

考虑数据链性能的实时任务分配算法研究

石 帅, 秦文龙, 韩金凯
(北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘 要: 导弹在战前一般已被分配了任务, 包括攻击目标及攻击顺序, 但在执行任务的过程中, 往往会出现突发威胁, 此时导弹可以对突发威胁采用电子对抗措施从而消除突发威胁的影响, 无须调整攻击顺序, 但电子对抗的效果要受到数据链性能的影响。为了分析数据链性能对实时任务分配结果的影响, 首先提出了基于“接受度-拒绝度”的实时任务分配算法, 然后建立了包含多种威胁的栅格类战场模型以及考虑数据链的电子对抗模型, 最后的仿真结果表明, 数据链性能越好, 对突发威胁的电子对抗效果越好, 越能消除突发威胁的影响, 从而保障任务的顺利执行。

关键词: 航路规划; 数据链; 电子对抗; 实时任务分配; 有源欺骗

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-1300(2021)03-0083-07

DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.184

Research on the Algorithm of Realtime Task Allocation Considered the Performance of Datalink

Shi Shuai, Qin Wenlong, Han Jinkai
(Beijing Electro-mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Missiles have generally been assigned tasks before the war, including targets and sequence of attacks, however, during the process of operation, sudden threats always appear. The electronic counter measures which are affected by the performance of datalink can be used to eliminate the passive effect by the sudden threats and there is no need to re-allocate the task. To analyze the influence brought by the performance of datalink, firstly, a realtime task allocation algorithm based on the "accept-reject" conception is proposed; secondly, a grid battle model with different types of threats and an electronic counter measures model which is considered the performance of datalink are built. The simulation results show that when the performance of datalink is better, the effect of electronic counter measures will be better and the passive effect by the sudden threats will be eliminated which ensures the mission will be executed successfully.

Key words: task allocation; datalink; electronic counter measure; realtime task allocation; active deception

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-10-15

通讯作者: 石帅, 博士, 工程师, 主要研究方向为导弹作战任务规划。

引用格式: 石帅, 秦文龙, 韩金凯. 考虑数据链性能的实时任务分配算法研究[J]. 战术导弹技术, 2021, (3): 83-89. (Shi Shuai, Qin Wenlong, Han Jinkai. Research on the Algorithm of Realtime Task Allocation Considered the Performance of Datalink [J]. Tactical Missile Technology, 2021, (3): 83-89.)

1 引言

在现代作战条件下,导弹在执行任务前一般都依据作战使用约束以及导弹性能约束提前做出任务分配及攻击顺序规划,以最大限度规避威胁区域提高突防效率。但在实际作战场景中,往往会出现突发威胁(雷达站,防空阵地等)阻碍任务的顺利执行,此时导弹可开启弹载电子对抗设备对突发威胁实施干扰,以期消除突发威胁的影响,从而无需重新进行任务分配。但弹载电子对抗的干扰效果受到通信数据链性能的影响,数据链性能较差,对威胁的干扰不充分,仍需进行实时任务分配以应对突发威胁。因此,本文将建立模型分析数据链性能对实时任务分配的影响。

任务分配主要指基于目标、地形、气象等环境信息,为飞行器制定出满足飞行性能等约束条件并使任务效能最优的任务实施计划^[1],既包括射前的任务预分配,也包括射后在不确定环境中进行的实时任务分配。目前进行实时任务分配时,有学者利用神经网络算法来对动态环境中的坦克实现自主机动及任务规划^[2];而合同网及其扩展算法通过模拟市场的“招标-投标-中标”的模式来对任务进行实时在线分配^[3-5];蚁群算法源自经典的旅行商问题,蚁群中的蚂蚁通过信息素这种通信方式来确立协同机制进而确定下一步方案,目前蚁群算法也得到了广泛的应用^[6-7]。

虽然目前能够实现实时任务分配的算法很多,但算法需要结合特定的作战使用场景进行选择与调整。本文主要研究电子对抗措施对实时任务分配的影响,因此需要将电子对抗模型融入到实时任务分配算法中来。有源欺骗式干扰是广泛采用的电子对抗措施之一,并且目前从欺骗信号生成方面以及欺骗信号识别方面都有较多的研究。例如,对SAR雷达实施有源欺骗干扰可显著降低雷达的探测范围^[8-9];对预警机的PD雷达实施有源欺骗干扰可以生成假航迹可严重影响其预警能力^[10];对防空导弹的制导雷达实施有源欺骗干扰可以降低其防空能力^[11]。

从电子对抗的研究中可以看出,采用有源欺骗式干扰可以降低多种威胁的作战效能,但在通过数据链实现互联互通的现代战场中,电子对抗的干扰效果是受到数据链性能影响的。目前在数据链性能对作战结果的影响研究方面,Jason W Mitchell建立了数据链时延模型,评估了时延对成功完成任务的影响^[12];Mostafa Mirzaei提出了一种时延模型可以降低时延对无人机进行战场整体评估时的负面影响^[13]。从上述研究中可以看出,在现代战场中建立任务分配模型以及电子对抗模型,必须考虑数据链性能的影响。

因此,本文的研究重点是分析数据链性能对实时任务分配结果的影响,首先提出了基于“接受度-拒绝度”的实时任务分配算法,然后基于导弹制导模型建立了有源欺骗式干扰模型,实现对防空导弹雷达导引头的干扰,最后分析数据链时延对有源欺骗式干扰的影响。本文依据“数据链性能影响电子对抗结果,电子对抗结果影响实时任务分配结果”的逻辑,最终实现数据链性能对实时任务分配的影响分析。本文研究流程如图1所示。

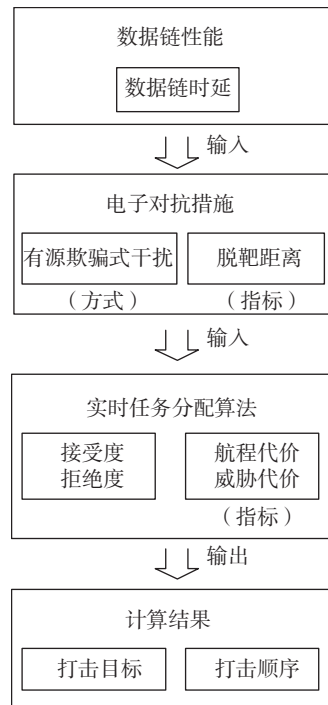


图1 本文研究流程图

2 基于“接受度-拒绝度”的实时任务分配算法

考虑导弹的具体性能,将战场上的打击任务分配给各个导弹执行,使得整体的作战效能最高,这就是本文实时任务分配算法的核心。本文采用“接受度-拒绝度”的概念来描述导弹对待分配任务的取舍原则。接受度越高,拒绝度越低,则导弹越倾向于接收待分配任务。

假设导弹 M_i 执行任务 T_j , 则其执行任务需要付出的代价主要有两部分:一为燃油代价或称为航路代价,与航路的长短相关;二为航路上的危险程度,与各种战场威胁有关^[14]。

航路代价 $RoadCost$ 定义为导弹与任务之间的直线距离,即:

$$RoadCost = \sqrt{(m_x - t_x)^2 + (m_y - t_y)^2 + (m_z - t_z)^2} \quad (1)$$

其中, (m_x, m_y, m_z) 为导弹 M_i 的战场坐标, (t_x, t_y, t_z) 为任务 T_j 的战场坐标。

威胁代价 $RiskCost$ 定义为依据战场中威胁的部署位置及性能参数,计算导弹被威胁杀伤的概率,即:

$$RiskCost = P_{DIT} \cdot P_{KH} \quad (2)$$

其中, P_{DIT} 表示导弹被探测到的概率, P_{KH} 表示导弹被威胁击中毁伤的概率。探测概率 P_{DIT} 的表达式为^[15]:

$$P_{DIT} = [1 + t/(1 + S/N)]^{-N} \quad (3)$$

其中, t 为恒虚警处理器的门限因子, N 为恒虚警处理器数目, S/N 为目标信噪比。

毁伤概率 P_{KH} 的表达式为^[15]:

$$P_{KH} = \frac{A_p}{2\pi\sigma^2 + A_p} \quad (4)$$

其中, A_p 为导弹的易损面积, σ 为导弹的 RCS。关于探测概率和杀伤概率的具体解算过程本文不再赘述,可参考引用文献。

当 $RoadCost$ 和 $RiskCost$ 计算完成后,由于 $RoadCost$ 与 $RiskCost$ 具有不同的量纲,不能直接进行加减运算,所以需要先分别对其进行归一化处理,统一到相同的量纲后再进行运算,以导弹 M_i 执行任务 T_j 为例来说明归一化的过程。

假设导弹 M_i 执行任务 T_j 的航路代价为

$RoadCost(M_i, T_j)$, 威胁代价为 $RiskCost(M_i, T_j)$ 。另外,设导弹 M_i 的任务集为 S_i , 任务 T_k 为任务集 S_i 中的一个任务,即 $T_k \in S_i$, 则航路代价 $RoadCost$ 与威胁代价 $RiskCost$ 的归一化公式为:

$$Acce_{M_i}(T_j) = \frac{\max_{S_i}(RoadCost(M_i, T_k)) - RoadCost(M_i, T_j)}{\max_{S_i}(RoadCost(M_i, T_k)) - \min_{S_i}(RoadCost(M_i, T_k))} \quad (5)$$

$$Rjec_{M_i}(T_j) = \frac{RiskCost(M_i, T_j) - \min_{S_i}(RiskCost(M_i, T_k))}{\max_{S_i}(RiskCost(M_i, T_k)) - \min_{S_i}(RiskCost(M_i, T_k))} \quad (6)$$

其中, $Acce_{M_i}(T_j)$ 表示导弹 M_i 对任务 T_j 的接受度, $Rjec_{M_i}(T_j)$ 表示导弹 M_i 对任务 T_j 的拒绝度。 $\max_{S_i}()$ 函数表示取任务集中的最大 $RoadCost$ 值与最大 $RiskCost$ 值,而 $\min_{S_i}()$ 函数表示取任务集中的最小 $RoadCost$ 值与最小 $RiskCost$ 值。因此从式(5)中可以看出,在导弹对任务进行评估时,航路越短越好。这是因为,当任务的 $RoadCost$ 值越小,式(5)的分子值越大,从而 $Acce_{M_i}(T_j)$ 越大,即对任务的接受度越高;而对式(6)进行分析可以得知,导弹希望任务的 $RiskCost$ 值越小越好,因为当 $RiskCost$ 值越小, $Rjec_{M_i}(T_j)$ 的值越小,说明导弹对任务的拒绝度越低,反之,若 $RiskCost$ 值越大,则表明导弹完成任务的危险性越高,从而 $Rjec_{M_i}(T_j)$ 的值越大,导致导弹越倾向于拒绝这个任务。

利用基于“接受度-拒绝度”的实时任务分配算法,既可以在射前对所有任务进行分配,又可以在射后对受到突发威胁影响的任务进行实时分配。分配结果综合考虑了航程和威胁的影响,最终形成作战效能最高的分配方案。

3 有源欺骗式电子对抗模型

假设战场中敌方的防空威胁为雷达制导的防空导弹。则导弹在面对此威胁时,会实施有源欺骗式干扰进行电子对抗。

有源欺骗式干扰的过程是:当弹载干扰机收

到敌方导弹发射的脉冲后，干扰机立即发回一个与敌方脉冲在载频、宽度和重复频率上均相似的，但在时间上稍有延迟，且功率更强的脉冲。随后，延迟逐渐增加，使得敌方导弹的跟踪波门不断后移，从而干扰了敌方导弹对目标的正确跟踪，进而实现了对敌方导弹的成功对抗。

建立有源欺骗式电子对抗模型首先需要建立敌方导弹的制导模型，本文不对制导模型进行详细介绍，具体制导模型可参考文献 [16]。假设敌方导弹采用比例制导，则整个制导模型包括导引头寻的模型、导引系统模型、自动控制环节模型、弹体机动模型以及运动学环节模型。而有源欺骗式电子对抗通过干扰敌方导弹导引系统的弹目角度解算来达到干扰目的。也就是在正确弹目角度的基础上，增加干扰角度，使敌方导弹按照错误角度进行制导飞行，如式 (7) 所示。

$$\theta_i = \theta_0 + \theta_e t + 0.5\theta_a t^2 \quad (7)$$

其中， θ_0 是为真实弹目角度， θ_e 、 θ_a 是线性状态下的电子对抗角度拖引速度及二阶状态下的角度拖

引加速度。

包含有源欺骗式电子对抗的具体制导过程计算流程如图2所示。初始阶段我方导弹与敌方防空导弹均按照既定航线飞行，敌方防空导弹首先判断是否发现了我方导弹，若未发现则继续飞行，直至超过最大搜索时间从而结束制导，若发现了我方导弹，则判断是否处于被拖引阶段，若处于被拖引阶段，则判断视线角是否超限或者视线角速度是否超限，若超限则制导结束，若均未超限则计算被拖引后的指令加速度以及导弹实际加速度进而进入下一仿真步长的计算，直至最终仿真结束。

4 数据链时延对电子对抗及任务分配的影响

现代战争是互联互通的体系化战争，数据链承担着信息传输及分享的任务。我方导弹在作战过程中，受限于自身的探测能力，主动发现敌方来袭导弹较为困难。因此，需要整个作战体系中的其他作战单元实现对敌方来袭导弹的预警，通

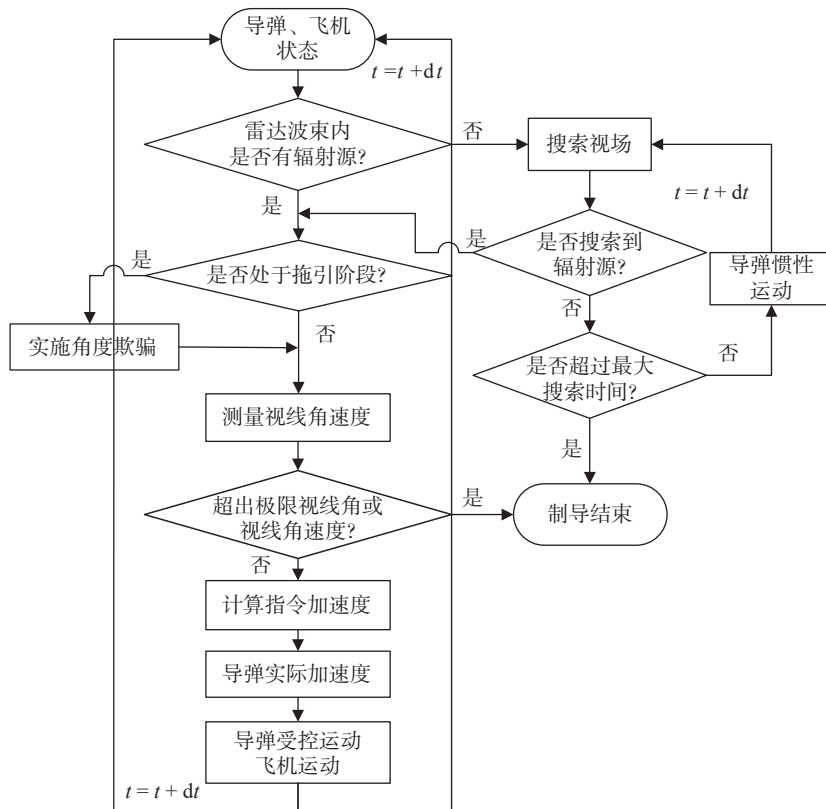


图2 有源欺骗式电子干扰仿真流程

过数据链将敌方来袭导弹的相关信息上传至我方导弹,由我方导弹实施电子对抗。

本文中假设我方导弹使用有源欺骗式电子对抗,而从后文的仿真算例中可以得出,有源欺骗式电子对抗实施的距离越远,实施的时间越长,干扰效果越好。因此,数据链时延越短,越能把敌方来袭导弹更早地告知我方导弹,进而实施电子对抗,从而获得最优的对抗结果。

从上文分析可知,电子对抗结果直接决定某一任务的拒绝度,进而影响任务分配的结果。因而,数据链时延通过影响电子对抗的结果来进一步影响任务分配的结果。

5 仿真算例

5.1 有源欺骗式电子对抗仿真算例

假设由我方作战体系内的预警机通过机载雷达对敌方防空导弹进行预警,且我方预警机的雷达探测装置参数如表1所示。

表1 我方预警机机载雷达探测装置参数

雷达特征参数	设定值
特征虚警概率	10^{-6}
特征探测概率	0.8
特征探测距离/km	150
特征RCS/m ²	10
参考单元个数	24

假设敌方防空导弹的RCS为0.02 m²,那么根据第2节式(4)可以计算出我方预警机对敌方防空导弹的预警距离为15 km。也就是说,假设没有数据链时延的情况下,我方导弹可在距离敌方导弹15 km处开始实施电子对抗,但实际上由于数据链时延的存在,实际电子对抗开始时的距离小于15 km。假设敌我导弹之间的相对速度为马赫数3,那么当数据链时延分别为0 s, 0.5 s, 1 s, 2 s时,我方导弹开始实施电子对抗时的实际相隔距离,如图3所示。

从图3中可以看出,数据链时延越大,可供电子对抗持续干扰的距离越短,其对抗效果越差。下面分析电子对抗开始时的距离对最终电子对抗结果的影响。

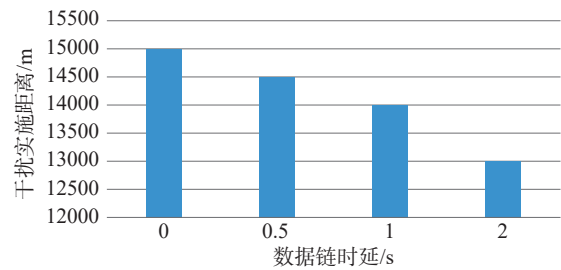


图3 数据链时延与干扰实施距离关系

首先给出敌方防空导弹的制导参数和我方导弹载电子对抗装置的参数,如表2和表3所示。

表2 敌方防空导弹的参数

寻的系统	雷达功率/W	500
	雷达天线增益/dB	100
	雷达带宽/MHz	1.5
导引系统	导引头固有频率/Hz	11
	阻尼系数	1.1
	扫描视场角/rad	$\pi/4$
	视线角速度/rad·s ⁻¹	$\pi/9$
	最大搜索时间/s	3
指令环节	导航比	4
	时间常数	0.15
自动控制系统	固有频率/Hz	12
	阻尼系数	0.6
	最大加速度/g	15

表3 我方导弹电子对抗装置参数

电子对抗装置参数	拖引速度/rad·s ⁻¹	0.01
	拖引加速度/rad·s ⁻²	0.01
	拖引持续时间/s	1

依据第3节阐述的有源欺骗式干扰算法,并结合数据链时延所确定的实际干扰距离,可以得出有源欺骗式电子对抗条件下干扰距离与最终敌方防空导弹脱靶量之间的关系,如图4所示。

从图4中可以看出,当数据链时延为0 s时,干扰距离可以达到最大值15 km,当数据链时延为2 s时,干扰距离缩减到13 km。此时导弹的最小脱靶距离从320 m降低到70 m。因此,有源欺骗式干扰应尽量早开始实施干扰,这是由其干扰机理所决定的:有源欺骗式干扰是通过不断拖动雷达角度跟踪波门,最终使雷达跟丢目标,达到大的脱靶距离,因此当实施有源欺骗式干扰时,就

应预留足够的拖引时间来干扰导弹，从而达到增大脱靶距离、提高导弹突防概率的目的。因而，数据链性能影响了干扰距离，而干扰距离最终影响了干扰结果。

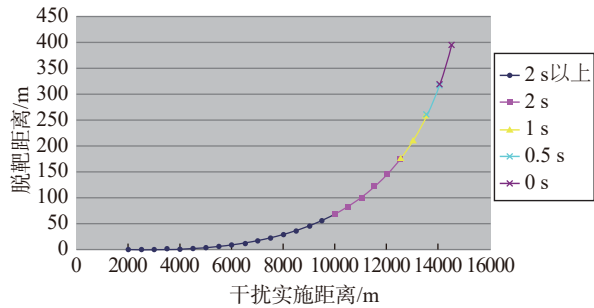


图4 有源欺骗式电子干扰结果

5.2 考虑数据链时延的任务分配算例

假设战场大小为 1000 km×1000 km，每个网格大小为 10 km×10 km。初始战场部署有 5 部雷达及防空系统（部署在同一网格），共有 8 个任务需要分配给我方 2 枚导弹，且我方导弹的 RCS 数值在各方向均不同。首先按照公式（2）给出初始战场杀伤概率图谱来直观呈现战场的危险区域，如图 5 所示。图中网格颜色越深表示我方导弹在此网格被杀伤的概率越高，颜色越浅，表示我方导弹在此网格被杀伤的概率越低。杀伤区域未呈现出圆形是因为我方导弹的 RCS 数值在各角度不相同。而最终根据第二节所示的任务分配算法，最终将 8 个任务分配给我方 2 枚导弹，分配结果如图 6 所示。

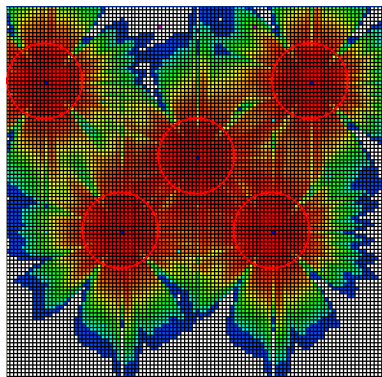


图5 初始战场杀伤概率图谱

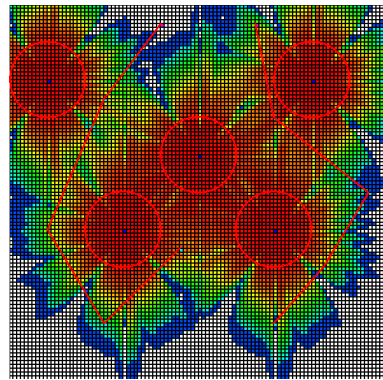


图6 任务分配结果

从分配结果图中可以看出，最终我方导弹的飞行航迹尽量避开了危险区域，得到了一个较为安全的任务分配方案。

假设此时在战场下部出现了一个突发威胁，我方导弹通过数据链实时获取了威胁信息，并对突发威胁实施了有源欺骗式电子对抗，试图消除突发威胁对执行任务带来的影响。但在某些情况下由于数据链时延的存在，电子对抗不能对突发威胁产生足够的干扰效果，还需对受影响的任务进行实时分配。几种情形的算例结果如图 7~图 9 所示。

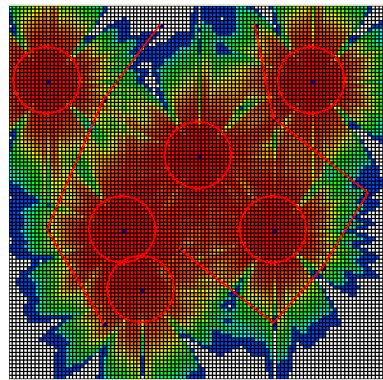


图7 数据链时延 2 s 以上时任务分配结果

从图 7 可以看出，当我方导弹的数据链时延较高时，由于与敌方导弹距离过近，电子对抗不够充分，突发威胁对自身的杀伤概率仍然较大，故将原本应由自身执行、却受到了突发威胁影响的任务实施分配给了我方另一枚导弹；从图 8 及图 9 可以看出，由于数据链时延较低，我方导弹对突发威胁实施了较为充分的电子对抗，可以完全抵消突发威胁

的影响,因而无需对任务进行重新分配。

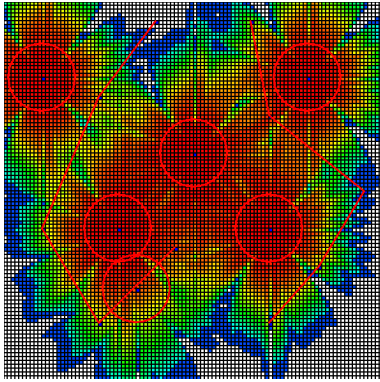


图8 数据链时延2 s时任务分配结果

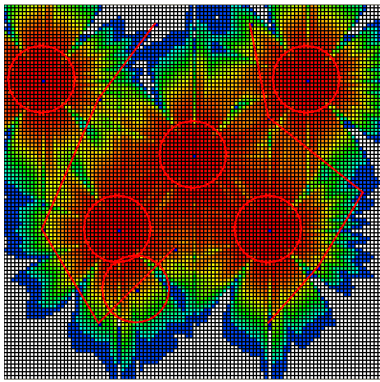


图9 数据链时延1 s时任务分配结果

6 结 论

本文提出了基于“接受度-拒绝度”的实时任务分配算法,同时分析了数据链时延以及电子对抗措施对任务分配的影响。通过仿真算例,得到了以下结论:

(1) 有源欺骗式电子对抗措施的干扰效果由干扰持续时间或干扰可实施距离决定,干扰持续时间越长或干扰可实施距离越远,有源欺骗式电子对抗越能增大敌方防空导弹的脱靶距离,从而提高我方导弹的突防概率;

(2) 敌方防空导弹的信息需要通过数据链传递给我方导弹,因而数据链时延决定了我方导弹对敌方防空导弹实施电子对抗的时刻,数据链时延越长,我方导弹实施电子对抗的持续时间越短,干扰效果越差;

(3) 我方导弹在执行任务期间,遇到突发威胁时可通过实施电子对抗以消除突发威胁影响,从而保持任务执行顺序不变,但如果数据链性能较差,则电子对抗效果不足以消除突发威胁的影响,需要进行实时任务分配,若数据链性能较好,则会消除突发威胁的影响,无须进行实时任务分配。

[参 考 文 献]

- [1] 沈林成,陈璟,王楠.飞行器任务规划技术综述[J].航空学报,2014,35(3):593-606.
- [2] 邢立宁,陈英武.基于神经网络的坦克机动任务规划[J].计算机工程与设计,2005,26(1):144-148.
- [3] Atkinson M L. Contract nets for control of distributed agents in unmanned air vehicles[C]. AIAA "Unmanned Unlimited" Systems, Technologies, and Operations, San Diego, California, 2003.
- [4] Pongpunwattana A, Rysdyk R, Vagne J. Marker-based co-evolution planning for multiple autonomous vehicles[C]. AIAA "Unmanned Unlimited" Systems, Technologies, and Operations, San Diego, California, 2003.
- [5] Zlot R, Stentz A. Market-based multirobot coordination for complex tasks [J]. International Journal of Robotics Research, 2006, 25 (1): 73-101.
- [6] 刘晓莹.混沌蚁群算法在多机器人任务规划中的应用研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [7] 苏菲.动态环境下多UCAV分布式在线协同任务规划技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2013.
- [8] 黄勇,段锐,张海,等.空间微动目标极化欺骗式干扰信号合成方法[J].系统工程与电子技术,2017,39(8):1738-1743.
- [9] 刘永才,王伟,潘小义,等.基于延迟-移频的SAR有源欺骗干扰有效区域研究[J].雷达学报,2013,2(2):46-53.
- [10] 原伟,束坤,高晨.对机载预警PD雷达的航迹欺骗干扰技术研究[J].舰船电子对抗,2018,41(4):6-14.
- [11] 斗计华,孙卫国,吴硕.欺骗干扰对防空导弹制导雷达影响分析[J].兵器装备工程学报,2018,39(7):30-32.

(下转第132页)