

多机载预警雷达协同探测范围三维建模与可视化

付莹^{1,2}, 汤子跃¹, 孙永健^{1,3}

(1. 空军预警学院, 武汉 430019; 2. 中国人民解放军 95333 部队, 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性能会受到空域覆盖盲区和多普勒盲区的限制。在分析空域覆盖盲区和多普勒盲区的基础上, 建立了机载预警雷达探测范围的三维模型。仿真结果表明, 可视化三维模型使机载预警雷达对监视区域内各高度层目标的空域覆盖更加直观, 而且可以给出雷达动态威力范围。多机载预警雷达进行协同探测, 不仅可以改善对监视区域的空域覆盖, 还可以互相弥补多普勒盲区。

关键词: 协同探测; 三维建模; 多机载预警雷达; 空域覆盖盲区; 多普勒盲区

中图分类号: V271.4; TN951 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)02-0022-06

The 3D Modeling and Visualization of Multi-AEW Radar Cooperative Detection Range

FU Ying^{1,2}, TANG Zi-yue¹, SUN Yong-jian^{1,3}

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. No. 95333 Unit of PLA, Changsha 410114, China;

3. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: The detection performance of single airborne early warning (AEW) radar is generally constrained by airspace covering blind area and Doppler blind zone (DBZ). A 3D model of the AEW radar detection range was established based on analysis to the airspace covering blind area and DBZ. Simulation results show that the 3D visualization model makes the airspace coverage of AEW radar for the targets at different heights in surveillance area more intuitive, and can produce the dynamic detection range of AEW radar. The multi-AEW radar cooperative detection can not only improve the airspace coverage of the surveillance area, but also make up the DBZ each other.

Key words: cooperative detection; 3D modeling; multi-AEW radar; airspace covering blind area; Doppler blind zone

0 引言

机载预警雷达具有较强的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, 以防突然受袭; 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, 还可以把各参战部队紧密地连成一个整体, 统一控

制战区內所有的防空武器, 有效地指挥多兵种联合作战。但由于各探测盲区^[1-4]的存在, 加大了单部机载预警雷达对空监视难度, 增大了漏警率。

文献[5-6]对机载预警雷达盲区进行了建模, 但没有给出雷达探测威力图; 文献[7]分析了压制干扰条件下预警雷达探测范围, 给出了雷达探测范围二维图; 文献[8]对有源干扰条件下多机载预警雷达的探测范围进行建模, 给出了多机载预警雷达的二维协同探测范围图, 并将其作为机载预警雷达优化部署依据。

虽然二维图形能够表示不同方位、不同距离时雷达探测威力的变化, 但是不能直观反映雷达对不同高度层目标的探测威力, 不能满足实际作战需求。本文考虑作战使用需求对多机载预警雷达空间联合探测范围进行三维建模, 实现雷达对不同高度层目标探测性

收稿日期: 2013-04-07

修回日期: 2013-04-22

基金项目: 武器装备军内科研项目(2011195)

作者简介: 付莹(1982—), 女, 湖北武汉人, 博士生, 研究方向为雷达信号与数据处理、多传感器数据融合。

能的实时、直观显示。

1 影响机载预警雷达探测范围的因素

机载预警雷达的主要用途是对威胁获得最大的反应时间,因此最大探测距离是机载预警雷达最重要的性能。但由于脉冲多普勒体制下,波束俯仰宽度限制、机体遮挡等原因,机载预警雷达探测范围受多普勒速度盲区 and 空间探测盲区的影响。

1.1 多普勒速度盲区

通常机载预警雷达主要任务是下视探测,地面运动目标大部分可与主瓣杂波和高度杂波一起滤除。但在高速公路和高速铁路密集区,高速公路上的汽车速度可达到 40 m/s,高铁列车的速度可达到 100 m/s,这些目标的雷达散射截面(RCS)较飞机目标足够大,而且中 PRF (Pulse Repetition Frequency)^[9] 存在速度模糊,因此会出现大量假目标,干扰雷达数据处理器对有用目标的航迹起始、关联与跟踪^[4]。为了克服这类目标对雷达性能和情报质量的影响,通常采取设置最小速度检测门限的方法,使落入该门限内的地面运动目标被进一步滤除。

如果目标相对于机载预警雷达的径向速度低于最小速度门限 V_{min} ,将不能被检测。经主杂波对消处理后,最小速度门限 V_{min} 对应的多普勒频率门限为

$$f_r = \frac{2V_{min}}{\lambda} \quad (1)$$

虽然多普勒门限避免了地面目标对雷达数据处理器的干扰,但同时也给目标跟踪带来了新的问题。当有用目标相对于预警机的径向速度小于检测速度门限 V_{min} 时,也不能被检测,称频率范围 $[-f_r, f_r]$ 为多普勒盲区。

1.2 空间探测盲区

机载预警雷达空间覆盖盲区有波束覆盖盲区和机体遮挡盲区两种^[10]。

波束覆盖盲区主要有两种:1) 雷达在水平方位覆盖上的盲区,如 Erieye 机载预警雷达在机头和机尾方向各有 60°的盲区;2) 雷达波束在俯仰方向上的覆盖范围有限而造成的俯仰方向上的盲区,例如机载脉冲多普勒雷达在俯仰上的波束覆盖范围为 $\pm\theta$ 时,所形成的俯仰上的盲区如图 1 所示。高度层 h 的锥区半径为

$$R_h = (H - h)\tan(\theta/2) \quad (2)$$

式中: θ 为低空锥区夹角; H 为载机飞行高度; $h \in [0, H]$ 。

机体遮挡盲区是因为机载雷达通常安装在机身上方、机头等利于探测目标的位置,但在探测低空目标时,仍然会由于受到机体外形遮挡而在机身下方形成

探测盲区。遮挡盲区的形状与载机机体外形及雷达安装位置密切相关,一般情况下在机头、机尾和两翼周围造成的遮挡较大。

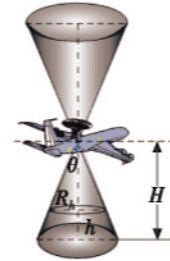


图1 预警机顶空和低空盲区示意图
Fig.1 The head space and low-altitude blind areas of AEW radar

2 机载预警雷达空间探测范围建模

2.1 空间探测范围建模

在机载预警雷达工作过程中,由于载机平台运动特性,其威力覆盖是变化的。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 ∞ 形航线。

如图 2 所示,设载机匀速直线飞行,天线为 $M \times N$ 的矩形侧面阵列,阵元在行列方向间隔均等放置,间距为 d ,并设 $d = \lambda/2$ 。阵面法线垂直于载机飞行方向,各行子阵与飞行方向平行。

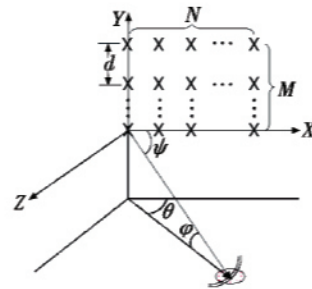


图2 天线阵列几何关系

Fig.2 Geometric relationships of antenna array

若行列子阵均不加权,可由图 2 的几何关系分别得到列子阵的方向图为

$$F(\varphi) = \sum_{m=1}^M \exp\left\{j \frac{2\pi d}{\lambda} (m-1) (\sin \varphi - \sin \varphi_0)\right\} \quad (3)$$

行子阵的方向图为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \exp\left\{j \frac{2\pi d}{\lambda} (n-1) (\cos \theta \cos \varphi - \cos \theta_0 \cos \varphi_0)\right\} \quad (4)$$

所以雷达天线的方向图为

$$F_a(\varphi, \theta) = |F(\varphi)F(\theta, \varphi)| \quad (5)$$

实际仿真当中,很难得到具体的天线方向图函数表

达式,因此采用高斯方向图近似波束主瓣,采用 sinc 方向图近似旁瓣。考虑到波束主瓣随波束指向展宽,则

$$\theta_{3dB} = \frac{\theta_{3dB}}{\cos(\theta_0)} \quad (6)$$

天线水平方向图和垂直方向图表达式分别为

$$F(\theta) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{3dB}}\right)^2\right], & |\theta - \theta_0| \leq 2\theta_{3dB} \\ \frac{\sin\left(\frac{2\pi(\theta - \theta_0)}{\theta_{3dB}}\right)}{\left(\frac{2\pi(\theta - \theta_0)}{\theta_{3dB}}\right)}, & |\theta - \theta_0| > 2\theta_{3dB} \end{cases} \quad (7)$$

$$F(\varphi) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_{3dB}}\right)^2\right], & |\varphi - \varphi_0| \leq 2\varphi_{3dB} \\ \frac{\sin\left(\frac{2\pi(\varphi - \varphi_0)}{\varphi_{3dB}}\right)}{\left(\frac{2\pi(\varphi - \varphi_0)}{\varphi_{3dB}}\right)}, & |\varphi - \varphi_0| > 2\varphi_{3dB} \end{cases} \quad (8)$$

雷达的探测范围实际上就是雷达对目标进行连续观察的空域,它取决于雷达的最大作用距离、最小作用距离、俯仰角 φ 和方位角 θ 的扫描范围。因此,雷达的空间探测范围分别依赖天线的水平方向函数 $F(\theta)$ 和垂直方向函数 $F(\varphi)$,即

$$R_0(\varphi, \theta) = R_{\max} |F(\varphi)F(\theta)| \quad (9)$$

要想得到雷达的水平探测范围图或垂直探测范围图,只须将 φ 或 θ 设置为某一固定值即可。如果雷达天线在水平方位上做旋转扫描,其波束覆盖的区域就是雷达的整个空间探测范围,对应公式为

$$R_0(\varphi, \theta - \theta_0) = R_{\max} |F(\varphi)F(\theta - \theta_0)| \quad (10)$$

式中, $\theta_0 (0 \leq \theta_0 \leq 2\pi)$ 为波束轴对应的中心角。

2.2 空间探测范围绘制步骤

根据式(10)可绘制机载预警雷达在三维空间的探测范围图形。具体步骤如下所述。

Step 1 模型参数初始化。主要包括天线波束方位 3 dB 宽度 θ_{3dB} ; 天线波束俯仰 3 dB 宽度 φ_{3dB} ; 天线波束指向 θ_0 ; 天线第一旁瓣电平 F_{dB} ; 雷达最大作用距离 R_{\max} , 载机飞行高度 H 。

Step 2 根据式(7)与式(8)计算天线方向图。

Step 3 根据式(10)计算球坐标系下的空间覆盖范围。

Step 4 将空间覆盖范围数据由球坐标系变换到三维直角坐标系下并绘制出 t 时刻机载预警雷达在航线上某一位置的空间覆盖威力范围。

Step 5 绘出机载预警雷达在航线上每一个位置的三维威力范围,就得到了其在全航线上的空间覆盖范围图。

通常,机头、机尾、机翼和机身遮挡盲区为机身周

边半径约几十公里的范围,在载机巡航高度为 9 km、雷达俯仰覆盖范围为 $\pm 30^\circ$ 时,由于俯仰覆盖范围有限造成的盲区的最大半径约 16 km; 对飞行高度为 27 km 的目标的高空盲区最大半径约 32 km。根据这一分析,在不考虑方位覆盖盲区的条件下,可以得出雷达的近盲区一般在机身周边 40 km 以内。因此可以将雷达的近盲区和探测距离统一考虑,认为雷达的威力覆盖范围在水平面上是雷达最小探测距离至雷达最大探测距离之间,雷达的最小探测距离和最大探测距离可以根据经验值来设定。

单架机载预警雷达本身所固有的探测盲区、目标特性、作战环境和监视区域的不同,使其很难实现对“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,使系统获得比其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。

文献[11]提出了基于多架预警机的两种组合航线模式概念(并立和串接),这两种组合航线模式的优缺点如表 1 所示。

表 1 并立航线与串接航线

Table 1 Parallel connection and series connection

	并立航线	串接航线
优点	部署灵活,使用方便,协同容易	减少载机转弯影响;具有更长的探测基线;探测距离较远
缺点	受载机转弯次数影响	覆盖空域不稳定;对载机飞行间隔有限制,部署灵活性差;要求预警机数量充足

由表 1 可知,串接航线要求各架机载预警雷达的飞行方向一致,且对彼此之间的飞行间隔有严格限制。否则,各架机载预警雷达互相补盲区域会产生起伏,甚至使得盲区面积增大,持续时间较长。因此,多机协同探测一般选择并立航线。

3 仿真分析

假设 E-3 机载预警雷达的最大探测距离 R_{\max} 为 300 km,最小探测距离 R_{\min} 为 40 km,水平波束宽度 θ_{3dB} 为 5° ,俯仰波束宽度 φ_{3dB} 为 10° ,飞行高度 H_a 为 8 km; Erieye 机载预警雷达的最大探测距离 R_{\max} 为 200 km,最小探测距离 R_{\min} 为 30 km,水平波束宽度 θ_{3dB} 为 6° ,俯仰波束宽度 φ_{3dB} 为 11° ,飞行高度 H_b 为 8 km。

图 3 和图 4 所示分别为 E-3 机载预警雷达在航线上某一点时的三维威力覆盖范围和其在整条航线上的

威力覆盖范围,图中直观地给出了雷达空间盲区以及处在不同高度层目标的探测覆盖能力。图5和图6所示分别为 Erieye 机载预警雷达在航线上某一点时的三维威力覆盖范围和其在整条航线上的威力覆盖范围,由图5可以看出,Erieye 机载预警雷达在机头和机尾方向各有60°的方位盲区。

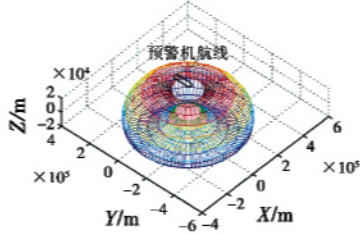


图3 E-3 机载预警雷达某时刻的空域覆盖

Fig.3 Airspace coverage of E-3 AEW radar at a certain time

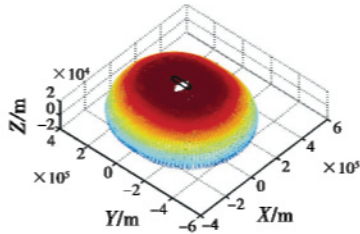


图4 E-3 机载预警雷达全航线的空域覆盖

Fig.4 Airspace coverage of E-3 AEW radar to entire route

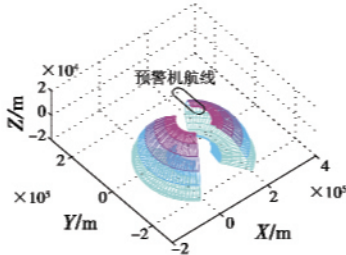


图5 Erieye 机载预警雷达某时刻的空域覆盖

Fig.5 Airspace coverage of Erieye AEW radar at a certain time

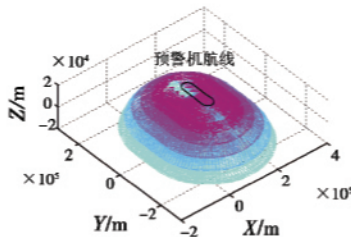


图6 Erieye 机载预警雷达全航线的空域覆盖

Fig.6 Airspace coverage of Erieye AEW radar to entire route

若重点监视区域为圆形,半径 R_T 为 150 km,圆心坐标为(270,0) km,目标雷达散射截面 RCS 为 5 m^2 ,飞行高度 h 为 200 m,飞行速度 V_T 为 300 m/s,虚警概率 P_f 为 10^{-6} ,多普勒门限 f_T 为 300 Hz,积累脉冲数 m 为 16。假设敌方向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 ΔR ,角度间隔为 $\Delta\alpha$ 进行离散得到目标坐标

$$\begin{cases} x_T(k,n) = x_0 + k\Delta R\cos((n-1)\Delta\alpha) \\ y_T(k,n) = y_0 + k\Delta R\sin((n-1)\Delta\alpha) \end{cases} \quad (11)$$

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。机载预警雷达对每一个目标采样点的发现概率可用概率矩阵表示为

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

多机协同探测情况下,应该把各架多目标区域的发现概率都统计在内,得出最终的发现概率,这就意味着,采用累计概率更为合理。令

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{K \times N} \quad (13)$$

监视区域的协同发现概率矩阵定义为

$$P_{dc} = A - \prod_{m=1}^M (A - P_{dm}) \quad (14)$$

式中: M 为机载预警雷达数目; $\prod(\cdot)$ 表示矩阵的连续 Hardmard 积。

图7所示为两架 Erieye 和一架 E-3 机载预警雷达采用并立航线模式,其航线长度 $L = 50 \text{ km}$,转弯半径 $r = 20 \text{ km}$,航线间距 $d = 100 \text{ km}$,在 $t = 450 \text{ s}$ 时对圆形重点监视区域的空域覆盖三维图。

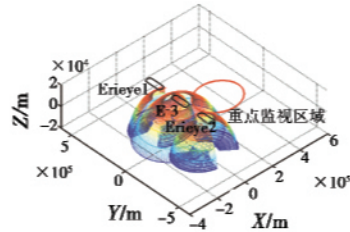


图7 两架 Erieye 和一架 E-3 机载预警雷达协同空域覆盖

Fig.7 Cooperated coverage of two Erieye and one E-3 AEW radar

由图7可以看出,当 Erieye 处在转弯阶段时,由于机头和机尾的盲区,不能对目标区域进行有效监视,而 E-3 机载预警雷达此时弥补了 Erieye 探测盲区。图8~图10分别给出了 $t = 450 \text{ s}$ 时 Erieye1、E-3 和 Erieye2 机载预警雷达对目标区域的发现概率。图11给出的是在如图7所示的空域覆盖条件下,两架 Erieye 和一架 E-3 机载预警雷达对重点监视区域目标的协同发现概率。由图中箭头所指可知,Erieye 机载预警雷达弥补了 E-3 雷达的一部分多普勒盲区。

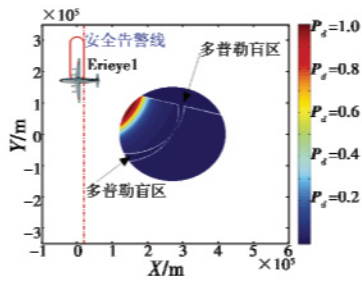


图8 Erieye1 对目标区域的发现概率

Fig. 8 Detection probability of Erieye1 for target area

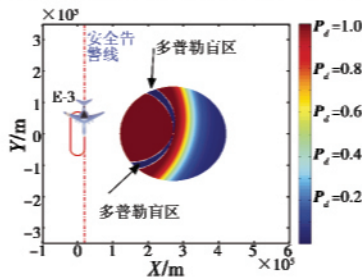


图9 E-3 对目标区域的发现概率

Fig. 9 Detection probability of E-3 for target area

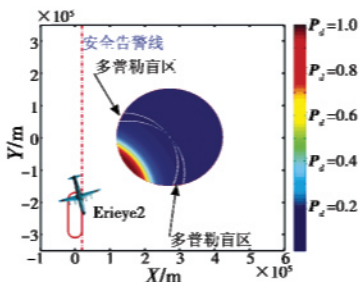


图10 Erieye2 对目标区域的发现概率

Fig. 10 Detection probability of Erieye2 for target area

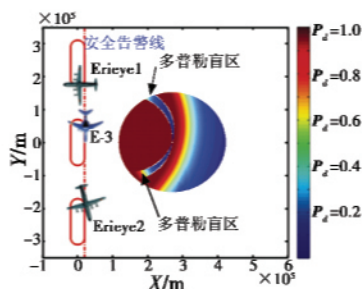


图11 两架 Erieye 和一架 E-3 机载预警雷达协同发现概率

Fig. 11 Cooperated detection probability of two Erieye and one E-3 AEW radar

图12所示为一架 Erieye 和两架 E-3 机载预警雷达采用并立航线模式探测在 $t = 450$ s 时对圆形重点监视区域的空域覆盖三维图。图13~图15所示分别为 $t = 450$ s 时 E-3A、Erieye 和 E-3B 机载预警雷达对目标区域的发现概率。图16给出了在如图12所示的空域覆

盖条件下,一架 Erieye 和两架 E-3 机载预警雷达对重点监视区域目标的协同发现概率。可以看出,协同探测增大了空域覆盖范围,缩小了多普勒盲区范围,提高了监视区域的目标发现概率。

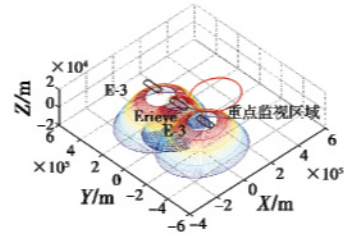


图12 一架 Erieye 和两架 E-3 机载预警雷达协同空域覆盖

Fig. 12 Cooperated coverage of one Erieye and two E-3 AEW radars

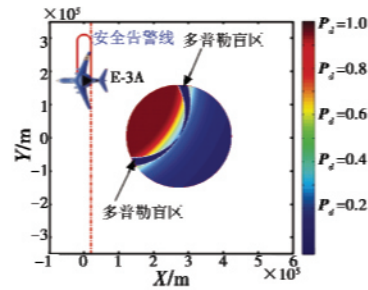


图13 E-3A 对目标区域的发现概率

Fig. 13 Detection probability of E-3A for target area

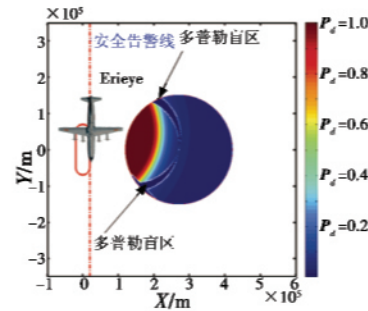


图14 Erieye 对目标区域的发现概率

Fig. 14 Detection probability of Erieye for target area

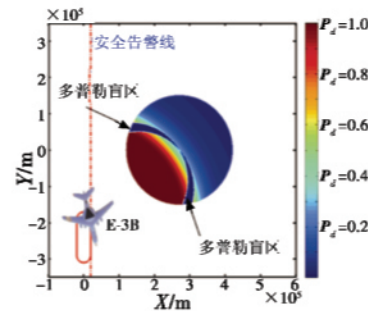


图15 E-3B 对目标区域的发现概率

Fig. 15 Detection probability of E-3B for target area

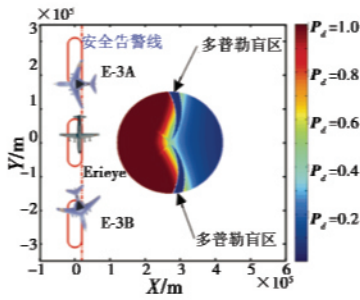


图 16 一架 Erieye 和两架 E-3 机载预警雷达协同发现概率

Fig. 16 Cooperated detection probability of one Erieye and two E-3 AEW radars

4 结束语

机载预警雷达的空间探测范围受到多普勒速度盲区和空间探测盲区的限制,容易造成目标丢失、航迹不连续和航迹频繁起始。多机载预警雷达协同探测,可以发挥每部雷达的优势,实现优势互补。结合实际作战使用需求,对多机载预警雷达协同探测范围进行三维建模,使雷达对目标区域的空间覆盖和不同高度层目标的威力覆盖更加直观。不仅可给出机载预警雷达的动态威力覆盖图,还可计算监视区域上空各高度层目标的发现概率。仿真结果说明,多机载预警雷达协同探测可以改善对重点监视区域的空域覆盖,弥补单架机固有盲区,提高目标区域的发现概率。下一步研究重点是对于干扰条件下的多机协同探测范围进行建模。

参考文献

[1] FU Y, TANG Z Y, SUN Y J, et al. Detection technique of the targets buried in blind Doppler zone based on multi-AEW radar data fusion [C]//IEEE CIE International Conference on Radar (Radar), IEEE, 2011, 1688-1691.

[2] AGARWAL V, MUKHERJEE S. Range velocity blind zone for airborne MPRF radar in look-down search mode[C]//Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST), 2012 :63-68.

[3] HAN W, TANG Z Y, ZHU Z B. A method of target tracking in Doppler blind zone based on multiple-hypothesis motion model[C]//IEEE 12th International Conference on Computer and Information Technology (CIT), IEEE, 2012 :464-469.

[4] 韩伟, 汤子跃, 朱振波. 多普勒盲区条件下的改进粒子滤波跟踪算法[J]. 宇航学报, 2013, 34(3) :417-425.

HAN W, TANG Z Y, ZHU Z B. An improved method for tracking targets in Doppler blind zone based on particle filter[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(3) :417-425.

[5] 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.

[6] 崔晓宝, 李楠. 机载 PD 雷达对机动目标探测盲区计算模型研究[J]. 火控雷达技术, 2008, 37(3) :36-40, 48.

CUI X B, LI N. Research on calculation models for detection blind zone of airborne PD radar against maneuvering targets [J]. Fire Control Radar Technology, 2008, 37(3) :36-48.

[7] 陈浩, 刘姜玲. 压制干扰条件下预警雷达探测范围研究[J]. 信息技术, 2012(7) :85-87.

CHEN H, LIU J L. Research on the performance range of AEW radar in noise jamming condition [J]. Information Technology, 2012(7) :85-87.

[8] 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.

WANG G S, LI Q, QIAN Q F, et al. Deployment and optimization to multi-AWACSs under the active jamming condition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11) :2973-2980.

[9] 毛士艺. 脉冲多普勒雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.

MAO S Y. Pulse Doppler radar[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990.

[10] 焦广伦, 陆军. 机载脉冲多普勒雷达探测性能的评估[J]. 电讯技术, 2009, 49(11) :80-84.

JIAO G L, LU J. Detection performance evaluation of airborne pulse Doppler radars[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(11) :80-84.

[11] 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.

LIU B, CHEN C H, SHEN Q. A study on flight course for airborne early warning radars coordinated detection[J]. Modern Radar, 2012, 34(6) :1-4.

欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>