

基于 DOA 聚类算法的 ARM 抗有源诱偏技术研究*

张海鑫¹, 周 鹏¹, 孙昭乾², 王 影², 张振华²
(1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580
2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 有源诱偏技术是雷达对抗反辐射导弹的一种重要手段, 可以大大降低反辐射导弹的作战效能。为提高对敌目标的精确打击能力, 在分析闪烁诱偏原理的基础上, 针对有源诱偏干扰下被动雷达测角精度与稳定度不高的问题, 通过对有源诱偏信号的时域特征进行分析, 提出一种基于脉冲前沿检测的 DOA 聚类分选算法, 找出前沿超前的辐射源信号, 实现了高性能抗有源诱偏干扰和高精度抗干扰测向。仿真结果表明, 该技术可以有效对抗四点源有源诱偏干扰。

关键词: 反辐射导弹 (ARM); 抗诱偏; 脉冲前沿检测; 波达方向 (DOA) 聚类

中图分类号: TN974 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)04-0011-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210308001

引用格式: 张海鑫, 周鹏, 孙昭乾, 等. 基于 DOA 聚类算法的 ARM 抗有源诱偏技术研究[J/OL]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 95-103[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210308001>.

Research on ARM anti-active decoy technique based on DOA clustering algorithm

ZHANG Haixin¹, ZHOU Peng¹, SUN Zhaoqian², WANG Ying², ZHANG Zhenhua²

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Active decoy technology is an important means for radars to fight with anti-radiation missiles, which can greatly reduce the combat effectiveness of anti-radiation missiles. The shortages of low angle measurement accuracy and poor stability caused by active decoy jamming are solved based on analyzing the principle of the active decoy, to improve the effective attack capability against the enemy's air defense and anti-missile systems. A DOA (direction of arrival) clustering sorting algorithm based on the detection of the pulse front edge is proposed to find the radar signal with leading edge, through analyzing the time-domain characteristics of flicker jamming signals. High performance and high-precision anti-jamming direction finding are realized by the proposed algorithm. The simulation results show that the technique can effectively counter the active decoy kind of four point sources.

Key words: Anti-radiation missile (ARM); Anti-decoy; Pulse front detection; DOA (direction of arrival) clustering

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210308001

Citation: ZHANG Haixin, ZHOU Peng, SUN Zhaoqian, et al. Research on ARM anti-active decoy method based on DOA clustering algorithm [J/OL]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 95-103[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210308001>.

引 言

反辐射导弹 ARM (Anti-Radiation Missile) 将抗干扰、侦察和摧毁融合于一体, 是摧毁敌方防空反导系统的主要武器之一。反辐射导弹装备的导引头通过探测敌方雷达信号来获取目标信息, 并对其进行

*基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1405600); 国家自然科学基金重点项目 (61931025); 山东省自然科学基金项目 (ZR2019MF004)

收稿日期: 2021-03-08 收修改稿日期: 2021-06-02

跟踪, 最后压制或摧毁敌方雷达。在现代雷达对抗中, 多源诱偏干扰是敌方防空反导系统对抗反辐射武器的重要手段之一^[1]。因此, 深入研究多源诱偏原理, 无论对提高雷达诱饵诱偏反辐射导引头的能力, 还是对提高反辐射导引头抗有源诱偏的作战性能都具有十分重要的意义。

目前, 国内有关 ARM 抗有源诱偏技术的研究主要集中于脉冲前沿检测、数据积累、超分辨率技术这几种方法。数据积累的方法是根据辐射源信号的幅度不同进行区分, 但其无法实现对小功率辐射源的识别。超分辨率技术是对信号的特征进行分析, 运算量较大, 影响 ARM 抗有源诱偏的实时作战性能。文献[1-6]中提出了运用脉冲前沿检测方法对抗有源诱偏系统, 将 ARM 中用来处理多径效应的脉冲前沿检测技术应用到 ARM 对抗有源诱偏技术中, 能够将诱饵和目标雷达逐一摧毁, 达到通道整理、突防压制的目的^[3]。但仅仅通过脉冲前沿检测技术, 只能使反辐射导弹识别、摧毁其中脉冲前沿超前的辐射源信号, 无法从多点辐射源中识别出目标雷达^[5]。因此, 反辐射导弹的战术思想可确立为先摧毁脉冲前沿超前的辐射源, 再攻击其他雷达, 即能有效攻击任一辐射源^[7]。

本文重点研究基于干涉仪体制下的反辐射导弹对抗四点源诱偏技术。通过分析四点源诱偏基本原理, 根据雷达信号与诱饵信号的合成信号, 建立四点源诱偏信号仿真模型, 提出了一种基于脉冲前沿检测的 DOA 聚类分选算法, 找出脉冲前沿超前的辐射源信号并进行跟踪, 达到有效击毁至少一个辐射源的目的。

1 脉冲前沿检测技术抗多源诱偏的理论基础

1.1 多源诱偏基本原理

相关干涉仪体制是由被动测向导引头导引, 通过探测敌方雷达信号来获取目标信息, 并对其进行跟踪, 最后压制或摧毁敌方雷达。因此, 当反辐射导引头在对敌方雷达信号进行侦测时, 被动雷达导引头会接收到多个在时域或者频域甚至时域频域均高度重叠的混合信号, 被动雷达导引头无法区分这些时域或者频域甚至时域频域均高度重叠的混合信号^[6-10]。经过理论分析, 当反辐射导引头接收到了多个敌方雷达信号时, 反辐射导引头的探测方向为多个敌方雷达信号的功率重心或相位重心, 基于相关干涉仪测向雷达的跟踪体制也将跟踪敌方雷达信号的功率重心或者相位重心方向, 从而偏离了每一个真实雷达的方向, 使得诱饵系统实现了诱偏反辐射导弹的作用^[11]。有源诱偏模型如图 1 所示。

四点源诱偏系统以目标雷达为坐标原点, 多个诱饵分布在雷达附近约百米处, 通过光纤将诱饵与目标雷达之间连接起来, 在目标雷达工作期间同时开机运转, 这使得诱饵信号的特征参数与目标雷达信号高度一致, 导致反辐射导引头难以区分出目标雷达信号和诱饵信号, 无法精确摧毁敌方目标雷达。另外, 通常诱饵雷达的发射功率与目标雷达旁瓣的功率相近。当反辐射导弹来袭时, 其被动雷达导引头被诱饵信号诱偏至导弹陷阱中^[8], 严重削弱反辐射导弹的作战效能。

1.2 脉冲前沿检测技术抗四点有源诱偏原理

脉冲前沿检测技术是反辐射导弹用来处理多径效应的一种技术^[6]。由于战场地形复杂, 反辐射导弹在对敌方目标进行攻击时, 必然存在着多径效应, 如图 2 所示。为了提高反辐射导引头的测向性能, 将脉冲前沿检测技术引入到反辐射导弹当中来处理多径效应。当目标雷达发射信号时, 反辐射导引头

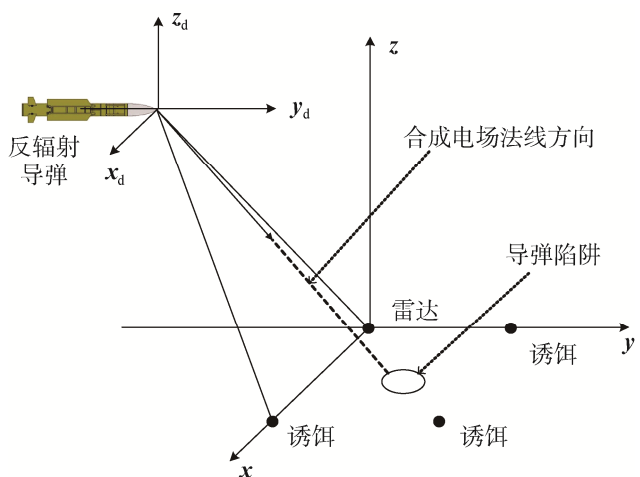


图 1 有源诱偏模型
Fig. 1 Active decoy model

可以测量出直达信号和多径反射信号间的时间差。从图2中可以明显看出，直达信号一定是最先到达反辐射导引头的信号，该信号方向为目标雷达的真实方向^[9]。

通过分析可知，雷达信号与多径信号之间始终有一个信号是提前到达反辐射导引头^[9]，因此，只要把先到达的信号当作直达信号，采用反辐射导弹中的脉冲前沿检测技术，反辐射导引头最先收到的辐射源信号就是目标信号，对其进行载频测量、DOA估计、目标跟踪，最后实现精确打击^[9]。

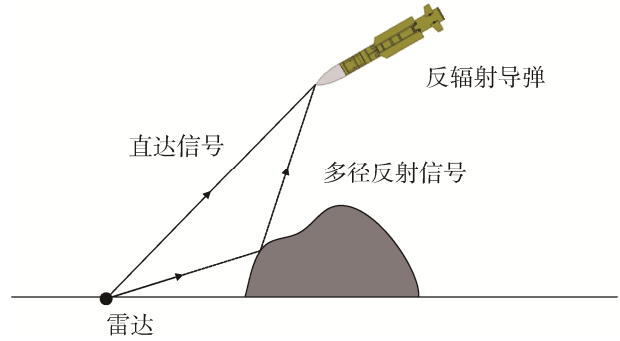


图2 直达信号和多径反射信号

1.3 四点源诱偏信号模型的建立

文献[9]和文献[10]提出了一种ARM对抗三点源诱偏系统的技术——时域鉴别技术，当反辐射导引头位于空间中任意位置时，多个辐射源信号中至少有一个辐射源信号提前到达反辐射导引头。这就意味着，可以首先关注先到达的辐射源信号，令反辐射导引头跟踪较早到达的辐射源信号，并对其实施精确打击^[9]。这里需要指出的是，当反辐射导弹位于两个辐射源之间的中垂面时，两个辐射源信号同时到达反辐射导引头，固定波门采样始终为两个辐射源信号的混合信号，这些点属于误判点^[11]。在这些误判点以外，在空间任意点处，至少有一个辐射源信号是提前到达反辐射导引头。又由于导弹来袭方向未知，诱饵信号与雷达信号的超前时间未知，采用贝叶斯公式来表征反辐射导引头接收的脉冲前沿内始终为混合信号的概率，即

Fig. 2 Direct signal and multipath reflection signal

$$P(B_i|A) = \frac{P(A|B_i)P(B_i)}{\sum_{j=1}^n P(A|B_j)P(B_j)} \quad (1)$$

式中， $P(B_i)$ 是 B_i 发生的概率， $P(A|B_i)$ 是在 B_i 发生的情况下 A 发生的概率， $P(B_i|A)$ 是在 A 发生的情况下 B_i 发生的概率。其中， A 为反辐射导弹来袭方向位于诱饵信号与雷达信号的中垂面， B_i 为诱饵信号与雷达信号的超前时间为0， B_j 为诱饵信号和目标信号的超前时间完备事件组。根据贝叶斯公式，可以计算出反辐射导引头接收的脉冲前沿内始终为混合信号的概率极低，即脉冲前沿信号是单一辐射源信号的概率极高。

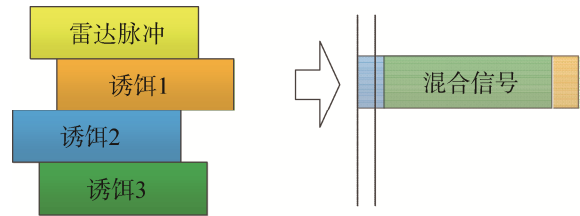


图3 雷达与诱饵信号合成脉冲

Fig. 3 Synthetic pulse and sampling pulse of radar and decoy signal

针对文献[9]中误判点处始终为两个辐射源信号的混合信号的问题，本文提出了一种四点源诱偏信号模型，设定脉冲前沿信号是单一辐射源信号的概率为20%，其余时刻四个辐射源信号随机出现。在极端条件下，充分验证所提出的基于脉冲前沿检测的DOA聚类分选算法的有效性。

四点源诱偏信号模型(示例)如图3所示，设定脉冲前沿信号是单一辐射源信号的概率为20%，单一辐射源信号可为任意信号，图3中以诱饵信号1为前沿超前信号，导引头检测到入射信号包括一个雷达信号和三个诱饵信号，若将雷达信号和三个诱饵信号分别记 $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 、 $S_3(t)$ 、 $S_4(t)$ ，设4个信号的频率相同，当它们到达导引头时，雷达信号和三个诱饵信号可以分别表示为：

$$S_1(t) = A_1(t) \exp(j(\omega t + \varphi_1)) \quad (2)$$

$$S_2(t) = A_2(t) \exp(j(\omega t + \varphi_2)) \quad (3)$$

$$S_3(t) = A_3(t) \exp(j(\omega t + \varphi_3)) \quad (4)$$

$$S_4(t) = A_4(t) \exp(j(\omega t + \varphi_4)) \quad (5)$$

其中, $A_1(t)$ 、 $A_2(t)$ 、 $A_3(t)$ 、 $A_4(t)$ 分别表示 4 个信号的幅度函数, φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 分别表示 4 个信号到达反辐射导引头时的初始相位, 其符合 $(-\pi, \pi)$ 的均匀分布。

2 ARM 抗有源诱偏 DOA 聚类算法

2.1 DOA 聚类分选算法

雷达信号聚类分选是现代侦察系统的重要组成部分, 它可以从复杂多变的电磁环境中识别和分离出有效的目标信号, 是反辐射导弹能够稳定跟踪并精确打击目标的前提和基础, 在现代雷达对抗中起着至关重要的作用^[12]。聚类分选算法主要通过参数聚类算法来完成雷达信号分选。目前, 聚类分选的算法有很多, 如基于密度、模型、网格、滑动窗口划分以及基于层次的聚类算法等^[12,13]。

文献[12]中提出了基于网格密度聚类的方法, 该方法使用滑动窗口模型获取目标信号的聚类分选结果, 应用计数滑动窗口模型储存数据, 减少了系统资源的浪费。文献[14]中介绍了 K 均值聚类算法的聚类过程, K 均值聚类需要提前确定聚类个数, 但在复杂多变的电磁环境中, 无法提前确定聚类个数, 不能满足实际要求。因此, 需要采用改进的 K 均值聚类算法, 能够动态地确定聚类的数量, 根据聚类中心与数据对象之间的距离进行动态门限聚类, 这就是动态距离聚类。与 K 均值聚类不同的是动态距离聚类初始仅有一个聚类中心, 随着算法的运行, 聚类中心的数量通过门限自动增加, 直到将所有数据分类到某一类^[14]。

本文将基于网格密度、动态门限、滑动窗口的聚类算法相结合, 提出了一种基于脉冲前沿检测的 DOA 聚类分选算法, 如图 4 所示。首先, 为了在有效空域内, 对反辐射导引头最先接收到的辐射源信号进行精确跟踪和打击, 需要对来波信号进行积累; 根据分析可知, 积累脉冲数量越多, 角度估计越精准; 为了提高 ARM 抗有源诱偏的实时作战性能, 本文采用的聚类算法在积累脉冲阶段积累 1 s 内的脉冲数据; 之后, 对来波信号的载频和来波角度进行估计; 最后, 先进行粗聚类再进行精细聚类, 聚合距离过近的种类, 剔除过小的堆, 找出前沿超前的雷达信号, 对其进行跟踪和精确打击。

2.2 粗聚类

粗聚类采用基于网格密度聚类的思想, 通过滑动窗口的方法进行在线动态聚类, 将数据空间划分为 $k \times k$ 个网格单元, 将数据集中的每个数据对象映射到相应的网格单元中。然后, 统计落入每个单元的数据对象的数量, 根据网格单元中数据对象的数量将网格单元划分为高密度网格单元、低密度网格单元和空白网格单元^[15]。最后, 引入滑动窗口模型, 找出数据集最多的滑窗区域。

在实际应用中, 收到的信号往往都比较复杂, 参数大小不一, 并有着不同的量级。为了消除初始数据中变量之间的不同量级对分选结果的影响, 需要将数据进行预处理, 以相同的量级参与聚类。

设有 N 个样本 $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N\}$, 其中, 每个样本 \mathbf{x}_i 具有 M 个参数指标, 即 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM})$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

按照极值标准化公式将 N 个样本进行归一化^[15]:

$$x'_{mi} = \frac{x_{mi} - x_{m\min}}{x_{m\max} - x_{m\min}} \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

式(6)中, $x_{m\max}$ 是指 $x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mN}$ 中的最大值, $x_{m\min}$ 是指 $x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mN}$ 中的最小值。

图 5 给出了粗聚类的流程图, 具体步骤如下:

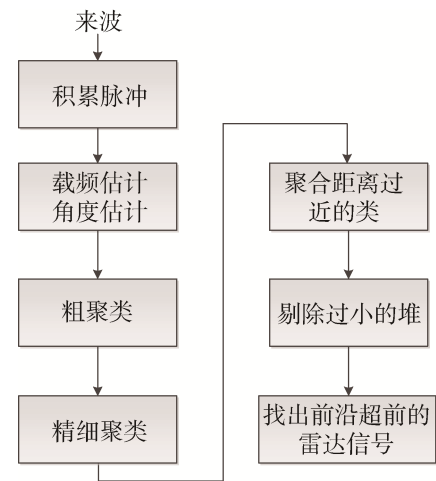


图 4 DOA 聚类分选算法流程图

Fig. 4 Flow chart of DOA clustering algorithm

首先,按照极值标准化公式对数据集中的数据进行归一化处理;之后,统计数据集中初始数据的个数,根据数据集中初始数据的个数,确定每个网格单元的边长,将空间模型划分为 $k \times k$ 个网格单元;接下来,将归一化后的数据映射到相应的网格单元中,并对每个网格单元进行依次扫描,统计落入每个单元的数据对象的数量,计算网格单元密度(即:落入每个网格单元的数据对象的数量)^[16];然后,根据初始数据对象的个数,引入 $m \times m$ 的滑动窗口,搜索高密度网格单元,遍历所有的网格单元,找出数据最多的滑窗区域;最后,将滑动窗口区域内低密度单元中的数据对象合并到距离该单元最近的高密度单元中,完成粗聚类。

下面进行仿真测试,参数设置为载波频率 $f_c=18$ GHz,信号采样率 $f_s=75$ GHz,脉冲宽度为 $10 \mu s$,提取脉冲前沿时间 500 ns,反辐射导弹初始位置坐标为 $[0 \text{ km}, -40 \text{ km}, 2 \text{ km}]$,辐射源个数为四个,四个辐射源位置坐标分别为 $[0 \text{ km}, 0 \text{ km}, 0 \text{ km}]$, $[1 \text{ km}, 0 \text{ km}, 0 \text{ km}]$, $[1 \text{ km}, 1 \text{ km}, 0 \text{ km}]$, $[0 \text{ km}, 1 \text{ km}, 0 \text{ km}]$,雷达和诱饵分布情况如图1所示。通过限定条件分别求出四个辐射源的DOA为 $[0^\circ, 21.8^\circ]$, $[-11.31^\circ, 21.8^\circ]$, $[0^\circ, 18.44^\circ]$, $[-9.42^\circ, 18.44^\circ]$,如图6所示。

图7给出了反辐射导引头在不同距离时全角度范围内的测角结果。在全角度范围内,采用 $12^\circ \times 12^\circ$ 的滑动窗口遍历所有网格单元,找出数据最多的滑动窗口区域。图8给出了反辐射导引头在不同距离时对 12° 范围内的测角结果。在全角度范围内,聚类和基于滑动窗口的聚类速度和精度相仿,但计算量相差极大。从仿真结果可以看到,图7所示的全角度范围内搜索的网格单元数为8 100,而图8所示的滑动窗口 12° 范围内搜索的网格单元数为144,计算量上相差几个数量级。采用基于网格密度的滑动窗口在线动态聚类可以有效地提高运算速度。

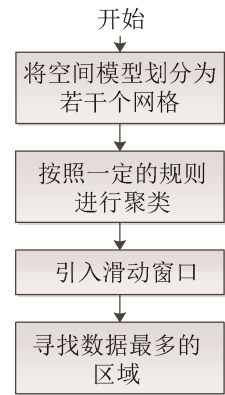


图5 粗聚类流程图

Fig. 5 Rough clustering flow chart

Fig. 5 Rough clustering flow chart

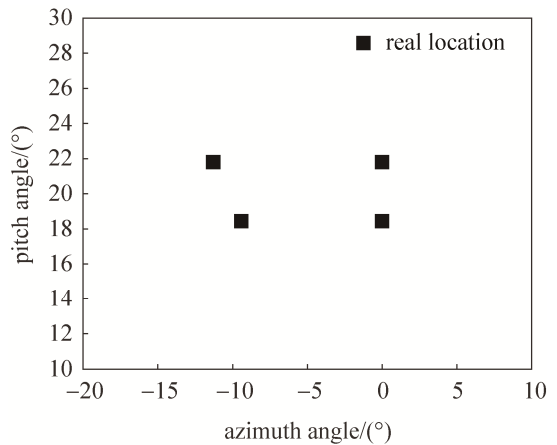


图6 四个辐射源目标位置

Fig. 6 Locations of four emitter targets

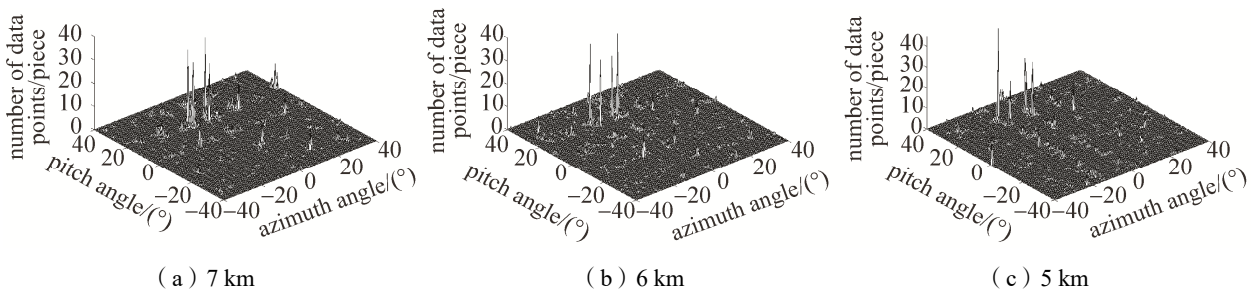


图7 不同距离时全角度范围内的测角结果

Fig. 7 Angle measurement results in full angle range at different distances

图9给出了反辐射导引头在不同距离情况下 12° 范围内粗聚类的最终测角结果。从仿真结果中可以看到,在滑动窗口区域内的低密度单元中的数据对象都被合并到离该单元最近的高密度单元类中,较好地完成了粗聚类。

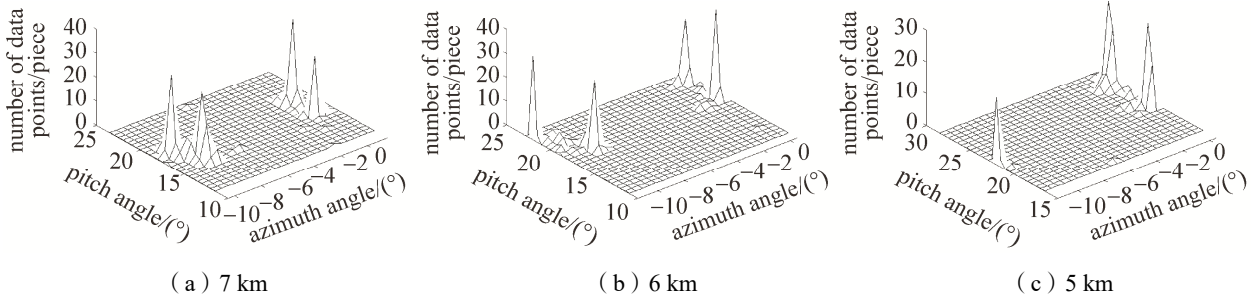


图 8 不同距离时 12°范围内的测角结果

Fig. 8 Angle measurement results within 12° range at different distances

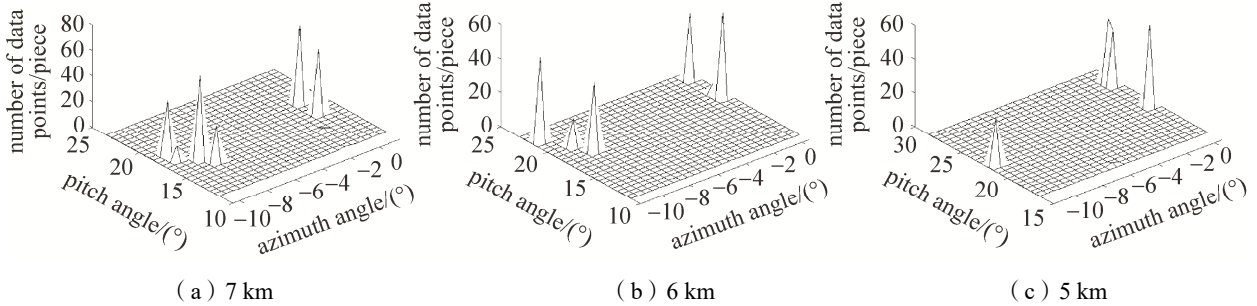


图 9 不同距离时 12°范围内粗聚类的测角结果

Fig. 9 Angle measurement results of rough clustering within 12° range at different distance

2.3 精细聚类

精细聚类采用基于动态距离聚类的思想。动态距离聚类的原理是在数据集中选择距离聚类中心最远的数据对象作为新的聚类中心, 在新的聚类中心附近根据最小距离原则将它们进行分类。令 $\mathbf{X}' = \{\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N\}$ 为经过粗聚类后的数据集。在精细聚类中, 根据加权欧氏距离计算公式, 求出数据集中的数据对象与聚类中心之间的距离^[16,17], 即

$$d_{ij} = [\mathbf{A}_{ij}^T \mathbf{W} \mathbf{A}_{ij}]^{1/2} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{x}'_i - \mathbf{z}_j$ 为信号参数的误差矢量, \mathbf{x}'_i 为第 i ($1 < i < N$) 个归一化输入矢量, \mathbf{z}_j 为第 j ($1 < j < N$) 类单元的均值矢量, 即类中心矢量。 \mathbf{W} 是加权矩阵, 它的对角元素表征了 M 种聚类参数的聚类可靠性^[18]。

动态距离聚类具体执行步骤如下:

- ① 将完成粗聚类后数据集 $\mathbf{X}' = \{\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}'_2, \dots, \mathbf{x}'_N\}$ 中第一个到达的数据对象作为第一个聚类中心 \mathbf{z}_1 ;
- ② 计算数据集中剩余各个数据到 \mathbf{z}_1 的距离 d_{i1} , 第二个聚类中心 \mathbf{z}_2 选定为距离 \mathbf{z}_1 最远的数据对象 \mathbf{x}'_s ;
- ③ 分别计算各数据对象到 \mathbf{z}_1 、 \mathbf{z}_2 的距离, 并求出他们到 \mathbf{z}_1 、 \mathbf{z}_2 距离的最小值, 找出两个最小值中的最大值设为 A ;
- ④ 如果 A 的值小于阈值门限 λ , 则跳至第⑥步; 如果 A 的值大于等于阈值门限 λ , 那么第三个聚类中心 \mathbf{z}_3 就选定为其对应的特征矢量, 然后继续执行第⑤步;
- ⑤ 设已经确定了 q 个聚类中心, 计算剩余的数据对象到 $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_q$ 之间的距离 B , 如果 B 的值大于门限 λ , 则将其作为新的聚类中心 $\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{x}'_s$, 循环该操作直到没有新的聚类中心为止。
- ⑥ 设最终得到 C 个聚类中心, 根据最小距离原则将数据集中的所有数据对象 \mathbf{x}'_i 分配到各类并更新聚类中心;
- ⑦ 将低于 5 个元素的类合并到离该聚类单元最近的聚类单元中, 完成聚类过程。
- ⑧ 计算总质心, 找出距离总质心最远的聚类中心, 该点就是脉冲前沿超前的雷达信号。

下面进行仿真测试, 参数设置为载波频率 $f_c = 18$ GHz, 信号采样率 $f_s = 75$ GHz, 脉冲宽度为 $10 \mu\text{s}$,

提取脉冲前沿时间为 500 ns，反辐射导弹初始位置坐标为[0 km, -40 km, 2 km]，辐射源个数为四个，四个辐射源位置坐标分别为[0 km, 0 km, 0 km]，[1 km, 0 km, 0 km]，[1 km, 1 km, 0 km]，[0 km, 1 km, 0 km]，雷达和诱饵分布情况见图 1。通过限定条件分别求出四个辐射源的 DOA 为 $[0^\circ, 21.8^\circ]$ ， $[-11.31^\circ, 21.8^\circ]$ ， $[0^\circ, 18.44^\circ]$ ， $[-9.42^\circ, 18.44^\circ]$ 。

图 10 给出了反辐射导引头在不同距离时 12° 范围内的最终聚类结果。通过对比粗聚类后的仿真结果和精细聚类后的仿真结果可以看出，精细聚类完成了低密度网格单元的分配。聚类完成后，通过计算总质心，找出距离总质心最远的聚类中心，即前沿超前的雷达信号。

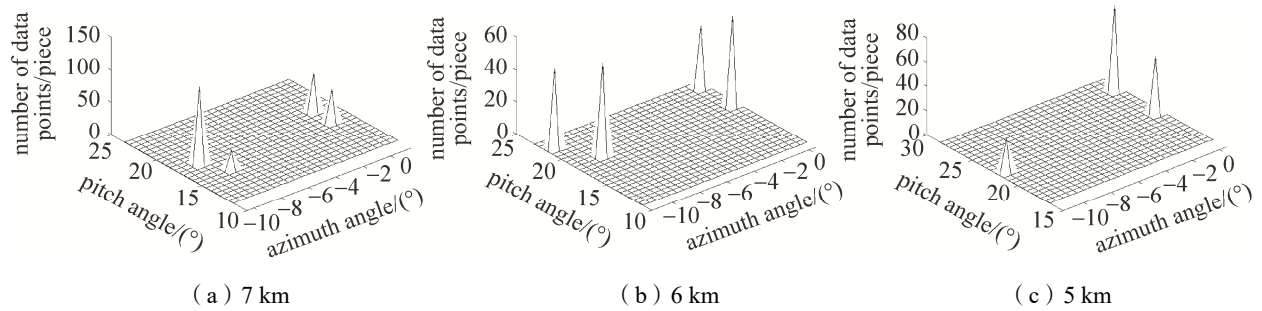


图 10 不同距离时 12° 范围内的最终聚类结果
 Fig. 10 The final clustering results in the range of 12° at different distances

2.4 ARM 抗有源诱偏 DOA 聚类算法效果评估

通过 2.2 节和 2.3 节中的仿真结果可以看出，ARM 抗有源诱偏 DOA 聚类算法通过粗聚类、精细聚类后完成了孤立点源的分离，找到前沿超前的雷达信号。通过进行多次蒙特卡洛仿真实验，验证了 ARM 抗有源诱偏 DOA 聚类算法可以有效对抗四点源诱偏干扰，同时，将其与不进行 DOA 聚类、仅进行 DOA 粗聚类两种情况进行对比。

图 11 给出了未进行 DOA 聚类和仅进行 DOA 粗聚类的多次蒙特卡洛仿真实验结果图。图 12 给出了 ARM 抗有源诱偏 DOA 聚类的多次蒙特卡洛仿真实验结果图。图中黑色代表辐射源信号相对于反辐射导弹的真实角度，红色代表辐射源信号相对于反辐射导弹的测量角度。从仿真结果可以看出，反辐射导弹通过抗有源诱偏 DOA 聚类，可以有效对抗四点源有源诱偏系统。

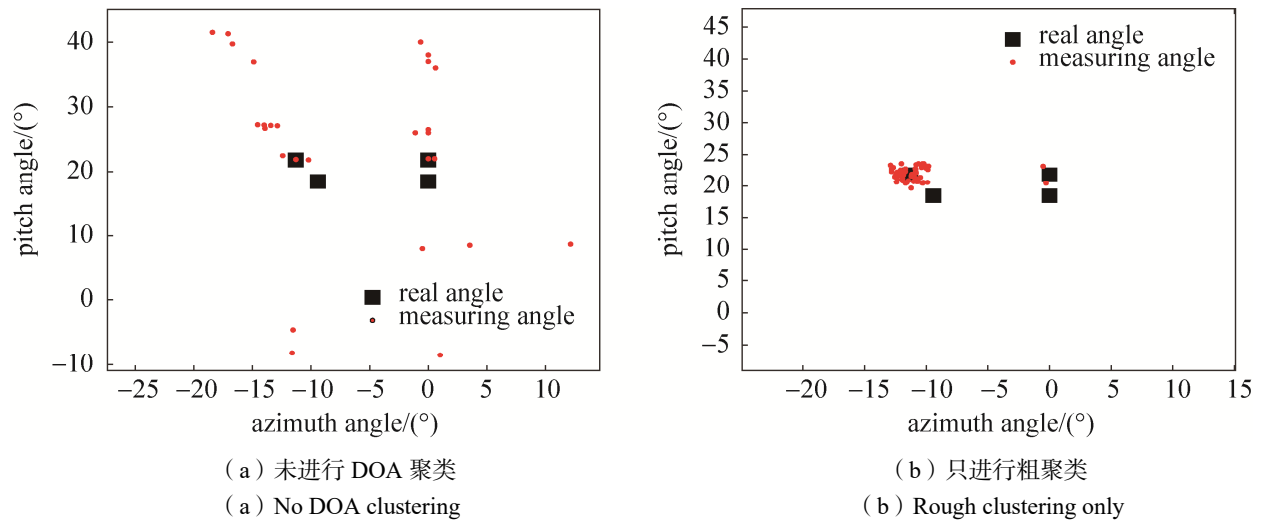


图 11 未进行 DOA 聚类和仅进行 DOA 粗聚类的多次蒙特卡洛仿真实验结果
 Fig. 11 Results of Monte Carlo simulation results without DOA clustering and with DOA rough clustering only

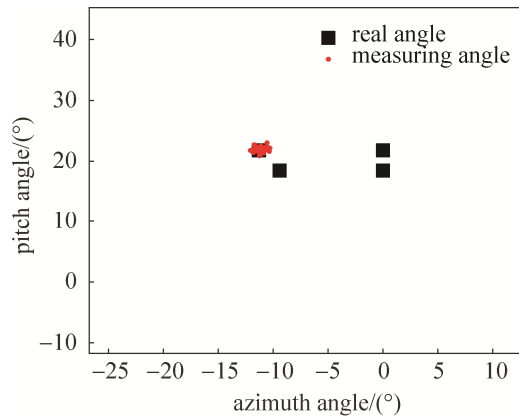


图 12 ARM 抗有源诱偏 DOA 聚类的多次蒙特卡洛仿真实验结果

Fig. 12 Multi Monte Carlo simulation results of DOA clustering for ARM anti active decoy

3 结束语

本文通过分析闪烁源干扰信号的时域特征, 提出一种四点源诱偏信号模型, 并详细描述了该模型的设定条件。在此基础上, 针对有源诱偏干扰下反辐射导引头测角精度与稳定度不高的问题, 探讨了基于网格密度、滑动窗口及动态门限在聚类分选中的应用, 然后提出了一种基于脉冲前沿检测的 DOA 聚类分选算法。仿真结果表明, 基于脉冲前沿检测的 DOA 聚类分选算法相比于其他聚类算法而言, 无论是聚类速度, 还是聚类精度都具有明显的优势。通过对 ARM 抗有源诱偏 DOA 聚类算法的效果进行评估发现, 基于脉冲前沿检测的 DOA 聚类分选算法, 可以有效地对抗闪烁源诱偏干扰和高精度抗干扰测向。

参考文献

- [1] 吴世龙, 罗景青, 钟飞. 反辐射无人机在电子战中的应用及其效能分析[J]. 现代防御技术, 2006, 34(3): 31–35.
WU Shilong, LUO Jingqing, ZHONG Fei. Antiradiation UAV in EW and analysis of its system capacity[J]. Modern Defence Technology, 2006, 34(3): 31–35.
- [2] XU D, DONG W, QI S, et al. Research on performance of PRS's pulse leading-edge distinguishing technique countering three-source decoy radar system[C]// IEEE International Conference on Signal Processing. IEEE, 2013.
- [3] 许端, 董文锋, 齐秀青, 等. PRS 前沿判别法抗三点源诱偏性能研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(9): 18–22.
XU Duan, DONG Wenfeng, QI Xiuqing, et al. Countering performance of PRS's pulse leading-edge distinguishing technique to three-source decoy radar system.[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(9): 18–22.
- [4] 董文锋, 刘泉, 王晨阳, 等. ARUAV 时域鉴别技术抗多点源诱偏性能分析[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(12): 44–47.
DONG Wenfeng, LIU Quan, WANG Chenyang, et al. Applicable analysis of time discrimination technique of ARUAV on countering multi-source decoy radar system[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(12): 44–47.
- [5] 梁永生, 刘俊, 朱全江. 反辐射武器抗诱饵技术[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 32(3): 36–41.
LIANG Yongsheng, LIU Jun, ZHU Quanjiang. Technology of anti-radiation weapons against active decoys[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2017, 32(3): 36–41.
- [6] 赖年杉. 基于反辐射弹的目标与诱饵仿真技术研究[J]. 航天电子对抗, 2015, 31(3): 34–36.
LAI Nianshan. Target and decoys simulation technology for anti-radiation missile[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2015, 31(3): 34–36.
- [7] 李益民, 王丰华, 黄知涛, 等. 反辐射导引头抗非相干三点源性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2011(3): 500–505.
LI Yimin, WANG Fenghua, HUANG Zhitao, et al. Performance of anti-radiation seeker in counteracting three uncorrelated decoys[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011(3): 500–505.
- [8] 王琴, 李振卿. 有源诱偏系统抗反辐射导弹原理及实现重点[J]. 电子工程, 2009(4): 13–16.
WANG Qin, LI Zhenqing. Principle and implementation emphasis of active decoy system used for anti-ARM[J]. Electronic Engineering, 2009(4): 13–16.
- [9] 许端, 董文锋, 高建敏, 等. ARUAV 时域鉴别技术抗三点源诱偏性能分析[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(6): 496–501.

- XU Duan, DONG Wenfeng, GAO Jianmin, et al. Performance analysis of time-domain discrimination technique of ARUAV on countering three active sources[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(6): 496–501.
- [10] ZOU Jianbin, GAO Kai, ZHANG Eryang. Research on angle measurement model of anti-radiation missiles PRS under coherent decoys[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88(3b): 18–21.
- [11] 张亮. 被动雷达导引头极化抗诱偏关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
ZHANG Liang. Anti-decoying techniques using polarization in passive radar seeker[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [12] 董柏娴, 汤建龙. 基于网格密度聚类的雷达信号在线分选算法[J]. 航天电子对抗, 2014, 30(6): 45–48.
DONG Boxian, TANG Jianlong. A radar signal online sorting algorithm based on grid-density clustering[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2014, 30(6): 45–48.
- [13] 赵慧, 刘希玉, 崔海青. 网格聚类算法[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(9): 83–85, 89.
ZHAO Hui, LIU Xiyu, CUI Haiqing. Grid-based clustering algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(9): 83–85, 89.
- [14] 吴海威. 新体制雷达信号参数估计与分选算法研究及 DSP 快速实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
WU Haiwei. Signal parameter estimation and separation algorithm research of new system radar and fast DSP implementation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [15] 向娴. 未知雷达信号分选算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
XIANG Xian. Research of unknown radar signal sorting algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [16] 张燕霞, 陶宏才. 一种基于网格密度的高效聚类算法[J]. 科技信息, 2009(9): 437, 452.
- [17] HE Ailing, ZENG Deguo, WANG Jun, et al. Multi-parameter signal sorting algorithm based on dynamic distance clustering[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2009, 7(3): 249–253
- [18] 何艾玲. 雷达信号分选算法及其 DSP 实现研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

[作者简介]

张海鑫 1997年生, 硕士, 主要研究方向为雷达信号处理。

周 鹏 1976年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为 SAR 成像处理和海洋遥感应用。

孙昭乾 1995年生, 硕士, 主要研究方向为雷达信号处理。

王 影 1979年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理和雷达系统设计。

张振华 1977年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理和 SAR 成像。

(本文编辑: 傅 杰)