

基于电磁兼容分析的舰载雷达优化部署方法^{*}

方小星 朱志宇 张冰 李阳

(江苏科技大学 电子信息学院 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对舰载雷达频谱拥挤 频率相近或相同雷达之间存在电磁兼容的问题 提出了一种基于电磁兼容分析的雷达优化部署方法。针对由定向天线和全向天线雷达组成的雷达系统 建立了电磁兼容模型 将其作为适应度函数 运用粒子群算法对雷达进行优化部署。仿真结果表明 应用粒子群算法结合电磁兼容模型 可以很好地解决雷达的优化部署问题。

关键词: 电磁兼容; 雷达天线; 度量模型; 舰载雷达系统; 粒子群; 优化部署

doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2016.02.006

中图分类号: TN956 文献标志码: A 文章编号: 1009-086X(2016)-02-0037-06

Ship-borne Radar Optimal Deployment Method Based on EMC Analysis

FANG Xiao-xing ZHU Zhi-yu ZHANG Bing LI Yang

(Jiangsu University of Science and Technology, Dept. of Electronics and Information, Jiangsu Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Aimed at the existence of electro-magnetic compatibility (EMC) problems between similar or identical frequency radars when ship-borne radar spectrum is crowding, a radar optimal deployment method based on EMC analysis is presented. For the radar systems composed of directional antenna radars and omni-directional antenna radars, an EMC degree measurement model is established as the fitness function. The optimal deployment of the radars can be got with particle swarm optimization (PSO) algorithm. The simulation results show that application of PSO algorithm combined with EMC model can commendably solve the radar optimal deployment problems.

Key words: electro magnetic compatibility(EMC); radar antenna; measurement model; ship-borne radar system; particle swarm optimization(PSO); optimal deployment

0 引言

在海战场上雷达林立,尤其是雷达工作频谱拥挤的情况下,相近和相同频率雷达同时工作时会产生严重的电磁兼容问题^[1-3],这时候需要对雷达进行优化部署。现有的文献一般只考虑雷达对责任区的覆盖,将覆盖系数和重叠系数为主要优化目

标^[4-7],这种方法主要从对主要方向、主要高度层中的目标区覆盖冗余数最多、体积最大以及单部雷达对目标的覆盖系数最大两个方面进行优化部署。少数文献考虑了雷达的探测概率,通过提高雷达探测概率来优化雷达组网^[8-10],给出了单部雷达探测概率和组网雷达联合探测概率模型,通过分析模型与雷达位置的关系来实现优化部署。然而上述文献忽

* 收稿日期: 2015-04-20; 修回日期: 2016-06-06

基金项目: 船舶预研支撑技术基金项目(13J3.3.5); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYL X15_1109)

作者简介: 方小星(1991-),男,江苏江都人。硕士生,主要研究方向为电磁兼容分析。

通信地址: 212003 江苏省镇江市梦溪路2号江苏科技大学电子信息学院 E-mail: fang_xiaoxing@126.com

略了雷达间存在的电磁兼容问题,尤其在频谱拥挤的情况下。本文提出了一种将雷达间的电磁兼容作为雷达优化目标,结合粒子群算法对雷达进行优化部署的方法。

1 舰载雷达电磁兼容模型

假设有 N 部雷达同时工作,且存在同频干扰。那么可知第 n 个雷达受到其他雷达的干扰 P_m 可表示为

$$P_m = P_{n1} + P_{n2} + \cdots + P_{n(n-1)} + P_{n(n+1)} + \cdots + P_{nN} = \sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{P_i G_i G'_n \lambda^2 \gamma_n}{(4\pi)^2 R_{in}^2 L_{in}}, \quad (1)$$

式中: P_i 为相邻干扰雷达 i 的发射功率; G_i 为相邻干扰雷达 i 的天线增益; G'_n 为受干扰雷达 n 的天线接收增益; λ 为雷达发射电磁波波长; γ_n 为雷达 i 干扰信号对雷达 n 接收天线的极化系数; R_{in} 为雷达 i 与受干扰雷达 n 之间距离; L_{in} 为雷达 i 发射的电磁波被雷达 n 接收过程中的能量损耗。

此时,雷达 n 收到的目标信号功率 P_{rs} 为^[11]

$$P_{rs} = \frac{P_n G_n \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_n^4 L_n}, \quad (2)$$

式中: P_n 为雷达 n 发射功率; G_n 为雷达 n 天线增益; σ 为目标散射截面积; L_n 为雷达发射并接收电磁波过程中的能量损耗; R_n 为雷达 n 与目标的距离。

在受干扰条件下,雷达要能发现目标,收到的目标信号功率 P_{rs} 和接收的干扰功率 P_m 必须满足以下条件:

$$\frac{P_m}{P_{rs}} = \frac{\sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{P_i G_i G'_n \lambda^2 \gamma_n}{(4\pi)^2 R_{in}^2 L_{in}}}{\frac{P_n G_n \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_n^4 L_n}} \leq K_n, \quad (3)$$

式中: K_n 为第 n 个雷达的压制系数。

当 $P_m/S_{n \min} \leq K_n$ 时,雷达的最大作用距离不受影响。当 $P_m/S_{n \min} > K_n$ 时,可以得到干扰下的雷达最大作用距离^[12]:

$$R'_{n \max} = \left(\frac{\frac{P_n G_n \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_n} K_n}{\sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{P_i G_i G'_n \lambda^2 \gamma_n}{(4\pi)^2 R_{in}^2 L_{in}}} \right)^{1/4}. \quad (4)$$

1.1 全向天线雷达之间的电磁兼容模型

雷达有许多种类,但是通过雷达天线种类可以将其分为 2 种:采用定向天线的雷达和采用全向天

线的雷达。由于全向天线波束简单,首先建立全向天线雷达之间的电磁兼容模型。

对公式(4)进行归一化处理,用受干扰时的 $R'_{n \max}$ 与不受干扰下的 $R_{n \max}$ 的比值 μ_n 作为雷达 n 的电磁兼容程度,得到全向雷达天线的电磁兼容程度^[12-13]:

$$\mu_n = \begin{cases} 1, & P_{ij}/S_{n \min} \leq K_n, \\ \frac{R'_{n \max}}{R_{n \max}} = \left(\frac{\frac{P_n G_n \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_n} K_n}{\sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{P_i G_i G'_n \lambda^2 \gamma_n}{(4\pi)^2 R_{in}^2 L_{in}}} \right)^{1/4}, & P_{ij}/S_{n \min} > K_n. \end{cases} \quad (5)$$

由 N 部全向天线雷达组成的雷达系统的电磁兼容程度为

$$\Phi = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_n \mu_n, \quad (6)$$

式中: η_n 为第 n 个雷达的重要系数,根据作战要求对雷达的要求度确定。

1.2 全向天线与定向天线雷达之间电磁兼容模型

当存在定向天线时,被定向天线对准,接收机前端会出现过载现象,电磁兼容程度很差,可认为电磁兼容程度 $\mu = 0$ 。假设,有 M 个定向天线雷达对全向天线雷达 n 有干扰。定向天线雷达 i 对全向天线雷达 n 的对准概率 p_{ni} ,那么雷达 n 不被对准的概率为

$$\bar{p}_n = 1 - \sum_{i=1}^M p_{ni}. \quad (7)$$

第 n 个雷达与定向雷达的电磁兼容程度为

$$\mu'_n = \bar{p}_n \mu = \begin{cases} \bar{p}_n, & P_{ij}/S_{n \min} \leq K_n, \\ \bar{p}_n \left(\frac{\frac{P_n G_n \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_n} K_n}{\sum_{i=1}^M \frac{P_i G_i G'_n \lambda^2 \gamma_n}{(4\pi)^2 R_{in}^2 L_{in}}} \right)^{1/4}, & P_{ij}/S_{n \min} > K_n, \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ'_n 为定向天线雷达对全向天线雷达的电磁兼容程度。

反过来,定向天线雷达与全向天线雷达对准概率是相同的。假设在定向天线雷达 k 的扫描范围内有 T 个全向天线雷达。全向天线雷达 i 对定向天线雷达 k 的干扰概率 p_{ki} ,那么雷达 k 不被对准的概率

\bar{p}_k 为

$$\bar{p}_k = 1 - \sum_{i=1}^T p_{ki}. \quad (9)$$

第 k 个定向天线雷达与全向天线雷达的电磁兼容程度可表示为

$$\mu'_k = \bar{p}_k \mu_k = \begin{cases} \bar{p}_k, & P_{ij}/S_{k \min} \leq K_k, \\ \bar{p}_k \left(\frac{S_{k \min} K_k}{\sum_{i=1}^T \frac{P_i G_i G'_k \lambda^2 \gamma_k}{(4\pi)^2 R_{ik}^2 L_{ik}}} \right)^{1/4}, & P_{ij}/S_{k \min} > K_k, \end{cases} \quad (10)$$

式中: μ'_k 表示全向天线雷达对定向天线雷达的电磁兼容程度。

1.3 定向天线雷达之间的电磁兼容模型

对于 2 个定向天线雷达之间的电磁兼容问题显然不能直接完全用上述模型来预测雷达间的电磁兼容程度。当 2 个定向天线雷达的主瓣波束不能相互对准的时候, 模型与上述相同。当 2 个定向天线雷达的主瓣波束可以相互对准时, 既需要避免对其他天线的对准也需要避免对准其他天线。

首先由文献 [14] 可知 2 个定向天线雷达相互对准需要水平方位和俯仰方位都对准。2 个定向天线雷达 1 和 2 的对准概率 p'_{12} 就是方位对准的概率与俯仰对准概率的乘积, 即

$$p'_{12} = p_h p_v, \quad (11)$$

式中: p_h 为水平方位对准概率; p_v 为俯仰方位对准概率。

那么, 假设定向天线雷达 m 可与 L 个定向天线雷达两两对准, 可以得到雷达 m 与其他定向天线雷达的互不对准概率 \bar{p}_m 为

$$\bar{p}_m = 1 - \sum_{j=1}^J (p_{mj} + p_{jm} - p'_{mj}), \quad (12)$$

式中: p_{mj} 是雷达 j 对雷达 m 的对准概率, 由式 (12) 计算得到; p_{jm} 是雷达 m 对雷达 j 的对准概率; p'_{mj} 是雷达 m, j 的相互对准概率。

那么定向雷达之间的电磁兼容程度 μ''_m 为

$$\mu''_m = \bar{p}_m \mu_k = \begin{cases} \bar{p}_m, & P_{ij}/S_{m \min} \leq K_m, \\ \bar{p}_m \left(\frac{S_{m \min} K_m}{\sum_{i=1}^T \frac{P_i G_i G'_m \lambda^2 \gamma_m}{(4\pi)^2 R_{im}^2 L_{im}}} \right)^{1/4}, & P_{ij}/S_{m \min} > K_m. \end{cases} \quad (13)$$

1.4 雷达系统的电磁兼容模型

将相近或相同频率的雷达组成雷达系统, 应用上述电磁兼容模型, 可以预测整个雷达系统的电磁兼容程度。假设有 N 个全向天线雷达, K 个定向天线雷达, 其中有 M 个定向天线雷达有可以两两对准的雷达。雷达系统的电磁兼容程度为

$$\Phi_{\text{总}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_n \mu_n + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \eta_n \mu'_n + \frac{1}{K-M} \sum_{k=1}^{K-M} \varepsilon_k \mu'_k + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \varepsilon_m \mu''_m, \quad (14)$$

式中: η_n 是第 n 个全向天线雷达的重要系数; $\varepsilon_k, \varepsilon_m$ 为第 k, m 个定向天线雷达的重要系数。

2 基于电磁兼容的舰载雷达位置优化部署方法

采用粒子群算法对雷达位置进行优化部署, 而对舰载雷达优化部署就是对舰船编队时的位置进行优化。用 X_i 表示 n 维搜索空间中粒子 i 的当前位置, V_i 表示当前粒子的飞行速度, P_i 表示当前粒子所经历的最好位置^[15-16]。

$$\begin{cases} X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), \\ V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}), \\ P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}), \end{cases} \quad (15)$$

式中: n 表示维度; i 表示第 i 个粒子 (当前粒子)。

描述雷达电磁兼容程度的 Φ 越大说明电磁兼容性越好, 故这是一个最大化问题的优化。若 $f(x)$ 为最大化目标函数, 则粒子 i 的当前最好位置为

$$P_i(t+1) = \begin{cases} P_i(t+1) & f(X_i(t+1)) \leq f(P_i(t+1)), \\ X_i(t+1) & f(X_i(t+1)) > f(P_i(t+1)), \end{cases} \quad (16)$$

式中: t 表示第 t 次迭代。

设群体中粒子数为 S , 群体中所有粒子所经历过的最好位置为 $P_g(t)$ (最优位置), 可得:

$$P_g(t) \in \{P_0(t), P_1(t), \dots, P_S(t) \mid f(P_g(t)) = \max \{f(P_0(t)), f(P_1(t)), \dots, f(P_S(t))\}\}. \quad (17)$$

基本粒子群算法粒子 i 的进化方程可描述为

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) (P_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t) (P_{gj}(t) - x_{ij}(t)), \quad (18)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (19)$$

式中: $x_{ij}(t), v_{ij}(t)$ 表示粒子 i 第 j 维第 t 代的位置与运动速度; w 为惯性系数, 值在 0 ~ 1 之间; c_1, c_2 为

加速度常数, 值在 $0 \sim 2$ 之间; r_{1j} 、 r_{2j} 分别为 2 个相互独立的随机数, 值在 $0 \sim 1$ 之间; $P_{gj}(t)$ 表示第 j 维最优位置粒子。

将雷达的电磁兼容程度作为雷达位置优化部署的适应度函数, 在已知雷达参数的情况下, 当雷达工作在相近或相同频率时, 以满足作战要求为前提确定雷达的位置空间范围, 运用粒子群算法对雷达的部署进行优化。基于电磁兼容分析的雷达优化部署方法的步骤:

(1) 构造初始粒子群体, 空间是 3 维, 随机产生 S 个粒子 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$, 并且置 $t = 0$ 。

(2) 不考虑不同时间的雷达使用与否与重要度系数变化, 只分析此时的位置对雷达对准的概率影响, 确定此时的总电磁兼容程度。

(3) 对粒子进行选择: ①假设以概率 1 选择所有 X_i ; ②通过公式(14)计算每个粒子的 $\phi_{\text{总}}$, 通过公式(16)求出当前所有粒子的最优位置; ③运用公式(17)求得种群中到目前为止在搜索空间找到的最好粒子, 即最优位置。

(4) 对粒子进行繁殖: ①利用公式(19)求出更新后的速度; ②利用公式(20)求出更新后的 $t+1$ 代的粒子群, 即位置。

(5) 判断是否达到迭代次数: 若是, 直接输出当前最优位置; 若不是, 则令 $t = t + 1$, 转入第(2)步。

(6) 结束, 输出最后的最优位置。

此方法默认各雷达的工作情况不变, 忽略时间这一维度, 只从空间角度来简化问题。最后用算例来说明方法的有效性。

3 算例分析

以 3 部雷达为例, 表 1 给出 3 部雷达的参数。

3 部雷达分别为表 1 中的雷达 A、雷达 B 和雷达 C, 用圆圈表示它们的位置, 如图 1 所示。

雷达 A 在 $x^2 + y^2 = 1\,600$ ($0 \leq x \leq 40$) 的范围内满足作战需求, 雷达 B 在 x 轴上, 雷达 C 在 y 轴上。雷达 C 扫描范围为以雷达 C 为圆心顺时针从 y 轴扫描 60° , 雷达 B 扫描范围在 x 轴下方。显而易见, 雷达 A 在边界上得到的 ϕ 比在边界以内大。用上述粒子群算法对其进行优化分布, 得到的雷达位置优化结果如表 2~4 所示。

表 1 雷达的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the radar

参数	雷达 A	雷达 B	雷达 C
发射功率/kW	100	80	80
工作频率/MHz	9 000	9 000	9 000
天线增益/ dB	主瓣 第一副瓣	40 -10	40 -10
极化方式	水平极化	水平极化	水平极化
能量损耗/dB	10	10	10
压制系数	3	3	3
灵敏度/dBmW	-90	-95	-95
主瓣波束宽 度/(°)	水平 垂直	2.5 3.0	2.5 3.0
扫描区域/ (°)	水平 垂直	60 30	60 30

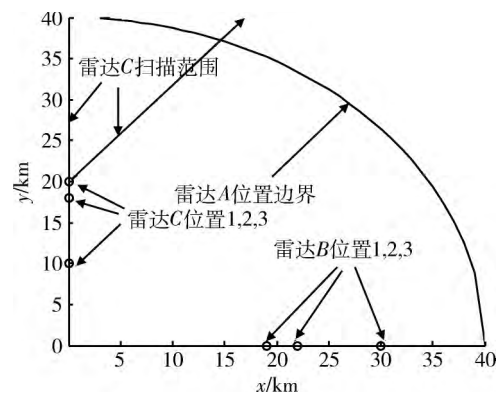


图 1 雷达分布图

Fig. 1 Radar maps

表 2 雷达 C 位于 y 轴 20 km 处时位置优化结果

Table 2 Optimization results of radar C

located at y -axis 20 km

雷达 B 位置 (x 轴)/km	雷达 ABC 重要度系数	雷达 A 最优位置	最优电 磁兼容
位置 1(19)	0.8 0.1 0.1	(29.297, 27.234)	0.533 7
位置 2(22)		(26.690, 29.793)	0.530 5
位置 3(30)		(23.757, 32.181)	0.531 6
位置 1(19)	0.4 0.3 0.3	(30.145, 26.292)	0.558 2
位置 2(22)		(25.406, 30.895)	0.555 2
位置 3(30)		(0, 40)	0.560 9

表3 雷达C位于y轴18 km处时位置优化结果

Table 3 Optimization results of radar C
located at y-axis 18 km

雷达B位置 (x轴)/km	雷达ABC 重要度系数	雷达A 最优位置	最优电 磁兼容
位置1(19)	0.8 0.1 0.1	(26.993 29.519)	0.536 5
位置2(22)		(24.131 31.902)	0.534 7
位置3(30)		(20.928 34.088)	0.537 8
位置1(19)	0.4 0.3 0.3	(25.608 30.729)	0.560 8
位置2(22)		(0 40)	0.563 0
位置3(30)		(0 40)	0.575 6

表4 雷达C位于y轴10 km处时位置优化结果

Table 4 Optimization results of Radar C
located at y-axis 10 km

雷达B位置 (x轴)/km	雷达ABC 重要度系数	雷达A 最优位置	最优电 磁兼容
位置1(19)	0.8 0.1 0.1	(0 40)	0.573 9
位置2(22)		(0 40)	0.577 5
位置3(30)		(0 40)	0.587 4
位置1(19)	0.4 0.3 0.3	(0 40)	0.605 1
位置2(22)		(0 40)	0.610 6
位置3(30)		(0 40)	0.625 5

从上述表2~4可以看出,雷达的重要度系数对于雷达的电磁兼容程度有很重要的影响,当雷达A的重要度系数从0.8降低到0.4时,表2中总电磁兼容程度由0.53提高到0.55~0.56,表3中总电磁兼容程度由0.53提高到0.56~0.57,表4中总电磁兼容程度由0.57~0.58提高到0.60~0.62;雷达B、C的位置对于雷达的电磁兼容程度有很重要影响,由表2~4可以发现在重要度系数相同时,随着雷达B在x轴离原点距离的增大,总电磁兼容程度并不是线性增大的。例如在表2中第一次优化的结果中,位置1: $\Phi_{\text{总}} = 0.533 7$; 位置2: $\Phi_{\text{总}} = 0.530 5$; 位置3: $\Phi_{\text{总}} = 0.531 6$ 。

从上述表2~4中的结果可以看出,雷达B、C的位置对最优的雷达A的位置也有很大影响,但是当雷达C位于y轴10 km时,雷达A的最优位置不发生改变,这时候最优位置超出了所要求的雷达位置范围。雷达的重要度系数也会影响雷达A的最优位置,例如表2中在雷达B位置相同时,雷达A的最优位置也明显不同。

上述仿真结果表明,应用粒子群算法结合电磁兼容模型,可以很好地解决频率相近或相同雷达工

作时的优化部署问题。

4 结束语

本文应用粒子群算法,提出了一种基于电磁兼容分析的雷达优化部署方法。针对由工作频率相近或相同的定向天线雷达和全向天线雷达组成雷达系统,建立了雷达的电磁兼容模型,将电磁兼容程度作为雷达位置优化部署的适应度函数,以满足作战要求为前提确定雷达的位置空间范围,运用粒子群算法对雷达的部署进行优化。仿真结果表明,在雷达频谱拥挤的情况下,该方法可以有效地解决雷达的优化部署问题,使得雷达在满足作战要求的范围内,电磁兼容程度达到最大,对舰船编队时决定舰船的位置有一定参考作用。

参考文献:

- [1] 毛滔,曾浩. 雷达抗同频干扰方法研究[J]. 航天电子对抗, 2005, 21(6): 43-45.
MAO Tao, ZENG Hao. Anti-Interference in the Same Frequency of Radar[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2005, 21(6): 43-45.
- [2] 郎维川,张林昌,楼鼎夫,等. GB/T17624.1-1998 电磁兼容综述电磁兼容基本术语和定义的应用与解释[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
LANG Wei-chuan, ZHANG Lin-chang, LOU Ding-fu, et al. Electromagnetic compatibility-General-Application and Interpretation of Fundamental Definitions and Terms[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [3] 邱炎,肖雳. 电磁兼容标准与认证[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
QIU Yan, XIAO li. Electromagnetic Compatibility Standards and Certification[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002.
- [4] 邢福成,康锡章. 雷达组网区域性防御区优化部署[J]. 现代防御技术, 2004, 32(4): 58-62.
XING Fu-cheng, KANG Xi-zhang. The Optimal Deployment of Radar Network in a Defensive Area[J]. Modern Defense Technology, 2004, 32(4): 58-62.
- [5] 蔡婧,许剑,李婧娇. 基于文化遗传算法的雷达优化部署[J]. 现代防御技术, 2010, 38(6): 6-11.
CAI Jing, XU Jian, LI Jing-jiao. Genetic Algorithm Based on Optimal Deployment of Radar Network[J]. Modern Defense Technology, 2010, 38(6): 6-11.
- [6] 刘彦君,黄金才,王江. 有源干扰条件下基于NSGA-

- II 的雷达网优化部署方法[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(1): 36-40.
- LIU Yan-jun, HUANG Jin-cai, WANG Jiang. Optimal Deployment of Radar Network Based on NSGA-II Under Active Jamming[J]. Command Control & Simulation, 2014, 36(1): 36-40.
- [7] 崔玉娟, 蔡豪, 田斌. 改进的混合蛙跳算法在雷达网部署中的应用[J]. 海军工程大学学报, 2015, 36(1): 36-40.
- CUI Yu-juan, CHA Hao, TIAN Bin. Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm for Radar Network Deployment[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2015, 36(1): 36-40.
- [8] 谭贤四, 武文, 王红, 等. 区域警戒雷达网优化部署研究[J]. 现代雷达, 2001, 23(5): 6-10.
- TAN Xian-si, WU Wen, WANG Hong, et al. Study on Optimizing a Locally Netted Warning Radar System[J]. Modern Radar, 2001, 23(5): 6-10.
- [9] 孙国伟, 谢军伟, 孙博. 一种新的组网雷达优化布站方法[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 23-26.
- SUN Guo-wei, XIE Jun-wei, SUN Bo. New Method of Network Radar Optimized Disposition[J]. Computer Simulation, 2013, 30(9): 23-26.
- [10] 师俊朋, 胡国平. 基于 N-P 准则的雷达网反隐身探测概率分析[J]. 现代防御技术, 2015, 43(2): 24-28.
- SHI Jun-peng, HU Guo-ping. Performance Research of Radar Network Anti-Stealth Detection Probability on N-P Criterion[J]. Modern Defense Technology, 2015, 43(2): 24-28.
- [11] MAHAFFZA B R, ELSHERBENI A. MATLAB Simulations for Radar Systems Design[M]. Chapman&Hall/CRC Press, 2003.
- [12] 李圭源, 张厚, 殷雄, 等. 基于作用距离衰减的雷达间电磁兼容模型[J]. 电讯技术, 2010, 50(3): 49-53.
- LI Gui-yuan, ZHANG Hou, YIN Xiong, et al. Radar Electromagnetic Compatibility Model Based on Radar Range Attenuation[J]. Telecommunications Technology, 2010, 50(3): 49-53.
- [13] 史豪杰, 邢清华, 刘付显. 基于最大作用距离损耗的雷达间电磁兼容度量新方法[J]. 现代防御技术, 2010, 38(6): 138-140.
- SHI Hao-jie, XING Qing-hua, LIU Fu-xian. A New Method to Measure EMC between Radars Based on Maximum Radar Range's Loss[J]. Modern Defense Technology, 2010, 38(6): 138-140.
- [14] 侯民胜. 雷达之间的干扰及概率计算[J]. 雷达与对抗, 2006, 26(2): 16-18.
- HOU Min-sheng. The Analysis of Interference Between Radars and the Computation of Interference Probability[J]. Radar and ECM, 2006, 26(2): 16-18.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle Swarm Optimization[C]//Proceedings of International Conference on Neural Networks. New York: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [16] EBERHART R C, SHI Y H. Particle Swarm Optimization: Development, Applications and Resources[C]//Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 2001: 81-86.

+++++

(上接第 36 页)

- [12] 张雪霞, 陈维荣, 戴朝华. 带局部搜索的动态多群体自适应差分进化算法及函数优化[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1825-1830.
- ZHANG Xue-xia, CHEN Wei-rong, DAI Chao-hua. Dynamic Multi-Group Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm with Local Search for Function Optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1825-1830.
- [13] 傅阳光, 周成平, 胡汉平. 无人飞行器海上航迹规划差分进化算法研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 295-300.
- FU Yang-guang, ZHOU Cheng-ping, HU Han-ping. Research on Differential Evolution Algorithm for Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle in Ocean Environment[J]. Acta Armamentaria, 2012, 33(3): 295-300.
- [14] 熊伟丽, 陈敏芳, 王肖, 等. 运用改进差分进化算法辨识 Hammerstein 模型[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(4): 536-542.
- XIONG Wei-li, CHEN Min-fang, WANG Xiao, et al. System Identification Method for Hammerstein Model Based on Improved Differential Evolution Algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(4): 536-542.
- [15] 彭志红, 孙琳, 陈杰. 基于改进差分进化算法的无人机在线低空突防航迹规划[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(1): 96-102.
- PENG Zhi-hong, SUN Lin, CHEN Jie. Online Path Planning for UAV Low-Altitude Penetration Based on An Improved Differential Evolution Algorithm[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2012, 34(1): 96-102.