

引用格式: 徐胜, 张安柯, 孔繁峨. 双机协同作战下导弹协同攻击区仿真分析[J]. 电光与控制, 2018, 25(9): 45-48. XU S, ZHANG A K, KONG F E. Simulation analysis on coordinated attack zone of dual-aircraft cooperative operation [J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(9): 45-48.

## 双机协同作战下导弹协同攻击区仿真分析

徐 胜<sup>1</sup>, 张安柯<sup>2</sup>, 孔繁峨<sup>2</sup>

(1. 海军装备部航空局, 北京 100089;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘 要:** 主要针对单机探测性能对导弹攻击区的限制, 对双机协同作战模式下的导弹协同攻击区进行研究, 并分析了双机协同攻击时制导约束条件, 仿真了两种编队下的导弹协同攻击区。经过仿真分析, 双机协同作战模式下导弹协同攻击区大于单机导弹攻击区, 更有利于发挥导弹效能。

**关键词:** 双机协同; 协同攻击区; 制导约束

中图分类号: V271.4; TJ765.4 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2018.09.010

## Simulation Analysis on Coordinated Attack Zone of Dual-Aircraft Cooperative Operation

XU Sheng<sup>1</sup>, ZHANG An-ke<sup>2</sup>, KONG Fan-e<sup>2</sup>

(1. Aeronautical Department of the Naval Equipment Department, Beijing 100089, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Aiming at the limitation of single aircraft detection performance to missile attacking area, we studied the missile cooperative attacking area under dual-aircraft cooperative operation mode, and analyzed the guidance constraints under dual-aircraft cooperative attacking. Simulation was made for the missile cooperative attacking area of two kinds of aircraft formations. The simulation analysis shows that, the cooperative missile attacking area of the dual-aircraft cooperation is larger than that of the single aircraft, which is more beneficial to the attacking performance of the missile.

**Key words:** dual-aircraft cooperative operation; coordinated attack zone; guidance constraint

### 0 引言

单机空战中, 中距雷达制导空空导弹的发射过程是: 载机雷达远距离发现、识别并跟踪目标, 导弹发射后直到导弹导引头截获目标的过程中, 机载雷达仍需不断照射目标。这就需要载机必须利用自身雷达等传感器系统探测目标数据, 也称为平台瞄准。

在网络信息化环境下, 武器平台能够通过各类数据链获得目标信息, 并向待发射或者已发射的信息化武器提供瞄准和攻击目标的制导信息<sup>[1]</sup>。传统的本机制导攻击模式可延伸为他机制导攻击模式, 能够改善导弹发射和制导条件, 扩大武器攻击范围。

当前机载火控系统对空空导弹攻击区的解算不考虑协同制导的因素, 这限制了编队和导弹的效能发挥,

需要进行改进。目前对网络中心环境下的综合火力控制概念的研究取得一定的成果<sup>[2-3]</sup>, 但对协同编队下空空导弹攻击区的研究较少。文献[4]研究了网络化条件下空空导弹允许发射区的计算方法, 但仿真结果置信度不高; 文献[5]对双机编队空空导弹协同发射区进行仿真分析, 但仿真中没有考虑导弹发射后不管攻击区的因素。

本文在上述文献的基础上, 总结了导弹协同攻击区的概念; 分析了协同制导方式以及协同制导的约束条件; 针对某中远距空空导弹, 仿真了两种典型编队下导弹协同攻击区。具体内容如下。

### 1 空空导弹协同攻击区

#### 1.1 传统空空导弹攻击区

空空导弹攻击区也称允许发射区、发射包线等, 是指导弹发射后能够以不低于一定概率命中目标的目标初始位置的范围<sup>[6-7]</sup>。

收稿日期: 2018-01-10

修回日期: 2018-07-40

作者简介: 徐 胜(1969—), 男, 湖南沅江人, 硕士, 高工, 研究方向为航空装备系统论证。

当以攻击机为中心描述时,攻击区由远边界、近边界和两侧边界围成,两侧边界由空空导弹最大离轴角确定。对于具有全向攻击能力的导弹,攻击区是一个闭合的圆形连通域,如图 1 所示。

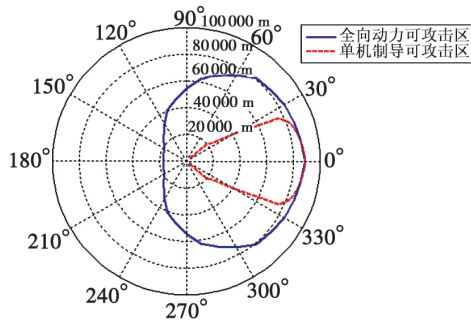


图 1 单机攻击区示意

Fig. 1 Missile attack area of single plane

## 1.2 空空导弹发射条件约束

空空导弹发射的基本条件: 1) 已知目标位置; 2) 导弹有能力攻击到目标位置<sup>[4]</sup>。由此可得出发射导弹的 2 个基本要素: 载机截获并稳定跟踪目标; 目标在导弹攻击区范围内。其中,前者主要受机载火控雷达性能的影响;后者与导弹自身性能及发射环境相关。

传统单机作战方式中,超视距导弹的实际可用攻击区受到以下因素的制约。

- 1) 单平台探测能力: 机载火控雷达性能参数。
- 2) 导弹中制导: 导弹发射后到末制导开始之前,载机仍要对目标进行跟踪并向导弹发送制导指令(发射后不管模式中不需要中制导,但发射距离较短)。
- 3) 多目标攻击限制: 在多目标攻击过程中,对被攻击的目标必须是照射兼容的,飞机将被局限在固定航线上。

在网络信息环境中,编队间能够实现空间态势信息的共享,弥补单平台探测能力的不足,放宽导弹发射条件,充分发挥导弹性能。

## 1.3 协同制导作战方式

协同作战环境下,通过数据链的协作,单机发射/制导模式延伸为载机发射、他机制导模式。他机协助下的导弹发射/制导方式主要有以下几种。

- 1) 他机提供目标信息,本机发射,他机制导。即空空导弹发射前,他机侦测和锁定目标,将数据传送给载机,协助载机完成导弹发射,导弹发射后,他机持续照射目标,并将目标更新信息发送给空空导弹。
- 2) 他机提供目标信息,本机发射,本机制导。即他机侦测和锁定目标,将目标数据传送给载机,协助载机完成导弹发射,导弹发射后,载机继续对导弹制导直至命中目标。
- 3) 他机提供目标信息,本机发射,载机制导,他机

接替制导。如果他机和载机的制导区域不能够完全覆盖空空导弹的整个中制导区域,在中制导开始阶段需要载机借助他机的目标信息对导弹进行中制导,直至导弹进入他机的制导区域,两机实现制导交接,之后由他机继续对导弹进行中制导。

## 1.4 协同攻击区概念

综上所述,协同攻击区是指在友机的协同下,载机发射导弹能以不低于一定的概率命中目标的目标初始位置的范围。通过多机编队的战术协同可以弥补单机的性能不足,减少因单机探测和制导能力不足而导致的损失,充分发挥导弹性能,提高作战效能。

## 2 协同攻击区仿真

### 2.1 协同攻击约束条件

影响协同攻击区的主要因素有 3 个方面: 1) 攻击目标过程中的导弹自身性能的约束; 2) 在导弹发射过程中,机载雷达系统对导弹攻击区的约束; 3) 在导弹协同制导过程中,不同的态势、运动状态对协同攻击区的约束。其中,后两个属于探测和制导约束。

由上文分析可知: 若想攻击目标,编队首先必须能够探测并截获目标,此为探测约束条件;在导弹发射后的飞行过程中,编队必须能够对导弹进行协同制导,此为制导约束条件。

1) 探测约束条件。在导弹发射和中制导过程中,目标必须处在编队中任一平台火控雷达的最大探测距离  $D_{t,max}$  和探测角度之内,否则编队不能为导弹提供目标信息,即

$$\begin{cases} D_{p,t} \leq D_{t,max} \\ |q_{p,t\psi} - \psi_p| \leq \psi_{t,max} \\ |q_{p,t\theta} - \theta_p| \leq \theta_{t,max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $D_{p,t}$  为目标与平台的距离;  $D_{t,max}$  为机载雷达的最大探测距离;  $q_{p,t\psi}$  为目标方位角;  $q_{p,t\theta}$  为目标俯仰角;  $\psi_p$  为平台飞行偏角;  $\theta_p$  为平台飞行倾角;  $\psi_{t,max}$  为平台水平最大探测角度;  $\theta_{t,max}$  为平台俯仰最大探测角度。

2) 制导约束条件。

① 导弹处于编队的协同制导区域内,即编队中必须有平台能够对导弹进行制导,导弹必须处于制导机的制导区域内,受到制导角度和制导距离约束,即

$$\begin{cases} D_{p,m} \leq D_{g,max} \\ |q_{p,m\psi} - \psi_p| \leq \psi_{g,max} \\ |q_{p,m\theta} - \theta_p| \leq \theta_{g,max} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $D_{p,m}$  为导弹与平台的距离;  $D_{g,max}$  为平台最大制导距离;  $q_{p,m\psi}$  为导弹相对于平台的方位角;  $q_{p,m\theta}$  为导弹相对于平台俯仰角;  $\psi_{g,max}$  为平台水平最大制导角度;  $\theta_{g,max}$  为俯仰平台最大制导角度。

② 制导机的位置必须落在导弹指令接收天线的角度范围内,即

$$\begin{cases} |q_{p,m\psi} - \psi_m| \leq \psi_{Mmax} \\ |q_{p,m\theta} - \theta_m| \leq \theta_{Mmax} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\psi_m$  为导弹飞行偏角;  $\theta_m$  为导弹飞行偏角;  $\psi_{Mmax}$  为导弹接收天线的水平最大角度;  $\theta_{Mmax}$  为导弹接收天线的垂直最大角度。

## 2.2 仿真流程与条件

协同攻击区计算流程如图2所示。

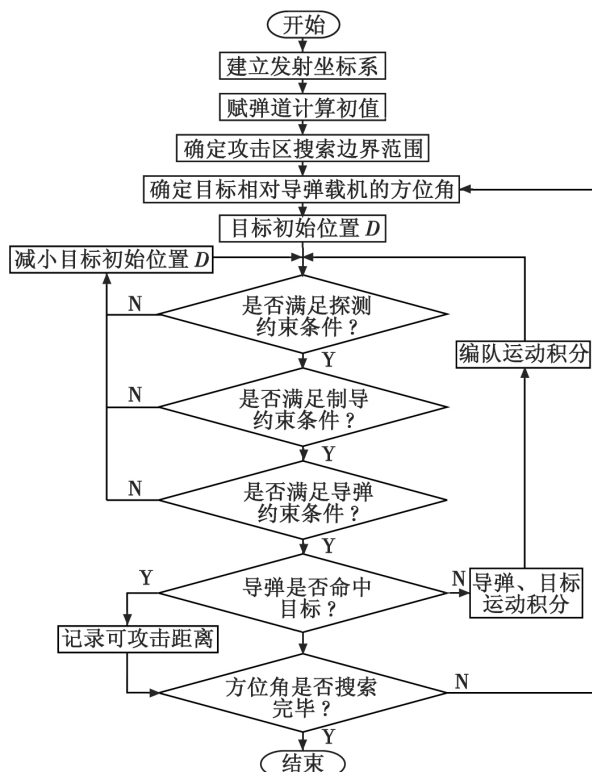


图2 协同攻击区计算流程

Fig. 2 Calculation flow of coordinated attack area

双机协同是多机协同的基本单位,是多机协同发射/制导的基本模式,本文主要对双机协同的情况进行研究。超视距空战双机队形各种各样,为了研究编队队形对协同制导攻击区的影响,本文选取其中常见的两种队形进行仿真分析:长机和僚机横队飞行(编队1),左右间隔20 km,此为典型的接敌队形;双机雷达跟进队形(编队2),长机在前,僚机跟随在长机斜后方20 km,此队形多用于中距空战和侦察。

通过上面分析可知,影响协同攻击区的参数主要有载机雷达最大探测角度  $\delta_l$ 、平台最大制导角度  $\delta_g$  和导弹最大指令接收角度  $\delta_r$ 。载机雷达最大探测角度  $\delta_l$  对空空导弹攻击区的限制如图1所示。下面将仿真分析  $\delta_g$  和  $\delta_r$  对协同攻击区的影响。

条件1 编队1  $\delta_g = \pm 60^\circ$   $\delta_r = \pm 60^\circ$ 。

如图3所示,与单机制导攻击区相比,空空导弹协

同攻击区面积增加,增加的面积位于单机制导攻击区的左侧,这是因为他机位于本机的左侧,增加了目标探测范围。

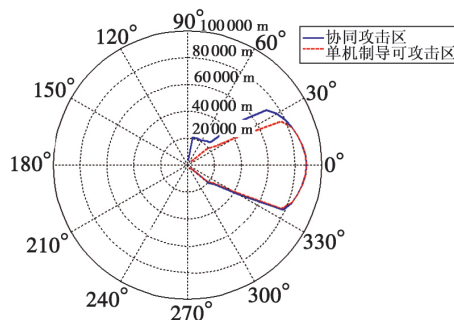


图3 协同攻击区(条件1)

Fig. 3 Coordinated missile attack area (Condition 1)

条件2 编队1  $\delta_g = \pm 60^\circ$   $\delta_r = \pm 180^\circ$ 。

对比图4与图3可以发现,当增大导弹指令接收角度  $\delta_r$  时,空空导弹协同攻击区的左侧略微增大,这说明导弹指令接收角度会限制空空导弹协同攻击区的范围。

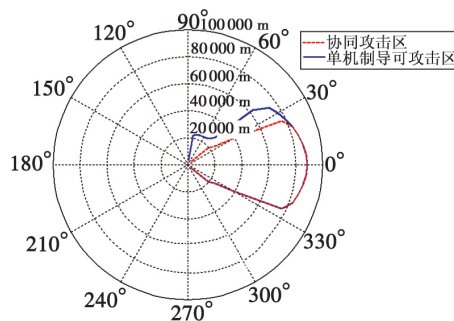


图4 协同攻击区(条件2)

Fig. 4 Coordinated missile attack area (Condition 2)

条件3 编队2  $\delta_g = \pm 60^\circ$   $\delta_r = \pm 60^\circ$ 。

在编队2队形下,双机协同攻击区大小见图5。

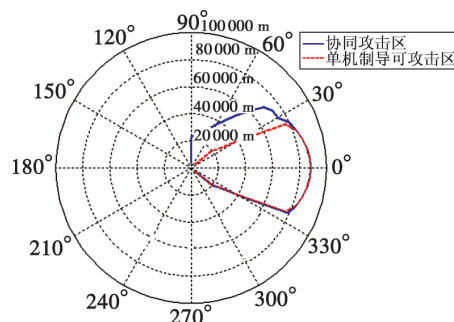


图5 协同攻击区(条件3)

Fig. 5 Coordinated missile attack area (Condition 3)

协同攻击区远大于单机制导攻击区,并且大于条件1和条件2的协同攻击区。经过大量仿真表明,当平台制导角度  $\delta_g$  和导弹指令接收角度  $\delta_r$  不小于载机雷达最大探测角度  $\delta_l$  时,平台制导角度  $\delta_g$  和导弹指令接收角度  $\delta_r$  对空空导弹协同攻击区没有影响,这是因

为双机队形不存在制导盲区。

通过对两种编队队形下的双机协同攻击区仿真结果进行分析,可以得出以下结论:1) 双机协同攻击区大于单机制导攻击区,但不是协同探测区域的并集,而是在此基础上受到的各种限制有所缩小;2) 协同攻击区同样受到平台探测角度、平台制导角度、导弹指令接收角度的限制;3) 协同攻击区的面积与编队形式有关,合适的队形能够放宽平台探测角度、制导角度、导弹指令接收角度的限制,扩大协同攻击区大小。

### 3 结束语

本文首先介绍协同攻击区的概念、发射/制导方式和约束条件,并阐述了协同攻击区计算模型。其次,仿真分析了两种编队队形下的协同攻击区,得到如下结论:双机协同能够充分发挥空空导弹的性能;协同攻击区同样受到平台探测角度、制导角度、导弹指令接收角度的限制;编队形式对协同攻击区的大小也有很大的影响。

(上接第 16 页)

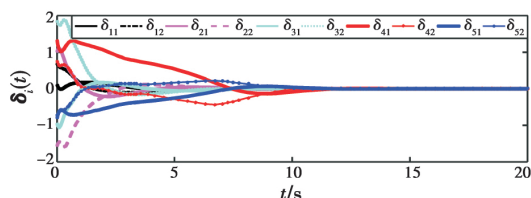


图 6 局部一致性误差

Fig. 6 Evolution of the local consensus error

### 4 结束语

本文针对不确定非线性多智能体系统的最优控制问题,提出了在线自适应协同控制方案。使用两组神经网络:一组用于估计不确定系统;另一组用于近似最优值函数。基于提出的控制方法,两组网络同时在线学习。通过李雅普诺夫稳定性理论,证明了闭环系统的稳定性。本文所提算法的缺点之一是神经元的个数需要多次尝试后才能确定,所以接下来可以尝试设计权值个数自适应寻优的最优协同控制算法。

### 参考文献

- [1] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [2] ZHANG H G, ZHANG J L, YANG G H, et al. Leader-based optimal coordination control for the consensus problem of multiagent differential games via fuzzy adaptive dynamic programming [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,

### 参考文献

- [1] 孙隆和. 网络信息环境中的飞机(飞行作战平台)武器火力指挥控制系统[J]. 电光与控制, 2010, 17(3): 1-8.
- [2] YOUNG B W. Future integrated fire control [C]//The 10th International Command and Control Research and Technology Symposium, 2005: 68-72.
- [3] 高劲松, 丁全, 邹庆元. 网络中心战对空战研究的影响[J]. 电光与控制, 2008, 15(9): 43-47.
- [4] 寇英信, 付昭旺, 冯国强, 等. 网络瞄准下空空导弹允许发射区模拟仿真分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(2): 24-28.
- [5] 刁兴华, 方洋旺, 伍友利, 等. 双机编队空空导弹协同发射区模拟仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(3): 370-376.
- [6] 周志刚. 机载火力控制系统分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [7] 樊会涛. 空空导弹方案设计原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [8] 2015, 23(1): 152-163.
- [3] MOVRIC K H, LEWIS F L. Cooperative optimal control for multi-agent systems on directed graph topologies [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(3): 769-774.
- [4] ZHANG H G, FENG T, YANG G H, et al. Distributed cooperative optimal control for multiagent systems on directed graphs: an inverse optimal approach [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(7): 1315-1326.
- [5] 孙景亮, 刘春生. 基于自适应动态规划的导弹制导律研究综述[J]. 自动化学报, 2017, 43(7): 1101-1113.
- [6] 李健, 沈艳军, 刘允刚. 线性多智能体系统一致性的自适应动态规划求解方法[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(7): 1016-1030.
- [7] YANG X, LIU D R, HUANG Y Z. Neural-network-based on-line optimal control for uncertain non-linear continuous-time systems with control constraints [J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(17): 2037-2047.
- [8] 王庆领. 饱和受限的多智能体系统一致性问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [9] MODARES H, LEWIS F L. Optimal tracking control of non-linear partially-unknown constrained-input systems using integral reinforcement learning [J]. Automatica, 2014, 50(7): 1780-1792.
- [10] SUN J L, LIU C S, YE Q. Robust differential game guidance laws design for uncertain interceptor-target engagement via adaptive dynamic programming [J]. International Journal of Control, 2017, 90(5): 990-1004.