数。

设 \mathbf{C}_{kl} 为第 K 个阵元第 L 个脉冲信号。则 $\mathbf{R}_p = [\mathbf{C}\mathbf{C}^H]$ 表示杂波的二维协方差矩阵, 则 \mathbf{R}_p 的矩阵元素如式(11)所示。

$$\begin{cases} w_s(\theta_R, \rho) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_R \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + z_R^2}} \\ w_i(\theta_R, \rho) = \frac{2\pi/(\lambda f_r)}{l_i - \sqrt{\rho^2 + z_R^2}} [(x_T - \rho \cos\theta_R)x_V + (y_T - \rho \sin\theta_R)y_V + z_T z_V] \end{cases} \quad (10)$$

$$c(n_1, n_2, k_1, k_2) = \sum_i \oint \frac{g_{TC}(j_T) g_{RC}(j_R) g_{TC}^*(j_T) g_{RC}^*(j_R)}{(R_{TC} R_{RC})^2} \cdot \exp(j((n_2 - n_1)w_s(\theta_R, \varphi_R) + (k_2 - k_1)w_i(\theta_R, \varphi_R))) d\theta_R \quad (11)$$

其中, f_r 是脉冲重复频率, $n_1, n_2 = 1, 2, \dots, N; k_1, k_2 = 1, 2, \dots, K$, 此处 c 表示假设不同距离单元的杂波回波信号互不相关^[13]。根据式(7)得到的杂波协方差矩阵, 提取多普勒信息, 为杂波动态化处理做先验条件。

由于非合作辐射源主要是对空、海作业, 为了体现杂波的复杂性和多变性, 式(4)中的幅度选取以海杂波为主的杂波分布作为杂波动态化处理的素材。

表 1 是以擦地角为判定条件, 擦地角反映的是杂波距离环, 而式(11)便是以杂波距离环作为条件进行转换, 与多

表 1 4 种分布概述

分布名称	分布函数概率密度	选取原则
瑞利分布	$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2}), x > 0$ 其中 σ 是形状参数。	瑞利分布是最实用的分布模型, 其他分布也是基于瑞利分布进行复杂化, 将其作为远处静止杂波分布较为合适。
对数正态分布	$f(x, \mu, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma}} \exp[-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x - \mu)^2], & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ 其中, σ 是形状参数, μ 是正态分布的尺度参数。	低擦地角($1^\circ \sim 5^\circ$)状态下, 对数正态分布 ^[12] 较好得契合了海杂波的平均回波强度。
韦布尔分布	$f(x, \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} (\frac{x}{\lambda})^{k-1} \exp(-(x/\lambda)^k), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ 其中, x 是随机变量, $\lambda > 0$ 是比例参数, $k > 0$ 是形状参数。	韦布尔分布与对数正态分布 ^[14] 在角度($1 \sim 30^\circ$)之间有较好的契合度, 而韦布尔得参数比对数正态分布更加复杂, 所以该分布复杂参数后更接近小擦地角的复杂海况。
K 分布	$f(x) = \frac{2}{a\Gamma(v+1)} (\frac{x}{2a})^{v+1} k_v(\frac{x}{a}), x > 0, v > -1$ 其中, v 是形状参数, $k_v(\cdot)$ 是二阶第 II 类修正的 Bessel 函数 $\tau(\cdot)$ 是伽马函数, a 是尺度参数。	2019 年, PAN 通过实测数据分析证明, 广义 K 分布可以很好地拟合 35° 擦地角下不同扫描角度下的海杂波 ^[15] , 也就说明大擦地角下, K 分布更能体现杂波的活跃程度。

普勒信息关联得到的空时信息。由于杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_c 以多普勒值、角度为导向矢量, 则可以通过判断信号中的多普勒大小并根据表 1 中的概率密度函数进行不同距离单元匹配选取。

杂波的多普勒值会因为距离的不同会引起杂波复杂变化^[16], 由于缺乏数据的引导, 杂波的距离引起的趋势基本一致, 所以对杂波多普勒归一化处理, 并暂时对其平均

分层, 越靠近辐射源, 杂波复杂度越高。以此类推进行杂波动态化处理。

若是利用角度信息进行杂波处理, 则需要阵列雷达天线合成之后, 这样的杂波处理会将雷达杂波处理的难度上升, 所以以多普勒值为标准进行选取。利用 ksdensity 函数对分布进行处理, 然后用集中趋势和离散程度进行对杂波协方差的比较与处理, 对不同距离单元以及脉冲选取合适

的杂波分布。进而根据表 1 中 4 种概率密度函数特性可得,瑞利分布和对数正态分布可用于单一复杂度的杂波环境,韦布尔分布可以根据杂波协方差进行杂波复杂化,而 K 分布属于海杂波模型,将其参数扩大之后,可用于辐射源运动导致杂波脊出现峰值的状况。

3 仿真实验

3.1 信号处理流程以及雷达参数设置

图 3 为本文对信号处理流程,根据辐射源的运动状态进行环境分析^[17],然后用目标检测方法进行检测处理。

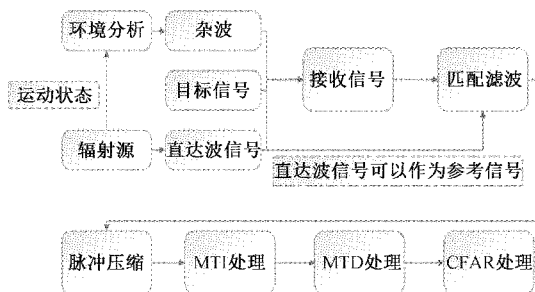


图 3 信号处理流程系统

本节用仿真实验来验证本文方法在非合作辐射源雷达系统中的有效性,仿真参数如表 2 所示。

表 2 雷达参数及接收端参数

仿真参数	数值
工作载波频率/GHz	1
带宽/MHz	2
时宽/ μ s	42
脉冲重复频率/Hz	4 200
采样频率/MHz	2
相干脉冲数	16
目标最大速度/m/s	600
接收端天线阵元数	12
天线间距/m	0.15

3.2 辐射源参数配置及杂波分布

辐射源的位置为(3 km,4 km,800 m),速度为 200 m/s。辐射源的运动状态简单可分为正径向、负径向、切向以及斜向。为了得到运动辐射源对,根据式(7)可以得到协方差矩阵,以归一化多普勒频率与归一化角频率为横纵坐标,即式(10)所示内容,得到杂波图协方差矩阵图,结果如图 4 所示,由于辐射源的运动状态有很多种,选取了比较直观、简单的 3 个运动状态,分别为正径向、切向、斜向(30°)。

根据以上的杂波谱,可以得到,辐射源处于正径向状态下,杂波变化率趋于角度和多普勒值的两个极端,也就说明辐射源在正径向运动状态下,处于辐射源与接收端一

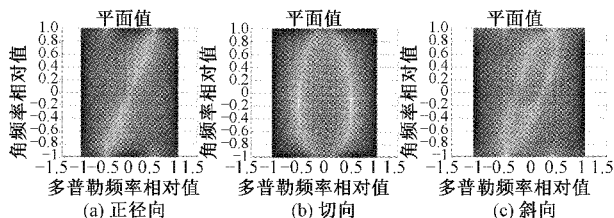


图 4 3 种状况下的杂波谱

条直线上的速度变化率较大,杂波的波动状况也较大,在空间感知来说,越接近辐射源本身,杂波会更复杂;在切向与斜向的图片也可以看出该规律,导致其杂波谱变化的原因是辐射源运动状态不同的原因,在切向条件下,速度变化率较大的范围并不是处于辐射源与接收端的直线上,而是处于垂直于该直线上,斜向则速度变化率处于与该直线有夹角的情况下。从上述实验结果也侧面证明辐射源速度会影响到周围环境进而影响目标检测。

3.3 杂波信号图

根据以上的辐射源信号以及参数,可以对杂波信号进行模拟,并且选取了正径向和切向两种杂波情况对其分析,结果如图 5 所示。

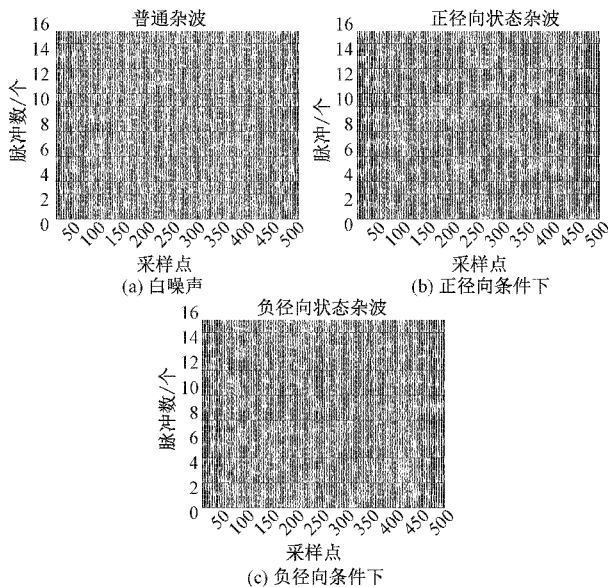


图 5 不同情况的动态杂波

根据图 5 结果可以清晰得到,图 5(a)白噪声杂波分布平缓,而图 5(b)正径向状态与图 5(c)负径向状态杂波有着明显的落差,其中落差与杂波本身性质一致,对其规律难以控制,由于正径向状态和负径向状态的杂波实际情况差距并不明显,所以选择其中正径向状态加入目标分析,并验证系统的可行性。

3.4 系统实验结果及分析

已知目标 1 位置为(1.4 km,3.7 km,0.8 km),速度为 400 m/s,目标 2 位置为(5 km,8 km,3 km),速度为 200 m/s,目标 3 位置为(-13 km,22.5 km,5 km),速度为 360 m/s,将

目标信息混入信号中,根据辐射源位置可以计算杂波协方差矩阵的数据,选取辐射源的速度设置为正径向速度,可以对杂波协方差处理,并根据协方差矩阵进行杂波动态化处理,处理的结果加入回波信号。根据以上的参数进行回波仿真,并对其进行目标检测图 6 为回波总信号其中的 16 个脉冲,图 6(a)为没有加入杂波信号,而图 6(b)加入了杂波信号,可以从图上清晰得看到回波情况,在加入杂波后出现了很多毛刺。

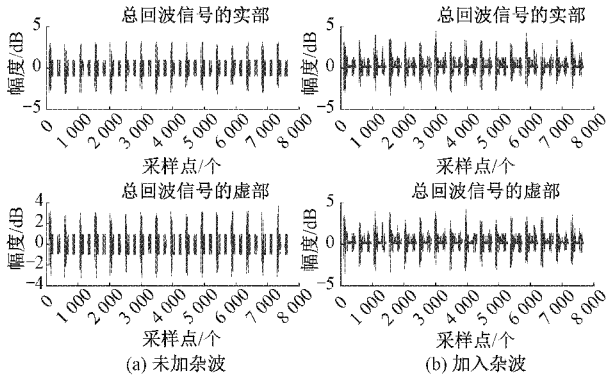


图 6 总回波信号

将图 6 作脉冲压缩处理,所得到的结果如图 7 所示,同理图 7(a)为未加杂波,(b)为加入杂波,从图 7 所示结果可以得到每个脉冲的目标距离单元十分明显,也能得到杂波在图 7(b)的整个环境中出现,并与所设置的目标功率均大于杂波的初始条件一致。

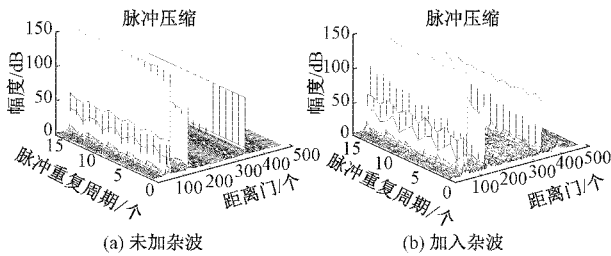


图 7 脉冲压缩处理结果

脉冲压缩后对其进行动目标显示(MTI)处理,该处理将相邻脉冲多普勒值一致的简单杂波进行滤除,所得的结果如图 8 所示。图 7(a)中没有杂波,所以对其处理的结果与本身一致,而图 8 中却明显得到杂波的幅度小了许多。

之后对图 8 所示的信号进行动目标检测(MTD)处理,得到图 9 结果。目标与杂波信息都可以得出准确的信息;并且可以看到在速度为 0 的条件下,有静止杂波出现的毛刺干扰了目标信号,这也从侧面描述了杂波存在的合理性。

最后对其进行简单的恒虚警(CFAR)处理,结果如图 10 所示。可以明确得到辐射源距离接收端雷达为 5 035 m,速度为 200 m/s,以及 3 个目标的位置速度信息,目标 1 距离 3 983 m,速度 400 m/s,目标 2 距离接收站 9 996 m,速度为 200 m/s,目标 3 距离接收站 26 km,速度为 362 m/s,其

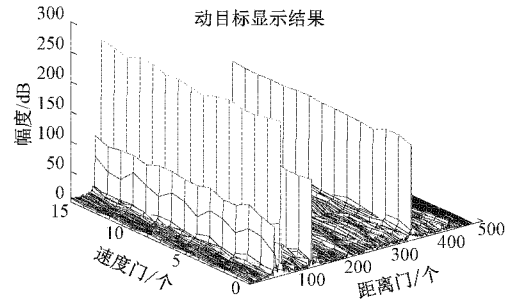


图 8 动目标显示处理结果

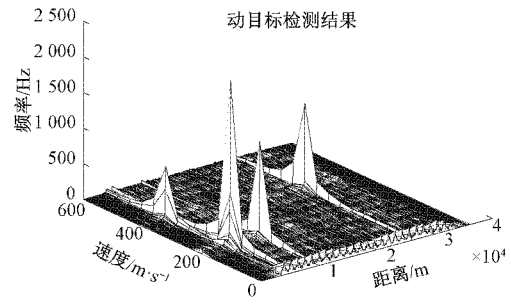


图 9 动目标检测处理结果

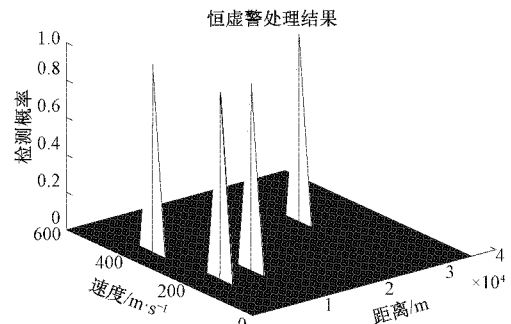


图 10 恒虚警处理结果

中距离信息由于辐射源的运动状态导致有少量的偏差。

由于方位信息的缺失对目标信息收集不准确,所以最后对收集的回波信号进行波束自适应处理便可得到图 11。

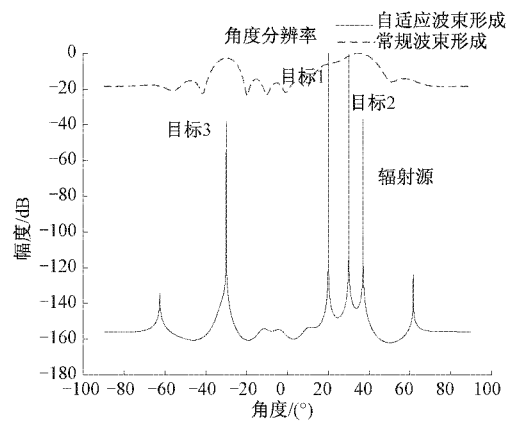


图 11 波束自适应结果

对其进行分析后可以与设置的雷达信息与目标信息进行匹配。例如由图 11 可以得到辐射源角度偏置为 37° ，与初始设置的辐射源位置(3 km, 4 km, 0.8 km)由此可得辐射源与接收站相距 5.06 km, 这个数据与图 11 恒虚警所得辐射源所距接收站 5.035 km 结果相差 0.4%，其余目标位置偏差不超过 1%。速度偏差不超过 0.5%，因此该杂波动态化处理方法可以充分复杂环境，对模拟实际场景有着重要的研究价值。

4 结 论

本文模拟了非合作雷达辐射源条件下的动态杂波背景。该方法首先构建了非合作雷达辐射源条件下的信号模型，其次用杂波协方差矩阵所携带的距离速度信息和擦地角所携带的距离信息进行 4 种分布函数匹配，最后根据仿真结果评估该方法是否适合对动态杂波环境进行设置。仿真结果表明：加入杂波与不加入杂波的信号模型有着明显的区别；通过分析经过杂波滤除、恒虚警处理后的信号，可以得出该方法也可以进行杂波环境复杂化的处理；并且经过自适应波束形成，可以得到目标的角度信息，综合的目标信息误差不超过 1%，以上的结论验证了模型的正确性。本文所设置的杂波动态化方法，适用范围得到了扩展，为进一步进行非合作雷达辐射源系统的直达波抑制、提高实际目标检测、实际信号分析研究奠定了基础。

参考文献

- [1] 杨博, 黄知涛, 周一宇. 基于空间非合作运动辐射源照射的目标定位研究[J]. 宇航学报, 2008, (1): 224-228, 235.
- [2] 宋杰, 何友, 蔡复青, 等. 基于非合作雷达辐射源的无源雷达技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2151-2156, 2180.
- [3] 许敏, 李博涵, 王凯, 等. 特定辐射源个体识别算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 116-123.
- [4] 闫宇嘉, 吉琳娜, 宋杰, 等. 非合作辐射源雷达杂波建模方法[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(5): 49-54.
- [5] 刘宁波, 姜星宇, 丁昊, 等. 雷达大擦地角海杂波特性与目标检测研究综述[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2771-2780.
- [6] 郑俊, 刘婉萍, 马念茹, 等. 探地雷达信号杂波抑制[J]. 电子测量技术, 2018, 41(21): 63-66.
- [7] 周伟江, 邵荣营. 多通道复杂海杂波模拟器设计[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(1): 97-102.

- [8] WANG H, TANG Z, et al. Signal processing and target fusion detection via dual platform radar cooperative illumination[J]. Sensors, 2019, 19(24), DOI: 10.3390/s19245341.
- [9] 何炜琨, 张鑫蕴, 王晓亮, 等. 阵列雷达鸟类回波信号精细建模与特征分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 262-270.
- [10] KLEMM R. Comparison between monostatic and bistatic antenna configurations for STAP[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 596-608.
- [11] 邓亚琦, 谭伟石, 祝秋香, 等. 机载外辐射源雷达微弱机动目标检测新方法[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2020, 29(5): 52-57.
- [12] 王慧娟, 汤子跃, 朱振波, 等. 固定坐标系机载双基地雷达杂波建模与特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(5): 110-117.
- [13] 陈刚, 王俊, 王珏, 等. 外辐射源雷达参考信号提纯方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1): 45-49.
- [14] 赵嘉斐, 王学田, 高洪民, 等. 小、中擦地角下海杂波的综合建模与仿真[J]. 微波学报, 2018, 34(S1): 53-56.
- [15] GINI F, GRECO M V, FARINA A, et al. Optimum and mismatched detection against K-distributed plus Gaussian clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 860-876.
- [16] 高铮, 张安清. 海杂波典型幅度分布模型的仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(9): 76-78, 94.
- [17] 武志凯, 刘宾. 数字信号的远程基带传输系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2): 129-133.

作者简介

闫宇嘉, 硕士研究生, 主要研究方向为非合作雷达辐射源杂波抑制。

E-mail: 751559041@qq.com

吉琳娜, 副教授, 主要研究方向为信息融合处理。

E-mail: jilinna@163.com

宋杰, 教授, 主要研究方向为非合作雷达辐射源信号处理。

E-mail: 48217874@qq.com

杨风暴, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息融合与处理。

E-mail: yangfb@nuc.edu.cn