

文章编号: 2095-4980(2022)03-0200-08

无人机集群对多雷达参数测量的影响效应

欧阳佳康, 周永坤, 饶彬*

(中山大学 电子与通信工程学院, 广东 深圳 518107)

摘 要: 为验证无人机(UAV)集群电子对抗的效果, 针对集群本体、集群压制干扰、集群转发干扰、集群相干干扰对多雷达参数测量的影响机理进行了探讨, 并重点分析了信噪比、干信比、目标回波与 UAV 本体回波幅值比等影响因素。首先基于贪心算法对 UAV 干扰资源进行资源分配, 然后通过仿真分析了几种干扰方式对雷达参数测量的影响。实验结果表明: 集群本体对雷达的影响效果较小, 主要原因是 UAV 体积小, 回波功率低; 集群压制干扰由于增大了检测阈值, 使多雷达的目标检测概率大幅降低; 集群转发干扰能产生大量假目标, 导致雷达测角误差较大; 集群相干干扰可使雷达测角偏离主波束方向, 形成角度欺骗。综合分析, 压制干扰、转发干扰和相干干扰这 3 种干扰方式运用在集群干扰中都具有较好的干扰效果。

关键词: 无人机(UAV)集群; 电子对抗; 多雷达; 干扰

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021344

Influence of UAV cluster on multi-radar parameter measurement

OUYANG Jiakang, ZHOU Yongkun, RAO Bin*

(School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen Guangdong 518107, China)

Abstract: In order to verify the effect of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) cluster electronic countermeasures, the influence mechanism of cluster ontology, cluster suppression interference, cluster retransmitting interference, and cluster coherent interference on multi-radar parameter measurement is discussed. The influencing factors such as Signal-Noise Ratio(SNR), Jamming-Signal Ratio(JSR), and the amplitude ratio between target echo and UAV body echo are analyzed emphatically. Firstly, the UAV jamming resources are allocated based on the greedy algorithm, and then the influence of several jamming methods on the measurement of radar parameters is analyzed through simulation. The experimental results show that the cluster body has a small effect on the radar, mainly due to the small size of the UAV and the low echo power; the cluster suppression interference increases the detection threshold, which greatly reduces the target detection probability of multiple radars; retransmitting interference can produce a large number of false targets, leading to larger errors in radar angle measurement; cluster coherent interference can cause radar angle measurement to deviate from the direction of the main beam, forming angle deception. Comprehensive analysis shows that the three interference methods, suppression interference, retransmitting interference and coherent interference, have good interference effects when applied in cluster interference.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle(UAV) cluster; electronic countermeasures; multiple radars; jamming

电子对抗技术是现代信息化战场的关键技术, 只有在电子对抗技术上领先才能在信息化战场上掌握主动权。近年来, 随着信息技术的持续发展, 雷达技术的不断进步, 各种新体制雷达开始用于现代信息化战场。在探测范围和测量精确度上, 新体制雷达有较大提高, 并对传统干扰方法有一定的抑制效果。雷达干扰技术面临严峻的挑战, 急需新型有效的干扰策略。随着无人机(UAV)技术的发展和应用, 体积小、价格便宜、易操控、零伤亡等众多的优点使无人机集群干扰成为可能。无人机集群与电子对抗技术相融合成为了一种新型的干扰技术, 文

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-11-17

*通信作者: 饶彬 email:raob@mail.sysu.edu.cn

献[1]阐述了无人机集群的作战理念。军用无人机已在现代电子对抗中广泛运用，在集群干扰和掩护目标等方面，无人机集群都有较好的效果。在集群干扰方面，相对于单一的干扰机，无人机集群能够产生大量的假目标，造成雷达虚警和漏报^[2]。在集群掩护目标方面，大量无人机本体和其产生的虚假目标会对雷达造成角度欺骗，同时低成本的无人机可以充当诱饵掩护目标^[3]。无人机集群在电子对抗中的干扰效果是一个重要的研究问题，可为集群自适应干扰和现代化电子战提供可靠的理论支撑。

不同的干扰样式运用在无人机集群干扰中会产生什么样的干扰效果，多雷达下的无人机干扰资源如何快速合理地进行资源分配，这些都是有待研究的关键点。通过数字射频存储(Digital RF Memory, DRFM)技术，可以实现间歇式转发欺骗干扰，能够在对应的距离域形成多个假目标，使雷达角度测量产生偏差^[4-6]。每个无人机都可以形成假目标，整个集群就能形成大量的假目标，从而构成多假压制，雷达检测概率下降^[7-8]。现代战场通常是同时出现多部雷达，无人机集群协同干扰也能对多雷达产生一定的干扰效果^[9-10]。如何更有效地协同干扰也是一直以来的研究重点。无人机本身较为密集，释放干扰后雷达回波更为密集。无人机本体及释放干扰究竟对雷达的检测及参数测量有什么影响，这是值得研究的课题。本文对集群压制、集群转发欺骗以及集群相干干扰等情况进行理论和仿真分析，有望对无人机集群对抗策略提供一定的理论指导。

1 雷达参数测量的基本原理

雷达接收的信号通常包含目标回波信号、干扰信号和噪声。对接收的回波信号经过脉冲压缩处理后进行目标检测，恒虚警检测 (Constant False-Alarm Rate, CFAR)是最为常见的检测方法，其检测原理见图 1。因为和通道能量最大，雷达一般先进行和通道距离 CFAR 检测，检测到目标后测距，然后再和差法测角。

单元平均 CFAR(Cell Averaging-CFAR, CA-CFAR)距离检测的原理是通过检测窗口信号值的平均值来判断是否有目标。图 1 中 D 为检测单元，假定参考单元长度为 N，保护单元长度为 M，则目标检测的阈值为：

$$P_T = \alpha \times \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s(n) \quad (1)$$

式中： $s(n)$ 为雷达接收的信号； α 为乘法因子。当检测单元的值大于目标检测阈值 P_T ，假设 H_0 成立，则检测单元内有目标；当检测单元的值小于目标检测阈值 P_T ，假设 H_0 不成立，则检测单元内无目标。乘法因子 α 可通过式(2)推导，其中 P_{FA} 为虚警概率^[11]。

$$\alpha = 1.13 \sqrt{N(P_{FA}^{-1/N} - 1)} \quad (2)$$

以二维情况为例说明测角原理。通过 CA-CFAR 检测后可以在距离域上判断是否有目标，将有目标的距离域标记下来，然后对目标进行测角。单脉冲测角因其测角方法简单、测角精确度高广泛用于雷达测角，其原理见图 2。假设天线 1 和天线 2 接收的信号分别为 s_1 和 s_2 ，对应的和差功率(能量)为 Σ 和 Δ ，通过其比值来确定目标角度与等信号轴(OA)的夹角 θ ，如式(3)所示，其中 k 表示相应曲线的斜率。由式(3)可知，信号的 Σ 和 Δ 的比值以及曲线斜率 k 可以唯一确定夹角 θ ，然后通过等信号轴(OA)的角度和夹角 θ 来推导出目标的角度^[12]。

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = k\theta \quad (3)$$

2 无人机集群干扰资源分配

仿真场景设为无人机群刚释放阶段，比较集中，为使干扰更有效果，假设无人机群都在雷达主瓣内。首先基于贪心算法对于干扰资源进行快速有效的分配。贪心算法的思路是：首先建立数学模型来描述问题，将最终问

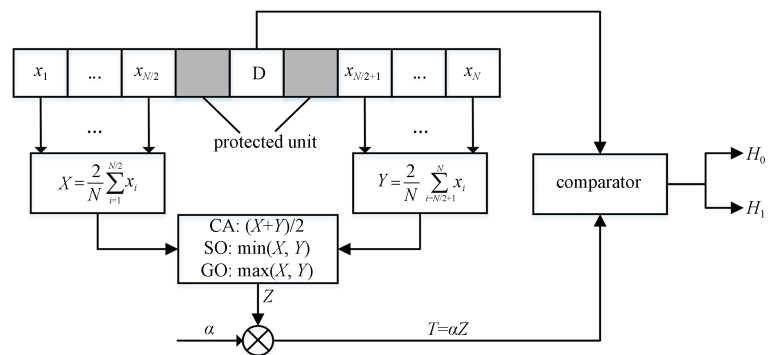


Fig.1 CFAR detection principle
图 1 CFAR 检测原理

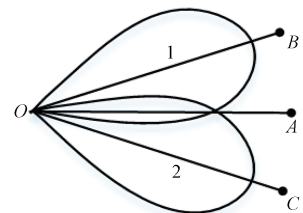


Fig.2 Monopulse angle measurement
图 2 单脉冲测角

题分为多个小问题，依次求解每个小问题的最优解，最后得到原问题的一个解。虽然贪心算法的最终解不一定是全局最优解，但它能够在较短时间内找到一个较为满意的解。在电子对抗中，单脉冲雷达只需要一个扫描周期就能发现目标，如果将过多的时间倾注在寻找资源分配的最优解，在干扰机开始工作前，雷达可能已经发现目标了，将无法起到较好的干扰效果。

假定场景中有 n 部雷达，可用于干扰的无人机数量为 m 架，每一个干扰机在同一时刻只能干扰一部雷达。以所有雷达接收到干扰信号的功率和为标准构建贪心算法的数学模型：

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n P_{ri} \quad (4)$$

式中 P_{ri} 为第 i 部雷达接收到的干扰信号功率和， P_{ri} 的形式如下：

$$P_{ri} = \sum_{k=1}^{n_i} P_k \quad (5)$$

式中： n_i 表示用于干扰第 i 部雷达的干扰机数量； P_k 为雷达接收到每一个干扰机对应的干扰功率。根据雷达方程，当其他条件不变时，雷达接收的干扰信号功率与 R^4 成反比^[13]：

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (6)$$

式中： P_t 为雷达发射功率； G_t 和 G_r 为发射天线和接收天线的增益； λ 为信号的波长； σ 为目标的雷达截面积。

因此可以将原干扰资源分配问题分解为多个小问题：求解每部干扰机应该干扰哪一部雷达。在这个小问题中采用贪心策略，优先分配距离该干扰机较近的雷达。为防止出现较多的干扰资源都分配到同一部雷达，设置约束条件，如式(7)所示：

$$\max \{j_i\} \leq p \quad (7)$$

无人机群的最大优点是可以对一定区域内所有辐射源进行干扰，为使仿真更逼近真实场景，每时刻并不是所有资源都用于干扰一部雷达。图3为一次干扰机资源分配的仿真情况，其中设置雷达数为4，无人机数量为100，式(7)中约束条件 $p=25$ 。由图3可知，随着贪心策略迭代的过程中，每一次迭代都会解决一个小问题，即分配一个干扰资源给其中一部雷达。当迭代完成时就解决了干扰资源分配的问题。贪心策略加上设置合理的约束条件能够快速得到一个比较满意的资源分配解决方案。

基于上述的干扰资源分配策略进行相关仿真，以雷达接收干扰功率之和作为衡量干扰资源分配效果的参数，讨论贪心算法和随机分配这两种干扰资源分配策略的影响。贪心算法是优先分配距离雷达较近的干扰机；随机分配是干扰机随机干扰某部雷达，但同时也需满足式(7)的约束条件，不能将过多的干扰资源倾注在同一部雷达上。仿真条件：设置雷达数为4；干扰机的干扰功率为10 kW；雷达的天线方向图为 sinc 函数；波束宽度为 $\pi/3$ ；雷达信号波长为 $\lambda=10$ m；目标和干扰机的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)=2 m²。图4为贪心算法和随机分配这两种干扰资源分配策略下4部雷达接收的所有干扰信号的功率之和，贪心策略均优于随机分配策略。图中不同雷达之间接收的干扰信号的和功率呈现了一定差异性，这是因为不同雷达到干扰机的距离不同，雷达接收的功率与距离呈反相关。图5为不同干扰分配策略下4部雷达接收到干扰信号功率的比值，这能够更直接地反映出贪心策略相对于随机分配的优势。在10次蒙特卡洛仿真中，贪心策略干扰信号和功率/随机分配干扰信号和功率的比值均大于1，体现出贪心策略作为资源分配算法的合理性。

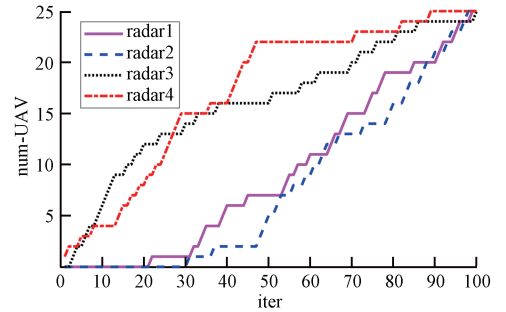


Fig.3 Jammer resource allocation
图3 干扰机资源分配

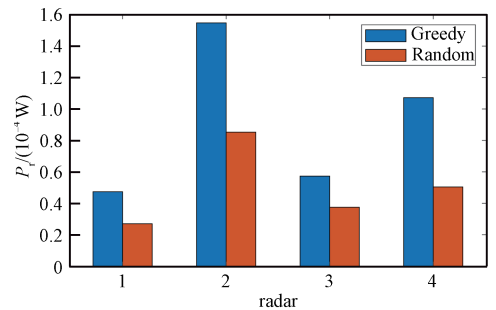


Fig.4 Sum of jamming power received by each radar
图4 各雷达接收的干扰功率之和

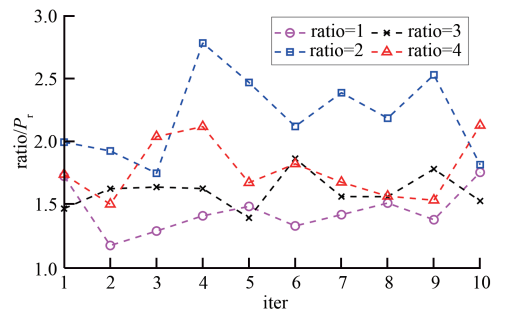


Fig.5 Ratio of radar received jamming signal power
图5 雷达接收干扰信号功率的比值

3 无人机集群干扰分析建模

3.1 无人机集群本体

雷达发射的线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)复信号可以写成^[14]:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j2\pi f_0 t + j\pi K t^2) \quad (8)$$

式中: T 为脉冲周期; f_0 为载频; K 为调频率。经过去载频和脉冲压缩后, 去掉与研究无关的项后, 可以推出第 i 架无人机本体的回波信号脉冲压缩后输出为:

$$y_i(t) = \sqrt{BTP_{ri}} \text{sinc}[Kt(t-\tau_i)T] \quad (9)$$

式中 τ_i 和 P_{ri} 为第 i 架无人机的时延和本体回波功率, 脉冲压缩后的回波为 sinc 形式的窄脉冲, 无人机集群的全部回波之和为:

$$y_s(t) = \sum_{i=1}^N y_i(t) = \sqrt{BT} \times \sum_{i=1}^N \sqrt{P_{ri}} \text{sinc}[Kt(t-\tau_i)T] \quad (10)$$

对于第 i 架无人机本体回波, $t=\tau_i$ 时, 脉冲压缩后对应的电压值最大, 最大峰值电压为:

$$u_{i\max} = \sqrt{BTP_{ri}} \quad (11)$$

在雷达检测目标的过程中, 假定 CA-CFAR 的参考单元长度为 N , 共有 m 架无人机落入参考单元中, 白噪声功率为 δ^2 。根据参考单元的平均功率, 计算 CA-CFAR 的阈值为:

$$P_T = \alpha P_{\text{ave}} = \frac{\alpha}{N} \left(\sum_{i=1}^m u_{i\max}^2 + \sum_{i=1}^N \delta^2 \right) \quad (12)$$

由于无人机本体落入 CA-CFAR 的参考单元中, 导致阈值变大。根据 CA-CFAR 的检测原理, 当目标的回波功率小于阈值时, 目标将无法检测, 从而影响雷达的参数测量。

下面分析无人机集群本体对测角的影响。由式(3)可以看出, 信号和差功率(能量)的比值决定目标的测量角度。由于无人机的数量较多, 通常都会有无人机本体和目标落入同一个距离单元。假定有 p 架无人机和目标落入同一距离单元, 对应的回波和差功率为:

$$\begin{cases} \Delta = F_{\Delta}(\theta_t) u_t^2 + \sum_{i=0}^p F_{\Delta}(\theta_i) u_{i\max}^2 \\ \Sigma = F_{\Sigma}(\theta_t) u_t^2 + \sum_{i=0}^p F_{\Sigma}(\theta_i) u_{i\max}^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $F_{\Sigma}(\theta)$ 和 $F_{\Delta}(\theta)$ 为和差天线方向图; θ_t 为目标角度; θ_i 为第 i 架无人机的角度; u_t 为目标的回波功率, 目标信号的和差功率中包含无人机本体, 导致目标角度测量不准; p 和 $u_{i\max}$ 的值越大时, 无人机本体的影响越大, 测角误差越大。

3.2 无人机集群压制干扰

在压制干扰下, 干扰机采取白噪声窄带干扰, 达到覆盖目标回波的效果, 使得雷达在目标参数测量上产生偏差。假设干扰机发射的功率为 δ_j^2 , 根据式(12)可以推导出在压制干扰下 CA-CFAR 的阈值为式(14)。当干扰机发射的功率 δ_j^2 较大时, CA-CFAR 的阈值将大幅提高, 达到压制干扰的效果。

$$P_T = \alpha P_{\text{ave}} = \frac{\alpha}{N} \sum_{i=1}^N (\delta^2 + \delta_j^2) \quad (14)$$

单个无人机在时域上能够达到一定的干扰效果, 但通常干扰频率小于雷达工作频率, 经过滤波器后可以有效过滤干扰信号, 很难实现宽带压制干扰。通过多架无人机协同合作, 可使无人机干扰频率覆盖整个雷达工作带宽。

3.3 无人机集群转发干扰

转发干扰是指无人机对雷达发射的信号进行采样并转发, 达到干扰雷达的效果。这里以工程上比较常见的间歇采样转发为例。间歇采样转发干扰能产生多个假目标, 其中有 3~5 个回波功率较大的假目标。

假设 $p(t)$ 为间歇式采样脉冲包络^[6], 其中 τ 为采样脉宽, T_s 为重复周期。

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (15)$$

则第 i 架无人机的转发干扰信号为:

$$j_i(t) = s_i(t) \times p(t) \quad (16)$$

间歇式采样转发干扰信号经过匹配滤波器后为^[6]:

$$z_i(t) = j_i(t) * h(t) = \text{Sa}\left[\pi(\xi_n + Kt_i)(T - |t_i|)\right] \left[1 - \frac{|t_i|}{T}\right] \exp(j\pi\xi_n t_i) \quad (17)$$

式中: f_s 为采样频率; $\xi_n = nf_s$; K 为调频斜率。该式表明会产生多个假目标, 且产生的假目标位于真目标的左右, 与采样频率 f_s 和调频斜率 K 相关。

因此, 无人机集群转发干扰能够在各个距离域产生大量的假目标, 造成雷达测角的较大偏差。当无人机干扰资源快速合理分配后, 干扰机就可以立刻采取间歇式转发干扰模式, 迅速在真目标周围产生大量的假目标。对于多雷达而言, 每部雷达真目标对应的距离域都有多个假目标, 大量假目标形成多假压制, 对雷达测距测角会产生较大的影响。

3.4 无人机集群相干干扰

目前无人机之间由于没有光缆, 较难实现类似于交叉眼之类的相干干扰。但随着高精度原子钟等同步技术的发展, 未来的无人机不排除可以跨平台实现相干干扰。相干干扰在角度欺骗上有较好的效果。不同于干扰机发射与雷达发射信号幅度相等、相位相差 180° 的干扰信号, 在雷达接收信号时会产生严重的波前相位失真, 造成雷达测角发生严重偏差。图 6 为相干干扰示意图。由图可知, 当目标回波信号和无人机干扰信号幅度相等、相位相差 180° 时, 在雷达接收信号时形成相干干扰, 导致雷达无法准确测量出目标的角。

假设第 i, j 架无人机对雷达形成相干干扰, 式(18)为雷达的测角偏差^[15], 其中 θ 为雷达测角值, θ_i 和 θ_j 为第 i, j 架无人机的角度, a 为第 i, j 架无人机干扰信号幅度比值, φ 为两干扰信号相位差。

$$\theta = \frac{\theta_i + \theta_j}{2} + \frac{\theta_i - \theta_j}{2} \times \frac{1 - a^2}{1 + 2a \cos(\varphi) + a^2} \quad (18)$$

通过无人机集群发射与雷达工作信号相干的干扰信号:

$$J = s(t) \exp(j\pi) \quad (19)$$

无人机集群覆盖距离域较大, 与目标在同一距离域的无人机能对雷达造成相干干扰, 形成角度欺骗。

4 仿真分析

假设目标位于场景中所有雷达的探测范围内, 无人机集群随机分布在以目标为圆心, 半径为 R 的圆内。图 7 为仿真场景雷达数 $n=4$, 无人机数 $m=100$ 的场景示意图。其中雷达的工作带宽为 10 MHz; 采样频率为 40 MHz; 发射信号的波长 $\lambda=10$ m; 天线方向图为 sinc 函数; 波束宽度为 $\pi/3$ 。首先通过对原始场景进行仿真来判断该雷达系统的探测精确度, 图 8 为原始场景 100 次蒙特卡洛测角仿真。在只包含检测目标时, 4 部雷达的目标检测概率皆为 100%, 测角误差几乎全部小于 0.2° , 测角误差平均值小于 0.1° , 这表明该雷达系统具有较好的性能。利用贪心算法对无人机集群干扰资源进行合理分配, 然后在此基础上再探究不同干扰模式和影响因素对多雷达参数测量的影响效果。

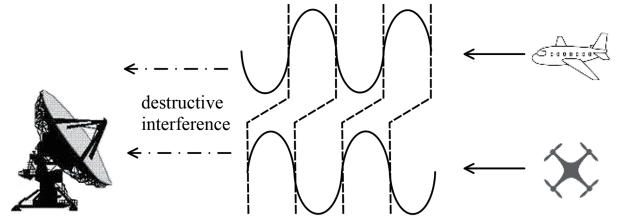


Fig.6 Schematic diagram of coherent interference
图 6 相干干扰示意图

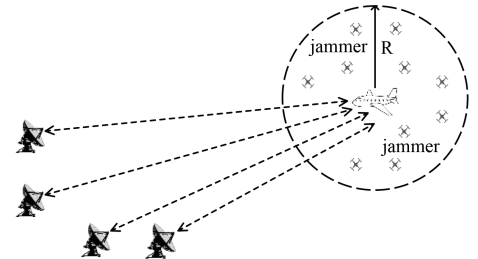


Fig.7 Sketch map of the scene
图 7 场景示意图

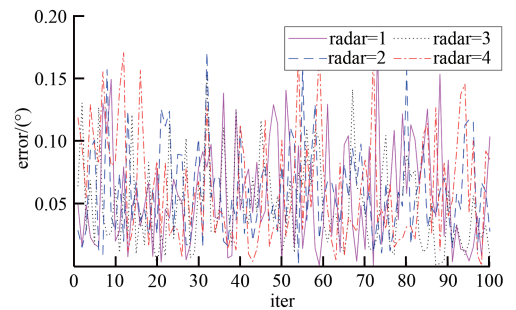


Fig.8 Error of original scene angle measurement
图 8 原始场景角度测量误差

下面分析 4 种模式下，SNR、JSR、目标回波与无人机本体回波幅值比(Ratio，可视为目标与无人机的体积之比)对多雷达参数测量的影响。本文主要以目标检测概率和测角误差作为干扰效果的评估指标。

4.1 SNR 与 Ratio 的影响

仿真场景：无人机的分布范围 $R=5\text{ km}$ ；目标和干扰机的 $RCS=1\text{ m}^2$ ；Ratio 取值 1,3,5；研究不同信噪比下无人机本体对雷达探测概率和测角的影响。图 9 为不同 Ratio 值在各雷达下 SNR 对检测概率的影响。图 10 为 SNR 在各雷达下对测角误差的影响。对于无人机集群，SNR 对检测概率的影响不大，随着 SNR 的增大，检测概率只有小幅的增加并趋向于饱和，其主要原因是大量无人机的回波会影响雷达探测。相对于 SNR，比值 Ratio 的大小对雷达探测的影响较大，较大的幅值比对应高检测概率和低测角误差。SNR 对雷达测角的影响比较明显，低信噪比时，SNR 增大，测角误差减小；当 $SNR>20\text{ dB}$ 时，SNR 对测角的影响就趋向饱和。由图 9 和图 10 可以看出，SNR 和 Ratio 值的影响对于不同的雷达基本相同，雷达之间呈现相同性。集群本体的影响在较低 SNR 和 Ratio 比值下能对多雷达同时产生一定的干扰效果，但这种干扰效果随 SNR 和 Ratio 比值的增大而逐渐减弱。

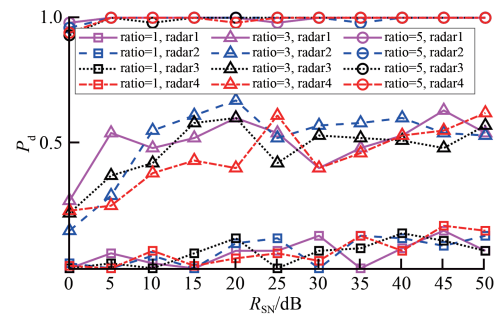


Fig.9 Influence of SNR on radar detection probability
图9 不同Ratio 值在各雷达下 SNR 对检测概率的影响

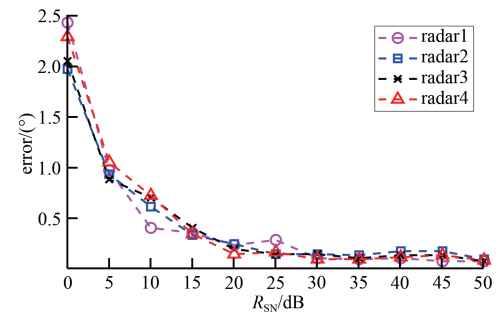


Fig.10 Influence of SNR on angle measurement error
图10 SNR 在各雷达下对测角误差的影响

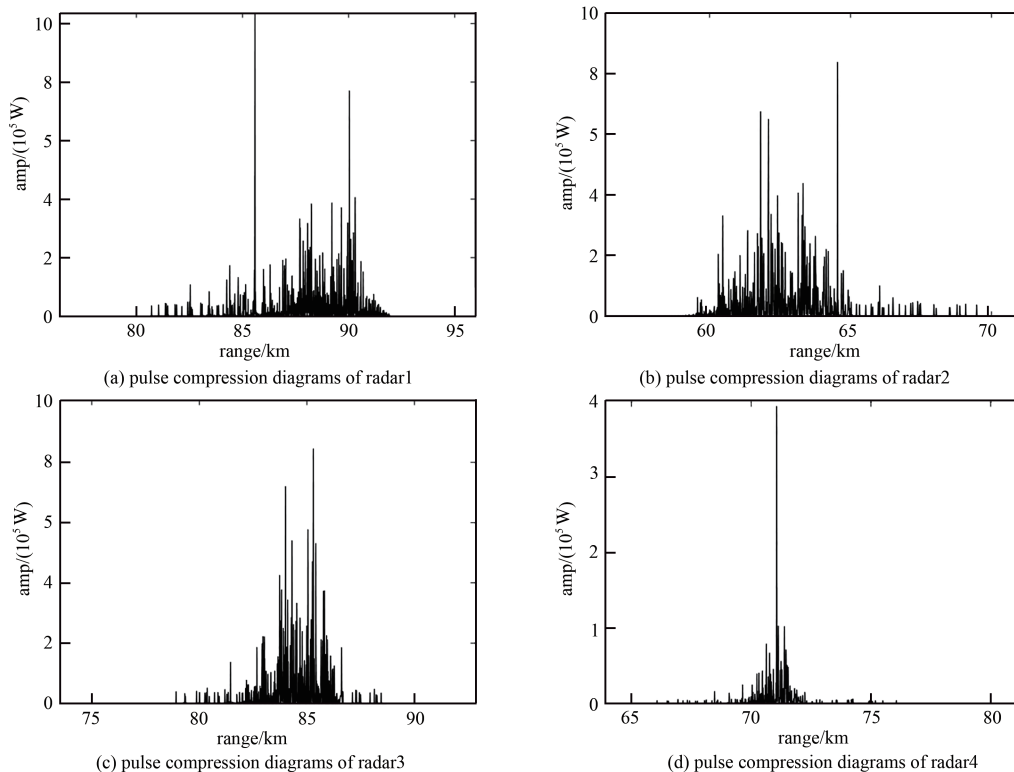


Fig.11 Pulse compression diagrams of each radar under retransmitting interference
图11 转发干扰下各雷达脉冲压缩图

4.2 JSR 的影响

仿真场景：无人机的分布范围 $R=5\text{ km}$ ；目标和干扰机的 $RCS=1\text{ m}^2$ ； $R_{SN}=20\text{ dB}$ ；Ratio=5。在不同时刻下，设置不同的 JSR，仿真测量检测概率和测角误差，并研究不同干扰模式下 JSR 对雷达测角的影响。图 11 为转发干扰下各雷达脉冲压缩图，可以看出无人机集群在间歇式转发干扰下对每部雷达都在对应的目标距离域附近形成了大量的假目标，达到有效的干扰。图 12 为 JSR 在不同干扰模式下对角度测量误差的影响，在小干信比条件下，

相干干扰的影响略小于间歇式转发干扰，主要原因是间歇式转发干扰能产生大量的假目标，而此时相干干扰由于功率较低还未达到有效的欺骗效果；在大干信比的条件下，可以看出，当 $JSR > 12$ dB 时，相干干扰开始造成角度欺骗效果，形成较大的测角误差(已偏离雷达主波束方向)。对于宽带压制干扰，对雷达检测有较好的干扰效果， JSR 较大时，雷达无法检测出目标，但对雷达测角影响不大。图 13 为 JSR 在转发干扰模式下对不同雷达的角度测量误差的影响，不同雷达之间的干扰效果趋同，皆形成了较大的测角误差。对于无人机本体的干扰影响，压制干扰、转发干扰、相干干扰在较大的 SNR 和 $Ratio$ 比值下，也能对所有雷达形成较好的干扰效果。

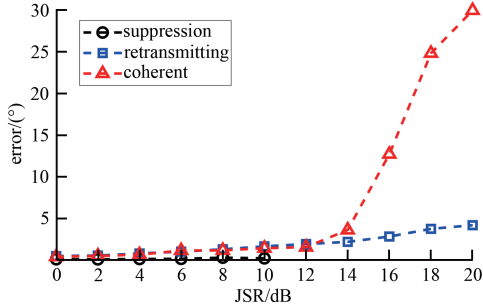


Fig.12 Influence of JSR on angle measurement error in different jamming modes
图 12 JSR 在不同干扰模式下对角度测量误差的影响

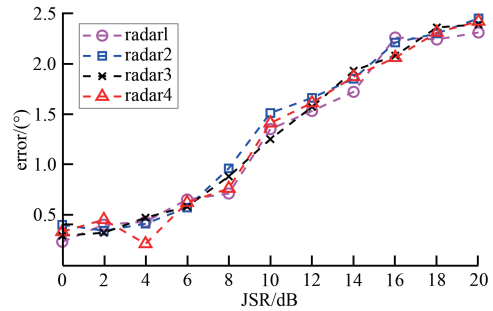


Fig.13 Influence of JSR on the angle measurement error of different radars in the repeating jamming mode
图 13 JSR 在转发干扰模式下对不同雷达的角度测量误差的影响

4.3 干扰资源分配策略的影响

前面讨论的 SNR 和 JSR 对雷达参数测量的影响都是基于贪心算法的资源分配策略，现讨论不同的分配策略对雷达参数测量的影响。仿真场景：设置雷达数为 4；无人机的分布范围 $R=40$ km；目标和干扰机的 $RCS=1$ m²；干扰机干扰样式为集群转发干扰。

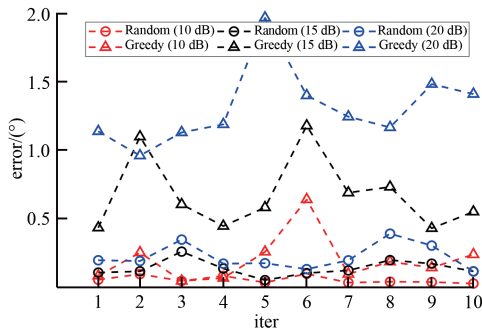


Fig.14 Influence of resource allocation strategy on radar angle measurement error
图 14 资源分配策略对雷达测角误差的影响

表 1 不同资源分配策略下集群干扰对雷达的检测概率和测角误差的影响
Table1 Influence of cluster interference on the detection probability and angle measurement error of radar under different resource allocation strategies

JSR/dB	P_d		error/(°)	
	Greedy	Random	Greedy	Random
10	0.93	1.00	0.198 1	0.051 7
15	0.75	0.94	0.672 3	0.135 1
20	0.45	0.92	1.306 9	0.219 1

分别对瞬时 JSR 的几种不同的取值进行分析，选取 JSR 为 10 dB,15 dB,20 dB。图 14 为 3 种不同 JSR 情况下干扰机分别采取贪心策略和随机分配策略对雷达测角误差的影响。由图可知，在 JSR 较小时(10 dB)，两种资源分配策略的效果相差不大；随着 JSR 的逐步增大，干扰资源分配策略对雷达测角误差影响呈现差异性；当 $JSR=20$ dB 时，贪心策略相比于随机分配策略有较大的优势。表 1 为两种策略下无人机集群干扰对雷达的检测概率和测角误差的蒙特卡洛实验平均值。由图 14 和表 1 分析可得： JSR 较小时，干扰机的干扰功率不足，因此两种资源分配策略都没有较好的效果；当 JSR 增大时，贪心策略下干扰效果呈现显著变化，对雷达造成的测角误差越来越大。

5 结论

本文首先基于贪心算法快速地进行无人机干扰资源分配，然后以检测概率和测角误差为标准，研究分析了不同干扰模式下无人机集群对多雷达的干扰效果。宽带压制干扰主要体现在压制性，无人机协同干扰相对于传统的干扰机有较好的压制效果，噪声提高了 CA-CFAR 参考单元的平均功率，增大了阈值，使所有雷达的检测概率同时降低，可用于无人机集群对目标的隐藏；间歇式转发干扰，每个无人机可以形成 3~5 个假目标，整个集群可以产生大量的假目标，可以覆盖较广的距离域，与目标在同一个距离域的假目标会使得雷达对目标的和差信号检测不准确，造成测角偏差，可用于对雷达测角的干扰。相干干扰，与目标在同一个距离域的假目标由于和

目标的回波相位相差 180° ，信号在雷达接收天线处发生零陷，使雷达测角偏离主波束方向，形成角度欺骗，雷达无法跟踪目标。场景中的多雷达在各个干扰模式下都呈现了趋同的干扰效果，表明无人机集群干扰组网雷达的可行性。无人机集群对多雷达的干扰中，干扰资源分配也是一个重要的研究问题。综上，本文的结论可为无人机集群电子对抗和干扰组网雷达的研究提供参考。

参考文献：

- [1] LI R, MA H. Research on UAV swarm cooperative reconnaissance and combat technology[C]// 2020 3rd International Conference on Unmanned Systems(ICUS). Harbin, China: IEEE, 2020: 996–999.
- [2] 周治宇, 饶彬, 谢晓霞. 对 LFM-PC 雷达的分布式合成欺骗干扰效果分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(1): 24–29. (ZHOU Zhiyu, RAO Bin, XIE Xiaoxia. Analysis of the effect on distributed synthetic deception jamming to LFM-PC radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(1): 24–29.)
- [3] 张双雄, 李晶晶, 尹帅, 等. 无人机蜂群作战分析[J]. 现代信息科技, 2020, 4(12): 22–24. (ZHANG Shuangxiong, LI Jingjing, YIN Shuai, et al. Analysis of drone swarm combat[J]. Modern Information Technology, 2020, 4(12): 22–24.)
- [4] 邬诚, 陈新年. 间歇采样转发干扰参数分析[J]. 电子信息对抗技术, 2014(5): 49–54. (WU Cheng, CHEN Xinnian. Jamming parameter analysis for intermittent sampling repeater[J]. Electronic Warfare Technology, 2014(5): 49–54.)
- [5] 冯德军, 徐乐涛, 王雪松. 间歇采样转发假目标的相位特性及其在角度欺骗干扰中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3): 135–140. (FENG Dejun, XU Letao, WANG Xuesong. Phase signature of active decoy and its application in angular deception jamming using interrupted-sampling repeater[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(3): 135–140.)
- [6] 王雪松, 刘建成, 张文明, 等. 间歇采样转发干扰的数学原理[J]. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2006, 36(8): 891–901. (WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, et al. The mathematical principle of intermittent sampling repeater jamming[J]. Science in China Series E: Information Science, 2006, 36(8): 891–901.)
- [7] 李楠. 雷达干扰多假目标欺骗效果研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(1): 65–68. (LI Nan. Study on jamming effect of multiple false targets with radar[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1): 65–68.)
- [8] YIN Yanjuan, ZHAO Feng, AI Xiaofeng, et al. A study on effectiveness modeling of multi-false-target jamming[C]// 2016 CIE International Conference on Radar(RADAR). Guangzhou, China: IEEE, 2016: 1–5.
- [9] 何嘉, 奚峥皓, 阚秀, 等. 多无人机对组网雷达的协同干扰控制策略研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(7): 48–51, 59. (HE Jia, XI Zhenghao, KAN Xiu, et al. Research on cooperative interference control strategy of multi-UAV to networked radar[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(7): 48–51, 59.)
- [10] 付昕莹. 雷达协同干扰策略及干扰方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020. (FU Xinying. Study on cooperative jamming policy and jamming methods of radar[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.)
- [11] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 5 版. 电子工业出版社, 2014. (DING Lufei, GENG Fulu, CHEN Jianchun. Radar principles[M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.)
- [12] SHERMAN S, BARTON D. Monopulse principles and techniques[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [13] RICHARDS M. Fundamentals of radar signal processing[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [14] MAHAFZA B. Radar systems analysis and design using Matlab[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [15] 刘天鹏, 魏玺章, 刘振, 等. 交叉眼干扰研究综述[J]. 雷达学报, 2019, 8(1): 140–153. (LIU Tianpeng, WEI Xizhang, LIU Zhen, et al. Overview of cross-eye jamming research[J]. Journal of Radars, 2019, 8(1): 140–153.)

作者简介：

欧阳佳康(1997–)，湖北省黄冈市人，在读硕士研究生，研究方向为无人机集群电子对抗。email: ouyjk@mail2.sysu.edu.cn.

饶彬(1980–)，男，四川省彭州市人，副教授，主要研究方向为目标跟踪与数据融合、认知电子战和雷达系统建模仿真等。

周永坤(1995–)，河南省商丘市人，在读博士研究生，研究方向为群体智能算法、无人机集群电子对抗。