

有源干扰条件下基于 NSGA-II 的雷达网优化部署方法

刘彦君, 黄金才, 王 江

(国防科学技术大学信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 在有源干扰条件下, 雷达网部署直接影响着防区内指挥信息系统的预警监测能力。由于防区内由分散于不同位置, 且重要度不同的责任区组成的, 那么实现全方位全纵深的预警能力, 将是雷达网部署的重要方面。根据覆盖系数和重叠系数为主要优化目标, 基于 NSGA-II 算法进行多目标优化。首先定义了覆盖系数和全局重叠系数两个指标, 尤其是全局重叠系数打破了以往重叠系数的概念, 从全局出发引导雷达网优化部署; 同时, 提出基于 NSGA-II 的多目标优化部署算法, 采用诱导跳跃、基因到位、诱导交叉等候选解生成方式, 保持种群多样性, 提高算法收敛性。实验表明, 部署优化算法耗时较低, 不同干扰源部署态势使网络节点部署产生较大差异, 多样的候选解生成方法明显提高了算法的收敛速度。

关键词: 优化部署; NSGA-II 算法; 干扰环境; 全局覆盖系数

中图分类号: TN951; E917

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2014.01.008

Optimal Deployment of Radar Network Based on NSGA-II under Active Jamming

LIU Yan-jun, HUANG Jin-cai, WANG Jiang

(Science and Technology on Information System Engineering Laboratory,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The optimal deployment of overlay network, which involves constructing overlay model, extracting multi-object function and designing optimal deployment algorithm, is one of the important parts in overlay network research. Generally speaking, the ranges of overlay network are often irregular closed graphs because of multifarious barriers. Consequently, we hope to put forward a fast algorithm based on marginal fitting to overcome a mass of wasting when calculating cover area. Significantly, the optimal deployment of overlay network in real world should take more aspects into consideration, including cover area, detection probability, and threaten degree of near link path which are different to formers. More attention, the near link path is aimed to analyze the relationship between dispersed remain areas in order to find out the probability of being a relative closed path which is uncovered by the overlay network. Finally, we put forward an optimal deployment algorithm based on NSGA-II to deal with this problem, within different genetic operators such as attractive jumping, gene reversing and attractive overlapping to generate new candidates, and using global temperature to control generation and selection of candidates as Simulated Annealing. The marginal fitting algorithm was found highly accurate and fast for calculating the cover area, and the near link path discovered a different novel request in deployment, and the optimal deployment algorithm was proved to suit for overlay network deployment.

Key words: optimal deployment; NSGA-II; jamming; global overlap index

雷达网的优化部署问题是物联网优化部署的一个典型缩影, 具有重要的研究意义, 是解决物联网其他问题的基础。指定高度层的辐射覆盖范围是一个不规则的封闭图形^[1-2], 而多数文献都将其视为圆形^[3-5]或其他规则的图形^[6]进行处理, 虽然为计算覆盖面积提供了方便, 但这样的抽象不能反应网络节点的辐射轨迹因受到地形遮挡、电磁干扰而变形的基本特征, 影响算法的实际应用效果, 因此, 在干扰条件下研究网络节点

的优化部署问题非常必要; 再者, “覆盖系数” “重叠系数” 等是主要选取的优化目标^[3-6], 其中“覆盖系数” 是描述对任务区域的覆盖程度, “重叠系数” 是指对不同重要度任务区域有重叠覆盖的一种度量。文献[7]提出 Virtual Force 概念, 考虑无线传感网络在通信中的跳数, 使网络节点部署在满足覆盖要求同时满足通信要求, 文献[4]考虑了网络节点覆盖的三维空间效果, 研究了三维空域雷达网覆盖部署问题, 使网络节点部署的维度由平面提高到立体维度, 虽然这些研究都将覆盖问题与具体领域特性结合起来, 但并非处于干扰环境中; 文献[8]提出了探测能力下降指数的概念, 动态地考虑干扰前后网络覆盖能力的差异, 从而使网络节点部署具有抗干扰特性, 但覆盖能力下降指数并未对节点部署结果带来实质影响; 最后, 网络节点部署是一

收稿日期: 2013-09-06

修回日期: 2013-09-29

作者简介: 刘彦君(1987-) 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 研究方向为信息管理与智能决策技术。

黄金才(1973-) 男, 研究员。

王 江(1988-) 男, 硕士研究生。

个多目标优化问题,但文献[4]将多目标问题通过加权方式转变为单目标问题,之后使用粒子群算法进行求解,文献[9]采用相同的方式运用遗传算法进行求解,而文献[10]则运用 NSGA-II 算法对声纳部署进行优化,充分考虑了多目标优化的特点。

为此,本文以网络的覆盖指数和重叠系数为优化目标,提出基于 NSGA-II 的多目标优化部署算法(Optimal Deployment Based on NSGA-II, ODGA),希望在覆盖系数和重叠系数同时引导下,达到满意的部署效果,并通过多种遗传算子提高算法收敛性。

1 雷达覆盖模型

网络节点的辐射轨迹受到地形遮蔽、电磁干扰等障碍会产生形变,导致辐射范围成不规则图形,也为辐射范围边界的数据处理带来了不便。不失一般性,本文以雷达网络中雷达节点的辐射特性为例,用干扰方程模拟干扰条件下的雷达探测性能,通过计算指定高度层雷达威力覆盖范围,示意网络节点在干扰环境中的覆盖模型。

雷达威力范围的边界就是雷达在空间各方向上的最远作用距离,而雷达在某方向上的作用距离同雷达有效辐射功率、目标雷达截面积、干扰机有效辐射功率等参数密切相关。雷达在干扰条件下的干扰方程为^[1]

$$\frac{P_j G_j}{P_i G_i} \cdot \frac{4\pi\gamma_j}{\sigma} \cdot \frac{R_i^4}{R_j^2} \cdot \frac{G_i'(\theta)}{G_i} \geq K_j \quad (1)$$

其中, P_j 为雷达的发射功率, G_i 为雷达天线主瓣方向上的增益, σ 为目标的雷达截面积, R_i 为雷达与目标间距离, P_j 为干扰机发射功率, γ_j 为干扰信号对雷达天线的极化损失, R_j 为干扰机与雷达的距离, K_j 为压制系数, π 为圆周率, G_j 为干扰机天线在雷达方向上的增益, $G_i'(\theta)$ 为雷达天线在干扰机方向上的增益^[1] 计算如下:

$$G_i'(\theta) = \begin{cases} G_i & 0^\circ \leq \theta \leq \frac{\theta_{0.5}}{2} \\ K\left(\frac{\theta_{0.5}}{\theta}\right)^2 G_i & \frac{\theta_{0.5}}{2} < \theta < 90^\circ \\ K\left(\frac{\theta_{0.5}}{90^\circ}\right)^2 G_i & \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

其中, K 为常数,一般取 $0.04 \sim 0.1$, $\theta_{0.5}$ 为雷达天线波瓣宽度, θ 为雷达与目标连线和雷达与干扰机连线之间的夹角。那么,根据式(1)、(2),可以得到信噪比等于压制系数时,雷达作用距离的表达式^[1] 为

$$R_i = \left(\frac{K_j \sigma R_j^2 P_i G_i^2}{P_j G_j 4\pi\gamma_j G_i'(\theta)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

2 多目标函数

优化部署中目标函数的选取决定了引导最优解的启发策略,反映了部署的特定需求。覆盖系数^[8]是指覆盖范围对任务区域的比例,覆盖系数越高,说明网络对任务区域的探测越全面;重叠系数^[10]是指能同时辐射到某一目标的节点数量,它是对重点区域探测的主要指标,重叠系数越高,说明该目标被探测到的概率就越大。但是,重叠系数无法反应不同责任区的雷达覆盖的合理程度;直观上,重要度越高的区域重叠系数越高,而重要度低的区域则较低,但是尚没有合适的方法对不同区域的重叠系数分布情况进行评估。本文提出全局重叠系数,成功解决了这个问题。

2.1 覆盖系数

网络辐射覆盖范围是由网中所有节点的辐射范围融合而形成的。如式(4)所示, C_{index} 是覆盖系数,其中 N 和 M 分别表示了雷达和责任区的数量, S_i^α 表示第 i 个雷达覆盖区域, S_j^β 表示第 j 个责任区,并且 $\|\cdot\|$ 是计算面积的泛函。

$$C_{Index} = \frac{\sum_{j=1}^M \left\| \bigcup_{i=1}^N (S_i^\alpha \cap S_j^\beta) \right\|}{\sum_{j=1}^M \|S_j^\beta\|} \quad (4)$$

2.2 全局重叠系数

重叠系数主要用于对不同重要度任务区域的评估。直观上,重要度越高的任务区域,应该由越多的网络节点进行辐射覆盖。重叠系数是对节点部署状态的直接测量数据,并不能评估部署的效能,而是要将整个任务区域的重叠系数转化为评估值。如式(5)、(6)所示,全局重叠系数 O_{Index} 主要评判雷达覆盖区域对不同重要度责任区覆盖的合理程度,越接近最佳覆盖比例,则全局重叠系数越高;其中 η_j 是第 j 个责任区应该得到的覆盖比例, I_j 是第 j 个责任区的重要度。

$$O_{Index} = \frac{M \cdot \sqrt{\prod_{j=1}^M \left(\left(\sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha \cap S_j^\beta\| \right) / \sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha\| \cdot \eta_j \right)}}{\sum_{j=1}^M \left(\left(\sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha \cap S_j^\beta\| \right) / \sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha\| \cdot \eta_j \right)} \quad (5)$$

$$\eta_j = \frac{\|S_j^\beta\| \cdot I_j}{\sum_{j=1}^M (\|S_j^\beta\| \cdot I_j)} \quad (6)$$

同时,通过式(5)、(6)可以推算得到式(7):

$$O_{Index} = \frac{M \cdot \sqrt{\prod_{j=1}^M \left(\left(\sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha \cap S_j^\beta\| \right) / \sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha\| \cdot \eta_j \right)}}{\sum_{j=1}^M \left(\left(\sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha \cap S_j^\beta\| \right) / \sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha\| \cdot \eta_j \right)} \leq 1 \quad (7)$$

$$\text{设 } a_j = \sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha \cap S_j^\beta\|, b_j = \sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha\| \cdot \eta_j, c_j = \frac{a_j}{b_j}, \text{ 由于 } \sum_{j=1}^M a_j \leq \sum_{i=1}^N \|S_i^\alpha\| = \sum_{j=1}^M b_j, \text{ 求证 } A_M = \sum_{j=1}^M c_j / M \geq \sqrt[M]{\prod_{j=1}^M c_j} = G_M.$$

证明:

1. 当 $M = 2$ 时,

$$c_1 + c_2 \geq 2 \cdot \sqrt{c_1 \cdot c_2} \Leftrightarrow (\sqrt{c_1} - \sqrt{c_2})^2 \geq 0 \quad \text{Iff} \quad c_1 + c_2 \Leftrightarrow a_1 = b_1 \wedge a_2 = b_2$$

当 $M = 2$ 时, 等式成立;

2. 假设不等式在 $M = k$ 时成立, 那么当 $M = k + 1$ 时,

$$\begin{aligned} A_{k+1} &= \frac{\sum_{j=1}^{k+1} c_j}{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^k c_j + (k+1) A_{k+1}}{2k} = \frac{\frac{\sum_{j=1}^k c_j}{k} + \frac{c_{k+1} + \overbrace{A_{k+1} + \dots + A_{k+1}}^{k-1}}{k}}{2} \\ &\geq \frac{\sqrt[k]{c_1 c_2 \dots c_k} + \sqrt[k]{c_{k+1} A_{k+1}^{k-1}}}{2} \geq \sqrt[k]{\sqrt[k]{c_1 c_2 \dots c_k} \cdot \sqrt[k]{c_{k+1} A_{k+1}^{k-1}}} = \sqrt[k]{c_1 c_2 \dots c_k c_{k+1} A_{k+1}^{k-1}} \\ A_{k+1} &\geq \sqrt[k]{c_1 c_2 \dots c_k c_{k+1} A_{k+1}^{k-1}} \Leftrightarrow A_{k+1}^{2k} \geq c_1 c_2 \dots c_k c_{k+1} A_{k+1}^{k-1} \Leftrightarrow A_{k+1} \geq \sqrt[k+1]{c_1 c_2 \dots c_k c_{k+1}} \\ \text{Iff} \quad c_1 &= c_2 = \dots = c_{k+1} \Leftrightarrow a_1 = b_1 \wedge a_2 = b_2 \dots \wedge a_{k+1} = b_{k+1} \end{aligned}$$

则当 $M = k + 1$ 时, 不等式也成立;

3. 不等式成立。

3 基于 NSGA-II 的优化部署算法

网络节点覆盖部署的问题域为实数域, 虽然会为问题提供全局最优解, 但也为优化算法带来了巨大的搜索空间, 采取离散网格编码方式将有利于遗传算法的快速收敛; 同时, 覆盖部署是多目标优化问题, NSGA-II^[10] 是运用 Pareto 最优的概念为解向量定义序关系, 并利用虚拟适应度的概念调整解空间的疏密程度的多目标优化遗传算法, 适合解决覆盖部署优化问题, 但如何维持种群的多样性, 如何产生下一代个体, 将是雷达部署问题跳出局部最优达到全局最优的关键, 因此, 在 NSGA-II 算法的框架下, 对每一代个体进行非支配排序和虚拟适应度评估, 并采用了随机跳跃、诱导跳跃、基因倒位等变异操作和随机交叉、诱导交叉等交叉操作启发候选解的生产, 从而保持种群多样性, 以及提供算法收敛性。

3.1 离散网格编码

网络节点的部署坐标范畴是整个实数域, 显然, 如果将问题域设定为实数域, 那么优化部署求解将是一个漫长的过程。因此, 将雷达可能的部署区域进行网格化, 以网格的行号、列号作为节点部署的整数编码, 在具体计算目标函数时, 将网格的中心作为节点实际部署的坐标。

3.2 NSGA-II

NSGA-II 是一种快速的非劣性排序方法^[11], Pareto 最优和虚拟适应度在遗传算法的选择操作中起到了重要作用。Pareto 最优以目标向量的序关系将种群中个体进行排序, 区分等级; 虚拟适应度定义了同等级个体之间的拥挤度。那么, 在遗传算法选择操作中, 等级低的个体优先选择, 同等级下拥挤度小的个体优先选择, 这样使遗传算法的解分布均匀、收敛较快。

3.3 种群生成

遗传算法中新种群的产生为找到全局最优解提供了可能, 但只有保持种群的基因多样性才容易使种群跳出局部最优, 达到全局最优, 因此, 本文采取了随机交叉和诱导交叉两种交叉操作方式。其中, 随机交叉是指从父代种群中任意挑选两个个体进行单点或多点交叉操作; 诱导交叉是指分别从 Pareto 优胜的不同级别中挑选两个个体进行单点或多点交叉操作。同时, 本文采取了随机跳跃、诱导跳跃、基因倒位等变异操作。其中, 随机跳跃是指某个雷达部署位置的随机跳动; 诱导跳跃是指根据节点部署位置和任务区域位置, 有目的地使节点部署位置更加靠近任务区域, 增加覆盖率; 基因倒位是指同一个个体中两个节点的部署位置进行调换。

3.4 基于 NSGA 的优化部署算法

NSGA-II 算法是一类解决多目标优化问题的典型遗传算法,下面结合文献[11]中对 NSGA-II 算法的描述,以伪代码形式将基于 NSGA-II 的优化部署算法进

行展现,见表 1。其中算法第 7 行是根据 Pareto 最优与虚拟适应度对种群的选择操作,第 11-12 行是随机应用多种不同种群生成方法产生新种群。

表 1 基于 NSGA-II 的优化部署算法

Algorithm ODGA ()	
Output: Candidate solution	
1	Initial the population by randomly setting the position of the netted radars random;
2	Repeat
3	iteration←iteration + 1;
4	For each child
5	Calculate the multi-objective function for i-th child
6	End
7	Sort and range for this population using Pareto optimal and virtual fitness;
8	For each child
9	Produce p based on the range and virtual fitness;
10	End For
11	Create new children randomly using different Cross operator;
12	Create new children randomly using different Mutation operator;
13	Combine the new children into the new population;
14	Until max iteration is over than k

4 实验分析

4.1 干扰源态势对优化部署的影响分析

实验中存在 1 个矩形责任区,4 个重点区,6 个不同制式、不同频率的雷达,以及 4 个不同干扰制式的干扰源,其中 B 区重要度为 2,其余为 1。图 1 中 a) 图是在 4 个干扰源位置分散的条件下进行的优化部署,ODGA 算法在种群大小为 30 的条件下,共进行了 48 次迭代,对 3605 个个体进行了优化目标的计算,共耗时 444.5429s;而 b) 图实验是在 4 个干扰源位置依次纵向排列的条件下进行的优化部署,ODGA 算法在种群大小为 30 的条件下,共进行了 38 次迭代,对 2748 个个体进行了优化目标的计算,共耗时 340.661s。a) 图中雷达威力比较均匀地覆盖在各个重点区上,而 b) 图中 C 区没有雷达威力覆盖,造成覆盖指数下降 0.1,可以分析,依次纵向排列的干扰源对部署在 C 区的雷达干扰最强,使覆盖面积无法达到在其他重点区的覆盖指标,因此只能部署在其他重点区内;与 D 区相比,B 区由两个雷达覆盖,并且存在重叠区域,说明了 B 区具有较高的重要度。由此可见,此时应该选用异于当前干扰制式的雷达部署在 C 区,以提高部署性能。

4.2 责任区重要度对优化部署的影响分析

实验中存在 4 个责任区,5 个不同制式、不同频率的雷达。图 2 中 a) 图是在 4 个责任区的重要度相同的条件下进行的优化部署,ODGA 算法在种群大小为 30 的条件下,共进行了 45 次迭代,对 3353 个个体进行了优化目标的计算,共耗时 309.4472s;而 b) 图实验中对

责任区的重要度进行了区分,其中 4 个责任区的重要度分布为 $I_A = 1$, $I_B = 1$, $I_C = 10$, $I_D = 5$,ODGA 算法在种群大小为 30 的条件下,共进行了 52 次迭代,对 3309 个个体进行了优化目标的计算,共耗时 302.4041s。从 a) 图中可以看出,5 个雷达的威力比较均匀地覆盖在 4 个责任区上,这与 4 个责任区重要度相同的条件相吻合;而 b) 图中可以看出,R2、R4 两个雷达的重叠覆盖在 C 区上,D 区由 R1 威力全部覆盖,B 区由 R3 威力基本覆盖,而 A 区则由 R5 威力覆盖了一部分,这个结果与各责任区的重要度相符合,可以分析,C 区重要度最高应该保障充足的雷达资源,甚至是冗余的雷达资源,D 区重要度相对较高,也应该优先保障,A、B 两区重要度相同,所以在雷达资源较缺乏的情况下,只能进行部分覆盖。

上述两个实验着重分析了有源干扰设备位置和责任区重要度对雷达部署的影响,而对于实际情况中敌方干扰设备会集中在责任区一侧,显然对边缘责任区的干扰强于内侧部分,因此,建议重要度高的责任区应该尽量位于整体防区的内侧,而雷达的部署则应该位于责任区中靠近敌方干扰的一侧,这样减少了干扰而产生的雷达覆盖盲区;当然,重要度高的责任区应该分配较多的雷达。

5 结束语

覆盖部署优化问题是多目标优化问题,选定的指标直接影响部署的结果。本文以覆盖系数和重叠系数为目标函数,得到了有益的结果。但不难发现,本文主要研究的是固定任务区数目、网络节点数目,同时固定

干扰源数目及位置的部署优化问题,未考虑节约使用节点资源,未引入动态干扰源,今后的工作将逐步考虑上述问题,并研究网络的重构部署优化。

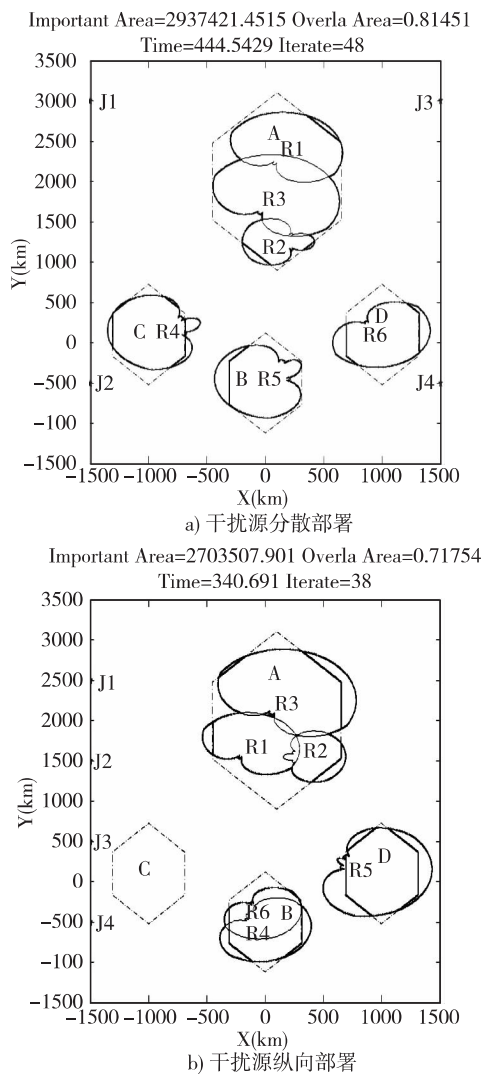


图 1 干扰源态势对优化部署的影响分析

参考文献:

- [1] 邵国培,曹志耀,何俊. 电子对抗作战效能评估[M]. 北京: 解放军出版社, 1998.
- [2] 邢福成,康锡章,王国宏. 干扰下雷达网的威力范围[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(6): 90-93.
- [3] 沙超,王汝传,黄海平,等. 一种基于多目标遗传优化的无线多媒体传感器网络节能覆盖方法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 19-26.
- [4] 刘以安,孟现海,杨华明,等. 粒群算法在雷达优化组网中的应用研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(5): 547-550.
- [5] 阙渭焰,彭应宁,陆大金,等. 雷达布站方法[J]. 清华大学学报, 1997, 37(4): 45-48.
- [6] 卢盈齐,祝长英. 雷达组网反隐身的一种优化布站方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007(6): 166-169.

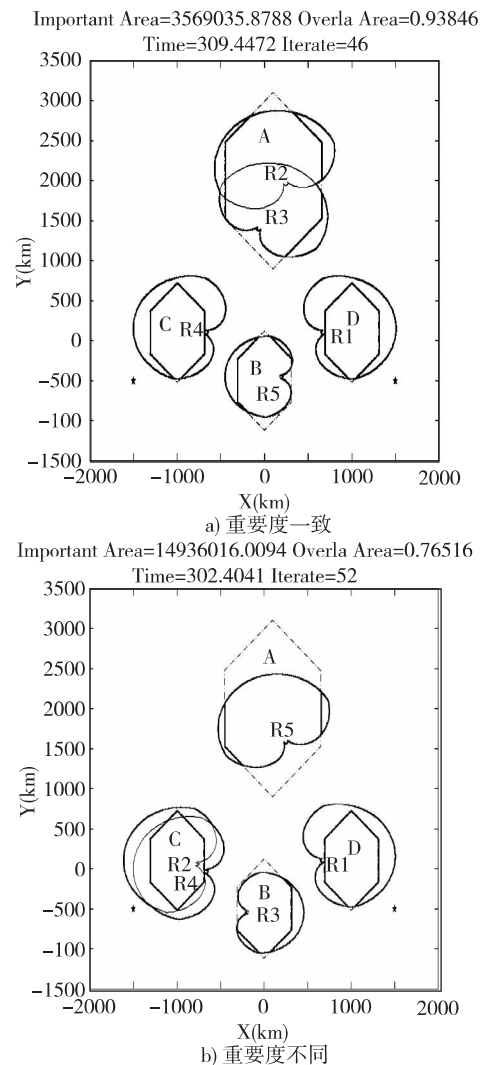


图 2 责任区重要度对优化部署的影响分析

- [7] Stephen Hurley, M. Imran Khan. Netted radar: Network Communications Design and Optimization [J]. Ad Hoc Networks, 2011(9): 736-751.
- [8] 李侠,蔡万勇,花良发,等. 责任区雷达组网系统抗干扰优化部署算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(8): 1254-1257.
- [9] Ngatchou P N, Fox W L J, et al. Multiobjective Multistatic Sonar Sensor Placement[C]. 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computations Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada, 2006: 2713-2719.
- [10] 乔士东,黄金才,修保新,等. 基于 NSGA-II 多目标优化的 C2 组织设计[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(5): 64-69.
- [11] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm NSGA-II [J]. IEEE Transactions Evolutionary Computation, 2001, 6(2): 182-197.