

# 基于改进罚函数策略的综合射频阵列智能多目标优化配置

薛慧<sup>1,2</sup>, 张涛<sup>1</sup>, 王锐<sup>1†</sup>, 李文桦<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

**摘要:** 综合射频系统是未来机载电子设备的发展趋势. 本文首次从系统工程运筹学的角度对无人机载综合射频系统中的雷达、侦察、通信、干扰的作战任务及威力进行了研究分析; 通过任务矢量的构建可实现不同作战环境下综合射频阵面的自主配置, 建立了基于任务矢量的综合射频系统阵面资源优化的物理模型和数学模型; 创建了基于作用距离、功耗、作战效能的多目标优化模型; 分析了孔径约束、功率约束和作用距离约束条件, 构建了基于任务矢量、距离矢量和优先级矢量的距离偏差值作为适应度函数. 通过基于改进罚函数的多目标进化算法对综合射频系统的阵列资源配置进行了多目标优化. 最后对优化结果进行了对比分析, 可为工程实践提供参考.

**关键词:** 综合射频; 阵面; 资源配置; 智能; 多目标优化

**引用格式:** 薛慧, 张涛, 王锐, 等. 基于改进罚函数策略的综合射频阵列智能多目标优化配置. 控制理论与应用, 2021, 38(12): 1911 – 1918

DOI: 10.7641/CTA.2021.10407

## Intelligent multi-objective optimal allocation of integrated RF array based on improved penalty function strategy

XUE Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1†</sup>, LI Wen-hua<sup>1</sup>

1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

**Abstract:** This article discusses the array resource allocation of integrated radio frequency (RF) system on the UAV which may include the radar, electronic reconnaissance, data link, and electronic jammer, etc. Firstly, the physical model and mathematical model of the integrated RF system are established; and the integrated RF system can realize automatic allocation under different combat environments based on the task vector. Secondly, the optimization targets of detection range, system operating power and synthesis operating efficiency, and the constraints of aperture, power and range are analyzed. Thirdly, the fitness function based on the task vector, range vector and priority vector is established. Finally, the optimization results of the array allocation of the integrated RF system under the different combat environments are given by the intelligent multi-objective optimization algorithms based on the improved penalty function strategy; and the results are compared and analyzed, which could provide reference for the engineering practice.

**Key words:** integrated radio frequency; array; resource allocation; intelligent; multi-objective optimization

**Citation:** XUE Hui, ZHANG Tao, WANG Rui, et al. Intelligent multi-objective optimal allocation of integrated RF array based on improved penalty function strategy. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(12): 1911 – 1918

## 1 引言

将机载航电设备中的雷达、电子战、通信、侦察等电子设备作为一个整体综合设计, 所形成的高度综合化传感器被称为综合射频系统. 综合射频系统通过平台内传感器的一体化设计, 可以减轻电子设备的重量和体积, 在作战平台受限的领域中有独特优势, 如空

军、海军平台. 鉴于传感器间的高度集成, 综合射频系统更有利于信息的共享和深度融合, 所以其在应对隐身目标方面具有一定的优势, 可以通过有源、无源射频系统的信息融合, 提升对隐身目标的探测能力和可靠性, 同时也是实现低功率、零功率探测的一个技术手段.

收稿日期: 2021-05-15; 录用日期: 2021-07-08.

†通信作者. E-mail: ruiwangnudt@gmail.com.

本文责任编辑: 王凌.

国家自然科学基金优秀青年基金项目(62122093), 国防科技大学自主科研项目计划项目(ZZKY-ZX-11-04), 季华实验室项目(X210101UZ210)资助.

Supported by the National Science Fund for Outstanding Young Scholars (62122093), the Scientific Key Research Project of National University of Defense Technology (ZZKY-ZX-11-04) and the Ji-Hua Laboratory Scientific Project (X210101UZ210).

国内外已经开展了广泛的综合射频系统研究和关键技术攻关. 在舰载综合射频系统研究方面, 美国在上世纪90年代即开展了先进多功能射频概念(advanced multifunction RF concept, AMRFC)研究<sup>[1,2]</sup>, 在6~18 GHz频段内完成了雷达、通信、电子战的一体化设计; 2009年美国海军启动了 InTop(integrated top-side, InTop)项目, 综合射频功能包括视距通信、卫星通信、信息战、电子战和雷达等. 在机载综合射频系统研究方面, 美国已经装备的F-22<sup>[3]</sup>和F-35<sup>[4]</sup>以及俄罗斯的T-50都部分地采用了综合射频技术; 美国开展了综合传感器系统(integrated sensor system, ISS)计划和多功能综合射频系统(multifunction integrated RF system, MIRFS)项目, 实现了雷达、电子战、通信和导航系统共用处理器和部分天线孔径; 法国泰勒斯公司开展了战斗机、无人机的综合射频研究<sup>[5]</sup>, 在超宽带有源相控阵天线领域取得了突破; 英国赛莱克斯公司开展了无人机超紧凑型多功能射频传感器研究, 采用一部有源相控阵天线实现了4.5~18 GHz范围内的雷达、电子支援、电子对抗和通信等功能, 并实现了处理终端的多功能、通用化. 综合射频系统的实现涉及到宽带射频源、宽带数字阵以及滤波器、放大器等各项关键技术, LIU Y, LIANG W, SALEEM A R等人<sup>[6-8]</sup>分别针对综合射频系统中的发射器、接收阵列、滤波器、功率放大器、振荡器及可靠性等展开了技术研究<sup>[9-12]</sup>. 智能优化技术的发展为综合射频的方案设计、系统重构及子阵划分提供了基本方法和依据, LI K W, LIAO T J, SATYABRATA S等人<sup>[13-15]</sup>开展了射频系统优化、波形优化等研究<sup>[16-19]</sup>. 国内方面, 徐艳国等人<sup>[20]</sup>开展了综合射频发展和关键技术的研究, 刘民等人<sup>[21]</sup>针对综合射频系统的可重构软件架构进行了研究. 但是面向未来的零功率、低功率作战, 综合射频系统如何适应未来战场, 其效能如何与作战任务实

现最佳耦合, 实现综合射频资源与作战环境的灵活配置与重构, 是面向作战的综合射频系统的顶层设计, 尚未有相关人员展开研究.

本文基于宽带数字阵列雷达技术、软件定义技术<sup>[22-25]</sup>、智能优化技术<sup>[26-30]</sup>、可重构技术<sup>[21]</sup>和子阵技术<sup>[31,32]</sup>的迅猛发展, 研究了综合射频系统阵面资源在不同作战环境中的配置与优化, 结合机载平台在强对抗环境和低威胁环境中的不同功能需求, 采用基于罚函数的多目标进化算法对综合射频的阵面资源进行了优化重构, 给出最优解集. 本文第2-3部分分别论述了综合射频系统的数学模型和物理模型, 第4部分构建了优化函数、约束条件和适应度函数, 第5部分详细介绍了优化算法及流程, 第6部分给出了不同作战环境下的资源优化结果, 并通过不同参数的对比验证了算法的鲁棒性, 最后给出了结论.

## 2 综合射频系统

多功能综合射频系统的实现需要基于宽带数字相控阵技术、软件化技术和智能化技术等. 数字阵的每个阵元可实现单独控制, 阵面划分可重构, 波束形成可灵活设计, 为综合射频的任务分配和重构提供了技术基础. 宽带数字阵则为多功能的分配提供了条件. 软件化和智能化技术可使各阵元功能实现重定义, 根据当前的电磁环境实现自适应调整. 如图1所示为综合射频系统框图, 根据不同的作战任务和环境威胁, 综合射频系统的天线阵列被划分为不同功能的子阵, 回波数据通过相应的信道后进行信号处理、数据处理, 经过数据融合与分析, 重新评估平台所面临的威胁等级是否发生变化, 从而开展优化配置和资源调度, 通过系统控制实现发射/接收(T/R)模块和天线阵列的优化再配置, 使综合射频系统功能与所面临的作战任务与威胁环境实现最优配置.

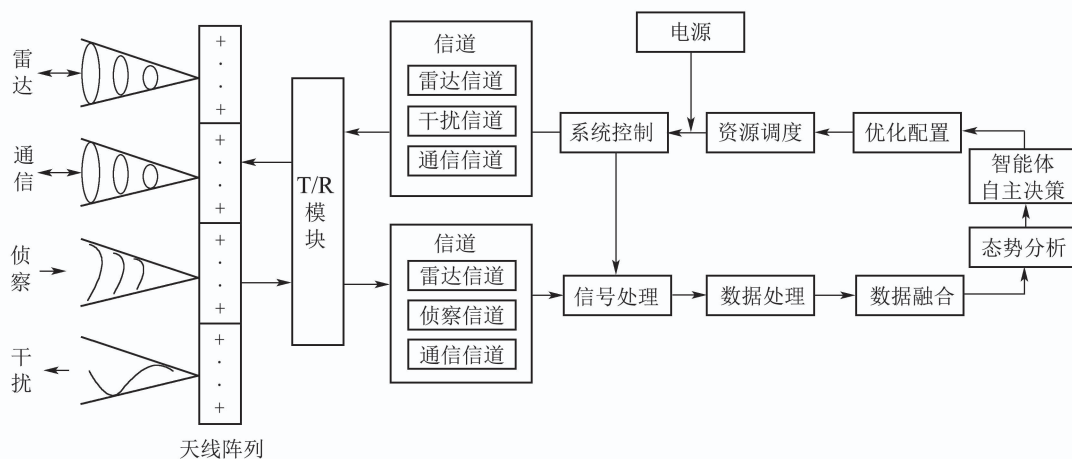


图1 综合射频系统框图

Fig. 1 Block diagram of integrated RF system

从功能角度分析, 综合射频可实现有源雷达探测、无源电子侦察、通信传输以及对威胁目标的电子干扰等. 雷达可实现探测、搜索、跟踪、成像等任务, 既发射电磁波, 也接收从目标返回的回波信息进行目标信息分析; 电子侦察属于被动工作方式, 仅接收空中不同方向的电磁信号, 通常具有大带宽、宽频谱、大角度等特点; 通信是未来空中飞机必不可少的能力, 其可能与编队飞机、地面等装备进行视距通信, 也可能进行卫星通讯, 需要同时进行单通信或多通信任务, 包括接收和发射; 无人机配备电子干扰功能可以对目标发起主动进攻, 也可以对自身实施电子保护, 对没有武器装备的无人机至关重要.

1) 雷达作用距离方程为

$$R_{\text{Rad}} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{r \min}}}, \quad (1)$$

其中:  $R_{\text{Rad}}$ 为雷达探测距离,  $P_t$ 为雷达发射功率,  $G_t$ 为发射天线增益,  $G_r$ 为接收天线增益,  $\lambda$ 为波长,  $\sigma$ 为目标反射截面积,  $P_{r \min}$ 为接收单元的最小可探测功率.

2) 电子侦察作用距离方程为

$$R_{\text{Rec}} = \sqrt[2]{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{r \min}}}, \quad (2)$$

其中:  $R_{\text{Rec}}$ 为侦察距离,  $P_t$ 为目标的发射功率,  $G_t$ 为发射天线增益,  $G_r$ 为接收天线增益,  $\lambda$ 为波长,  $\sigma$ 为目标反射截面积,  $P_{r \min}$ 为接收单元的最小可探测功率.

3) 通信距离方程为

$$R_{\text{Com}} = \left[ \frac{P_t K}{P_{r \min}} \right]^{\frac{1}{\gamma}} R_0, \quad (3)$$

式中:  $R_{\text{Com}}$ 为通讯距离,  $P_t$ 为发射功率,  $K$ 为天线系数,  $P_{r \min}$ 为接收方的最小可探测功率,  $\gamma$ 为路径损耗系数,  $R_0$ 为远场参照距离.

4) 电子干扰距离方程为

$$R_{\text{Jam}} = \sqrt[2]{\frac{4\pi P_J G_J R_T^4}{K P_T \sigma}}, \quad (4)$$

其中:  $R_{\text{Jam}}$ 为电子干扰距离,  $K$ 为调整系数(取决于干扰样式),  $P_J$ 为干扰机发射功率,  $G_J$ 为干扰机天线增益,  $P_T$ 为雷达发射功率,  $R_T$ 为掩护目标与雷达的距离,  $\sigma$ 为目标截面积. 由于是自卫干扰, 且无人机载系统功耗越低越好, 所以干扰作用距离均处于烧穿距离之内.

根据上面各式, 可以得出各分系统关于发射功率、孔径、天线增益等的影响参数, 如表1所示.

表 1 综合射频分系统的影响参数

Table 1 Parameters of integrated RF subsystem

参数功能	发射功率	孔径尺寸	最小可探测功率	波长	天线发射增益	天线接收增益
雷达探测	✓	✓	✓	✓	✓	✓
通信发射	✓	✓	×	✓	✓	×
通信接收	×	✓	✓	×	×	✓
电子干扰	✓	✓	×	✓	✓	×
电子侦察	×	✓	✓	✓	×	✓

### 3 综合射频面阵分配的物理模型

对于一个  $M \times N$  的阵列, 综合射频各分系统阵元划分示意图如图2所示. 综合射频系统在某特定时间需要执行雷达探测、电子侦察、通信和电子干扰中的全部或部分任务, 设任务矢量为  $\mathbf{T}$ , 则

$$\mathbf{T} = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4], \quad (5)$$

其中:  $T_i$  依次代表雷达、电子侦察、通信、电子干扰, 0代表暂时不需要执行该任务, 反之则执行, 从而形成某一时刻的任务矢量.

由于是相同的阵元, 所以各单元具有相同的接收灵敏度(对雷达探测和电子侦察任务), 相同的发射系数(针对通信、雷达和电子干扰). 假设所有单元的发射功率相同, 则电磁发射功率与能接收到的能量都依

赖于该功能所占用的孔径的尺寸, 所以雷达探测距离、电子侦察距离、干扰距离、通信距离都正比于作用于该功能的天线单元数量.

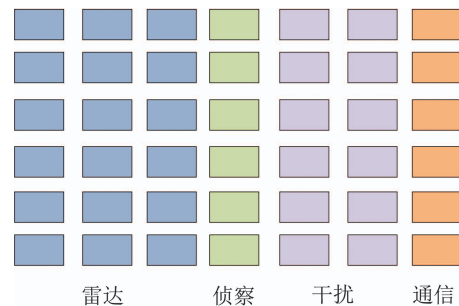


图 2 综合射频各分系统阵元划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of array element division

## 4 优化目标

### 4.1 优化函数

对于单平台无人机,综合射频阵面大小是一定的,但其需要兼顾雷达、侦察、通信、干扰等不同功能,所以各分系统作战能力存在“此消彼长”的矛盾关系.这是一个典型的系统工程设计问题,系统性能由各分系统共同决定,不能突出某一部分的性能,所以优化目标函数应能体现系统的综合性能.

本文采用基于罚函数策略的多目标优化方法求解该问题.以各分系统分配的阵元数量 $x_i$ 为自变量,即 $X = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]$ ,其中 $n \leq 4$ ,维度等于任务矢量的非零维度;受阵元大小约束, $x_i$ 应小于阵元总数 $\Omega$ ,后者即为可行解的域.目标函数可以考虑的比较多,本文主要选择作用距离、系统能耗、综合作战效能作为优化目标.

首先,作用距离作为射频系统的重要参数,表征了系统可覆盖的范围,因此设为优化目标之一.根据式(1)–(4)可知,各分系统的性能均与其所占的阵元数量直接相关,设系统作用距离函数为 $F$ ,其为各分系统作用距离 $R_{\text{rad}}$ ,  $R_{\text{rec}}$ ,  $R_{\text{com}}$ ,  $R_{\text{jam}}$ 的复合函数,后者均为 $x_i$ 的函数,将式(1)–(4)代入可将 $F$ 表示为

$$F = f_R(R_{\text{Rad}}, R_{\text{Rec}}, R_{\text{Com}}, R_{\text{Jam}}). \quad (6)$$

其次,对于机载系统,体积能耗要求较高,在满足系统要求的情况下,应尽量降低综合射频系统的能耗 $P$ ,可以使无人机实现更远的航程、更长的航时,结合表1的分析,系统功耗可表示为

$$P = \sum_{i=1}^4 P_i(x_i). \quad (7)$$

第三,若想使整个综合系统的效能最大化,应该使整个阵面尽可能的参与资源配置,在满足一定作战需求的同时使系统综合效能 $E$ 最大化,与任务矢量 $T_i$ 、优先级矢量 $B_i$ 及各分系统作用距离 $R_i$ 均相关,表示为

$$E = \sum_{i=1}^4 f_E(T_i, B_i, R_i). \quad (8)$$

综上所述,多目标优化函数可写为

$$\begin{cases} \max F = f_R(R_{\text{Rad}}, R_{\text{Rec}}, R_{\text{Com}}, R_{\text{Jam}}), \\ \min P = \sum_{i=1}^4 P_i(x_i), \\ \max E = \sum_{i=1}^4 f_E(T_i, B_i, R_i), \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n) \in \Omega.$$

### 4.2 约束条件

综合射频阵面资源的空间配置主要受系统孔径、功率的约束,并应满足实际作战需求.

#### 1) 孔径约束.

综合射频各分系统的阵面配置总和应等于整个阵列,即

$$\sum_{i=1}^4 T_i x_i = D, \quad (10)$$

其中: $T_i$ 为任务矢量,决定了第 $i$ 次优化时的分系统功能需求, $x_i$ 分别为用于执行雷达、电子侦察、通信、电子干扰的阵列单元, $D$ 为阵列的总孔径.

#### 2) 功率约束.

综合射频的总功率应小于系统设计的峰值功率,即

$$P = \sum T_i P_i(x_i) < P_{\text{Peak}}, \quad (11)$$

其中 $P_i$ 表示各分系统的功耗.如表1所示,综合射频中的雷达、通信可能涉及到发射和接收,侦察仅涉及接收,干扰仅涉及发射,所以忽略接收器件功率,综合射频的总功率主要取决于发射功率之和,即雷达发射功率、通信发射功率、电子干扰发射功率之和.由于综合射频阵元是各分系统阵元之和,所以功率约束条件也间接的约束了无源分系统的阵面占比.

#### 3) 作用距离约束.

各分系统的作用距离应与实际作战需求相匹配,最典型的如电子干扰的距离设置应远小于电子侦察距离和雷达探测距离,因为前者需要后面二者的目标信息.所以应根据作战需求对各分系统的作用距离进行约束.根据无人机使用情况,电子侦察属于无源侦察,直接接收在该方向上各目标的电磁信号.假设雷达探测距离为 $R_{\text{Rad}}$ ,则对于相同波长、相同最小可探测功率,此时侦察目标的距离应该位于 $2R_{\text{Rad}}$ 之外.同样的,电子干扰需要耗费较大的功率,所以电子干扰流程应该在电子侦察和雷达确认目标的相关参数之后,再采取有效的应对措施,在合适的距离上对其进行干扰.由于雷达具有主被动探测性能,与其它各功能兼有关联,所以此处选择雷达作用距离为基准距离,对其它系统作用距离进行缩放如下:

$$\begin{cases} R_{\text{Rec}} = \delta_1 R_{\text{Rad}}, \\ R_{\text{Com}} = \delta_2 R_{\text{Rad}}, \\ R_{\text{Jam}} = \delta_3 R_{\text{Rad}}, \end{cases} \quad (12)$$

其中: $R_{\text{Rec}}$ 为电子侦察距离, $R_{\text{Com}}$ 为通信距离, $R_{\text{Jam}}$ 为电子干扰距离, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 为修正系数,根据使用需求进行设定.

### 4.3 适应度函数

进化算法主要基于生物进化机制,通过繁殖、变异、重组和选择实现进化,优化问题的候选解决方案在群体中扮演个体的角色,适应度函数决定了解决方案的质量.所以适应度函数的选取应能体现优化目标的价值,对优化具有较好的引导性.

根据上述的优化目标和约束条件分析, 此处综合任务矢量 $T$ 、距离矢量 $R$ 、优先级矢量 $B$ 推导出作用距离偏差值 $\sigma$ 作为适应度函数

$$\sigma = \sum \frac{T_i B_i * (R_i - \delta_i R_{Rad})^2}{R_i^2 + R_{Rad}^2}, \quad (13)$$

作用距离偏差值 $\sigma$ 越小, 表明求得的各分系统的作用距离与期望值越接近, 越符合设计预期. 其中, 任务矢量 $T$ 将作战任务与综合射频功能相关联, 决定了射频功能的划分类型; 优先级矢量 $B$ 可根据任务优先级对射频功能的优化过程进行调整, 优先满足优先级较高的资源划分; 式中以雷达作用距离值 $R_{Rad}$ 作为衡量其它分系统作用距离的基准, 与式(12)相匹配;  $(R_i - \delta_i R_{Rad})$ 表示某分系统作用距离值与期望值之间的偏差, 差值越小说明优化效果越好; 最后通过  $(R_i^2 + R_{Rad}^2)$  的归一化求和计算出各分系统作用距离和期望值的偏离程度. 在式(10)–(12)的约束下,  $(R_i^2 + R_{Rad}^2)$  越大, 优化目标式(6)越大,  $\sigma$ 越小; 由于各分系统的任务优先级不同, 在阵面资源配置过程中, 统筹作用距离时不能做简单叠加处理, 通过优先级 $B_i$ 的加权调整优化算法的收敛方向, 使优化目标(8)同步增大, 满足优化需求. 在满足功率约束式(11)的前提下, 功耗优化目标式(7)越小越好, 但同时受到作用距离的约束, 在实现时优先保证作用距离和系统效能的优化, 同等条件下优先考虑无源工作方式以节约系统能耗.

## 5 优化算法

本文采用基于罚函数的多目标进化算法进行优化求解. 罚函数法通过个体违反约束的程度对算法优化进程进行调整引导, 具有实现简单、快速收敛的优点, 缺点是惩罚系数的设置会直接影响算法寻找可行解的速度和结果. 惩罚系数设置得太小, 算法寻找可行解的速度较慢; 相反, 则不利于算法收敛到最优解. 传统的罚函数法是将惩罚项 $p(x)$ 添加到目标函数的构建中而形成新的目标函数, 本算法中的罚函数 $p(x)$ 主要用于修正变异参数和进化方向, 以加速收敛速度, 从而实现本文综合射频系统的在线优化配置. 优化流程图如图3所示, 具体流程包括:

1) 流程开始, 初始化综合射频各系统参数和算法参数, 包括最小可探测功率、天线增益及目标相关参数等;

2) 根据任务矢量 $T$ 确定阵面划分的类型需求, 以任务矢量的非零维度作为染色体的基本维度, 采用随机方法生成满足孔径约束条件和功率约束条件的初始种群 $N$ , 不再进行传统的二进制编码, 不影响进化效能的同时提升了计算效率;

3) 根据惩罚函数修正变异方向, 采用随机方法选择交叉点和变异点, 进行交叉、变异, 判断约束条件,

如果符合约束的解的个数超过 $N$ , 则根据适应度函数将其截断为 $N$ , 以确保总体大小等于 $N$ ;

4) 融合父代、子代, 对 $2N$ 个个体进行适应度函数计算并排序, 选择最优的 $N$ 个个体;

5) 判断循环是否达到迭代次数, 否则回到步骤(3)继续优化;

6) 选择最优个体, 并根据综合射频阵列的满阵要求及各功能的优先级矢量, 修正最优配置参数, 流程结束.

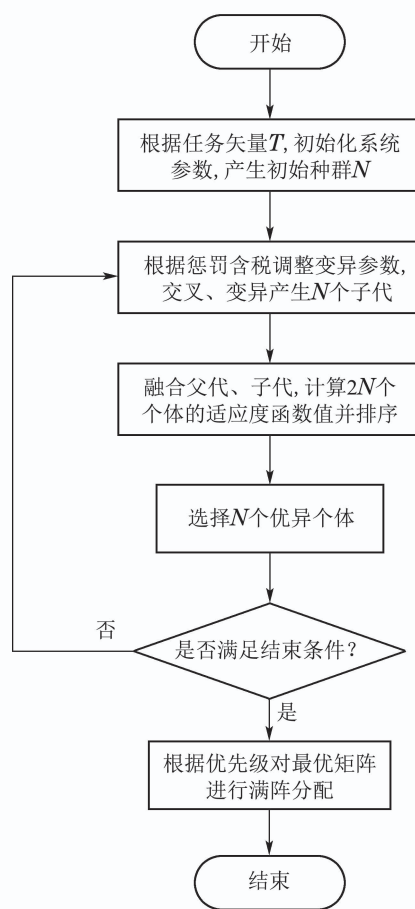


图3 优化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of optimization algorithm

## 6 仿真实验

### 6.1 作战环境

假设无人机执行某任务, 编队中包括一架战斗机和另外1架无人机, 无人机主要负责前出执行战场态势侦察, 并在一定程度上保护自身安全. 在不同的环境中, 无人机面临的威胁不同, 任务设置可通过任务矢量 $T$ 进行人工设置或自动修改, 从而通过任务矢量 $T$ 对综合射频系统天线单元的配置进行优化计算. 本文实验部分将对无人机在低威胁环境和高威胁环境下分别进行综合射频的任务优化.

#### 1) 低威胁环境.

低威胁环境是指一般的侦察环境, 无人机执行高空远航程侦察, 未受到电子干扰、导弹攻击等, 此时综合射频的任务包括雷达探测、电子侦察和通信传输, 任务矢量 $\mathbf{T} = [1 \ 1 \ 1 \ 0]$ .

2) 高威胁环境.

高威胁环境是指受到对方雷达的探测或者受到导弹的攻击, 需要启动电子干扰功能对方雷达实施电子干扰或对来袭导弹实施诱骗干扰等, 从而保证自身的安全. 此时, 任务矢量 $\mathbf{T} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$ , 综合射频任务以电子干扰为最高优先级, 侦察、雷达和通信的优先级相应降低.

6.2 参数设置

系统参数设置如表2所示, 相关物理意义如前所述, 其中 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 分别表示期望的侦察距离、通信距离、干扰距离与雷达距离的比值, 可以根据不同平台需求进行调整.

表2 综合射频系统仿真参数设置

Table 2 Parameters for integrated RF system

性能指标	参数值	性能指标	参数值
波长	0.03 m	$\delta_1$	2
雷达接收天线增益	0.95	$\delta_2$	0.5
雷达发射天线增益	0.95	$\delta_3$	0.3
单元最小可探测功率	10e-6 W	侦察目标发射功率	600 kW
电子侦察天线增益	0.35	电子干扰天线增益	0.95
通信天线增益	0.95	干扰目标发射功率	1 MW

6.3 优化结果

为了验证本文所提算法的有效性, 我们设置了以下实验. 首先, 对阵元数为2000时的系统进行了优化配置, 给出了优化结果; 其次, 为了验证算法在不同规模阵面中的鲁棒性, 将阵元数修改为5000, 将优化结果与阵元数2000时进行了对比分析, 优化结果与理论一致; 最后, 改变修正系数 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 的值, 验证算法对不同优化目标函数的普适性. 最后, 多次执行优化, 对算法进行蒙特卡洛分析, 从整体上对算法进行了综合评价.

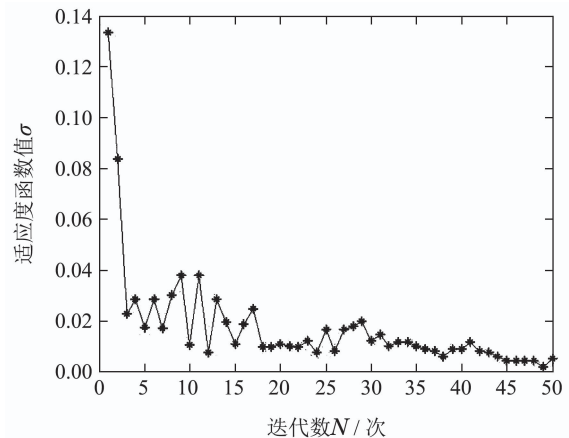
1) 不同阵元数的优化结果.

假设阵元总数 $\Omega$ 为2000, 每行单元数为20, 设置迭代次数为50, 交叉因子为0.8, 变异因子为0.2, 低威胁环境和高威胁环境下的优化结果如图4所示.

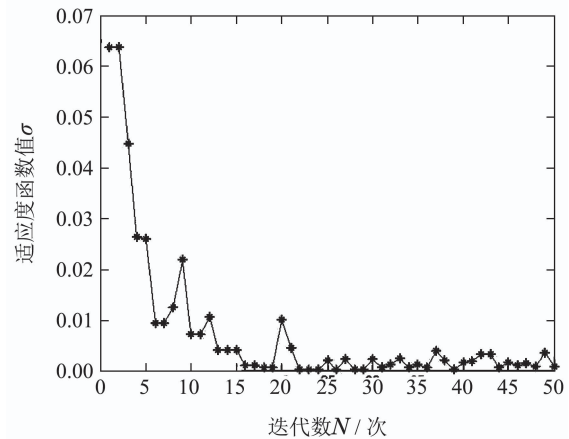
根据式(13), 本优化算法选用带权重的归一化作用距离偏差值作为适应度函数, 其影响因素包括距离矢量、优先级矢量和修正系数. 作用距离偏差值 $\sigma$ 越小, 表明求得的各分系统的作用距离与期望值越接近, 越符合优化预期. 如图4所示, 低威胁环境下 $\sigma$ 初始值约为0.064, 优化后的 $\sigma$ 值低于0.005, 收敛过程稳定. 高

威胁环境下 $\sigma$ 初始值超过0.13, 优化后的 $\sigma$ 值约为0.005, 收敛过程稳定. 可以发现, 低威胁环境下的 $\sigma$ 初始值低于高威胁环境下的 $\sigma$ 初始值, 这是由于低威胁环境下综合射频系统的功能只有雷达、侦察和通信3种功能, 根据式(13)其适应度函数只有两项, 所以适应度函数初始值较低; 而在高威胁环境下综合射频系统的功能增加了电子干扰, 适应度函数包括3项, 其初始值增大. 但是两种情况下的总体收敛态势均良好, 最后收敛值均低于0.01.

重设阵元总数 $\Omega$ 为5000, 每行单元数为50, 其它参数不变, 高威胁环境和低威胁环境下的适应度函数收敛曲线如图5所示, 优化后的 $\sigma$ 值均低于0.01, 且收敛过程稳定. 其中, 高威胁环境下的 $\sigma$ 初始值和优化后的值均高于低威胁环境, 原因同上. 此外, 阵元数5000时, 低威胁环境和高威胁环境下的 $\sigma$ 初始值分别为0.11和0.18, 均高于阵元数2000时的0.065和0.13, 这是由于阵元总数增加, 其在不同威胁环境下分配给各分系统的初始单元数增加, 在随机分配的情况下, 其 $\sigma$ 初始值相应增加.



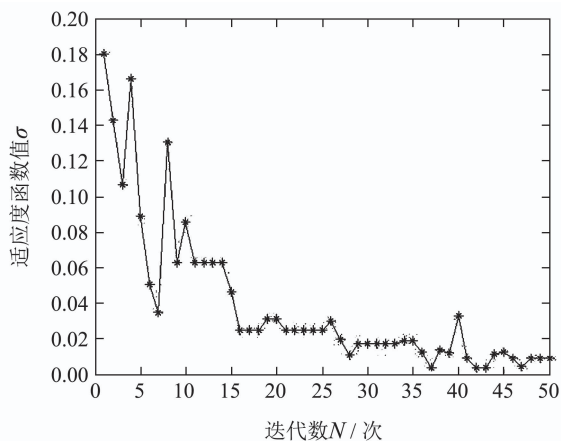
(a) 低威胁环境



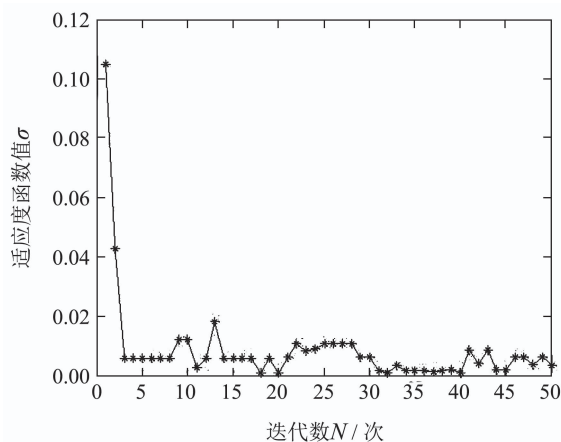
(b) 高威胁环境

图4 阵元数2000时适应度函数收敛图

Fig. 4 Fitness function curve when  $N = 2000$



(a) 低威胁环境



(b) 高威胁环境

图 5 阵元数5000时适应度函数收敛图

Fig. 5 Fitness function curve when  $N = 5000$ 

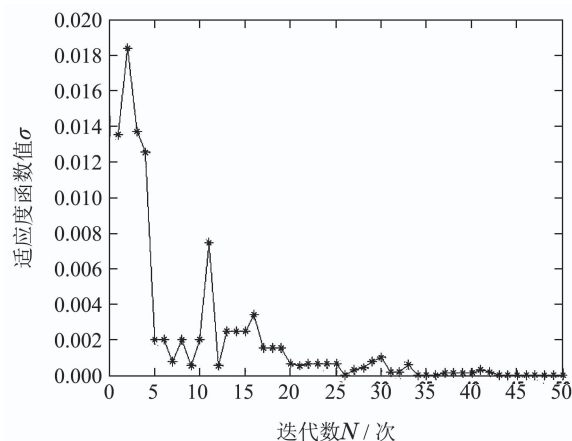
## 2) 不同修正系数的优化结果.

为了验证多目标优化算法的鲁棒性, 将修正参数  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  的值从 2, 0.5, 0.3 修改为 3, 0.67, 0.5, 代表着优化目标函数的改变. 优化结果如图 6 所示, 优化后的  $\sigma$  值均低于 0.01. 这表明, 本文的多目标优化算法具有良好的适应性, 使综合射频系统在不同的威胁环境下满足不同的作战需求, 均能取得良好的优化结果.

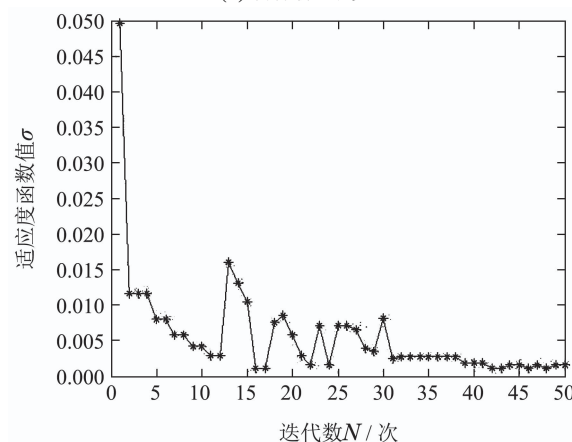
## 3) 算法综合性能分析.

从系统实现角度分析, 该算法可满足实时性优化需求. 运行该优化算法 50 次, 求得的平均运行时间为 38 ms, 满足实时优化的需求.

阵元资源的再配置可提升综合射频系统的作战效能, 变相降低系统功耗, 从而提升无人机的续航时间. 比较高威胁环境与低威胁环境的作战任务, 由于后者不需要实施干扰, 所以将高威胁环境下的干扰阵元重新分配用于其它功能, 在满足通信需求时, 可提升雷达作用距离 20%, 提升侦察距离 40% 以上; 且由于侦察单元的增加, 有效降低了综合射频系统的功耗, 进一步提升了无人机的续航时间.



(a) 低威胁环境



(b) 高威胁环境

图 6  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  的值分别为 3, 0.67, 0.5 时的适应度函数收敛值Fig. 6 Fitness function curve when  $\delta_i$  having values of 3, 0.67, 0.5

## 7 结论

综合射频资源配置优化是一项复杂的约束优化问题, 传统的求解方法难以解决. 本文通过基于改进罚函数的多目标进化算法对综合射频系统的阵面重构进行了空间资源配置研究. 实验结果表明, 本文提出的方法具有较好的鲁棒性, 针对不同的阵元数、不同的威胁环境和优化需求, 均能取得良好的优化结果. 通过任务矢量的设置, 综合射频系统可以自主地在不同威胁度环境下自由切换, 实现了综合射频系统效能与作战任务的耦合和灵活配置, 可提升平台在未来零功率、低功率作战中的安全性. 下一步工作重点是针对分配后的阵面子系统开展分时复用的资源调度研究, 实现阵面划分与时间资源调度之间的高效协同, 从而从空间和时间上提升综合射频系统的效能. 机载综合射频系统是未来机载航电系统发展的必然趋势, 随着大数据技术和智能优化技术的进一步发展, 未来机载射频系统必将更加智能化、小型化和高效, 将装备于未来六代机和新型无人机等平台.

## 参考文献:

- [1] MAZUMDER S, DURAND J P, MEYER S L, et al. High-band digital preprocessor (HBDP) for the AMRFC test-bed. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(3): 1065 – 1071.
- [2] DE GRAAF J, GLANCY J, BROCKETT S, et al. Transmit/receive isolation and ERP measurements of the AMRFC testbed. *IEEE Conference on Radar*. Syracuse, NY, USA: IEEE, 2006: 565 – 572.
- [3] MALAS J A. F-22 radar development. *Proceedings of the IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conference*. Hartford, CT, USA: IEEE, 1997: 831 – 839.
- [4] LEMONS G T, CARRINGTON K. F-35 mission systems design, development & verification. *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Atlanta, Georgia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018: 3519.
- [5] XUE Hui, ZHANG Hao. Research on airborne multi-functional rf integration system. *Journal of CAEIT*, 2016, 11(5): 532 – 539. (薛慧, 张昊. 机载多功能综合射频一体化发展研究. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(5): 532 – 539.)
- [6] LIU Y, HOTTEN J, CHOUDHARY A, et al. All-optimized integrated RF photonic notch filter. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4631 – 4634.
- [7] LIANG W, CHARLES C, RAYMOND L, et al. An integrated RF power delivery and plasma micro-thruster system for nano-satellites. *Frontiers in Physics*, 2018, 6(10): 1 – 9.
- [8] SALEEM A R, STADIUS K, HANNULA J M, et al. A 1.5–5-GHz integrated RF transmitter front end for active matching of an antenna cluster. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(11): 4728 – 4739.
- [9] ESMAELI M, STOCKMANN J, STRASSER B, et al. An integrated RF-receive/B 0-SHIM array coil boosts performance of whole-brain MR spectroscopic imaging at 7 T. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1 – 17.
- [10] ZHU N, MCLAREN R, HOLMES D G, et al. An integrated RF match and baseband termination supporting 395 MHz instantaneous bandwidth for high power amplifier applications. *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. IEEE, 2017: 1114 – 1117.
- [11] STEGNER J, FISCHER M, GROPP S, et al. Highly integrated RF-MEMS multi-frequency oscillator on a silicon-ceramic composite substrate. *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2019: 782 – 785.
- [12] BUDROWEIT J, JAKSCH M P. In-Situ TID testing and characterization of a highly integrated rf agile transceiver for multi-band radio applications in a radiation environment. *2019 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*. IEEE, 2019: 1 – 6.
- [13] LI K W, WANG R, ZHANG T, et al. Evolutionary many-objective optimization: A comparative study of the state-of-the-art. *IEEE Access*, 2018, 6: 26194 – 26214.
- [14] LIAO T, STÜTZLE T, DE OCA M A M, et al. A unified ant colony optimization algorithm for continuous optimization. *European Journal of Operational Research*, 2014, 234(3): 597 – 609.
- [15] CHEN C Y, VAIDYANATHAN P P. MIMO radar waveform optimization with prior information of the extended target and clutter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(9): 3533 – 3544.
- [16] YANG D, JIAO L, GONG M, et al. Artificial immune multi-objective SAR image segmentation with fused complementary features. *Information Sciences*, 2011, 181(13): 2797 – 2812.
- [17] YANG Q, CHEN W N, YU Z, et al. Adaptive multimodal continuous ant colony optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016, 21(2): 191 – 205.
- [18] SEN S. PAPR-constrained pareto-optimal waveform design for OFDM-STAP radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 52(6): 3658 – 3669.
- [19] LELLOUCH G, MISHRA A K, INGGIS M. Design of OFDM radar pulses using genetic algorithm based techniques. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2016, 52(4): 1953 – 1966.
- [20] XU Yanguo, HU Xuecheng. Integrated RF technology and its development. *Journal of CAEIT*, 2009, 4(6): 551 – 559. (徐艳国, 胡学成. 综合射频技术及其发展. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(6): 551 – 559.)
- [21] LIU Min, TANG Xiaobin. Research on design method of wide band reconfigurable RF integratio. *Journal of CAEIT*, 2017, 12(1): 1 – 6. (刘民, 唐晓斌. 机载任务系统通道化宽带可重构综合射频设计方法研究. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(1): 1 – 6.)
- [22] KIRK B H, GALLAGHER K A, OWEN J W, et al. Cognitive software defined radar: A reactive approach to RFI avoidance. *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)*. Oklahoma: IEEE, 2018: 0630 – 0635.
- [23] KIRK B H, NARAYANAN R M, GALLAGHER K A, et al. Avoidance of time-varying radio frequency interference with software-defined cognitive radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 55(3): 1090 – 1107.
- [24] EGBERT A, KIRK B H, BAYLIS C, et al. Fast software-defined radio-based system performance evaluation for real-time adaptive R-F systems. *2020 95th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)*. San Antonio: IEEE, 2020: 1 – 4.
- [25] ZAUGG E, MARGULIS A, MARGULIS M, et al. Next-generation software defined radar: first results. *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*. Florence: IEEE, 2020: 749 – 754.
- [26] LELLOUCH G, MISHRA A K, INGGIS M. Design of OFDM radar pulses using genetic algorithm based techniques. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(4): 1953 – 1966.
- [27] LIU Y J, XIHONG C, YU Z. Joint synchronization estimation based on genetic algorithm for OFDM/OQAM systems. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2020, 31(4): 657 – 665.
- [28] RONGHUA Z, HEMIN S U N, HAO L I, et al. TDOA and track optimization of UAV swarm based on D-optimality. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2020, 31(6): 1140 – 1151.
- [29] SAHA B, RAO D V. A heuristic methodology for optimal deployment of radar systems in a constrained area of operation. *Defence Science Journal*, 2020, 70(4): 412.
- [30] KHAN T A, LING S H. A survey of the state-of-the-art swarm intelligence techniques and their application to an inverse design problem. *Journal of Computational Electronics*, 2020, 19(4): 1606 – 1628.
- [31] WANG Buhong, CHENG Tianhao, LI Xia, et al. Interleaved sparse array design of hybrid phased-MIMO radar. *Control and Decision*, 2021, 36(4): 959 – 966. (王布宏, 程天昊, 李夏, 等. 混合MIMO相控阵雷达的交错稀疏阵列设计. 控制与决策, 2021, 36(4): 959 – 966.)
- [32] XIONG Ziyuan, XU Zhenhai, ZHANG Liang, et al. Research on the optimal subarray partition based on clustering algorithm. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(11): 2615 – 2621. (熊子源, 徐振海, 张亮, 等. 基于聚类算法的最优子阵列划分方法研究. 电子学报, 2011, 39(11): 2615 – 2621.)

## 作者简介:

薛慧 博士研究生, 主要研究方向为综合射频系统的智能优化与资源调度, E-mail: xuehui\_2001@163.com;

张涛 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算智能与优化决策技术、智慧能源系统工程, E-mail: zhangtao@nudt.edu.cn;

王锐 博士, 副教授, 主要研究方向为智能仿真优化与调度、机器学习, E-mail: ruiwangnudt@gmail.com;

李文桦 博士研究生, 主要研究方向为智能优化, E-mail: liwenhua1030@aliyun.com.