

2-20-2021

An Intelligent Method for Rapid Construction of Time Sensitive Target Strike Chain

Jiabo Lu

1. 716 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Lianyungang 222061, China; ;

Peixing Cheng

1. 716 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Lianyungang 222061, China; ;

Huang Yi

2. Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; ;3. Institute of Intelligent Computing and Visualization based on Big Data, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China; ;

Jinqiang Yao

4. Zhejiang Transportation Testing Technology Co., Ltd, Hangzhou 310030, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

An Intelligent Method for Rapid Construction of Time Sensitive Target Strike Chain

Abstract

Abstract: In order to improve the construction efficiency of the time sensitive hit chain, optimize the resource allocation in combat, and realize an intelligent method for quickly constructing the time-sensitive strike chain, *the simulated annealing algorithm and genetic algorithm are adopted to build a time sensitive hit chain*. Simulation experiments show that the method can complete the time sensitive target strike priority sorting, sensor platform-target pairing and weapon platform-target pairing in a short time, and destroy the target within the target time window. The proposed method optimizes the application of sensors and weapons, compensates for the limitations of constructing time-sensitive strike chains, and improves the ability to strike time-sensitive targets, which has significant military benefits for striking the enemy and improving the operational effectiveness of the force.

Keywords

time sensitive target, simulated annealing algorithm, genetic algorithm, time window

Authors

Jiabo Lu, Peixing Cheng, Huang Yi, Jinqiang Yao, Xuemeng Yang, Xinqiang Ma, and Liu Yong

Recommended Citation

Lu Jiabo, Cheng Peixing, Huang Yi, Yao Jinqiang, Yang Xuemeng, Ma Xinqiang, Liu Yong. An Intelligent Method for Rapid Construction of Time Sensitive Target Strike Chain[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(2): 346-357.

用于时敏目标打击链快速构建的智能方法

陆嘉波¹, 程培星¹, 黄羿^{2,3*}, 姚进强⁴, 杨雪梦², 马新强^{2,3}, 刘勇²(1. 中国船舶重工集团公司第七一六研究所, 江苏 连云港 222061; 2. 浙江大学 智能系统与控制研究所, 浙江 杭州 310027;
3. 重庆文理学院 大数据智能计算与可视化研究所, 重庆 402160; 4. 浙江省交通集团检测科技有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 为提高战斗中时敏打击链的构建效率, 优化资源分配, 实现一种快速构建时敏打击链的智能方法, 提出将模拟退火算法与遗传算法运用于快速构建时敏打击链。仿真实验表明, 可以在短时间内完成时敏目标打击优先级排序、传感器平台-目标配对和武器平台-目标配对, 并在目标的时间窗口内摧毁目标。优化了传感器和武器的使用, 弥补了构建时敏打击链的局限性, 提高了对时敏目标的打击能力, 对打击敌人和提高部队作战效能具有重大的军事效益。

关键词: 时敏目标; 模拟退火算法; 遗传算法; 时间窗口

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 02-0346-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0460

An Intelligent Method for Rapid Construction of Time Sensitive Target Strike Chain

Lu Jiabo¹, Cheng Peixing¹, Huang Yi^{2,3*}, Yao Jinqiang⁴, Yang Xuemeng², Ma Xinqiang^{2,3}, Liu Yong²

(1. 716 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Lianyungang 222061, China;

2. Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Institute of Intelligent Computing and Visualization based on Big Data, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China;

4. Zhejiang Transportation Testing Technology Co., Ltd, Hangzhou 310030, China)

Abstract: In order to improve the construction efficiency of the time sensitive hit chain, optimize the resource allocation in combat, and realize an intelligent method for quickly constructing the time-sensitive strike chain, the simulated annealing algorithm and genetic algorithm are adopted to build a time sensitive hit chain. Simulation experiments show that the method can complete the time sensitive target strike priority sorting, sensor platform-target pairing and weapon platform-target pairing in a short time, and destroy the target within the target time window. The proposed method optimizes the application of sensors and weapons, compensates for the limitations of constructing time-sensitive strike chains, and improves the ability to strike time-sensitive targets, which has significant military benefits for striking the enemy and improving the operational effectiveness of the force.

Keywords: time sensitive target; simulated annealing algorithm; genetic algorithm; time window

引言

北约和美国国防部将时敏目标^[1](time critical target, 或 time sensitive target)定义为: 已经或很快对友军构成威胁, 或者具有极高打击价值的、稍纵

即逝的目标。要达到战斗目的, 对这样的目标必须快速做出反应、进行优先打击。时敏目标打击作战是基于信息化条件开展的新型体系作战样式。国内学界关于时敏打击构建的研究已初步展开, 主要研究内容在于武器平台分配(WTA)问题^[2-3], 却没有

收稿日期: 2019-08-29 修回日期: 2020-04-17

基金项目: 浙江大学工业控制技术国家重点实验室开放课题(ICT170330, ICT1800413, ICT1900358), 浙江省重点研发计划(2019C01004), 重庆市发改委重大产业技术研发项目(2018148208), 重庆英才创新创业示范团队(CQYC201903167), 广东省重点研发计划(2019B010120001)

第一作者: 陆嘉波(1979-), 男, 硕士, 高工, 研究方向为舰艇指控模型软件。Email: lujiabo_cn_jari@163.com

通讯作者: 黄羿(1976-), 女, 博士, 教授, 研究方向为人工智能、计算机仿真。Email: 36931978@qq.com

构建完整的时敏打击链, 如何动态并且快速、高效集成时敏目标打击所需的传感器、武器及指挥控制节点, 构建时敏目标的打击链, 具有重要的研究价值。时敏打击通常不仅仅局限于单个平台的使用与决策, 其探测、决策、打击往往需要多个系统协同工作^[4]。

针对时敏目标打击链快速构建问题, 本文提出了一种快速的时敏打击链构建方法, 主要步骤包括:

(1) 根据时敏目标的威胁程度值和时间窗口效果测度值, 对时敏目标打击的优先级进行排序。

(2) 采用模拟退火算法, 建立目标函数, 通过每次计算新解和当前解的目标函数差值, 根据 Metropolis 准则判断是否选择新解替换当前解, 最终选择算法最优解为传感器平台-目标配对。

(3) 采用遗传算法, 建立算法的适应度计算函数, 在初始种群中采用轮盘赌模型选择遗传至下一代的染色体, 并进行交叉变异, 选择最终适应性最好的染色体为武器平台-目标进行配对。

1 相关工作

美国国防部已经较好地协调了其快速定位、确认和打击时敏目标的能力。现在, 时敏目标打击不仅是美国空军, 也是美国海军必须具备的作战能力。美海军时敏打击的任务包括: 以海军火力打击远程战斗目标; 对机动目标进行远程打击; 对短时停留的移动目标进行远程打击; 对坚固掩体进行远程打击。为成功实施时敏打击任务, 美海军使用“战术利用系统”和“联合服务图像处理系统”为其火力网提供信息和情报支持。这 2 个系统能够缩短识别和定位目标所需时间, 为成功实施时敏打击提供了可靠的保证。

时敏打击的打击链构建是复杂而具有挑战性的。第一, 时敏打击可能涉及到多种传感器、武器平台和多个指控或火控节点, 只有协调一致的组织管理才有可能实现指挥官的作战意图。第二, 在整个战区内协调作战行动与时敏打击对快速反应的

要求是矛盾的, 因为任何一个环节的协调都需要一定的时间。环节越多, 需要的时间就越多。第三, 为及时探测到可疑目标, 往往需要传感器对可能出现时敏目标的区域进行不断的扫描。将传感器平台用于探测可能出现的时敏目标, 有时候会与有效遂行整体作战目标发生冲突。另外, 传感器平台在某些区域长时间徘徊可能会遭到敌方火力的攻击。这些都是指挥控制系统需要考虑和权衡的问题。目前, 美海军借助于战术利用系统、联合服务图像处理系统和联合火力网^[5], 已将构建时敏打击链的时间从数小时缩短为 20 分钟左右; 其最终目标是在几分钟内完成打击过程, 摧毁目标^[6-7]。

2 时敏打击链快速构建方法

时敏目标是指对时间敏感, 有着非常严格攻击时间窗口限制的目标, 及时对其攻击是确保全局作战任务成功执行的关键。

通常, 采用 6 个阶段来描述一个时敏目标的打击过程, 即发现、确认、跟踪、瞄准(目标指示)、打击和评估^[8]。这些环节也被称为 F2T2EA^[9]或更简单的“时敏打击链”。时敏打击链快速构建方法如图 1 所示, 一个完整的时敏目标打击过程可以描述如下:

(1) 由广域分布的战场综合情报侦察系统发现可疑目标;

(2) 对可疑的地面目标如机动式导弹发射架、仓库和桥梁等, 利用卫星、无人机等进一步收集关于目标的图像信息, 对于空中目标例如来袭敌机和导弹等, 则利用雷达、电子侦察以及主被动光学传感器进行跟踪和识别, 实现目标的快速精确定位、准确识别及确认, 初步确定可用时间;

(3) 战场综合情报侦察系统对确定的时敏目标进行优先处理, 保持对该目标的持续跟踪;

(4) 在跟踪的基础上, 进行时敏打击链的构建, 确认目标参数并计算瞄准数据, 在这一步还要确定目标的威胁程度, 可利用的传感器资源和武器资源, 考虑达到预期效果的可行方式、各种限制条件,

进行风险评估并最后确定打击链所需的传感器、武器平台和打击方式;

(5) 指挥员下达攻击命令, 传送命令并监视打击进展;

(6) 报告打击结果并进行评估, 确定是否需要再一次打击。

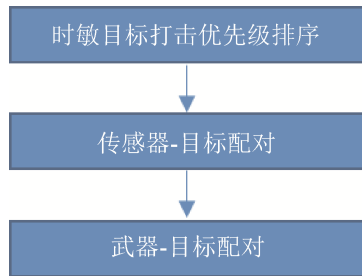


图 1 时敏打击链快速构建方法流程图

Fig. 1 Flow chart of the rapid construction method of the time sensitive strike chain

本文提出的时敏打击链快速构建方法, 主要针对在获取了战场综合情报侦察系统的时敏目标信息后, 对多个时敏目标确定目标威胁程度、确定打击链所需的传感器、武器平台的问题, 包括对时敏目标打击优先级排序、采用模拟退火算法对传感器平台-目标进行配对以及采用遗传算法对武器平台-目标进行配对 3 个步骤^[10]。提出使用模拟退火算法和遗传算法在此领域用于传感器、武器与时敏目标的配对, 与传统资源优化分配方法相比, 本方法增强了全局优化搜索能力, 提高了资源优化分配的快速性、适用性和稳定性。

结合图 1, 假设有 l 个待打击的时敏目标 T_1, T_2, \dots, T_l , m 个空闲的武器平台 W_1, W_2, \dots, W_m 和 n 个空闲的传感器平台 S_1, S_2, \dots, S_n 。对于 l 个时敏目标快速构建打击链, 具体包括时敏目标打击优先级排序、传感器平台-目标配对、武器平台-目标配对 3 个步骤。

2.1 时敏目标打击优先级排序

文献[8]分析了时敏目标打击优先级排序的可行性与必要性, 为了最大限度地实现时敏目标销毁, 最大程度地降低风险, 本文提出一种时敏目标

的打击优先级排序的方法, 步骤如下:

第 1 步, 根据时敏目标 $T_j (j=1, 2, \dots, l)$ 的类型, 计算其威胁程度值 Tw_j 。典型的时敏目标大致可分为两类: 一类是空中目标如来袭敌机和导弹等; 另一类是地面目标如机动式导弹发射架、仓库和桥梁等^[11]。

如果时敏目标 T_j 的类型为空中目标, 其威胁程度值 Tw_j 计算见式(1):

$$Tw_j = w_1Cr_j + w_2Cd_j + w_3Cb_j + w_4Cv_j + w_5Ch_j \quad (1)$$

式中: w_1 为目标类型加权因子, $0 \leq w_1 \leq 1$; w_2 为相对距离加权因子, $0 \leq w_2 \leq 1$; w_3 为相对方位加权因子, $0 \leq w_3 \leq 1$; w_4 为相对速度加权因子, $0 \leq w_4 \leq 1$; w_5 为相对高度加权因子, $0 \leq w_5 \leq 1$, 且满足 $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$;

Cr_j 为时敏目标 T_j 的类型指数, 由人工方式确定, $0 \leq Cr_j \leq 1$; Cd_j 为时敏目标 T_j 相对距离指数, 依据式(2)计算:

$$Cd_j = \begin{cases} 1 - D_j / D_{\max}, & D_j < D_{\max} \\ 0, & D_j \geq D_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_j 为时敏目标 T_j 的相对距离; D_{\max} 为我方安全区域的近界距离;

Cb_j 为时敏目标 T_j 的相对方位指数, 依据式(3)计算:

$$Cb_j = \begin{cases} 1 - 2 \times \frac{\Delta b_j}{\pi}, & 0 \leq \Delta b_j \leq 0.5\pi \\ 0, & 0.5\pi \leq \Delta b_j \leq 1.5\pi \\ 2 \times \frac{\Delta b_j}{\pi} - 3, & 1.5\pi \leq \Delta b_j \leq 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δb_j 为时敏目标 T_j 的相对方位;

Cv_j 为时敏目标 T_j 的相对速度指数, 依据式(4)计算:

$$Cv_j = \begin{cases} 1 - \frac{D_j}{V_j \times \cos(\Delta b_j) \times T_{\max}}, & \cos(\Delta b_j) > 0 \\ 0, & \cos(\Delta b_j) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_j 为时敏目标 T_j 的相对距离; V_j 为时敏目标 T_j 的相对速度; T_{\max} 为传感器平台发现目标所需最大时间; Δb_j 为时敏目标 T_j 的相对方位;

Ch_j 为时敏目标 T_j 的相对高度指数, 依据式(5)计算:

$$Ch_j = \begin{cases} 1 - \frac{H_j}{H_{\max}}, & H_j < H_{\max} \\ 0, & H_j \geq H_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: H_j 为时敏目标 T_j 的相对高度; H_{\max} 为我方安全区域的高度。

如果时敏目标 T_j 的类型为地面目标, 根据人工确定的目标分级 L , 其威胁程度值 Tw_j 的取值应满足:

$$Tw_j \in \begin{cases} [0.5, 1], & L = 1 \\ [0.333, 0.5], & L = 2 \\ [0, 0.333], & L = 3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: L 为地面时敏目标分级, $L = 1, 2, 3$ 。 Tw_j 在实际使用中的取值可根据需要配置。

第 2 步, 计算时敏目标 T_j 的时间窗口效果测度值 $T\tau_j$, 见式(7):

$$T\tau_j = \frac{\min_{j=1}^l Tw_j}{Tw_j}, j = 1, \dots, l \quad (7)$$

式中: l 为时敏目标数量; Tw_j 为时敏目标 T_j 的时间窗口值, 可由查表法或人工确定, 典型的时敏目标 Tw_j 时间窗口特征如表 1 所示。

表 1 常见时敏目标时间窗口特征

Tab. 1 Common time sensitive target time window feature			
地面时敏目标	Tw_j /min	空中或空间时敏目标	Tw_j /min
近距离空中支援目标	≤ 10	低轨道卫星	≤ 10
机动式导弹发射架	30	来袭战术弹道导弹	≤ 15
敌方军政首脑	45	来袭敌机或巡航导弹	≤ 20
仓库或桥梁	≥ 60	来袭战略弹道导弹	≤ 30

第 3 步, 计算时敏目标 T_j 的打击优先级 $T\mu_j$, 如式(8):

$$T\mu_j = \lambda_1 T\tau_j + \lambda_2 Tw_j \quad (8)$$

式中: λ_1 为时间窗口效果测度值加权系数; $T\tau_j$ 为计算得到的时敏目标 T_j 的时间窗口效果测度值, λ_2 为威胁程度加权系数; Tw_j 为计算得到的时敏目标 T_j 的威胁程度值, λ_1 和 λ_2 满足 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

第 4 步, 按照目标打击优先级 $T\mu_j$ 从高到低的原则进行排序。

2.2 采用模拟退火算法对传感器平台-目标进行配对

本文将模拟退火算法^[12]应用于传感器平台和目标的配对, 建立了模拟退火算法的目标函数, 使其良好适配此过程。改进的模拟退火算法流程伪代码为:

```

1: Begin
2: Select initial solution parameters for initialization
3:  $k:=1$ 
4: Generate a new solution  $\mathbf{SX}'_k$ 
5: Calculate the objective function difference  $\Delta f$ 
6: if  $\Delta f < 0$  or ( $\Delta f \geq 0$  and  $\exp(\Delta f) \geq rand$ ):
7:   Accept the new solution  $\mathbf{SX}'_k$ 
8: else:
9:   if  $T < Temp_{stop}$ :
10:    Output the solution
11:   else:
12:     $k:=k+1$ 
13:    if  $k < K$ :
14:     return 4
15:   else:
16:     $t:=t \times Temp_t$ 
17:    return 3
18: End

```

模拟退火算法的具体步骤为:

第 1 步: 建立模拟退火算法的目标函数:

$$f_S(\mathbf{SX}) = \min \sum_{j=1}^l \left[1 - \prod_{i=1}^n [1 - Sr_{ij} Sx_{ij}] \right] \quad (9)$$

式中: \mathbf{SX} 为传感器平台-目标配对问题的解空间,

$$\mathbf{SX} = \begin{bmatrix} Sx_{11} & Sx_{12} & \dots & Sx_{1l} \\ Sx_{21} & Sx_{22} & \dots & Sx_{2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Sx_{n1} & Sx_{n2} & \dots & Sx_{nl} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$, n 为传感器平台数量; $j = 1, 2, \dots, l$,

l 为时敏目标数量;

Sx_{ij} 表示传感器平台 S_i 是否与时敏目标 T_j 配对,

$$Sx_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{表示 } S_i \text{ 与 } T_j \text{ 配对} \\ 0, & \text{表示 } S_i \text{ 与 } T_j \text{ 不配对} \end{cases} \quad (11)$$

Sx_{ij} 满足 $\sum_{j=1}^l Sx_{ij} = 1$ 或 0 , ($i=1,2,\dots,n$) 且 $\sum_{i=1}^n Sx_{ij} = 1$, ($j=1,2,\dots,l$);

Sr_{ij} 为传感器平台 S_i 对时敏目标 T_j 的探测时间的效果测度值,

$$Sr_{ij} = \frac{\min_{i=1}^n t_{ij}}{t_{ij}}, 0 \leq Sr_{ij} \leq 1 \quad (12)$$

式中: t_{ij} 为传感器平台 S_i 对时敏目标 T_j 的探测时间,

$$t_{ij} = t_{ij_ent} + t_{ij_ima} \quad (13)$$

式中: t_{ij_ent} 为时敏目标 T_j 进入传感器平台 S_i 探测区的时间,

$$t_{ij_ent} = \begin{cases} \frac{Sd_{ij} - Sd_{imax}}{V_{ij}}, & T_j \text{ 在 } S_i \text{ 探测区} \\ 0 & , T_j \text{ 不在 } S_i \text{ 探测区} \end{cases} \quad (14)$$

式中: Sd_{ij} 为时敏目标 T_j 到传感器平台 S_i 的距离; Sd_{imax} 为传感器平台 S_i 的最大作用距离; V_{ij} 为时敏目标 T_j 相对于传感器平台 S_i 的速度;

t_{ij_ima} 为传感器平台 S_i 对时敏目标 j 的成像时间,

$$t_{ij_ima} = \frac{2Sd_{imax}}{V_{ij}} \arcsin\left(\frac{\alpha_i}{4\rho_i \sin(\phi_i)}\right) \quad (15)$$

式中: Sd_{imax} 为传感器平台 S_i 的最大作用距离; V_{ij} 为时敏目标 T_j 相对于传感器平台 S_i 的速度; α_i 为传感器平台 S_i 的雷达载波波长; ρ_i 为传感器平台 S_i 的雷达方位分辨率; ϕ_i 为传感器平台 S_i 的斜视角。

第 2 步, 选择初始解 SX_1 , 模拟退火算法与初始解的选择无关, 算法求得的最终解与初始解(算法迭代的起点)无关^[13], 如式(16)。

初始化迭代次数 K 、初始温度 $Temp_{init}$ 、终止温度 $Temp_{stop}$ 和模拟退火算法的冷却进度控制参数 t , 令 $t = Temp_{init}$, $K > 1$ 且 $Temp_{init} > Temp_{stop}$ 。

$$SX_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

第 3 步, 初始化迭代计数器 $k=1$, 对 $k=1,2,\dots,K$, 做第 4 步~第 7 步。

第 4 步, 产生新解。设当前解为 SX_k , 在 $(1, n)$ 区间内产生 2 个随机数 a 和 b , 满足 $a < b$, 将 SX_k 的第 a 行和第 b 行互换, 得到一个新的矩阵 SX'_k 即为新解。

第 5 步, 计算目标函数差。

$$\Delta f = fs(SX'_k) - fs(SX_k) \quad (17)$$

第 6 步, 根据 Metropolis 准则^[14]判断新解可否接受, 具体方法为:

$$r = \begin{cases} 1 & , \Delta f < 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta f}{t}\right) & , \Delta f \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

当 $\Delta f < 0$ 时, 接受新解, 当 $\Delta f \geq 0$ 时, 则首先在 $(0, 1)$ 区间产生一个随机数 $Rand$, 若 $r \geq Rand$ 则接受新解。否则不接受新解。这样处理的好处是在寻优的过程中允许接受坏解, 从而能在一定程度上避免陷入局部极小值。

第 7 步, 判断是否满足算法的终止条件, 终止条件为 $t < Temp_t$, 如果满足终止条件则将当前解作为传感器平台-目标配对的最优解, 算法终止, 否则进行第 8 步。

第 8 步, 令 $k=k+1$, 如果 $k < K$ 则返回第四步, 如果 $k \geq K$ 则更新冷却进度控制参数 $t = t \times Temp_t$ 并返回第 3 步, 其中 $Temp_t=0.95$ 为衰减系数。

2.3 采用遗传算法对武器平台-目标进行配对

本文将传统的遗传算法应用于武器平台和目标的配对, 自行定义了适应度计算函数, 使其良好应用于配对过程, 其伪代码为:

1: Begin

2: Select initial solution parameters for initialization

3: $e:=0$
 4: Calculate fitness values
 5: Select inherited chromosomes to the next generation
 6: Chromosomes crossover and mutation
 7: if satisfied the termination condition:
 8: Output the most adaptive chromosome
 9: else:
 10: $e:=e+1$
 11: if $e<E$:
 12: return 4
 13: else:
 14: Output the most adaptive chromosome
 15: End

遗传算法的具体步骤如下:

第 1 步, 选择遗传算法初始种群^[15], 定义算法种群为 $P(e) = (A_1, A_2, \dots, A_N)_e$, 其中 e 为进化代数计数器, N 为种群规模, $A_i \in \mathbb{Z}^m (i=1, 2, \dots, N)$ 为第 e 代种群的一个染色体, 表示一种武器平台与时敏目标的配对方式, A_{ij} 表示在第 i 条染色体中, 第 j 个武器与第 A_{ij} 个时敏目标配对。令 $e=1$, 得到初始种群 $P(1) = (A_1, A_2, \dots, A_N)_1$ 。

第 2 步, 根据式(19)定义适应度计算函数:

$$fw(\mathbf{WX}) = \max \left(\omega_1 \sum_{j=1}^l \left[\prod_{i=1}^m (1 - Wr_{ij} Wx_{ij}) \right] T\tau_j + \omega_2 \sum_{j=1}^l \left[\prod_{i=1}^m (1 - Wp_{ij} Wx_{ij}) \right] T\mu_j \right) \quad (19)$$

式中: Wr_{ij} 为武器平台 W_i 对时敏目标 T_j 的打击时间的效果测度值; Wp_{ij} 为武器平台 W_i 对时敏目标 T_j 的杀伤概率, $T\tau_j$ 和 $T\mu_j$ 分别由式(7)和式(8)计算获得, $T\tau_j$ 为时敏目标 T_j 的时间窗口效果测度值; $T\mu_j$ 为时敏目标 T_j 的打击优先级; \mathbf{WX} 为武器平台-目标配对决策矩阵:

$$\mathbf{WX} = \begin{bmatrix} Wx_{11} & Wx_{12} & \dots & Wx_{1l} \\ Wx_{21} & Wx_{22} & \dots & Wx_{2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Wx_{m1} & Wx_{m2} & \dots & Wx_{ml} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$, m 为武器平台数量, $j=1, 2, \dots, l$, l 为时敏目标数量。

种群中每条染色体对应一个 \mathbf{WX} , Wx_{ij} 表示在染色体中武器平台 W_i 是否与时敏目标 T_j 配对, 其取值为:

$$Wx_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{表示 } W_i \text{ 与 } T_j \text{ 配对} \\ 0, & \text{表示 } W_i \text{ 与 } T_j \text{ 不配对} \end{cases} \quad (21)$$

适应度计算函数中, ω_1 为武器平台的打击时间效果测度值的加权系数, ω_2 为武器平台的杀伤概率的加权系数。 ω_1 和 ω_2 应满足: $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

武器平台 W_i 对时敏目标 T_j 的打击时间效果测度值 Wr_{ij} , 采用式(22)计算:

$$Wr_{ij} = \frac{\min_{i=1}^n Wt_{ij}}{Wt_{ij}}, \quad 0 \leq Wr_{ij} \leq 1 \quad (22)$$

式中: Wt_{ij} 为武器平台 W_i 对时敏目标 T_j 的打击时间。

第 3 步, 定义 E 为最大进化代数, 对 $e=1, 2, \dots, E$, 执行第 4 步至第 8 步:

第 4 步, 计算种群中各染色体的适应度值 $fw(\mathbf{WX}_{A_i})$, 其中, \mathbf{WX}_{A_i} 为染色体 A_i 解码后对应的武器平台-目标配对的决策矩阵。

第 5 步, 采用轮盘赌算子最优保存策略选择遗传到下一代的染色体个体。由于算法种群规模有限且轮盘赌选择算子是随机选择操作, 有时会淘汰适应度较高的染色体, 导致算法收敛速度慢, 难以满足实时性要求, 本文通过为轮盘赌选择算子增加最优保存策略来保留适应度最高的染色体, 保证得到的最优染色体个体不会被交叉、变异等遗传算子破坏, 从而提高算法实时性。具体步骤为首先按照染色体个体适应度值从大到小排序, 用适应度值最大的染色体个体替换当前种群中经过交叉、变异操作后所产生的适应度值最小的染色体个体, 其次计算染色体个体 A_i 遗传至下一代的概率 P_{sel} , 计算公式如式(23):

$$P_{sel} = \frac{fw(\mathbf{WX}_{A_i})}{\sum_{i=1}^N fw(\mathbf{WX}_{A_i})} \quad (23)$$

根据每个染色体个体遗传至下一代的概率 P_{sel}

创建一个赌盘，每个染色体个体对应赌盘中的一个扇形部分，扇面的角度与染色体个体遗传至下一代的概率 P_{sel} 成正比，重复 N 次轮盘赌选择算子操作，每次随机生成一个 $[0,1]$ 区间的小数，然后判断该随机数落在那个扇面就选择对应的染色体个体。在这个选择过程中，遗传至下一代的概率越高的染色体被选中的可能性越大。

第 6 步，染色体交叉，交叉重组是生物遗传和进化过程的一个重要环节，遗传算法使用交叉算子来产生新的个体，按交叉概率 P_{Chi} (取 $0.9\sim 1$ 之间的常数) 从种群中选择 2 个配对染色体 F 和 M 构成双亲染色体： $F=(F_1, F_2, \dots, F_m)$ 与 $M=(M_1, M_2, \dots, M_m)$ 。

采用两点交叉算子进行交叉运算，在染色体的编码串中随机设置 2 个交叉点，双亲染色体在设置的 2 个交叉点之间进行部分基因交换。在区间 $(1, m)$ 随机选择两点 a 和 b , $a < b$, 将 $a\sim b$ 间的子串作为映射段，交换双亲的 2 个子串产生原始后代：

$$F' = (F_1 F_2 \dots M_a M_{a+1} \dots M_b F_{b+1} \dots F_m)$$

$$M' = (M_1 M_2 \dots F_a F_{a+1} \dots F_b M_{b+1} \dots M_m)$$

确定两映射段之间的映射关系，如图 2，根据映射关系将后代合法化。

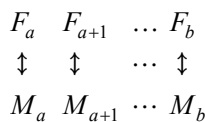


图 2 双亲染色体映射关系

Fig. 2 Parental chromosome mapping relationships

第 7 步，染色体变异，变异模拟生物遗传和进化过程中的变异环节，将染色体编码串中的某些基因座上的基因值用该基因的其他等位基因来替换，从而形成一个新的染色体。变异能够避免由于选择和交叉运算而造成的某些信息丢失，保证遗传算法的有效性。根据变异概率 P_{mut} (取 $0\sim 1$ 之间的常数) 选择变异染色体 $C=(C_1, C_2, \dots, C_m)$ ，在区间 $(1, m)$ 随机选择两点 a 和 b , $a < b$, 对 a 和 b 两点进行互换，得到变异后的后代染色体：

$$C' = (C_1 C_2 \dots C_b C_{a+1} \dots C_a C_{b+1} \dots C_m)$$

第 8 步，判断是否满足算法的终止条件，经过选择、交叉、变异操作后得到新的种群，计算新的种群的染色体个体适应度最大值与上一代种群的染色体个体适应度最大值差的绝对值 $|\Delta p|$ ，如果 $e \geq E$ 或连续 G 代内满足 $|\Delta p| \leq \varepsilon$ ，其中， G 为遗传终止代数， ε 为遗传收敛值，则满足终止条件将适应度值最大的染色体作为武器平台-目标配对的最优解，否则返回第 3 步进行下一次迭代计算。

3 实例分析

本文通过构建多计算机节点的仿真试验环境，采用软件仿真方式对提出的算法进行了仿真实验验证。仿真试验环境由剧情模拟节点、多个传感器平台仿真节点和武器平台仿真节点构成，试验环境如图 3 所示，具体配置参见表 2。

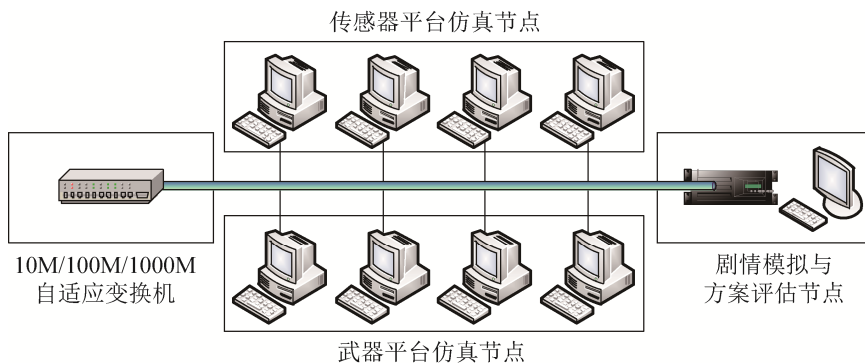


图 3 仿真试验环境示意图

Fig. 3 Schematic diagram of simulation environment

表 2 仿真节点配置
Tab. 2 Simulation node configuration

节点类型	硬件性能	软件配置
传感器平台仿真节点	CPU 采用 Intel® Core™ Duo T2300, 主频为 1.66 GHz, 内存容量 2 GB	数据总线软件 传感器平台 仿真软件
武器平台仿真节点	CPU 采用 Intel® Core™ Duo T2300, 主频为 1.66 GHz, 内存容量 2 GB	数据总线软件 武器平台 仿真软件
剧情模拟与评估节点	CPU 采用 Intel® Core™ i5-7500, 主频为 3.4 GHz 双核四线程, 内存容量 8 GB	数据总线软件 剧情模拟软件 仿真控制软件 人工干预软件 方案生成与 评估软件
交换机	10 M/100 M/1 000 M 自适应	无

剧情模拟节点根据配置的目标特性和传感器、武器平台性能, 生成时敏目标、提供统一的时钟驱动传感器平台仿真节点的运行以及武器平台仿真节点的运行, 提供干预界面生成指挥员的

干预指令。传感器平台仿真节点根据剧情分配的运动和探测性能参数模拟平台自身的运动和目标探测过程, 报告目标探测数据。武器平台则根据剧情分配的运动和杀伤能力模拟武器平台自身的运动, 并对分配的目标进行打击。在仿真实验环境中配置 4 个待打击的时敏目标 T_1, T_2, T_3, T_4 , 4 个可用的传感器平台 S_1, S_2, S_3, S_4 , 4 个可用的武器平台 W_1, W_2, W_3, W_4 。实验中, 时敏目标的威胁程度加权因子取值为 $w_1=0.3$ 、 $w_2=0.4$ 、 $w_3=0.1$ 、 $w_4=0.1$ 、 $w_5=0.1$ 。图 4 为时敏目标参数设置, 包括时敏目标的时间窗口值 T_{tw} 、时间窗口效果测度值加权系数 λ_1 、类型指数 Cr 、威胁程度加权系数 λ_2 。图 5 为传感器平台参数设置, 包括雷达方位分辨率 ρ 、雷达载波波长 α 、航速 V 、最大作用距离 $S_{d_{max}}$ 、初始斜视角 ϕ 、运动模型。图 6 为武器平台参数设置, 包括航速、准备时间、留空时间, 图 7 为人工干预界面。



图 4 时敏目标参数设置

Fig. 4 Time sensitive target parameter setting



图 5 传感器平台参数设置

Fig. 5 Sensor platform parameter setting



图 6 武器平台参数设置
Fig. 6 Weapon platform parameter settings



图 7 人工干预
Fig. 7 Manual intervention

设定每个时敏目标最多可与 1 个传感器平台配对，即： $\sum_{j=1}^4 Sx_{ij} = 1, (i=1,2,3,4)$ 且 $\sum_{i=1}^4 Sx_{ij} = 1, (j=1,2,3,4)$ 。每个时敏目标最多可与 1 个武器平台配对，即： $\sum_{j=1}^4 Wx_{ij} = 1, (i=1,2,3,4)$ 且 $\sum_{i=1}^4 Wx_{ij} = 1, (j=1,2,3,4)$ 。表 3 和表 4 分别是传感器平台探测概率和武器平台杀伤概率，两种概率一般由传感器平台和武器平台报告，在仿真实验中使用人为设置的参数。

表 3 传感器平台探测概率
Tab. 3 Sensor platform detection probability

传感器平台	目标			
	1	2	3	4
1	0.81	0.71	0.82	0.79
2	0.73	0.92	0.74	0.83
3	0.89	0.85	0.72	0.80
4	0.73	0.82	0.69	0.75

表 4 武器平台杀伤概率
Tab. 4 Weapon platform kill probability

武器平台	目标			
	1	2	3	4
1	0.88	0.75	0.77	0.86
2	0.80	0.86	0.76	0.75
3	0.81	0.76	0.74	0.77
4	0.73	0.72	0.69	0.71

模拟退火算法解算参数设定：初始温度 $Temp_{mit} = 1$ ，衰减系数 $Temp_t = 0.95$ ，最大迭代次数 $K=100$ ，终止温度 $Temp_{stop} = 0.01$ 。遗传算法参数设定：种群规模 $N=3$ ，交叉概率 $P_{chi} = 0.95$ ，变异概率 $P_{mut} = 0.2$ ，终止遗传代数 $G=7$ ，最大进化代数 $E=100$ ，遗传收敛值 $\epsilon = 0.01$ 。

根据以上的参数设定，利用本文第二节中介绍的模拟退火算法与遗传算法进行了 10 000 次实验以验证所述方法的有效性与稳定性。为更好解释用于武器平台与目标配对的遗传算法，表 5 显

示了其中一次实验的遗传算法各代染色体情况。在 10 000 次重复的实验中, 传感器平台-目标、武器平台-目标的配对结果均相同, 图 8 显示了实验得到的结果。表 6 为 10 000 次实验中传感器平台-

目标配对算法运行统计, 表 7 为 10 000 次实验的武器平台-目标配对算法运行统计。表中的平均解算时间为 10 000 次配对实验的平均耗时。

表 5 遗传算法各代染色体示意图
Tab. 5 Chromosome of each generation for genetic algorithm

代数	染色体编码	适应度	选择概率/累计概率	染色体选择统计	染色体交叉	染色体变异	最优保存种群	平均适应度/最高适应度
0	3 4 1 2	3.05	0.329/0.329	1	1 4 3 2	1 4 3 2	1 3 4 2	3.090/3.130
	1 4 3 2	3.09	0.333/0.662	1	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	
	1 3 4 2	3.13	0.338/1.000	1	1 3 4 2	2 3 4 1	1 4 3 2	
3	4 1 3 2	3.12	0.338/0.338	1	4 1 3 2	4 1 3 2	1 3 4 2	3.190/3.150
	2 4 3 1	2.97	0.322/0.661	1	1 2 3 4	1 3 4 2	1 3 4 2	
	1 3 4 2	3.13	0.339/1.000	1	1 3 4 2	4 2 3 1	4 3 3 1	
9	4 2 3 1	3.19	0.341/0.341	1	4 2 3 1	4 2 3 1	4 2 3 1	3.190/3.170
	2 4 3 1	2.97	0.318/0.659	0	4 2 3 1	3 2 4 1	3 2 4 1	
	4 2 3 1	3.19	0.341/1.000	2	4 2 3 1	4 2 3 1	4 2 3 1	
10	4 2 3 1	3.19	0.335/0.335	0	4 2 3 1	4 1 3 2	4 2 3 1	3.190/3.190
	3 2 4 1	3.13	0.329/0.665	0	4 2 3 1	4 2 3 1	4 2 3 1	
	4 2 3 1	3.19	0.335/1.000	3	4 2 3 1	4 2 3 1	4 2 3 1	
20	4 2 1 3	3.22	0.334/0.334	0	4 2 3 1	4 2 1 3	4 2 1 3	3.220/3.220
	4 2 3 1	3.19	0.331/0.666	2	4 2 1 3	4 2 1 3	4 2 1 3	
	4 2 1 3	3.22	0.334/1.000	1	4 2 3 1	4 2 3 1	4 2 1 3	



图 8 配对结果与运行界面

Fig. 8 Pairing results and running interface

表 6 传感器平台-目标配对算法运行统计(10 000 次实验)

Tab. 6 Sensor platform-target pairing algorithm statistics (10,000 times)

平均迭代次数	最大迭代次数	最小迭代次数	平均解算时间/s	最长解算时间/s	最短解算时间/s
21	28	11	2.654	6.155	1.169

表 7 武器平台-目标配对算法运行统计(10 000 次实验)

Tab. 7 Weapon platform-target pairing algorithm statistics (10,000 times)

平均迭代次数	最大迭代次数	最小迭代次数	平均解算时间/s	最长解算时间/s	最短解算时间/s
10	35	6	2.931	13.274	2.619

由表 6 和 7 可以看出, 本文所提出的时敏打击链构建方法的确十分迅速高效, 且结果稳定。打击 4 个时敏目标, 统计 10 000 次配对实验的平均耗时只有 5.585 s, 最长解算时间也只需几十秒, 建立打击链的速度满足实际需求, 较好地体现了本文提出的时敏打击链快速构建方法的效率。

4 结论

本文描述了时敏目标打击链的快速构建的全过程, 引入模拟退火算法和遗传算法, 与现有技术相比, 其显著优点: 针对时敏打击的严格时间约束特性和系统资源优化分配问题, 提出时间约束资源优化分配方法, 基于目标的时间窗口和武器对目标的打击时间及杀伤概率建立时间约束下的传感器目标、武器-目标配对方法, 与传统资源优化分配方法相比, 该方法考虑了时间特性对资源分配的影响, 增强了全局优化搜索能力, 提高了资源优化分配的适用性和稳定性, 对打击敌人和提高部队作战效能具有重大的意义。

本文提出的将寻优算法引入构建时敏打击链的方法可以为日后的研究提供一些借鉴和参考, 例如, 进一步引入机器学习的方法来改进构建时敏打击链的过程, 使构建效率在此基础上再有所提升。

参考文献:

- [1] 张开德, 赵书斌. 时敏打击指挥控制技术初探[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(2): 1-5.
Zhang Kaide, Zhao Shubin. The Command and Control Technology of Time Critical Strike[J]. Command Control and Simulation, 2006, 28(2): 1-5.
- [2] Li X Y, Zhou D Y, Pan Q, et al. Weapon-target Assignment Problem by Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition[J]. Complexity (S1076-2787), 2018, 2018: 1-19.
- [3] Chang T, Kong D, Hao N, et al. Solving the Dynamic Weapon Target Assignment Problem by an Improved Artificial Bee Colony Algorithm with Heuristic Factor Initialization[J]. Applied Soft Computing, 2018, 70: 845-863.
- [4] 王圣东. 时敏目标协同打击链的构建[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(5): 43-46.
Wang Shengdong, Cooperative Engage Link Structuring Method Aiming at Time Critical Target Striking[J]. Command Control and Simulation, 2013, 35(5): 43-46.
- [5] 周海瑞, 刘小毅. 美军联合火力机制及其指挥控制系统[J]. 指挥信息系统与技术, 2018, 9(1): 8-17.
Zhou Hairui, Liu Xiaoyi. U.S. Military joint fire Mechanism and its Command and Control Systems[J]. Command Information System and Technology, 2018, 9(1): 8-17.
- [6] Dirik N, Hall S N, Moore J T, et al. Maximizing Strike Aircraft Planning Efficiency for a Given Class of Ground Targets[J]. Optimization Letters (S1862-4480), 2015, 9(8): 1729-1748.
- [7] Qin H, Fan P, Tang H, et al. An Effective Hybrid Discrete Grey Wolf Optimizer for the Casting Production Scheduling Problem with Multi-objective and Multi-constraint[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 2019, 128: 458-476.
- [8] Weaver P. Development and Evaluation of an Automated Decision Aid for Rapid Re-tasking of Air Strike Assets in Response to Time Sensitive Targets[D]. Monterey: Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA. 2004: 2-3.
- [9] Sauter J, Matthews R, Robinson J, et al. Swarming Unmanned Air and Ground Systems for Surveillance and Base Protection[C]// AIAA Infotech@ Aerospace Conference and AIAA Unmanned Unlimited Conference. Seattle: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1850.
- [10] Kline A, Ahner D, Hill R. The Weapon-target Assignment Problem[J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2019, 105: 226-236.
- [11] 刘钢, 廖守亿, 于功健, 等. 时敏目标打击作战信息链仿真研究[J]. 信息通信, 2016(10): 76-79.
Liu Gang, Liao Shouyi, Yu Gongjian, et al. Simulation Research of Time-sensitive Target Striking Information Chain[J]. Information & Communications, 2016(10): 76-79.
- [12] Van Laarhoven P J M, Aarts E H L. Simulated Annealing: Theory and Applications[M]. Berlin: Springer, Dordrecht, 1987.

- [13] Bräysy O, Dullaert W, Hasle G, et al. An Effective Multi Restart Deterministic Annealing Metaheuristic for the Fleet Size and Mix Vehicle-Routing Problem with Time Windows[J]. *Transportation Science* (S0041-1655), 2008, 42(3): 371-386.
- [14] Anderson J A, Irrgang M E, Glotzer S C, et al. Scalable Metropolis Monte Carlo for Simulation of Hard Shapes[J]. *Computer Physics Communications* (S1100-4655), 2016, 100(204): 21-30.
- [15] Chatterjee S, Laudato M, Lynch L A. Genetic Algorithms and Their Statistical Applications: An Introduction[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 1996, 22(6): 633-651.