

## 大型海上编队空中警戒力量优化部署

程子光<sup>1,2</sup>, 姜礼平<sup>1</sup>, 朱建冲<sup>1</sup>, 周浩<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学, 武汉 430033; 2. 军事科学院, 北京 100091)

**摘要:** 为了解决大型海上编队空中警戒力量(节点)的优化部署问题,提出了一种基于作战区、警戒区、威胁区划分的部署模型。首先,分析了大型海上编队空中警戒力量的预警区和作战区的划分规则,建立了程序处理坐标系;然后定量研究了基于作战区域划分的可部署度矩阵、基于警戒区域和威胁区域划分的重要度矩阵及基于节点协同探测的协同度矩阵,建立了节点优化部署模型;最后对模型进行了求解计算。仿真结果表明:所建模型具有较强适用性,能够实现对不同数量节点的部署,可以自动生成合理、高效的优化部署方案。

**关键词:** 空中警戒; 大型海上编队; 优化部署; 遗传算法

**中图分类号:** V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)02-0057-04

## Optimal Deployment of Alert Aircrafts for Large Ship Formation

CHENG Ziguang<sup>1,2</sup>, JIANG Liping<sup>1</sup>, ZHU Jianchong<sup>1</sup>, ZHOU Hao<sup>1</sup>

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Academy of Military Science, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In order to solve the deployment problem of alert aircrafts for large ship formation, an optimal deployment model was proposed based on partition of combat zone, warning zone and threatening zone. First, rules for partitioning the combat zone and warning zone of the alert aircraft were analyzed, and a programming coordinate system was established. Then, the deployment degree matrix based on combat zone, the important degree matrix based on warning zone and threatening zone, and collaborative degree matrix based on collaborative detection were studied quantitatively. The optimal deployment model was established. Simulation result shows that the model has strong applicability and can automatically generate a reasonable and efficient optimization deployment scheme.

**Key words:** alert aircraft; large ship formation; optimal deployment; genetic algorithm

### 0 引言

现代海战中,空中的来袭目标速度越来越快、目标越来越小,大型海上编队面临的空袭威胁日益严重,大型海上编队的防空防御能力必须加强,因而提供尽可能远、尽可能准的预警信息成为防空作战的关键环节<sup>[1]</sup>。如何合理利用空中警戒力量(固定翼预警机、预警直升机、侦察机、空中战斗巡逻机、挂载侦察吊舱的战机等节点)对这些具有传感和通信功能的高机动节点进行部署,形成一种优质的警戒网络,是提高发现和

掌握严重威胁对象(小目标、低空目标、隐身目标等)能力的保障,是增强大型海上编队对空警戒力量体系作战能力的重要手段。

美俄等主要海军强国对大型海上编队防空警戒问题研究较为深入。俄海军的大型海上编队针对各种威胁源实施环形多层次探测,所有警戒兵力进行大纵深、全方位、全高度的部署,组成复式侦察体系,力求及时掌握敌情。美军大型海上编队特别重视侦察预警,其大型海上编队依靠自身装备,构成了一个立体化、高效的侦察、预警、监控系统,依照早期探测、机动控制、精确打击等原则,在纵深上构成3个层次的配置<sup>[2]</sup>。通过纵深上分层、方向上划分威胁扇面等方法,实现对各警戒力量的综合运用,以减小盲区、突出重点、发挥警戒力量的体系探测能力。

关于海上编队警戒力量部署问题,从可获得的文

收稿日期:2011-11-26

修回日期:2011-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074191);全军军事学研究生课题资助项目(2010JY0679-391)

作者简介:程子光(1981—),男,河北邯郸人,博士生,研究方向为作战模拟与人工智能。

献中仅能查到一些结论性的数据,原理性的分析方法很少见<sup>[1,3-4]</sup>。文献[4]给出一种基于均匀分布的节点部署方法,该方法仅适用于只存在一个威胁扇面角时的部署问题,并且要求各节点代表同种类型的作战平台,当部署力量由不同探测能力的节点构成时,算法不再适用。因此,需要加强对相关理论的研究。

## 1 问题描述

以美军航母编队为例,其防空区域一般划分为预警区与作战区两大部分,如图1所示<sup>[5]</sup>。

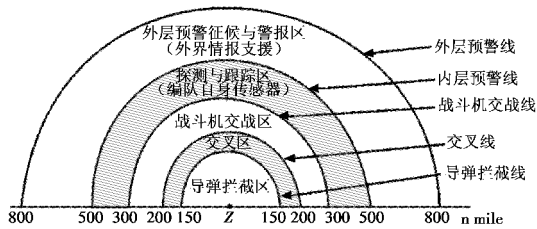


图1 美军航母编队防空区域划分图

Fig. 1 Division of air defence region of American carrier

### 1) 预警区的划分。

预警区分为外层和内层。外层为预警征候与警报区,该区距离Z点(编队基准点)500~800 n mile (1 n mile = 1853.2 m),主要依靠外界(主要指上级)的敌情支援;内层为探测与跟踪区,该区距离Z点300~500 n mile,该区的信息主要依靠编队自身的传感器进行保障。

### 2) 作战区的划分。

作战区域分为3层:战斗机交战区、导弹拦截区和交叉区。战斗机交战区通常距离Z点200~300 n mile,主要由航母战斗机承担防御任务,防御的目标是敌方飞机与防区外发射的导弹。导弹拦截区通常距离Z点0~150 n mile,主要由防空舰艇的舰空导弹和近程防空武器系统实施防御,防御的目标是敌各种平台发射的反舰导弹。交叉区是指在战斗机交战区与导弹拦截区之间的空域,该区通常距离Z点150~200 n mile,该区主要用于加强目标识别,防止误伤己方飞机。

本文主要研究空中警戒力量的优化部署问题,进行如下假设。

1) 美军航母编队空中警戒力量主要是指预警机,但在一定条件下,空中战斗巡逻机也可作为重要的空中警戒力量。空中战斗巡逻机的机载雷达往往具有较大的探测距离,雷达资料可与其他战机进行分享,可将情报信息接入数据链,从而加强对高威胁区域的协同探测,提高警戒网络对小目标、隐身目标及低空目标的探测能力。

### 2) 程序处理区域坐标系的建立。设大型海上编

队内层探测与跟踪区及其内部为空中警戒力量的责任区域,将包含责任区域的一个适当大小的矩形作为程序处理区域,可建立如图2所示的程序处理坐标系。其中,程序处理区域被分割为100行、100列的栅格,左下角为坐标系原点,横轴为x轴,纵轴为y轴,坐标轴单位为格(grid)。图2中,大型海上编队基准点Z位于坐标(45 n mile, 55 n mile)。

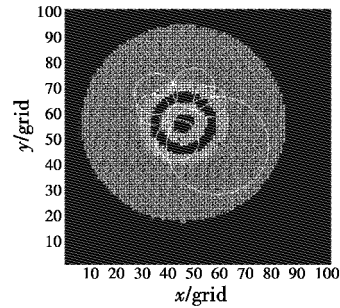


图2 程序处理区域坐标系

Fig. 2 Programming coordinate system

3) 将编队中所有的舰载机抽象为节点,每类节点都具有不同的探测能力。假设节点有3类,分别为预警机类节点、A类巡逻机节点和B类巡逻机节点,预警机类节点可以提供较远的探测距离,A类节点配备比B类节点更为先进的雷达,A类节点比B类节点探测距离稍远。

## 2 模型建立

将程序处理区域按行列划分为 $100 \times 100$ 个大小相等的栅格,得到离散的区域格单元<sup>[6]</sup>,如图2所示。可用 $100 \times 100$ 阶矩阵 $G = (g_{x,y})_{100 \times 100}$ 对栅格化区域进行描述,根据每个栅格位于何种类型区域,对元素 $g_{x,y}$ 进行赋值,可以得到可部署度矩阵、重要度矩阵、协同度矩阵。

### 2.1 可部署度矩阵模型

根据局部区域是否利于节点的部署,可将程序处理区域划分为3个等级:不可部署区域、普通部署区域、优势部署区域。划分的主要依据是作战区和警戒区的划分规则,式(1)将大型海上编队程序处理区域划分为如下6部分

$$\begin{cases} B_1 = \{(x,y) | d_z(x,y) \leq 50\} \\ B_2 = \{(x,y) | 50 < d_z(x,y) \leq 100\} \\ B_3 = \{(x,y) | 100 < d_z(x,y) \leq 150\} \\ B_4 = \{(x,y) | 150 < d_z(x,y) \leq 200\} \\ B_5 = \{(x,y) | 200 < d_z(x,y) \leq 500\} \\ B_6 = \{(x,y) | d_z(x,y) > 500\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d_z(x,y)$ 表示栅格点 $(x,y)$ 到Z点的距离; $B_1$ 为不可部署区域; $B_2$ 为优势部署区域; $B_3$ 为不可部署区域; $B_4$ 为优势部署区域; $B_5$ 为普通部署区域; $B_6$ 为不可部署区域。

在栅格化的程序处理区域中,用符号“0”标识不可部署位置,“1”标识普通部署位置,“2”标识优势部署位置,那么程序处理区域对应的矩阵为可部署度标识矩阵。如果用  $c_B(x,y)$  表示可部署度标识矩阵第  $x$  行  $y$  列对应的元素值,那么可用式(2)将可部署度标识矩阵转换为可部署度矩阵。

$$g_{x,y}^{\text{部署度}} = \begin{cases} 0.1, & c_B(x,y) = 0 \\ 1.0, & c_B(x,y) = 1 \\ 1.5, & c_B(x,y) = 2 \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 重要度矩阵模型

根据局部区域需要的保障程度,可将程序处理区域划分为4个等级:禁止保障区域、不关心区域、普通保障区域、重点保障区域。各类保障区域的划分主要依据静态因素和动态因素。静态因素指警戒区域的划分规则,在同一作战任务中警戒区域的划分一般保持不变;动态因素是指实时的威胁扇面,在同一作战任务的不同阶段,空中威胁扇面的大小和方向一般会有较大变化。

1) 基于静态因素的重要度标识矩阵。

根据警戒区域的划分规则及各局部区域的保障要求,可对程序处理区域进行如下具体划分

$$\begin{cases} C_1 = \{(x,y) | d_z(x,y) \leq 50\} \\ C_2 = \{(x,y) | 50 < d_z(x,y) \leq 200\} \\ C_3 = \{(x,y) | 200 < d_z(x,y) \leq 500\} \\ C_4 = \{(x,y) | 500 < d_z(x,y) \leq 800\} \\ C_5 = \{(x,y) | d_z(x,y) > 800\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $C_1$  为禁止保障区域; $C_2$  为不关心区域; $C_3$  为普通保障区域; $C_4$  为不关心区域; $C_5$  为禁止保障区域。在程序处理区域中,用符号“0”标识禁止保障位置,“1”标识不关心位置,“2”标识普通保障位置,“3”标识重点保障位置,从而可以得到基于静态因素的重要度标识矩阵。

2) 基于动态因素的重要度标识矩阵。

设编队内层预警线半径为  $r_y$ ,威胁源与  $Z$  距离为  $r_i$ ,敌最大空袭距离为  $r_{\max}$ ,则威胁扇面角<sup>[7]</sup>为

$$\alpha = 2 \cdot \arccos \frac{r_i^2 + r_y^2 - (r_{\max} - r_y)^2}{2 \cdot r_i \cdot r_y} \quad (4)$$

设共有  $q$  个威胁扇面,第  $i$  个威胁扇面用  $\alpha_i$  表示,  $i = 1, 2, \dots, q$ 。对程序处理区域中的所有位置  $(x,y)$  对应的元素  $c_c(x,y)$ ,按式(5)进行赋值,可得到基于动态因素的重要度标识矩阵。

$$c_c(x,y) = \begin{cases} 1, & (x,y) \in (\bigcup_{i=1}^q \alpha_i) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

3) 基于矩阵运算的重要度矩阵模型。

将基于静态因素和动态因素的重要度标识矩阵相加,可得到一个综合性的重要度标识矩阵(简称重要度

标识矩阵)。用式(6)可将重要度标识矩阵转换为重要度矩阵。

$$g_{x,y}^{\text{重要度}} = \begin{cases} -1.0, & c_c(x,y) = 0 \\ 0.1, & c_c(x,y) = 1 \\ 1.0, & c_c(x,y) = 2 \\ 1.5, & c_c(x,y) = 3 \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 协同度矩阵模型

在程序处理区域中,每个节点依据探测能力都对应一个探测圆,探测圆内的离散点赋为“1”,圆外的离散点被赋为“0”,所有节点探测圆合并相加可得一个新矩阵(称之为协同度标识矩阵)。

设  $c_D(x,y)$  为协同度标识矩阵中第  $x$  行  $y$  列的元素值,则  $c_D(x,y) = 0$  表示位置  $(x,y)$  位于盲区,  $c_D(x,y) = 1$  表示位置  $(x,y)$  位于1重探测区域,  $c_D(x,y) = 2$  表示位置  $(x,y)$  位于2重探测区域,依次类推。用式(7)可将协同度标识矩阵转换为协同度矩阵。

$$g_{x,y}^{\text{协同度}} = \begin{cases} 0.0, & c_D(x,y) = 0 \\ 1.0, & c_D(x,y) = 1 \\ 1.5, & c_D(x,y) = 2 \\ 2.0, & c_D(x,y) \geq 3 \end{cases} \quad (7)$$

### 2.4 优化部署模型

综合考虑节点部署位置合理性、保障区域重要性、节点协同探测等因素,给出如式(8)所示的大型海上编队空中警戒力量优化部署模型

$$\begin{aligned} \max A &= \left( \sum_{x=1}^{100} \sum_{y=1}^{100} g_{x,y}^{\text{协同度}} \cdot g_{x,y}^{\text{重要度}} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^K g_{x_i,y_i}^{\text{部署度}} \right) \quad (8) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} (x_i, y_i) \in Z \\ i = 1, 2, \dots, K \end{cases} \end{aligned}$$

部署模型目标函数  $A$  是部署网络保障能力的反映,  $A$  值不仅能够体现网络的探测范围,也使得网络在探测重要度较高的局部区域时比在探测重要度低的局部区域时  $A$  值要大,并且对于同样面积的局部区域,用较多节点进行探测(协同度高的局部区域)比用较少节点探测时的  $A$  值要大。

模型的决策变量为  $(x_i, y_i)$ ,即大型海上编队空中警戒力量所有节点的部署位置,决策变量的定义域为  $Z^K$ ,  $Z$  表示二维程序处理区域,且有  $Z \subset R^2$ 。考虑到空中警戒力量的有限性,  $K$  的取值一般小于50,算法构造的网络一般为稀疏型网络,多次仿真发现,模型对50个节点以内的网络部署表现良好,当部署更多数量节点时,则会出现求解效果与执行时间难以兼顾的矛盾。

## 3 仿真计算

### 3.1 仿真假设

敌方假设:敌方共2个机场,机场1位于  $O_1$ ,其战

机最大空袭距离为 1700 km; 机场 2 位于  $O_2$ , 其战机最大空袭距离为 2000 km。

大型海上编队方假设: 当得知敌方将进行空袭时, 大型海上编队基准点  $Z$  到  $O_1$  距离 850 n mile, 威胁方向  $310^\circ$ ,  $Z$  到  $O_2$  距离 1045 n mile, 威胁方向  $40^\circ$ 。空中警戒力量如表 1 所示。

表 1 海上编队空中警戒力量

Table 1 Airborne alert aircrafts of formation

机型	架数	机载雷达	区域	作战半径/km	警戒距离/km	任务
E-2C	1	AN/APS-125	交叉区	2856	470	空中警戒
		AN/ALR-73				
		AN/ARC-51A				
F-14	3	AN/AWG-9	交叉区	1230	200	巡逻警戒
F/A-18	3	AN/APC-65	交叉区	1065 ~ 1472	150	巡逻警戒
		AN/APG-73				

### 3.2 仿真结果

选用遗传算法对部署模型进行求解。遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架, 该算法广泛应用于函数优化、组合优化、自动控制、人工生命、机器学习等领域。

设计遗传算法种群数为 30, 每个染色体代表一种部署方案, 每个染色体有 15 个基因, 分别表示 5 个部署节点的位置坐标  $(x, y)$  和探测半径信息。随机生成 30 组部署方案, 并对染色体进行初始化, 经过各代染色体的交叉、变异和优选操作实现群体的进化过程。多次仿真发现, 经过约 1000 代的进化, 群体平均适应度已与最佳染色体适应度持平, 并且增长趋势不明显, 可以认为此时最佳染色体对应的方案即为优化部署方案, 如表 2 和图 3 所示。

表 2 优化部署方案数据

Table 2 Optimal deployment scheme data

节点标号	$x$ 坐标	$y$ 坐标	探测半径
节点 1	58	46	19
节点 2	56	66	8
节点 3	54	43	8
节点 4	60	61	8
节点 5	49	40	6
节点 6	58	47	6
节点 7	57	66	6

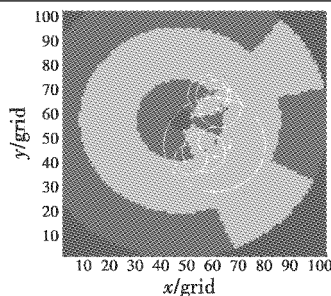


图 3 优化部署方案图

Fig. 3 Figure of the optimal deployment scheme

从图 3 所示的结果部署可以看出, 空中警戒力量均位于交叉区, 而这正是节点的优势部署区域, 从而提高了部署方案的实用性, 对区域的可部署性划分有利于对节点位置的导引, 可在实现网络较大保障能力前提下, 尽量使节点部署于安全区域或利于性能发挥的区域。

从部署方案图还可看出, 构造的网络实现了对高威胁区域的重点探测之目的, 预警机节点位于较大威胁扇面角内, 其他节点也加强了对重点保障区域的探测。另一方面, 节点在部署位置上依据自身探测能力, 较为均匀地分布于威胁区域, 在保证较大探测范围的同时, 相互之间也形成了尽可能大的重叠区域, 利于节点协同能力的发挥, 从而最大程度实现了网络的保障能力。

本文给出的模型方法能够解决复杂区域下节点的优化部署问题, 实现对异构节点(具有不同探测能力的空中警戒力量)的部署。多次仿真表明, 给出的优化部署模型是合理、有效的。

### 4 结束语

本文构造了大型海上编队空中警戒力量优化部署模型。模型充分考虑到节点位置可部署性、保障区域重要性、节点协同探测能力等因素影响, 使得模型更加合理与贴近实战。通过模型参数调整, 可得到满足不同作战要求的优化部署方案。如果将已有方案作为模型初始方案, 经过算法多次演化, 可得到现有方案的优化与改进方案。因此, 模型具有较强适应性, 能够为战斗筹划或实时决策提供辅助参考, 在一定程度上提高防空指挥官的作战效率。

### 参考文献

- [1] 谢荣鸿, 冷画屏, 陈小银. 航母编队远海对空作战预警探测体系的构建[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(1): 1-3.
- [2] 邢昌凤. 海军武器系统概论[M]. 北京: 海潮出版社, 2006.
- [3] 徐圣良, 吴晓锋, 赵小龙. 航母编队航渡过程中预警机阵位确定方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(1): 56-60.
- [4] 徐圣良, 吴晓锋, 王振波, 等. 航母编队进入综合作战区后巡逻机阵位研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(3): 43-47.
- [5] 尹文彬, 许腾, 盖世昌, 等. 美航母编队舰载战斗机防空作战出动能力分析[J]. 兵工自动化, 2011, 30(1): 8-11.
- [6] CHENG Ziguang, GAN Shaowu, WU Ningsheng, et al. Study on information vector of radar work space [C]// 2009 IET International Radar Conference, 2009: 1-4.
- [7] 冯威, 王平, 程子光. 航母编队受到的敌空袭威胁扇面大小预测模型[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(7): 119-122.