



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

基于合同网协议的分布式反导资源分配算法

王松, 陈功

引用本文

王松, 陈功. 基于合同网协议的分布式反导资源分配算法[J]. 计算机科学, 2024, 51(11A): 240900024-7.

WANG Song, CHEN Gong. Distributed Sensor-Weapon-Target Assignment Algorithm for Ballistic Missile Defense Based on Contract Net Protocol [J]. Computer Science, 2024, 51(11A): 240900024-7.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[ARM架构云服务器的CPU功耗模型研究](#)

CPU Power Model for ARM Architecture Cloud Servers

计算机科学, 2022, 49(10): 59-65. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800103>

[基于智能卡的扩展混沌映射异步认证密钥协商协议](#)

Chaotic Mapping Asynchronous Authentication Key Agreement Scheme with Smart-cards

计算机科学, 2019, 46(1): 175-181. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.01.027>

[基于规则的分层负载平衡调度模型](#)

计算机科学, 2003, 30(10): 16-20.

[合同网协议中的Agent可信度模型](#)

计算机科学, 2006, 33(6): 150-153.

[合同网协议中的agent可用度研究](#)

计算机科学, 2004, 31(8): 127-128.

基于合同网协议的分布式反导资源分配算法

王松 陈功

成都流体动力创新中心 成都 610072

(w_ms1985@163.com)

摘要 资源分配算法是实现一体化防空反导的关键技术。针对弹道导弹防御过程中“传感器-武器-目标”动态分配问题,提出一种基于合同网协议的分布式分配方法。首先,对“传感器-武器-目标”动态分配问题进行形式化建模,模型考虑传感器和武器空间能力、传感器制导通道和武器拦截弹数量等实际约束,并设计目标函数以实现弹道导弹防御中尽早拦截和尽可能提高拦截成功概率这两个主要原则。然后,在合同网协议框架的基础上,构建反导资源协同动态分配流程,并针对传感器和武器的任务特点分别设计反导资源投标与中标策略。其中,武器资源投标策略设计中考虑对已分配目标的置换,并在估计被置换对象重招标所带来效能损失的基础上提出基于校正效能的置换对象选择方法。计算机仿真实验结果表明,所提算法能够实现分配方案的动态调整,且与传统反导体系下的分配算法相比,对导弹的拦截时间更早,成功概率更高,平均反导效能提高 43.7%。

关键词:“传感器-武器-目标”分配;分布式任务分配;动态任务分配;合同网协议;弹道导弹防御

中图分类号 TP301

Distributed Sensor-Weapon-Target Assignment Algorithm for Ballistic Missile Defense Based on Contract Net Protocol

WANG Song and CHEN Gong

Chengdu Fluid Innovation Center, Chengdu 610072, China

Abstract The resource assignment algorithm is a key technology of realizing integrated air and missile defense. In order to solve the problem of sensor-weapon-target dynamic assignment in ballistic missile defense, a distributed assignment algorithm based on contract net protocol is proposed. Firstly, a formal model of the sensor-weapon-target dynamic assignment problem is constructed, which considers the practical constraints such as the spatial capability of sensors and weapons, and the number of guidance channels and interceptor missiles. An objective function is designed to achieve the two main principles of earliest interception and maximum success probability in ballistic missile defense. Then, on the basis of the contract network protocol framework, we construct the dynamic process of sensor-weapon-target assignment, and design the bidding and awarding strategies of sensors and weapons according to their characteristics respectively. In the bidding strategy of weapons, the replacement of assigned targets is considered, and a method of selecting the replacement target is proposed which estimates the effectiveness loss caused by the replacement target rebidding. Computer simulation experimental results show that the proposed algorithm can assign sensors and weapons dynamically. Compared to the assignment method of traditional ballistic missile defense system, the proposed algorithm leads to earlier interception and greater success probability, and achieves 43.7% effectiveness improvement.

Keywords Sensor-Weapon-Target assignment, Distributed task assignment, Dynamic task assignment, Contract net protocol, Ballistic missile defense

1 引言

传统以平台为中心的防空反导中,防空反导资源之间隶属关系固定,不同隶属的资源间无法互操作,严重制约了防空反导体系的效能。一体化防空反导是指在一体化火控网络支持下,将分散的传感器、武器、指控等各类防空反导资源组网,并在统一空情态势的基础上实现资源的一体化协同管理和任务分配的新型作战样式^[1],是现代防空反导体系提高体系对抗效能的重要发展方向。防空反导资源分配算法直接决定任务分配方案的优化程度和分配效率,是实现一体化防空反导的关键核心,得到广泛研究^[2-3]。

拦截武器作为防空反导的关键资源,武器-目标的分配

问题(Weapon-Target Assignment, WTA)成为研究热点。文献[4]对地面防空系统中的WTA问题开展研究,提出利用基于非线性目标规划的优化方法,实现整体拦截成功概率最大化、拦截弹发射数量最小化等综合优化目标。文献[5]针对大规模WTA问题快速求解的现实需求,将WTA建模为整数线性规划问题并针对性设计求解算法,能够在数秒内对400武器×400目标规模的分配方案的计算。然而,以上方法只适用于单波次或单阶段防空空中武器-目标静态分配方案计算,没有考虑多波次防空阶段间的相互影响,也无法根据空态势的变化动态调整分配方案^[6]。为此,很多方法被提出以寻求动态武器-目标分配问题^[7-13]。文献[8]通过战场态势转移概率建模目标和武器状态变化规律,并利用随机动态规划

方法生成序贯的武器-目标分配方案,实现了适用于多波次防空动态武器-目标最优分配方法。作为典型的 NP 难问题,动态 WAT 问题随着规模的增加计算量呈指数增长^[14]。文献[9]在海上编队协同反导 WAT 研究中提出基于“招标-投标”策略的优化方法,通过编队内作战单元间分布式协商完成目标分配决策,以缓解集中式分配算法的计算负载问题。

另一方面,传感器作为防空反导的另一个重要资源,传感器-目标分配(Sensor-Target Assignment, STA)问题也得到很多关注^[15-17]。文献[17]研究了反弹道导弹过程中多类雷达传感器资源与对导弹目标的搜索、跟踪、识别、精跟等任务之间的动态分配问题,提出利用拍卖算法对多约束多目标传感器分配模型进行协同优化的方法。实验表明,该方法能够在保证任务完成度的同时,减少传感器之间的交接次数和时间消耗。

防空反导过程中,传感器和武器之间密切配合,共同作用和影响着防御效能。因此,防空反导资源分配中需要考虑 WTA 与 STA 之间的影响,开展传感器、武器与目标的协同分配也更符合实际应用需要。相比 WTA 与 STA 问题,传感器-武器-目标分配问题(Sensor-Weapon-Target Assignment, S-WTA)由于分配维度的增加而更具挑战性,近年来逐步得到关注与研究^[18-20]。为了求解 S-WTA 问题,文献[18]假设待分配的武器、传感器和目标数量相同,在此基础上构建简化的 S-WTA 问题模型,并通过改进 Swt_opt 算法准确求解联合分配方案。由于以上假设极大地限制了算法的可应用范围,因此很多研究没有采用。文献[19]在研究协同防空的 S-WTA 问题中,将目标的毁伤概率建模为武器对目标拦截概率与传感器对目标捕获概率的函数,在此基础上以对所有目标毁伤总期望最大化为目标构建问题模型。然后,将可行(传感器,武器,目标)三元组集合的边界收益(Marginal Return)作为启发信息设计了 MMRCH 求解算法,获得了良好的求解性能。文献[20]研究了不确定战场环境下的 S-WAT 问题,考虑了目标威胁程度、武器对目标拦截性能、传感器对目标跟踪性能等因素的不确定性,建立了不确定因素的影响模型。模型求解中,将目标函数的期望作为优化评价准则,并在 MMRCH 算法基础上进行了求解算法设计。

然而,以上算法都只考虑了单阶段的防空反导资源分配,属于静态 S-WTA 研究。实现防御过程中分配方案调整的动态 S-WTA 问题研究相对较少^[21-23]。文献[21]在弹-炮一体化地面多层防空系统 S-WTA 问题研究中,提出分配决策时刻模型,迭代地开展防空资源分配决策,实现分配方案的动态调整。文献[23]将防空过程离散化为固定时长的多个阶段,提出在每个阶段内对后续若干阶段的分配方案进行优化调整的动态分配方法。该模型假设后续阶段中传感器和武器对目标的可用性性能已知,并通过改进的 MOEA/D 算法进行求解。

分析已有研究可以发现两点不足:一是动态 S-WTA 协同分配问题研究较少;二是已有研究中优化目标往往追求提高拦截成功概率和降低拦截成本,缺乏对弹道导弹拦截决策中实现尽早拦截目标需求的考虑。因此,本文针对协同反导中传感器-武器-目标的动态分配问题开展研究,创新性包括:

1)对协同反弹道导弹中传感器-武器-目标的动态协同分配问题进行形式化建模,模型反映了传感器与武器的相互

依赖关系,考虑了多种实际约束,并考虑弹道导弹防御需求设计了尽早拦截前提下最大化拦截成功概率的分配目标。

2)在合同网算法框架基础上,针对反导过程中传感器-武器-目标分配实际,设计 S-WTA 协同分配流程,提出 S-WTA 问题分布式求解算法,其中提出的基于校正效能的置换对象选择策略,估计和考虑置换对象重新招标可能带来的性能损失,有利于形成全局更优的分配方案。

2 协同反导资源分配问题分析与建模

2.1 协同反导资源分配问题分析

战术弹道导弹(Tactical Ballistic Missile, TBM)防御过程如图 1 所示。预警雷达发现目标后,反导系统根据自身的部署空间和拦截弹性能等数据计算对目标的拦截窗口、拦截点位等拦截方案。反导系统根据防御原则或任务分配算法确定拦截目标,并根据拦截计划发射拦截弹。拦截弹发射后,反导系统的传感器跟踪并引导拦截弹对目标进行打击,最后经毁伤评估判断拦截效果,适时实施二次拦截^[13]。

在以平台为中心的反导过程中,武器与传感器紧耦合,一个反导系统要执行对目标的拦截任务,需要同时满足其武器对目标的可拦截和传感器对目标的可制导两个条件,这限制了反导资源使用的灵活性和效率。协同反导模式下,传感器与武器解耦,并通过反导资源分配算法实现拦截联盟的灵活构建,其防御过程如图 2 所示。

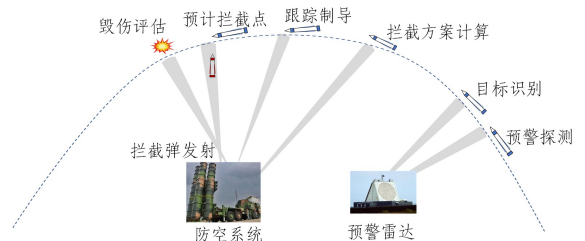


图 1 TBM 防御过程

Fig. 1 Process of tactical ballistic missile defense

传感器节点发现目标后,将目标信息上报指控节点,指控节点利用反导资源分配算法计算得到拦截目标的反导资源分配方案后,将拦截任务下发至分配的传感器节点和武器节点,并根据实时态势变化,适时调整分配方案。任务分配后,武器节点根据拦截计划对所分配目标发射导弹进行拦截,并由所分配传感器引导拦截弹飞向目标。

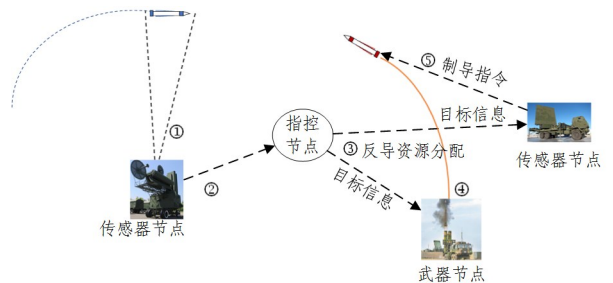


图 2 协同反导示意

Fig. 2 Schematic diagram of cooperative ballistic missile defense

为了方便建模协同反导资源分配问题,进行如下假设:

- 1)防御方能够准确预测来袭 TBM 的弹道参数;
- 2)反导资源之间通信全联通,任意反导资源节点之间都能够通信,并实现在网络中实时共享信息;

3)对来袭目标采用“射击—观察—射击”(Shoot-Look-Shoot, SLS)的拦截射击策略,且对一个目标的一次拦截只分配一个武器节点和一个制导节点。

在反导资源分配效果方面,实现尽早拦截和尽可能提高拦截成功率是弹道导弹防御的两个重要原则^[24]。因此本文反导资源分配中依次考虑以下两个分配目标。

1)尽早拦截:当发现来袭目标后,选择预测遭遇时间最早的反导资源进行拦截;

2)拦截成功率尽可能高:选择反导资源组合,以尽可能提高对目标的拦截成功率。

2.2 协同反导资源分配问题建模

为实现对来袭目标的动态分配效果,本文利用事件来动态触发分配程序,如图3所示,特定类型的事件将动态触发分配过程,分配算法根据最新态势信息计算分配方案并下发各反导资源节点执行。随着相关事件的不断发生,分配方案能够实现动态调整。本文初步考虑两类触发事件:一是探测到新的来袭目标;二是评估到拦截目标失败。在动态分配触发机制的基础上,下面对反导资源分配问题进行定义。

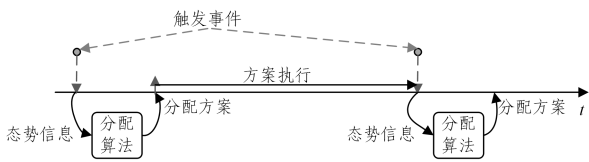


图3 事件驱动的动态分配机制

Fig. 3 Dynamic assignment mechanism driven by events

基本定义:假设当前决策时刻来袭 TBM 目标,我方武器节点和传感器节点的数量分别为 N_T, N_W, N_G , 并分别记来袭目标集合为 $T = \{t_i | i = 1, 2, \dots, n_1, \dots, N_T\}$, 武器节点集合为 $W = \{\omega_j | j = 1, 2, \dots, N_W\}$, 传感器节点集合为 $G = \{g_k | k = 1, 2, \dots, N_G\}$ 。

模型变量:

1)可拦截性 $I(t_i, \omega_j)$:若武器节点 ω_j 具备拦截目标 t_i 的条件,则 $I(t_i, \omega_j) = 1$; 否则, $I(t_i, \omega_j) = 0$ 。

2)可制导性 $J(\omega_j, t_i, g_k)$:若传感器节点 g_k 能为武器节点 ω_j 拦截来袭目标 t_i 提供制导,则 $J(\omega_j, t_i, g_k) = 1$; 否则, $J(\omega_j, t_i, g_k) = 0$ 。

3)预计拦截时间 $F(t_i, \omega_j)$:武器节点 ω_j 在 $E(t_i, \omega_j)$ 时刻对目标 t_i 发射拦截弹,预计拦截弹与目标交汇的时间。

4)拦截成功率 $P(t_i, \omega_j, g_k)$:在传感器节点 g_k 的支持下用武器节点 ω_j 对目标 t_i 进行拦截的成功概率。

5) $S(\omega_j)$:武器节点 ω_j 剩余的拦截弹数量。

6) $C(g_k)$:传感器节点 g_k 的制导容量。

决策变量:

$$X = [x_{ijk}]^{N_T \times N_W \times N_G}$$

若分配武器节点 ω_j 在传感器节点 g_k 的制导支持下对目标 t_i 进行拦截,则 $x_{ijk} = 1$; 否则 $x_{ijk} = 0$ 。

约束条件定义:

1)空间约束:如果 $x_{ijk} = 1$, 必须有 $I(t_i, \omega_j) = 1$ 且 $J(\omega_j, t_i, g_k) = 1$;

2)武器拦截弹总数约束: $\sum_{i=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_G} x_{ijk} \leq S(\omega_j), \forall j \in \{1, 2, \dots, N_W\}$;

3)制导容量约束: $\sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_W} x_{ijk} \leq C(g_k), \forall k \in \{1, N_G\}$;

4)分配方案唯一性约束:

$$\sum_{j=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{N_G} x_{ijk} = 1, \forall i \in \{1, N_T\}$$

目标函数定义:

$$\min Z(X)$$

$$Z(X) = \sum_{i=1}^{N_T} \{\alpha * F(i) - P(i)\}$$

其中:

$$F(i) = \prod_{j=1}^{N_W} \prod_{k=1}^{N_G} F(t_i, \omega_j)^{x_{ijk}}$$

$$P(i) = \prod_{j=1}^{N_W} \prod_{k=1}^{N_G} P(t_i, \omega_j, g_k)^{x_{ijk}}$$

通过设置合适的 α 取值, 可确保优先实现对来袭目标拦截时间尽可能早, 同时尽可能提高拦截成功率的分配效果。

3 基于合同网的反导资源分配方法

3.1 反导资源动态分配流程

本文根据协同反导过程中武器、传感器的工作实际和所设置的协同分配目标, 利用合同网算法协商机制, 设计如图4所示的目标-武器-传感器协同分配流程。

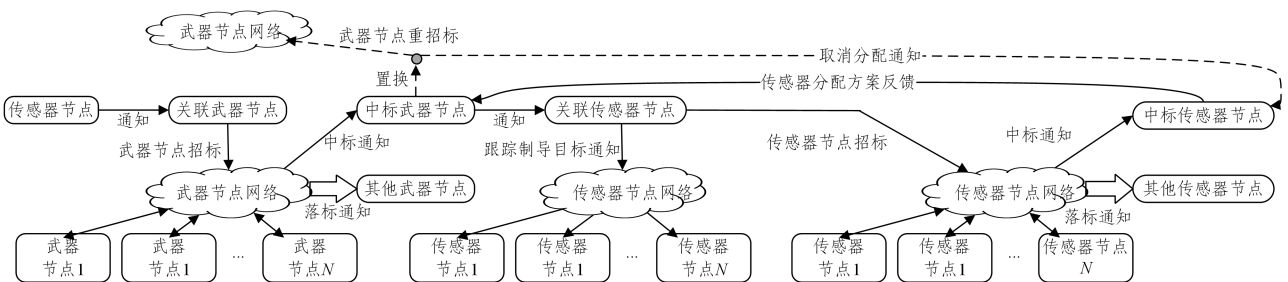


图4 反导资源动态分配流程

Fig. 4 Dynamic assignment process of ballistic missile defense

为了实现武器与传感器节点间的分配协同, 首先假设武器节点与传感器节点之间预先定义了用于协同的通知关联关系。当传感器节点发现目标分配事件(包括稳定跟踪新目标和判断目标拦截失败)后, 首先将目标信息通知关联武器节点, 触发武器节点分配过程。收到通知的武器节点作为招标管理者, 在武器节点网络中利用合同网机制对目标开展

招标, 决定中标武器节点并向竞标武器节点发出中标/落标通知。

随后, 中标武器节点将分配事件返回关联传感器节点, 触发传感器节点分配过程。由于传感器需要根据其对目标的跟踪情况进行效能评估与竞标判断, 因此在利用合同网算法进行分配协商前, 在关联传感器节点的通知下,

传感器网络中的所有节点首先对目标进行探测跟踪。然后,关联传感器节点再作为招标管理者在传感器网络中开展目标招标。

传感器节点分配结束后,未中标的传感器立刻停止对目标的跟踪,中标传感器持续跟踪目标并将传感器分配方案反馈给中标武器节点。为了实现更优的分配效果,已分配的武器节点可能进行置换和重招标(具体见小 3.3 节),当置换事件发生后,中标武器节点将向对应中标传感器节点发送取消分配通知,以及时释放传感器资源。

下面从招标流程、投标策略和中标策略 3 个主要方面对基于合同网的分配方法进行介绍。

3.2 基于合同网的招标流程

合同网算法通过模拟市场化招投标的协商竞争机制进行问题求解,其招标流程如图 5 所示。在合同网算法中,每次招标任务都有一个招标管理者负责招标信息生成、招标文件发送以及中标判断与通知发送等工作,其他相关节点则作为竞标者根据需要开展投标。其中,投标策略包括投标条件判断、投标报价计算、置换对象选择等功能模块,是算法的主体内容;中标策略包括:优选中标者、目标信息计算、中标处理等功能模块,涉及招标管理者的中标计算和中标者收到中标通知后的处理,是算法的重要内容。

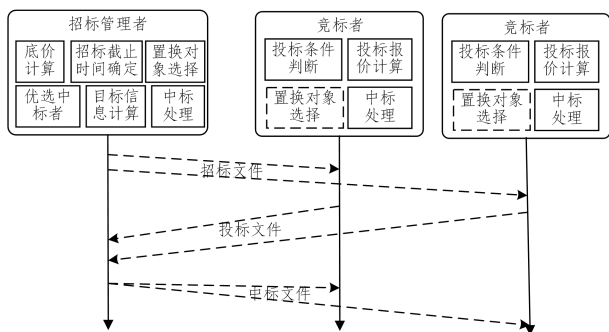


图 5 合同网协议招标流程

Fig. 5 Bidding process of contract net protocol

需要指出的是,武器资源与传感器资源分别承担对目标的拦截弹发射和跟踪制导任务,两类任务执行特点上的差异导致对两类资源的分配存在不同要求。具体来说,武器资源只关注拦截弹发射时刻的执行,在发射前可以灵活调整目标任务;而传感器资源需要对目标进行持续跟踪,强调任务执行的连续性;同时,传感器对目标的跟踪还具有实时动态性,即传感器前一刻无法跟踪的目标可能在当前时刻能被跟踪

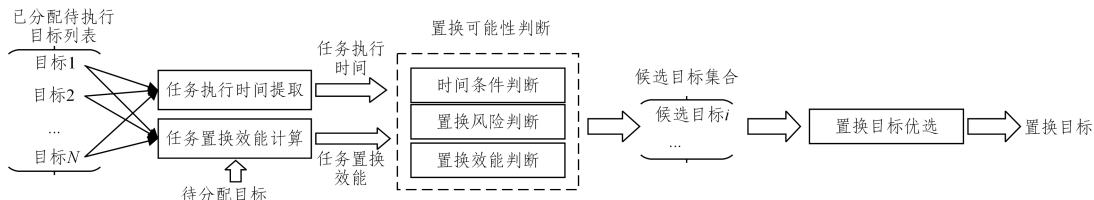


图 7 置换对象选择流程

Fig. 7 Process of selecting replacement targets

首先,将武器节点目前可能承担的目标任务分为已中标待执行目标和已投标待确认目标两类,假设其分别存储在列表 A 和 B 中。所谓置换,就是从列表 A 中选择一个已中标待执行目标进行重新招标分配,以空出拦截弹分配

上。因此,对武器和传感器两种资源的投标策略和中标策略设计会有所不同。

3.3 反导资源投标策略

投标策略主要规定反导资源收到任务招标通知后,如何判断是否能够承担该任务,以及如何计算执行该任务的效用,以支撑投标决策。

武器节点的投标逻辑如图 6 所示。首先进行拦截条件判断,计算武器节点对目标拦截的时间窗口,如果武器节点对目标不具有拦截窗口,则放弃对该目标任务的投标。如果武器节点对目标有拦截窗口,且对目标的预计最早拦截时间早于招标文件内的参考时间,则进一步判断武器节点是否值得承担该目标打击任务。武器系统所能承担的拦截任务数量受到其所装载拦截弹数量的限制。如果武器节点已分配的目标拦截任务数量小于其拥有的总拦截弹数量,则认为能够承担对新目标的拦截任务,进行直接投标。如果武器节点的所有拦截弹都已分配到目标,但评估认为接收该目标任务能够得到更优的效能,则需要考虑置换投标,即中标后用待分配目标置换出已分配目标,并对置换出的目标进行重新招标分配。

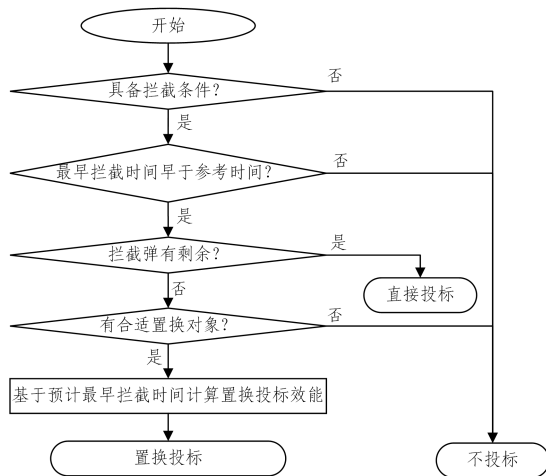


图 6 武器资源投标逻辑

Fig. 6 Bidding logic of weapon resources

在开展目标置换的现实合理性方面,由于武器系统在工作机制上允许发射前调整分配目标,且基于置换的招投决策过程不会影响已有拦截任务的执行,因此武器资源分配具备进行目标置换的条件。

置换对象的选择是开展置换投标的关键,对此本文提出基于校正效能的置换对象选择策略,对目标的可置换性进行评估并优选置换对象,策略流程如图 7 所示。

给新的待分配目标。选择时,首先对每个已分配待执行目标任务从时间条件、置换风险以及置换效能 3 个方面进行置换可能性判断。

其中,时间条件判断是指目标的计划执行时间(即武器节

点计划对目标发射拦截弹的时间)不能早于估计的重招标结束时间,从而保证该目标任务的执行权能够成功转移到其他武器节点。

置换风险判断主要考虑投标结果的不确定性,保证在任意时刻列表 A 中的任意已中标待执行目标是列表 B 中的至多一个已投标待确认目标的置换对象。如果列表 A 中的目标可以同时被列表 B 中多个目标选为置换对象进行投标,当武器节点最终中标其中多个目标时,会出现只有第一个中标目标能实现置换,其他中标目标无对象可置换的问题。因此,策略中通过标记置换对象并结合置换风险判断,保证在投标结果确认前被置换对象不参与后续目标的置换选择。

最后,对已分配目标进行置换一定要有利于提升整体反导效能,这是开展置换投标的原因和前提。因此,置换效能的计算是开展置换投标的关键,直接决定着策略的性能优化效率。为此,提出基于校正效能的投标策略,具体思路如下:

对于武器节点 w_i ,定义其已分配待执行目标列表 $A_i = \{t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,S(i)}\}$,其中 $S(i)$ 为武器节点 w_i 的当前剩余拦截弹数量,即所有拦截弹都已分配给来袭目标。此时,该武器节点的整体拦截时间效能为:

$$Y_i = E_i(A_i) = \sum_{j=1}^{S(i)} F(t_{i,j}, w_i) \quad (1)$$

当该武器节点新接收到待分配目标 t_k 时,如果节点将已分配目标 $t_r \in A_i$ 置换出来以接收 t_k ,且经过重招标最终将 t_r 分配给 w_j ,则此次置换将主要对武器节点 w_i 和 w_j 的拦截效能产生影响。

其中, w_i 的效能调整为:

$$Y_i^* = Y_i - F(t_r, w_i) + F(t_k, w_i) \quad (2)$$

w_j 的效能调整为:

$$Y_j^* = Y_j + F(t_r, w_j) \quad (3)$$

此次置换对拦截体系总拦截时间效能指标的改变可估计为:

$$C_{k,r,i} = Y_i^* + Y_j^* - (Y_i + Y_j) \quad (4)$$

将式(2)、式(3)代入,可得:

$$C_{k,r} = F(t_k, w_i) + F(t_r, w_j) - F(t_r, w_i) \quad (5)$$

鉴于目标 t_r 在上轮招标分配中武器节点 w_i 胜出节点 w_j ,可以认为 $F(t_r, w_j) > F(t_r, w_i)$,即 w_j 对 t_r 的拦截时间晚于 w_i ,因而将已分配目标置换出并重招标这一行为会增加对该目标的拦截时间。因此,在计算置换投标效能时,不仅要考虑拦截该目标的时间 $F(t_k, w_i)$,还要考虑将已分配目标重招标导致的拦截时间增加量。为此,我们假设目标 t_r 重招标的接收者 w_j 为 t_r 在上轮招标中的次优者 \bar{w}_r (即最早拦截时间投标值仅次于 $F(t_r, w_i)$ 的投标者),在此基础上对重招标导致的拦截时间增量进行估计,得到校正后的置换效能为:

$$C_{k,r,i}^* = F(t_k, w_i) + [F(t_r, \bar{w}_r) - F(t_r, w_i)] \quad (6)$$

若目标的校正后效能值小于投标管理者的参考拦截时间,该目标被认为是值得用于置换待分配目标。目标如果通过了时间条件判断、置换风险判断和置换效能比较,将被存入置换对象候选集合 H_i 。在置换目标选择上,遍历列表 A 中所有已中标待执行目标后,利用式(7)从 H_i 中确定置换对象,并以 $\min C_{k,r,i}^*, r \in H_i$ 为报价进行置换投标。

$$t_{k,i}^* = \arg \min C_{k,r,i}^*, r \in H_i \quad (7)$$

传感器资源的招标策略相对简单。因为传感器资源首先

需要对待分配目标实现跟踪,才能具备投标条件。当传感器节点的制导通道都被已分配目标占用时,由于需要对已被分配目标进行持续跟踪,导致没有通道能够对新的待分配目标进行探测跟踪,因此传感器节点不具备开展置换投标的现实条件。传感器资源投标策略如图 8 所示,首先根据前期探测结果进行判断,如果传感器节点没能跟踪上目标,则不具备投标条件;反之,估计在传感器节点制导支撑下用分配的武器节点对该目标进行拦截的成功概率。其中拦截成功概率模型参考文献[21],将拦截成功概率建模为传感器探测概率与拦截弹预计飞行时间的函数。得到拦截成功概率后,如果该概率大于投标管理者的参考概率,则进行投标。

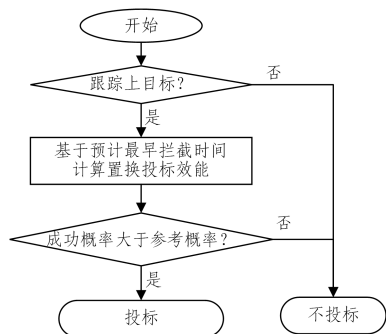


图 8 传感器资源投标逻辑

Fig. 8 Bidding logic of sensor resources

3.4 反导资源中标策略

在中标节点选择方面,根据优化目标函数要求,武器资源投标管理节点和传感器资源投标管理节点分别采用式(8)和式(9)进行中标节点选择。

$$w_f = \arg \min_{i \in SB} T_i \quad (8)$$

$$g_f = \arg \max_{i \in SB} P_i \quad (9)$$

其中, SB 表示投标者组成的集合, T_i 表示武器节点上报的最早拦截时间, P_i 表示传感器节点上报的拦截成功概率。为了配合置换投标,武器资源投标管理节点还应确定次优分配节点和计算置换代价,并随中标通知发送给中标节点。

此外,由于传感器节点可能存在刚发现目标时无法跟踪上目标,一段时间后能够跟踪上目标的情况。因此, $SB = \emptyset$ 不意味着目标无法分配到制导节点,此时投标管理传感器节点会将该目标的分配任务缓存,并在一段时间后再次进行招标,直至找到中标节点或目标突防。

在中标通知处理方面,由于置换类投标的存在,武器资源的中标处理相对复杂,其处理流程如图 9 所示。

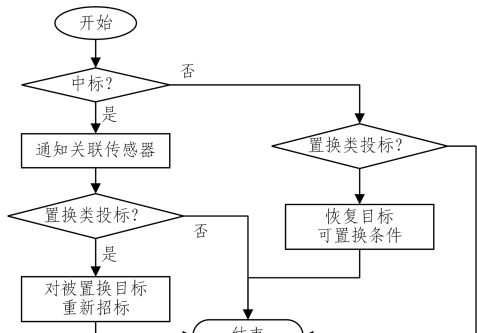


图 9 武器资源中标通知处理流程

Fig. 9 Process after winning bids of weapons

当武器节点中标时,首先将中标事件通知关联传感器节点。如果节点投标时选择置换,还需要对被置换出的任务进行重新招标。当节点未能中标时,如果是置换投标,需要及时恢复被置换目标的可置换性标志。

此外,为避免出现目标在一个节点中重复置换和招标,被置换出来的目标进行重招标时,其原拥有者不再进行投标。

4 仿真实验

本节通过仿真实验对提出的协同分配方法进行测试。为了更好地说明协同分配方法带来的优势,实验中将其与传统反导体系下以拦截概率最大为目标的分配方法进行对比。在对比算法中,武器资源与传感器资源间存在特定的绑定关系,只有相同编号的武器与传感器才能配合完成反导任务。

4.1 实验场景设计

假设蓝方从3个点位分别发射5枚、8枚、6枚TBM打击红方3个防卫目标点,每个点位发射TBM的时间和打击的目标具有随机性,所有19枚TBM按发射顺序依次编号为 t_1 至 t_{19} 。红方利用5个传感器节点和5个武器节点在互联互通的条件下组成反导体系,利用分配算法开展反导拦截,假设每个武器节点拥有5枚拦截弹,每个传感器同时能够制导4个目标。

4.2 实验结果

表1列出了协同分配算法对两类反导资源的分配过程。整个仿真过程对19枚来袭导弹总共进行了23次分配。其中包含3次分配方案的动态调整,分别在14号、19号、22号分配事件中调整了4号、8号、12号目标的分配方案。此外,包含一次对拦截失败目标的二次分配。具体来说,发现3号目标拦截失败后,算法在23号分配事件中对目标进行了再次反导资源分配。同时,可以看到,对所有来袭目标协同分配算法都成功地分配了武器与传感器资源进行拦截。

表1 反导资源分配事件

Table 1 Events of ballistic missile defense assignment

分配事件 序号	分配 时间/s	目标 序号	分配结果	
			武器编号	传感器编号
1	322.50	7	1	4
2	323.00	1	1	3
3	328.00	2	2	2
4	341.00	9	2	2
5	354.75	3	3	1
6	365.25	10	3	2
7	376.25	4	1	3
8	400.25	5	2	3
9	401.50	11	1	4
10	426.25	6	3	1
11	439.50	13	3	2
12	456.50	8	1	3
13	502.00	14	1	4
14	506.25	4	4	1
15	544.00	12	2	3
16	551.25	15	2	2
17	559.25	16	3	2
18	600.00	17	1	4
19	604.25	8	4	1
20	659.00	18	4	4
21	761.75	19	2	2
22	765.75	12	5	2
23	947.50	3	5	3

来袭目标的首次拦截时间及拦截成功概率。从对比中首先可以看到,由于系统武器与传感器资源的绑定约束,对比算法对其中7号、15号、16号、17号、19号来袭目标没能形成可行拦截方案,直接导致5枚来袭导弹突防成功。

表2 对目标拦截情况的对比

Table 2 Target interception comparison of two algorithms

目标 序号	首次拦截时间/s		拦截成功概率/%	
	本文方法	对比方法	本文方法	对比方法
1	969.44	969.44	84.77	85.23
2	960.70	960.70	85.18	85.18
3	944.16	973.80	98.35	85.19
4	1055.67	1024.00	85.19	85.22
5	1033.40	1162.66	85.22	76.14
6	1016.71	1046.34	84.76	85.14
7	610.50	—	86.93	0
8	1135.65	1104.00	85.19	85.22
9	673.73	673.73	86.53	86.53
10	613.44	666.65	87.29	86.89
11	698.57	795.53	86.66	86.04
12	1216.87	1306.91	85.28	76.14
13	671.94	763.37	87.31	87.19
14	823.37	925.45	86.36	85.75
15	883.57	—	86.53	0
16	807.44	—	87.29	0
17	900.50	—	86.93	0
18	1048.96	1048.96	85.65	85.65
19	1085.37	—	87.19	0
有数据项均值	918.76	958.68	86.70	84.39

进一步详细对比可以发现,在首次拦截时间指标方面,对大多数来袭导弹,协同分配方法都能实现更早的拦截,只有4号和8号目标的首次拦截时间较对比方法晚。针对4号和8号目标的分配过程进一步分析发现,在对两个目标的分配方案进行置换调整时,虽然两个目标的拦截时间被推迟,但却获得了更短的整体拦截时间。同时,统计两个算法都成功分配反导资源目标(即排除7,15,16,17,19号目标后的剩余目标集合)的首次拦截时间也可以看到,协同分配算法对目标的平均拦截时间明显早于对比方法,也证实了置换策略能够提高整体拦截效能。在拦截成功概率指标方面,由于协同分配算法对3号目标进行了两次拦截,因此对3号目标总的拦截成功概率高达98.35%;同时,即使不考虑对比算法未分配反导资源目标的情况下,协同分配算法对目标的平均拦截成功率也具有明显优势。

最后,为了更综合地比较反导效能,实验中采用不同随机种子运行10次仿真,并对两个算法下红方成功拦截的来袭导弹数量进行统计。从图10所示结果可以看到,每次仿真运行中协同分配算法都较对比算法能够拦截更多来袭导弹,成功拦截导弹数量平均多出5.8枚,反导效能平均提高47.9%。

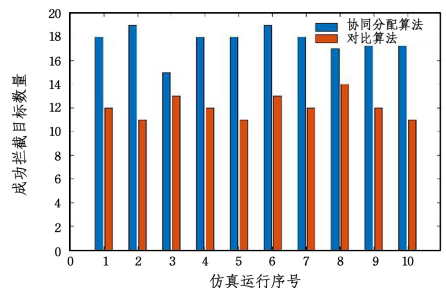


图10 多次仿真运行的反导效果对比

Fig. 10 Effectiveness comparison of two algorithms in multiple runs of simulation

表2列出了协同分配算法与对比算法支持下红方对每个

结束语 本文在对弹道导弹防御过程中“传感器-武器-目标”协同动态分配问题进行建模的基础上,提出了事件驱动的动态分配机制,建立了基于合同网的分布式协同分配流程,配合设计了符合武器和传感器应用实际的投标与中标策略,并通过仿真实验测试了所提算法能力与性能优势。

下一步需要考虑对抗条件下来袭导弹威胁水平、我方反导资源损毁等更多实际因素,对算法进行改进和完善,进一步扩大算法的适用场景。

参 考 文 献

- [1] KORDA M, KRISTENSEN H M. US ballistic missile defenses [J]. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2019, 75(6): 295-306.
- [2] LAI W X, WANG C W, GU C F, et al. Integrated Air Defense Cooperative Networking Operation Research [J]. *AIR & SPACE DEFENSE*, 2022, 5(4): 92-96.
- [3] HE S, YUE S, WANG G, et al. Requirement analysis of cooperative task planning for regional joint air defense operations [C]//6th International Workshop on Advanced Algorithms and Control Engineering (IWAACE 2022). SPIE, 2022: 267-274.
- [4] HOCAOGLU M F. Weapon target assignment optimization for land based multi-air defense systems: A goal programming approach [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128: 681-689.
- [5] LU Y, CHEN D Z. A new exact algorithm for the weapon-target assignment problem [J]. *Omega*, 2021, 98: 102138.
- [6] CHANG X, SHI J, LUO Z, et al. Adaptive large neighborhood search algorithm for multi-stage weapon target assignment problem [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 181: 109303.
- [7] LAI C M, WU T H. Simplified swarm optimization with initialization scheme for dynamic weapon-target assignment problem [J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 82: 105542.
- [8] LI Y, LIU G, HU X H, et al. SDP-Based Dynamic Weapon Target Assignment Algorithm [J]. *Aero Weaponry*, 2023, 30(5): 1-7.
- [9] MA L, MA Y L, LIU X K. Based on Strategy of “Invite Public Bidding” Fleet Cooperative Anti-missile Optimization [J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(5): 95-103.
- [10] SILAV A, KARASAKAL E, KARASAKAL O. Bi-objective dynamic weapon-target assignment problem with stability measure [J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 311(2): 1-19.
- [11] KONG L, WANG J, ZHAO P. Solving the dynamic weapon target assignment problem by an improved multiobjective particle swarm optimization algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(19): 9254.
- [12] HU L, YI G X, HUANG C, et al. Research on Dynamic Weapon Target Assignment Based on Cross-Entropy [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020(1): 8618065.
- [13] SHAO J Z, BI Y M, QIAN D Q, et al. Firepower scheduling research on double-layer firepower coordination anti-missile combat [J]. *System Engineering and Electronics*, 2016, 38(8): 1840-1846.
- [14] TOKGOZ A, BULKAN S. Weapon target assignment with combinatorial optimization techniques [J]. *International journal of advanced research in artificial intelligence*, 2013, 2(7): 39-50.
- [15] WANG Y C, SHAN G L, TONG J. Solving sensor-target assignment problem based on cooperative memetic PSO algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(5): 1000-1007.
- [16] DAS S K. Modeling intelligent decision-making command and control agents: An application to air defense [J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2013, 29(5): 22-29.
- [17] ZHOU L, WANG Y, ZHU X Z, et al. Multi-sensor Task Assignment Auction Method for Anti-missile Early Warning Campaign [J]. *Modern Radar*, 2023, 45(6): 42-50.
- [18] LI Z F, LI X M, DAI J J, et al. Sensor-weapon-target assignment based on improved SWT-opt algorithm [C]//IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. IEEE, 2011: 25-28.
- [19] XIN B, WANG Y P, CHEN J. An efficient marginal-return-based constructive heuristic to solve the sensor-weapon-target assignment problem [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Systems*, 2018, 49(12): 2536-2547.
- [20] LI G, HE G, ZHENG M, et al. Uncertain Sensor-Weapon-Target Allocation Problem Based on Uncertainty Theory [J]. *Symmetry*, 2023, 15(1): 176.
- [21] ZHANG K, ZHOU D, YANG Z, et al. A novel heterogeneous sensor-weapon-target cooperative assignment for ground-to-air defense by efficient evolutionary approaches [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 227373-227398.
- [22] XU W Q, CHEN C, DING S X, et al. A bi-objective dynamic collaborative task assignment under uncertainty using modified MOEA/D with heuristic initialization [J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 140: 112844.
- [23] ZONG A, CHEN C, MENG K. Multi-Stage Sensor Weapon Target Assignment Problem based on Modified MOEA/D [C]//42nd Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2023: 01-06.
- [24] HUANG R Q, LI W M, TIAN Y, et al. Research on the Firepower Distribution Model of the Upper Layer Cooperate with Lower Layer for Missile Defense [J]. *Modern Defence Technology*, 2010, 38(4): 26-30.



WANG Song, born in 1989, Ph.D, assistant professor. His main research interests include system simulation and artificial intelligence.



CHEN Gong, born in 1985, Ph.D, senior engineer. His main research interests include multi-agent system and machine learning.