

舰载无人机双机无源定位机理与战术运用分析

朱青松¹, 谭安胜¹, 王新为¹, 赵科华²

(1. 海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018; 2. 中国人民解放军 92529 部队, 浙江 温州 317604)

摘要: 在对舰载无人机无源定位机理分析的基础上, 给出了辐射源位置估计的一般方法, 从等圆概率误差曲线、定位模糊区和辐射源位置误差最大值 3 个角度入手, 对舰载无人机双机无源定位战术运用问题进行了综合分析, 构建了相应的数学模型, 通过仿真计算得出了实用结论, 为驱护航编队作战中使用舰载无人机进行无源定位提供了理论与方法。

关键词: 舰载无人机; 无源定位; 战术运用

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)08-0023-06

Principle and Tactics Application Analysis of Passive Location of Dual Shipborne UAVs

ZHU Qing-song¹, TAN An-sheng¹, WANG Xin-wei¹, ZHAO Ke-hua²

(1. Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China; 2. No. 92529 Unit of PLA, Wenzhou 317604, China)

Abstract: Based on the principle analysis of passive location of shipborne UAVs, a common method is given about the position estimation of emitter. The tactics application of passive location of dual shipborne UAVs is studied from three aspects: equal circular error probability curve, ambiguous area in location and the maximum value of the emitter position error. The respective models are established, and practical conclusion is obtained through simulation. The paper provides a theoretic basis and a method for passive locating by shipborne UAVs for destroyer and frigate formation.

Key words: shipborne UAV; passive location; tactic application

0 引言

舰载无人机无源定位较有源定位具有作用距离远、隐蔽性强、不易被敌方发觉的优点^[1], 对于提高舰载无人机在电子战环境下的生存能力和作战能力具有重要作用, 是水面舰艇编队实施超视距隐蔽导弹攻击的重要信息源。无源定位与有源定位相比最大的区别在于“合作性”, 当无源定位系统试图定位某个目标时, 目标系统是非合作的, 换句话说, 目标发射信号的时间对于无人机无源定位系统来说是未知的, 无人机无源定位系统必须在时频域中进行扫描以确定目标信号的时频位置, 仅此一点就已使舰载无人机无源定位问题大为复杂化。使用舰载无人机挂载电子侦察载荷对目标进行无源定位时, 无论是单个平台还是多个平台, 都可以利用辐射源信号的方位角信息形成辐射源

的方位线, 方位线的交叉点可以实现对辐射源的位置估计, 这种利用方位线的交叉点实现对辐射源位置估计的定位方法, 通常称之为测向交叉定位法^[2]。本文以作战使用的角度, 在分析舰载无人机无源定位机理的基础上, 从等圆概率误差曲线、定位模糊区和辐射源位置误差最大值 3 个方面入手, 对舰载无人机双机无源定位战术运用问题进行综合论证研究。

1 舰载无人机无源定位机理分析

如图 1 所示, 两架挂载电子侦察载荷的舰载无人机 A_1, A_2 (也可以看成是一架无人机在 t_1 时刻位于 A_1 , 在 t_2 时刻位于 A_2), 采用高精度干涉仪测向交叉定位体制。 A_1, A_2 到目标辐射源 T 的斜距离分别为 L_1, L_2 , 对辐射源的俯角 (或称为辐射源的仰角) 分别为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$; 方位角 (或称为示向角, 本文规定为与 x 轴正向的夹角) 分别为 $\phi_1, -\phi_2$; 每架无人机均可在 360° 范围内进行全向侦察, 侦察天线的最大俯角为 ε_0 , U_1, U_2 分别为两架舰载无人机 (或单架无人机 t_1, t_2 时刻) 在水平面上的投影点。

收稿日期: 2015-04-14

修回日期: 2015-05-12

基金项目: 军队科研基金

作者简介: 朱青松 (1986—), 男, 安徽六安人, 硕士生, 研究方向为军事运筹、舰载武器作战使用。

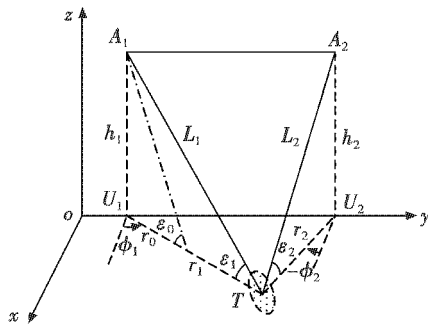


图1 舰载无人机测向交叉定位原理示意图

Fig.1 DOA location principle of shipborne UAV

假设舰载无人机的位置坐标是精确的,且测向设备对目标辐射源测向时无测向误差,则两架无人机的测向方位线相交且交点位于水平面上,该交点的位置就是目标辐射源的真实位置。为便于对问题的理解,可以在 xoy 平面内讨论。如图2所示,设无人机位置坐标分别为 $A_1(x_1, y_1, z_1)$, $A_2(x_2, y_2, z_2)$, 目标辐射源的坐标为 $T(x_T, y_T, z_T)$ 。

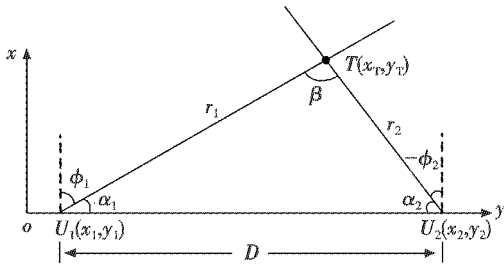


图2 舰载无人机测向交叉定位原理平面示意图

Fig.2 Plane sketch of DOA location principle of shipborne UAV

根据图1则有

$$\begin{cases} \tan \phi_1 = \frac{y_T - y_1}{x_T - x_1} \\ \tan \phi_2 = -\frac{y_T - y_2}{x_T - x_2} \end{cases} \quad (1)$$

解得

$$\begin{cases} x_T = \frac{y_2 - y_1 + x_1 \tan \phi_1 + x_2 \tan \phi_2}{\tan \phi_1 + \tan \phi_2} \\ y_T = \frac{y_2 \tan \phi_1 + y_1 \tan \phi_2 + (x_2 - x_1) \tan \phi_1 \tan \phi_2}{\tan \phi_1 + \tan \phi_2} \end{cases} \quad (2)$$

由于 U_1, U_2 的坐标是已知的,所以两点之间的距离(基线) D 已知,当 (ϕ_1, ϕ_2) 确定了以后, α_1 和 α_2 亦能确定,即 $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \phi_1, \alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \phi_2$ 。这时若要确定目标辐射源 T 到 U_1, U_2 的水平距离 r_1 和 r_2 ,可根据正弦定理求得

$$\begin{cases} r_1 = \frac{D \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ r_2 = \frac{D \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (3)$$

水面舰艇编队在通过数据链接收到舰载无人机的探测信息后,通过决策软件即可计算出目标的坐标。

2 舰载无人机无源定位战术运用分析

在实际作战中,对舰载无人机位置坐标的确定以及对目标辐射源示向角的测定都不可避免地存在误差,直接影响无源定位的精度。而采用不同的定位精度指标,会得出不同的结论,增加了舰载无人机双机无源定位战术运用方式方法确定的复杂性。为此,本节从等圆概率误差曲线、定位模糊区和辐射源位置误差最大值3个方面入手,对舰载无人机双机无源定位战术运用问题进行系统分析。

2.1 辐射源位置估计方法

假设每架舰载无人机的位置误差和示向角测量值误差均服从零均值高斯分布^[3],且标准偏差分别为 $\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i} (i=1,2)$ 和 $\sigma_{\phi_i} (i=1,2)$,则相关无人机位置协方差矩阵 C_{x,y_i} 和示向角协方差矩阵 C_{ϕ_i} 可分别表示为

$$\begin{cases} C_{x,y_i} = \begin{pmatrix} \sigma_{x_i}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_i}^2 \end{pmatrix} \\ C_{\phi_i} = \begin{pmatrix} \sigma_{\phi_i}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\phi_i}^2 \end{pmatrix} \end{cases} \quad i=1,2 \quad (4)$$

由舰载无人机位置 $(x_i, y_i), i=1,2$,以及相应的辐射源信号示向角 (ϕ_1, ϕ_2) 误差而引起的辐射源位置协方差矩阵 C_{x_T, y_T} ,可利用下式^[4]进行计算

$$C_{x_T, y_T} = \sum_{i=1}^2 J_{x_T, y_T | x_i, y_i} C_{x_i, y_i} J_{x_T, y_T | x_i, y_i}^T + J_{x_T, y_T | \phi_1, \phi_2} C_{\phi_1, \phi_2} J_{x_T, y_T | \phi_1, \phi_2}^T \quad (5)$$

式中, $J_{x_T, y_T | x_i, y_i} (i=1,2), J_{x_T, y_T | \phi_1, \phi_2}$ 分别是有关舰载无人机位置和到达角位置估计值的偏微分,由以下两式给出

$$J_{x_T, y_T | x_i, y_i} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_T}{\partial x_i} & \frac{\partial x_T}{\partial y_i} \\ \frac{\partial y_T}{\partial x_i} & \frac{\partial y_T}{\partial y_i} \end{pmatrix} \quad i=1,2 \quad (6)$$

$$J_{x_T, y_T | \phi_1, \phi_2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_T}{\partial \phi_1} & \frac{\partial x_T}{\partial \phi_2} \\ \frac{\partial y_T}{\partial \phi_1} & \frac{\partial y_T}{\partial \phi_2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

参考图2所建立的坐标系,将 $x_1 = x_2 = 0, y_2 - y_1 = D$ 代入式(2)得

$$\begin{cases} x_T = \frac{D}{\tan \phi_1 + \tan \phi_2} \\ y_T = \frac{y_2 \tan \phi_1 + y_1 \tan \phi_2}{\tan \phi_1 + \tan \phi_2} \end{cases} \quad (8)$$

利用式(8)求 $J_{x_T, y_T | \phi_1, \phi_2}$,并考虑到 $\phi_1 + \alpha_1 = \frac{\pi}{2}, \phi_2 + \alpha_2 = \pi/2$,整理得

$$\mathbf{J}_{x_i, y_i | \phi, \phi_2} = -\frac{D}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \cdot \begin{bmatrix} \sin^2 \alpha_2 & \sin^2 \alpha_1 \\ -\sin \alpha_2 \cos \alpha_2 & \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)的第二项,并整理得

$$\mathbf{J}_{x_i, y_i | \phi, \phi_2} \mathbf{C}_{\phi, \phi_2} \mathbf{J}_{x_i, y_i | \phi, \phi_2}^T = \frac{D^2}{\sin^4(\alpha_1 + \alpha_2)} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{\phi_1}^2 \sin^4 \alpha_2 + \sigma_{\phi_2}^2 \sin^4 \alpha_1 & -\sigma_{\phi_1}^2 \cos \alpha_2 \sin^3 \alpha_2 + \sigma_{\phi_2}^2 \cos \alpha_1 \sin^3 \alpha_1 \\ -\sigma_{\phi_1}^2 \cos \alpha_2 \sin^3 \alpha_2 + \sigma_{\phi_2}^2 \cos \alpha_1 \sin^3 \alpha_1 & \sigma_{\phi_1}^2 \cos^2 \alpha_2 \sin^2 \alpha_2 + \sigma_{\phi_2}^2 \cos^2 \alpha_1 \sin^2 \alpha_1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

对于式(10),设其特征根为 λ_1, λ_2 ,则有

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \frac{D^2}{\sin^4(\alpha_2 + \alpha_1)} (\sigma_{\phi_1}^2 \sin^2 \alpha_2 + \sigma_{\phi_2}^2 \sin^2 \alpha_1) \quad (11)$$

现分3种情况对式(5)进行讨论。

1) 在不考虑舰载无人机位置误差影响的情况下,将式(11)代入圆概率误差估算公式,则得到目标辐射源位置的圆概率误差为

$$E_{\text{CEP}\phi} = 0.75 \sqrt{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{0.75D}{\sin^2(\alpha_2 + \alpha_1)} \sqrt{\sigma_{\phi_1}^2 \sin^2 \alpha_2 + \sigma_{\phi_2}^2 \sin^2 \alpha_1} \quad (12)$$

令 β 为交会角,则 $\beta = 180 - (\alpha_1 + \alpha_2)$,有 $\sin \beta = \sin(\alpha_1 + \alpha_2)$,所以

$$E_{\text{CEP}\phi} = \frac{0.75D}{\sin^2 \beta} \sqrt{\sigma_{\phi_1}^2 \sin^2 \alpha_2 + \sigma_{\phi_2}^2 \sin^2 \alpha_1} \quad (13)$$

如果两架舰载无人机的测向误差相同,令 $\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = \sigma_{\phi}$,则有

$$E_{\text{CEP}\phi} = \frac{0.75D\sigma_{\phi}}{\sin^2 \beta} \sqrt{\sin^2 \alpha_2 + \sin^2 \alpha_1} \quad (14)$$

根据式(3),有 $\sin \alpha_2 = r_1 \sin \beta / D$, $\sin \alpha_1 = r_2 \sin \beta / D$,分别代入式(13)和式(14),得

$$E_{\text{CEP}\phi} = 0.75 \cdot \frac{\sqrt{r_1^2 \sigma_{\phi_1}^2 + r_2^2 \sigma_{\phi_2}^2}}{\sin \beta} \quad (15)$$

$$E_{\text{CEP}\phi} = 0.75 \sigma_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}}{\sin \beta} \quad (16)$$

2) 在不考虑舰载无人机测向误差影响的情况下,对式(2)求 $\mathbf{J}_{x_i, y_i | x, y}$,即

$$\mathbf{J}_{x_i, y_i | x, y} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_T}{\partial x_i} & \frac{\partial x_T}{\partial y_i} \\ \frac{\partial y_T}{\partial x_i} & \frac{\partial y_T}{\partial y_i} \end{pmatrix} = \frac{1}{\tan \phi_1 + \tan \phi_2} \begin{pmatrix} \tan \phi_1 & -1 \\ -\tan \phi_1 \tan \phi_2 & \tan \phi_2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

则

$$\mathbf{J}_{x_i, y_i | x, y} \mathbf{C}_{x, y} \mathbf{J}_{x_i, y_i | x, y}^T = \frac{1}{(\tan \phi_1 + \tan \phi_2)^2} \begin{bmatrix} \sigma_x^2 \tan^2 \phi_1 + \sigma_y^2 & -\sigma_x^2 \tan^2 \phi_1 \tan \phi_2 - \sigma_y^2 \tan \phi_2 \\ -\sigma_x^2 \tan^2 \phi_1 \tan \phi_2 - \sigma_y^2 \tan \phi_2 & \sigma_x^2 \tan^2 \phi_1 \tan^2 \phi_2 + \sigma_y^2 \tan^2 \phi_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

令式(18)的特征根为 λ'_1, λ'_2 ,并考虑到 $\phi_1 + \alpha_1 = \pi/2$, $\phi_2 + \alpha_2 = \pi/2$, $\sin \beta = \sin(\alpha_1 + \alpha_2)$,则

$$\lambda'_1 + \lambda'_2 = \frac{1}{\sin^2 \beta} (\sigma_x^2 \cos^2 \alpha_i + \sigma_y^2 \sin^2 \alpha_i) \quad (19)$$

则 U_i 位置误差引起目标位置误差的圆概率误差为

$$E_{\text{CEP}x, y_i} = 0.75 \sqrt{\lambda'_1 + \lambda'_2} = \frac{0.75}{\sin \beta} \sqrt{\sigma_x^2 \cos^2 \alpha_i + \sigma_y^2 \sin^2 \alpha_i} \quad (20)$$

如果 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{U_i}$,则有

$$E_{\text{CEP}x, y_i} = \frac{0.75 \sigma_{U_i}}{\sin \beta} \quad (21)$$

如果两架舰载无人机的机位误差相同,令 $\sigma_{U_1} = \sigma_{U_2} = \sigma_U$,则

$$E_{\text{CEP}xy} = \sqrt{E_{\text{CEP}x, y_1}^2 + E_{\text{CEP}x, y_2}^2} = \frac{0.75 \sqrt{2} \sigma_U}{\sin \beta} \quad (22)$$

3) 当同时考虑舰载无人机位置误差和测向误差对定位精度的影响时,圆概率误差 E_{CEP} 算式为

$$E_{\text{CEP}}^2 = E_{\text{CEP}\phi}^2 + CEP_{\text{CEP}xy}^2 \quad (23)$$

如果两架舰载无人机的机位误差和测向误差相同,令 $\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = \sigma_{\phi}$, $\sigma_{U_1} = \sigma_{U_2} = \sigma_U$,将式(16)、式(22)代入式(23),得

$$E_{\text{CEP}} = \frac{0.75}{\sin \beta} \cdot \sqrt{2\sigma_U^2 + (r_1^2 + r_2^2)\sigma_{\phi}^2} \quad (24)$$

2.2 等圆概率误差曲线

对作战使用具有指导意义的参数是等圆概率误差范围,该范围对于舰载无人机的电子侦察部署具有重要意义。为此,建立如图3所示的极坐标系,极坐标系原点 o 位于 $U_1 U_2$ 的中点,目标辐射源 T 的极坐标为 (R, θ) 。

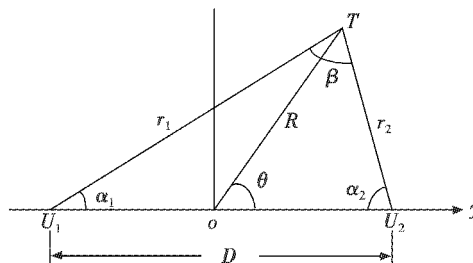


图3 舰载无人机双机定位极坐标示意图

Fig. 3 DOA location of double-shipborne UAV on polar coordinate system

根据图3,有

$$\begin{cases} r_1^2 = R^2 + D^2/4 - RD \cos(180 - \theta) \\ r_2^2 = R^2 + D^2/4 - RD \cos \theta \\ DR \sin \theta = r_1 r_2 \sin \beta \end{cases} \quad (25)$$

将式(25)分别代入式(16)、式(22)、式(24),并整理得

$$E_{\text{CEP}\phi} = \frac{0.75 \sqrt{2} D \sigma_{\phi}}{\sin \theta} \sqrt{\left(\left(\frac{R}{D} \right)^2 + \frac{1}{4} \right) \left[\left(\frac{R}{D} + \frac{D}{4R} \right)^2 - \cos^2 \theta \right]} \quad (26)$$

要使式(26)有最小值,在基线长度 D 一定时,应满足 $\theta = 90^\circ$ 且 $R = \frac{D}{2\sqrt{2}}$,此时交会角 β 约为 110° 。

$$E_{CEP_{xy}} = \frac{0.75\sqrt{2}\sigma_U}{\sin\theta} \sqrt{\left(\frac{R}{D} + \frac{D}{4R}\right)^2 - \cos^2\theta} \quad (27)$$

要使式(27)有最小值,在基线长度 D 一定时,应满足 $\theta = 90^\circ$ 且 $R = \frac{D}{2}$,此时交会角 $\beta = 90^\circ$ 。

$$E_{CEP} = \frac{0.75\sqrt{2}}{\sin\theta} \sqrt{\left[\left(\frac{R}{D} + \frac{D}{4R}\right)^2 - \cos^2\theta\right] \left[\sigma_\phi^2 \left(R^2 + \frac{1}{4}D^2\right) + \sigma_U^2\right]} \quad (28)$$

为直观地表述舰载无人机无源定位性能,分别应用式(26)、式(27)进行仿真计算,探索各参数之间的关系。

给定仿真参数:舰载无人机干涉仪最大侦察距离 $L = 200$ km,无人机飞行高度 $H_U = 3000$ m,测向误差 σ_ϕ 为 $1 \sim 5^\circ$,无人机定位误差 σ_U 分别取 30 m, 50 m, D 为 $50 \sim 200$ km。

仿真设计:1) 给定 D, σ_ϕ , 探索 E_{CEP_ϕ} 随 R 和 θ 的变化规律以及 E_{CEP_ϕ} 与 D 之间的关系;2) 给定 D, σ_U , 探索 $E_{CEP_{xy}}$ 随 R 和 θ 的变化规律以及 $E_{CEP_{xy}}$ 与 D 之间的关系;3) $\sigma_U = 50$ m, 给定 D, σ_ϕ , 探索不同测向精度和基线距离下等圆概率误差曲线。仿真结果如图4~图6所示。

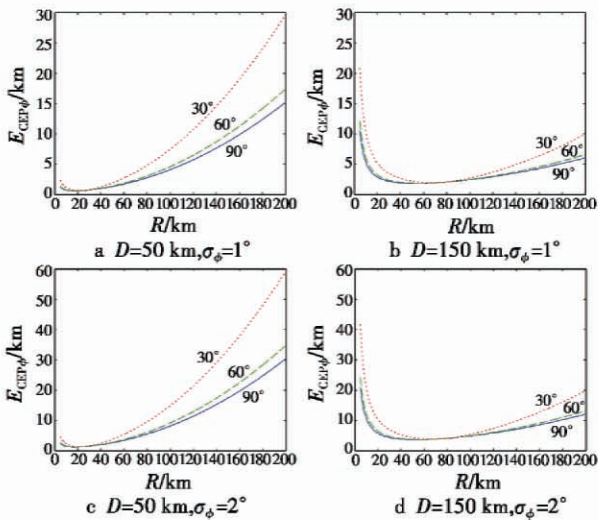


图4 E_{CEP_ϕ} 随 R 的变化规律
Fig. 4 Changing of E_{CEP_ϕ} with R

从图4可以看出:1) E_{CEP_ϕ} 随舰载无人机测向误差 σ_ϕ 的增大而增大;2) E_{CEP_ϕ} 随 R 的增大,先减小后增大,其最小值与 D, σ_ϕ 有关;3) 当 D, R 一定, $\theta \in (0, 90^\circ]$ 时, E_{CEP_ϕ} 随 θ 的增大而减小,当 $\theta = 90^\circ$ 时, E_{CEP_ϕ} 最小,也就是说当目标在基线的垂直平分线上时定位精度最高;4) E_{CEP_ϕ} 在 $\theta = 90^\circ, R = \frac{D}{2}$ 处取得最小值,此时 $\alpha_1 \approx 35^\circ$, 交会角 β 约为 110° , 也就是说当目标在基线的垂直平分线上且交会角为 110° 时,定位精度最高;5) 当 $R > \frac{D}{2}$ 时, E_{CEP_ϕ} 随 R 的增大而增大,其变化幅度随基线 D 的增大而减小,满足定位精度要求的舰

载无人机无源定位范围变大,实际作战中应使用大基线进行无源定位;6) 舰载无人机测向误差对无源定位精度的影响显著。

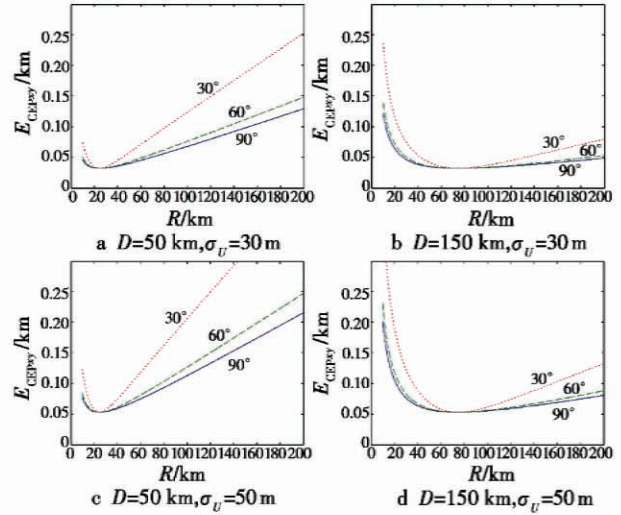


图5 $E_{CEP_{xy}}$ 随 R 的变化规律
Fig. 5 Changing of $E_{CEP_{xy}}$ with R

从图5可以看出:1) $E_{CEP_{xy}}$ 随舰载无人机自身定位误差 σ_U 的增大而增大;2) $E_{CEP_{xy}}$ 随 R 的增大,先减小后增大,其最小值在 $R = D/2$ 处;3) 当 $R > D/2$ 时,尽管 $E_{CEP_{xy}}$ 随 R 的增大而增大,但变化的幅度与 $R < D/2$ 相比要小,也就是说 $R > D/2$ 时的定位性能与 $R < D/2$ 时相比要好;4) 当 D, R 一定, $\theta \in (0, 90^\circ]$ 时, $E_{CEP_{xy}}$ 随 θ 的增大而减小,当 $\theta = 90^\circ$ 时, $E_{CEP_{xy}}$ 达到最小值,也就是说当目标在基线 D 的垂直平分线上时,定位精度高;5) 舰载无人机自身定位误差对无源定位精度的影响不显著。

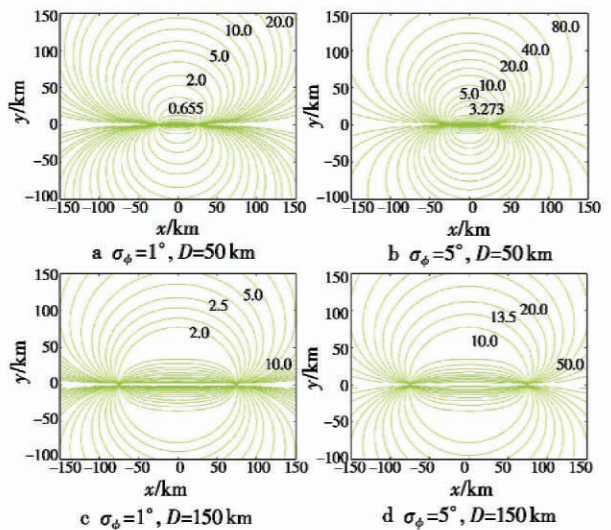


图6 不同测向精度和基线距离下 CEP 的等值线图
Fig. 6 CEP contour map under different direction measurement accuracy and length of baseline

从图6可以看出:1) 等圆概率误差曲线(CEP等高线)以基线为轴呈对称分布;2) 基线 D 越长,满足给

定位精度要求的范围越大;3) 测向精度,对满足给定定位精度要求的范围的大小具有决定性影响;4) 辐射源目标处于基线的垂直平分线上时,舰载无人机具有无源定位的距离优势。

2.3 定位模糊区分析

若不考虑 U_1, U_2 的位置误差,并假设两架舰载无人机(或单架舰载无人机在不同时刻)的最大测向误差相同且均为 $\Delta\theta_{\max}$,则目标辐射源的真实位置应该位于两扇形区相交的四边形 $ABCD$ 区域内,由于测向误差是在 $\pm\Delta\theta_{\max}$ 范围内的任意值,因此目标辐射源的真实位置可能出现在四边形 $ABCD$ 区域内的任意点上,由于无法确定目标辐射源在四边形 $ABCD$ 区域中的真实位置,因此称四边形区域 $ABCD$ 为定位模糊区^[5]。

定位模糊区面积的大小是定位精度高度的一个重要指标,四边形 $ABCD$ 的面积越小,说明定位精度越高。下面就具体分析四边形的面积与哪些因素有关。

假定目标辐射源离 U_1, U_2 的距离很远(相对于四边形 $ABCD$ 的边长来说),如图 7 所示。

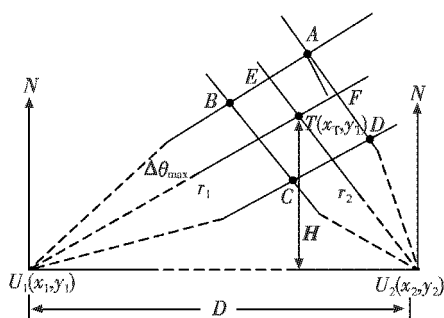


图 7 双机交叉定位模糊区分析示意图

Fig.7 Ambiguous area analysis of cross location of dual UAVs

显然,平行四边形 $ABCD$ 的面积近似等于 4 倍的四边形 $AETF$ 面积。而平行四边形 $AETF$ 的两条边对应的高可以用对应的一段圆弧来近似,即

$$\begin{cases} h_1 = r_1 \Delta\theta_{\max} = \frac{D\Delta\theta_{\max} \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ h_2 = r_2 \Delta\theta_{\max} = \frac{D\Delta\theta_{\max} \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (29)$$

设边 AF 的长度为 l ,则

$$l = \frac{h_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{D\Delta\theta_{\max} \sin \alpha_2}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (30)$$

可得

$$S_{ABCD} = 4S_{AETF} = \frac{4D^2 \Delta\theta_{\max}^2 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2}{\sin^3(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (31)$$

可见, S_{ABCD} 的大小除了与 H (或 D), $\Delta\theta_{\max}$ 有关外,还与 α_1 和 α_2 有关。一般来说, $\Delta\theta_{\max}$ 主要取决于舰载无人机电子侦察载荷测向设备的性能。在 $\Delta\theta_{\max}$ 一定的情况下, H (或 D) 越小,则 S_{ABCD} 也越小;如果 H (或 D) 一

定,则 S_{ABCD} 的大小主要取决于 α_1 和 α_2 ,要使得 S_{ABCD} 最小, α_1 和 α_2 的选择就有一定的要求。

下面分别研究在 H, D 一定的条件下,模糊区最小时 α_1 和 α_2 的取值。

1) 设 H 一定时,令

$$W_1 = \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (32)$$

要使 S_{ABCD} 最小,应满足

$$\begin{cases} \frac{\partial W_1}{\partial \alpha_1} = \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) = 0 \\ \frac{\partial W_1}{\partial \alpha_2} = \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) = 0 \end{cases} \quad (33)$$

又 $\alpha_1, \alpha_2 \in (0, \pi/2)$,则上式可简化为

$$\begin{cases} \tan \alpha_1 = -\tan(\alpha_1 + \alpha_2) \\ \tan \alpha_2 = -\tan(\alpha_1 + \alpha_2) \end{cases} \quad (34)$$

解得

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{3} \quad (35)$$

由此可见,当 H 一定时,只有在满足 $\alpha_1 = \alpha_2 = \pi/3$ 的条件下,对应的定位模糊区面积才为最小。即当 U_1, U_2, T 构成等边三角形时,定位模糊区最小,此时交会角 $\beta = 60^\circ$ 。

2) 设 D 一定时,令

$$W_2 = \frac{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2}{\sin^3(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (36)$$

要使 S_{ABCD} 最小,应满足

$$\begin{cases} \frac{\partial W_2}{\partial \alpha_1} = \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) - 3\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin^4(\alpha_1 + \alpha_2)} = 0 \\ \frac{\partial W_2}{\partial \alpha_2} = \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) - 3\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin^4(\alpha_1 + \alpha_2)} = 0 \end{cases} \quad (37)$$

整理得

$$\tan \alpha_1 = \tan \alpha_2 = \frac{1}{3} \tan(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (38)$$

解得

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{6} \quad (39)$$

也就是说,当 D 一定时,只有在满足 $\alpha_1 = \alpha_2 = \pi/6$ 的条件下,对应的定位模糊区面积才为最小值,此时交会角 $\beta = 120^\circ$ 。

由此得出如下结论:

1) 定位模糊区面积最小的位置是在 U_1, U_2 基线 D 的中垂线上且交会角为 60° 或 120° 处;

2) 当两架舰载无人机保持基线 D 不变飞行,对目标进行无源交叉定位时,将目标保持在基线 D 的中垂线上且交会角 $\beta = 120^\circ$ 的位置上,基于定位模糊区面积最小的定位精度最高;

3) 当两架舰载无人机保持目标到基线 D 的距离

不变飞行,对目标进行无源交叉定位时,将目标保持在基线 D 的中垂线上且交会角 $\beta = 60^\circ$ 的位置上,基于定位模糊区面积最小的定位精度最高;

4) 偏离基线中垂线时定位性能将不断下降,主要体现在满足定位模糊区面积最小时,有效定位距离不断减小。

2.4 辐射源位置误差最大值分析

根据前面的分析,目标辐射源可能在定位模糊区即四边形 $ABCD$ 中的任意位置,通常以该四边形的中心即两条示向度线的交点位置作为真实目标辐射源位置的估计值^[5],显然,当真实目标辐射源位于四边形的 4 个顶点之一时,其位置误差达到最大值。

在图 7 中,如果目标辐射源的真实位置位于 B 点或 D 点,则对应的位置误差为

$$l_1^2 = \overline{BT}^2 = \overline{DT}^2 = \frac{\Delta\theta_{\max}^2}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} [r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2\cos(\alpha_1 + \alpha_2)] \quad (40)$$

如果目标辐射源的真实位置位于 A 点或 C 点,则对应的位置误差为

$$l_2^2 = \overline{AT}^2 = \overline{CT}^2 = \frac{\Delta\theta_{\max}^2}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} [r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos(\alpha_1 + \alpha_2)] \quad (41)$$

则,最大位置误差为

$$l_m = \max(l_1, l_2) \quad (42)$$

又 $0 < \alpha_1 + \alpha_2 < \pi$, 联立式(3)、式(40)、式(41),得

$$\begin{cases} l_1^2 = \frac{D^2 \Delta\theta_{\max}^2}{\sin^4(\alpha_1 + \alpha_2)} [\sin^2\alpha_1 + \sin^2\alpha_2 + 2\sin\alpha_1\sin\alpha_2\cos(\alpha_1 + \alpha_2)] \\ l_2^2 = \frac{D^2 \Delta\theta_{\max}^2}{\sin^4(\alpha_1 + \alpha_2)} [\sin^2\alpha_1 + \sin^2\alpha_2 - 2\sin\alpha_1\sin\alpha_2\cos(\alpha_1 + \alpha_2)] \end{cases} \quad (43)$$

可见,在 $D, \Delta\theta_{\max}$ 一定的条件下, l_m 随 α_1, α_2 而变化, l_m 最小时对应的 α_1, α_2 值应该是使 l_1^2 最小同时满足 $l_1^2 \leq l_2^2$, 或 l_2^2 最小同时满足 $l_2^2 \leq l_1^2$ 。不妨先求 l_1^2 达到极小值时对应的 α_1, α_2 , 这是一个二元极值求解问题,对式(43)求极值并整理得

$$\sin(\alpha_1 + \alpha_2) [\sin\alpha_1\cos\alpha_1 + \cos\alpha_1\sin\alpha_2\cos(\alpha_1 + \alpha_2) - \sin\alpha_1\sin\alpha_2\sin(\alpha_1 + \alpha_2)] - 2\cos(\alpha_1 + \alpha_2) [\sin^2\alpha_1 + \sin^2\alpha_2 + 2\sin\alpha_1\sin\alpha_2\cos(\alpha_1 + \alpha_2)] = 0 \quad (44)$$

解得

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi/2 \quad (45)$$

当 $\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ 时, $l_1^2 = l_2^2 = D^2 \Delta\theta_{\max}^2$, 它对应的是最大位置误差的最小值,此时交会角 $\beta = 90^\circ$ 。

由此得出如下结论:1) 在以 U_1, U_2 基线 D 为直径的圆周上,定位的最大位置误差具有最小值;2) 若两架无人机具有相同的测向精度,当目标辐射源在 $U_1,$

U_2 基线 D 的中垂线上且交会角为 90° 的位置上时,基于位置误差最大值最小的定位精度最高;3) 偏离基线的中垂线时定位性能将不断下降,主要体现在满足定位最大位置误差最小时,有效定位距离不断减小。

3 结语

舰载无人机双机无源定位,是保障驱护舰编队超视距隐蔽对海导弹攻击的重要手段。通过本文的分析可知,舰载无人机双机交叉定位,交会角接近 110° 时 CEP 最小,当两架无人机与辐射源构成等腰三角形或等边三角形时定位模糊区最小,当交会角为 90° 时,基于位置误差最大值最小的定位精度最高。因此,使用舰载无人机双机交叉定位时,交会角最好选择为 $60^\circ \sim 120^\circ$ 。而实际作战中要求:1) 应尽可能地在远距离时及早发现目标并对其定位;2) 要求有较高的定位精度,交会角必须满足一定的要求;3) 从载舰对舰载无人机的控制和安全考虑,舰载无人机前出距离应在可控范围内;4) 侦察范围必须覆盖目标分布区域。为此,在进行兵力部署优化时,交会角应控制在 $30^\circ \sim 150^\circ$ 范围内。在满足交会角限制的前提下,如何优化双机间的定位基线距离、飞行高度、双机飞行队形以及舰载无人机前出距离、前出方向、侦察飞行区域、侦察飞行航迹等作战使用要素,是指挥员非常关心的问题,将在今后工作中继续研究。

参考文献

- [1] 魏瑞轩,李学仁. 无人机系统及作战使用[M]. 北京:国防工业出版社,2009. (WEI R X, LI X R. UAV system and operational use[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [2] 王喜鹏,王飞. 机载无源定位精度分析[J]. 舰船电子技术 2012, 35(3): 23-26. (WANG X P, WANG F. Analysis of airborne passive location precision[J]. Ship Electronic Technology, 2012, 35(3): 23-26.)
- [3] 周亦军,李旻,李锐. 纯方位定位中观测站布局优化研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(11): 69-71. (ZHOU Y J, LI M, LI R. Research on constellation optimization of multi-observer inbearing only localization[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(11): 69-71.)
- [4] WILEY R G. 电子情报(ELINT)——雷达信号截获与分析[M]. 吕跃广,译. 北京:电子工业出版社,2008. (WILEY R G. ELINT: the interception and analysis of radar signals[M]. Translated by LYU Y G. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.)
- [5] 王红星,曹建平. 通信侦察与干扰技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005. (WANG H X, CAO J P. Communication reconnaissance and jamming technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.)