

文章编号: 1000-6893(1999)05-0478-03

基于模拟退火算法的防空作战布局优化

韩松臣¹, 石德平²

(1 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

(2 航天工业总公司 二院, 北京 100854)

OPTIMIZATION FOR AIR-DEFENSE COMBAT CONFIGURATION VIA SIMULATED ANNEALING ALGORITHM

HAN Song-chen¹, SHI De-ping²

(1 Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2 The Second Research Academy of CASIC, Beijing 100854, China)

摘要: 在防空导弹武器系统的作战布局优化中使用模拟退火算法, 选取适当的 Boltzmann 常数, 结合基于随机服务系统理论的作战效能分析数学模型, 得到了较为快捷的定量优化武器系统作战布局的方法。

关键词: 导弹武器系统; 效能分析; 模拟退火算法; 作战布局

中图分类号: E917; TJ761.1 **文献标识码:** A

Abstract: The simulated annealing algorithm is used to optimize combat configuration of air-defense missile weapon systems. By choosing Boltzmann constant adequately, and combining with a mathematical model based on stochastic service system theory to analyze combat effectiveness, the shortcut to solve quantitatively the problem about optimization of a weapon system's combat configuration is presented.

Key words: missile weapon system; effectiveness analysis; simulated annealing algorithm; combat configuration

目前, 防空体系中武器系统的布局一般是人工布局^[1], 通常是由指挥员通过绘制武器系统火力杀伤区、作战区等区域图, 遵照布局原则, 凭经验布局。使用人工布局方法, 不同的指挥员会给出不同形式的作战布局, 同时有些原则在一定的条件下是不可兼顾的, 最终的布局结果不可避免会带有随意性及布局者的个人偏好。

有关研究人员一直在寻找进行武器作战布局的定量优化方法^[2,3]。在相应的辅助指挥系统中, 快速性是一项十分重要的指标。其中, 优化算法是影响运算速度的主要因素之一。

本文提出用模拟退火算法解决武器系统作战布局优化问题, 结合基于随机服务系统理论的作战效能分析数学模型, 得到了一种较为快捷的定量优化武器系统作战布局的方法。

1 模拟退火算法

模拟退火 (Simulated Annealing) 算法^[4]是 1953 年由 N. Metropolis 等人提出的。模拟退火算法用于解优化问题的出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般优化问题间的相似性。退

火过程在得到最低的能态以前, 系统可以从较低能态 (局部最优), 暂时跃迁到较高的能态, 也正是退火过程的这个特征使得物质体系能达到最低的能态。换言之, 该算法能通过模拟退火过程找到全局 (或近似) 最优解。

模拟退火算法是基于 Monte Carlo 迭代求解法的一种启发式随机搜索法。设 S 为解的可行域, E 为非负的目标函数, 则一般优化问题可表达为寻找 S^* 使得

$$E(S^*) = \min[E(S_i)] \quad \forall S_i \in S \quad (1)$$

模拟退火法的基本过程是让模拟温度 T 从一个足够高的值慢慢下降, 相对于当前状态 S 随机产生一个新状态 S' , 计算能量的变化 ΔE 。如果 $\Delta E \leq 0$, 则无条件接受这个新状态, 并把它当作进一步模拟的初始状态; 如 $\Delta E > 0$, 说明系统能量没有得到降低, 这时按照下述接受概率

$$p = \exp(-\Delta E / (k_b T)) \quad (2)$$

有条件接受这个新状态, 即在 $(0, 1)$ 内随机产生一个随机数, 如果该随机数小于 p , 接受新的非改善状态; 否则, 仍以原来的状态当作下一步模拟的初始状态; 重复这个过程直到有新的状态被接受。式(2)中 k_b 为 Boltzmann 常数。

收稿日期 1998-08-24, 修订日期 1998-11-09

2 选取 Boltzmann 常数的方法

将 $\beta = 1/(k_b T)$ 亦称作 Boltzmann 常数, 这样对状态接受的概率可以写成

$$p = \exp(-\beta \Delta E) \quad (3)$$

参数 β 的选取直接影响到对新状态的接受概率和寻优搜索的次数。若 β 选取的过大则对新状态的接受概率过小, 其结果可能会导致算法程序陷入局部最优而无法离开; 若 β 选取的过小则对新状态的接受概率过大, 其结果可能会导致不管 ΔE 有多大, 什么样的新状态都接受。为了避免这种情况出现, 采用了下述 Boltzmann 常数的选取方法:

(1) 首先用指标的相对变化取代指标的绝对变化, 任意选取一定数量的样本并计算出其指标相对变化量的数学期望 $E(\Delta E/E)$, $\Delta E > 0$; 然后, 分别求了大于和小于该期望值部分的指标相对变化量的数学期望, 分别记为 $E_1(\Delta E/E)$, $E_2(\Delta E/E)$;

(2) 再调整 β , 使

$$\left. \begin{aligned} \exp[-\beta E_1(\Delta E/E)] &= 0.4 \\ \exp[-\beta E_2(\Delta E/E)] &= 0.6 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3 作战效能分析的数学模型

本文以目标沿任意航迹的突防概率作为防御体系作战效能的测度, 直接利用文献[3]给出的解析模型, 用以计算防御体系中各点作战效能。该模型是在目标成批到达、多种武器系统、火力杀伤区有一定纵深的条件下得出的, 对于 $n > m$ 情况

$$\left. \begin{aligned} -\lambda P_0 + \mu_1 P_1 &= 0 \\ -\left(\lambda + \sum_{i=1}^k \mu_i\right) P_k + \sum_{i=1}^{k+1} \mu_i P_{k+1} &= 0 \\ k &= 1, 2, \dots, m-1 \\ \lambda P_{k-m} - \left(\lambda + \sum_{i=1}^k \mu_i\right) P_k + \sum_{i=1}^{k+1} \mu_i P_{k+1} &= 0 \\ k &= m, m+1, \dots, n-1 \\ \lambda P_{n-m} - \left(\lambda + \sum_{i=1}^n \mu_i\right) P_n + \sum_{i=1}^n \mu_i P_{n+1} &= 0 \\ \left(\sum_{i=1}^n \mu_i + \nu\right) P_{n+1} &= 0 \\ \lambda P_{n+s-m} - \left(\lambda + \sum_{i=1}^n \mu_i + s\nu\right) P_{n+s} + \left[\sum_{i=1}^n \mu_i + (s+1)\nu\right] P_{n+s+1} &= 0 \\ s &= 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: P_i 为系统处于状态 i (在火力杀伤区上空的目标数为 $i, i = 1, 2, \dots, +$) 的概率; m 为每个编队中目标数; n 为武器系统的火力单元数; s 为武器系统处于饱和射击状态, 在杀伤区内尚未受到射击的目标数; λ 为目标以批为单位的入侵强度; μ_i 为第 i 个火力单元的射击强度; ν 为目标在火力杀伤区内的某航迹上逗留强度。 $n < m$ 情况和 $n = m$ 情况的模型与此相近, 略去。

由此模型可以获得系统处于任意状态 i 的统计概率 P_i 。再考虑武器系统的单发杀伤概率, 可以得出目标沿该航迹突破防御体系的概率

$$P_i = \frac{\nu}{\lambda n} \sum_{i=1}^{n_1} i P_{n+i} + \left[\left(\sum_{i=0}^{n_1-1} P_i \right) (1-P_{k1})^{l_{\max 1}} + \left(\sum_{i=n_1}^{n_2-1} P_i \right) (1-P_{k2})^{l_{\max 2}} + \dots + \left(\sum_{i=n_{l-1}}^{n_l-1} P_i \right) (1-P_{kl})^{l_{\max l}} \right] + \left[1 - \sum_{i=0}^{n-1} P_i - \frac{\nu}{\lambda n} \sum_{i=1}^{n_1} i P_{n+i} \right] \cdot \left[\prod_{j=1}^l \frac{n_j \mu_j}{n_i \mu_i} \frac{1}{I_{\max j}} (1-P_{kj})^i \right] \quad (6)$$

其中: P_{ki} 与 $I_{\max i}$ 分别为第 i 类武器的单发杀伤概率和对飞越其火力杀伤区目标的最大射击次数; n_i 是第 i 类武器的火力单元数; l 为武器种类数。

这样, 作战布局问题, 变为使防御体系中最薄弱处的突防概率最小这样一个优化问题。

4 优化布局算例

通常, 主战型武器在其责任防御高度以下的火力区宽度相对较小, 导致两个火力单元中间区域成为防线的缺陷, 这个缺陷需要用辅助型防空兵器来弥补, 如图 1 所示。

假设主战型武器系统的火力杀伤区是一个远界 $R_{\max} = 4.5 \text{ km}$, 近界 $R_{\min} = 300 \text{ m}$, 夹角 $\theta = 120^\circ$ 的扇形区域, 两个主战型武器的火力单元之间的距离 $O_1 O_2 = 9 \text{ km}$, 武器的一次射击平均时间是 8 s , 单发杀伤概率 $P_{k1} = 0.9$; 辅助类型防空武器系统的火力杀伤区是一个半径 $R = 2 \text{ km}$ 的圆形区域, 一次射击平均时间是 10 s , 单发杀伤概率 $P_{k2} = 0.85$ 。

空袭目标以 $\lambda = 0.28$ 架/秒的强度, $\nu_i = 500 \text{ m/s}$ 的速度试图通过武器系统的火力杀伤区。试用 $N = 3$ 个辅助类型武器火力单元来弥补两个主战型武器火力单元间火力杀伤区的空档。



图1 责任防空武器不同高度火力区示意图

(a) 责任高度内满足作战效能要求; (b) 责任高度以下需用辅助兵器弥补

图2是使用模拟退火算法3个辅助类型火力单元的优化布点过程,图3为相应的作战有效性指标的变化。由图中可以看出,用模拟退火方法能很快找到火力单元理想的布局位置。这时防线最薄弱点上的突防概率最小 $E=0.617$,防线的作战有效性趋于最优。

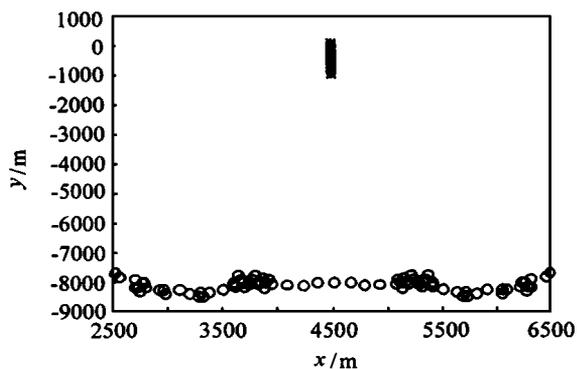


图2 模拟退火方法例图

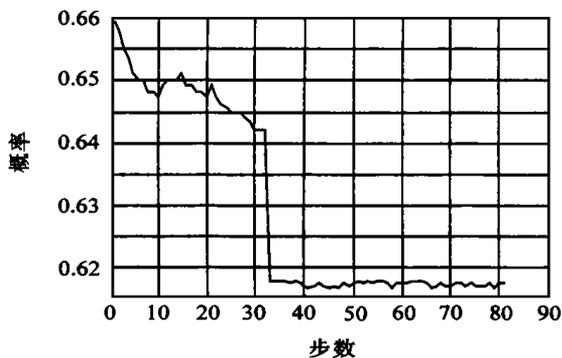


图3 性能指标曲线

5 结论

将基于随机服务系统理论的作战有效性分析

模型与模拟退火优化算法结合起来,可以获得自动寻找武器系统最优作战布局点的方法。这种定量的组网和布局方法将比以往基于原则的手工布局更科学、更快速。该方法为进一步建立军事辅助决策系统奠定了基础。

参考文献

- [1] 徐品高. 防空导弹体系拦截系统组网理论[A]. 见: 航空航天工业总公司二院科技委编. 防空导弹系统论文集[C]. 北京: 航天工业总公司二院, 1995: 47~124
- [2] Horrigan T J. Configuration and effectiveness of air defense systems in simplified, idealized combat situation—preliminary examination[Z]. Office of Naval Technology Office of the Chief of Naval Research, 1990
- [3] 韩松臣. 防空导弹武器系统作战有效性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997.
- [4] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(5): 671~680

作者简介:



韩松臣 男, 1964年生。1987年毕业于哈尔滨船舶工程学院导弹自动控制专业, 而后在哈尔滨工业大学获得工学硕士、博士学位。现在南京航空航天大学航空与宇航技术博士后流动站从事民航空中交通管理决策理论与武器系统效能分析研究。



石德平 男, 1963年生。1979至1987年在北京航空航天大学飞行器设计专业学习, 获工学学士、硕士学位。现在航天工业总公司二院任研究员。参加过多种型号武器系统的总体设计工作。