

# 基于防空警戒任务的多预警机协同补盲

王国师<sup>1</sup>, 李强<sup>2</sup>, 代科学<sup>2</sup>, 杨征<sup>3</sup>, 谢毓湘<sup>3</sup>

(1. 空军雷达学院研究生管理大队, 湖北 武汉 430019;

2. 空军雷达学院预警监视情报系, 湖北 武汉 430019;

3. 国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 在作战环境日益复杂的情况下, 多预警机进行协同补盲, 不仅可以扩大探测范围, 大大增强抵抗“四大威胁”的能力, 而且比地面雷达网具有更好的低空、超低空探测能力。研究了多预警机执行防空警戒任务时的协同补盲问题。首先, 给出了预警机探测总区域、探测强效区和弱效区的定义, 并分别建立了数学模型。其次, 对预警机的顶空盲区、底空盲区、机体遮挡盲区、转弯盲区进行了分析和建模。然后, 给出了基于防空警戒任务的多预警机协同补盲模型。最后, 通过仿真证明了模型的有效性。

**关键词:** 探测区域; 协同; 补盲; 多预警机

**中图分类号:** V 249

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.16

## Blind compensation for multi-AWACS cooperation based on aerial defence and warning

WANG Guo-shi<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>, DAI Ke-xue<sup>2</sup>, YANG Zheng<sup>3</sup>, XIE Yu-xiang<sup>3</sup>

(1. *Brigade of Graduate Management, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China;*

2. *Department of Early Warning Surveillance Intelligence, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China;*

3. *College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)*

**Abstract:** Under the circumstances at which the battle surroundings are becoming more and more complex, blind compensation of multi-airborne warning and control system (AWACS) cooperation can not only expand detection range and enhance to resistance the “four threats”, but also detect the larger area in the low altitude and super low altitude. The problem of blind compensation for multi-AWACS cooperation is researched based on the task of aerial defence and warning. Firstly, the definitions of the total detection area, strong detection area and poor detection area are given, and the mathematical models are established respectively. Secondly, the blind areas of AWACS are analyzed and modelled. Thirdly, the model of blind compensation of multi-AWACS cooperation is proposed. Finally, simulation results prove the effectiveness of the proposed model.

**Keywords:** detection area; cooperation; blind compensation; multi-AWACS

## 0 引言

预警机<sup>[1]</sup>是一种大型、全天候、多传感器空中预警与指挥控制飞机,集预警、指挥、控制、通信、情报为一体,与地面雷达相比,具有较强的低空、超低空探测能力、机动能力和战场指挥能力,是空军预警探测和作战指挥系统的重要组成部分。因价格昂贵,世界上只有部分国家拥有预警机<sup>[2]</sup>,且目前主要以单架预警机研究为主,如美国从最初研制<sup>[3-7]</sup>的AD-3W“复仇者”预警机试验机,到后来研制的XTF-

1W、E-1B、E-2、E-3,目前又在研制通用和多功能“作战平台”-“多传感器指挥控制飞机”E-10A,想用它取代日益老化的现役情报、侦察、监视机群,即:替代由E-3飞机来指挥控制空对空作战任务、JSTARS飞机执行空对地作战任务、而RC-135“铆钉”飞机执行情报收集与战场监视作战任务的现状。但随着作战环境的日益复杂,单架预警机由于本身存在的缺陷(如存在探测盲区等)和探测范围有限性,很难实现对“四大威胁”的对抗能力。因此,在大规模局部战争中,为了实施大纵深、全方位的预警探测,需要多

架预警机协同完成任务。

多年来,国内外在无人机、战斗机等协同空战<sup>[8-11]</sup>方面开展了广泛的研究,并取得了一些颇有成效的结果。但多预警机协同涉及到大量技术难题,只有美、俄等极少数预警机主产国开展了一些研究,其成果已在近几年现代局部战争中得到展示,如海湾战争、科索沃战争和伊拉克战争中,几十架 E-3A 和 E-2C 预警机承担了以美军为首的进攻一方的全部防空监控任务。由于预警机属于各国机密武器,几乎看不到公开的相关资料。目前,我国对预警机的研究也是以单架预警机为主<sup>[12-13]</sup>,为了适应未来战争的需要,有必要对多预警机协同进行研究。

多预警机协同涉及到预警、指挥、控制、通信等大量的技术难题,而防空警戒任务是预警机的最基本功能。为了简化模型,本文只研究多预警机执行防空警戒任务时的协同补盲模型。首先,给出了预警机探测总区域、探测强效区和弱效区的定义,并分别建立了数学模型。其次,对预警机的顶空盲区、底空盲区、机体遮挡盲区、转弯盲区进行了分析和建模。最后,给出了基于防空警戒任务的多预警机协同补盲的数学模型,并通过仿真证明了该模型的有效性。

### 1 预警机巡逻探测区域

预警机在遂行防空预警任务时<sup>[12]</sup>,通常在敌防空火力圈之外、敌我战线的我方一侧巡逻飞行,飞行的航线一般是双平行线,但有时(如侧风很大时)亦采用横 8 字形,特殊情况下还可采取环绕保卫重点的飞行巡逻方式,以便全方位环视警戒。本文以双平行线形航线为例进行建模,双平行线形航线上下两边为直线,长度  $L$  为 60~90 km,两线间隔 20~30 km,左右两侧可以近似看作半径为  $r$  的两个半圆,可知  $r$  为 10~15 km,如图 1 所示。

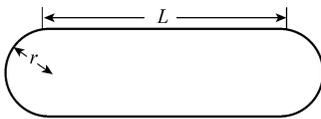


图 1 预警机双平行线形航线

#### 1.1 预警机巡逻探测总区域

**定义 1** 预警机巡逻探测总区域是指预警机沿着如图 1 所示的双平行线形航线巡逻时,所能探测到的区域总和。

本文假设预警机在空中不动时的探测范围为以载机所在位置为圆心、以雷达最大探测距离  $R_m$  为半径的一个圆(暂不考虑盲区),当载机沿双平行线形航线巡逻飞行时,这个探测圆就随之一起运动,如图 2 所示的灰色区域为预警机巡逻探测总区域,面积  $S$  可表示为

$$S = \pi(R_m + r)^2 + 2(R_m + r)L \quad (1)$$

**定义 2** 预警机巡逻探测强效区是指预警机沿着如图 1 所示的双平行线形航线巡逻时,在双平行线形航线上的任意航迹点都能够探测到的区域。

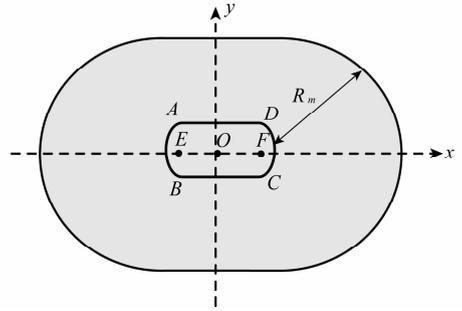


图 2 预警机巡逻探测总区域

根据上述定义,强效区可以转化为如下数学模型进行求解,即以双平行线航线上的各航迹点为圆心、以载机雷达最大探测距离  $R_m$  为半径的所有圆的交集。欲求此交集,需要对这一系列圆建立数学方程,而这些圆的圆心是双平行线航线上的航迹点。因此,需要先对双平行线航线进行数学建模。

如图 2 所示,以双平行线形航线的中心点  $O$  为坐标原点、水平对称轴为横轴、垂直对称轴为纵轴建立直角坐标系, $E$ 、 $F$  分别为双平行线形航线两侧半圆的圆心, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别为双平行线航线上直线部分与两个半圆的交点,则  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$  的坐标分别为  $(-L/2, r)$ 、 $(-L/2, -r)$ 、 $(L/2, -r)$ 、 $(L/2, r)$ 、 $(-L/2, 0)$ 、 $(L/2, 0)$ 。由此可将双平行线航线分为:直线  $AD$ 、直线  $BC$ 、弧线  $AB$ 、弧线  $CD$  4 段来描述,其方程分别为式(2)~式(5),直线  $L_{AD}$  的方程为

$$y = r, -L/2 \leq x \leq L/2 \quad (2)$$

$$y = -r, -L/2 \leq x \leq L/2 \quad (3)$$

$$(x + L/2)^2 + y^2 = r^2, L/2 - r \leq x \leq -L/2 \quad (4)$$

$$(x - L/2)^2 + y^2 = r^2, L/2 \leq x \leq L/2 + r \quad (5)$$

前面所提到的这一系列圆的圆心就在以上所描述的 4 条直线或弧线上。根据圆心所在直线的不同,可以将这些圆分为 4 类,即以直线  $L_{AD}$  上的点为圆心的一系列圆,以直线  $L_{BC}$  上的点为圆心的一系列圆,以弧线  $L_{\widehat{AB}}$  上的点为圆心的一系列圆,以弧线  $L_{\widehat{CD}}$  上的点为圆心的一系列圆。下面以直线  $L_{AD}$  上的点为圆心的圆的方程的建立为例进行说明。

设点  $(x_1, y_1)$  为直线  $L_{AD}$  上任意点,根据式(2)有

$$y_1 = r, -L/2 \leq x_1 \leq L/2 \quad (6)$$

以  $(x_1, y_1)$  为圆心,以  $R_m$  为半径的圆可以描述为

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = R_m^2 \quad (7)$$

将式(6)代入式(7),得

$$(x - x_1)^2 + (y - r)^2 = R_m^2, -L/2 \leq x_1 \leq L/2 \quad (8)$$

式(8)即为以直线  $L_{AD}$  上的点为圆心的圆的方程。

同理可得,以  $L_{BC}$ 、 $L_{\widehat{AB}}$ 、 $L_{\widehat{CD}}$  上的点为圆心的圆的方程分别为

$$(x - x_2)^2 + (y + r)^2 = R_m^2, -L/2 \leq x_2 \leq L/2 \quad (9)$$

$$(x + \sqrt{r^2 - y_3^2} + L/2)^2 + (y - y_3)^2 = R_m^2 \quad (10)$$

$$(x - \sqrt{r^2 - y_4^2} - L/2)^2 + (y - y_3)^2 = R_m^2 \quad (11)$$

式中,  $x_2$  为直线  $L_{BC}$  上的任意点的横坐标;  $(x_3, y_3)$  为弧线  $L_{\widehat{AB}}$  上的任意一点; 点  $y_4$  为弧线  $L_{\widehat{AB}}$  上的任意点的纵坐标。

预警机沿着该双平行线航线巡逻时的探测强效区的面积  $S_1 = \bigcap_{l \in L} S_l$ 。其中,  $L$  表示式(8)~式(11)所表示的所有圆的集合,  $l$  为  $L$  中的任意圆,  $S_l$  为  $l$  的面积。

**定义 3** 预警机巡逻探测弱效区指预警机沿着图 1 所示的双平行线形航线巡逻时, 在双平行线形航线上的有些航迹点可以探测到在有些航迹点探测不到的区域。

### 1.2 预警机探测盲区

由于机载雷达本身设计因素、载机机体的遮蔽效应、飞行姿态变化等因素, 致使其威力范围内亦存在探测盲区。这些盲区包括顶空盲区、底空盲区、机体遮挡盲区、转弯盲区、径向速度盲区。其中, 前 4 个类盲区只与预警机本身因素有关, 与目标因素无关; 而径向速度盲区与预警机和目标的相对径向速度有关, 此类盲区作者已在文献[12]中进行了详细谈论, 本文只讨论与预警机本身因素有关的前 4 类盲区。

#### 1.2.1 顶空盲区和底空盲区

机载雷达由于扫描波束存在一定的俯仰角, 因此载机探测范围存在顶空盲区和底空盲区。如图 3 所示为预警机雷达的顶空和底空盲区示意图, 盲区形状是以预警机所在位置为顶点的两个锥体, 大小取决于天线俯仰角波束的捷变能力及预警机系统平台高度等因素。设预警机飞行高度为  $H$ , 波束俯角波束、仰角波束分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ , 则高度层为  $h \in [0, H]$  处的底空盲区半径  $R_{h1}$  和顶空盲区半径  $R_{h2}$  分别为

$$R_{h1} = (H - h) \tan \theta_1 = (H - h) \tan (\pi/2 - \varphi_1) \quad (12)$$

$$R_{h2} = (h_2 - H) \tan \theta_2 = (h_2 - H) \tan (\pi/2 - \varphi_2) \quad (13)$$

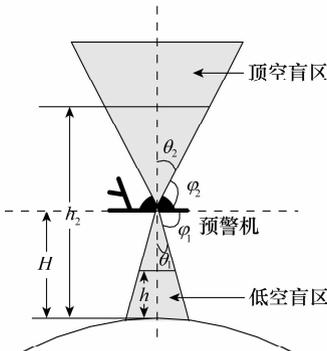


图 3 顶空盲区和底空盲区

考虑到预警机平台高度较高, 且预警机系统的主要任务为下视探测。因此, 顶空盲区在此不再做进一步讨论。

由式(12)可知,  $R_{h1}$  在不同的高度层其值不等, 我们最关心的是  $R_{h1}$  的最大值。当  $h=0$  时, 底空盲区  $R_{h1}$  取最大值为

$$R_{h1}^{\max} = H \tan \theta_1 = H \tan (\pi/2 - \varphi_1) \quad (14)$$

下面讨论预警机飞行高度  $H$  和雷达波束俯角  $\varphi_1$  对  $R_{h1}^{\max}$  的影响, 当  $H$  分别取 7 000 m、10 000 m、13 000 m,  $\varphi_1$  在  $10^\circ \sim 40^\circ$  之间变化时, 通过 Matlab R2008 b 仿真结果如图 4 所示。

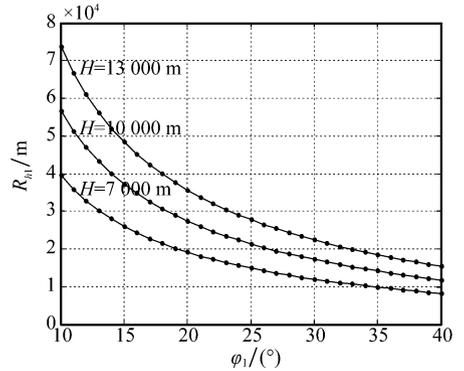


图 4 底空盲区最大半径  $R_{h1}^{\max}$  的变化曲线

由图 4 可知, 对于确定的  $H$ , 底空盲区半径  $R_{h1}^{\max}$  随着  $\varphi_1$  增大而减小; 对于确定的  $\varphi_1$ , 底空盲区半径  $R_{h1}^{\max}$  随着  $H$  增大而增大。例如: 给定  $H=10\ 000\ \text{m}$ , 当俯角  $\varphi_1$  从  $15^\circ$  增大到  $25^\circ$  时, 底空盲区半径  $R_{h1}^{\max}$  从约 37 000 m 逐渐减小到约 21 000 m; 给定  $\varphi_1=20^\circ$ , 当飞行高度  $H$  从 7 000 m 增大到 13 000 m 时, 底空盲区半径  $R_{h1}^{\max}$  从约 19 000 m 增大到约 36 000 m。

#### 1.2.2 转弯盲区

转弯盲区是预警机转弯时的坡度角和雷达俯仰角的限制而形成的, 它是顶空盲区和底空盲区的变形, 本文只讨论转弯盲区中的底空盲区。该区域是随着预警机转弯坡度角变化的一个动态盲区。假设预警机转弯时飞行坡度角为  $\alpha_1$ , 雷达波束俯角为  $\varphi_1$ , 飞行高度为  $H$ , 如图 5 所示。

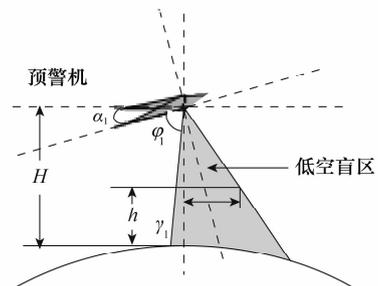


图 5 转弯盲区

其中,坡度角  $\alpha_1$  与预警机速度  $V$  和转弯半径  $r$  有关,根据文献[13]所描述三者的关系为

$$\begin{cases} F_y \cos \alpha_1 = G \\ r = V^2 / (9.8 \sqrt{n_y^2 - 1}) \\ n_y = F_y / G \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $F_y$  为升力;  $G$  为飞机重力;  $n_y$  为过载系数。由此可得:

$$\alpha_1 = \arccos(9.8r / \sqrt{V^4 + 9.8^2 r^2}) \quad (16)$$

取  $V$  分别为 150 m/s、165 m/s、180 m/s 时,  $r$  在 10 000 ~ 30 000 m 之间变化, 仿真结果如图 6 所示。

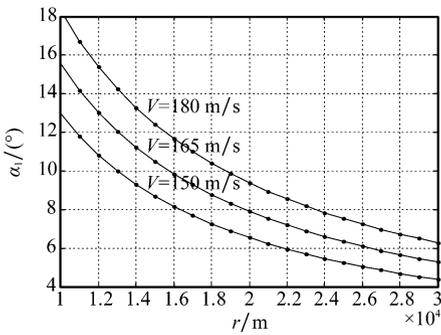


图 6 坡度角  $\alpha_1$  的变化曲线

由图 6 可知,对于确定的  $V$ ,坡度角  $\alpha_1$  随着转弯半径  $r$  的增大而减小;对于确定的  $r$ ,坡度角  $\alpha_1$  随着  $V$  增大而增大。例如:给定  $V=165$  m/s,当转弯半径  $r$  从 10 000 m 增大到 30 000 m 时,坡度角  $\alpha_1$  从约  $15.5^\circ$  减小到约  $5.5^\circ$ ;给定  $r=20$  000 m,当飞行速度  $V$  从 150 m/s 增大到 180 m/s 时,坡度角  $\alpha_1$  从约  $6.5^\circ$  增大到约  $9.5^\circ$ 。

预警机在  $h$  高度层的转弯盲区为一个环,内、外侧半径分别为

$$R_{b1} = (H - h) \tan(\pi/2 - \varphi_1 - \alpha_1) \quad (17)$$

$$R_{b2} = (H - h) \tan(\pi/2 - \varphi_1 + \alpha_1) \quad (18)$$

盲区宽度为

$$\begin{aligned} d_b &= R_{b1} + R_{b2} = \\ &= ((\tan(\pi/2 - \varphi_1 - \alpha_1) + \tan(\pi/2 - \varphi_1 + \alpha_1)) = \\ &= \frac{2(H - h) \cot \varphi_1 (1 + \tan^2 \alpha_1)}{1 - \cot^2 \varphi_1 \tan^2 \alpha_1} \end{aligned} \quad (19)$$

当  $h=0$  时,有最大盲区宽度  $d_{\max}$  为

$$d_{\max} = \frac{2H \cot \varphi_1 (1 + \tan^2 \alpha_1)}{1 - \cot^2 \varphi_1 \tan^2 \alpha_1} \quad (20)$$

通常情况下,  $\pi/2 - \varphi_1 - \alpha_1 \geq 0$ 。取  $H=10$  000 m,  $\varphi_1$  分别为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ ;  $H$  为 8 000 m、6 000 m,  $\varphi_1=25^\circ$ 。坡度角  $\alpha_1$  在  $8^\circ \sim 12^\circ$  之间变化时,仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可知:对于确定的  $H$  和  $\varphi_1$ ,转弯盲区宽度  $d_{\max}$  随着坡度角  $\alpha_1$  的增大而增大;对于确定的  $H$  和  $\alpha_1$ ,转弯盲

区宽度  $d_{\max}$  随着波束俯仰角  $\varphi_1$  的增大而减小;对于确定的  $\varphi_1$  和  $\alpha_1$ ,转弯盲区宽度  $d_{\max}$  随着飞行高度  $H$  的减小而减小。例如:给定  $H=10$  000 m,  $\varphi_1=15^\circ$  时,当坡度角  $\alpha_1$  从  $8^\circ \sim 12^\circ$  之间变化,转弯盲区宽度  $d_{\max}$  在 110 000 ~ 210 000 m 之间上升;给定  $H=10$  000 m,  $\alpha_1=10^\circ$  时,当波束俯仰角  $\varphi_1$  从  $15^\circ$  增大到  $25^\circ$  时,转弯盲区宽度  $d_{\max}$  从约 135 000 m 减小到约 50 000 m;给定  $\varphi_1=25^\circ$ ,  $\alpha_1=10^\circ$  时,当飞行高度  $H$  从 8 000 m 降低到 6 000 m 时,转弯盲区宽度  $d_{\max}$  从约 40 000 m 减小到约 30 000 m。通常情况下,盲区宽度  $d_{\max}$  小于 70 km。

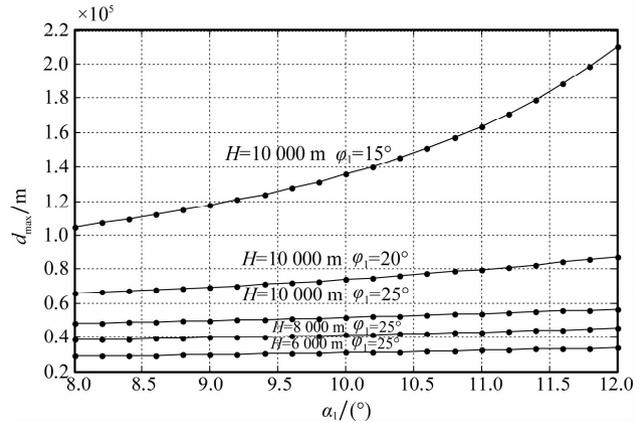


图 7 转弯盲区最大半径  $d_{\max}$  的变化曲线

### 1.2.3 机体遮挡盲区

由于机载雷达受载机机体的遮蔽,在机头、机尾、机翼、机身下方的一定范围内不可探测,使得底空下视盲区进一步加大,其盲区平面分布示意图如图 8 所示(黑色区域大小仅做示意,不代表实际盲区范围)。预警机载机遮蔽所形成的盲区与雷达天线安装的位置,载机外形(如翼展、机身长)等因素有关,而对于不同的预警机而言,具体情形不同,且数学模型比较复杂。但随着预警机设计技术的不断提高,机体遮蔽盲区越来越小,为简化模型,本文认为机体遮挡盲区在底空盲区或转弯盲区内,不再对其单独建模。

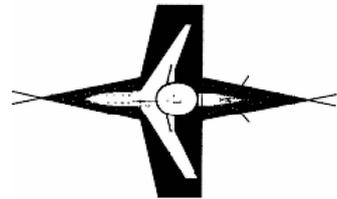


图 8 机体遮蔽盲区

上述讨论的盲区在双平行线航线的某些航迹点可能不是盲区,根据弱效区定义,上述讨论盲区中的部分区域应属于弱效区的范畴,但这部分区域相对于前面所描述的弱效区来说很小,且跟盲区衔接在一起,为了便于处理,把这类盲区仍然称为盲区。现将预警机巡逻时探测区域在 Matlab

(R2008b)平台下进行仿真,如图 9 所示。图中外侧阴影部分为预警机巡逻探测弱效区,阴影内的白色区域为预警机巡逻探测强效区,内侧圆角矩形为预警机盲区,3 者之和为预警机巡逻探测总区域。其中,图 9 的 4 个图中  $H$  均为

10 km,  $\varphi_1$  为  $25^\circ$ ,  $V$  为 170 m/s, 图 9(a) 中:  $r=20$  km,  $L=60$  km,  $R_m=420$  km; 图 9(b) 中:  $r=10$  km,  $L=60$  km,  $R_m=420$  km; 图 9(c) 中:  $r=20$  km,  $L=90$  km,  $R_m=420$  km; 图 9(d) 中:  $r=20$  km,  $L=90$  km,  $R_m=300$  km。

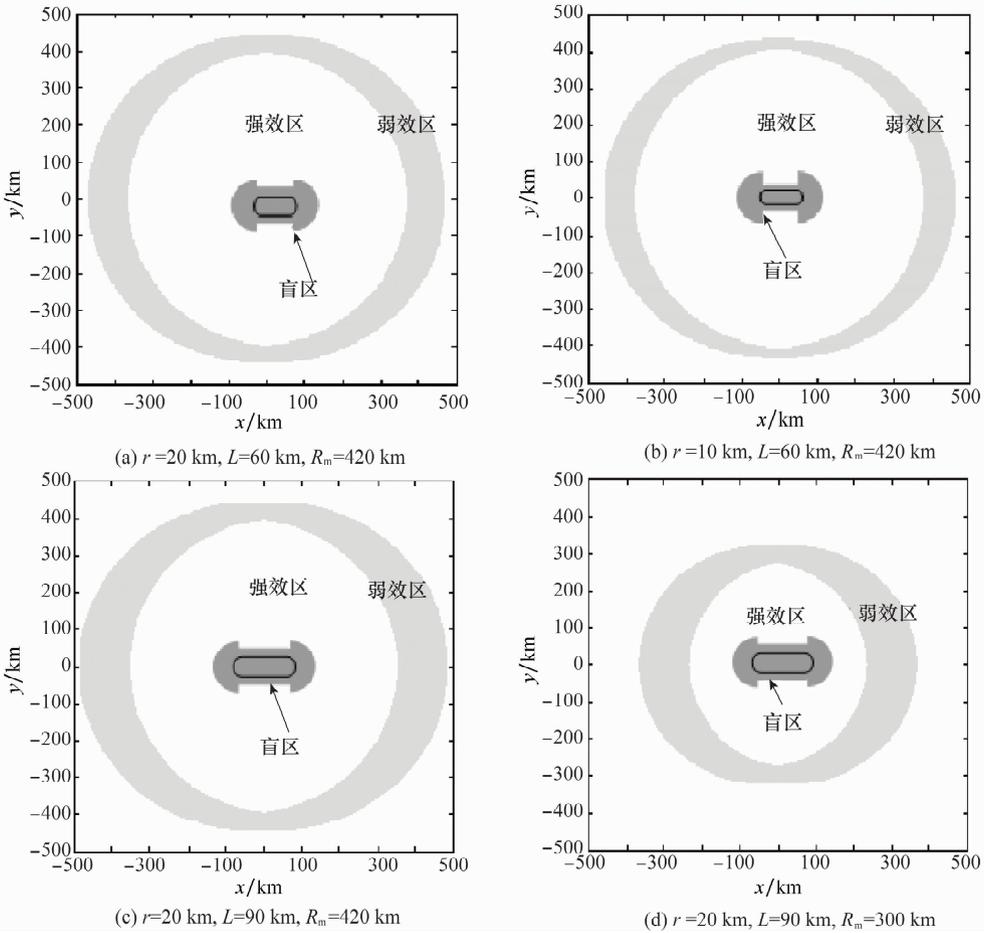


图 9 不同参数时预警机巡逻探测区域

由图 9 可知:强效区的大小主要与与双平行线形航迹的直线长度  $L$ 、两侧半圆的半径  $r$  和机载雷达的最大探测距离  $R_m$  有关。对比图 9(a)与图 9(b)可知,  $r$  越小,预警机巡逻探测总区域越小,预警机巡逻探测强效区所占总探测总区域比例越大,预警机巡逻探测弱效区所占总探测总区域比例越小;对比图 9(a)与图 9(c)可知,  $L$  越大,预警机巡逻探测总区域越大,预警机巡逻探测强效区所占总探测总区域比例越小,预警机巡逻探测弱效区所占总探测总区域比例越大;对比图 9(c)与图 9(d)可知,  $R_m$  越小,预警机巡逻探测总区域越小,预警机巡逻探测强效区所占总探测总区域比例越小,预警机巡逻探测弱效所占总探测总区域比例越大。

## 2 多预警机协同补盲模型

为简化模型,本文做了如下假设:参与协同的各预警机

为同一型号,即各种性能完全相同;目标在各方向上的散射截面面积相同;各预警机对目标的发现概率和虚警概率是独立的。则协同后的目标发现概率和虚警概率采用“或”规则计算为

$$P_d^o = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - p_d^i) \quad (21)$$

$$P_f^o = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - p_f^i) \quad (22)$$

式中,  $p_d^i$  和  $p_f^i$  分别为第  $i$  架预警机的发现概率和虚警概率。

将所要防御的区域按重要程度分为警戒区域  $A_w$  和重点区域  $A_l$ , 其中  $A_w \in A_l$ , 是指至少能被一架预警机探测的区域,  $A_l$  指至少能被  $K$  架预警机的强效区覆盖的区域。在预警机资源有限的条件下,如何应用有限的预警机资源合理协同,使得对警戒区域和重点区域的探测面积均最大,但一般情况下,这两个问题是相互矛盾的。因此,需要一种折

中的办法处理。本文采用加权的方法对该问题建立的数学模型如下：

$$f = \omega \frac{A_w^W}{A_w} + (1 - \omega) \frac{A_l^W}{A_l} \quad (23)$$

式中,  $A_w^W$  为多预警机协同系统实际警戒的区域与  $A_w$  的交集;  $A_l^W$  为至少能被  $K$  架预警机的强效区覆盖的区域与  $A_l$  的交集;  $\omega$  为加权系数, 其大小可以根据具体应用调整。

### 3 仿真分析

欲求得上述问题的最优解, 需要将警戒区域中每个点作为各预警机飞行航线的中心点进行遍历, 且在每个点还有考虑预警机飞行参数(如速度、高度、波束俯角等), 此计算量相当大。为了对问题进行快速求解, 只要求得到问题的次优解即可。因此, 本文利用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法<sup>[14]</sup>对问题进行求解。假设使用两架预警机对  $700 \text{ km} \times 500 \text{ km}$  的  $A_w$  和  $140 \text{ km} \times 70 \text{ km}$  的  $A_l$  执行防空警戒任务,  $k=2$ ,  $A_l$  处于  $A_w$  的中心位置, 以  $A_l$  为原点、以水平方向为  $x$  轴建立直角坐标系, 基于 PSO 算法的仿真结果如图 10 所示。

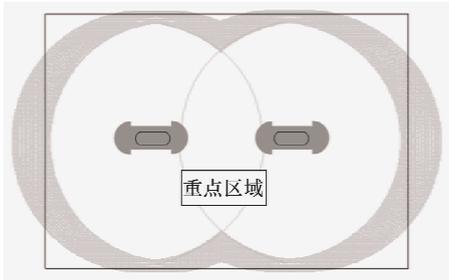


图 10 两架预警机协同仿真结果

仿真中, 两架预警机巡逻航线中心坐标分别为:  $(180^\circ, 0^\circ)$ 、 $(-180^\circ, 0^\circ)$ , 两架预警机的参数均为:  $H=10 \text{ km}$ ,  $\varphi_1=25^\circ$ ,  $V=170 \text{ m/s}$ ,  $R_m=420 \text{ km}$ ,  $r=20 \text{ km}$ ,  $L=60 \text{ km}$ ,  $\omega=0.2$ ,  $\frac{A_w^W}{A_w}=0.96$ ,  $\frac{A_l^W}{A_l}=1$ ,  $f=0.992$ 。协同系统在满足探测范围要求的同时, 尽量扩大整个强效区的范围, 使原来单架预警机巡逻时的弱效区变成了协同系统时的强效区, 仿真结果证明了本文所建模型比较理想。

### 4 结论

本文研究多预警机执行防空警戒任务时的协同补盲模型。给出了预警机探测总区域、探测强效区和弱效区的定义, 并分别建立了数学模型。其次, 对预警机的顶空盲区、底空盲区、机体遮挡盲区、转弯盲区进行了分析和建模。最后, 给出了基于防空警戒任务的多预警机协同补盲的数学模型, 并通过仿真证明了该模型的有效性。

### 参考文献:

- [1] 郇能敬. 预警机系统导论[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. (Li N J. *Introduction to airborne early warning systems* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.)
- [2] 贲德, 韦传安, 林幼权. 机载雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2008. (Ben D, Wei C C, Lin Y Q. *Airborne radar technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [3] Kirkendall D A. Redefining E-3 core competencies for dominant battlespace knowledge in future combat operations [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2005.
- [4] Austin J J, Lynch H R. An analysis of retaining or replacing air force command and control aircraft[R]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2007.
- [5] Ames B. Air force starts work on follow-on surveillance aircraft to joint STARS[J]. *Military & Aerospace Electronics*, 2003, 14(10):3-4.
- [6] Michael J S. Defense acquisitions: changes in E-10A acquisition strategy needed before development starts [R]. Washington: General Accounting Office, 2005.
- [7] Luis M, Fernando C, Joaquin F, et al. Multi-UAV cooperative perception techniques[J]. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2007, 37(1):67-110.
- [8] Emanuel S, Lewis L F. A hardware platform for research in helicopter UAV control[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2009, 54(1-3):387-406.
- [9] Wei X X, Duan H B, Wang Y R. Hybrid game theory and D-S evidence approach to multiple UCAVs cooperative air combat decision[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, 5553(1):236-246.
- [10] Maza I, Kondak K, Bernard M, et al. Multi-UAV cooperation and control for load transportation and deployment[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, 57(1-4):417-449.
- [11] 王国师, 李强, 贺玲, 等. 某型机载预警雷达盲区计算模型研究[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(6):491-498. (Wang G S, Li Q, He L, et al. Research on calculation model for blind zone of an airborne warning radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2010, 8(6):491-498.)
- [12] 曾庆华, 管于球, 王中伟. 多机空战仿真的飞机简化模型研究[J]. 航空计算技术, 2000, 30(2):9-11. (Zeng Q H, Guan Y Q, Wang Z W. The research of the plane simply model in the multi-plane air war[J]. *Aviation Computation Technology*, 2000, 30(2):9-11.)
- [13] Hu X H, Eberhart R. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization[C]//*Proc. of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 2002:1677-1681.