

## 机载预警雷达协同探测航线优化

付莹<sup>1,2</sup>, 汤子跃<sup>1</sup>, 孙永健<sup>1,3</sup>

(1. 空军预警学院, 湖北 武汉 430019; 2. 中国人民解放军 95333 部队, 湖南 长沙 410114;  
3. 北京无线电测量研究所, 北京 100854)

**摘要:** 单架机载预警雷达探测目标时存在空域覆盖盲区和多普勒盲区。建立了巡逻航线的参数化模型, 推导了机载预警雷达目标发现概率计算模型; 提出了基于累积发现概率矩阵 2-范数的单架机载预警雷达巡逻航线优化准则。由于多架机协同可以减小盲区对探测性能的影响, 进一步研究了多架机协同探测的任务航线规划问题, 提出了优化准则, 分析了机载预警雷达之间的飞行时间间隔和航线之间的距离间隔对重点监视区域累积发现概率的影响。仿真结果表明了基于累积发现概率矩阵 2-范数的优化准则的有效性, 有利于最大化机载预警雷达空域覆盖和目标发现概率。

**关键词:** 协同探测; 航线优化; 机载预警雷达; 累积发现概率

**中图分类号:** TN951      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4177-09

## Cooperative detection routes optimization of AEW radar

Fu Ying<sup>1,2</sup>, Tang Ziyue<sup>1</sup>, Sun Yongjian<sup>1,3</sup>

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. Unit 95333 of PLA, Changsha 410114, China;  
3. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Airspace covering blind area and Doppler blind zone occur as single airborne early warning (AEW) radar is operated to probe targets. The parameterized mathematical model of AEW radar patrol routes was established. The calculation formula of AEW radar target detection probability was derived. And the patrol routes optimizing criterion of single AEW radar was proposed based on the 2-norm of accumulated detection probability matrix. The mission routes programming problem of multi-AEW radar cooperation probing was studied further and the optimizing criteria was presented in that multi-AEW radar cooperation can help reduce the bad influence of airspace covering blind area and Doppler blind zone on detection performance. Finally, the effects of time interval and distance separation between AEW radars on accumulated detection probability of the key surveillance area were analyzed. Simulation results show that the optimizing criteria founding on 2-norm of accumulated detection probability matrix are effective which are conducive to maximize the coverage and target detection probability of AEW radar.

**Key words:** cooperation probing; routes optimization; airborne early warning radar;  
accumulated detection probability

收稿日期: 2014-04-08; 修订日期: 2014-05-11

基金项目: 武器装备军内科研项目(2011195)

作者简介: 付莹(1982-), 女, 博士生, 主要从事信号处理与数据融合方面的研究。Email: fyradar@126.com

导师简介: 汤子跃(1966-), 男, 教授, 博士后, 主要从事雷达系统、雷达信号处理、SAR 成像及信息处理方面的研究。

## 0 引言

机载预警雷达与地面雷达相比,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。和平时期,机载预警雷达可用于空中值勤,执行重大活动和重要目标的安保任务或监视周边敌对国军事行动,维护国家领空、领海、领土主权,以防突然袭击;战时,机载预警雷达执行警戒、指挥和武器引导任务,不仅可以加大预警距离,使截击机的拦截线大大向外延伸,而且还可以把各参战部队紧密地联成一个整体,统一控制战区内所有的防空武器,有效地指挥多军兵种联合作战<sup>[1]</sup>。但由于单架机载预警雷达本身存在固有的探测盲区<sup>[2-4]</sup>、目标特性<sup>[5]</sup>、作战环境和监视区域的不同,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,需要多架机载预警雷达协同完成任务。通过各机载预警雷达之间的协调和性能互补的优势,克服单部机载预警雷达的不确定性和局限性,获得对目标的一致性解释与描述,进而实现相应的决策和估计,使系统获得比它的各组成部分更加充分的信息,提高整个感知系统的有效性能,全面准确地描述目标。

参考文献[3, 6-7]对机载预警雷达、无人机和战斗机的协同探测和空战开展了研究,并取得了一些颇有成效的结果。参考文献[8]研究了机载预警雷达协同探测航线模式,提出了多架预警机协同执行预警探测任务时的并立和串接组合航线模式概念。为了适应未来战争的需要,有必要进一步对多机载预警雷达协同进行研究。在多架机载预警雷达协同对目标进行探测监视时,巡逻航线的优化是至关重要的。合理的巡逻航线,可以最大化空域覆盖和目标发现概率,提高目标航迹的连续性。为此文中首先给出了机载预警雷达巡逻航线的参数化表示;其次推导

了单部机载预警雷达针对特定目标区域的发现概率计算模型,提出了基于累积发现概率矩阵 2-范数准则的巡逻航线优化方法;最后,基于优化准则研究了载机飞行时间间隔对并立航线模式和串接航线模式下目标累积发现概率的影响以及航线间距对并立航线模式下目标累积发现概率的影响,为机载预警雷达任务规划提供了科学依据。

## 1 单架机载预警雷达的巡逻航线优化

### 1.1 机载预警雷达航线的参数化表示

机载预警雷达在遂行防空预警任务时,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。

文中以双平行线形航线为例进行建模,双平行线航线上下两边为直线,假设其长度为  $L$ ,两线间隔  $2r$ ,左右两侧可以近似看作半径为  $r$  的两个半圆,如图 1 所示,定义航线倾角  $\theta \in [0, \pi]$  为机载预警雷达航线方向与探测当面的垂线的夹角。

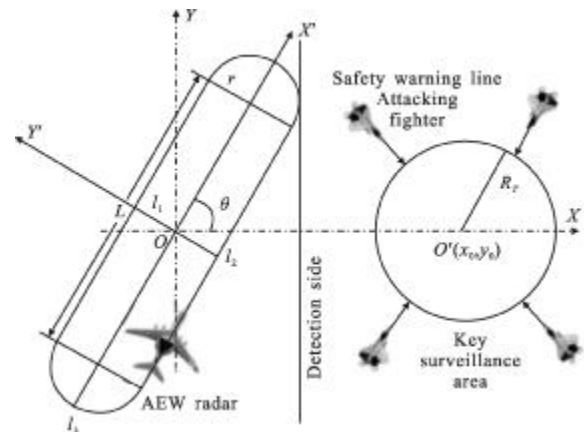


图 1 机载预警雷达巡逻航线

Fig.1 AEW radar Patrol route

可以写出机载预警雷达航线在坐标系  $X'OY'$  中的函数表达式:

$$\begin{cases} l_1: y_a(t) = r & -L/2 \leq x_a(t) \leq L/2 \\ l_2: y_a(t) = -r & -L/2 \leq x_a(t) \leq L/2 \\ l_3: (x_a(t) + L/2)^2 + y_a(t)^2 = r^2 & -L/2 - r \leq x_a(t) \leq -L/2, -r \leq y_a(t) \leq r \\ l_4: (x_a(t) - L/2)^2 + y_a(t)^2 = r^2 & L/2 \leq x_a(t) \leq L/2 + r, -r \leq y_a(t) \leq r \end{cases} \quad (1)$$

根据 Euler 旋转公式可知,坐标系  $X'OY'$  下机载

预警雷达航迹点坐标到坐标系  $XOY$  下的坐标  $(x'_a(t),$

$y_a'(t)^T$  变换为:

$$\begin{bmatrix} x_a'(t) \\ y_a'(t) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_a(t) \\ y_a(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

### 1.2 机载预警雷达的目标发现概率计算模型

在雷达系统的设计中,探测威力指标通常是从雷达方程出发的。雷达方程将雷达作用距离与发射机、接收机、天线和目标特性及环境特性联系起来<sup>[9-10]</sup>。它不仅用于确定某一特定雷达能够探测到的目标最大作用距离,且可充当了解影响雷达性能因素的一种手段,是用于分析雷达系统实际探测性能的一种有效分析途径。简化的雷达方程不能恰当地描述真实雷达的性能,许多重要的因素没有明显地包括进去,下面给出了修正的雷达方程:

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G A \rho_a \sigma F^4 e^{-2\alpha R_{\max}}}{(4\pi)^2 k T_0 B F_n (S/N)_m L_r L_s} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中: $P_t$  为平均发射机峰值功率,单位为 W; $G$  为天线增益; $A$  为天线面积,单位为  $m^2$ ; $\rho_a$  为天线孔径效率; $\sigma$  为雷达横截面积,单位为  $m^2$ ; $F^4$  为传播因子; $\alpha$  为衰减系数,单位为每单位距离奈培; $k=1.38 \times 10^{-23}$  J/K 为玻耳兹曼常数; $T_0=290$  K 为标准温度; $F_n$  为接收机噪声系数; $B$  为接收机带宽,单位为 Hz; $(S/N)_m$  为积累  $m$  个脉冲时雷达检测目标所需的信噪比; $L_r$  为目标起伏损耗(对于 Swerling 目标模型); $L_s$  为系统损耗。

由公式(3)可知, $R_{\max}$  是  $(S/N)_m$  的函数。这里只考虑非起伏目标情况,对于起伏目标,可以通过查表得到  $L_r$  后将其修正为非起伏目标。因为关心的是雷达在不同距离处的发现概率,所以只保留  $R_{\max}$  和  $\sigma$ ,把其他项用一个常数  $Const$  代替,可以将雷达方程写为:

$$(S/N)_m = Const \cdot \sigma R_{\max}^{-4} e^{-2\alpha R_{\max}} \quad (4)$$

Albersheim 在参考文献[11-12]中给出了  $P_d$ 、 $P_f$  和  $(S/N)_m$  三者之间的关系式:

$$(S/N)_m(\text{dB}) = -5\lg m + \left( 6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{m+0.44}} \right) \times \lg(A+0.12AB+1.7B) \quad (5)$$

式中: $A=\ln(0.62/P_f)$ ,  $B=\ln[P_d/(1-P_d)]$ 。著名雷达专家 M.I.Skolnik<sup>[13]</sup>指出,公式(5)在  $m=1 \sim 8096$ ,  $P_d=0.1 \sim$

$0.9$ ,  $P_f=10^{-3} \sim 10^{-7}$  范围内的误差小于 0.2 dB。

将公式(5)代入公式(4),整理可得:

$$Const = \sigma^{-1} R_{\max}^4 e^{2\alpha R_{\max}} 10^{\left[ -5\lg m \left( 6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{m+0.44}} \right) \times \lg(A+0.12AB+1.7B) \right] / 10} \quad (6)$$

对同一部雷达而言,若不考虑目标起伏,  $Const$  是一个常数。雷达的最大作用距离通常是指虚警概率为  $10^{-6}$ ,发现概率为 0.5(或 0.8)时对 RCS 为  $1 \text{ m}^2$  目标的最大作用距离。因此只要给出雷达的最大作用距离,就可以求出对应的  $Const$  值。进而可以求出雷达在任意距离处的发现概率为:

$$P_d = \frac{1}{1 + \exp\left[ \frac{(A-C)}{(1.7+0.12A)} \right]} \quad (7)$$

式中: $A=\ln(0.62/P_f)$ ,  $C$  为引入的临时变量,有  $\lg C = \frac{[10\lg(Const \cdot \sigma R_{\max}^{-4} e^{-2\alpha R_{\max}}) + 5\lg m]}{(6.2+4.54/\sqrt{m+0.44})}$ 。这样就得到了积累  $m$  个脉冲时雷达在不同距离处的发现概率表达式。

### 1.3 基于累积发现概率矩阵 2-范数的航线优化

实际应用中,为了发现目标,雷达要周期地对所观察的空域进行扫描。在进行检测时,将对目标进行数次观察,得到满足发现概率要求的探测距离。根据这种情况,应该把各次扫描的发现概率都统计在内,得出最终的发现概率,而不是某一次扫描的发现概率。另外,对于机载雷达,在探测目标的过程中,雷达和目标都在运动,所以在扫描时,雷达和目标之间的距离是变化的。这就意味着,每次扫描的信噪比和发现概率不同,采用累计概率更为合理。

机载预警雷达巡逻航线和场景如图 1 所示,假设敌方针对重点监视区域的空中突袭来自于任意方向。以重点保护区域中心点为圆心,径向步长为  $\Delta R$ ,角度间隔为  $\Delta\alpha$  进行离散得到目标坐标:

$$\begin{aligned} x_T(k, n) &= x_0 + k\Delta R \cos((n-1)\Delta\alpha) \\ y_T(k, n) &= y_0 + k\Delta R \sin((n-1)\Delta\alpha) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $k=1, 2, \dots, K$ ,  $K=\text{int}[R_T/\Delta R]$ ;  $n=1, 2, \dots, N$ ,  $N=\text{int}[2\pi/\Delta\alpha]$ ;  $(x_0, y_0)$  为重点区域中心坐标。当航线倾角为  $\theta_j$  时,机载预警雷达在位置  $(x_a'(t, \theta_j), y_a'(t, \theta_j))$  处对每一个目标采样点的发现概率可用概率矩阵表示为:

$$P_d(R_{kn}(t, \theta_j)) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{K1} & P_{K2} & \dots & P_{KN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,

$$R(t, \theta) = \{R_{kn}(t, \theta)\}_{K \times N}$$

$R_{kn}(t, \theta) = \{[x_a'(t, \theta) - x_T(k, n)]^2 + [y_a'(t, \theta) - y_T(k, n)]^2\}^{\frac{1}{2}}$   
为  $t$  时刻每个采样点到机载预警雷达的距离矩阵。令

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{K \times N}$$

各个采样点在机载预警雷达全航线上的累积发现概率矩阵定义为:

$$P_{dc}(R(t, \theta)) = A - \prod_{t=1}^T [A - P_d(R(t, \theta))] \quad (10)$$

式中:  $T$  为机载预警雷达航线采样点数;  $\prod(\cdot)$  表示矩阵的连续 Hardmard 积。定义满足下列约束条件时, 对重点监视区域的机载预警雷达巡逻航线为最优。

$$\begin{cases} \theta_0 = \arg[\max(\|P_{dc}\|_2)] & 0 \leq \theta_0 \leq \pi \\ \text{s.t. } \min|\min(x_T) - \max(x_a'(\theta))| \geq R_s \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $R_s$  为机载预警雷达航线安全告警距离;  $\|\cdot\|_2$  表示矩阵的 2-范数, 表征了机载预警雷达对于整个监视区域的探测性能, 其定义为:

$$\|P_{dc}\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(P_{dc}^T P_{dc})} \quad (12)$$

式中:  $\lambda_{\max}(P_{dc}^T P_{dc})$  为累积概率矩阵  $P_{dc}$  的最大奇异值, 即  $\lambda_{\max} = \max[\text{svd}(P_{dc})]$ 。

由公式(11)表明, 当机载预警雷达航线上与探测区域最近的点达到安全警告线时, 在  $\theta \in [0, \pi]$  区间搜索使得目标在机载预警雷达全航线上的累积概率矩阵 2-范数达到最大的角度。这样就确定了机载预警雷达对重点保护区域的最优巡逻航线。

## 2 协同探测航线优化

当多架机载预警雷达协同对重点监视区域进行探测监视时, 可能采用并立航线或串接航线模式。在完成单架机载预警雷达航线优化的基础上, 进一步研究, 多架机载预警雷达对重点区域协同监视和预警的任务航线优化问题。

将  $M$  架预警机雷达在  $t$  时刻对目标区域的协同发现概率定义为:

$$P_{da} = A - \prod_{m=1}^M [A - P_d^m(R(t, \theta_0))] \quad (13)$$

将  $M$  架机载预警雷达对目标区域的协同累积发现概率定义为:

$$P_{dM} = A - \prod_{t=1}^T (A - P_{da}) \quad (14)$$

式中:  $P_d^m(R_m(t, \theta_0))$  表示  $t$  时刻第  $m$  架机载预警雷达航线倾角为  $\theta_0$  时, 对重点监视区域的发现概率矩阵。

这里主要考虑两架机载预警雷达协同探测情况下, 载机飞行时间间隔对并立航线模式和串接航线模式以及航线间距对并立航线模式探测性能的影响。对于两架以上的多机协同问题可以采取两两优化的方法解决。

当两架载机在航线上存在飞行时间间隔  $t$  的情况下,  $t$  时刻目标区域采样点到机载预警雷达的斜距为:

$$R_{kn}^m(t, \theta_0, \Delta t) = \{[x_a'(t+m\Delta t, \theta_0) - x_T(k, n)]^2 + [y_a'(t+m\Delta t, \theta_0) - y_T(k, n)]^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

其中  $m=0, 1$ 。为寻找最优时间间隔, 可定义以下准则

$$\begin{cases} \Delta t_0 = \arg[\max(\|P_{dM}\|_2)] \\ \text{s.t. } 0 \leq \Delta t \leq T \end{cases} \quad (16)$$

如果两架机载预警雷达航线满足公式(16), 则认为飞行时间间隔  $\Delta t$  为最优。

当两架机载预警雷达采用并接航线模式时, 航线之间的间距同样会对探测性能产生影响。假设两架机载预警雷达航线沿  $y$  轴方向排列, 则

$$R_{kn}^m(t, \theta_0, \Delta d) = \{[x_a'(t, \theta_0) - x_T(k, n)]^2 + [y_a'(t, \theta_0) + m\Delta d - y_T(k, n)]^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

定义准则

$$\begin{cases} \Delta d_0 = \arg[\max(\|P_{dM}\|_2)] \\ \text{s.t. } 0 \leq \Delta d \leq R_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $R_{\max} + R_{\max_e} + R_{\max_p}$ ,  $R_{\max_e}$  为 E3 最大探测距离;  $R_{\max_p}$  为平衡木机载预警雷达的最大探测距离。如果两架机载预警雷达并立航线间距满足公式(18), 则认为航线间距  $\Delta d$  为最优。

## 3 仿真分析

### 3.1 单架机载预警雷达航线优化

仿真假设目标雷达散射截面  $RCS=5 \text{ m}^2$ , 飞行速度  $V_T=300 \text{ m/s}$ , 高度  $H_T=200 \text{ m}$ 。机载预警雷达的虚警概率  $P_f=10^{-6}$ , 发现概率  $P_d=50\%$ , 飞行速度  $V_a=200 \text{ m/s}$ , 飞行高度  $H=8 \text{ km}$ , 多普勒盲区门限  $f_T=300 \text{ Hz}$ , 航线转弯半径  $r=20 \text{ km}$ , 航线长度  $L=100 \text{ km}$ ; E3 机载预警雷达的最大作用距离  $R_{\max_e}=380 \text{ km}$ 。平衡木机载预

警雷达的最大作用距离  $R_{max}=200$  km。重点监视区域半径  $R_T=150$  km,中心坐标为(500 km, 0 m)。

图 2 给出了 E3 机载预警雷达对圆形重点监视区域,在  $t=0$  s,航线倾角  $\theta_j=20^\circ$  时的发现概率;图 3 给出了在航线倾角  $\theta_j=20^\circ$  时 E3 机载预警雷达全航线对重点监视区域的累积发现概率。图 4 给出了 E3 机载预警雷达对圆形重点监视区域,航线倾角与累积发现概率矩阵 2-范数的关系曲线。由曲线可以看出,当航线达到安全告警线,  $\theta_j=90^\circ$  时,累积发现概率矩阵的 2-范数达到最大,即此时的机载预警雷达巡逻航线为最优。

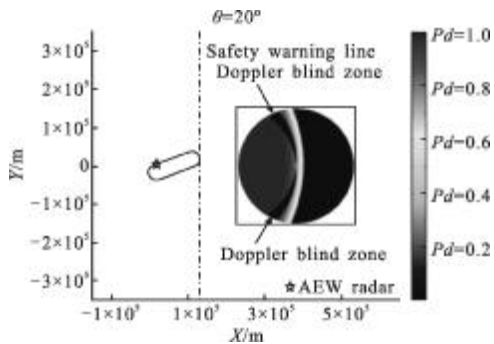


图 2  $\theta=20^\circ$  时对重点监视区域发现概率

Fig.2 Detection probability of key surveillance area when  $\theta=20^\circ$

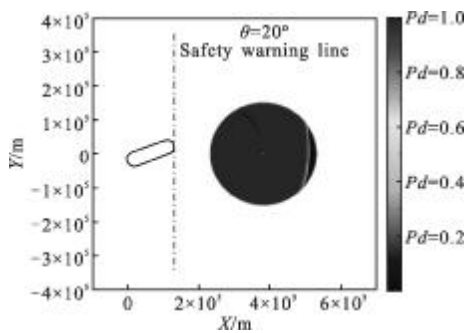


图 3  $\theta=20^\circ$  时对重点监视区域累积发现概率

Fig.3 Accumulated detection probability of key surveillance area when  $\theta=20^\circ$

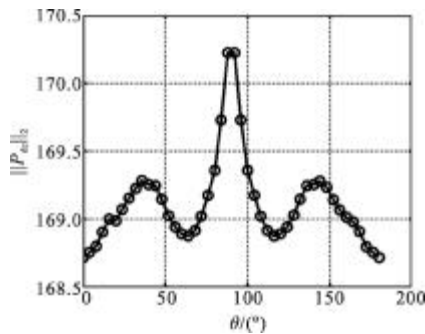


图 4 航线倾角与  $\|P_{acc}\|_2$  的关系曲线

Fig.4 Relationship between the route angle and  $\|P_{acc}\|_2$

图 5 给出了平衡木机载预警雷达对圆形重点监视区域,在  $t=0$  s,航线倾角  $\theta_j=20^\circ$  时的发现概率;图 6 给出了在航线倾角  $\theta_j=20^\circ$  时平衡木机载预警雷达全航线对重点监视区域的累积发现概率。图 7 给出了机载预警雷达对圆形重点监视区域,航线倾角与累积发现概率矩阵 2-范数的关系曲线。由曲线可以看出,当航线达到安全告警线,  $\theta_j=90^\circ$  时,累积发现概率矩阵的 2-范数达到最大,即此时的机载预警雷达巡逻航线为最优。

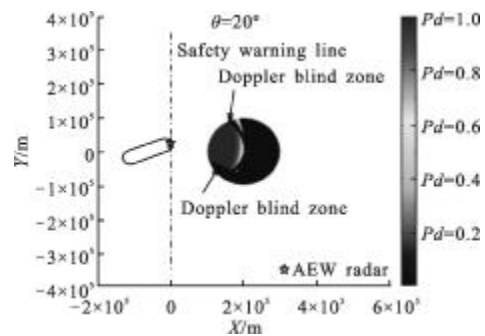


图 5  $\theta=20^\circ$  时重点监视区域发现概率

Fig.5 Detection probability of key surveillance area when  $\theta=20^\circ$

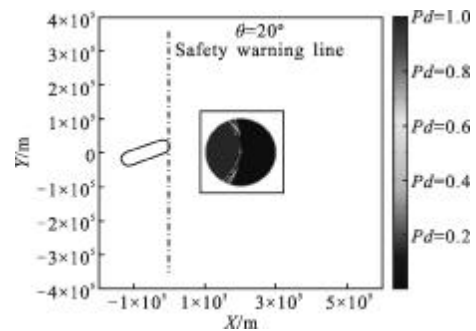


图 6  $\theta=20^\circ$  时重点监视区域累积发现概率

Fig.6 Accumulated detection probability of key surveillance area when  $\theta=20^\circ$

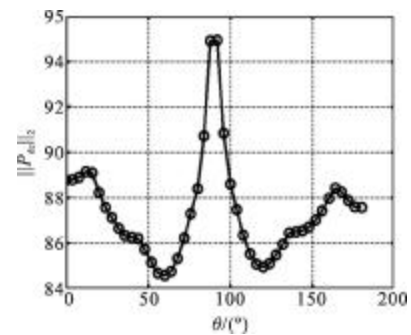


图 7 航线倾角与  $\|P_{acc}\|_2$  的关系曲线

Fig.7 Relationship between the route angle and  $\|P_{acc}\|_2$

综合以上仿真结果可知,满足公式(11)约束条

件的机载预警雷达巡逻航线,对于重点监视区域可以得到最大的累积探测概率。但是由于平衡木机载预警雷达前后各有  $60^\circ$  的方位盲区,所以在全航线上的累积发现概率较小。在侦查监视任务区域明确的情况下,可以采用此方法预先确定机载预警雷达的巡逻航线,获得最好的监视效果,充分发挥机载预警雷达的作战性能。

### 3.2 多机协同航线的飞行时间间隔优化

图 8 给出了 E3 机载预警雷达和平衡木机载预警雷达采用并立航线对重点监视区域的协同发现概率。图中  $t=0$ , 飞行时间间隔  $\Delta t=0$  s。图 9 给出了一架 E3 和一架平衡木在全航线上对目标区域的协同累积发现概率。

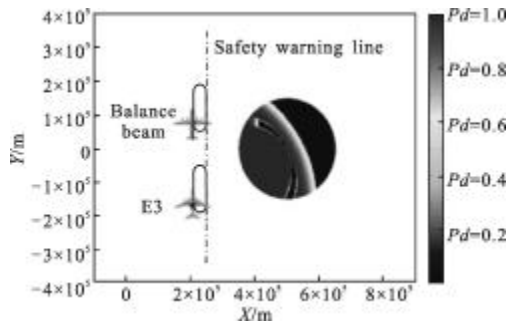


图 8 E3 和平衡木机载预警雷达协同发现概率

Fig.8 Cooperated detection probability between E3 and balance beam AEW radar

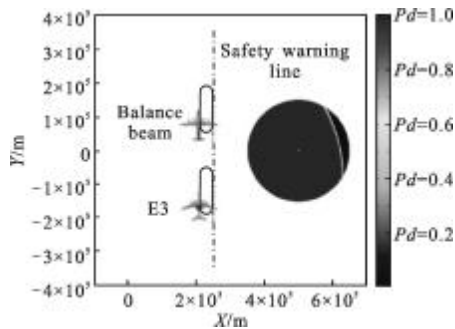


图 9 E3 和平衡木全航线协同累积发现概率

Fig.9 Cooperated and accumulated detection probability between E3 and balance beam AEW radar to the entire route

图 10 给出了这两架机载预警雷达之间飞行时间间隔与协同累积发现概率矩阵 2-范数的关系曲线。从图中可以看出,如果 E3 和平衡木机载预警雷达采用并行航线探测模式时,协同累积发现概率矩阵 2-范数在  $\Delta t=750$  s 时达到最大值。还可以看出随飞行时间间隔的变化幅度较小,表明机载预警雷达

对重点监视区域的覆盖较稳定。

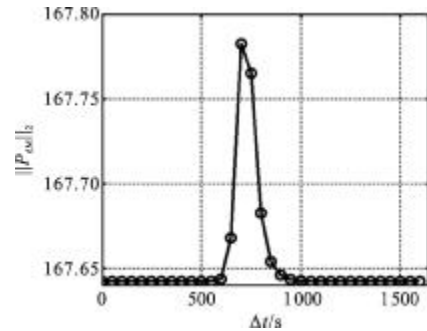


图 10 飞行时间间隔与  $\|P_{dm}\|_2$  关系曲线

Fig.10 Relationship between the flight time interval and  $\|P_{dm}\|_2$

假设两架 E3 机载预警雷达采用并立航线协同探测圆形重点监视区域。图 11 给出了  $t=0$  s, 飞行时间间隔  $\Delta t=0$  s 条件下两架机载预警雷达对重点监视区域的协同发现概率。图 12 给出了  $\Delta t=0$  s 条件下, 两架机载预警雷达在全航线上对目标区域的协同累

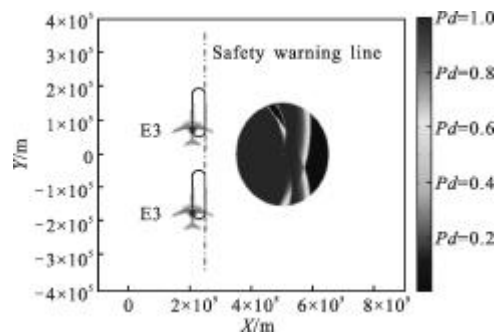


图 11 两架 E3 机载预警雷达的协同发现概率

Fig.11 Cooperated detection probability of two E3 AEW radars

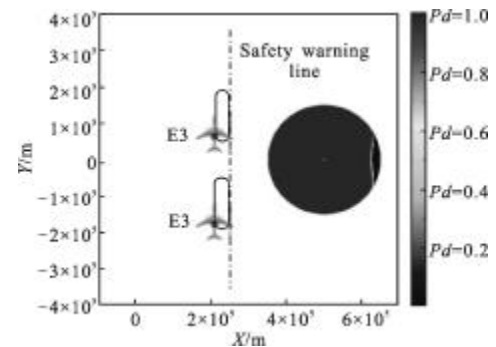


图 12 两架 E3 机载预警雷达全航线协同累积发现概率

Fig.12 Cooperated and accumulated detection probability of two E3 AEW radars to the entire route

积发现概率。图 13 给出了各架机载预警雷达之间飞行时间间隔与协同累积发现概率矩阵 2-范数的关系曲线。仿真结果表明,如果两架 E3 机载预警雷达

采用并行航线探测模式时, 协同累积发现概率矩阵 2-范数在  $\Delta t=1\ 250\text{ s}$  时达到最大值。还可以看出随飞行时间间隔的变化幅度较小, 表明机载预警雷达对重点监视区域的覆盖较稳定。

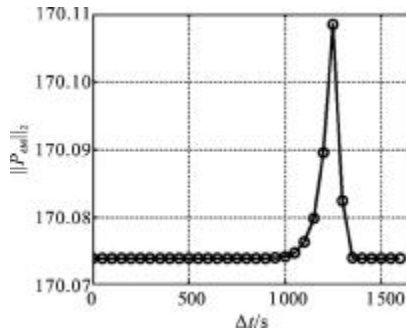


图 13 飞行时间间隔与  $\|P_{av}\|_2$  关系曲线

Fig.13 Relationship between the flight time interval and  $\|P_{av}\|_2$

假设 E3 机载预警雷达与一架平衡木机载预警雷达采用串接航线协同探测圆形重点监视区域。图 14 给出了两架机载预警雷达在航线上  $t=0\text{ s}$ , 飞行时间间隔  $\Delta t=1\ 100\text{ s}$  时对目标区域的协同发现概率。图 15

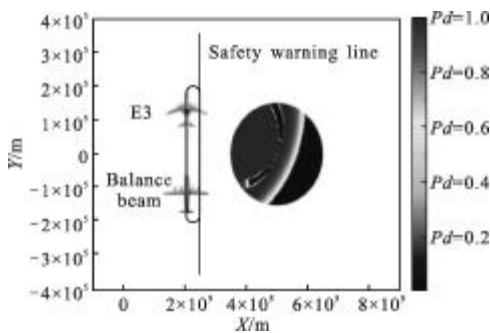


图 14 E3 和平衡木机载预警雷达的协同发现概率

Fig.14 Cooperated detection probability between E3 and balance beam AEW radar

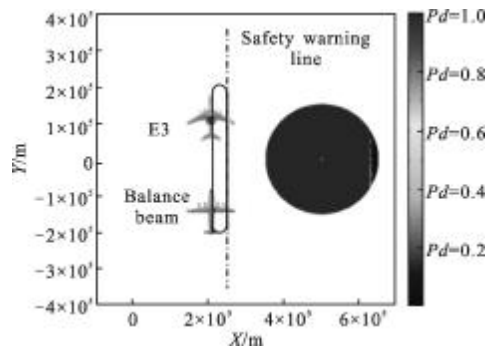


图 15 E3 和平衡木机载预警雷达全航线协同累积发现概率  
Fig.15 Cooperated and accumulated detection probability between E3 and balance beam AEW radar to the entire route

给出了全航线上两架机载预警雷达的协同累积发现概率。图 16 给出了各架机载预警雷达飞行时间间隔与协同累积发现概率矩阵 2-范数的关系曲线。

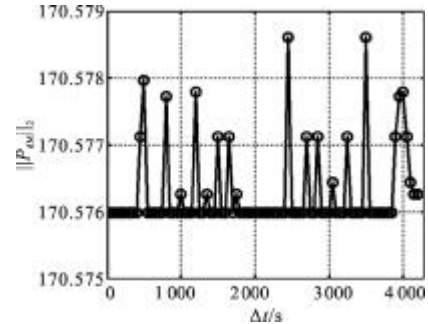


图 16 飞行时间间隔与  $\|P_{av}\|_2$  关系曲线

Fig.16 Relationship between the flight time interval and  $\|P_{av}\|_2$

假设两架 E3 机载预警雷达采用串接航线协同探测。图 17 给出了两架机载预警雷达在  $t=0\text{ s}, \Delta t=500\text{ s}$  时对目标区域的协同发现概率。图 18 给出了两架 E3 机载预警雷达在全航线上对目标区域的累积发现概率。图 19 给出了各架机载预警雷达之间的飞行时间间隔对协同累积发现概率矩阵 2-范数的影响。

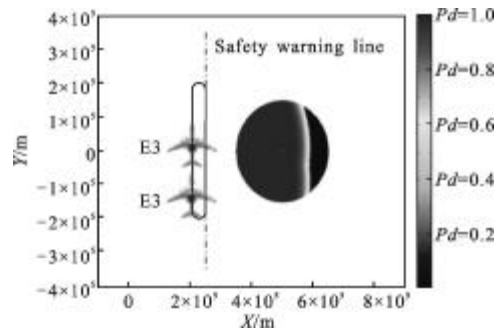


图 17 两架 E3 机载预警雷达的协同发现概率

Fig.17 Cooperated detection probability of two E3 AEW radars

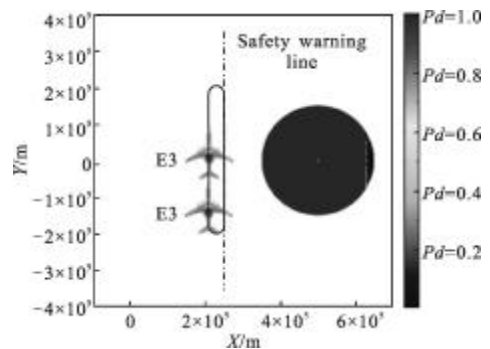


图 18 两架 E3 机载预警雷达全航线协同累积发现概率  
Fig.18 Cooperated and accumulated detection probability of two E3 AEW radars to the entire route

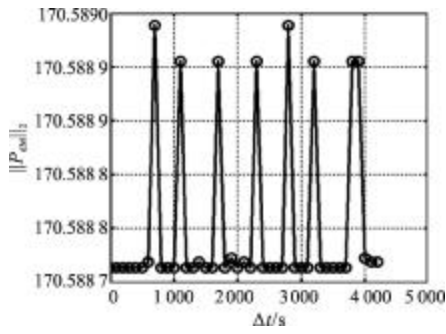


图 19 飞行时间间隔与 $\|P_{av}\|_2$ 关系曲线

Fig.19 Relationship between the flight time interval and  $\|P_{av}\|_2$

比较图 10 与图 16 和图 13 与图 19 可知, 多架机载预警雷达采用串接航线模式协同探测时的累积发现概率矩阵 2-范数较采用并立航线模式时大, 这表明在机载预警雷达数量较多的条件下, 串接航线适合探测距离较远的区域。但是串接航线模式的累积发现概率矩阵 2-范数变化频繁, 这说明串接航线模式对重点区域的空域覆盖和探测性能不稳定。

### 3.3 多机协同并立航线距离间隔优化

两架机载预警雷达并立航线探测模式配置灵活, 协同容易, 使用方便。但是并立航线间距  $\Delta d$  对空域覆盖和协同累积发现概率产生一定的影响。间距选择不当, 会增加载机转弯对探测性能的影响, 降低协同探测性能。因此有必要就航线间距对协同探测累积发现概率的影响进行研究。图 20 给出了当  $\Delta d=110 \text{ km}$  时 E3 和平衡木并立航线协同累积发现概率。图 21 给出了 E3 和平衡木航线间距与协同累积发现概率矩阵 2-范数之间的关系曲线。可以看出, 当航线间距  $\Delta d=210 \text{ km}$  时, 协同累积发现概率矩阵 2-范数达到最大值。

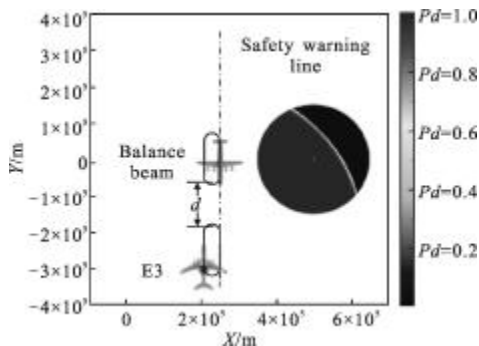


图 20 E3 和平衡木并立航线协同累积发现概率

Fig.20 Cooperated and accumulated detection probability between E3 and balance beam AEW radar

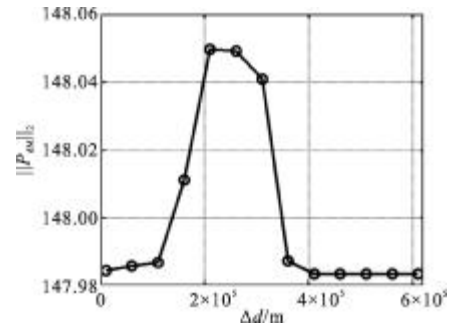


图 21 航线间距与 $\|P_{av}\|_2$ 关系曲线

Fig.21 Relationship between the distance separation and  $\|P_{av}\|_2$

## 4 结 论

建立了单部机载预警雷达巡逻航线的参数化方程。针对单架机载预警雷达任务规划问题, 提出了基于探测累积发现概率矩阵 2-范数的优化准则, 仿真结果表明, 无论是 E3 还是平衡木机载预警雷达, 当航线达到安全告警线时, 航线倾角为  $90^\circ$  时为最优。针对多机协同探测航线飞行时间间隔优化问题, 提出了相应寻优准则。仿真表明, 如果双机采用并立航线模式, 则空域覆盖和探测性能稳定, 可以得到最优飞行时间间隔; 而采用串接航线模式, 由于空域覆盖不稳定, 难以得到最优飞行时间间隔, 因此要得到稳定的探测性能, 必须增加雷达数目。但是串接航线累积发现概率矩阵的范数比并立航线稍大, 所以串接航线模式适合探测较远的目标区域。最后研究了多机协同探测并立航线距离间隔优化问题。经过仿真分析得知, 可以利用文中提出的优化准则得到最优的航线间距, 充分发挥多机协同探测的优势。多机协同探测技术是当今军事科学发展的一个重要方向, 因此将进一步对各飞机的飞行航线规划深入研究。

### 参考文献:

[1] Wang Guoshi, Li Qiang, Qian Qiongfeng, et al. Deployment and optimization to multi-AWACSs under the active jamming condition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2973-2980. (in Chinese)  
 王国师, 李强, 钱琼芬, 等. 有源干扰条件下多预警机空中部署及优化 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2973-2980.

[2] Agarwal Vishal, Mukherjee Sumant. Range velocity blind zone for airborne mprf radar in look-down search mode[C]//



- Sensing Technology (ICST), 2012 Sixth International Conference, 2012: 63-68.
- [3] Fu Ying, Tang Ziyue, Sun Yongjian, et al. Detection technique of the targets buried in blind Doppler zone based on multi-aew radar data fusion [C]//Radar, 2011 IEEE CIE International Conference, 2011, 2: 1688-1691.
- [4] Han Wei, Tang Ziyue, Zhu Zhenbo. A method of target tracking in doppler blind zone based on multiple-hypothesis motion model [C]//Computer and Information Technology (CIT), 2012 IEEE 12th International Conference, 2012: 464-469.
- [5] Liu Bo, Chen Chunhui, Feng Jun. A study on the relationship between the target characteristics and coverage capability of airborne early warning radar [J]. Zhongguo Dianzi Kexue Yanjiuyuan Xuebao (Journal of China Academy of Electronics and Information Technology), 2012, 7(4): 390-392. (in Chinese)
- [6] Wei Xingxing, Duan Haibin, Wang Yanran. Hybrid Game Theory and ds Evidence Approach to Multiple Ucavs Cooperative air Combat Decision [C]//Advances in Neural Networks-ISBN 2009, 2009, 5553: 236-246.
- [7] Maza Ivan, Kondak Konstantin, Bernard Markus, 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.
- [8] Liu Bo, Chen Chunhui, Shen Qi. A study on flight course for airborne early warning radars coordinated detection [J]. Modern Radar, 2012, 34(6): 1-4. (in Chinese)  
刘波, 陈春晖, 沈齐. 机载预警雷达协同探测航线模式研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(6): 1-4.
- [9] Ma Pengge, Jin Qiuchun, Liu Yi, et al. New airborne multi-pulse LADAR target signal simulator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2068-2072. (in Chinese)  
马鹏阁, 金秋春, 柳毅, 等. 新型机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2068-2072.
- [10] Wang Tianjiao, Sun Jianfeng, Wang Xuefeng, et al. Improvement and simulation of flash focal plane lidar equation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 626-631. (in Chinese)  
王天骄, 孙剑峰, 王雪峰, 等. 闪光式焦平面激光成像雷达方程改进及仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 626-631.
- [11] Alberhseim W J. A closed-form approximation to robertson's detection characteristics [J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(7): 839-839.
- [12] Tufts D W, Cann A J. On albersheim's detection equation [J]. Aerospace and Electronic Systems IEEE Transactions on, 1983, 19(4): 643-646.
- [13] Skolnik Merrill I. Introduction to Radar Systems[M]. 3rd ed. Boston: McGraw Hill, 2001.