

文章编号: 2095-4980(2020)02-0215-07

机载预警雷达网络化协同探测模式及性能分析

陈小龙, 张 海, 孙嘉辰, 黄 勇

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘 要: 为了进一步提高机载预警雷达的目标探测和监视能力, 首先对影响单平台机载预警雷达探测范围的因素进行了分析, 引出网络化协同探测的特点和必要性, 给出了稳定探测覆盖范围和多普勒盲区的定义; 其次重点分析了机载预警雷达与其他机载预警雷达、舰载雷达、无人机(UAV)雷达等不同平台雷达间的协同探测工作方式, 并进行了仿真分析, 通过评估指标参数对各种协同探测模式进行了比较; 最后对机载预警雷达网络化协同探测发展趋势进行展望。

关键词: 机载预警雷达; 舰载雷达; 无人机雷达; 网络化协同; 多普勒盲区; 探测范围

中图分类号: TN959.73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019285

Networked collaborative detection mode and performance analysis of airborne early warning radar

CHEN Xiaolong, ZHANG Hai, SUN Jiachen, HUANG Yong

(Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: In order to further improve the target detection and monitoring capability of airborne early warning radar, this paper first analyzes the factors affecting the detection range of single platform airborne early warning radar, introduces the characteristics and necessity of networked collaborative detection mode, and gives the definition of stable detection coverage and Doppler blind zone. Secondly, the cooperative detection modes among airborne early warning radar and other airborne early warning radar, shipborne radar, Unmanned Aerial Vehicle(UAV) radar and other different platform radars are analyzed and the simulations and evaluations are carried out. The performance parameters are compared with that of various cooperative detection modes. Finally, the development trend of networked cooperative detection of airborne early warning radar is prospected.

Keywords: airborne early warning radar; shipborne radar; UAV radar; networked coordination; Doppler blind zone; detection range

在现代战争中, 作战态势和环境复杂多变, 获得准确的情报和清晰的战场态势已成为赢得信息化战争的关键^[1-2]。机载预警雷达作为预警探测的重要手段, 可实现目标探测、空中警戒、目标识别和指挥引导等诸多功能, 已成为各国发展的重点^[3-4]。然而, 由于单一机载预警雷达在执行任务时受载机自身限制, 飞行航线往往无法过长, 而且预警雷达的探测范围有限, 导致单架机载预警雷达在执行任务时对关心区域无法做到良好稳定的覆盖探测, 很难满足实际需求。机载预警雷达面临多样任务和复杂探测环境, 要求单一的机载预警雷达必须配合其他机载预警雷达或预警探测设备进行情报协同^[5]。机载预警雷达网络化协同探测, 组成较为严密的空中雷达警戒网, 有利于各预警平台之间的相互补盲, 形成一定范围的稳定覆盖探测区域, 对于空中警戒、指挥引导能力的提升有重要意义^[6-8]。

收稿日期: 2019-08-12; 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1933135); 山东省重点研发计划资助项目(2019GSF1111004)

作者简介: 陈小龙(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达动目标检测、海杂波抑制、雷达信号精细化处理等。email:cxlcx11209@163.com

1 机载预警雷达探测范围及协同探测航线模式

1.1 单平台机载预警雷达探测范围

雷达探测范围的理论依据主要有^[9]:

1) 基本雷达方程

基本雷达方程将雷达的作用距离与雷达发射、接收、天线和环境等因素联系起来。其公式为:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中: P_t 为雷达发射功率; σ 为雷达截面积; A_e 为天线有效接收面积; G 为天线增益; S_{\min} 为最小可检测信号。由式(1)可知, 雷达探测距离与雷达发射功率、雷达截面积、天线有效接收面积、天线增益的四次方成正比, 与最小可检测信号的四次方成反比。

2) 搜索雷达方程

机载雷达在搜索目标的时候需要通过天线在一定的立体角范围内逐帧扫描来发现目标, 因此可以通过搜索雷达方程来提升探测距离。其公式为:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_{av} t_s A_r \sigma}{4\pi \psi_s k T_0 D_0 L_s} \right] \quad (2)$$

式中: P_{av} 为平均发射功率; t_s 为搜索扫描时间(帧时); A_r 为天线有效接收面积; σ 为目标雷达散射截面; ψ_s 为搜索扇区立体角(弧度); k 为玻兹曼常数; T_0 为标准室温; D_0 为检测因子; L_s 为各种因素引起的搜索损耗因子。由式(2)可知, 增加雷达探测距离还可采取增加搜索扫描时间以及减小搜索扇区的方式。

3) 雷达视距公式

受地球表面曲率的影响, 雷达所能发现目标的最大直视距离, 取决于雷达天线架设高度和目标高度。雷达视距公式为:

$$D = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3)$$

式中: h_1 是雷达架设高度; h_2 是目标高度。

机载预警雷达通常工作在约 10 km 的高度。由式(3)可以计算出, 在该高度, 限制机载预警雷达下视的最大距离是雷达视距, 约为 400 km。机载预警雷达的最大探测距离不仅与雷达自身的各项参数有关, 也受限于目标的雷达反射截面积(RCS)与探测时所处的环境。因此, 机载预警雷达的实际探测距离存在一定的浮动范围, 是雷达参数、目标特性、环境等多方因素共同影响的结果。尽管通过雷达方程可以给出提高雷达探测距离的理论途径, 但受载机自身条件和器件的限制, 雷达天线尺寸、发射功率与天线增益受到限制, 雷达探测距离也受限。所以为了增加雷达探测距离, 一种有效的方式是网络化协同探测。

机载预警雷达为了解决下视时强地/海杂波的问题, 采用脉冲多普勒体制, 利用运动目标产生的多普勒效应来实现目标探测。然而, 由于载机是运动的, 导致雷达中主杂波的多普勒谱扩展, 主瓣杂波的遮挡效应较为严重。此外, 机载预警雷达通常使用设置最小多普勒速度门限来过滤除杂波, 也称速度盲区, 计算模型如下:

$$|v_T \cos \varphi| < v_{MD} \text{ 或 } |f_T \cos \varphi| < f_{MD} \quad (4)$$

式中: v_T 和 f_T 为目标速度和多普勒; φ 为目标的运动方向与视距夹角; v_{MD} 和 f_{MD} 为最小速度和多普勒门限。如图 1 所示, 若

目标在机载预警雷达探测范围内, 且根据式(4)计算得出多普勒速度大于门限值, 则认为目标可以被探测到。

机载预警雷达的探测能力由稳定覆盖区域的长度和宽度来表示, 设 N 为可以被探测到的次数, R_x 表示 x 轴上能被全部探测到(N_{\max})的距离, R_y 表示 y 轴上能被全部探测到(N_{\max})的距离。

1.2 协同探测的航线模式

机载预警雷达在实际工作时, 巡逻航线往往比较简单, 通常选取空域内做双 180°转弯航线飞行。机载预警雷达在协同探测时一般有两种较为基础的组合航线模式^[10-11], 一种是并立航线模式, 另一种是串接航线模式。

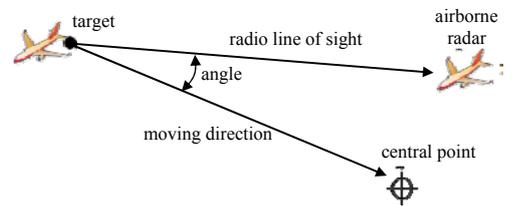


Fig.1 Schematic diagram of the relative position of airborne early warning radar and target

图 1 机载预警雷达与目标相对位置关系示意图

如图 2 所示, 并立航线模式是指各机载预警雷达分别有各自的巡逻航线, 分别沿各自的巡逻航线飞行, 以达到增大探测范围的目的。由于各预警平台间相互独立, 在实际中比较容易实现, 同时在机载预警雷达与无人机网络化协同探测时, 由于无人机雷达探测距离较近, 且一般采用相对于机载雷达提前出发(前出)的集群作战, 可优先考虑并立航线模式。但是由于各载机平台之间独自运动, 并且各预警平台的航线长度有限, 不利于形成稳定覆盖探测区域, 且各自的多普勒速度盲区无法做到相互之间的高效补充。在串接航线模式中, 各机载预警雷达通过等速同向飞行协同探测, 可以实现在较长的航线上实施预警探测, 有利于形成稳定覆盖探测区域和多机载预警雷达之间的相互补盲。但串接航线在实际中实施比较困难, 要求各机载预警雷达之间的航向、速度相对统一, 且当机载预警雷达探测能力不同时, 探测效果不如并立航线模式。

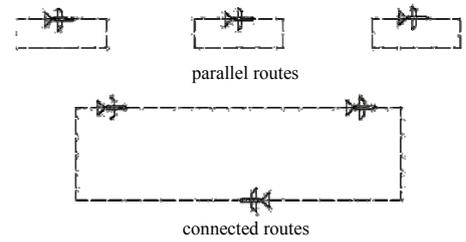


Fig.2 Networked collaborative detection route mode
图 2 网络化协同探测航线模式

2 机载预警雷达与不同平台雷达间的网络化协同探测

2.1 多机载预警雷达网络化协同探测及能力评估

通常, 机载预警雷达在空域内进行双 180° 转弯或“8”字形飞行。然而, 单架机载预警雷达空域巡逻采用双 180° 转弯或“8”字形航线飞行时, 受到雷达探测距离的影响, 无法对巡逻区域的边缘实现不间断探测, 且在巡逻区域内存在大量的多普勒盲区。因此, 有必要对机载预警雷达进行网络化协同探测。对于多机载预警雷达网络化协同探测, 忽略机载预警雷达转弯时自身运动对目标探测的影响, 做双 180° 转弯航线飞行, 并采用串接航线, 来获得较大的稳定探测覆盖区域以及达到良好的多普勒速度盲区互补效果。

单架机载预警雷达的巡逻航线一般在 100 km 至 200 km 之间, 采用串接航线进行网络化协同探测, 选择近似为 $400\text{ km} \times 80\text{ km}$ 的矩形巡逻航线, 设置 20 个航迹点。具体模式为:

1) 两架机载预警雷达协同探测时, 将两架机载雷达均匀分布在巡逻航线上, 以相同速度同向飞行巡逻。其航迹点如图 3 所示。

2) 三架机载预警雷达协同探测时, 将三架机载雷达等间隔分布在巡逻航线上, 以相同速度同向飞行巡逻。其航迹点如图 4。

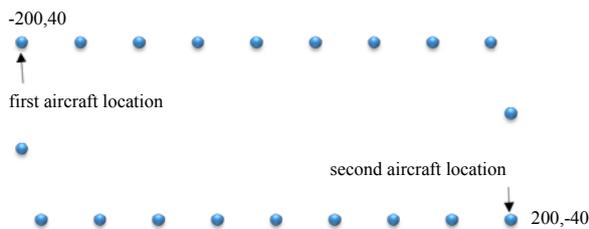


Fig.3 Starting position of the route when two airborne early warning radars cooperate
图 3 两架机载预警雷达协同探测时航线起始位置

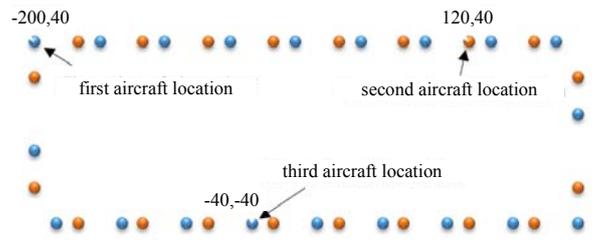


Fig.4 Starting position of the route during the coordinated detection of three airborne early warning radars
图 4 三架机载预警雷达协同探测时航线起始位置

仿真的参数设置如下: 机载预警雷达最大探测距离为 $R=400\text{ km}$, 在每个航迹点进行一次探测。假设目标以 150 m/s 的速度朝巡逻中心点飞行, 多普勒速度门限为 30 m/s 。建立一个 2401×2401 的坐标系网格, 用每个坐标交点被探测到的次数来表示机载预警雷达的探测能力。当坐标交点在机载雷达的探测范围内并且不在其多普勒速度盲区中的时候, 则视为可以探测到, 其探测次数加 1, 反之为 0。在仿真结果中用颜色的不同来表示探测的结果, 探测到一次显示红色, 未被探测到显示蓝色, 最后的结果进行一个累加。

如图 5 所示, 由单架机载预警雷达独立探测的仿真结果可以看出, 探测区域近似为一个长轴为 600 km , 短轴为 400 km 的椭圆形。单架机载预警雷达巡逻飞行时, 其可稳定覆盖探测的区域极小, $R_x=200\text{ km}, R_y=300\text{ km}$, 不能实现探测区域的稳定覆盖, 且存在大量的多普勒速度盲区。

如图 6 所示, 由 3 架机载预警雷达协同探测的仿真结果可以看出, 稳定探测范围扩大, 可稳定覆盖探测区域 $R_x=484\text{ km}, R_y=422\text{ km}$, 且不存在多普勒速度盲区。

根据仿真结果可知, 多机载预警雷达间网络化协同探测对探测性能有极大的提升, 对多普勒速度盲区有明显的改善。在 $400\text{ km} \times 80\text{ km}$ 的矩形巡逻航线上, 单架机载预警雷达可稳定覆盖探测区域 $R_x=200\text{ km}, R_y=300\text{ km}$

且存在大量多普勒盲区；2 架机载预警雷达网络化协同探测时可稳定覆盖区域 $R_x=408 \text{ km}, R_y=376 \text{ km}$ 并且仍然存在一定的多普勒盲区；3 架机载预警雷达网络化协同探测时 $R_x=484 \text{ km}, R_y=422 \text{ km}$ 并且不存在多普勒盲区，已经可以对探测区域实现稳定覆盖探测，满足空中监视的需求。

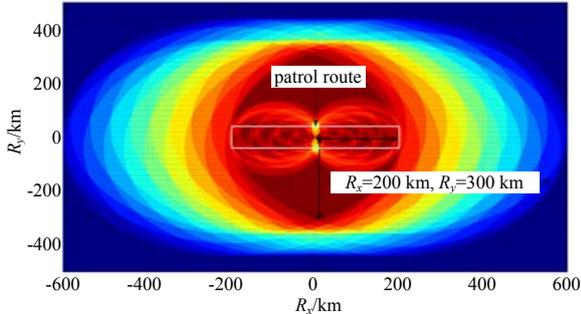


Fig.5 Detection range of single airborne early warning radar
图 5 单架机载预警雷达探测范围

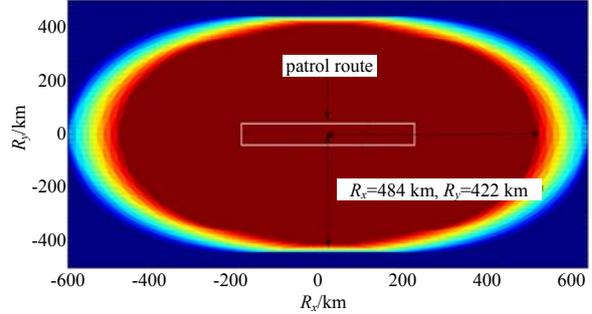


Fig.6 Collaborative detection range of 3 airborne early warning radars
图 6 三架机载预警雷达协同探测范围

2.2 机载预警雷达与舰载雷达网络化协同探测及能力评估

机载预警雷达可采取以海上舰艇编队为中心，以一定的巡逻边长围绕舰艇编队环状飞行。机载预警雷达在作环状飞行时，如果航线半径 r 过大，则无法对舰艇编队实行稳定探测覆盖，如果 r 太小，机载预警雷达探测范围将过小。设机载预警雷达探测距离 $R=400 \text{ km}$ ，选择环状飞行航线半径 $r=250 \text{ km}$ ，对舰艇编队实施警戒的圆形区域也为 250 km 。设置 20 个航迹点。具体模式为：1) 两架机载预警雷达协同探测时，将两架机载雷达分布在任务区域圆心对称的位置，以相同速度同向飞行巡逻。其航迹点如图 7。2) 三架机载预警雷达协同探测时，将三架机载雷达等间隔分布在巡逻航线上，以相同速度同向飞行巡逻。其航迹点如图 8。

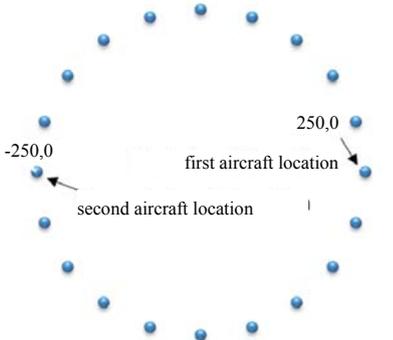


Fig.7 Track of two airborne early warning radars in coordinated detection
图 7 两架机载预警雷达协同探测时航迹

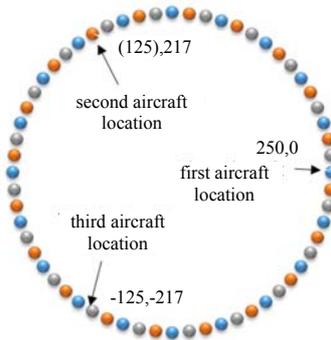


Fig.8 Track of three airborne early warning radars in coordinated detection
图 8 三架机载预警雷达协同探测时航迹

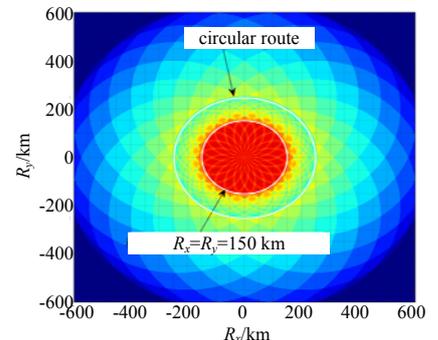


Fig.9 Detection range of single airborne early warning radar
图 9 单架机载预警雷达探测范围

仿真的参数设置如下：机载预警雷达最大探测距离为 $R=400 \text{ km}$ ，在每个航迹点进行一次探测。假设目标以 150 m/s 的速度朝巡逻中心点飞行，设机载预警雷达的多普勒速度门限为 30 m/s 。如图 9 所示，由单架机载预警雷达独立探测的仿真结果可以看出，可稳定覆盖探测的区域 $R_x=R_y=R-r=150 \text{ km}$ ，无法做到对舰艇编队所在区域进行稳定覆盖。且其中存在大量的多普勒速度盲区。

如图 10 所示，由 3 架机载预警雷达协同探测的仿真结果可以看出： $R_x=R_y=\frac{1}{2}r + \sqrt{R^2 - (\sqrt{3}/2r)^2} = 461 \text{ km}$ ，且多普勒速度盲区很小，可优先配置 3 架机载预警雷达执行任务，实现与舰载雷达协同探测的稳定覆盖探测。

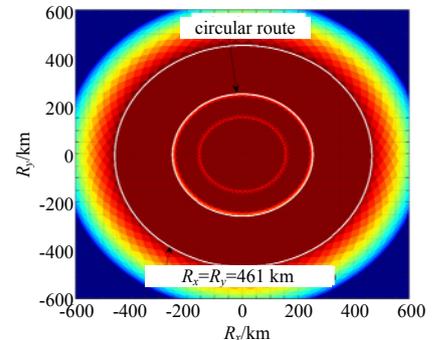


Fig.10 Collaborative detection range of three airborne early warning radars
图 10 三架机载预警雷达协同探测范围

2.3 机载预警雷达与无人机雷达网络化协同探测及能力评估

单架机载预警雷达在执行任务时，航线无法做到过长，探测区域极其有限，并且对于边缘区域的探测效果不够理想。可采用机载预警雷达与无人机网络化协同探测的方式来增加机载预警雷达的探测范围以及增强边缘

区域的探测效果。无人机一般部署在敌机可能来袭方向相对于机载预警雷达前出的位置，以此来保障载机的自身安全。由于机载预警雷达与无人机的飞行速度、探测范围等均不相同，本节将机载预警雷达与 3 架无人机采用并立航线模式的飞行模式，给出了 3 架无人机之间采用并立航线模式与串接航线模式两种模式，实现机载预警雷达与无人机之间的网络化协同探测。将 3 架无人机部署在机载预警雷达探测区域边缘位置，与机载预警雷达起始位置横向相距 450 km。单架机载预警雷达沿双 180°转弯航线飞行，本文选择近似为 200 km×40 km 的矩形巡逻航线，设置 20 个航迹点。

当 3 架无人机采用并立航线模式时，考虑到无人机探测距离较近，又要对机载预警雷达探测边缘区域进行补充，3 架无人机相互之间相隔 200 km，本文对 3 架无人机均选择近似为 100 km×20 km 的矩形巡逻航线，各设置 20 个航迹点。其航迹点如图 11。

当 3 架无人机采用串接航线模式时，考虑到无人机飞行速度较慢，本文使 3 架无人机共同组成一个较大的航线，选择近似为 300 km×60 km 的矩形巡逻航线，各设置 20 个航迹点。其航迹点如图 12。

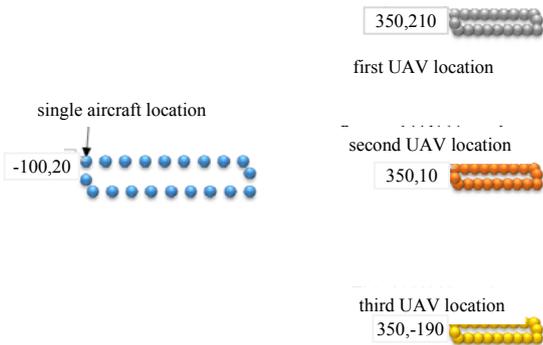


Fig.11 Track of airborne early warning radar and 3 parallel drones
图 11 机载预警雷达与 3 架并立无人机协同探测时航迹

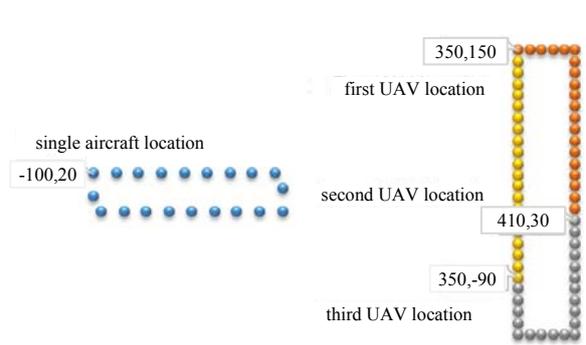


Fig.12 Track of airborne early warning radar and 3 serially connected drones
图 12 机载预警雷达与 3 架串接无人机协同探测时航迹

仿真的参数设置如下：机载预警雷达最大探测距离为 $R=400$ km，无人机最大探测距离为 $r=100$ km，在每个航迹点进行探测。假设目标以 150 m/s 的速度朝巡逻中心点飞行，设机载预警雷达与无人机的多普勒速度门限均为 30 m/s。如图 13 所示，可以看出，对于探测边缘区域的探测效果有了很大的补充，且将稳定探测覆盖范围扩展了大约 150 km， $R_x=450$ km。但是在 3 架无人机各自探测范围的边缘，探测效果有所下降。

如图 14 所示，由单架机载预警雷达与 3 架采用串接航线模式的无人机协同探测的仿真结果可以看出，与采用并立航线模式时比较，稳定探测覆盖区域少扩展 40 km， $R_x=410$ km，且在纵向上对于探测边缘区域补充范围较小。但在无人机形成的探测区域中，形成较为明显的稳定覆盖探测区域，探测效果较采用并立航线时要好很多，且没有明显的探测效果较差的区域。

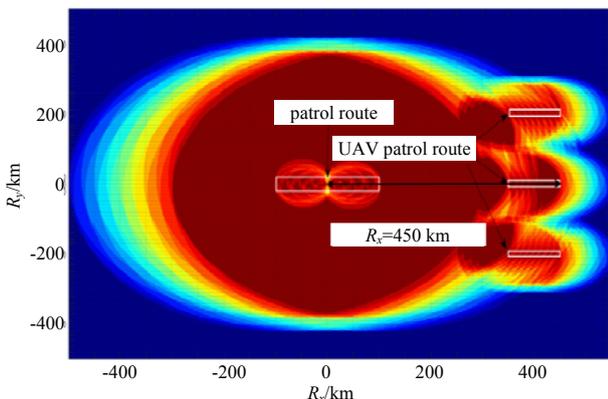


Fig.13 Detection range when airborne early warning radar cooperates with 3 parallel drones
图 13 机载预警雷达与 3 架并立无人机协同时探测范围

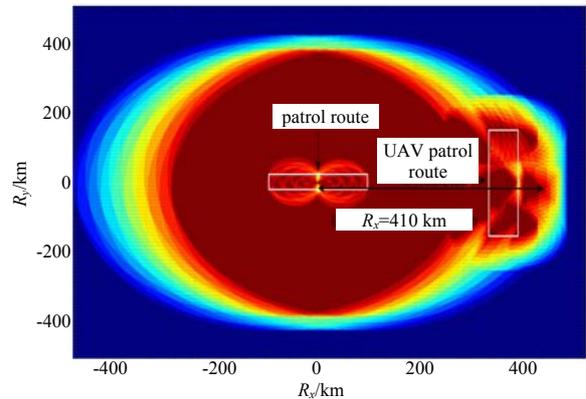


Fig.14 Detection range when airborne early warning radar cooperates with 3 serially connected drones
图 14 机载预警雷达与 3 架串接无人机协同时探测范围

在 200 km×40 km 的矩形巡逻航线上，单架机载预警雷达独立探测时可稳定探测覆盖区域 $R_x=300$ km，与无人机网络化协同后探测能力明显提升。且当不确定敌方兵力大致方位的时候，无人机采用并立航线模式飞行，可以尽可能地扩大探测范围，可稳定探测覆盖区域 $R_x=450$ km；当可以确定敌方兵力大致方位的时候，无人机采用串接航线模式飞行，虽然可稳定探测覆盖区域减少， $R_x=410$ km，但对特定方向的能量较为集中。

3 机载预警雷达网络化协同探测模式发展与展望

3.1 未来机载预警雷达网络化协同探测特征

在信息化战争中,机载预警雷达将要承担越来越重要的战场监控、指挥任务,要求其能够与各作战平台相互协同并实现网络化。面对网络化协同探测的作战模式,将有以下几方面的特征:

1) 任务多元化。机载预警雷达不仅需要在战时进行网络化协同探测,完成战时的预警探测、指挥引导等任务,也要在非战时和其他力量形成满足反恐、护航以及救援等多元化任务需求的网络化协同探测。

2) 作战对抗化。机载预警雷达在实际工作时不仅存在着大量的自然信号以及民用信号的干扰,还受到主动电子干扰。机载预警雷达网络化协同探测时,需要在各预警平台之间进行数据融合和各作战平台之间进行数据分配,要求机载预警雷达具有极强的抗干扰能力和数据处理能力。

3) 环境复杂化。随着电子技术的发展,未来机载预警雷达的作战环境必然有复杂的电磁干扰,未来机载预警雷达也需要在复杂地理、气象环境中进行作战。因此需要提高机载预警雷达网络化协同探测时在复杂环境下的可靠性^[12]。

4) 体系协同化。未来的网络战,将会是以机载预警雷达为主体,协同有人机载雷达、无人机载雷达、岸基雷达、预警卫星以及各战斗机、舰艇等构建成的完整预警探测体系^[13]。机载预警雷达在网络化协同探测时,需要与各作战平台无缝衔接成一个有机、高效的整体,从而提高整个预警体系的作战能力。

5) 协同智能化。随着人工智能理论和应用的发展,各传感器之间具有智能处理的潜力,其已在雷达目标识别和检测中有所应用^[14-16],由于网络化协同涉及平台、传感器、信号和数据处理、信息融合等复杂处理,智能化是未来发展的必然手段。

3.2 网络化协同探测的主要发展趋势

目前,新一代机载预警雷达,普遍具有多传感器融合、网络和战场管理、综合指挥等多种功能。以机载预警雷达为主体的协同探测样式,已经成为未来战争的发展趋势。具体可总结为以下几个方面:

1) 网络化协同作战时任务分配更加高效。

在未来战争中,通常会面临多机多任务的作战样式。因此,在实际作战中需要对预警探测任务进行动态分配,并确保在任务动态分配时,整个预警探测体系可以发挥出最大效能,提高在实际战争中对于可能出现的新任务的预警探测能力。

2) 网络化协同探测时数据融合能力更加完善。

由于网络化协同探测对于数据融合能力要求很高,需要对各预警平台上的预警信息进行高效融合,以提高预警探测的精确度,过滤掉杂波等虚假目标。并且可以实现各预警平台之间的战场数据实时共享,最大程度地发挥出预警平台的作战效能。

3) 多机载雷达之间网络化协同探测时的航线选择更加优化。

在实际战争中,不仅要考虑机载雷达的预警探测能力,还要根据战场中对机载雷达可能产生威胁的目标进行航线优化选择。这就不仅限于并立航线和串接航线,需要在确保自身安全的情况下,最大程度发挥出机载雷达预警探测能力。

4 结论

本文从单平台机载预警雷达探测的局限性入手,以机载预警雷达网络化协同探测为核心,分别讨论了机载预警雷达在空域巡逻、为舰艇编队警戒、与无人机协同 3 种不同情况下的网络化协同探测及作战模式。结果表明,采取网络化协同探测可有效提高雷达稳定覆盖范围,减少多普勒探测盲区。随着无人机技术的发展和广泛应用,多平台雷达间的协同探测必将成为未来雷达探测的重要发展方向。本文仅分析了网络化协同探测的特例,且配置较为简单,未来研究将考虑目标特性、雷达参数变化以及环境对探测能力的影响。

参考文献:

- [1] 张海,陈小龙,张财生,等. 人工智能时代智能化海战模式[J]. 科技导报, 2019,37(12):86-91. (ZHANG Hai, CHEN Xiaolong, ZHANG Caisheng, et al. Future intelligent naval warfare pattern: artificial intelligence[J]. Science & Technology Review, 2019,37(12): 86-91.)

- [2] 陈小龙,关键,黄勇,等. 雷达低可观测动目标精细化处理及应用[J]. 科技导报, 2017,35(20):19–27. (CHEN Xiaolong, GUAN Jian,HUANG Yong,et al. Radar refined processing and its applications for low-observable moving target[J]. Science & Technology Review, 2017,35(20):19–27.)
- [3] 刘民,陆军. 下一代预警机主要特征与发展趋势研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015,10(3):278–282. (LIU Min, LU Jun. Overview of AEW character and development trend[J]. Journal of CAEIT, 2015,10(3):278–282.)
- [4] 李广强,鲁瑞达,王茂华. 预警机协同预警作战模型研究[J]. 舰船电子对抗, 2014,37(3):83–84,104. (LI Guangqiang,LU Ruida,WANG Maohua. Research into coordinate early warning operation model of early warning aircraft[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014,37(3):83–84,104.)
- [5] 张雪松,王文生,刘家鹏. 探索网络化作战的预警机[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015,10(2):119–124. (ZHANG Xuesong,WANG Wensheng,LIU Jiapeng. Explore a novel AWACS for network-centric operations[J]. Journal of CAEIT , 2015,10(2):119–124.)
- [6] 施荣. 国外网络化作战及其关键技术的进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007(2):206–210. (SHI Rong. Development on the foreign network centric warfare and key technologies[J]. Journal of CAEIT, 2007(2):206–210.)
- [7] 陈军,张新伟,张修社,等. 网络化舰艇编队的协同防空效能分析[J]. 电光与控制, 2015,22(3):15–19. (CHEN Jun, ZHANG Xinwei,ZHANG Xiushe,et al. Intercepting effectiveness of warship formation air defense[J]. Electronics Optics & Control, 2015,22(3):15–19.)
- [8] 宋志强,周献中,王慧平. 网络化多平台协同控制与决策系统总体设计框架[J]. 火力与指挥控制, 2016(6):121–124. (SONG Zhiqiang,ZHOU Xianzhong,WANG Huiping. Research on overall design framework of networked multi-vehicle cooperative control and decision-making system[J]. Fire Control & Command Control, 2016(6):121–124.)
- [9] 祁炜,李侠,蔡万勇,等. 多机载雷达协同探测能力及航线规划[J]. 系统工程与电子技术, 2016(12):2764–2768. (QI Wei,LI Xia,CAI Wanyong,et al. Multi-AEW cooperative detection capability and flight planning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(12):2764–2768.)
- [10] 戴瑜,汤子跃,李婧. 点状区域的多预警机协同探测航线规划[J]. 现代防御技术, 2017,45(4):31–36. (DAI Yu,TANG Ziyue,LI Jing. Route planning for multi-EWA cooperation detection of point region[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(4):31–36.)
- [11] 戴瑜,汪先超,汤子跃,等. 针对重点任务航线保障的预警机航线规划[J]. 火力与指挥控制, 2018,43(4):62–65,70. (DAI Yu,WANG Xianchao,TANG Ziyue,et al. EWA route planning for plane support[J]. Fire Control & Command Control, 2018,43(4):62–65,70.)
- [12] 邱志明. 未来海上协同作战技术[J]. 指挥控制与仿真, 2010,32(3):118. (QIU Zhiming. Future maritime co-operation technology[J]. Command Control & Simulation, 2010,32(3):118.)
- [13] 陈军,高晓光,肖步宇,等. 预警机指挥多机群空战的协同战术决策[J]. 火力与指挥控制, 2006,31(1):10–13. (CHEN Jun,GAO Xiaoguang,XIAO Buyu,et al. Research on tactical decision of multi-groups aircrafts coordinated air battle under command of AWACS[J]. Fire Control and Command Control, 2006,31(1):10–13.)
- [14] 牟效乾,陈小龙,苏宁远,等. 基于时频图深度学习的雷达动目标检测与分类[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(1):105–111. (MOU Xiaqian,CHEN Xiaolong,SU Ningyuan,et al. Radar detection and classification of moving target using deep convolutional neural networks on time–frequency graphs[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(1):105–111.)
- [15] 王俊,郑彤,雷鹏,等. 深度学习在雷达中的研究综述[J]. 雷达学报, 2018,7(4):395–411. (WANG Jun,ZHENG Tong,LEI Peng,et al. Study on deep learning in radar[J]. Journal of Radars, 2018,7(4):395–411.)
- [16] 苏宁远,陈小龙,关键,等. 基于卷积神经网络的海上微动目标检测与分类方法[J]. 雷达学报, 2018,7(5):565–574. (SU Ningyuan,CHEN Xiaolong,GUAN Jian,et al. Detection and classification of maritime target with micro-motion based on CNNs[J]. Journal of Radars, 2018,7(5):565–574.)