【装备理论与装备技术】　　doi：10.11809/scbgxb2017.06.015

基于博弈论的无人机战场攻防策略求解模型

李迎春，程建博，于　尧

（中国人民解放军装备学院 复杂电子系统仿真重点实验室，北京 101416）

摘要：提出基于博弈论的无人机战场攻防策略求解模型；利用零和博弈求解方法，找出当目标平均定位时间变化时的不同纳什均衡点；案例结果表明：该纳什均衡点即为攻守双方一定条件下的最佳策略集合；该模型可为实际战场决策提供参考。

关键词：无人机；博弈论；最优决策；零和博弈；纳什均衡

本文引用格式：李迎春，程建博，于尧. 基于博弈论的无人机战场攻防策略求解模型[J]. 兵器装备工程学报，2017(6)：70－72.

Citation format：LI Ying-chun，CHEN Jian-bo，YU Yao. Solving Model of Unmanned Aerial Vehicle Battle Strategy Based on Game Theory[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2017(6)：70－72.

中图分类号：TJ741　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096－2304(2017)06－0070－03

Solving Model of Unmanned Aerial Vehicle Battle Strategy Based on Game Theory

LI Ying-chun，CHEN Jian-bo，YU Yao

（Science and Technology on Complex Electronic System Simulation Laboratory，Academy of Equipment of PLA，Beijing 101416，China）

Abstract：A solving model of unmanned aerial vehicle battle strategy based on the game theory is been proposed. Referring to the solving method of zero-sum game，different Nash equilibriums are found out which depends on the average locating time. Results of a case show that these Nash equilibriums are the best strategy profile of offensive and defensive sides under certain conditions. This model can provide a reference for the practical model of battlefield decision.

Key words：unmanned aerial vehicle；game theory；the best strategy；zero-sum game；Nash equilibrium

无人机（Unmanned Aerial Vehicle，UAV）是一种具备自主飞行和独立执行任务能力的新型作战平台，不仅能够执行军事侦察、监视、搜索、目标指向等非攻击性任务，而且还能够执行对地攻击和目标轰炸等作战任务。现代战争中无人机作为战场的“先锋部队”，一旦任务失利，可能对整个战局造成巨大的影响。合理的无人机任务分配是提高作战效率的重要手段。面对复杂的战场环境，无人机的任务分配成为决策方首要考虑的问题[1]。

博弈论主要是研究智能体之间相互依存的理性行为，是研究智能体之间竞争冲突的形式化表示方法，目的是通过理性的决策得到最大化的收益或者最小化的惩罚。这与无人机战场环境十分相似，攻守双方决策者均需使用自己的策略达到利益最大化或惩罚最小化。特别地，在无人机任务规划中，由于路线和程序设定后没有人为干预很难更改，战前策略的制定显得尤为重要[2]。本文将引进博弈论及其相关策略求解方式，建立简单的无人机博弈模型，得出决策者特定条件下最佳的策略集。

收稿日期：2017－02－25；**修回日期**：2017－03－26

作者简介：李迎春（1993—），男，硕士研究生，主要从事指控系统的建模与评估研究。

1 博弈论简介

博弈论是二人在平等的对局中各自利用对方的策略变换自己的对抗策略，达到取胜的目的[3]。1928 年，冯 · 诺依曼证明了博弈论的基本原理，从而宣告了博弈论的正式诞生。1951 年，John Forbes Nash 利用不动点定理证明了均衡点的存在，为博弈论的一般化奠定了坚实的基础[4]。博弈论的本质是局中人必须置身其中，站在其他人的角度考虑问题，从别人的决策中找到自己的最佳决策。所以，局中人必须是理性的。每一个博弈论模型中都有三个要素：局中人、收益和策略空间。一个博弈可用 $G=\{S_1,S_2,\cdots,S_n;\ u_1,u_2,\cdots,u_n\}$ 来表示，其中 S_i 为第 i 个局中人的策略空间，u_i 为第 i 个局中人的收益值。

纳什均衡是博弈论中一种策略组合，它可使得同一时间内每个参与人的策略是对其他参与人策略的最优反应。假设有 n 个局中人参与博弈，如果某情况下无一参与者可以独自行动而增加收益，则此策略组合被称为纳什均衡。纳什均衡达成时，双方均不可能独自改变策略而获得更多收益，所以纳什均衡解可以看成是一个局部最优解。当一个博弈中只有一个纳什均衡点时，局中人在不知道其他人的决策时，理性的决策者会趋向纳什均衡点来制定策略。

2 无人机战场案例

2.1 模型介绍

现有攻守双方模拟战场，攻击方在推进的过程中发现防御方某重要建筑物，拟派遣无人机群对其进行打击。防御方建筑物附近安放有一部隐秘性很好的远程雷达。

现攻击方有 4 架 FY 攻击型无人机，将被派出击毁防御方某目标建筑物与其附近远程雷达。目标建筑物自带近程雷达，位置已知，附近的远程雷达具体坐标未知，需等其开机后才能探测到，防御方可以选择开启远程雷达或者关闭。现以目标坐标为原点建立平面直角坐标系，战场示意图如图 1。

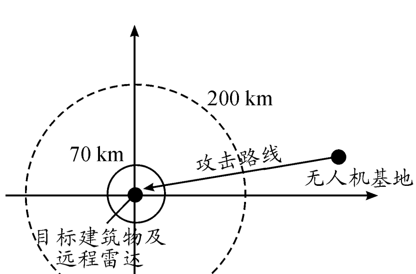

图 1 战场示意图

打击过程中，攻方无人机先飞往目标建筑物或雷达附近，再实施打击，最后飞离，由于打击目标建筑物需要信息的协同，所以至少需要 3 架无人机同时参与，打击远程雷达没有限制[5]。

现已知近程雷达探测半径为 $a=70$ km，远程雷达探测半径为 $s=200$ km，无人机飞行速度近似为 $v=200$ km/h，打击单一目标时间为 $t=0.5$ h，由于同时打击同一目标的无人机相互协同作用，n 架无人机打击单一目标的时间为 $\frac{t}{n}\cdot\frac{n-1}{n}$。攻击方为保证无人机的安全，应尽量使所有无人机暴露在敌方雷达范围内的时间总和 $t_{总}$ 最小，同理防御方应尽量使其最大，便于自身采取行动。

2.2 模型假设

为简化模型，突出博弈论在战场环境的应用性，对模型进行假设：

作战双方都是绝对理性的；由于作战时间很短，双方战术一旦形成并采用，便不能中途更改；若攻击方在未知远程雷达具体坐标的情况下就飞往雷达附近，则定位时间 t_0 不能忽略，并且此时间不是一定的，需根据战场环境估计。

2.3 模型博弈论三要素

1）局中人

$A_i=\{a_1,a_2\}$，其中 a_1 为攻击方；a_2 为防御方。

2）收益

该博弈符合零和博弈范畴，零和博弈是博弈论的一个概念，指参与博弈的各方，在严格竞争下，一方的收益必然意味着另一方的损失，博弈各方的收益和损失相加总和永远为“零”，双方不存在合作的可能。在本例中，所有无人机暴露在敌方雷达范围内的时间总和 $t_{总}$ 为防守方的收益，也为进攻方的惩罚，或将 $-t_{总}$ 看作进攻方的收益[6-7]。

3）策略空间

攻击方已经得知防御方远程雷达大致位置，在远程雷达开机的情况下，先攻击雷达总能带来更高的收益，所以战机的数量安排构成了攻击方的策略空间。

由于打击目标建筑物至少需要 3 架无人机，简化的攻击方策略空间 $S_1=\{s_1^1,\ s_1^2,\ s_1^3\}$：

s_1^1：同时派出 4 架无人机进行攻击（若远程雷达开启则先攻击远程雷达，否则先攻击目标建筑物）；

s_1^2：先派出 1 架无人机攻击远程雷达，待攻击结束后，再派出其余 3 架攻击目标建筑物；

s_1^3：派出 3 架无人机攻击（若远程雷达开启则先攻击远程雷达，否则先攻击目标建筑物）。

作为理性的博弈一方，为使无人机在雷达中的暴露总时间最大，防御方会在发现附近有敌机的情况下开启远程雷达，但若一直开启过早的暴露自己的位置反而会引来敌机轰炸，防御方开启远程雷达的时机构成防御方策略集合 $S_2=\{s_2^1,\ s_2^2\}$。

s_2^1：雷达一直处于开机状态；

s_2^2：待目标建筑物自带近程雷达发现敌机后再开启远程雷达。

本例中，攻击方的决策者也是理性的，应对防御方的策略空间有所推测，并会根据自身的策略空间进行优化。通过分析可知，在收益为无人机暴露总时间的情况下，无论防御方采取何种策略，s_1^3 不会比 s_1^1、s_1^2 更优，所以可以直接排除。

3　博弈论纳什均衡求解

求解博弈论的最佳策略集合，就是求解博弈的纳什均衡点。画出博弈论框图如表 1 所示，由于该博弈是零和博弈，同一策略下，双方收益为相反数，即 $u_1 = -u_2$，该表以防御方收益为正。

表 1　博弈论框图

		a_2	
		s_2^1	s_2^2
a_1	s_1^1	$(u_1(s_1^1,s_2^1))$ $(u_2(s_1^1,s_2^1))$	$(u_1(s_1^1,s_2^2))$ $(u_2(s_1^1,s_2^2))$
	s_1^2	$(u_1(s_1^2,s_2^1))$ $(u_2(s_1^2,s_2^1))$	$(u_1(s_2^1,s_2^2))$ $(u_2(s_2^1,s_2^2))$

计算表中的各收益值，以 $u_2(s_1^1, s_2^1)$ 为例，它表示局中人 a_1 即攻击方选择策略 s_1^1 即同时派出 4 架无人机进行攻击，局中人 a_2 即防御方选择策略 s_2^1 即雷达一直处于开机状态，此时防御方收益，攻击方的收益为其相反数。由上文可知，4 架无人机向目标建筑物航行，首先进入远程雷达探测范围，飞往途中可探知具体坐标，飞到建筑物附近耗时 200/200 = 1 h，打击远程雷达耗时 $\frac{t}{n}\cdot\frac{n-1}{n}=0.094$ h，打击目标建筑物耗时 $\frac{t}{n}\cdot\frac{n-1}{n}=0.094$ h，所有无人机暴露总时间为 $u_2(s_1^1, s_2^1) = 4\times(1+0.094+0.094)=4.75$ h。$u_1(s_1^1, s_2^1) = -4.75$ h。同理，可得出 $u_2(s_1^2, s_2^1) = 3.32$ h，$u_2(s_1^1, s_2^2) = 2.15 + t_0$ h，$u_2(s_2^1, s_2^2) = 2.58 + t_0$ h。其中 t_0 为防御方选择待目标建筑物自带进程雷达发现敌机后再开启远程雷达策略时，攻击方未能及时定位远程雷达具体坐标而产生的额外定位时间。代入数值后的博弈论框图如表 2 所示。

表 2　代入数值的博弈论框图

		a_2	
		s_2^1	s_2^2
a_1	s_1^1	①$(-4.75, 4.75)$	③$(-(2.15+t_0), 2.15+5_0)$
	s_1^2	②$(-3.32, 3.32)$	④$(-(2.58+t_0), (2.58+t_0))$

为方便表示，表 2 中以序号表示收益。由于 t_0 不是固定的，t_0 的变化导致双方策略组合收益排序发生变化。同样以防御方为例，t_0 从小到大变化过程中，出现的收益大小排序：

$0 < t_0 < 0.74$，收益从小到大排序为③④①②；

$0.74 < t_0 < 1.17$，收益从小到大排序为③②④①；

$1.17 < t_0 < 2.17$，收益从小到大排序为②③④①；

$2.17 < t_0 < 2.6$，收益从小到大排序为②③①④；

$2.6 < t_0$，收益从小到大排序为②①③④。

可以看出，情况 1，无论攻击方如何选择，防御方都应选择策略 s_2^1，攻击方是理性的，推知防御方选择 s_2^1 后，攻击方应选择策略 s_1^2，则最佳策略组合为(s_1^2, s_2^1)，即攻击方先派出 1 架无人机攻击远程雷达，待攻击结束后，再派出其余 3 架攻击远程雷达对目标建筑物进行攻击，防御方远程雷达应一直处于开机状态。此点即为该博弈的纳什均衡点。防御方收益为 3.32 h，即所有无人机暴露总和为 3.32 h。

同理，情况 5 时，双方博弈纳什均衡点为(s_1^1, s_2^2)，防御方收益为 $2.15 + t_0$ h，即所有无人机暴露总和为 3.32 h。

情况 2、3、4 时，双方策略都随着对方策略而变化，并形成有闭合回路的动态博弈，此时不存在纳什均衡点，即双方不能找到同一个对自己最优策略组合。此时决策者将采取避免最大损失原则进行决策，尽量避开能使自身承受最大损失的策略。图 2 是情况 2、3、4 的动态博弈图，以情况 2 为例，从总时间的大小排序③②④①上可以看出，攻击方将避免落入策略组合①中，防守方将避免落入策略组合③中，则攻击方将采取 s_1^2 策略，防守方将采取 s_2^2 策略，即最终的策略集合为④(s_2^1, s_2^2)，无人机暴露总和为 2.58 h。同理，情况 3 最终的策略集合为③，无人机暴露总和为 3.32 h。情况 4 最终的策略集合为 1，无人机暴露总和为 4.75 h。

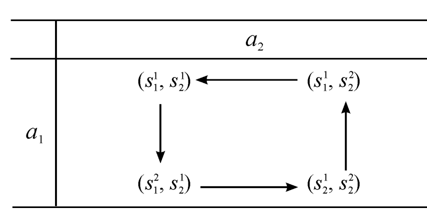

图 2　动态博弈图

4　总结

在无人机战场中，双方决策者应该是绝对理性的，所做出的决策应该趋向收益的最大化，这也正是博弈论的前提，并且无人机实施攻击任务过程中，往往很难再做出人为干预，在博弈论中，最优策略组合一旦找到，也不应中途做出改变。本文通过一个简单的案例，证明了博弈论在无人机任务规划中的适用性。现实的无人机有更加复杂的策略集合和收益形式，在特定的场合和任务下，应建立不同的模型，但博弈方式和建模思路大同小异，本文的模型可为现实无人机战场的博弈论建模提供参考。

（下转第 103 页）

on. IEEE,2008:1635-1639.

[24] WANG R,SONG J,ZHANG X. Multiclass segmentation of SAR image using modified unit-linking pulse coupled neural network[C]//2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE,2009:3775-3778.

[25] 汪华章,宰文姣.改进型脉冲耦合神经网络高分辨率SAR图像分割[J].北京大学学报:自然科学版,2013,49(2):176-182.

[26] LONG J,SHELHAMER E,DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015:3431-3440.

[27] CHEN L C,PAPANDREOU G,KOKKINOS I,et al. Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs[J]. Computer Science,2016(4):357-361.

[28] NOH H,HONG S,HAN B. Learning deconvolution network for semantic segmentation[C]//Proceed-ings of the IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]:[s. n.],2015:1520-1528.

[29] MALMGREN-HANSEN D,NOBEL J M. Convolutional neural networks for SAR image segmenta-tion[C]//2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT). IEEE,2015:231-236.

[30] 于文倩.基于自适应频域信息和深度学习的SAR图像分割[D].西安:西安电子科技大学,2014.

[31] 石西建.基于深度学习和区域图的SAR图像分割[D].西安:西安电子科技大学,2014.

[32] 田微晴,程慧华,刘琼俐,等.基于多重分形的遥感图像融合检测方法[J].四川兵工学报,2015(3):135-137.

(责任编辑 杨继森)

(上接第72页)

参考文献:

[1] 詹明明.多无人机任务规划研究[D].合肥:合肥工业大学,2012.

[2] 付超,杨善林.基于博弈论的多无人机协同作战仿真系统[J].系统仿真学报,2009,21(9):2591-2594.

[3] 齐格弗里德.纳什均衡与博弈论[M].北京:化学工业出版社,2011.

[4] 谢识予.经济博弈论[M].上海:复旦大学出版社,2002.

[5] 陈小林.博弈论在鉴定雷达抗干扰特性中的应用[J].航天电子对抗,1986(s1):115-123.

[6] 周代平,李康奇,贺琳.诱导信息条件下车辆路径选择:基于有限理性模糊博弈[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2015,32(12):31-35.

[7] 艾瑞卡·S.奥尔森.零和博弈[M].北京:中国财政经济出版社,2014.

[8] 韩玉龙,严建钢,陈榕,等.改进博弈论的舰载无人机编队协同对海突击目标分配[J].火力与指挥控制,2016(7):65-70.

(责任编辑 周江川)