

中图分类号:TN972.3

文献标志码:A

文章编号:1674-2230(2016)03-0051-04

# 基于多机协同的组网雷达欺骗干扰策略

孙琳<sup>1</sup>,李小波<sup>1</sup>,毛云祥<sup>1</sup>,徐旭宇<sup>2</sup>

(1. 电子工程学院,合肥 230037;2. 解放军 73677 部队,南京 210000)

**摘要:**针对组网雷达抗欺骗干扰能力强的特点,分析了利用多机协同对组网雷达进行航迹欺骗的可行性。利用多无人机协同干扰,可以将分布式干扰及空间航迹融合的优势充分发挥,取得理想的欺骗干扰效果,在敌方的雷达网信息融合系统中形成欺骗干扰航迹。首先从几何关系上分析了飞行器完成欺骗干扰的运动条件,并提出了分步优化的干扰航迹数学模型。利用该规划模型可以降低协同干扰的难度,同时使假目标成功避开威胁区域到达目标位置。仿真实验证明了模型的可行性与可靠性。

**关键词:**多机协同;欺骗干扰;组网雷达;航迹优化

DOI:10.3969/j.issn.1674-2230.2016.03.011

## A Strategy for Track Deception Jamming Against Radar Network Using Cooperative Autonomous Vehicle Teams

SUN Lin<sup>1</sup>, LI Xiao-bo<sup>1</sup>, MAO Yun-xiang<sup>1</sup>, XU Xu-yu<sup>2</sup>

(1. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. Unit 73677 of PLA, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** For the characteristics of radar network which has strong anti-jamming capacity, the feasibility of cooperative deception jamming is analyzed against radar network using a team of unmanned aerial vehicles (UAVs). The reason using UAVs to deceive radar network is that, it can take advantage of the feature of distributed jamming as well as space integration. The UAVs can form the phantom track in information fusion system of enemy, and achieve a satisfied jamming effect. Firstly the motional condition is discussed to finish the deception jamming by analyzing geometrical relationship, and then a step-by-step mathematical model is proposed to optimize the phantom track. The difficulty of cooperative jamming could be reduced through this model, phantom target is made keep away from threatening area and to move toward destination. The feasibility and reliability is proved with the simulations.

**Key words:** cooperative UAVs; deception jamming; radar network; path optimization

## 1 引言

现代战争敌我双方围绕雷达与雷达对抗装备<sup>[1]</sup>间的斗争愈演愈烈。组网雷达<sup>[2]</sup>凭借多频

段、多体制及信息融合的优势,使传统的欺骗干扰达不到理想的干扰效果,而利用多无人机协同干扰,可以将分布式干扰及空间航迹融合的优势充

收稿日期:2015-12-18;修回日期:2015-12-29

基金项目:安徽省科技攻关项目(1310115188)

作者简介:孙琳(1990—),男,山东威海人,硕士研究生,研究方向为雷达与雷达对抗技术;李小波,副教授。

分发挥, 达到理想的欺骗干扰效果, 在敌方的雷达网信息融合系统中形成欺骗干扰航迹, 迫使敌方加强空情处置, 调动其战略部署。

多飞行器协同欺骗干扰技术作为较新的欺骗手段, 得到了相关学者的研究, 并陆续提出了多机协同干扰方法。McLain<sup>[3]</sup>等人于2000年研究提出了多机协同的汇聚问题, 利用泰森多边形汇聚原理, 使多无人飞行器在确定时刻在雷达网内的暴露点迹最小化, 从而达到控制飞行路线及飞行方向的目的; 马亚涛<sup>[4]</sup>提出了利用单个ECAV对雷达网内某个特定雷达进行假目标航迹欺骗干扰, 分布式小型干扰机对雷达网内其它各个雷达进行相关噪声压制干扰的方法, 并对相关原理进行了仿真, 但对于航迹的规划并没有提出具体思路; K. B. Purvis<sup>[5-6]</sup>在总结前人方法的基础上, 对于多机协同欺骗进行了更深入的研究, 首先利用多机协同对网内雷达的位置进行确定, 然后根据雷达位置提出了基于瞄准线准则的协同欺骗算法, 考虑了风向以及油耗对于整个飞行系统的影响。对于多机干扰系统, 引入代价函数是为了更好地对假目标航迹及飞行器运动状态进行优化, 而文献<sup>[7]</sup>将假目标及飞行器的运动状态统一到同一代价函数中, 参数较多, 优化维数庞大, 不能够起到良好的优化效果, 部分模型速度抖动过于剧烈, 在现实情况下不可能完成干扰任务。

本文在进行合理几何分析基础上, 提出了合理的速度与角速度限制条件, 与此同时引入独立的代价函数, 对距离假目标合成以及飞行器轨迹进行分步优化考虑, 形成更加合理化的航迹优化效果, 同时将威胁地域的避让引入路径规划函数中, 使假目标航迹在敌方雷达更加逼真地显示; 通过仿真实验, 验证了所形成假航迹的合理性与可靠性。

## 2 基本原理

### 2.1 完成协同干扰的条件

利用飞行器对雷达网进行欺骗的基本原理是将不同干扰飞机分别对网内的雷达进行距离延时干扰, 延时干扰后的目标融合为同一目标。如图2所示, 干扰机对接收到的雷达脉冲信号进行延

时转发, 经过转发后的脉冲信号由雷达主瓣进入信号处理系统, 形成假目标。

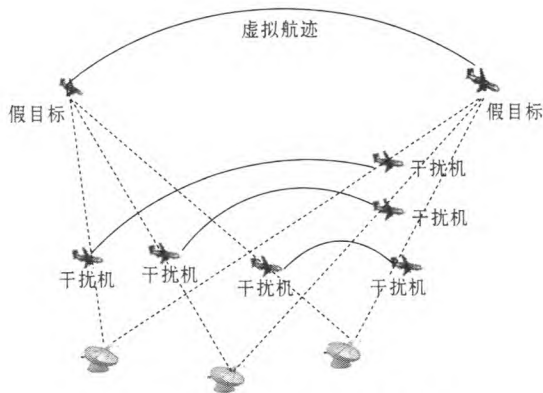


图1 多飞行器干扰雷达网示意图

完成整个干扰过程需要达到以下条件: (1) 干扰平台运动状态可控, 整个假航迹的形成过程需要干扰飞机通过运动状态的控制进行配合确保虚假点迹融合成功; (2) 雷达网内雷达的数量及具体位置可知, 保证干扰过程飞行器干扰阵位及干扰时延的要求; (3) 干扰机平台隐身化, 干扰机平台的隐身化有利于干扰实施过程中的安全, 不被敌方发现, 确保干扰过程完整顺利, 利用小型无人机平台低慢小的特点躲避敌方雷达的侦察干扰, 顺利完成整个干扰流程; (4) 干扰机可对雷达进行转发式干扰且具备判断雷达天线主瓣照射能力, 这样才能在预定位置形成假目标, 利用数字射频存储 (Digital Radio Frequency Memory, DRFM) 技术转发式干扰, 可以快速识别转发所接收的雷达信号, 保证对雷达网成功进行欺骗。

### 2.2 协同干扰技术流程

多机干扰的实现流程如图2所示。信息获取模块首先需要获取组网雷达的位置、整个运行轨迹中的威胁区域、威胁半径及不可预知的突发情况, 将信息存储到代价模型; 专家决策系统决定飞行器及假目标的起始位置, 控制飞行器及相应的转发时延, 使假目标完成融合; 代价模型计算模块根据此刻的飞行器及假目标的位置, 计算出下一时刻飞行器所处的最优位置, 专家决策系统根据最小代价及完成任务的可行性进行综合处理, 分析并传达下一步的控制指令。代价计算<sup>[8]</sup>及专家决策是整个流程的核心环节, 是本文航迹优化

的主要研究问题。

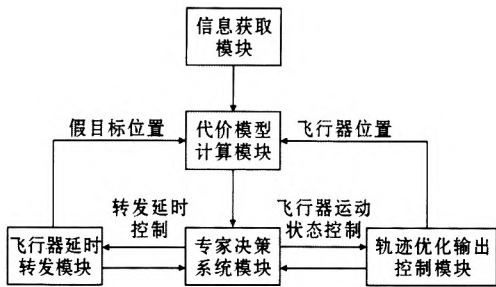


图2 协同干扰的决策流程图

### 3 数学模型

#### 3.1 干扰问题的数学分析

本节将对单干扰机对单部雷达形成的延时干扰航迹进行建模,为简化分析,将在二维平面对问题进行阐述。定义假目标航迹的速度和朝向角分别为  $V_p(t)$  和  $\varphi_p(t)$ , 雷达的位置坐标为  $\{x_r, y_r\}$ , 飞行器的起始位置坐标为  $\{x_u(0), y_u(0)\}$ , 速度和朝向角为  $V_u(t)$  和  $\varphi_u(t)$ 。完成整个干扰过程是基于视线准则(line-of-sight, LOS), 需要  $V_u(t)$ 、 $\varphi_u(t)$  及延时转发的时间共同配合形成合理的假目标,如图3所示。

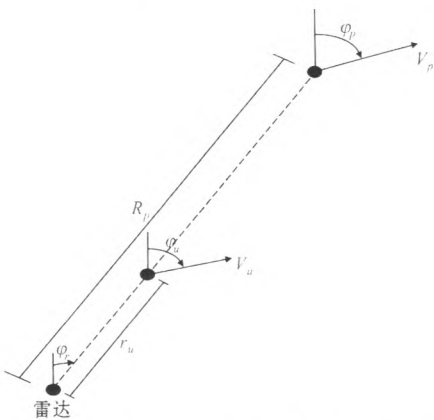


图3 干扰机及假目标之间的几何关系

令  $\hat{x} = x - x_r, \hat{y} = y - y_r$ , 即目标对于雷达的相对坐标位置;从图中可看出,假目标移动距离为:

$$\hat{x}_p(t) = \int_0^t V_p(T) \sin(\varphi_p(T)) dT \quad (1)$$

$$\hat{y}_p(t) = \int_0^t V_p(T) \cos(\varphi_p(T)) dT \quad (2)$$

飞行器与雷达之间的距离为  $\hat{r}_u(t)$ , 假目标与

雷达之间的距离为  $\hat{r}_p(t)$ , 则有如下关系:

$$\hat{r}_p(t) = \sqrt{\hat{x}_p^2 + \hat{y}_p^2} \quad (3)$$

$$\hat{r}_u(t) = \alpha(t) \hat{r}_p(t) \quad (4)$$

式中  $\alpha(t)$  为距离系数, 是飞行器与假航迹到雷达距离的比值,  $0 \leq \alpha(t) \leq 1$ 。

令  $\varphi_r(t)$  表示航线对于雷达的方位角, 则有:

$$\varphi_r(t) = \arctan(\hat{x}_p(t) / \hat{y}_p(t)) \quad (5)$$

$$\hat{x}_u(t) = \hat{r}_u(t) \sin \varphi_r(t) = \alpha(t) \hat{x}_p(t) \quad (6)$$

$$\hat{y}_u(t) = \hat{r}_u(t) \cos \varphi_r(t) = \alpha(t) \hat{y}_p(t) \quad (7)$$

由速度关系可得:

$$\hat{x}_u(t) = \int_0^t V_u(T) \sin(\varphi_u(T)) dT \quad (8)$$

$$\hat{y}_u(t) = \int_0^t V_u(T) \cos(\varphi_u(T)) dT \quad (9)$$

由式(6~9)得

$$\alpha(t) = \frac{\int_0^t V_u(T) \sin(\varphi_u(T)) dT}{\hat{x}_p(t)} = \frac{\int_0^t V_u(T) \cos(\varphi_u(T)) dT}{\hat{y}_p(t)} \quad (10)$$

从式(10)中可以看出, 整个系统的定位由  $V_u$ 、 $\varphi_u$  及  $\alpha$  共同决定的, 选择任意  $\alpha$  则  $V_u$  和  $\varphi_u$  在离散域的表达式为:

$$\hat{y}_p^{i+1}(\hat{x}_u^i + V_u^i \sin \varphi_u^i \Delta t) = \hat{x}_p^{i+1}(\hat{y}_u^i + V_u^i \cos \varphi_u^i \Delta t) \quad (11)$$

整理式(11)可得飞行方向角  $\varphi_u$  与飞行速度  $V_u$  之间的关系为:

$$\varphi_u^i(V_u^i) = -\arctan\left(\frac{c^i \pm \sqrt{(c^i)^2 - (\hat{y}_p^{i+1})^2 - (\hat{x}_p^{i+1})^2}}{\hat{y}_p^{i+1} + \hat{x}_p^{i+1}}\right) \quad (12)$$

式中  $c^i = \frac{\hat{x}_p^{i+1} \cdot \hat{y}_u^i - \hat{y}_p^{i+1} \cdot \hat{x}_u^i}{V_u^i \Delta t}$ 。

综合上式得到飞行器飞行角度的限制条件:

$$0 \leq \alpha \leq 1 \Rightarrow \arctan\left(\frac{\hat{x}_p^{i+1} - \hat{x}_u^i}{\hat{y}_p^{i+1} - \hat{y}_u^i}\right) \leq \varphi_u^i \leq \varphi_r^i + \pi \quad (13)$$

$$V_u^i \geq V_{\min} \Rightarrow \varphi_u^i(V_{\min})^- \leq \varphi_u^i \leq \varphi_u^i(V_{\min})^+ \quad (14)$$

式(13)、(14)给出了飞行器方向角的限制边界, 另外飞行器本身存在最大最小速度限制及加速度限制, 即:

$$V_{\min} \leq V_u^i \leq V_{\max} \quad (15)$$

$$a_u < a_{\max} \quad (16)$$

只要规划假目标的航迹在飞行器的速度、加

速度及朝向角的限制范围之内,即可完成有效的欺骗干扰。而对于整个飞行器的组网欺骗,需要互相配合整体规划以达到融合为同一点迹的目的,因此需要引入相应的代价函数来优化假目标航迹以及飞行器的航迹。

### 3.2 航迹优化

针对文献[6-7]的不足,本文将航迹优化分步为假目标航迹形成及飞行器运动状态两部分的代价函数。

考虑到假目标航迹需要模拟真实的运动目标及其完成任务的过程,需要将敌方火力威胁及目标点考虑到代价函数模型当中。设置假威胁场坐标为 $(x_N, y_N)$ ,威胁半径为 $R_N$ ,目标点的坐标为 $(x_T, y_T)$ ,则假目标航迹优化问题在时间离散域可以表述为:在第 $i$ 时刻,寻找满足运动状态的且代价函数最小的第 $i+1$ 时刻的位置坐标 $(x_p^{i+1}, y_p^{i+1})$ ,即:

$$\min J_p = \frac{k_1}{\sqrt{(x_p^{i+1} - x_N)^2 + (y_p^{i+1} - y_N)^2} - R_N} + k_2 \cdot \sqrt{(x_p^{i+1} - x_T)^2 + (y_p^{i+1} - y_T)^2} \quad (17)$$

且满足限制条件:

$$V_{\min} \leq V_p \leq V_{\max} \quad (18)$$

$$\Delta\varphi_{\min} \leq \Delta\varphi_p \leq \Delta\varphi_{\max} \quad (19)$$

为完成整个运动过程,飞行器的运动状态需要与假目标航迹时刻对应,且运动过程尽量稳定可行,可以表述为:在满足式(11)的运动状态下,寻找恰当的距离系数 $\alpha$ ,使得飞行器的运动速度 $V_u$ 及朝向角 $\varphi_u$ 稳定,代价函数为:

$$\min J_u = k_3 |V_u^{i+1} - V_u^i| + k_4 \left| \arctan\left(\frac{y_u^{i+1} - y_u^i}{x_u^{i+1} - x_u^i}\right) - \varphi_u^i \right| \quad (20)$$

式(20)中, $(x_u, y_u)$ 、 $\varphi_u$ 及 $V_u$ 满足式(11)。

整个评价系统对于航迹规划有较大的稳定性及可行性,在仿真实验中进行了相关的验证。

## 4 仿真分析

仿真实验模拟三架干扰飞机对三部雷达进行干扰,具体仿真条件如下,设置1、2、3号雷达的初始位置坐标分别为 $(1000, 1000)$ 、 $(13000, 0)$ 、 $(7000, 6000)$ ;威胁点坐标为 $(25000, 30000)$ ,威胁半径为2000米;假目标的起始位置为 $(1000,$

$30000)$ ,终点为 $(5000, 29000)$ ,速度为300m/s,角速度上限为 $15^\circ/\text{s}$ ;1号、3号干扰飞机的初始距离系数 $\alpha$ 设置为0.4,2号干扰飞机初始距离系数设置为0.5,角速度上限为 $10^\circ/\text{s}$ ,速度范围120~180m/s,加速度上限为 $8\text{m}/\text{s}^2$ , $k_1=100000$ , $k_2=1$ , $k_3=1$ , $k_4=0.7$ 。运行时间为150秒,仿真结果如图4所示。

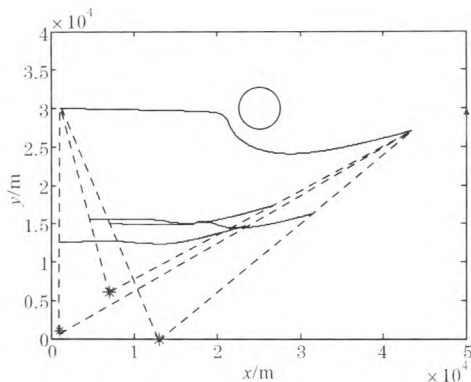


图4 飞行器及假目标运行轨迹示意图

图4给出了150秒的时间内,飞行器与假目标的轨迹,从图中可以看出假目标航迹可以完成既定的运行轨迹,成功的避开威胁区域,并向终点飞行,飞行器在执行转发干扰任务时,运动状态平稳,具体的飞行角度及飞行速度如图5所示。

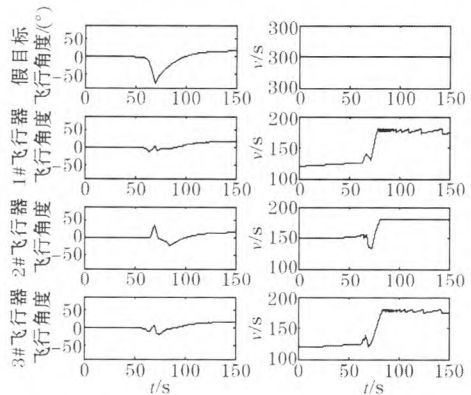


图5 干扰过程飞行器角度及速度分析

图5给出了完成图4干扰过程的角度及速度关系,从图中可以看出飞行器在飞行过程中,速度和飞行朝向角度基本稳定,没有过幅的波动,可以在飞行过程中完成干扰任务。

图6反映了飞行过程中,各干扰飞机相对于假目标的距离系数,变化较为平稳,且在限制范围内。

(下转第63页)



互影响,还需要从隐身及电性能的角度对各种因素进行综合考虑,以期达到综合最佳的效果。

#### 参考文献:

[1] AXNESST A, COFFMAN R V, KOPP B A, et al. Shared Aperture Technology Development [J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1996, 17(3): 285-294.

[2] HEMMIC, DOVER R T, GERMAN F, et al. Multi-function Wide-Band Array Design [J]. IEEE Trans Antennas And Propagation, 1999, 47(3): 425-431.  
[3] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
[4] JENNND C. Radar and Laser Cross Section Engineering [M]. 2nd ed. Newyork: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.

(上接第54页)

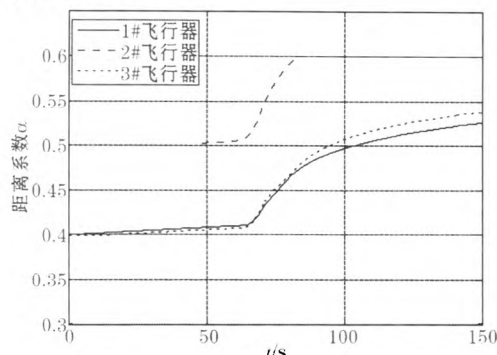


图6 干扰过程距离系数分析

综合实验结果可以看出,在本文所提的限制条件及代价函数的要求下,可以平稳完成对组网雷达的干扰,并且假目标航迹可以顺利避开威胁区域。

## 5 结束语

多飞行器协同干扰是对组网雷达进行航迹欺骗的有效手段,合理的运动状态规划可以将航迹欺骗复杂度变低,干扰成功率提高。本文针对前人进行航迹规划函数单一、规划效果不佳的问题,提出了分步规划、合理避让威胁点的代价函数,仿真实验表明,所提规划函数优化效果理想,可操作性较高。本文对于研究组网雷达的航迹欺骗干扰提供了理论指导,但分析暂时局限于二维平面的仿真,对于三维规划模型的构建将是下一步研究的重点。

#### 参考文献:

[1] 张锡祥. 现代雷达对抗技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
[2] 杨涛. 组网雷达系统“四抗”效能评估方法研究[D]. 国防科学技术大学, 2008. 5.  
[3] 马亚涛, 赵国庆, 徐晨. 现有技术条件下对组网雷达的航迹欺骗[C]. 电子信息对抗技术, 2013, 28(2): 34-37, 68.  
[4] McCLAIN T W, CHANDLER P R, PACHTER M. A Decomposition Strategy for Optimal Coordination of Unmanned Air Vehicles [C]//Proceedings of the 2000 American Control Conference, 2000, 6: 691-695.  
[5] PURVIS K B, ASTROM K J, MUSTAFA KHAMMASH. Estimating Radar Positions Using Cooperative Unmanned Air Vehicle Teams [C]//Proceedings of the 2005 American Control Conference, 2005, 6: 3512-3517.  
[6] PURVIS K B, CHANDLER P R. A Review of Recent Algorithms and a New and Improved Cooperative Control Design for Generating a Phantom Track [C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007, 7: 3252-3258.  
[7] WAUN S D, OZGUNER U. Deception of Radar System Using Cooperatively Controlled Unmanned Air Vehicles [C]//Proceedings of 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004, 12: 3370-3375.  
[8] 王威, 许鹏, 张多林. 混合优化策略在巡航导弹多航迹规划中的应用[J]. 电光与控制, 2008, 15(4): 66-69.

欢迎投稿

欢迎订阅

投稿邮箱: dzxxdkjs@126.com