

进攻作战预警机与干扰机协同空域配置*

祁 炜,程东升,武 文,蒋 伟

(空军预警学院 防空预警装备系,湖北 武汉 430019)

摘要:针对进攻作战中预警机与己方干扰机协同空域配置问题,以预警机与干扰机在确保各自安全和有效遂行空中目标感知、远距离支援干扰作战任务为前提,构建基于两者存在电磁互扰时的预警机空域配置决策模型、干扰机空域配置决策模型、目标角度估算模型和协同空域配置优化决策模型,并提出一种协同效能评估模型,结合算法流程,针对进攻角、干扰机垂直方向因数,对预警机与干扰机协同空域配置的位置关系进行仿真分析,得出预警机和干扰机在协同作战时最优的空域配置,具有一定的实践指导意义。

关键词:进攻作战;预警机;电子干扰飞机;空域配置;协同效能

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)06-117-09

Cooperative airspace allocation of early warning aircraft and jamming aircraft in offensive operations

QI Wei, CHENG Dongsheng, WU Wen, JIANG Wei

(Air-Defense Early Warning Equipment Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Aiming at the problem of cooperative airspace configuration of early warning aircrafts and jammers in offensive operations, and on the premise that early warning aircraft and jammers can ensure their safe and effective implementation of aerial target perception and long-distance support jamming operations, the decision-making models of airspace configuration of early warning aircraft, airspace configuration of jammers, target angle estimation model and optimal decision-making model of cooperative airspace configuration were constructed based on the electromagnetic interference between them, in addition, a collaborative effectiveness evaluation model was proposed. Combined with the proposed algorithm process, the location relationship of the cooperative airspace configuration of early warning aircraft and jammers was simulated and analyzed according to the attack angle and the vertical pattern factor of jammers, and the optimal airspace configuration of early warning aircraft and jammers in cooperative operation was obtained, which has certain practical significance.

Keywords: offensive operations; early warning aircraft; electronic jamming aircraft; airspace allocation; cooperative effectiveness

在现代空中进攻作战中,预警机和远距离电子支援干扰机(以下简称干扰机)已成为空袭战斗机不可或缺的空中支持力量,但在实际作战中,守方预警雷达与攻方预警机频段大致相同,从而容易造成攻方远距离电子支援干扰机对己方预警机造成干扰,因此多机种如何在进攻作战中进行协同配合是亟待深入研究的问题^[1-5]。现有研究大多聚焦于多预警机协同、多干扰机协同问题,少数文献涉及预警机与干扰机的协同问题。文献[6-8]围绕着航线优化、相互补盲、联合发现概率等评估要素,讨论了多预警机协同方法;文献[9-11]围绕着目标威胁评估、目标动态分配等评估要素,分析了预警机对战斗机的实时指挥引导问题;文献[12]基于空域叠加方法构建了功

率分配模型,分析了干扰机编队协同过程中的干扰功率分配问题;文献[13-14]基于构建的电子压制空间模型,分析了干扰机协同战斗机有效遂行突防任务的问题。

本文以有效保障战斗机遂行作战任务为约束条件,构建了预警机、干扰机及其保障对象的空域配置模型;基于预警机、干扰机空域配置的基本原则,提出了预警机和干扰机协同有效性判定准则、构建了预警机和干扰机协同作战评估模型和算法流程;仿真分析了进攻角、干扰机垂直方向因数等重要因素对两者协同空域配置和综合作战保障效能的影响。文中给出的估算模型和评判准则考虑了主要的内、外部约束条件,具有实用价值。

* 收稿日期:2020-11-23

基金项目:国家部委基金资助项目(KJ20172A03122)

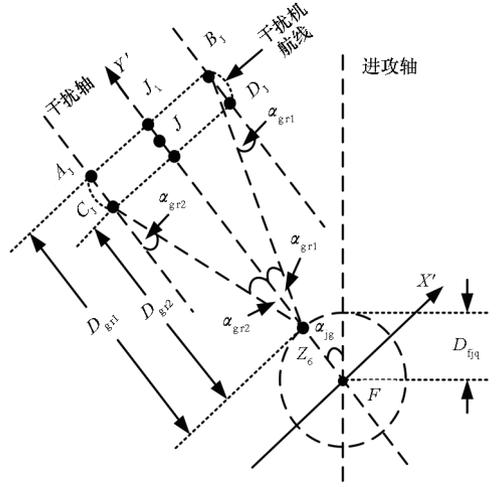
作者简介:祁炜(1981—),男,湖北武汉人,讲师,博士,E-mail:bluewind19810328@163.com

1 多机种空域配置参数化

由于多机种空域配置属于多属性复杂问题, 需要将各机种空域配置进行参数化, 为空域配置决策模型提供准确的位置坐标。

以文献[15]中“实施打击”阶段为背景, 如图1所示, 令战斗机从 α_{jg} 角度对守方重点目标 F 遂行空袭作战任务, 而预警机与干扰机采用协同方式分别为其提供实时信息保障和远距离电子支援干扰。不失一般性, 令攻方战斗机、预警机、干扰机和守方战斗机均在相同高度层 h_T , 并分别以 v_{sj} 、 V_a 、 V_j 、 V_T 飞行, 预警机和干扰机转弯速度 V_{ra} 和 V_{rj} 为已知参数值; D_{zy} 是预警机阵位距离 $|EF|$, L_Y 是预警机直飞航线长度, $W_Y = 2V_{ra}^2/(g \cdot \tan\beta_Y)$ 是预警机转弯直径, β_Y 是预警机转弯坡度角; D_{zj} 是干扰机阵位距离 $|JF|$, L_J 是干扰机直飞航线长度, $W_J = 2V_{rj}^2/(g \cdot \tan\beta_J)$ 是干扰机转弯直径, β_J 是干扰机转弯坡度角, d_{zw} 是干扰机自卫距离 $|Z_4J_2|$, d_{zg} 是守方战斗机对干扰机拦截的最短航线距离 $|Z_4Z_5|$, d_{nk} 是干扰机后撤至攻方导弹拦截线后 $d_{fkk} + W_J/2$ (d_{fkk} 是守方战斗机空空导弹射程)处的距离; Z_6 点是守方地(舰)空导弹阵位, D_{fjq} 是守方导弹阵位半径, 干扰机两条直飞航线与空袭导弹阵地之间的垂直距离分别为 $D_{gr1} = |Z_6J_1| = D_{zj} - D_{fjq} + W_J/2$ 和 $D_{gr2} = |Z_6J_2| = D_{zj} - D_{fjq} - W_J/2$; Z_6A_J 和 Z_6B_J 与干扰轴的夹角均为 α_{gr1} , Z_6C_J 和 Z_6D_J 与干扰轴的夹角均为 α_{gr2} 。

以守方重点目标 F 为原点, 责任区远界为 X 轴, 进攻轴为 Y 轴, 垂直干扰轴的直线为 X' 轴, 干



(b) 远距离支援干扰局部放大图

(b) Partial enlarged drawing map of stand-off jamming

图1 预警机与干扰机空域配置图

Fig.1 Airspace allocation diagram of early warning aircrafts and jamming aircraft

扰轴为 Y' 轴, 分别构建 XFY 和 $X'FY'$ 直角坐标系。令责任区边界 Z_2Z_3 、 Z_3Z_7 、 Z_7Z_8 和 Z_8Z_2 分别为 $l_{zr,1}$ 、 $l_{zr,2}$ 、 $l_{zr,3}$ 和 $l_{zr,4}$, 情报交接线 $\widehat{I_1I_2}$ 为 l_{jj} , 则在坐标系 XFY 中, 责任区边界和预警机情报交接线的函数表达式为:

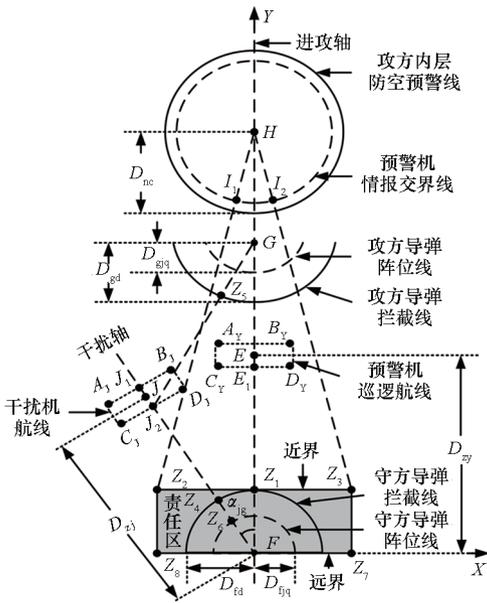
$$\begin{cases} l_{zr,1}: y_{zr} = D_{fd}, -L_{tc}/2 \leq x_{zr} \leq L_{tc}/2 \\ l_{zr,2}: x_{zr} = L_{tc}/2, 0 \leq y_{zr} \leq D_{fd} \\ l_{zr,3}: y_{zr} = 0, -L_{tc}/2 \leq x_{zr} \leq L_{tc}/2 \\ l_{zr,4}: x_{zr} = -L_{tc}/2, 0 \leq y_{zr} \leq D_{fd} \\ l_{jj}: y_{jj} = (D_{HZ} + W_{tc}) - \sqrt{(D_{nc} - v_{sj}t_{qj})^2 - x_{jj}^2} \\ x_{jj} \in [-(D_{nc} - v_{sj}t_{qj})L_{tc}/(2d_{sj}), (D_{nc} - v_{sj}t_{qj})L_{tc}/(2d_{sj})] \end{cases} \quad (1)$$

其中: $D_{fd} = D_{fjq} + \sqrt{d_{fjk}^2 - h_T^2}$ 是守方导弹拦截线半径, D_{fjq} 是守方地(舰)空导弹阵位线半径, d_{fjk} 是守方地(舰)空导弹最大射程; $L_{tc} = 2(D_{fd} + l_{kt})$ 和 $W_{tc} = D_{fd}$ 分别是责任区长度和纵深, l_{kt} 是进攻方空袭战斗机横向所需空中机动宽度; D_{nc} 是攻方内层防空预警线半径; t_{qj} 是预警机与攻方内层防空远程警戒雷达之间目标交接所需时间; D_{HZ} 是 $|HZ_1|$ 距离。

$$\begin{cases} D_{HZ} = \sqrt{d_{sj}^2 - (L_{tc}/2)^2}, d_{sj}^2 - (L_{tc}/2)^2 \geq 0 \\ d_{sj} = v_{sj}(t_{sh} - t_{cb} - t_{zh})/2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, d_{sj} 是攻方机场到 Z_2 或 Z_3 点的距离, t_{sh} 是攻方战斗机续航时间, t_{cb} 是攻方战斗机储备时间, t_{zh} 是攻方战斗机计划在责任区内作战所需时间。

在 XFY 坐标系中, 令 A_1B_1 和 C_1D_1 分别为 $l_{Y,1}$



(a) 攻防态势图

(a) Attack and defense situation map

和 l_{Y2} , 在 $X'FY'$ 坐标系中, 令 $\overline{A_1B_1}$ 和 $\overline{C_1D_1}$ 分别为 l_{J1} 和 l_{J2} , 则预警机和干扰机直飞航线函数表达式为:

$$\begin{cases} l_{Y1}: y_Y(t) = D_{zy} + W_Y/2, x_{A_Y} \leq x_Y(t) \leq x_{B_Y} \\ l_{Y2}: y_Y(t) = D_{zy} - W_Y/2, x_{C_Y} \leq x_Y(t) \leq x_{D_Y} \\ l_{J1}: y'_J(t) = D_{zj} + W_J/2, x'_{A'_J} \leq x'_J(t) \leq x'_{B'_J} \\ l_{J2}: y'_J(t) = D_{zj} - W_J/2, x'_{C'_J} \leq x'_J(t) \leq x'_{D'_J} \end{cases} \quad (3)$$

两个坐标系间可根据欧拉方程转换, 即

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_J(t) \\ y_J(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_{jg} & \sin\alpha_{jg} \\ -\sin\alpha_{jg} & \cos\alpha_{jg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_J(t) \\ y'_J(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x'_Y(t) \\ y'_Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_{jg} & -\sin\alpha_{jg} \\ \sin\alpha_{jg} & \cos\alpha_{jg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_Y(t) \\ y_Y(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

2 多机种空域配置决策模型

在协同作战中应尽量避免干扰机对己方预警机的电磁干扰, 但在实际作战中, 由于干扰机使用的干扰频段和极化方式等是由守方预警探测装备决定, 因此干扰机极有可能对己方预警机造成干扰。本节基于此种情况, 在多机种空域配置参数基础上, 以有效遂行各自作战任务为前提, 构建预警机与干扰机协同作战空域配置决策模型, 为协同效能评估提供底层支撑。

2.1 预警机空域配置决策模型

预警机为空袭战斗机实时提供信息保障任务

$$L_Y = \begin{cases} \min\{L_{Y1}, L_{Y2}\}, L_{Y1} \geq 0 \wedge L_{Y2} \geq 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} L_{Y1} = 2 \sqrt{R_{\max}^2 - \left(D_{zy} + \frac{W_Y}{2}\right)^2} - L_{tc} \\ L_{Y2} = 2 \sqrt{R_{\max}^2 - \left[D_{HZ} - (D_{zy} - W_{tc}) - \frac{D_{HZ}(D_{nc} - v_{xj}t_{qj})}{d_{xj}} + \frac{W_Y}{2}\right]^2} - \frac{L_{tc}(D_{nc} - v_{xj}t_{qj})}{d_{xj}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, R_{\max} 是预警机最大探测距离, 当考虑受干扰时, 预警机自卫距离 R_{\max_J} 估算公式^[16-17]为:

$$R_{\max_J} = \begin{cases} (A \sum_{-Y} R_{-Y}^2)^{1/4}, 0 \leq |\theta_{YT}| \leq \theta_{Y0.5}/2 \wedge 0 \leq |\varphi_{jY}| \leq \varphi_{ld0.5}/2 \\ \{A \sum_{-Y} R_{-Y}^2 / [k_J (\varphi_{ld0.5}/\varphi_{jY})^2]\}^{1/4}, 0 \leq |\theta_{YT}| \leq \theta_{Y0.5}/2 \wedge \varphi_{ld0.5}/2 < |\varphi_{jY}| \leq \pi/2 \\ \{A \sum_{-Y} R_{-Y}^2 / [k_J (2\varphi_{ld0.5}/\pi)^2]\}^{1/4}, 0 \leq |\theta_{YT}| \leq \theta_{Y0.5}/2 \wedge \pi/2 < |\varphi_{jY}| \leq \pi \\ \{A \sum_{-Y} R_{-Y}^2 / [k_Y (\theta_{Y0.5}/\theta_{YT})^2]\}^{1/4}, \theta_{Y0.5}/2 < |\theta_{YT}| \leq \pi/2 \wedge 0 \leq |\varphi_{jY}| \leq \varphi_{ld0.5}/2 \\ \{A \sum_{-Y} R_{-Y}^2 / [k_J (\varphi_{ld0.5}/\varphi_{jY})^2 k_Y (\theta_{Y0.5}/\theta_{YT})^2]\}^{1/4}, \theta_{Y0.5}/2 < |\theta_{YT}| \leq \pi/2 \wedge \varphi_{ld0.5}/2 < |\varphi_{jY}| \leq \pi/2 \\ \{A \sum_{-Y} R_{-Y}^2 / [k_J (2\varphi_{ld0.5}/\pi)^2 k_Y (\theta_{Y0.5}/\theta_{YT})^2]\}^{1/4}, \theta_{Y0.5}/2 < |\theta_{YT}| \leq \pi/2 \wedge \pi/2 < |\varphi_{jY}| \leq \pi \\ \{A \sum_{-Y} R_{-Y}^2 / [k_Y (2\theta_{Y0.5}/\pi)^2]\}^{1/4}, \pi/2 < |\theta_{YT}| \leq \pi \wedge 0 \leq |\varphi_{jY}| \leq \varphi_{ld0.5}/2 \\ \{A \sum_{-Y} R_{-Y}^2 / [k_Y (2\theta_{Y0.5}/\pi)^2 k_J (\varphi_{ld0.5}/\varphi_{jY})^2]\}^{1/4}, \pi/2 < |\theta_{YT}| \leq \pi \wedge \varphi_{ld0.5}/2 < |\varphi_{jY}| \leq \pi/2 \\ \{A \sum_{-Y} R_{-Y}^2 / [k_Y (2\theta_{Y0.5}/\pi)^2 k_J (2\varphi_{ld0.5}/\pi)^2]\}^{1/4}, \pi/2 < |\theta_{YT}| \leq \pi \wedge \pi/2 < |\varphi_{jY}| \leq \pi \end{cases} \quad (7)$$

时, 应遵循三个基本原则: 一是尽早进入预定空域巡航警戒, 且为战斗机空袭行动的前期准备、组织实施、结束返航全过程提供实时有效的引导情报保障; 二是具体飞行阵位选择, 必须确保自身安全, 同时充分发挥固有预警探测与引导指挥能力, 阵位距离应以最坏情况进行考虑; 三是尽可能地避免受到己方干扰机的无意干扰和敌方干扰机的有意干扰。

基于上述空域配置原则, 可得预警机阵位选择决策模型, 即预警机最前阵位 D_{zy-Q} 可由式(5)确定。

$$D_{zy-Q} = (V_T - V_a)(D_{gz} - D_{gd})/V_T + d_{fkk} + V_a V_{ra} \pi / (2g \cdot \tan\beta_Y) + D_{fd}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} D_{gd} = D_{gjq} + \sqrt{d_{gjk}^2 - h_T^2} \\ d_{fkk} + D_{fd} + W_Y/2 \leq D_{zy-Q} \leq D_{gz} - D_{gd} + d_{fkk} + D_{fd} \end{cases} \quad (5)$$

式中, D_{gjq} 和 D_{gd} 分别是攻方地(舰)空导弹阵位线和拦截线半径, d_{gjk} 是攻方地(舰)空导弹最大射程, D_{gz} 是攻方前置导弹拦截线等效圆心 G 到责任区近界 Z_1 点的垂直距离。则预警机阵位 $D_{zy} \in [D_{zy-Q}, D_{gz} - D_{gd} + d_{fkk} + D_{fd}]$ 。

一旦巡航阵位已确定, 令预警机满足覆盖责任区时的直飞航线最长距离为 L_{Y1} , 满足覆盖 $\widehat{I_1 I_2}$ 时的直飞航线最长距离为 L_{Y2} , 则实际直飞航线 L_Y 由式(6)确定。

式中, $A_{\Sigma Y} = A_{rY} \sigma_Y / [A_{jY} 4\pi G_j F_j^2(\beta_{jY}) G_Y F_Y^2(\varepsilon_{jY}) K_{jY}]$, $A_{rY} = P_Y G_Y^2 D_Y L_Y^{-1}$, σ_Y 是空中目标的雷达散射截面 (radar cross section, RCS), $A_{jY} = P_j \gamma_{jY} B_{rY} B_j^{-1} L_{rjY}^{-1}$, R_{jY} 是干扰机与预警机的距离, $F_j(\beta_{jY})$ 是干扰机在预警机垂直方向上的归一化方向因数, $F_Y(\varepsilon_{jY})$ 是预警机在干扰机垂直方向上的归一化方向因数, $\theta_{Y0.5}$ 和 $\varphi_{id0.5}$ 分别是预警机和电子干扰机水平波束半功率点宽度, k_Y 的取值范围均为 $[0.04, 0.10]$, $K_{jY} = -4.75 / [\sqrt{n_Y} \ln(P_{dY})]$, P_{dY} 是预警机发现概率, n_Y 是预警机脉冲积累数, 其他是预警机和干扰机自身参数。

2.2 干扰机空域配置决策模型

干扰机为空袭战斗机提供支援压制干扰时, 应遵循五个基本原则: 一是具体飞行阵位选择必

$$D_{zj-Q} = d_{zw} + D_{fd} + \frac{W_j}{2}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \frac{(d_{hc} - d_{fkk})^2 + d_{zw}^2 - d_{zg}^2}{2(d_{hc} - d_{fkk})d_{zw}} = \frac{(d_{hc} - d_{fkk} + D_{gd})^2 + (d_{zw} + D_{fd})^2 - (D_{gz} + D_{fd})^2}{2(d_{zw} + D_{fd})(d_{hc} - d_{fkk} + D_{gd})} \\ d_{zg} = (d_{hc} + d_{fkk})V_T/V_j \\ \cos\alpha_{jg} = \frac{(d_{zw} + D_{fd})^2 + (D_{gz} + D_{fd})^2 - (d_{hc} - d_{fkk} + D_{gd})^2}{2(d_{zw} + D_{fd})(D_{gz} + D_{fd})} \\ d_{fkk} + D_{fd} + \frac{W_j}{2} \leq D_{zj} \leq (D_{gz} + D_{fd} - D_{gd})/\cos\alpha_{jg} \end{cases} \quad (8)$$

一旦确定干扰机巡航阵位, 则可进行干扰机航线规划。令 Z_6 点到干扰机直飞航线的垂直距离为 D_{gr} , 且 Z_6 点与直飞航线最远端的连线与干扰轴的夹角为 α_{gr} , 干扰机与目标指示雷达的最远距离为 $R_{jmax} = D_{gr}/\cos\alpha_{gr}$ 。可得干扰机在完成作战任务的前提下 α_{gr} 估算公式为:

$$\alpha_{gr} = \begin{cases} \arccos\{D_{gr}[A_{\Sigma} G_j G_t / F_T^4(\varepsilon_T)]^{1/2}\}, & 0 \leq |\alpha_{gr}| \leq \theta_{gj0.5}/2 \\ \arccos\{D_{gr}[A_{\Sigma} k_T G_t G_j / F_T^4(\varepsilon_T)]^{1/2} \theta_{gj0.5} / \alpha_{gr}\}, & \theta_{gj0.5}/2 < |\alpha_{gr}| \leq \varphi_{id0.5}/2 \\ \arccos\{D_{gr}[A_{\Sigma} k_T G_t k_j G_j / F_T^4(\varepsilon_T)]^{1/2} \theta_{gj0.5} \varphi_{id0.5} / \alpha_{gr}^2\}, & \varphi_{id0.5}/2 < |\alpha_{gr}| \leq \pi/2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $F_T(\varepsilon_T)$ 是目标指示雷达在攻防战斗机垂直方向上天线的归一化方向因数; k_T 和 k_j 的取值范围均为 $[0.04, 0.10]$, 具体取值依据各自副瓣电平高低而定, 副瓣电平越低, 取值越小; $\theta_{gj0.5}$ 和 $\varphi_{id0.5}$ 分别是目标指示雷达和干扰机水平波束宽度; $A_{\Sigma} = 4\pi P_j \gamma_j B_r L_{dis}^4 K_{jY} / (P_l G_l^2 B_l L_{vj} D \sigma_T)$, σ_T 是攻防战斗机 RCS, $\gamma_j \in [0, 1]$ 是干扰极化匹配系数, L_{vj} 是目标指示雷达接收干扰信号时的插入损

须确保自身安全, 同时又能充分发挥固有支援干扰能力; 二是在空袭行动前位于距离守方较远阵位且关闭干扰源, 避免过早暴露空袭意图; 三是在空袭行动开始时, 攻方战斗机未抵达守方远程警戒雷达预警线时, 应前置干扰空域阵位施放干扰, 时机不宜太早, 以缩短守方雷达网重新布防或采取其他反干扰措施的时间; 四是当攻方战斗机完成空袭任务并退至守方地 (舰) 空导弹拦截线外时, 应停止施放干扰并回撤至安全空域; 五是在遂行对敌压制干扰时, 必须尽量避免对己方预警机的无意干扰。

基于上述空域配置原则, 可得干扰机阵位选择决策模型, 即干扰机最前阵位 D_{zj-Q} 可由式 (8) 确定。则干扰机阵位 $D_{zj} \in [D_{zj-Q}, (D_{gz} + D_{fd} - D_{gd})/\cos\alpha_{jg}]$ 。

耗, d_{fks} 是攻方战斗机空对面导弹最远射程, $K_{jY} = -4.75 / [\sqrt{n_j} \ln(P_{dY})]$, P_{dY} 是目标指示雷达发现概率, n_j 是目标指示雷达脉冲积累数, 其他是目标指示雷达和干扰机自身参数。当 D_{gr} 为 D_{gr1} 或 D_{gr2} 时可分别求得 α_{gr1} 或 α_{gr2} 。

显然, 只有当干扰机处于干扰轴上的 J_2 点 ($\varphi_{gr1} = \varphi_{gr2} = 0$) 且 D_{gr1} 不大于 R_{jmax} 时, 才能完成其作战任务。因此, 干扰机实际直飞航线 L_j 可由式 (10) 决定。

$$L_j = \begin{cases} \min(L_{j1}, L_{j2}), D_{gr1} \leq [A_{\Sigma} \frac{G_j G_t}{F_T^4(\varepsilon_T)}]^{1/2} \\ 0, D_{gr1} > [A_{\Sigma} \frac{G_j G_t}{F_T^4(\varepsilon_T)}]^{1/2} \end{cases}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} L_{j1} = 2 \left(D_{zj} - D_{fjq} + \frac{W_j}{2} \right) \tan\alpha_{gr1} \\ L_{j2} = 2 \left(D_{zj} - D_{fjq} - \frac{W_j}{2} \right) \tan\alpha_{gr2} \end{cases} \quad (10)$$

式中, L_{j1} 、 L_{j2} 分别是在完成支援干扰任务的前提下 $A_j B_j$ 、 $C_j D_j$ 的直飞航线长度。

2.3 目标角度估算

令 α_{dis} 是预警机到责任区边界的距离, b_{dis} 是

预警机到干扰机的距离, c_{dis} 是预警机到预警机情报交接线的距离, d_{dis} 是干扰机到责任区边界的距离, e_{dis} 是干扰机到预警机情报交接线的距离, θ_{JYZ} 是干扰机到预警机与责任区边界的角度, θ_{JY} 是干扰机到预警机再到干扰机的角度, θ_{JYJ} 是干扰机到预警机与预警机情报交界线的角度。由预警机直飞航线、干扰机直飞航线、责任区边界、预警机情报交接线等在坐标系 XFY 中的显函数表达式, 可得:

$$\begin{cases} a_{dis} = \sqrt{[x_Y(t) - x_{zr}]^2 + [y_Y(t) - y_{zr}]^2} \\ b_{dis} = \sqrt{[x_Y(t) - x_J(t)]^2 + [y_Y(t) - y_J(t)]^2} \\ c_{dis} = \sqrt{[x_Y(t) - x_{jj}]^2 + [y_Y(t) - y_{jj}]^2} \\ d_{dis} = \sqrt{[x_J(t) - x_{zr}]^2 + [y_J(t) - y_{zr}]^2} \\ e_{dis} = \sqrt{[x_J(t) - x_{jj}]^2 + [y_J(t) - y_{jj}]^2} \end{cases} \quad (11)$$

而 θ_{JYZ} 、 θ_{JY} 和 θ_{JYJ} 的计算公式为:

$$\begin{cases} \theta_{JYZ} = \begin{cases} \arccos \frac{a_{dis}^2 + b_{dis}^2 - d_{dis}^2}{2a_{dis}b_{dis}}, \text{其他} \\ 0, a_{dis} = 0 \vee b_{dis} = 0 \end{cases} \\ \theta_{JY} = 0 \\ \theta_{JYJ} = \begin{cases} \arccos \frac{c_{dis}^2 + b_{dis}^2 - e_{dis}^2}{2c_{dis}b_{dis}}, \text{其他} \\ 0, c_{dis} = 0 \vee b_{dis} = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

在坐标系 $X'FY'$ 中, 干扰机在预警机方向的指向角 φ_{JY} 的分段估算公式为:

$$\begin{cases} \varphi_{JY} = \pi/2, y'_Y(t) = y'_J(t) \\ \varphi_{JY} = \arctan \left| \frac{x'_J(t) - x'_Y(t)}{y'_J(t) - y'_Y(t)} \right|, y'_Y(t) < y'_J(t) \\ \varphi_{JY} > \pi/2, y'_Y(t) > y'_J(t) \end{cases} \quad (13)$$

2.4 协同空域配置优化决策

在预警机与干扰机进行协同作战时, 其协同空域配置优化后的方案既要满足预警机有效遂行情报保障任务, 又要满足干扰机有效遂行对守方雷达的电磁干扰任务。因此, 令式(7)中 $\varphi_{JY} = \varphi_{JY}$, 且 θ_{JT} 分别为 θ_{JY} 、 θ_{JYZ} 、 θ_{JYJ} , 可得到相应预警机在干扰机方向上的预警机最大自卫距离(即预警机遭受干扰机电磁干扰时的最大探测距离) R_{max_JY} 、在责任区边界方向上的预警机最大自卫距离 R_{max_JYZ} 和预警机在预警机情报交界线方向上的最大自卫距离 R_{max_JYJ} 。则预警机能有效遂行情报保障任务的判定准则为:

$$\begin{cases} R_{max_JYZ} \in [a_{dis}, R_{max}] \wedge R_{max_JY} \in [b_{dis}, R_{max}] \\ [b_{dis}, R_{max}] \wedge R_{max_JYJ} \in [c_{dis}, R_{max}] \\ D_{zy} \geq D_{zy-Q} \end{cases} \quad (14)$$

干扰机与预警机协同作战时, 干扰机能有效遂行电磁干扰任务的判定准则为:

$$D_{zj} \geq D_{zj-Q} \wedge D_{grt} \leq [A_{\Sigma} G_j G_t / F_T^4(\epsilon_T)]^{1/2} \quad (15)$$

3 协同效能评估模型及算法

协同效能评估模型是判别预警机与干扰机协同作战效能好坏的准则, 也是协同任务规划中最佳协同作战方案生成的判断依据。

3.1 评估模型

预警机和干扰机协同作战效能, 是指双方已充分发挥装备预警探测和电磁干扰能力, 且在自身安全是否有保障的前提下, 以何种作战效果来有效完成各自的作战任务。因此, 预警机和干扰机协同作战效能指标 E_{XT} 可描述为:

$$E_{XT} = A_{XT} \cdot F_{XT} \cdot T_{XT} \quad (16)$$

式中, A_{XT} 是协同安全因子, 表征预警机和干扰机所处阵位是否同时满足自身安全的状态。

$$\begin{aligned} A_{XT} &= A_{ZS_Y} \cdot A_{ZS_J} \\ \text{s. t. } \begin{cases} A_{ZS_Y} &= \begin{cases} 1, D_{zy} \geq D_{zy-Q} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \\ A_{ZS_J} &= \begin{cases} 1, D_{zj} \geq D_{zj-Q} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

F_{XT} 是协同任务有效完成因子, 表征预警机和干扰机是否在各自所处阵位能够同时有效完成各自的作战任务, 可定量描述为:

$$\begin{aligned} F_{XT} &= F_{ZS_Y} \cdot F_{ZS_J} \\ \text{s. t. } \begin{cases} F_{ZS_Y} &= \begin{cases} 1, R_{max_JYZ} \geq a_{dis} \wedge R_{max_JY} \geq b_{dis} \wedge R_{max_JYJ} \geq c_{dis} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \\ F_{ZS_J} &= \begin{cases} 1, D_{grt} \leq [A_{\Sigma} G_j G_t / F_T^4(\epsilon_T)]^{1/2} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

T_{XT} 是协同作战效果因子, 为预警机和干扰机协同作战时, 在各自单圈直飞航线上的飞行距离与其独立作战时在安全阵位区间内最大直飞距离比值的乘积, 可定量描述为:

$$\begin{cases} T_{XT} = \frac{L_{XT_Y}}{L_{Y_max}} \cdot \frac{L_{XT_J}}{L_{J_max}}, J_{XT} \neq 0 \\ T_{XT} = 1, J_{XT} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

其中, L_{XT_Y} 和 L_{XT_J} 是预警机和干扰机协同巡航直飞距离, L_{Y_max} 和 L_{J_max} 是预警机和干扰机独立作战

时巡航最大直飞距离, J_{XT} 是干扰机在协同作战时对预警机的有效干扰效能指标, 可通过“六域”协同因子进行描述。

$$J_{XT} = M_{XT} \cdot f_{XT} \cdot t_{XT} \cdot \gamma_{XT} \cdot P_{XT} \cdot K_{XT} \quad (20)$$

式中: $M_{XT} \in [0, 1]$ 是模式域协同因子, 当干扰机采用的有效干扰模式不对预警机雷达产生影响时取 0; $f_{XT} \in [0, 1]$ 是频域协同因子, 当干扰机与预警机雷达工作在不同频率时取 0; $t_{XT} \in [0, 1]$ 是时域协同因子, 当干扰机施放干扰时间与预警机雷达感知情报时间不同时取 0; $\gamma_{XT} \in [0, 1]$ 是极化域协同因子, 当干扰机极化方式与预警机雷达极化正交时取 0; $P_{XT} \in [0, 1]$ 是能量域协同因子, 当干扰机施放的干扰能量进入预警机雷达接收输入端可忽略不计时取 0; $K_{XT} \in [0, 1]$ 是空域协同因子, 当干扰机施放的干扰对预警机雷达探测威力覆盖作战任务空域不造成影响时取 0。

3.2 算法

预警机与干扰机协同作战时空域配置寻优的实用算法流程如下:

初始化处理: 确定攻守双方参战飞机及其配属装备、导弹性能参数、地(舰)空导弹阵位线半径和各作战流程消耗时间, 设定干扰机、预警机和

守方目标指示雷达具体参数。

Step 1: 以式(5)和式(8)为依据, 确定 D_{zy} 、 D_{zj} 和 α_{jg} 的取值范围, 从而确保 $A_{XT} = 1$ 。

Step 2: 独立作战空域配置寻优。根据作战任务选定进攻角 α_{jg} , 以式(6)和式(10)为依据, 在 Step 1 结果中搜索 $L_{Y_{max}}$ 和 $L_{J_{max}}$ 。

Step 3: 协同作战空域配置。

1) 分别按 $R_{max_JY} \geq b_{dis}$ 、 $R_{max_JYZ} \geq a_{dis}$ 、 $R_{max_JYJ} \geq c_{dis}$ 为顺序的判定准则, 逐步缩小 D_{zy} 和 D_{zj} 的取值范围, 最终确定所有满足协同条件的 D_{zy_i} 、 L_{Y_i} 、 D_{zj_i} 、 L_{J_i} , $i \in [1, N]$, 从而确保 $F_{XT} = 1$ 。

2) 将 $L_{Y_{max}}$ 、 $L_{J_{max}}$ 、 L_{Y_i} 、 L_{J_i} 数据代入式(19)解算 T_{XTi} 。

Step 4: 预警机和干扰机最优协同作战效能指标 $E_{XT_{opt}} = \max \{ T_{XTi} \mid i \in [1, N] \}$ 。

Step 5: 绘制最优 D_{zy} 、 L_Y 、 D_{zj} 、 L_J 空域配置图。

4 仿真分析

4.1 参数设置

攻守双方参战飞机及其配属装备、导弹性能参数、地(舰)空导弹阵位线半径和各作战流程消耗时间等如表 1 所示。

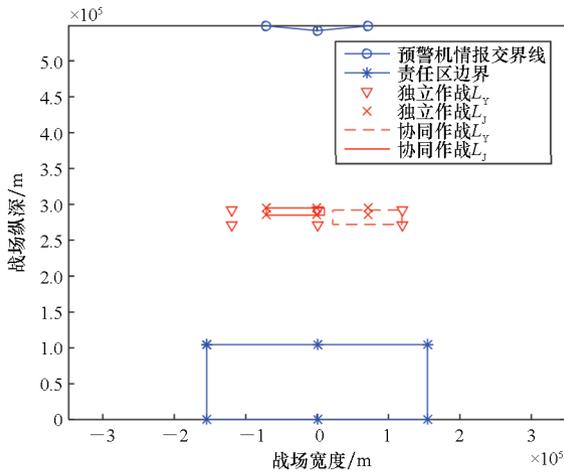
表 1 攻守双方参数设置

Tab. 1 Parameter setting of offensive and defensive sides

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 | 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|------------------------|-------|------------------------------|------|-------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| D_{gq}/km | 20 | D_{gz}/km | 320 | G_j/dB | 18 | D_y | 20 |
| d_{gk}/km | 85 | d_{gs}/km | 80 | $\varphi_{ld,0.5}/(^{\circ})$ | 30 | L_y/dB | 6.5 |
| h_T/km | 9 | $\theta_{si,0.5}/(^{\circ})$ | | k_j | 0.06 | B_{r_y}/MHz | 0.5 |
| l_{kt}/km | 50 | G_r/dB | 30 | P_j/kW | 2 | L_{j_y}/dB | 3 |
| $v_{sj}/(\text{km/h})$ | 1 200 | $F_T(\varepsilon_T)$ | 0.7 | B_j/MHz | 2 000 | R_{max}/km | 400 |
| $V_T/(\text{km/h})$ | 1 000 | k_T | 0.04 | γ_j | 0.5 | n_y | 16 |
| t_{sh}/h | 3 | B_r/MHz | 0.5 | γ_{j_y} | 0.5 | P_{d_y} | 0.5 |
| t_{cb}/h | 0.2 | L/dB | 6.5 | $\beta_j/(^{\circ})$ | 25.47 | σ_y/m^2 | 2 |
| t_{zh}/h | 1.4 | n_j | 16 | $V_j/(\text{km/h})$ | 850 | k_y | 0.04 |
| $g/(\text{m/s}^2)$ | 9.8 | P_{d_j} | 0.1 | $V_{j_y}/(\text{km/h})$ | 550 | $V_a/(\text{km/h})$ | 750 |
| d_{fk}/km | 100 | P_l/kW | 80 | $F_j(\beta_{jy})$ | 0.03 | $V_{ra}/(\text{km/h})$ | 500 |
| D_{gq}/km | 20 | D | 20 | $\theta_{y,0.5}/(^{\circ})$ | 6 | $\beta_y/(^{\circ})$ | 11.13 |
| d_{gk}/km | 85 | σ_T/m^2 | 2 | P_y/kW | 30 | $F_{T_y}(\varepsilon_{y_z})$ | 1 |
| D_{nc}/km | 400 | L_{j_y}/dB | 3 | G_y/dB | 40 | $F_{T_y}(\varepsilon_{y_{jy}})$ | 1 |
| t_{qj}/h | 0.01 | | | | | | |

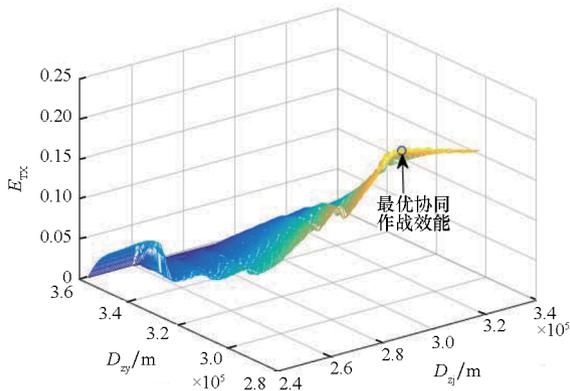
4.2 α_{jg} 和 $F_Y(\varepsilon_{YJ})$ 对协同空域配置的影响

令 $J_{XT} \neq 0$, 且 $\alpha_{jg} = 0^\circ$, $F_Y(\varepsilon_{YJ}) = \{1, 0.05\}$, 可得图2和图3所示的预警机与干扰机协同空域配置关系。



(a) 最优空域配置图

(a) Optimal airspace configuration diagram

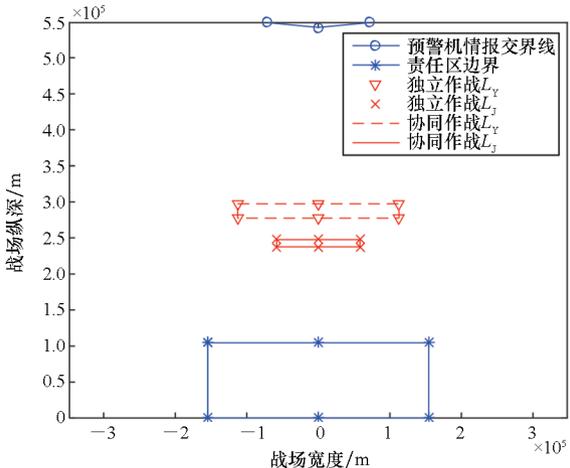


(b) D_{zy} 和 D_{zj} 与 E_{XT} 关系图

(b) Diagram between D_{zy} and D_{zj} , E_{XT}

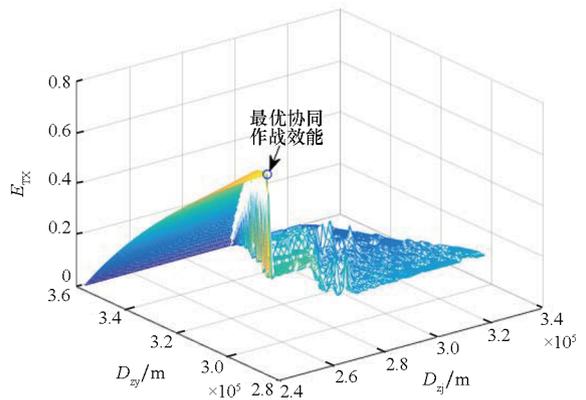
图2 预警机与干扰机协同作战空域配置(方案1)

Fig.2 Operational airspace configuration of early warning aircrafts and jamming aircraft (scheme 1)



(a) 最优空域配置图

(a) Optimal airspace configuration diagram



(b) D_{zy} 和 D_{zj} 与 E_{XT} 关系图

(b) Diagram between D_{zy} and D_{zj} , E_{XT}

图3 预警机与干扰机协同作战空域配置(方案2)

Fig.3 Operational airspace configuration of early warning aircrafts and jamming aircraft (scheme 2)

由图2、图3可知:

1) 当 $F_Y(\varepsilon_{YJ}) = 1$ 时, 最优协同空域配置为 $D_{zy} = 282 \text{ km}$, $D_{zj} = 290 \text{ km}$, $L_Y = 97.05 \text{ km}$, $L_J = 81.15 \text{ km}$, $E_{XT, \text{opt}} = 0.228 59$ 。预警机与干扰机所处阵位基本相同, 且协同直飞航线长度均比独立遂行作战任务时阵位的直飞航线长度要短。其原因是干扰机主瓣和尾瓣均对预警机造成较大干扰, 致使其不能有效遂行对预警机情报交界线 and 责任区的探测任务, 因此航线在空域配置时要相对错开。

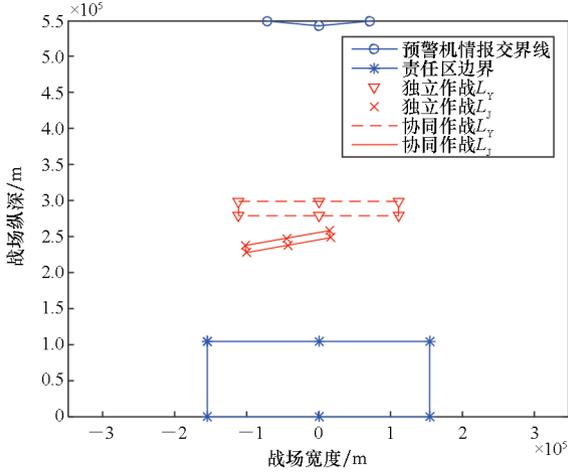
2) 当 $F_Y(\varepsilon_{YJ}) = 0.05$ 时, 最优协同空域配置为 $D_{zy} = 287.5 \text{ km}$, $D_{zj} = 242.6 \text{ km}$, $L_Y = 225.6 \text{ km}$, $L_J = 116 \text{ km}$, $E_{XT, \text{opt}} = 0.763 7$ 。预警机阵位后置于干扰机, 且协同直飞航线长度与独立遂行作战任务时基本相同。这说明此时干扰机尾瓣已对预警机探测责任区不造成太大影响, 但其主瓣依然对预警机探测预警机情报交界线干扰很大。

3) 不论是协同作战效能还是预警机和干扰机的巡航直飞航线长度, 方案2明显优于方案1, 其原因是 $F_Y(\varepsilon_{YJ})$ 的取值不同。这说明若想获得更佳的协同空域配置, 预警机必须降低干扰机垂直波瓣对其探测能力的影响; 又因为干扰机的干扰对象处于较低高度层, 致使其干扰主瓣下俯、尾瓣上仰, 所以干扰机阵位应处于预警机前上方。

令 $J_{XT} \neq 0$, 且 $\alpha_{jg} = 10^\circ$, $F_Y(\varepsilon_{YJ}) = 0.05$, 可得图4所示的预警机与干扰机协同空域配置关系。

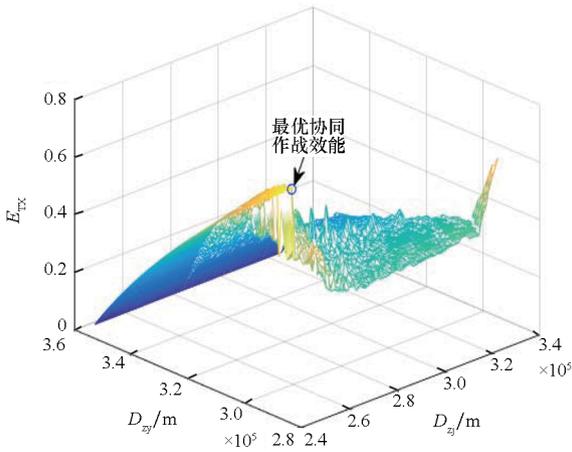
由图4可知: 预警机与干扰机最优协同空域配置为 $D_{zy} = 288.9 \text{ km}$, $D_{zj} = 246.6 \text{ km}$, $L_Y = 222.5 \text{ km}$, $L_J = 118.8 \text{ km}$, $E_{XT, \text{opt}} = 0.766 7$ 。方案3与方案1

相比协同作战效能几乎相同,但预警机和干扰机的阵位及直飞航线长度均有变化,原因是进攻角变大,致使干扰机直飞航线偏转,从而干扰机阵位相对前移、预警机阵位相对后置。



(a) 最优空域配置图

(a) Optimal airspace configuration diagram



(b) D_{xy} 和 D_{zj} 与 E_{XT} 关系图

(b) Diagram between D_{xy} and D_{zj} , E_{XT}

图 4 预警机与干扰机协同作战空域配置(方案 3)

Fig. 4 Operational airspace configuration of early warning aircrafts and jamming aircraft (scheme 3)

5 结论

根据攻防双方主要参战力量的性能,本文针对守方重点目标遂行空袭作战任务中预警机与干扰机协同空域配置问题,提出预警机遂行预警探测任务时的三条原则和干扰机遂行远距离电子支援干扰任务时的五条原则,并据此构建空域配置模型,且依据所提效能评估模型,通过仿真对关键参数与协同空域配置的关系进行分析。本文协同空域配置原则、定量模型以及仿真结论可供实际预警机与干扰机协同兵力部署决策时参考使用。本文尚未考虑多预警机与多干扰机协同问题,有

待进一步研究。

参考文献 (References)

[1] 曹晨. 第四代预警机发展研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(9): 809-814.
CAO C. Study on the development of the fourth generation airborne early warning system[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(9): 809-814. (in Chinese)

[2] 张昊旻, 姜志敏, 李灵芝, 等. 基于特殊任务的预警机预警能力评估[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(4): 83-85, 115.
ZHANG G M, JIANG Z M, LI L Z, et al. Evaluation of early warning capability of early warning aircraft based on special mission [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2020, 43(4): 83-85, 115. (in Chinese)

[3] 徐功康, 刘栋, 董晶, 等. 预警机巡逻探测区域建模及效能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(5): 470-476.
XU G K, LIU D, DONG J, et al. Modeling and efficiency analysis of AWACS patrol detection area[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(5): 470-476. (in Chinese)

[4] 董晶, 王颖, 赫锋, 等. 基于兵力投入的预警机巡逻航线规划研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(3): 263-270.
DONG J, WANG Y, HE F, et al. Research on patrol route planning of AWACS based on forces input [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(3): 263-270. (in Chinese)

[5] YUE K Z, GAO Y, LI G X, et al. Conceptual design and RCS performance research of shipborne early warning aircraft[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(6): 968-976.

[6] 李相如, 曹晨, 罗琪楠. 预警机巡逻航线规划问题建模与仿真分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(2): 153-156.
LI X R, CAO C, LUO Q N. Modeling and simulation analysis of patrol route planning for AWACS [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(2): 153-156. (in Chinese)

[7] 王国师, 李强, 代科学, 等. 基于防空警戒任务的多预警机协同补盲[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 941-946.
WANG G S, LI Q, DAI K X, et al. Blind compensation for multi-AWACS cooperation based on aerial defence and warning [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 941-946. (in Chinese)

[8] 付莹, 汤子跃, 孙永健. 机载预警雷达协同探测航线优化[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4177-4185.
FU Y, TANG Z Y, SUN Y J. Cooperative detection routes optimization of AEW radar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(12): 4177-4185. (in Chinese)

[9] 郭徽东. 多预警机强效区覆盖与仿真计算[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(11): 78-82.
GUO H D. Coverage and simulation calculation of high efficiency area of multi-AEWs [J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(11): 78-82. (in Chinese)

[10] 蔡佳, 罗继勋, 胡朝晖, 等. 预警机指挥控制系统在编队

- 飞机空战中的算法研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(6): 28-31.
- CAI J, LUO J X, HU Z H, et al. Air combat algorithm of aircraft formation under command and control of early warning aircraft[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(6): 28-31. (in Chinese)
- [11] 彭芳, 吴军, 马健, 等. 预警机对战斗机的远距引导效能分析与评估[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2046-2051.
- PENG F, WU J, MA J, et al. Effectiveness analysis and evaluation of the early warning aircraft steering the fighter based on long-distance guidance[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2046-2051. (in Chinese)
- [12] 崔凯, 沈治河, 杨兴宝, 等. 基于空中通信中继的预警机配置研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 58-62.
- CUI K, SHEN Z H, YANG X B, et al. Research on early warning aircraft configuration based on air communication relay[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 58-62. (in Chinese)
- [13] 寇英信, 任波, 贺宏刚, 等. 基于电子压制的不可穿越区域低空突防方法[J]. 电光与控制, 2009, 16(2): 1-4.
- KOU Y X, REN B, HE H G, et al. Study on low altitude penetration over risky area based on oppressive jamming[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(2): 1-4. (in Chinese)
- [14] 崔啸, 张良, 王峰, 等. 预警机雷达双机协同探测布站研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(7): 1-4.
- CUI X, ZHANG L, WANG F, et al. A study on distribution of dual-aircraft cooperative detection for airborne early warning radar[J]. Modern Radar, 2020, 42(7): 1-4. (in Chinese)
- [15] 祁炜, 李侠, 蔡万勇, 等. 空袭中预警机阵位选择及航线规划[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(12): 64-68.
- QI W, LI X, CAI W Y, et al. AEW location selection and course programming of air-raid operations[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(12): 64-68. (in Chinese)
- [16] 张杲旻, 姜志敏, 李灵芝, 等. 基于特殊任务的预警机预警能力评估[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(4): 83-85.
- ZHANG G M, JIANG Z M, LI L Z, et al. Evaluation of early warning capability of early warning aircraft based on special mission[J]. Ship Board Electronic Countermeasure, 2020, 43(4): 83-85. (in Chinese)
- [17] 李侠, 蔡万勇, 花良发, 等. 责任区雷达组网系统抗干扰优化部署算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(8): 1254-1257.
- LI X, CAI W Y, HUA L F, et al. Algorithms of anti-jamming optimized arrangement for radar networking system with warning area[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(8): 1254-1257. (in Chinese)