

多层反导体系火力部署优化

周晓光, 李为民, 谢鑫

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要 研究了多层反导体系火力部署优化问题。首先介绍了多层反导体系的概念及火力组成, 分析了反导体系发展的趋势; 其次分析了组成多层反导体系火力系统的反导拦截平台部署的基本要求; 再次, 由于反导作战是一个攻防对抗的过程, 因此从博弈角度出发, 建立了多层反导体系火力部署 $\min - \max$ 模型, 并对求解 $\min - \max$ 模型的求解算法进行了分析。最后针对实例, 应用多层反导体系火力部署 $\min - \max$ 模型对多层反导作战部署进行了优化分析, 仿真结果表明: 只有合理部署各种反导火力平台, 构成一体化反导作战部署, 才能达到体系的最优化。研究结果可为多层反导体系反导拦截平台协同部署提供有效的方法和途径。

关键词 多层反导体系; 火力部署; $\min - \max$ 模型

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.03.009

中图分类号 V271.4 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)03-0040-05

国内外弹道导弹防御体系发展的一个重要趋势是构建具备多层拦截能力的弹道导弹防御体系^[1-2]。按照弹道导弹的飞行阶段, 其防御体系一般分为3段4层。3段防御体系是把防御体系划分为: 兼有助推段的上升段防御体系, 中段防御体系和末段防御体系。4层防御体系即把末段防御体系分为末段高层防御体系和末段低层防御体系, 与助推段和中段防御体一起构成4层防御体系。随着对末段反导作战需求的不断深入和反导武器装备的发展, 国外又提出了末段4层防御体系, 即: 大气层、过度层、外大气层下层和外大气层上层。随着空基、天基反导武器系统的研究与应用, 将进一步丰富多层反导体系的拦截层构成, 从而构成对弹道导弹全程、多次拦截能力。

目前, 针对反导火力部署的研究大多数是针对末段反导部署的^[3-4], 不能构成多层反导体系整体上的优化, 因此本文以多层反导体系火力部署为研究对象, 应用对策理论研究了多层反导体系火力部署问题。

1 多层反导体系火力部署的基本要求

多层反导体系火力部署的基本要求是反导拦截平台的拦截杀伤区必须覆盖可能来袭弹道导弹的飞行弹道。文献[3]对末段低层反导作战的基本部署样式进行了定量研究, 文献[4]对末段高低2层反导部署的基本部署样式进行了分析, 得出了末段高低2层反导作战部署的优化方案。

由于弹道导弹中段拦截的反导拦截平台拦截距离大, 拦截高度区间高, 因此进行中段的反导拦截平台部署时, 必须考虑潜在威胁的弹道导弹的飞行高度问题。例如, 如果潜在威胁的弹道导弹中段飞行高度小于500 km, 那么部署 SM3 Block 1A 是没有拦截能力的。

助推段反导拦截平台的部署首要问题是对拦截平台对发射点的距离要求苛刻。ABL (Air Borne Laser, ABL) 反导拦截平台要求部署与距弹道导弹发射点 200 km 以内^[4]; 文献[5]分析地基动能拦截平台助推段反导作战部署的基本要求, 在采用近最优制导规律的情况下, 沿弹道导弹发射方向, 在(0 km, 90 km) 处区

* 收稿日期: 2010-12-13

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2009AA7010XXX)

作者简介: 周晓光(1982-), 男, 吉林蛟河人, 博士生, 主要从事防空反导作战运筹分析研究。

E-mail: Jhanglili2117@163.com

域,是地基动能拦截反导拦截平台助推段反导非可行域,其原因主要是该点发射的动能拦截弹超出了其空气动力学限制,沿弹道导弹发射方向,在(0 km, 150 km)区域是最优部署区域,部署于该地基的地基动能拦截反导拦截平台助推段反导作战的效能最高。

2 多层反导体系火力协同部署模型

为方便建模,引入如下变量:①描述弹道导弹进攻方变量及意义: L 表示弹道导弹的发射点位置集; M 表示弹道导弹的类型集; $missile_{l,m}$ 表示类型为 m ,位于 l 的导弹; T 表示弹道导弹进攻的目标集,其中每一个目标 $t \in T$ 具有 $value_t$ 的价值; A 表示弹道导弹进攻方可采用的行动集,其中的一次行动 $a \in A$ 表示发射位于 $l_a \in L$,类型为 $m_a \in M$ 的弹道导弹对目标 $t_a \in T$ 进行打击,其杀伤概率为 k_a ,期望杀伤收益为 $k_a value_t$;对于进攻者而言,其目标函数是选择适当的弹道导弹与打击目标进行配对,以获得总体上的最大期望杀伤效果。②描述弹道导弹防御方变量及意义: P 表示反导火力平台; C 表示反导火力平台的类型集,对于一反导火力平台 $p \in P$,其平台的类型为 $c_p \in C$; G 为反导火力平台可部署域集,对于每类平台的可部署位置集 $G_c \in G$; 每种反导武器平台可携带的拦截器类型集为 I , $loadout_{c,i}$ 表示类型 $c \in C$ 的反导火力平台携带着类型为 $i \in I$ 的拦截器;对于弹道导弹的进攻行动 a 而言, $d \in D$ 表示反导火力平台在该次作战过程中可采用的行动集, $salvo_{a,c,d,i}$ 表示针对进攻方的行动 a ,防御方使用平台类型为 c 的反导火力平台,采取防御策略 d ,发射拦截弹类型为 i 的拦截弹的数量, $Pk_{a,c,g,d}$ 表示对于敌方打击行动 a ,预先部署在 g 的类型为 c 的平台,发射类型 i 的拦截弹对其进行拦截的成功概率。 $d \in D$ 的具体意义:针对弹道导弹的进攻行动 a ,防御方采用 $salvo_{a,c,d,i}$ 枚拦截弹对其进行拦截,其拦截概率为 $Pk_{a,c,g,d}$ 。对于防御方而言,其目标是通过最优化的预先部署,最小化敌方弹道导弹进攻方对我方的最大杀伤期望。引入如下变量:

$$Y_a = \begin{cases} 1, & \text{进攻采取 } \alpha \text{ 行动} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$X_{p,g} = \begin{cases} 1, & \text{火力平台 } p \text{ 部署于 } g \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$R_{a,p,g,d} = \begin{cases} 1, & \text{部署于 } g \text{ 的火力平台 } p \text{ 对进攻 } \alpha \text{ 采取防御行动 } d \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$\min - \max$ 模型最早被用于网络对抗的最短路径的研究问题上^[5-6],并取得了大量的研究成果。本文采用 $\min - \max$ 描述反导作战。根据进攻方和防御方的行动模型,联立进攻方和防御方的目标函数,建立多层反导拦截平台部署 $\min - \max$ 模型如下:

$$\min_{\{X, R\} \in X} \left\{ \begin{array}{l} \max_Y \sum_a value_{t_a} \left(k_a \prod_{Pk_{a,c_p,g,d} R_{a,p,g,d}} (1 - Pk_{a,c_p,g,d} R_{a,p,g,d}) \right) Y_a \\ \text{s. t.} \quad \sum_{a|l=l_a \wedge m=m_a} Y_a \leq \text{missiles}_{l,m} \quad \forall l \in L, m \in M[\alpha_{l,m}] \\ \sum_{a|t=t_a} Y_a \leq \max_- \text{missiles}_t \quad \forall t \in T[\beta_t] \\ 0 \leq Y_a \leq 1 \quad \forall a \in A[\gamma_a] \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: $\max_- \text{missiles}_t$ 为用于攻击目标 t 的最大弹道导弹数量; $[\cdot]$ 内变量是相应的对线性规划偶变量;第一行为模型的目标函数,描述保卫目标毁伤值,进攻者的目标是选择适当的弹道导弹杀伤期望,以期获得对目标最大期望杀伤效果;第2行为因发射位置约束限制的弹道导弹数量的约束条件;第3行为对每个进攻目标的最大可用弹道导弹数量的约束条件;第4行为对弹道导弹发射行动的约束,保证一个弹道导弹仅能对一个目标进行打击。

防御方平台拦截行动约束条件 $\{X, R\} \in X$:

$$\begin{aligned} \sum_{g \in G} X_{p,g} &\leq 1, \quad \forall p \in P \\ \sum_{p \in P} X_{p,g} &\leq 1, \quad \forall g \in G \\ \sum_{p \in P, g \in G, d \in D} R_{a,p,g,d} &\leq 1, \quad \forall a \in A \\ \sum_{a \in A, d \in D} \text{salvo}_{a,c_p,d,i} R_{a,p,g,d} &\leq \text{loadout}_{c_p,i} X_{p,g}, \quad \forall p \in P, g \in G_{c_p}, i \in I \\ X_{p,g} &\in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, g \in G \\ R_{a,p,g,d} &\in \{0,1\}, \quad \forall a \in A, p \in P, g \in G, d \in D \end{aligned} \quad (2)$$

式中约束条件第 1 行为每个火力平台最多只能部署在一个栅格位置;第 2 行为每个栅格位置最多只能部署一个火力平台;第 3 行为对于每次攻击最多仅进行一次拦截,第 4 行为每个栅格处的火力平台的作战任务数量;第 5、第 6 行为二元决策变量。

3 多层反导体系火力协同部署模型的求解算法

多层反导火力平台协同部署 $\min - \max$ 模型的求解方法主要有 2 种,一是根据线性规划对偶原理,把 $\min - \max$ 问题化为 $\min - \min$ 问题^[7-8],二是根据 bender 分解原理,分解成 2 个子问题进行求解。本文采用把 $\min - \max$ 问题化为 $\min - \min$ 问题进行求解的方法。

假定双方都可以看见对方的准备工作。对于固定的 R ,如果 $\text{missile}_{l,m}$, max-salvo , 都是整数,进攻者的目标函数最大化问题可以用整数规划来描述,并且求得最优解 Y^* 。为使用这一结论,应用对偶原理构建混合整数线性规划的最小化问题。即:

$$\begin{aligned} \min_{\alpha, \beta, \gamma, X, R, l \in L, m \in M} & \sum \text{missiles}_{l,m} a_{l,m} + \sum_{t \in T} \text{max-missiles}_t \beta_t + \sum_{a \in A} \gamma_a \\ \text{s. t. } & \alpha_{l_a, m_a} + \beta_a + \gamma_a \geq \sum_a \text{value}_{t_a} \left(k_a \prod_{p \in P, g \in G, d \in D} (1 - 1 - Pk_{a,c_p,g,d} R_{a,p,g,d}) \right), \forall a \in A \\ & \sum_{g \in G} X_{p,g} \leq 1, \quad \forall a \in A \\ & \sum_{p \in P} X_{p,g} \leq 1, \quad \forall p \in P \\ & \sum_{p \in P, g \in G, d \in D} R_{a,p,g,d} \leq 1, \quad \forall a \in A \\ & \sum_{\alpha \in A, d \in D} \text{salvo}_{a,c_p,d,i} R_{a,p,g,d} - \text{loadout}_{c_p,i} X_{p,g} \leq 0, \quad \forall p \in P, g \in G_{c_p}, i \in I \\ & X_{p,g} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, g \in G_{c_p} \\ & R_{a,p,g,d} \in \{0,1\}, \quad \forall a \in A, p \in P, g \in G, d \in D \\ & \alpha_{l,m} \geq 0, \quad \forall l \in L, m \in M; \beta_t \geq 0, \quad \forall t \in T; \gamma_a \geq 0, \quad \forall a \in A \end{aligned} \quad (3)$$

用这个模型求解所得到的可行解 X^* 和 R^* ,代入攻击方的最优问题便可得到相对应的攻击方案 Y^* 。这个模型一个显著的特点是攻击方能预见防御方兵力部署情况,因此,变量 R^* 的含义从“拦截这些 TBM 目标”变为“发射拦截弹对可能的 TBM 攻击进行拦截”。并非所有的拦截计划都将执行,这是因为攻击方能预见他的某些攻击将会被防御方拦截,在这种情况下,他可能放弃某些攻击计划。

4 仿真分析

作战想定:假定某岛屿有 3 处弹道导弹发射井,发射井 1 位于 (E121.18°, N22.75°),发射井 2 位于

(E120.46°,N23.50°),发射井 3 位于(E121.05°,N24.85°)。其空袭目标有 3 处:目标 1 位于(E116.38°,N39.9°);目标 2 位于(E121.4°,N31.24°);目标 3 位于(E114.2°,N30.5°)。发射井可发射 TBM 类型、目标价值和敌发射可实施空袭的方案及对目标的摧毁概率见表 1。

表 1 作战基本想定

Tab. 1 Based operation initialization

发射井编号	可发射 TBM 类型	目标编号	目标价值	可实施空袭方案	摧毁概率
1		1	10	类型 1TBM	0.75
1	类型 1 射程 2 000 km	2	8.5	否	
1		3	7.5	否	
2	类型 1 射程 2 000 km	1	10	类型 1TBM	0.75
2	类型 2 射程 1 000 km	2	8.5	类型 2TBM	0.85
2		3	7.5	类型 2TBM	0.95
3		1	10	否	
3	类型 2 射程 1 000 km	2	8.5	类型 2TBM	0.75
3		3	7.5	类型 2TBM	0.95

假定拦截平台的类型主要有 3 类:①末段低层防御平台 P-Terminal 2 个,构成 30-40 km 以下末段低层防御层,对目标的拦截概率为 50%;②末段高层防御平台 T-Terminal 2 个,其拦截高度为 200 km,构成末段高层防御层,对目标的拦截概率为 75%;③上升段海基拦截平台 S-Ascend 2 个,拦截高度为 120 km,构成上升段防御层,对目标的拦截概率为 85%。空基动能反导拦截平台 A-Boost 1 个,拦截高度为 50 km,构成助推段防御层,对目标的拦截概率为 85%。为确定各类防御平台的可部署区域 G,把该地区进行栅格化,每度为一个栅格,见图 1。

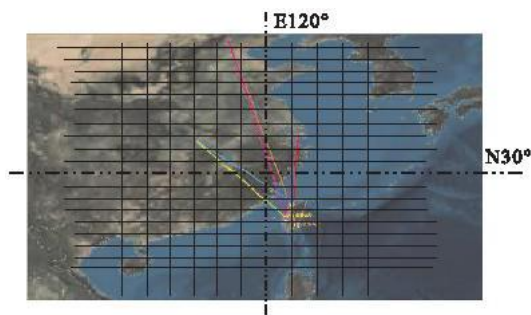


图 1 反导平台作战部署栅格

Fig. 1 Operation deployment grid

各类平台的基本部署要求,可以确定平台的可部署区域: $G_{P_Terminal} = \{(E116^\circ, N40^\circ), (E121^\circ, N31^\circ), (E114^\circ, N30^\circ)\}$, $G_{T_Terminal} = \{(E117^\circ, N38^\circ), (E121^\circ, N30^\circ), (E115^\circ, N30^\circ)\}$, $G_{A_Ascend} = \{(E121^\circ, N25^\circ), (E120^\circ, N24^\circ), (E120^\circ, N23^\circ)\}$, $G_{A_Boost} = \{E121^\circ, N23^\circ\}, (E120^\circ, N23.50^\circ), (E121^\circ, N25^\circ)\}$ 。

1) 无防御的最优 TBM 攻击方案:表 2 给出了在无防御情况下的 TBM 的最优化攻击方案,假定对每个未设防的目标仅发射一枚 TBM 进行空袭,造成了 15.437 5 的期望毁伤值。

2) 最优防御部署方案:假定攻击方不能预见防御方战前准备情况,而防御方事前知道所有的 TBM 攻击,所以能够按最优化部署方案定位部署反 TBM 武器系统,拦截武器以一定的杀伤概率拦截来袭的 TBM,假定每个反导拦截平台采用一枚动能拦截弹对目标进行拦截,则其最大期望毁伤值为 1.220 313,表 2 给出了最优防御部署方案。

3) 双边透明的双边最优化方案:若双方都能观察到对方的情况,防御方知道攻击方会使其部分 TBM 穿过防御,攻击方则能够观察到并利用防御方的兵力部署情况,防御目的是最小化期望最大毁伤。经过计算目标期望毁伤值为 1.395 938,比最大期望毁伤减小了 90.1%。表 2 给出了在给定透明度条件下双边优化方案仿真结果。

表 2 仿真结果

Tab.2 Simulation results

仿真方案	部署方案	效能值
无防御的最优 TBM 攻击方案	发射井 1 发射类型 1, TBM 空袭目标 1; 发射井 2 发射类型 2, TBM 空袭目标 2; 发射井 3 发射类型 2, TBM 空袭目标 3。	15.437 5
最优防御部署方案	2 个 P_Terminal 平台分别部署: (E116°, N40°), (E114°, N30°); 2 个 T_Terminal 平台分别部署: (E117°, N38°), (E121°, N30°); 2 个 S_Ascend 平台分别部署: (E121°, N25°), (E120°, N24°); 1 个 A_Boost 平台分别部署: (E121°, N25°)。	1.220 313
双边透明的双边最优化方案	发射井 1 发射类型 1, TBM 空袭目标 1; 发射井 2 发射类型 2, TBM 空袭目标 3; 发射井 3 发射类型 2, TBM 空袭目标 2; 2 个 P_Terminal 平台分别部署: (E116°, N40°), (E114°, N30°); 2 个 T_Terminal 平台分别部署: (E117°, N38°), (E115°, N30°); 2 个 S_Ascend 平台分别部署: (E121°, N25°), (E120°, N24°); 1 个 A_Boost 平台分别部署: (E120°, N23.50°)。	1.395 938

5 结束语

多层反导体系反导拦截平台协同部署是一个复杂的、对抗性的作战活动。从仿真结果可以看出,从博弈角度出发,综合考虑 TBM 空袭和防御方的防御部署拦截方案对多种类型的反导拦截平台进行部署,是符合作战实际的。通过实例对多层反导体系的反导拦截平台协同部署的方法和实现过程进行验证,并且获得了最优的部署方案。该模型可为多层反导体系反导拦截平台协同部署提供有效的方法和途径。

参考文献:

- [1] MacKay N J. Lanchester combat models[J]. Mathematics today, 2006, 42: 170 - 173.
- [2] Brown G, Carlyle M, Diehl D, et al. Two - sided optimization for theater ballistic missile defense[J]. Operations research, 2005, 53(5): 15 - 18.
- [3] 刘健. 地空导弹兵作战部署定量分析方法研究[D]. 西安:空军工程大学, 2002.
LIU Jian. Study on quantitative analysis methods for operational disposition of ground - to - air missile force[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2002. (in Chinese)
- [4] 陈良中. 低空导弹兵末端反 TBM 火力协同优化研究[D]. 西安:空军工程大学, 2006.
CHEN Liangzhong. Research on optimization of fire co - operation in surface - to - air missile troop anti - tactical ballistic missile engagement in terminal phase[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2006. (in Chinese).
- [5] Wen Wai Leong. Trade - off study for the hit - to - kill interception of ballistic missile in the boost phase[D]. California: Naval postgraduate school, 2009.
- [6] Diehl D D. How to optimize joint theater ballistic missile defense[D]. California: Naval postgraduate school, 2004.
- [7] Benders J F. Partitioning procedures for solving mixed integer variables programming problems[J]. Num math, 1962, 11(4): 238 - 252.
- [8] Israeli E. System interdiction and defense[D]. California: Naval postgraduate school, 1999.
- [9] Birge J R. Sublinear upper bounds for stochastic programs with recourse[J]. Math prog, 1989, 43: 131 - 149.
- [10] Wood R K. Deterministic network interdiction[J]. Mathematical and computer modeling, 1993, 17: 1 - 18.

(编辑:田新华)

(下转第 49 页)