

多阶段传感器-武器联合任务管理方法*

陈晨^{1,2}, 胥文钦^{1,2}, 张明阳^{1,2}

(1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081; 2. 复杂系统智能控制与决策国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:针对动态环境下的传感器-武器联合任务管理问题展开研究。根据在动态作战过程中出现的有效新目标、有效空闲传感器和武器数量设定阶段门限,以决定进入下一阶段的时机,从而构建多阶段的作战过程。从打击方案质量及系统响应时间的角度出发,分析构建分布式作战体系对系统作战效能的影响,使系统在每个任务管理阶段可以决定响应流程。通过仿真实验验证了所构建的分布式作战体系与设定的阶段门限可以明显提升系统的作战效能。

关键词:动态任务管理;多阶段;分布式作战体系;传感器武器联合管理

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)04-098-09

Multi-stage sensor-weapon joint task management method

CHEN Chen^{1,2}, XU Wenqin^{1,2}, ZHANG Mingyang^{1,2}

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, Beijing 100081, China)

Abstract: The sensor-weapon joint task management under dynamic environment was studied. The stage threshold, which determines the beginning of next stage, was set according to the number of valid newly appearing targets, idle sensors and weapons during the dynamic combat process. The multi-stage combat process was constructed. The effect of distributed combat system to the quality of attack scheme and the response time of system was analyzed. As a result the system could decide the response flow of each task management stage independently. The superiority of constructing distributed combat system and setting the stage threshold was verified by simulations.

Keywords: dynamic task management; multi-stage; distributed combat system; sensor-weapon joint management

战场环境的动态特性为防空作战任务方案制定带来了极大的挑战。由于目标轨迹改变、新目标出现以及装备故障等因素影响,战场态势处于时刻动态变化中,这要求对既定的传感器和武器作战任务进行及时有效的调整,以使其适应新的态势环境,充分发挥防空系统的作战效能。

目前,对动态任务管理问题的研究集中在求解方法上,主要包括以下三个方面:第一,多阶段匹配优化算法,主要包括整数规划法、动态规划法等;第二,分配策略优化算法,主要包括基于马尔可夫决策过程的策略迭代算法、值迭代算法以及二者的混合算法等;第三,anytime 算法^[1]。Zhang 等^[2]在研究单阶段任务管理模型的基础上,考虑时间等因素,以作战效能最大、消耗最小为原则建立动态多阶段任务管理模型,并采用启发式算法对每个阶段任务管理问题求解。杨奇松等^[3]以对地攻击作战为背景,考虑武器数量、毁伤概率及

目标动态变化情况,进行合理假设,建立分阶段对地打击任务管理问题的局部模型与全局模型。郭继周等^[4]在研究单阶段任务模型后,给出动态变化的多阶段任务系统的任务成功概率模型,在满足系统任务成功概率约束条件下,给出了防空作战单元备件携行量优化模型,并运用边际分析进行求解。陈英武等^[5-6]在已有的动态任务管理马尔可夫决策模型基础上,针对大规模任务管理问题中的策略优化,提出一种混合的最优策略改进算法,对初始最优策略的选取,最优策略的改进、判断准则做出调整。Bess 等^[7]为解决舰艇的多武器目标分配问题,提出基于马尔可夫决策过程的动态资源约束算法。anytime 算法根据目标当前位置、轨迹及武器分布情况等信息,确定每个目标的截止期,系统根据目标截止期的先后,依次为每个目标分配武器。anytime 算法快速产生一个初始解,随着算法计算时间的增大,解的质量也

* 收稿日期:2019-01-24

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(61773066)

作者简介:陈晨(1982—),女,北京人,副教授,博士,E-mail:xiaofan@bit.edu.cn

随之增大,算法可以在任意时刻终止输出当前最优解,但付出更多时间的代价来解的质量稍有增大是否有意义。因此, Li 等^[8]引入解的效用概念,根据解的质量增长前景,新目标的到来情况和当前时间相对于截止期的大小来计算算法的停止时间。徐克虎等^[9]结合分队地面作战特点,采用随局势动态变化的 anytime 算法应对战场上的紧急情况从而提升系统的整体作战效能。

除此之外,一些学者还提出其他优化算法解决动态任务管理。王邑等^[10]将机器学习应用到动态任务管理问题中,进行辅助战场决策,通过已知的一些决策推理出战场局势发生变化时的新决策,从而缩短系统响应时间,但此种方法仅适用于战场局势没有剧烈变化的情形中。Khosla^[11]提出时间窗的概念,在进行武器任务管理的同时为其确定发射时机,考虑时间约束与资源约束,并采用混合遗传算法对其求解。何富贵等^[12]提出了在优先级数量有限的条件下的动态调度算法,给出一个任务系统动态调度所需的最小优先级数量的算法,并对算法的复杂性进行了分析。梁少帅等^[13]以事件驱动方式解决动态任务管理问题,当有突发事件产生时,动态调整算法的参数,从而达到动态更改打击方案的目的。

动态任务管理主要解决连续交战过程中作战节点与来袭目标之间的组合匹配问题,要求算法具有实时性和灵活性。多阶段匹配优化算法将动态交战过程看成若干个阶段,其模型简洁,实时性较优,能较灵活地调整打击方案。因此本文采用多阶段匹配算法进行动态联合任务管理,并从何时进入新阶段以及新阶段中如何调整两个方面对多阶段任务管理展开研究。

1 多阶段联合任务管理流程

传统任务管理方法必须等待当前所有节点完成任务后才可进行下一轮分配。这类方法在节点完成任务时间相近或战场范围不大的情形下可行。而随着战场区域的扩大,作战节点位置分布差异较大,导致不同节点完成任务的时间相差很大。因此传统任务管理方法会使优先完成任务的节点持续处于等待状态,因而降低了资源利用率,整体防御效果无法达到较优。

在多阶段任务管理中,进行火力打击和评估的同时不断更新目标、武器和传感器的状态信息,并根据它们的状态信息决定是否进入新的作战阶段,在进入新阶段后对任务进行快速调整,这一过程重复直至所有目标飞离战场区域或被击毁。相

比传统任务管理方法,多阶段任务管理的优势在于更好地利用了空闲作战资源,对动态环境更具灵活性。

另外,为了保证阶段内任务调整的时效性,可选择性地构建分布式作战体系实现作战效能的提升。

分布式作战体系通过在作战节点的实际物理拓扑上构建如图 1 所示的虚拟拓扑结构,实现对作战节点的分层分级管理,不同次级组合之间相互独立,以期减小指挥控制中心的任务管理量,缩短任务调整的反应时间以及提高作战效能。在实际战场中,目标通常具有典型的集群特点,它们具有相似的位置、轨迹及进攻目标,利用态势信息可对这些目标进行集群划分,得到若干目标组合。指挥控制中心基于此划分构建分布式作战体系,将若干作战单元联合为一个次级作战组合,并为每个目标组合指派一个次级作战组合。次级作战组合中选择一个有能力的节点作为信息融合及管理中心,即次级指挥中心。组合内的传感节点将目标探测信息传至次级指挥中心融合后提供给需要目标指引的武器节点。因此后序作战可直接在次级作战组合内进行。合理的划分能够减小指挥控制中心的信息处理负担,可以避免任务管理问题的维度爆炸,提高任务管理的时效性。但是构建分布式作战体系有时耗,而且组合间独立任务管理意味放弃了任务管理问题的全局最优解,因此在任务管理问题规模较小时构建分布式作战体系的时间代价可能不能弥补防御效果的提升,需根据实际情况抉择是否选择构建分布式体系。若不构建,指挥控制中心则对所有作战节点采用集中式指挥方式,统一管理所有作战节点任务,融合传感节点信息,并为武器节点提供目标指引。

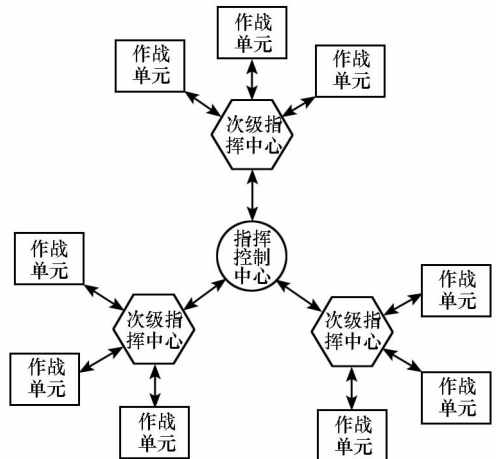


图 1 分布式作战体系结构

Fig. 1 Structure of distributed combat system

综上所述,动态多阶段交战过程任务管理流程如图 2 所示。需要注意的是,所提出的联合任务管理方法不考虑实际物理作战网络带宽限制以及延时,需要保证所有作战节点之间连通,且多数作战单元具有较强信息处理能力,所提出的方法适用于防空背景下的动态传感器武器联合任务管理。

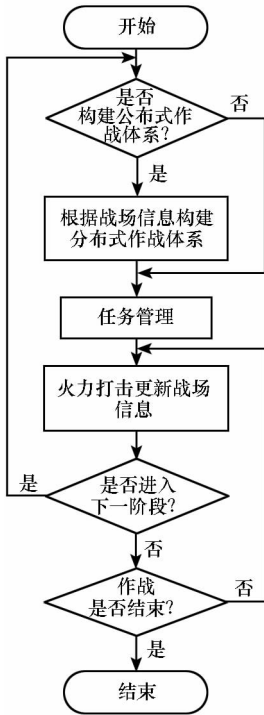


图 2 多阶段任务管理流程

Fig. 2 Flowchart of multi-stage task management

2 多阶段联合任务管理方法

2.1 阶段门限设定

根据上述多阶段任务管理流程,动态交战过程被划分为多个任务管理阶段。随着交战的进行,将不断出现新目标及空闲传感器和武器。考虑到存在空闲传感器可能无法对空闲武器进行指引或空闲武器可能无法对新目标进行火力打击的情况,有必要在进行阶段调整前通过预处理剔除这些无效对象以获取真实任务调整规模的信息。这个过程可分为三步:

步骤 1:根据武器传感器之间的指引约束关系,剔除无空闲传感器指引的武器。

步骤 2:根据武器与新目标之间的打击约束关系,获得可进行火力打击的武器与可被打击的新目标,即有效的空闲武器,有效的新目标。

步骤 3:根据武器传感器之间的指引关系获得可对有效空闲武器指引的传感器,即为有效空

闲传感器。

为了能更好地理解这个过程,用以下实例做进一步说明。假设在某个作战时刻,我方所有作战节点中空闲武器节点编号为 2、3、5、6、7、8、9,空闲传感器节点编号为 1、2、3、6、8、9,新目标编号为 5、6、7、8,武器与传感器间的指引约束关系和武器与目标间的打击约束关系如表 1、表 2 所示。

表 1 武器 - 传感器指引约束关系

Tab. 1 Sensor-weapon guidance constraint relationship

| 武器 | 传感器 | | | | | |
|----|-----|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 6 | 8 | 9 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

表 2 武器 - 目标打击约束关系

Tab. 2 Weapon-target attack constraint relationship

| 武器 | 目标 | | | |
|----|----|---|---|---|
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 8 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 0 |

由表 1 可以看出:虽然 5 号武器处于空闲状态,但没有空闲传感器可以对其进行指引,无法完成任何作战指令,因此其为无效的空闲武器,此时仍有效的空闲武器节点为 2、3、6、7、8、9。由表 2 可以看出:2、6 号武器无法打击当前任意新目标,因此也不需要 2、6 号武器进行任务管理,此时有效的空闲武器节点为 3、7、8、9。最终得到可打击的有效新目标为 6、7、8,可对有效空闲武器进行指引的有效空闲传感器为 1、3、6、8、9。

假设战场上某一时刻有效的空闲武器数量为 w 、有效的空闲传感器数量为 s 、以及有效的新目

标数量为 t_v , 根据式(1)计算 μ 值。 μ 值表示当前时刻所有有效的即可以进入新一轮任务调整的对象总数量。若 μ 值很小时就进入下一阶段任务调整会导致系统任务调整频繁,且打击方案会过于片面,不能保证整个作战过程的打击质量。而若 μ 值很大时才进入下一阶段,这些空闲对象将长时间处于等待状态,系统响应时间长,资源利用率低。因此需要合理设置阶段响应门限以控制进入新一阶段的任务调整问题规模。一种合理的设定是当 μ 值达到战场总对象数量一定比例时进入下一阶段。如式(2)所示, W 、 S 、 T 分别为战场上所有武器节点数量、所有传感器节点数量及预估所有武器能同时拦截的目标数量, λ 为预设的常数。阶段门限值 δ 给出了阶段划分的依据,阶段 s 按式(3)所示更新。

$$\mu = w_v + s_v + t_v \quad (1)$$

$$\delta = \frac{W+S+T}{\lambda} \quad (2)$$

$$s = \begin{cases} s+1 & \mu \geq \delta \\ s & \mu < \delta \end{cases} \quad (3)$$

2.2 分布式作战体系

在新一阶段进行联合任务管理时,作为实际作战中的两个重要因素,防御效果和系统响应时间存在矛盾,特别是随着任务调整问题规模的增大,为了达到较好的防御效果,作战方案生成算法的收敛时间也将增加。分布式作战体系的引入能够较好地解决这对矛盾。然而当任务管理规模较小时,构建分布式体系的必要性不大。因此有必要合理设置临界点,以使防空系统在作战过程中能够更好地发挥作战效能。以下从防御效果和系统响应时间两个方面来评判构建分布式体系的优劣,并结合给出综合临界指标。

2.2.1 防御效果

任务管理过程制定的打击方案的优劣决定了系统最终的防御效果,用 f 表征某一打击方案的适应值,即总体毁伤的理论评估值。 f 越大,打击方案越优,反之越差。用 α 表示构建分布式体系对打击方案适应度值的影响。其中: f_d 为分布式体系打击方案适应度值,它是各个次级作战组合对其目标组合的打击适应度值之和; f_c 为集中式体系打击方案适应度值,它为指挥控制中心直接管理的所有作战节点综合作战效能组成。

$$\alpha = \frac{f_d - f_c}{f_c} \quad (4)$$

2.2.2 系统响应时间

系统响应时间为进入新阶段开始至调整任务

方案生成完成之间的时间长度。在集中式体系中,系统响应时间为对有效对象直接解算任务分配方案的时间。而在分布式体系中,系统响应时间主要包括目标集群划分、分布式次级作战组合划分及各个次级作战组合任务分配方案解算三部分时间构成。用 β 表示构建分布式作战体系对系统响应时间的影响。其中, t_d 为分布式作战体系系统响应时间, t_c 为集中式作战体系系统响应时间。

$$\beta = \frac{t_c - t_d}{t_c} \quad (5)$$

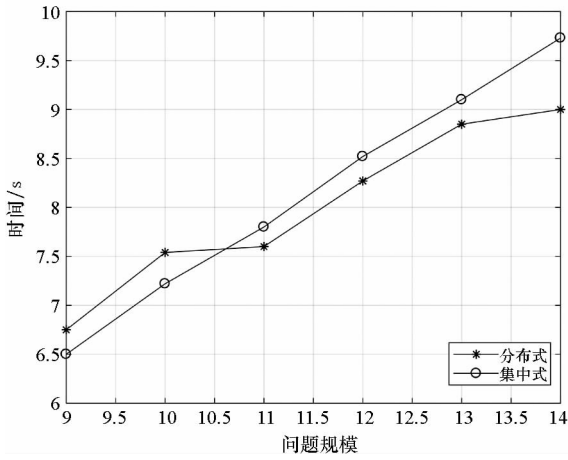
考虑系统响应时间与防御效果两个因素,给出综合临界指标 σ 。当 σ 大于零时,表明构建分布式作战体系提升了系统的整体性能,在该阶段应先构建分布式作战体系,再进行传感器-武器联合任务管理,反之降低了系统性能,因此无须构建分布式作战体系,可直接进行联合任务管理。

$$\sigma = \alpha + \beta \quad (6)$$

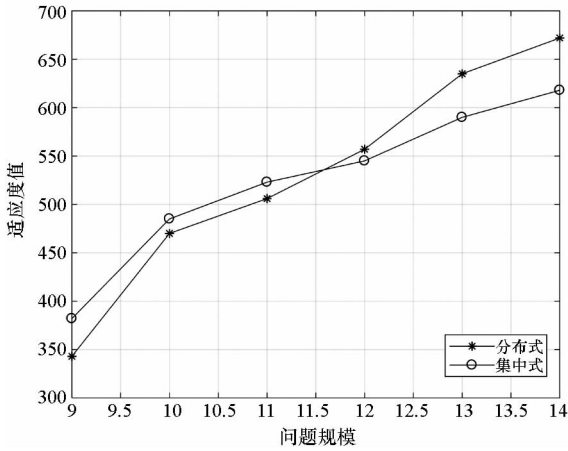
如前所述, α 与 β 主要与系统进行阶段任务管理规模相关,为使系统在多阶段任务管理过程中能够根据规模大小,对当前阶段是否构建分布式作战体系做出合理判断,对问题规模从9个来袭目标、18个武器节点、18个传感器节点至14个来袭目标、28个武器节点、28个传感器节点的范围,选取几种问题规模分别在集中和分布式条件下进行仿真,计算 σ 值,进而拟合出 σ 值与问题规模的对应曲线。针对某一种问题规模情形下,由于节点性能参数及目标数据具有随机性,因此二者的值会在一定范围内波动,可通过多次仿真计算此种问题规模下二者的均值。分布式作战体系与集中式作战体系二者在时间与打击方案适应度值上的差异如图3所示。

从图3中可以清晰地获得构建分布式作战体系能够提升系统性能时问题规模的临界点。图3作出了设定武器、传感器数量为新目标数量两倍时,系统响应时间、打击方案质量关于问题规模的曲线。如横坐标为10,则新目标、武器、传感器数量依次为10、20、20。从图3中可以看出,当问题规模较小,集中式体系无论在防御效果还是响应时间上都优于分布式体系,此时对应 α 和 β 都小于0的情形。随着问题规模的增大,分布式在两方面都表现都超过集中式体系,此时对应 α 和 β 都大于0的情形。在过渡期间存在一小段区间两指标一个大于0、一个小于0的情况,在这小段区间不会出现两者极端大或极端小的情况,因此认为用综合临界指标作为是否构建分布式体系的标

准是合理的。



(a) 时间对比
(a) Time comparison



(b) 适应度值对比
(b) Fitness value comparison

图 3 分布式与集中式作战体系仿真对比图

Fig. 3 Simulation comparison between distributed combat system and centralized combat system

更一般情况下临界指标 σ 值如表 3 所示,采用最小二乘法对 σ 值与问题规模进行曲线拟合,获得 σ 与武器数量 w 、传感器数量 s 及目标数量 t 之间的关系,如式(7)所示,此式适用于本文研究背景下 σ 值与问题规模的对应关系。在动态任务管理中,进入下一阶段后,根据当前问题规模计算 σ 值,判断是否构建分布式体系。

表 3 σ 值与问题规模对应矩阵

Tab. 3 σ value corresponding to problem size

| s, t | w | | | |
|--------|----------|----------|-----|---------|
| | 9 | 11 | ... | 14 |
| 18, 18 | -0.145 5 | -0.039 2 | ... | 0.162 4 |
| 18, 21 | -0.143 4 | -0.031 4 | ... | 0.148 1 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 28, 28 | -0.116 5 | 0.020 9 | ... | 0.194 1 |

$$\sigma = 0.049 4t + 0.007 1w + 0.002 7s - 0.765 6 \quad (7)$$

若 $\sigma > 0$ 表示需构建分布式作战体系,中心节点需先根据态势信息对目标进行分群,然后为每个目标群分配作战资源形成与目标群相对应的多个作战单元组合。为简化问题研究,假设来袭目标都是以匀速直线运动飞向我方唯一的被保护单位,根据目标当前位置可确定目标轨迹。根据目标横坐标、纵坐标及高度构建目标信息矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11}, x_{12}, x_{13} \\ x_{21}, x_{22}, x_{23} \\ \vdots \\ x_{T1}, x_{T2}, x_{T3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,来袭目标共有 T 个, x_{T1}, x_{T2}, x_{T3} 分别表示目标 T 的横坐标、纵坐标及高度。为防止目标由于某一坐标过大或过小产生错误聚类结果,对每一个坐标分别进行归一化处理。根据归一化的目标信息矩阵,采用式(9)计算目标之间的差异度。其中, $d_{t_1 t_2}$ 为非负整数,表示目标 t_1 与目标 t_2 的距离,其值越小,表征两目标间差异越小,轨迹越相近,反之,表征两目标差异较大。采用 K -means 算法对目标进行聚类,将所有目标划分为 n 个目标群。

$$d_{t_1 t_2} = \sqrt{(x_{t_1 1} - x_{t_2 1})^2 + (x_{t_1 2} - x_{t_2 2})^2 + (x_{t_1 3} - x_{t_2 3})^2} \quad (9)$$

根据目标分群结果为每个目标组合分配作战资源,得到与目标组合一一对应的 n 个次级作战组合,构建分布式作战体系。 n 个作战单元组合有多种划分方案,为缩短系统响应时间,需快速评估出某一划分方案的优劣,如式(10)所示。

$$F = \sum_{p=1}^n f_p(X_p, Y_p) \quad (10)$$

式中, F 表征某一划分方案的优劣,它由各个次级作战组合 p 对其对应的目标组合所产生的最优打击效能 $f_p(X_p, Y_p)$ 决定,其中 X_p 和 Y_p 分别为组合 p 中武器和传感器对目标组合的打击方案。要获得每个次级作战组合对其目标组合最优打击效能 $f_p(X_p, Y_p)$ 是非常困难的,这是在完成划分后需要继续去优化的问题。因此在划分时必须采用一种估计的方法。本文在评估某一划分方案优劣时,按照其目标组合中目标威胁度由大到小的顺序依次为每一目标分配武器、传感器,当对某一目标的毁伤达到设定毁伤阈值时,继续为下一目标分配。这

一过程直至次级作战组合资源耗尽或目标全部被分配,以此制定出用于评估划分方案优劣的临时分配方案,并得到次级作战组合拦截相应目标群大概能产生的毁伤效能。利用差分进化算法来求得一个可行的分布式体系次级作战组合划分方案。关于分布式体系构建的更具体信息可参见文献[14]。

2.3 传感器武器联合任务管理

构建分布式作战体系之后,每个作战单元组合、目标群中都包含若干个武器传感器节点、来袭目标,次级作战组合之间相对独立地进行传感器武器联合任务管理,制定最优打击方案。每个组合内建立如下任务管理模型:

$$\max f = \sum_{k=1}^T th_k \cdot [1 - \prod_{i=1}^W (1 - \beta_i \cdot ph_{ik} \cdot x_{ik} \cdot P_{ik})] \quad (11)$$

$$P_{ik} = 1 - \prod_{j=1}^S (1 - pt_{jk} \cdot y_{jk} \cdot z_{ij}) \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^T x_{ik} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, W \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^T y_{jk} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, S \quad (14)$$

$$x_{ik} \leq f_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, W; k = 1, 2, \dots, T \quad (15)$$

其中: T, W, S 分别为某一组合内目标数目、武器数目、传感器数目; th_k 表示目标 k 的威胁值; β_i 为传感器跟踪精度对武器毁伤概率的影响; ph_{ik} 为武器 i 对目标 k 的毁伤概率; pt_{jk} 为传感器 j 对目标 k 的探测概率; P_{ik} 为武器 i 拦截目标 k 时传感器提供的综合探测概率; f_{ik} 为武器目标间打击约束,其值为1表示武器 i 能够打击目标 k ,0则不能,其主要由武器节点的剩余弹量以及在武器节点接收到作战任务时目标是否仍在武器的射击范围内两方面因素决定; z_{ij} 表示传感器 j 能否为武器 i 提供指引,当武器拦截范围与传感器探测范围存在重叠时 $z_{ij} = 1$,表示可以提供指引,否则为0; x_{ik}, y_{jk} 为决策变量,分别表示武器 i 和传感器 j 是否分配给目标 k ,1为是,0为否。约束(13)、约束(14)表示最多为每个武器和传感器分配一个目标;约束(15)表示武器对其分配的目标应满足打击可行性约束条件。采用文献[14]中的基于交叉策略离散粒子群算法对问题求解,获得最优的打击方案,其基本步骤如下:

步骤1:对粒子位置、算法参数进行初始化。

步骤2:每隔一定代数对粒子的个体最优进行变异,计算变异后的适应度值,若优于原个体最优,则直接替换,否则以一定概率进行替换。

步骤3:构建一个全局最优备选集合,采用联赛选择算子为每个粒子确定其全局最优。

步骤4:粒子与其全局最优进行交叉操作。

步骤5:粒子与其个体最优进行交叉操作。

步骤6:粒子进行变异操作。

步骤7:计算下一代粒子的适应度值,更新粒子所经历的个体最优与种群全局最优。

步骤8:判断是否达到算法终止条件,若达到,则终止算法跳出循环,输出最优解,否则,返回步骤2,算法终止条件为到达最大迭代次数或若干次迭代中种群最优个体保持不变。

若根据综合临界指标选择不构建分布式作战体系,则指挥控制中心直接根据上述模型生成所有作战节点的任务,即所有节点组成一个作战组合。

3 仿真实验

3.1 分布式与集中式作战体系对比

为验证构建分布式作战体系的必要性,以MATLAB为工具进行分布式作战体系与集中式作战体系对比仿真。集中式体系中指挥控制中心直接对战场上的所有节点进行任务管理;分布式体系根据综合临界指标选择是否构建。仿真时设定战场中我方存在一被保护资源,作战单元随机分布在战场区域中,被保护资源间距离最近为10 km,最远为60 km,每个作战单元包含1个武器节点、1个传感器节点,所有武器、传感器对来袭目标的毁伤概率、探测概率已知,并在一定范围内波动。仿真中问题规模为15个来袭目标,30个武器节点,30个传感器节点。为满足战场上的时间要求,在实际仿真实验中限定两种管理中系统响应时间为5 s,到达系统响应时间上限后,终止算法,并输出当前最优打击方案。比较分布式与集中式打击方案优劣及目标损毁数量,由于目标、传感器及武器的数据带有随机性,为降低随机性对仿真结果的影响,本文对两种管理方式进行30次仿真,每次仿真中两种管理方式打击方案适应度值对比情况如图4所示,并统计仿真结果的平均值,如表4所示。

综合图4与表4可以看出,由于目标、作战节点数据带有随机性,所以每次的仿真结果在一定范围内波动,但分布式体系最终打击方案的适应度值明显优于集中式,防御效果更好。分布式作战体系通过降低问题维度达到缩短算法求解时间的效果,使得算法在5 s时已经收敛,解的质量更

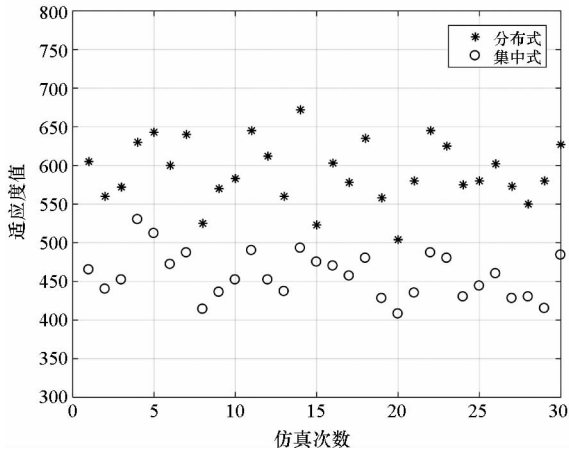


图 4 分布式与集中式作战体系适应度值散点图

Fig. 4 Scatter figure of fitness value of distributed combat system and centralized combat system

优,而且由于解空间较小,算法不易于陷入局部最优。而集中式体系解空间较大,算法找到最优解并收敛所需时间较长,具有 5 s 的系统响应时间,算法还没有收敛却强制退出,输出当前最优解,解的质量难以保证。因此构建分布式作战体系可以明显提升系统性能。

表 4 分布式作战体系与集中式作战体系仿真结果

Tab. 4 Simulation results of distributed combat system and centralized combat system

| 仿真指标 | 分布式作战体系 | 集中式作战体系 |
|------------|-----------|-----------|
| 适应度值 | 607.612 7 | 465.224 4 |
| 目标损毁数量 | 6.2 | 4.5 |
| 系统响应时间上限/s | 5 | 5 |

3.2 多阶段与无阶段点对比

采用多阶段解决动态交战过程中作战节点的任务管理问题,将动态交战过程看成由若干个阶段组成,并设定一个阶段门限值,根据有效的新目标数量、空闲武器传感器数量判断是否进入下一阶段。设定阶段门限可以有效缩短作战节点的等待时间,提高资源利用率,进而提升系统的总体防御效果,尤其是随着作战时间的延长、战场范围的扩大,优势更加明显。为做进一步说明,将对设定阶段点与无阶段点进行对比仿真。

从来袭目标被探测发现到其飞离战场区域或被击毁的动态交战过程中,为对比设定阶段点与无阶段点两种管理方式打击方案的优劣、系统防御效果,采用式(11)作为适应度函数评估任务管

理算法输出解质量,动态交战过程中,会存在多个任务管理阶段,统计所有阶段输出解的适应度值之和,并在仿真结束后,统计来袭目标被打击次数、损毁数量及武器、传感器使用次数。为降低目标、武器及传感器参数的随机性对仿真结果的影响,本文对两种管理方式进行对比仿真,统计 30 次仿真结果的均值,如表 5、表 6 所示。为更清晰地比较设定阶段点与无阶段点两种管理方式在系统效能、资源利用率上的差异,本文在作战时间较长、战场区域较大的 30 次仿真中,记录每次仿真的总体适应度值及武器传感器节点使用次数之和,并绘制两种管理方式对比散点图,如图 5 所示。

表 5 作战时间较短、战场区域较小时仿真结果

Tab. 5 Simulation results with short combat time and small battlefield area

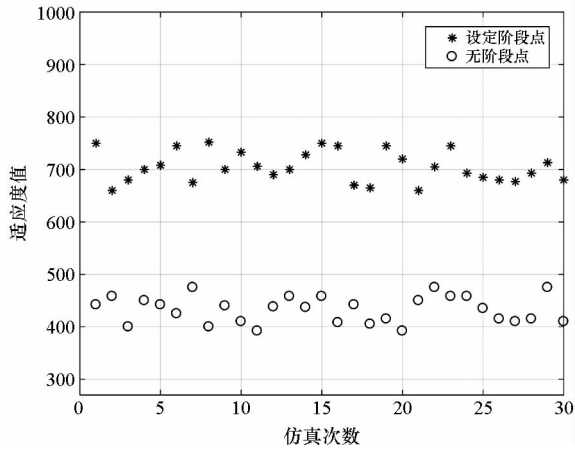
| 仿真指标 | 多阶段 | 无阶段点 |
|---------|-----------|-----------|
| 总体适应度值 | 590.063 6 | 486.384 7 |
| 目标损毁数量 | 4.766 7 | 3.766 7 |
| 武器使用次数 | 26.333 | 21.633 3 |
| 传感器使用次数 | 27.266 7 | 24.366 7 |
| 目标被打击次数 | 10.433 3 | 7.966 7 |

表 6 作战时间较长、战场区域较大时仿真结果

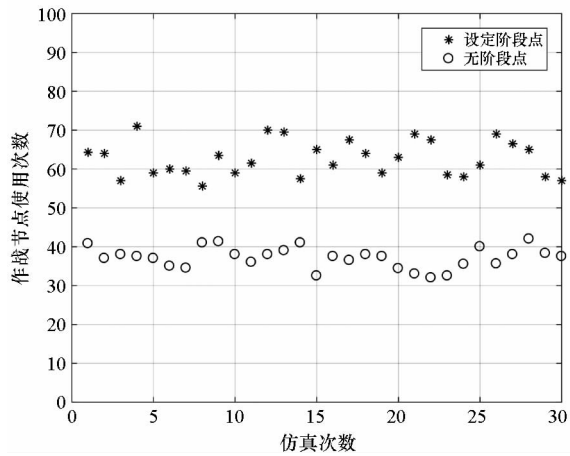
Tab. 6 Simulation results with long combat time and large battlefield area

| 仿真指标 | 多阶段 | 无阶段点 |
|---------|-----------|-----------|
| 总体适应度值 | 706.537 4 | 432.346 1 |
| 目标损毁数量 | 5.7 | 2.433 3 |
| 武器使用次数 | 31.5 | 17.733 3 |
| 传感器使用次数 | 31.9 | 19.633 3 |
| 目标被打击次数 | 14.933 3 | 7.033 3 |

当战场区域范围较小时,作战单元之间的间距不大,因此作战单元完成任务时间相差并不明显,即使等待所有节点完成任务再进入下一阶段也不会过大增加节点等待时间,因此设定阶段点优势并不明显。当战场区域范围较大时,作战单元完成任务的时间具有较大的差异,设定阶段点实时根据战场信息判断是否进入下一阶段,因此其相比于无阶段点的情况会明显提升资源利用率,进而提升系统防御效果。



(a) 适应度值
(a) Fitness value



(b) 作战节点使用次数
(b) Operational node usage times

图5 设定阶段点与无阶段点仿真结果对比图

Fig.5 Comparison of setting stage point and no stage point simulation results

4 结论

本文研究了动态条件下的传感器-武器联合任务管理方法。通过控制阶段有效任务调整规模设计了阶段门限,构建了防空作战的多阶段动态调整过程,相比传统任务管理方法更有效地利用了空闲作战资源。在阶段任务调整时,为了解决防御效果和系统响应时间的矛盾,提出了分布式与集中式相结合的调整流程,使得系统可根据综合临界指标来自主地确定是否需要构建分布式作战体系。分布式作战体系快速将所有作战节点和目标划分若干次级作战组合,每个次级作战组合独立地进行传感器-武器联合管理并对任务做出快速的调整。分布式作战体系放弃了作战效能的全局最优性,然而仿真实验显示在问题规模较大时可得到相比集中式更好的效能,从而验证了其

有效性。所提出任务管理方法能够较好地适应动态战场环境,使得防空系统能够更高效地发挥作战优势。

参考文献 (References)

- [1] 刘传波,邱志明,吴玲,等. 动态武器目标分配问题的研究现状与展望[J]. 电光与控制, 2010, 17(11): 43-48. LIU Chuanbo, QIU Zhiming, WU Ling, et al. Review on current status and prospect of researches on dynamic weapon target assignment[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(11): 43-48. (in Chinese)
- [2] Zhang Y, Yang R N, Zuo J L, et al. Improved MOEA/D for dynamic weapon-target assignment problem[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 22(6): 121-128.
- [3] 杨奇松,王顺宏,王然辉,等. 分阶段对地打击武器-目标分配建模与决策[J]. 弹道学报, 2017, 29(2): 90-96. YANG Qisong, WANG Shunhong, WANG Ranhui, et al. Modeling and decision-making of ground attack weapon-target assignment[J]. Journal of Ballistics, 2017, 29(2): 90-96. (in Chinese)
- [4] 郭继周,赵朝先,郭波,等. 面向多阶段任务的武器系统备件优化配置建模[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(12): 64-70. GUO Jizhou, ZHAO Chaoxian, GUO Bo, et al. Spare optimization modeling of phased-mission system for air-defense combat unit[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(12): 64-70. (in Chinese)
- [5] 陈英武,蔡怀平,邢立宁,等. 动态武器目标分配问题中策略优化的改进算法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(7): 160-165. CHEN Yingwu, CAI Huaiping, XING Lining, et al. An improved algorithm of policies optimization of dynamic weapon target assignment problem[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2007, 27(7): 160-165. (in Chinese)
- [6] 蔡怀平,刘靖旭,陈英武,等. 动态武器目标分配问题的马尔可夫性[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(3): 124-127. CAI Huaiping, LIU Jingxu, CHEN Yingwu, et al. On the Markov characteristic of dynamic weapon target assignment problem[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(3): 124-127. (in Chinese)
- [7] Besse C, Chaib-draa B. An efficient model for dynamic and constrained resource allocation problems[C]// Proceedings of Joint Workshop for International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, 2007.
- [8] Li P, Wu L, Lu F X. Analysis on influential factors for meta-level control of the anytime algorithm for dynamic WTA problem[C]// Proceedings of International Workshop on Intelligent Systems and Applications, 2009.
- [9] 徐克虎,孔德鹏,陈金玉,等. 合成分队动态武器目标分配协同决策模型[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(6): 62-66, 72. XU Kehu, KONG Depeng, CHEN Jinyu, et al. Synthesis

- unit dynamic weapon target assignment model of collaborative decision making [J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(6): 62-66, 72. (in Chinese)
- [10] 王邑, 孙金标, 肖明清, 等. 基于类型 2 区间模糊 K 近邻分类器的动态武器目标分配方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1314-1319.
WANG Yi, SUN Jinbiao, XIAO Mingqing, et al. Research of dynamic weapon-target assignment problem based on type-2 interval fuzzy K-nearest neighbors classifier [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(6): 1314-1319. (in Chinese)
- [11] Khosla D. Hybrid genetic approach for the dynamic weapon-target allocation problem[C]//Proceedings of the SPIE—the International Society for Optical Engineering, 2001.
- [12] 何福贵, 王家礼. 基于有限优先级的动态调度算法[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(3): 545-547.
HE Fugui, WANG Jiali. Dynamic scheduling algorithm based on limited number of priority [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(3): 545-547. (in Chinese)
- [13] 梁少帅, 邱涤珊, 杨晓凌, 等. 事件驱动的动态武器目标分配研究 [J]. 电子设计工程, 2011, 19(19): 61-64, 69.
LIANG Shaoshuai, QIU Dishan, YANG Xiaoling, et al. Research on dynamic weapon target assignment based on event-driven [J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(19): 61-64, 69. (in Chinese)
- [14] Zhang M Y, Chen C. Joint task management of sensor and weapon based on distributed management system [C]//Proceedings of the 36th Chinese Control Conference, 2017.