

弹道导弹攻防对抗的对策模型

黄树彩, 李为民, 李威

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:针对现代空袭的弹道导弹突击,设计了弹道导弹攻防对抗的对策模型。把导弹攻击的行动表示为能造成最大预期伤害的数学模型,然后指出如何最优化防御拦截系统部署及拦截方案以期最小化最大期望毁伤,仿真实例说明了弹道导弹攻防对抗对策方法的有效性。

关键词:弹道导弹;优化;决策;模型

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2007)03 - 0023 - 03

远距离非接触式的精确打击已成为现代空袭的主要手段,其中战区弹道导弹已成为大量和重复使用的主要空袭兵器。而且各国目前正在寻求智能化程度更高的导弹和武器系统来替代现有的设计方案^[1]。战区弹道导弹、巡航导弹及包括精确制导武器在内的空防对抗不仅是武器对武器的对抗战,系统对系统的对抗战,也是信息的对抗战。因此弹道导弹的攻防对抗作战已成为现代空防作战研究的主要问题^[2-5]。本文针对现代空袭的弹道导弹突击,设计弹道导弹攻防对抗的对策模型,用计算机在几分钟内,就能通过这个模型解出一个最优的弹道导弹防御方案。

1 导弹攻防对抗的对策模型

1.1 极小化极大期望毁伤对策模型

定义攻击方弹道导弹发射地点集合 L , 导弹类型集合 M , 在位置 $l \in L$ 类型为 $m \in M$ 的导弹数量为 $MIS_{m,l}$, 导弹攻击的目标集合 T , 每个 $t \in T$ 赋予价值 v_t 。一次攻击 $a \in A$ 包括一个发射位置 $l_a \in L$ 指向目标 $t_a \in T$ 的 $m_a \in M$ 类型的导弹, 将以概率 k_a 打击目标。攻击方的问题是决定哪枚导弹打击哪个目标, 使对目标造成的预期毁伤最大。若目标价值为 v_t , 则该攻击的预期毁伤是 $k_a v_t$ 。

定义防御方拥有防御平台类型集合 C , 防御平台集合 P , 每个平台类型 $C_p \in C$ 。平台部署位置集合 G 。类型为 c 的平台的允许部署位置集合 $G_c \subseteq G$ 。类型为 c 的平台装载拦截武器类型集合 I , 在类型 $c \in C$ 的平台上的类型为 $i \in I$ 的拦截武器数量为 $LOA_{c,i}$ 。一次攻击 a 可以被一个计划的防御行动 d 防御, 这里防御 $d \in D$ 发射 $SAL_{a,c,d,i}$ 个拦截武器, 以概率 $PK_{a,c,p,g,d}$ 成功拦截攻击弹道导弹。防御方的问题是最优化拦截攻击弹道导弹的部署。同时攻击方(可能)能够观测到所有防御准备并寻找防御中的任何弱点加以优化攻击, 防御目的是使保卫目标受到的总预期最大毁伤为最小。

定义变量 Y_a 、 $X_{p,g}$ 和 $R_{a,p,g,d}$, 若实施攻击 a , 则 $Y_a = 1$, 否则为 0; 若平台 p 部署在 $g \in G$ 位置, 则 $X_{p,g} = 1$, 否则为 0; 若攻击 a 被在 g 位置的平台 p 实施拦截方案 d 进行了拦截, 则 $R_{a,p,g,d} = 1$ 否则为 0。极小化极大预期毁伤最优化攻击对策模型设计为

$$\max \sum_a v_{t_a} (k_a (1 - \sum_{p \in P, g \in G, d \in D} PK_{a,c,p,g,d} R_{a,p,g,d})) Y_a \tag{1}$$

$$\text{st } \sum_{a | m = m \wedge l = l_a} Y_a \leq MIS_{m,l}, \quad \forall m \in M, l \in L \tag{2}$$

收稿日期: 2006-06-13

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA701304)

作者简介: 黄树彩(1967-), 男, 湖北黄梅人, 教授, 博士, 主要从事智能控制与决策研究;

李为民(1964-), 男, 甘肃民勤人, 教授, 博士生导师, 主要从事军事运筹与工程研究。

$$\sum_{a|t=t_a} Y_a \leq \max_mis_t, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$Y_a \in \{0,1\}, \quad \forall a \in A \quad (4)$$

以上4式中:攻击方的目的是最大化期望的目标毁伤式(1);约束式(2)限制发射位置可用的导弹数量;约束式(3)限制对一个目标发射的导弹的最大数量;约束式(4)限制每次攻击最多发射一枚导弹。

防御方的防御行动约束为

$$\sum_{g \in G} X_{p,g} \leq 1, \quad \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} X_{p,g} \leq 1, \quad \forall g \in G \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P, g \in G, d \in D} R_{a,p,g,d} \leq 1, \quad \forall a \in A \quad (7)$$

$$\sum_{a \in A, d \in D} SAL_{a,c_p,d,i} \cdot R_{a,p,g,d} \leq LOA_{c_p,i} X_{p,g}, \quad \forall p \in P, g \in G, i \in I \quad (8)$$

$$X_{p,g} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, g \in G \quad (9)$$

$$R_{a,p,g,d} \in \{0,1\}, \quad \forall a \in A, p \in P, g \in G, d \in D \quad (10)$$

约束式(5)限制每个平台至多占用一个位置,约束式(6)限制每个位置至多容纳一个平台,约束式(7)表示一次最多发射一枚拦截武器,约束式(8)限制每个平台每个位置的拦截武器的数量,约束式(9)和式(10)要求二进制决策。

攻击方想使预期毁伤为最大,而防御方想使攻击方最大预期毁伤为最小。通过这个模型采用 Benders 分解^[1],可以分下面的3种情况解算出弹道导弹的最优攻击计划 Y^* 和防御方的最优拦截武器平台的部署计划 X^* 和拦截计划 R^* 。

1) 若防御方可以完全隐藏其位置,且攻击方在不知道防御力量部署的情况下要实现最优攻击,可以采取先进行求解内部最优攻击问题,得到 Y^* ,然后再求解外部最优防御问题,得到 X^* 和 R^* 。

2) 若攻击方能看到防御方的防御准备,如果防御方不清楚攻击方的情况,仍然部署其防御武器,并对可能的攻击发射拦截弹,则式(1)中的极大预期毁伤目标函数变为

$$\max_{\{X,R\} \in X} \sum_a k_a v_{t_a} (1 - \sum_{p \in P, g \in G, d \in D} PK_{a,c_p,g,d} R_{a,p,g,d}) \quad (11)$$

3) 假设攻防双方都能观测到彼此的准备。对于固定的 R ,若 $MIS_{l,m}$ 和 \max_SAL_l 是整数,则最大攻击问题模型为线性规划模型,可以求出一个固有的线性最优攻击解 Y^* 。使用来自这个整数线性规划模型的可行防御部署计划 X^* 和拦截计划 R^* ,固定的 X^* 和 R^* 通过求解攻击方的原始最大化线性问题,能够重新获得联合攻击计划 Y^* 。因此,此时拦截变量 R^* 的含义由“拦截进攻导弹”变为“拦截可能发射的进攻导弹”。这里并不是所有的拦截都会实施,因为当攻击方观测到攻击可能会被拦截时,攻击方可能放弃一些攻击方案。

1.2 目标价值估计

因为需要推断攻击方的动机,所以估计目标价值是很重要的。假定攻击方能够观测到部分防御力量、防御弱点和重要节点。描述目标价值是一个重要的准备阶段,以便得到合理的防御方案。

目标价值建立在目前在防御计划中使用的4个因素正确评估的基础上:危险程度,弱点,重组能力和威胁。

1) 危险程度(CR)。危险程度是对很重要的防御位置的重要程度判断。大的值表示这个目标较重要。

2) 弱点(VU)。弱点是对目标容易受到空中或者导弹的攻击,或者容易受到监视的程度评估。高的值表示目标容易受到攻击,没有保护和在公开的清楚路线上,低的值表示其它。

3) 重组能力(RE)。重组能力是对目标能从受到的伤害恢复能力的表述,是在时间、设备和可用人力上恢复正常操作的程度评估。高的值表示目标在遭受攻击之后,需要相当长的时间,人力,物力才能恢复正常操作。

4) 威胁(TH)。威胁是对受到导弹攻击目标的受攻击可能性的评估。高的值表示很可能敌方正在或者将要攻击。

综合这些因素,目标价值为

$$v_i = \ln(CR \cdot VU \cdot RE \cdot TH) + 1 \quad (12)$$

这里 CR、VU、RE、TH 值的范围定义为 1-10 之间的数值, v_i 的值范围为 1-10.0。

2 仿真及结果分析

2.1 攻防仿真设定

假定攻击方的弹道导弹类型集合 $M = \{m_1, m_2, m_3\}$, 其相应参数设定如表 1 所示。导弹攻击的目标集合 $T = \{t_1, t_2, t_3\}$, 目标位置设定如表 2 所示。假定每个进攻导弹都是 100% 可靠的, 如果没有被拦截, 有 100% 的命中目标的概率 (k_a)。同时假定各型号的拦截弹在各自的射程之内, 拦截概率为 50%。

表 1 弹道导弹参数

弹道导弹类型	发射位置经度/纬度	数量枚	射程/km	TNT 当量/kg	圆概率误差/m	杀伤半径 m
m_1	119°/23°	50	130	598	200	50.550
m_2	120°/23°	20	300	224.25	1 000	36.450
m_3	121°/23°	5	1 000	852.15	400	56.884

拦截武器平台类型 $C = \{c_1, c_2, c_3\}$, 如表 3 所示, 并且武器平台分别部署在保卫目标位置。进攻的弹道导弹可能沿着一个能避免与特定防御位置发射的拦截武器遭遇的弹道飞行, 若符合可行交会条件, 则拦截概率为 0 或者一个恒定的值, 也可以用由横向、下向和飞行高度索引的杀伤概率表来表示拦截效果。拦截概率将进攻弹发射位置、攻击目标、攻击导弹类型以及与进攻导弹弹道有关的防御位置和防御方用来拦截导弹的武器之间的复杂关系简化成一个独立的数字。这里假定各型号的导弹在各自的射程之内, 拦截概率为 50%。表 4 列出想定中弹道导弹攻击的目标和目标价值。

表 2 目标/防御位置

T/G	经度	纬度
t_1/g_1	119°	26°
t_2/g_2	116°	23°
t_3/g_3	118°	24°

表 3 拦截武器

C	射程/km
c_1	12
c_2	150
c_3	150

表 4 可能受到攻击的目标价值估计

T	CR	VU	RE	TH	v_i
t_1	4	8	5	9	8.3
t_2	8	7	8	10	9.4
t_3	3	6	5	4	6.9

2.2 仿真结果分析

1) 无防御的最优弹道导弹攻击。表 5 表述一个弹道导弹的最优攻击结果, 对每个未防御的目标仅发射一枚导弹造成了 94.2 的毁伤。

2) 最优防御设计。假定攻击方观测不到防御准备, 防御方部署防御武器并拦截攻击导弹。假定防御方预先观测到所有的弹道导弹攻击, 针对性地部署防御武器, 并以一定的杀伤概率拦截进攻导弹, 最大毁伤的仿真结果为 0.91。

3) 双边透明的双边最优化。若双方都能观测到对方的情况, 防御方知道攻击方会使其一些导弹穿过防御。攻击方能够观测到并利用我们的部署力量, 防御目的是最小化预期最大毁伤。给定攻击方和防御方的透明度, 预期最大毁伤的仿真结果为 6.5, 比最大预期毁伤减小了 93.1%。

4) 部分透明的双边最优化。假设能对攻击方隐藏部分防御平台, 预期毁伤结果从完全透明的下界移到完全秘密防御的上界。图 1 显示了在不同透明度情况下预期毁伤仿真结果。

表 5 弹道导弹攻击结果

目标	弹道导弹	导弹发射位置坐标
	类型	经度/纬度
t_1	m_1	119°/23°
t_2	m_2	120°/23°
t_3	m_3	121°/23°

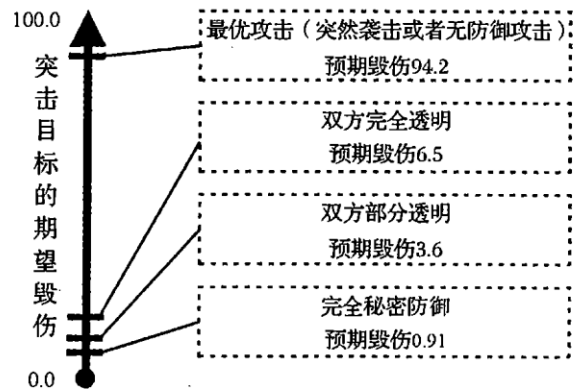


图 1 不同透明度情况下预期毁伤结果

(下转第 64 页)

A Blind Adaptive Multiuser Detection Based on RLS Algorithm

ZHOU Yi - jian, WANG Yong - min

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A blind adaptive multi - user detection based on RLS algorithm is presented, and the algorithm's convergence dynamics for suppressing MAI (Multi - Access Interference) is analyzed. These demonstrate that the detection based on this algorithm finally converges to a constraint MMSE detection without training sequence. The simulation results under AWGN - Additive White Gaussian Noise channel and Rayleigh fading channel are presented.

Key words: multi - user detection; CDMA; RLS algorithm

(上接第 25 页)

3 结束语

世界上没有完美的导弹防御系统,所以预计攻击方弹道导弹会有一部分穿过空中防御,防御方将会尽最大可能地拦截入侵的导弹直到将其摧毁。战区弹道导弹攻防双边优化对策目的是在最大程度(在某种意义上)上降低对防御目标毁伤的位置上,部署防御拦截武器,使未被拦截并命中目标的弹道导弹数量为最少,最大程度上降低其造成的预期毁伤。本文给出的弹道导弹攻防对抗的双边优化决策的 0 - 1 型整数规划模型,可以在一台笔记本电脑上几分钟内提供可行的最优拦截方案。

参考文献:

- [1] Douglas D. Diehl, LT USN. How to Optimize joint Theater Ballistic Missile [EB/OL]. <http://www.go.com/>, 2004.3
- [2] 王运吉, 关爱杰, 刘增良, 等. 反导系统空中防御仿真模型研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1925 - 1927.
- [3] 朱一凡, 张学斌, 王维平, 等. 反导防空导弹拦截决策分析模型[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(1): 29 - 32.
- [4] 丁保春. 洲际弹道导弹突防效能仿真评估系统研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(10): 1325 - 1928.
- [5] 张 肃, 王颖龙, 曹泽阳. 战区反导拦截效率模型研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2004, 5(4): 34 - 36.

(编辑: 田新华)

Two - sided Optimal Decision Model Used for Ballistic Missile Attack - Defense

HUANG Shu - cai, LI Wei - min, LI Wei

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming at ballistic missile attacking, a two - sided optimal decision model used for ballistic missile attack - defense is put forward, asynchronous branch and bound algorithm is designed. Given a complete missile attack plan and a responding defense, expressing the enemy courses of action as a mathematical model which can cause maximum expected damage, and then the problem how to optimize our defensive interceptor pre - positioning to minimize the maximum achievable expected damage is shown and explained. A simulation instance that can show the validity of the two - sided optimal decision method used for ballistic missile attack - defense is given at last.

Key words: ballistic missile; optimization; decision; model