

基于双层规划的网络化防空作战编队结构优化

李 慧^{1,2} 周 林¹ 辛文波²

(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)¹ (中国人民解放军 95899 部队 北京 100085)²

摘 要 科学、合理的网络化防空作战编队结构是确保编队自身安全,提高作战任务可靠性和有效性的重要保证。针对网络化防空作战编队结构优化问题,首先,定义了编队防空结构的相关概念,分析了编队防空作战的一般过程;其次,基于双层规划理论,分别以掩护节点与核心节点距离最大、编队抗饱和攻击能力最强为上下层目标,综合考虑探测角度覆盖、火力拦截时间、导弹二次捕捉等因素,建立了作战编队防空结构双层优化模型;然后,引入层次粒子群算法,对模型进行求解,并给出了具体运算步骤;最后,以水面舰艇编队防空结构优化为例,求解最佳编队防空结构,计算最大抗饱和攻击能力。通过与典型的纵队、弧形编队的对比,验证了模型与方法的合理性与可行性。

关键词 作战编队,防空结构,优化,双层规划,层次粒子群优化算法

中图分类号 E833,E917 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.04.045

Optimization of Networked Air-defense Operational Formation Structure Based on Bilevel Programming

LI Hui^{1,2} ZHOU Lin¹ XIN Wen-bo²

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)¹

(Unit 95899 of PLA, Beijing 100085, China)²

Abstract Scientific and reasonable operational formation air-defense structure(OFAS) is important to ensure the safety of formation, and improve the reliability and validity of operational missions. Aiming at the optimization problem of OFAS, firstly, relevant concepts of OFAS were defined and general process of formation air-defense operation was analyzed. Secondly, based on the theory of bilevel programming, taking the farthest distance between defending nodes and core node and the strongest anti-saturation striking capability as upper and lower target respectively, the double layers optimization model for OFAS was built by comprehensively considering detection angle covering, fire intercepting time, missile twice catching and so on. Then, the hierarchical particle swarm optimization algorithm was introduced to solve the model, and concrete operation steps were given. Finally, taking OFAS for surface ships as an example, the optimal air-defense network structure was built, and the maximum anti-saturation striking capability was calculated. The rationality and feasibility of the model and method are verified through contrast with typical column and arc formation structures.

Keywords Operational formation, Air-defense structure, Optimization, Bilevel programming, Hierarchical particle swarm optimization algorithm

基于信息系统的体系作战是现代战争的基本作战形式^[1],空中突袭作为其独立样式之一,具有全方位、大纵深、全时段、高强度等特点,使分布在太空、空中、海上的作战编队面临更多可能的突发事件和更加严重的空中威胁。作战编队防空结构(Operational Formation Air-defense Structure, OFAS)是指作战编队为防御空中目标突袭,所形成的防空布势,其具有相对固定的队形排列方式,是生成防空作战能力的重要基础。OFAS 是否科学合理、稳健可靠,不仅直接影响着编队自身安全,还影响着指挥决策、交战打击、综合保障等任务的顺利完成。为此,结合防空作战过程及特点,研究 OFAS 优化

问题显得尤为重要。

当前,国内外关于 OFAS 的研究主要集中在作战视图分析、体系结构描述、编队队形设计、编队航路规划、队形控制建模、作战效能评估等方面。如美军先后提出空海一体战、网电空间战等新型作战理念,推出了权力边缘、敏捷性优势等理论体系,并深入开展了作战体系融合、网系重构、动态控制、深度协作等研究^[3];刘立佳等^[2]结合现代空袭作战模式的特点,根据防空火力对要地全方位保护的战术要求,基于排队论、信息熵等理论,提出了多型防空武器分防线部署的要地防空优化部署模型;朱智等^[4]结合网络化防空反导体系的典型作战特

收稿日期:2017-02-08 返修日期:2017-05-13 本文受国家自然科学基金(61401499,61174162)资助。

李 慧(1982—),女,博士生,工程师,主要研究方向为装备发展论证与体系规划,E-mail:1878798895@qq.com(通信作者);周 林(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为军事装备管理预测与决策;辛文波(1978—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为装备环境与可靠性评估。

点,分别从目标、武器和指控3个角度开发网络化防空反导体系作战模型,并设计了仿真案例进行实验验证;赵建印等^[5]针对海上编队双舰防空队形部署优化问题,以编队舰船抗击来袭目标防御纵深最大为优化目标,建立海上编队双舰防空队形部署优化模型,并给出求解算法;黄金才等^[6]运用性能评价过程方法对舰艇编队防空作战全过程进行有效建模,形式化描述了预警探测、情报传递、命令下达、防空拦截等作战的主要过程,考虑要素间的相互协作、编队防空作战分布并发的特点,建立了层次化结构模型;王步云等^[7]采用复杂网络方法建立水面舰艇编队反舰作战网络模型,分析了网络结构对信息质量的影响,并采用遗传算法对反舰作战网络结构进行优化。

已有研究虽然深化了OFAS问题的认知水平,但多数仍存在以下不足:1)对编队防空作战过程、网络结构优化的描述和建模过于抽象化、理想化,对战场环境、导弹性能、来袭方向、拦截路径等因素考虑不足,研究结论的可操作性和实用性较欠缺;2)通常建立单层优化模型,各目标函数相互独立,且均在同一层面优化,未能结合编队的结构特性与作战特性,从两个层面分别构造目标函数和约束条件。

双层规划能从两个层面进行多目标优化,上层决策者利用某个变量影响下层可行约束集,通过下层目标函数与下层决策者的相互作用,经过迭代运算,逐步寻找全局最优解,因而结果更加准确、符合实际。为此,本文在定义OFAS相关概念的基础上,基于双层规划理论,分别以掩护节点与核心节点距离最大、编队抗饱和和攻击能力最强为上下层目标,综合考虑探测覆盖角度、火力拦截时间、导弹二次捕捉等因素,建立OFAS双层优化模型,并通过层次粒子群算法进行求解。最后以水面舰艇OFAS优化为例进行仿真对比分析。

1 问题描述与分析

1.1 相关概念

定义1(作战节点) 作战节点是执行信息侦察、指挥决策、火力拦截等任务的作战实体,主要包括两类:

1)核心节点,是担负作战决策、指挥控制、指令分发等任务的节点,是编队的中枢和关键,如预警机、指挥舰等,记为 $C=\{C_i|i=1,2,\dots,m\}$, m 为核心节点个数。

2)掩护节点,是分布在核心节点周边,担负侦察探测、火力拦截、电子干扰等任务的节点,负责保障核心节点的安全,如歼击机、护卫舰等,记为 $D=\{D_i|i=1,2,\dots,n\}$, n 为掩护节点个数。

记作战节点集合为 N ,则有 $N=CUD$ 。

定义2(作战编队) 作战编队是针对特定作战任务,由相互依赖、相互作用的若干作战节点组成的较为固定的基本组织,如预警机编队、水面舰艇编队等,记为 F_c 。

定义3(作战编队防空结构) 其是指在防空作战过程中,根据作战任务需要确定的兵力组成、关系及位置,其排列方式是相对固化的抽象结构,可表示为由若干核心节点、掩护节点构成的二元函数组,记为 $OFAS=\Theta(C,D)$ 。

定义4(抗饱和攻击能力) 其是指当核心节点遭遇多批次的导弹同时攻击时,在最危险的方向上,作战编队能够拦截来袭导弹的最大批数,记为 Sat 。

1.2 编队防空作战的过程分析

以水面舰艇编队防空作战为例进行分析。出于一般性考虑,本文设定的来袭目标均为巡航导弹,所研究的编队防空拦截体系仅包括防空导弹、密集火炮等,不考虑其他力量的火力支援,不考虑导弹的目标特性对雷达发现概率的影响,也不考虑有源和无源电子干扰对命中率的影响。水面舰艇编队在执行防空任务时,作战区域可分为内、外两层,作战过程如图1所示。其中,方位角指目标节点与观察节点之间连线,沿顺时针方向与正北方向的夹角,用 θ 表示;探测半径是指雷达对周边辐射源进行探测和识别的最大距离,用 R 表示。

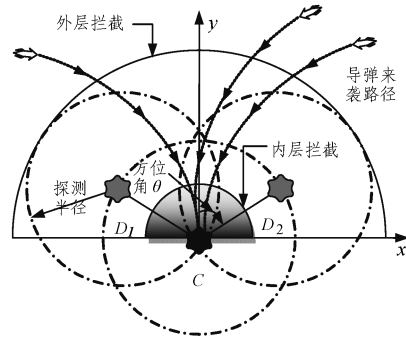


图1 编队网络化防空作战过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of operation process of formation network air defense

1)外层拦截

拦截范围为距编队核心节点50~400 km的环形区域^[6],可控制距编队核心节点1000 km以内的圆形区域,主要运用自身搭载的防空导弹进行拦截。当来袭导弹进入编队探测范围时,掩护节点在空天信息的支援下,利用警戒雷达进行空情预警,获取空情后传递预警信息给核心节点,再由核心节点进行分析处理,对来袭目标拦截任务进行分配,下达打击命令给各掩护节点^[5]。

2)内层拦截

拦截范围为距编队核心节点50 km以内的圆形区域^[6],主要运用密集阵防空武器(如火炮、电子干扰装备等)进行拦截。当来袭导弹突破外层拦截后,被攻击节点的对空警戒雷达能及时获取空情信息,节点指控系统下达目标拦截指令给火炮密集阵、电子干扰装备等。

1.3 模型假设

为便于模型建立与问题求解,做如下假设:

1)作战节点均保持匀速直线运动,且编队结构不变、始终通信畅通;所搭载的防空导弹型号相同、数量充足,不考虑拦截过程的耗弹量。

2)作战节点在所发射防空导弹与来袭导弹相遇之前,不接受新的拦截任务。

3)核心节点对拦截任务的分配原则是,对每批来袭导弹只安排一个节点进行拦截,且无论成功与否,不对该批来袭导弹进行第二次拦截。

4)来袭导弹仅攻击核心节点,且以最快相遇路径航行,不考虑掩护节点被击毁的情况;来袭导弹数量充足,一旦被探测到就不会丢失。

5) 防空导弹以最快相遇路径拦截来袭导弹, 只要二者相遇, 即认为拦截成功, 不考虑作战节点之间、作战节点与来袭导弹、防空导弹与来袭导弹的相对运动。

2 模型建立

OFAS 优化受作战地域、战场环境、担负任务、威胁来源方向、导弹战技性能等因素制约, 是复杂的多目标非线性规划问题。为便于描述及计算, 本文仅考虑 1 个核心节点、 n 个掩护节点组成作战编队的情况。建立平面直角坐标系, 设正北方向为 0° , 核心节点 C 的坐标为 $(0, 0)$, 掩护节点 D_i 的坐标为 (x_i, y_i) , $i \in [1, n]$ 。敌导弹仅从核心节点 $\alpha \sim \beta$ 角度的扇面来袭, 无发射间隔且每个角度的来袭可能性相同。

2.1 上层模型

2.1.1 目标函数

作战节点间的相对距离决定了编队结构, 影响空情预警及火力打击范围。上层模型从编队防空结构的视角, 选择全部掩护节点与核心节点距离之和最大作为优化目标。原因在于, 核心节点是编队中枢, 一旦遭敌毁伤, 将极大影响编队整体作战效能的发挥, 甚至导致编队结构崩溃、功能完全失效。为确保核心节点的安全, 须尽量增大周围雷达探测的范围, 对各方向威胁目标及时预警。拓展编队雷达探测距离主要依靠各掩护节点的合理布局, 在确保编队结构稳定、节点相对位置固定的情况下, 掩护节点与核心节点的距离越大, 就越能利用掩护节点的雷达探测装置有效扩大预警范围, 减轻核心节点遭敌毁伤的威胁。

设 Dis_{iC} 为掩护节点 D_i 到核心节点 C 的距离, 则目标函数可表示为:

$$\max Lon = \sum_{i=1}^n Dis_{iC} \quad (1)$$

2.1.2 约束条件

1) 探测来袭导弹距离约束

由于敌方导弹一般采用超低空飞行方式以及受地球曲率的影响, 各作战节点发现来袭导弹的随机变量 X 在节点周围 $Det^- \sim Det^+$ 的环形区域内, 且服从均匀分布, 即 $X \sim U(Det^-, Det^+)$ 。为不失一般性, 用期望值 $E(X)$ 表示来袭导弹被发现的平均距离, 则掩护节点探测半径 \bar{R}_{det} 可表示为:

$$\bar{R}_{det} = E(X) = \frac{Det^- + Det^+}{2} \quad (2)$$

一般而言, 作战节点搭载的防空导弹火力打击范围都显著大于其侦察范围, 一旦发现来袭导弹, 就能快速拦截摧毁, 因此要尽可能增大目标探测距离。但同时, n 个掩护节点的探测圆域还要无缝覆盖核心节点周围 $\alpha \sim \beta$ 角度。根据几何关系, Dis_{iC} 应满足:

$$0 < Dis_{iC} \leq \frac{\bar{R}_{det}}{\sin(\frac{\beta-\alpha}{2n})} \quad (3)$$

其中, $\frac{\bar{R}_{det}}{\sin(\frac{\beta-\alpha}{2n})}$ 为掩护节点探测圆域彼此相切, 且两侧掩护

节点的探测圆域与敌方导弹来袭角度的上下限边界相切时, Dis_{iC} 的取值。

将式(2)代入式(3)后, 可得:

$$0 < Dis_{iC} \leq \frac{Det^- + Det^+}{2 \cdot \sin(\frac{\beta-\alpha}{2n})} \quad (4)$$

2) 防来袭导弹二次捕捉距离约束

设 Dis_{mC} 为来袭导弹探测点 M 到核心节点 C 的距离, 作战节点的火力范围为 $[Fir^-, Fir^+]$, 当 $Dis_{mC} \in (0, Fir^-]$ 时, 防空导弹拦截存在盲区, 将采用电子干扰、密集火炮等内层拦截手段, 但无法确保一定能够摧毁来袭导弹。通常情况下, 来袭导弹都具有二次捕捉能力, 为有效保护核心节点, 掩护节点的火力打击范围应覆盖核心节点的火力打击下限(即 Fir^-) 以外的区域。对于掩护节点 D_i , 当 $Dis_{iC} \in (Fir^-, 2Fir^-]$ 时, 掩护节点、核心节点的火力盲区叠加, 使得掩护节点的保护效果大幅下降; 当 $Dis_{iC} \in [Fir^- + Fir^+, +\infty)$ 时, 核心节点周围半径为 Fir^- 的圆域超出了掩护节点的火力范围, 也无法有效应对二次捕捉的来袭导弹, 为此应满足:

$$2Fir^- < Dis_{iC} < Fir^- + Fir^+ \quad (5)$$

3) 掩护节点均匀布局约束

由于各掩护节点所搭载的警戒雷达、防空导弹型号完全一致, 且侦察范围、火力打击能力相同, 因此为实现各角度侦察截击效果稳定和尽可能减少薄弱方向, n 个掩护节点应均匀分布在敌方导弹的来袭角度内, 且与核心节点的距离相同, 即:

$$Dis_{iC} = Dis_{(i-1)C} \quad (6)$$

其中, $i \in [1, n]$ 。

2.2 下层模型

2.2.1 目标函数

编队抗饱和和攻击能力主要与作战节点所搭载防空导弹的战技性能、敌方导弹的来袭角度和飞行速度等有关, 能够直接反映编队防空作战效果。下层模型从编队防空效能的视角, 选择作战编队整体抗饱和和攻击能力最强作为优化目标。其原因在于, 抗饱和和攻击能力是防空编队能够抗击空中目标攻击的最大密度, 是衡量编队防空性能的关键指标。抗饱和和攻击能力越强, 说明编队抗击空中来袭目标的概率越高, 自身安全性也就越有保证。

各作战节点都具有区域防空能力, 当核心节点遭敌导弹威胁时, 全部掩护节点将为核心节点提供区域拦截掩护。因此, 编队抗饱和和攻击能力是核心节点、全部掩护节点对来袭导弹的拦截批次之和。设 Sat^F, Sat^C, Sat_i^D 分别为作战编队、核心节点、掩护节点 D_i 的抗饱和和攻击能力, 则目标函数可表示为:

$$\max Sat^F = Sat^C + \sum_{i=1}^n Sat_i^D \quad (7)$$

根据文献[8]得出核心节点、掩护节点 D_i 的抗饱和和攻击能力表达式。设 V_a 和 V_m 分别为防空导弹、来袭导弹的飞行速度, T^* 为作战节点的拦截准备时间, 则核心节点 C 的抗饱和和攻击能力 Sat^C 为:

$$Sat^C = \frac{1}{\ln(1 + \frac{V_m}{V_a})} \cdot \ln(\frac{Fir^+ + V_a \cdot T^*}{Fir^- + V_a \cdot T^*}) + 1 \quad (8)$$

设 θ_i 为 D_i 的方位角, 其抗饱和和攻击能力 Sat_i^D 为:

$$Sat_i^D = \frac{1}{V_m \cdot T^*} \cdot \left| \sqrt{Dis_{iC}^2 + Det^{+2} - 2 \cdot Dis_{iC} \cdot Det^+ \cdot \cos(270^\circ - \theta_i)} - Fir^- \right| \quad (9)$$

2.2.2 约束条件

1) 掩护节点探测覆盖角约束

为保护核心节点,全部掩护节点的探测角度应完全覆盖敌方导弹来袭角度扇面,确保侦察探测无盲区^[9-10],即:

$$\bigcup_{i=1}^n \theta_i \supseteq (\alpha, \beta) \quad (10)$$

设掩护节点 D_i 的探测覆盖角为 $\Delta\phi_i, i \in [1, n], \Delta\phi_i$ 的数值与探测半径、掩护节点距核心节点的相对位置有关,则有 $\theta_i \in [\phi_i^-, \phi_i^+]$,其中 ϕ_i^- 和 ϕ_i^+ 分别为探测覆盖范围对应方位角的下限和上限。来袭导弹拦截过程如图 2 所示,则有:

$$\phi_i^+ - \phi_i^- = \Delta\phi_i \quad (11)$$

$$\Delta\phi_i = 2 \cdot \arctan \frac{\bar{R}_{det}}{Dis_{iC}} \quad (12)$$

根据掩护节点 D_i 的方位角换算关系,有:

$$\theta_i = \phi_i^- + \frac{\Delta\phi_i}{2} \quad (13)$$

将式(5)、式(8)、式(9)代入式(6),有:

$$\bigcup_{i=1}^n \left(\phi_i^- + \arctan \frac{Det^- + Det^+}{2 \cdot Dis_{iC}} \right) \supseteq (\alpha, \beta) \quad (14)$$

其中, $\phi_i^- \in [0, \beta], i \in [1, n]$ 。

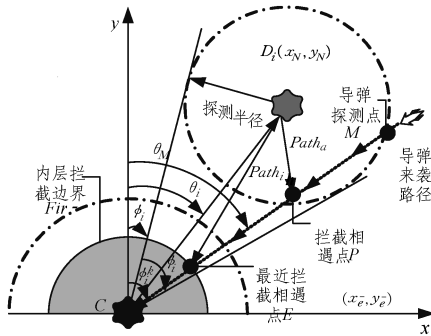


图 2 来袭导弹拦截过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interception process of incoming missile

2) 各方向侦察与火力打击能力约束

由于导弹来袭方向具有不确定性,作战编队必须在不同方向都具有稳定的侦察、拦截能力,防空结构的薄弱方向相对较少,最薄弱方向的火力打击能力尽可能强, n 个掩护节点应均匀分布在来袭导弹方向角的范围内。为不失一般性,假定 $\alpha \leq \theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_n \leq \beta$,则有:

$$\theta_i - \theta_{i-1} = \Delta\theta \quad (15)$$

$$\theta_1 - \alpha = \beta - \theta_n \quad (16)$$

其中, $i \in [1, n], \Delta\theta$ 为常数。

3) 作战节点拦截来袭导弹的时间约束

在拦截来袭导弹的过程中,若来袭导弹已飞入距核心节点 $(0, Fir^-]$ 的范围内,那么作战节点将无法利用防空导弹对其进行成功拦截。设 $Path_b$ 为当防空导弹与来袭导弹相遇点恰好在距离核心节点 Fir^- 处时(最近拦截相遇点)防空导弹的飞行路径长度, $Path_m$ 为对应来袭导弹的飞行路径长度,则有:

$$\frac{Path_b}{V_a} - \frac{Path_m}{V_m} > T^* \quad (17)$$

执行拦截任务的节点可以是核心节点或掩护节点。如图 2 所示,为不失一般性,设执行拦截任务的节点坐标为 (x_N, y_N) ,最近拦截相遇点的坐标为 (x_e^-, y_e^-) ,由几何关系可知:

$$Path_m = Dis_{mC} - Fir^- \quad (18)$$

$$Path_b = \sqrt{(x_N - x_e^-)^2 + (y_N - y_e^-)^2} \quad (19)$$

将式(18)、式(19)代入式(17),则有:

$$\frac{\sqrt{(x_N - x_e^-)^2 + (y_N - y_e^-)^2} - Dis_{mC} + Fir^-}{V_a} > T^* \quad (20)$$

特别地,当拦截任务由核心节点执行时,有 $x_N = y_N = 0, Dis_{iC} = 0$,式(20)可化简为:

$$\frac{Fir^- - Dis_{mC} - Fir^-}{V_a} > T^* \quad (21)$$

当核心节点 C 、掩护节点 D_i 与来袭导弹探测点 M 处于一条直线,且两个节点的探测圆域相切、 M 位于掩护节点 D_i 的探测圆周时, Dis_{mC} 取得最大值,即 $Dis_{mC}^+ = 3\bar{R}_{det} = 1.5 \cdot (Det^- + Det^+)$;此时,当 M 位于核心节点 C 的最小探测圆周时, Dis_{mC} 取得最小值,即 $Dis_{mC}^- = Det^-$,则有:

$$Det^- \leq Dis_{mC} \leq 1.5 \cdot (Det^- + Det^+) \quad (22)$$

4) 防空导弹拦截路径可用性约束

如图 2 所示,设 $Thod$ 为拦截任务耗时,在核心节点 C 、掩护节点 D_i 、拦截相遇点 P 构成的三角形内,防空导弹的拦截路径长度为:

$$Path_a = V_a \cdot Thod \quad (23)$$

设 θ_M 为来袭导弹的方位角,根据余弦定理,相遇点 P 与核心节点 C 的距离 Dis_{PC} 可表示为:

$$(Path_a)^2 = (Dis_{PC})^2 + (Dis_{iC})^2 - 2 \cdot \cos|\theta_M - \theta_i| \cdot Dis_{PC} \cdot Dis_{iC} \quad (24)$$

将式(23)代入式(24),可得:

$$(V_a \cdot Thod)^2 = (Dis_{PC})^2 + (Dis_{iC})^2 - 2 \cdot \cos|\theta_M - \theta_i| \cdot Dis_{PC} \cdot Dis_{iC} \quad (25)$$

为防止节点间的相互误伤,任意掩护节点的防空导弹不能经过核心节点周围半径为 Fir^- 的圆域,因此应满足:

$$Dis_{PC} \geq Fir^- \quad (26)$$

只有当来袭导弹处于掩护节点的打击范围时才可能执行拦截任务,为此有:

$$Fir^- \leq Path_a \leq Fir^+ \quad (27)$$

将式(27)代入式(23),得到 $Thod$ 的取值范围为:

$$\frac{Fir^-}{V_a} \leq T_{hod} \leq \frac{Fir^+}{V_a} \quad (28)$$

2.3 双层规划模型

OFAS 优化是在确保编队整体空情预警、火力打击覆盖范围尽可能大的基础上,提高抗饱和和攻击能力,提升防空作战效能^[11]。

1) 上层模型

由式(1)、式(4)一式(6),得到 OFAS 优化的上层模型为:

$$\max Lon = \sum_{i=1}^n Dis_{iC}$$

$$s. t. \begin{cases} 0 < Dis_{iC} \leq \frac{Det^- + Det^+}{2 \cdot \sin(\frac{\beta - \alpha}{2n})} \\ 2Fir^- < Dis_{iC} < Fir^- + Fir^+ \\ Dis_{iC} = Dis_{(i-1)C} \\ i \in [1, n], i \in N^* \end{cases}$$

2) 下层模型

由式(7) - 式(9)、式(13) - 式(16)、式(20)、式(22)、式(25) - 式(26)、式(28), 得到 OFAS 优化的下层模型为:

$$\max Sat^F = Sat^C + \sum_{i=1}^n Sat_i^D$$

s. t.

$$\begin{cases} \bigcup_{i=1}^n (\phi_i^- + \arctan \frac{Det^- + Det^+}{2 \cdot Dis_{iC}}) \supseteq (\alpha, \beta) \\ \theta_i = \phi_i^- + \frac{\Delta \phi_i}{2}, \theta_i - \theta_{i-1} = \Delta, \theta_1 - \alpha = \beta - \theta_n \\ \alpha \leq \theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_n \leq \beta \\ \frac{\sqrt{(x_N - x_e^-)^2 + (y_N - y_e^-)^2}}{V_a} - \frac{Dis_{mC} - Fir^-}{V_m} > T^* \\ Det^- \leq Dis_{mC} \leq 1.5 \cdot (Det^- + Det^+) \\ Dis_{PC} \geq Fir^- \\ (V_a \cdot T_{hod})^2 = (Dis_{PC})^2 + (Dis_{iC})^2 - 2 \cdot \cos|\theta_M - \theta_i| \cdot Dis_{PC} \cdot Dis_{iC} \\ Sat^C = \frac{1}{\ln(1 + V_m/V_a)} \cdot \ln(\frac{Fir^+ + V_a \cdot T^*}{Fir^- + V_a \cdot T^*}) + 1 \\ Sat_i^D = \frac{1}{V_m \cdot T^*} \cdot |\frac{\sqrt{Dis_{iC}^2 + Det^{+2}} - 2 \cdot Dis_{iC} \cdot Det^+ \cdot \cos(270^\circ - \theta_i)}{Fir^-}| \\ \frac{Fir^-}{V_a} \leq T_{hod} \leq \frac{Fir^+}{V_a} \\ \phi_i^- \in [0, \beta], i \in [1, n], i \in N^*, \Delta \theta \in C(\text{常数}) \\ x_N, y_N, x_e^-, y_e^-, V_a, V_m \geq 0 \end{cases}$$

OFAS 双层规划模型综合考虑了部署结构、作战效能之间的影响, 上、下层既紧密联系又相互制约。上层目标通过增加掩护节点 D_i 与核心节点 C 的距离 Dis_{iC} , 扩大了编队整体的空情预警、火力打击覆盖的范围, 但容易使预警探测出现薄弱区域、多个危险方向甚至盲区, 从而降低编队抗饱和和攻击能力^[12]; 下层目标通过均衡各掩护节点方位角 θ_i , 减小距离 Dis_{iC} , 能有效限制作战编队结构扩大化。通过上、下层之间的交互式迭代作用, 逐渐寻求最佳的编队防空结构及抗饱和和攻击能力。

3 模型求解

OFAS 优化模型是一个非线性双层规划模型, 存在明显的主从递阶求解结构, 上、下层模型在求解中互相支撑, 通常是非凸不可微的问题, 求解过程相对复杂, 具有层次性、独立性、冲突性、优先性、自主性、制约性等特点^[13-14]。针对该类问题, 一般通过设计启发式算法, 分别求解上、下层模型, 然后反复迭代优化结果, 直至收敛。常用算法有迭代分配算法、直接搜索算法、K-T 算法、粒子群算法、分枝定界法、互补旋转算

法、下降算法等。本文采用层次粒子群算法进行求解。

3.1 算法原理

层次粒子群算法是以标准粒子群算法为基础, 通过层次算法框架进行求解的变形算法, 实质是将双层规划问题转化为上层或下层决策变量条件下的单层优化问题, 两层模型的求解结果互为对方的输入条件。在优化过程中, 通过应用多种群智能体自组织动力学模型, 迭代求解双层规划中所涉及的优化问题, 实现上、下层种群博弈寻优。

一方面, 在获得下层规划最优解 y^* 的基础上, 求解上层规划最优解。另一方面, 在上层规划最优解 x^* 的基础上, 求解下层规划最优解 y^{**} , 然后再次将 y^{**} 传递到上层规划中, 作为上层优化求解的基础。以此类推, 下层群体的任一个体均与上层群体的个体进行博弈。通过上、下两层模型的标准粒子群算法反复交互迭代和协同作用, 逐渐缩小求解范围, 使最优解空间进一步聚焦, 从而逼真模拟算法决策过程, 有序完成求解寻优。其复制动态方程为:

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= x_i(t) + x_i(t) \cdot [(AX(t))_i - X(t)^T \cdot AX(t)] \\ y_i(t+1) &= y_i(t) + y_i(t) \cdot [(AY(t))_i - Y(t)^T \cdot AY(t)] \end{aligned}$$

其中, $x_i(t), X(t), AX(t)_i$ 分别为上层种群 X 采用策略 i 的比例、混合策略状态向量、收益矩阵; $y_i(t), Y(t), AY(t)_i$ 分别为下层种群 Y 采用策略 i 的比例、混合策略状态向量、收益矩阵; $i, j \in [1, n]$ 。

为降低计算复杂度, 通常限定粒子种群迭代次数为外层循环当前次数, 以确保进化初期, 当上层解不精确时, 下层解的精度要求可适当降低。当上层问题给定允许决策解后, 若下层问题的最优解不唯一, 将会显著增加整个算法求解的复杂度, 有时甚至导致求解过程陷入反复循环迭代中, 无法保证能够获得满足要求的最优解。

3.2 基本流程

整个求解过程基于粒子群算法进行, 文献[14]已对粒子群算法进行了详细介绍, 此处不再赘述。

步骤 1 参数设定与种群初始化。设定上层种群规模 S^u , 生成种群 $E^u = \{E_i^u\}$ (E_i^u 表示个体 $i, i \in [1, S^u]$); 设定下层种群规模 S^l , 生成种群 $E^l = \{E_i^l\}$ (E_i^l 表示个体 $i, i \in [1, S^l]$); 同时设定粒子数 N 、粒子长度 L 、最大速度 V^+ 、加速因子 p 与 q 、约束违背度容限 U 、最大迭代次数 R ; 分别根据上、下层问题的决策变量取值范围, 随机初始化 1 个符合条件的种群。

步骤 2 针对上层种群中给定的个体 E_i^u , 利用粒子群算法求解下层规划的最优解 E^{l*} , 将该最优解作为整个层次粒子群算法求解的基础。

步骤 3 针对下层种群的每个个体 E_i^l , 利用粒子群算法求解上层规划的最优解 E^{u*} 。

步骤 4 根据多目标优化的非支配关系, 对上层种群 E^{u*} 、下层种群 E^{l*} 所组成的笛卡尔集合进行排序^[14]。解的 Pareto 最前端为非支配解集合, Pareto 次前端受制于最前端。每个 Pareto 前端中的个体依据自身适应度、前端等级依次排列。

步骤 5 以种群个体的前端等级、拥挤距离为依据,采用二进制锦标赛方法,选择 Pareto 前端等级低或拥挤距离大的父代个体^[13,15]。再将前端集中个体与当前子代个体进行非支配排序,从中选择 L 个个体,进入下一代种群集合。重复该步骤,迭代次数增加 1 次,即可实现不同种群之间的相互迭代。

步骤 6 判断是否达到最大迭代次数 R ,若达到,则算法终止,Pareto 前端集中的个体为最优解集合,再结合实际,从中选择一个作为最终方案 E^* ;否则转步骤 2 继续进行。

3.3 算法分析

在时间复杂度方面,步骤 2 和步骤 3 是算法中的基本语句,设上、下层种群规模分别为 n_1 和 n_2 (n_1, n_2 为变量),则步骤 2 和步骤 3 的时间复杂度分别为 $O(n_1)$ 和 $O(n_2)$,整个算法的时间复杂度为 $O(n_1) + O(n_2) = O(n)$,此为典型的线性阶。在计算开销方面,每次迭代的种群个体的数量不变,设第 i 步迭代的种群个体数量为 S_i ($i \in [1, R]$),因此有 $S_1 =$

$S_2 = \dots = S^R = S^u + S^l$ 。设每个种群个体 1 次迭代需要的运算时间为 T_T ,则算法运行的总时间为 $R \cdot T_T \cdot (S^u + S^l)$ 。在收敛性方面,本算法以经典的粒子群算法为基础,由于粒子群算法具有扩展搜索空间、避免陷入局部极小值的机制,因此本算法总体效率较高、全局收敛性较强。

4 案例分析

假设在我国南海某海域,由 1 艘导弹驱逐舰和 4 艘导弹护卫舰组成的水面舰艇编队正在执行海域巡逻任务。驱逐舰为指挥舰,是编队的核心节点;护卫舰是掩护节点。各舰防空导弹型号相同、数量充足,在空天信息的支援下,对空中来袭目标进行探测。依托舰载数据链,任意一艘舰发现目标,其余舰都可共享信息,并由驱逐舰统一指挥各舰进行防御。

4.1 运算求解

通过查阅资料及咨询相关专家,确定各参数值,如表 1 所列。出于保密原因,各参数取值均不反映现实情况。

表 1 参数设置
Table 1 Setting of parameters

参数	n	β	T^*	y_c	L	Det^+	Dis_{m0}	V_a	S^u	V^+	Det^-	Fir^-	V_m	S^l	G	a	Fir^+	x_c	N	R
数值	4	220	7	0	2	30	230	816	20	2	20	10	306	20	2	20	80	0	10	400

将上述参数值代入双层规划模型中,应用层次粒子群算法进行求解运算,得到最优解为: $Dis_{1C} = Dis_{2C} = Dis_{3C} = Dis_{4C} = 47.3 \text{ km}$, $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 95^\circ, \theta_3 = 145^\circ, \theta_4 = 195^\circ$ 。相应地,优化目标 $Lon = 189.2 \text{ km}$, $Sat^F = 28$,最危险方向为 41° 和 199° 。

根据极坐标的转换公式,可得 4 艘护卫舰的坐标分别为: $D_1(33.5, 33.5), D_2(47.1, -4.1), D_3(27.1, -38.8), D_4(-12.3, -45.7)$ 。所对应的最佳编队防空结构如图 3 所示,其中菱形为各舰位置,圆形区域为编队最小侦察探测范围。

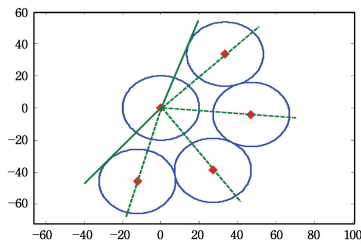


图 3 模型求解所得编队防空结构

Fig. 3 Formation air defense structure solved by model

图 3 中,4 艘护卫舰均匀分布在驱逐舰周围 $20^\circ \sim 220^\circ$ 易受敌方导弹袭击的范围内,与驱逐舰的距离相同,且各自的最小侦察探测圆形区域彼此相切,较好地实现了作战编队防空结构与抗饱和能力的均衡协调。

4.2 对比分析

为验证文中模型与方法的合理性,将模型求解所得结构与纵队、弧形编队两种典型的编队防空结构进行仿真对比分析。

4.2.1 方案设置

方案 A:纵队结构。4 艘护卫舰沿编队航行方向,等间距纵向排列在驱逐舰的前后方。各护卫舰的坐标分别为 $D_1(13.7, 37.6), D_2(-13.7, -37.6), D_3(-27.4, -75.2),$

$D_4(-41.1, -112.8)$ 。该方案的编队结构如图 4 所示。

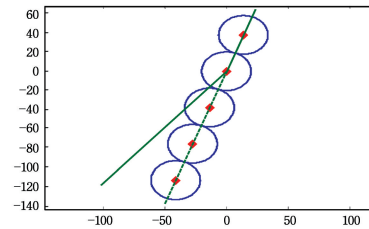


图 4 方案 A 的编队防空结构

Fig. 4 Formation air defense structure of scheme A

方案 B:弧形编队结构。4 艘护卫舰在驱逐舰周围等距离紧凑排列,各护卫舰的最小侦察探测范围均与相邻护卫舰、驱逐舰的最小侦察探测范围相交,编队内部不存在侦察探测盲区。各护卫舰的坐标分别为: $D_1(21.2, 21.2), D_2(29.9, -2.6), D_3(17.2, -24.6), D_4(-7.8, -28.9)$ 。该方案的编队结构如图 5 所示。

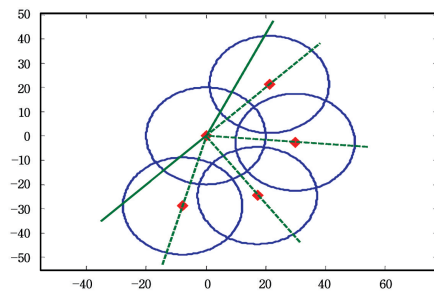


图 5 方案 B 的编队防空结构

Fig. 5 Formation air defense structure of scheme B

方案 C:求解 4.1 节所得的防空结构,如图 3 所示。

4.2.2 仿真对比

选取了以下 3 个度量指标:所有方向的平均拦截批次为

Sat_m ,用以衡量编队总体防空能力;各方向拦截批次的方差为 V ,用以反映编队防空能力的稳定性;所有方向的最小拦截批次为 Sat^- ,用以反映编队最薄弱方向的抗打击能力。针对以上3种方案,计算各方向的导弹拦截批次,结果如图6所示。

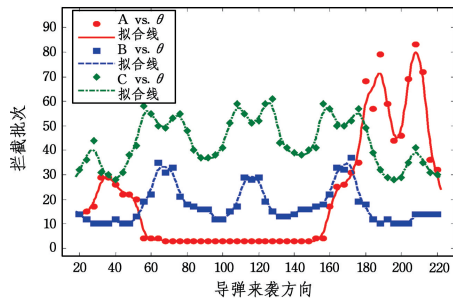


图6 3种方案在各方向上的导弹拦截批次

Fig. 6 Missile intercept batches of three schemes in different directions

根据图6,计算得出各方案的性能以及编队防空结构的最危险方向,如表2所列。

表2 3种方案的性能指标对比

Table 2 Comparison of performance indexes of three schemes

方案	Sat_m	V	Sat^-	最危险方向
方案 A	21	555.8	3	69°/151°
方案 B	18	50.7	10	38°/202°
方案 C	44	95.1	28	41°/199°

由图6和表2可知,方案A在各方向的导弹拦截次数起伏较大,虽然平均拦截批数与方案B接近,但在不同方向的拦截导弹批数的方差最大,表明该方案的拦截能力分布不均衡,总体稳定性最差。当导弹来袭方向未知且随机时,对驱逐舰的保护效果不佳。同时,在最危险方向的拦截批次仅为3批,该数据也是3种方案中最小的,这表明该方案的抗打击能力较差、防空作战效能较低。

方案B在各方向拦截批次的方差最小,这是因为弧形编队结构实现了护卫舰对导弹来袭方向的全向侦察覆盖,应对未知方向来袭导弹的效率更高、稳定性更好。但由于编队侦察探测距离较近、覆盖范围较小,未能有效发挥各舰的火力打击优势,导致平均拦截批次最少。同时,由于护卫舰靠近驱逐舰部署,扩大了驱逐舰附近的火力打击盲区,一旦来袭导弹逼近或二次捕获成功,会对驱逐舰造成较大威胁。

方案C除了各方向拦截批数的方差略大于方案B以外,其他两项指标均优于方案A和方案B,这是因为方案C综合考虑了护卫舰与驱逐舰之间的距离、侦察角度全向覆盖、抗饱和能力等因素,所以编队结构更加合理、防空作战效能更高。

结束语 系统科学认为,系统结构决定系统功能。通过优化作战单元的部署方式与结构,可有效提高作战组织的整体效能。本文综合考虑了全角度侦察覆盖、火力打击范围、导弹二次捕捉等因素,分别以掩护节点与核心节点距离最大、编队抗饱和攻击能力最强为上、下层目标,探索建立了OFAS双层规划模型,为优化编队结构提供了一种可行方法。不足之处在于,对作战单元在拦截过程中的相对运动、来袭导弹飞行路径动态时变等问题未进行深入研究,案例分析中编队结构类型较为传统和单一。后续还应结合作战实际,进一步改进和完善模型,增强求解算法与人工免疫、神经网络等算法收

敛的对比研究,以更好地适应复杂多变的战场环境,满足作战编队网络化防空作战的需要。

参考文献

- [1] HU X F. A brief survey on war complex networks studies [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2010, 7(2/3): 24-28. (in Chinese)
胡晓峰. 战争复杂网络研究概述[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2010, 7(2/3): 24-28.
- [2] LIU L J, LI X M, YAN J. Key-point air defense fan-shaped deployment with large-dimensional multi-objective multi-constraint group divided optimization [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(12): 2513-2520. (in Chinese)
刘立佳, 李相民, 颜骥. 基于高维多目标约束分组优化的要地防空扇形优化部署[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(12): 2513-2520.
- [3] ALBERTS D S. *The agility advantage: a survival guide for complex enterprises and endeavors* [M]. Washington DC: CCRP Publication Series, 2011: 4-10.
- [4] ZHU Z, LEI Y L, ZHU Y F. Modeling and simulation of operation process for networked air and missile defense systems [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(3): 179-184. (in Chinese)
朱智, 雷永林, 朱一凡. 网络化防空反导体系的作战过程建模与仿真[J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(3): 179-184.
- [5] ZHAO J Y, LIU F. Deployment optimization of two warships formation for air defense [J]. *Acat Armamentarii*, 2010, 31(6): 865-869. (in Chinese)
赵建印, 刘芳. 海上编队双舰防空队形部署优化研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(6): 865-869.
- [6] HUANG J C, CHEN S R, CHENG G Q. Modeling and analysis of air defense process for warship formation [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(3): 184-190. (in Chinese)
黄金才, 陈洒然, 程光权. 舰艇编队防空过程建模及分析[J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(3): 184-190.
- [7] WANG B Y, ZHAO X Z, WANG J. Optimizing the combat network on the anti-ship of vessel formation [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(9): 2354-2361. (in Chinese)
王步云, 赵晓哲, 王军. 水面舰艇编队反舰作战中作战网络结构的优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(9): 2354-2361.
- [8] JING F B, KANG X Y. Research on the firing times model of the anti-missile interception for surface ship formation [J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(3): 120-122. (in Chinese)
荆发标, 康晓予. 编队防空反导作战拦截次数模型[J]. *舰船科学技术*, 2011, 33(3): 120-122.
- [9] ZOU Z G, LIU F X, SUN S M, et al. Ripple-effect analysis for operational architecture of air defense systems with supernetwork modeling [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2014, 25(2): 249-263.
- [10] LEE M Z. Constrained weapon-target assignment enhanced very large scale neighborhood search algorithm [J]. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2011, 41(3): 598-606.



图3 部分实验对比图

Fig. 3 Partial experimental contrast

结束语 本文提出了一种基于随机森林算法的多尺度核相关滤波器跟踪算法。该算法首先提取样本,分别训练 HOG 特征滤波器和 CN 颜色特征滤波器,得到特征响应分布后进行响应融合,对最大融合响应进行遮挡判断,在未受到遮挡的情况下,对当前目标建立尺度池;然后通过尺度滤波器和先验概率求取自适应后的最大尺度响应,得到当前目标尺度信息;最后使用新目标图像为训练样本更新目标的外观模型和尺度模型,若受到遮挡,则触发重检测机制,在目标丢失后重新获取目标。实验结果表明,该方法的跟踪性能与原始 KCF 算法相比有所提高,并且明显高于其他 5 种经典算法。因此所提方法适用于具有光照变化、尺度变化和遮挡的复杂场景下的运动目标跟踪。

参考文献

[1] CHENG X T, TANG Z M. Scale Adaptive Target Tracking Algorithm for Robot[J]. Computer Science, 2014, 41(12): 280-

282. (in Chinese)

成新田,唐振民.一种尺度自适应的机器人目标跟踪算法[J].计算机科学,2014,41(12):280-282.

- [2] HUAN E Y, LI R. Particle Filter Object Tracking Based on Adaptive Feature Fusion[J]. Computer Science, 2015, 42(2): 316-318. (in Chinese)
- 郇二洋,李睿.基于自适应特征融合的粒子滤波目标跟踪算法[J].计算机科学,2015,42(2):316-318.
- [3] JING L. Incremental Learning for Robust Visual Tracking[J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 77(1-3): 125-141.
- [4] BABENKO B, YANG M H, BELONGIE S. Robust object tracking with online multiple instance learning [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(8): 1619-1632.
- [5] ZHANG K, ZHANG L, YANG M H. Real-Time Compressive Tracking [C] // European Conference on Computer Vision. Springer-Verlag, 2012: 864-877.
- [6] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-Learning-Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(7): 1409-1422.
- [7] BOLME D S, BEVERIDGE J R, DRAPER B A, et al. Visual object tracking using adaptive correlation filters[C] // IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, 2010: 2544-2550.
- [8] HENRIQUES J F, RUI C, MARTINS P, et al. Exploiting the Circulant Structure of Tracking-by-Detection with Kernels[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2012, 7575(1): 702-715.
- [9] HENRIQUES J F, RUI C, MARTINS P, et al. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 37(3): 583-596.
- [10] DANELLJAN M, HÄGER G, KHAN F, et al. Accurate scale estimation for robust visual tracking[C] // British Machine Vision Conference, Nottingham, BMVA Press, 2014.
- [11] DANELLJAN M, HÄGER G, KHAN F S, et al. Accurate Scale Estimation for Robust Visual Tracking[C] // British Machine Vision Conference, 2014: 1-11.
- [12] DANELLJAN M, KHAN F S, FELSBURG M, et al. Adaptive Color Attributes for Real-Time Visual Tracking[C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014: 1090-1097.
- [13] OZUYSAL M, CALONDER M, LEPETIT V, et al. Fast Keypoint Recognition Using Random Ferns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 32(3): 448-461.

(上接第 272 页)

[11] BARKALOV A A, BABAKOV R M. Operational formation of state codes in microprogram automata [J]. Cybernetics and Systems Analysis, 2011, 47(2): 193-197.

[12] BAYRAK A E, POLAT F. Employment of an evolutionary heuristic to solve the target allocation problem efficiently [J]. Information Sciences, 2013, 222(3): 675-695.

[13] LI C B, DU M K, FU D Q. Solution strategy for bi-level nonlinear programming problem based on hierarchical particle swarm optimization [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(9): 2292-2293. (in Chinese)

李昌兵,杜茂康,付德强.基于层次粒子群算法的非线性双层规划问题求解策略[J].系统工程理论与实践,2013,33(9):2292-2293.

- [14] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [15] JIA S H. A New Descent Method for Solving Ill-Posed Bilevel Programming Problems via Maxmin Model[C] // The fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2013: 47-50.