

# 无源传感器引导 AESA 雷达目标搜索

唐书娟, 许蕴山, 肖冰松

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 无源传感器引导有源电扫阵列(AESA)雷达完成目标搜索是机载多传感器协同探测的重要应用形式。综合了引导传感器的测角误差以及目标运动产生的偏差2种因素,建立目标指示成功概率模型。提出了一种满足时效性、指示成功率和误交接概率要求的最优搜索策略。采用分步优化的方法在多种场景下对搜索策略和性能指标进行了计算。仿真结果表明:提出的搜索策略与传统搜索策略相比在满足指示成功率要求的前提下,通过增加较少的搜索波位,较大幅度地降低了误交接概率,保证了引导条件下目标搜索的准确性。

**关键词** 无源传感器;有源电扫阵列雷达;指示交接;搜索策略

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.03.008

**中图分类号** TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)03-0035-06

## Research on Passive Sensor Cueing of AESA Radar for Target Searching

TANG Shujuan, XU Yunshan, XIAO Bingsong

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

**Abstract:** Passive sensor cueing of Active Electronically Scanned Array (AESA) radar searching on specified regions is an important application form of airborne multi-sensor cooperating. In comprehensive consideration of the cueing sensor observation error and target's velocity error, a successful cueing probability density model is established. An optimized target searching strategy satisfied the requirement of timeliness, successful cueing probability and false cueing probability is presented. The searching strategy and performance index are calculated under multi-scenario by using the stepwise optimization method. The simulation result shows that in comparison with the traditional method the proposed method can meet the requirements of successful cueing probability, through increase little beam positions and simultaneously can decrease the false hand-off probability obviously.

**Key words:** passive sensor; AESA radar; cueing and handoff; searching strategy

传感器之间的指示是指利用一个传感器观测或跟踪的数据引导另一个传感器指向目标,通过被指示传感器的探测信息来确认获取的目标。当目标即将脱离指示传感器视域,或者该传感器负载过多时,

应将任务移交给其他传感器以保证对目标的持续观测即传感器之间对目标的交接<sup>[1]</sup>。国内外学者也有将目标指示与交接描述为传感器间的交叉提示(Cross-Cueing)的<sup>[2-4]</sup>。文献[5]研究了组网雷达间

**收稿日期:** 2015-02-08

**基金项目:** 航空科学基金资助项目(20145596025)

**作者简介:** 唐书娟(1983—),女,内蒙古赤峰人,讲师,博士生,主要从事预警机传感器管理、雷达信号处理等研究。E-mail: busybring@163.com

**引用格式:** 唐书娟,许蕴山,肖冰松. 无源传感器引导 AESA 雷达目标搜索[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(3):35-40. TANG Shujuan, XU Yunshan, XIAO Bingsong. Research on Passive Sensor Cueing of AESA Radar for Target Searching [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(3): 35-40.

的目标指示问题,将交叉提示过程总结为雷达指示信息、指示坐标变换以及雷达搜索波位编排 3 项内容。文献[6~8] 分析了在不同传感器之间的指示交接性能。文献[9]研究了集中配置多目标情况下IRST对雷达的引导问题。文献[10]针对反潜作战中静音潜艇的威胁,研究了基于被动声纳传感器指示多基地主动声纳传感器的融合算法,从降低错误跟踪概率的角度研究了指示交接的性能。

### 1 目标引导模型

无源传感器引导 AESA 雷达过程中必须进行两方面的处理:一方面是指示传感器向被指示传感器提供目标的充分信息;另一方面是被指示的传感器必须到指定的范围内搜索指定的目标,并证实已经捕获了该目标。

图 1 给出了一个无源传感器对 AESA 雷达进行引导的示意图,其中  $FOV_{\theta_1}$  和  $FOV_{\varphi_1}$  分别是无源传感器方位和俯仰的视域范围, $FOV_{\theta_2}$  和  $FOV_{\varphi_2}$  是 AESA 雷达方位和俯仰的视域范围。通常无源传感器有较大的视域(FOV),而 AESA 雷达具有较小的视域。

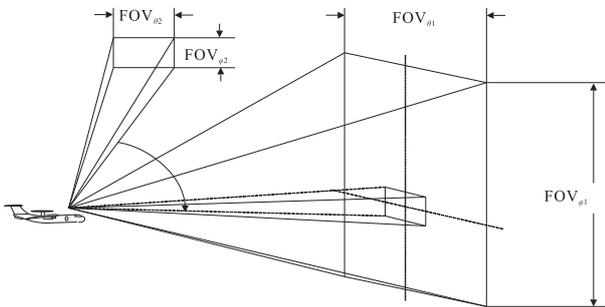


图 1 无源传感器引导 AESA 雷达示意图  
Fig.1 Passive sensor cueing of AESA radar

#### 1.1 指示成功概率

无源传感器对目标  $i$  的估计值设为  $(\hat{\theta}_i, \hat{\varphi}_i)$ , 假设观测误差标准差为  $(\sigma_{\theta_i}, \sigma_{\varphi_i})$ 。若在无源传感器观测时刻目标的真值为  $(\theta_i, \varphi_i)$ , 则该目标出现在交接空域的概率密度可表示为:

$$f_i(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\theta_i}\sigma_{\varphi_i}} \exp\left(-\frac{(\theta - \hat{\theta}_i)^2}{2\sigma_{\theta_i}^2} - \frac{(\varphi - \hat{\varphi}_i)^2}{2\sigma_{\varphi_i}^2}\right) \quad (1)$$

在引导期间内,由于载机平台和目标的运动特性,可能会引起方位和俯仰的偏差,设最大偏差为  $(S_{\theta mi}, S_{\varphi mi})$ 。若令  $(\Theta_i, \Phi_i)$  表示在引导结束时目标方位和俯仰的真值,由于目标的实际运动的未知性,可以认为实际位置的偏差在最大偏差范围内服从均匀分布。

综合考虑传感器量测误差和目标运动产生的位

置偏差,令  $Q_a$  表示目标的真方位在 AESA 雷达方位视域范围内的事件,  $Q_e$  表示目标的真俯仰在 AESA 雷达的俯仰视域范围内的事件,则无源传感器对 AESA 雷达的指示成功率可以定义为事件  $Q$  发生的概率,记为  $P_d(Q)$ 。令  $F_{\theta_2} = FOV_{\theta_2} / 2$  则目标在引导结束时仍位于雷达视域范围内应满足的条件为:

$$\begin{aligned} P(Q_a) &= P\{-F_{\theta_2} \leq \Theta_i - \hat{\theta}_i \leq F_{\theta_2}\} \\ &= P\{\Theta_i - F_{\theta_2} \leq \hat{\theta}_i \leq \Theta_i + F_{\theta_2}\} \quad (2) \\ &= E\{P\{\Theta_i - F_{\theta_2} \leq \hat{\theta}_i \leq \Theta_i + F_{\theta_2} | \Theta_i\}\} \end{aligned}$$

式中:  $E[\cdot | \Theta_i]$  代表对随机变量  $\Theta_i$  求均值。令  $m = \Theta_i - \theta_i$ , 并利用标准高斯分布  $\Phi(x) + \Phi(-x) = 1$  的性质将上式化简为:

$$P(Q_a) = \frac{1}{2S_{ma\theta} - S_{ma\theta}} \int_{-S_{ma\theta}}^{\theta + S_{ma\theta}} \left\{ \Phi\left(\frac{m + F_{\theta_2}}{\sigma_{\theta_i}}\right) - \Phi\left(\frac{m - F_{\theta_2}}{\sigma_{\theta_i}}\right) \right\} d\theta_i \quad (3)$$

设  $p_m(t) = \int_{(t-F_{\theta_2}/\sigma_{\theta_i})}^{(t+F_{\theta_2}/\sigma_{\theta_i})} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp^{-x^2/2} dx$ , 则原式可化简为:

$$P(Q_a) = \frac{1}{S_{ma\theta}} \int_0^{S_{ma\theta}} p_m(t) dt \quad (4)$$

同理  $P(Q_e)$  可化简为:

$$P(Q_e) = \frac{1}{S_{me\varphi}} \int_0^{S_{me\varphi}} p_n(t) dt \quad (5)$$

则指示成功概率可以化为:

$$\begin{aligned} P_d(Q) &= P(Q_a)P(Q_e) = \\ &= \frac{1}{S_{me\varphi}} \frac{1}{S_{ma\theta}} \int_0^{S_{me\varphi}} p_n(t) dt \int_0^{S_{ma\theta}} p_m(t) dt \quad (6) \end{aligned}$$

由于在交接空域中可能出现多个目标,在制定 AESA 雷达搜索策略之前,首先需要明确判决空域  $Z_0$ , 即在此空域内捕获到的目标,才判定其为交接目标。若将公式(6)简写成  $f_i(z)$ ,  $P_i$  表示第  $i$  号目标在某一空域  $D_k$  内出现的概率:

$$P_i = \int_{D_k} f_i(z) dz \quad (7)$$

为了确保在多目标条件下准确的完成目标交接,定义判决空域  $Z_0$  满足

$$Z_0 : \{D | P_0 > \sum_{i=1}^N P_i\} \quad (8)$$

#### 1.2 搜索空域与误交接概率

当无源传感器提供引导信息, AESA 雷达必须通过波束控制在指定的搜索空域内,依据一定的搜索策略搜索目标,当指示成功率达到某一门限值时,完成目标捕获。

定义搜索空域为 AESA 雷达在交接过程中搜

索的空域,用  $\Omega$  表示。以波位为单位描述搜索空域的大小,假设各个波位无相交空域,则搜索空域可表示为  $\Omega = \{\Omega_j\}_{j=1}^{N_0}$ 。

$N_0$  是搜索波位数。由于交接时效性的要求,假设 AESA 雷达搜索时间上限为  $T_0$ ,单个波位驻留时间为  $t_0$ ,则在限定的时间内最多的搜索波位数为

$$N_0 = \lfloor T_0/t_0 \rfloor \quad (9)$$

由于多目标影响,当雷达在指定空域内搜索时如果只追求第 0 号目标的高出现概率,有可能出现对于非交接目标也是高概率的情况,可能导致对正确目标的失败捕获。

图 2 是指示区域内存在 3 个目标时,根据目标落入概率模拟 100 次得到的每个目标在空域内的位置分布示意图。当空间内目标分布密集时,雷达在某些波位上搜索时可能会捕获到错误的目标,且出现错误捕获的波位会随指示误差的增大而增多。

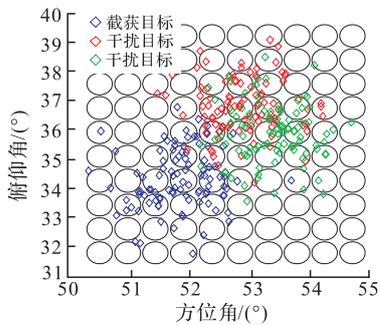


图 2 多目标位置分布

Fig.2 Multi-targets location distribution

为量化干扰目标对雷达捕获的影响,定义误交接概率  $P_f$  为捕获到的目标为非 0 号目标的概率,即:

$$P_f = \int_{\Omega} \sum_{i=1}^N f_i(z) dz / \int_{\Omega} \sum_{k=0}^N f_k(z) dz \quad (10)$$

雷达搜索空域的确定直接关系到 AESA 雷达搜索目标的性能。如果搜索空域过大,会增加目标交接时间,不能满足交接时效性要求。但若搜索空域过小,目标可能不在雷达搜索区内。对于机械扫描雷达空域大小一般取  $(\theta, \varphi) = \pm 3\sigma$ ,其中  $\sigma$  为引导信息目标指向的方差<sup>[11]</sup>,采用分行扫描或者锯齿扫描的方式搜索目标<sup>[12]</sup>。

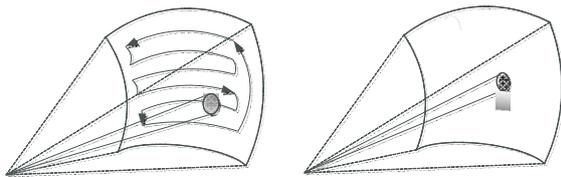


图 3 分行扫描和锯齿扫描

Fig.3 Raster scanning and zigzag scanning

然而 AESA 雷达波束指向可以灵活控制,在引

导条件下对于感兴趣的搜索区域,通过合理的搜索策略,可以满足对目标的高捕获概率、低误交接概率和交接时效性要求。AESA 雷达搜索空域是由目标捕获的时间内扫描过的波位集合构成的,因此在搜索之初搜索空域是不确定的。

## 2 AESA 雷达搜索策略分析

### 2.1 搜索策略优化

AESA 雷达搜索策略由搜索波位的位置和波位编排的顺序确定。对于搜索空域中可能存在多目标的情况,考虑如下的搜索策略:当 AESA 雷达对目标的指示成功率达到一定的门限值记为  $P_0$  后,无需再次扩大搜索空域<sup>[13]</sup>,当存在多个目标时误交接概率应当低于一定的门限值  $P_{f0}$ 。用搜索波位数限制交接时效性。

搜索策略的优化公式可以表示为:

$$\begin{aligned} \Omega_{opt} = \operatorname{argmax} P_d \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \int_{\Omega} f_0(z) dz \geq P_0 \\ \int_{\Omega} \sum_{i=1}^N f_i(z) dz / \int_{\Omega} \sum_{k=0}^N f_k(z) dz \leq P_{f0} \\ N(\Omega) \leq N_0 \\ \Omega \subset Z_0 \end{array} \right. \quad (10) \end{aligned}$$

当搜索空域内为单目标时,合理的搜索策略按照目标出现概率由大到小的顺序依次搜索。当搜索空域内有多个目标时,合理的搜索策略是在满足捕获概率、交接时效性要求的前提下,使误交接概率低于门限值。

若对  $N_0$  个波位求全局最优解,需要的计算量将非常大,可能会影响目标交接的时效性。因此采用分布优化的思想,认为搜索空域的划分是在已确定  $k$  个搜索波位的前提下增加第  $k+1$  个波位,保证新增一个波位组成新的搜索空域使捕获概率最大,等价于选择目标出现概率最大的波位进行搜索。

假设搜索波位集合表示为  $\{\Omega_j\}_{j=1}^{N_0}$ ,由于波位内的概率可加,定义 AESA 雷达在波位  $j$  上的指示成功率和误交接概率分别为:

$$P_d^j = \int_{\Omega_j} f_0(z) dz \quad \text{和} \quad P_f^j = \frac{\int_{\Omega_j} \sum_{i=1}^N f_i(z) dz}{\int_{\Omega_j} \sum_{k=0}^N f_k(z) dz}$$

则在整个搜索空域内的指示成功率和误交接概率分别为:

$$P_d = \sum_{j=1}^{N_0} \int_{\Omega_j} f_0(z) dz \quad (11)$$

$$P_f = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \int_{\Omega_j} \sum_{i=1}^N f_i(z) dz}{\sum_{j=1}^{N_0} \int_{\Omega_j} \sum_{k=0}^N f_k(z) dz} \quad (12)$$

因此,对于式(10)的全局优化可采用分步优化的方法。

## 2.2 仿真计算步骤

由于优化过程可看做是对  $N_0$  个波位的分步优化,因此优化过程步骤如下:

**步骤 1** 在指示传感器视域内确定波位指示成功率最大的  $N_0$  个波位,这  $N_0$  个波位组成初始搜索空域  $\Omega$ 。

**步骤 2** 计算空域  $\Omega$  内的误交接概率是否超过了门限值  $P_{f0}$ 。

**步骤 3** 若  $P_f < P_{f0}$ ,选取  $P_d$  最大的波位记为  $\Omega_{d0}$ ,若  $p_d^{i0} \geq P_0$ ,算法结束停止搜索。花费时间  $t_0$ ,搜索空域为  $\Omega_{d0}$ 。

**步骤 4** 若  $p_d^{i0} < P_0$ , $\Omega$  中剩余的  $N_0 - 1$  个波位记作  $\bar{\Omega}_d$ ;在  $\bar{\Omega}_d$  中选取  $P_d$  最大的波位记为  $\Omega_{d1}$ ,若  $p_d^{i0} \geq P_0$ ,算法结束停止搜索。花费时间  $2t_0$ ,搜索空域为  $\Omega = \{\Omega_{dj}, j = 0, 1\}$ 。

**步骤 5** 类似步骤 3、4 的依次搜索,直到在搜索空域内的  $p_d = \sum_{i=0}^{N-1} p_d^i \geq P_0$ ,算法结束停止搜索。花费时间  $Nt_0$ ,搜索空域为  $\Omega = \{\Omega_{dj}, j = 0, 1, \dots, N-1\}$ 。

**步骤 6** 步骤 2 之后,若  $P_f > P_{f0}$  在搜索空域  $\Omega$  内找出误交接概率最大的波位称为舍弃波位,记为  $\Omega_{f1}$ ,剩余的  $N_0 - 1$  个波位视作新的搜索空域  $\Omega$ ;计算  $\Omega$  上的误交接概率。若  $P_f < P_{f0}$  执行步骤 3 到步骤 5 结束。

**步骤 7** 若  $P_f > P_{f0}$  重复步骤 6,直到  $p_d(\Omega) \geq P_0$  实现目标捕获,或者是  $p_d(\Omega) < P_0$ ,交接失败结束。

## 3 仿真验证

本文从不同传感器牵引精度出发,设置了 4 种场景进行仿真验证。设无源传感器引导 AESA 雷达需要捕获的目标位置的估计值为  $[54^\circ, 37^\circ]$ 。IRST 角度测量的精度较高,设其观测误差标准差为  $[0.3^\circ, 0.3^\circ]$ ,ESM/CSM 等传感器角度测量精度较差,设其观测误差标准差为  $[2^\circ, 2^\circ]$ ,设雷达波束宽度为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,捕获概率门限值设为 80%,误交接概率门限值设为 15%。交接时效性要求设为 60 个波位。无源传感器视域一般较大,本文选择  $10^\circ \times$

$10^\circ$  范围内展示搜索波位及其编排顺序。

场景 1:单目标精确引导(见图 4)。当 IRST 传感器牵引 AESA 雷达时,属于这种情况。

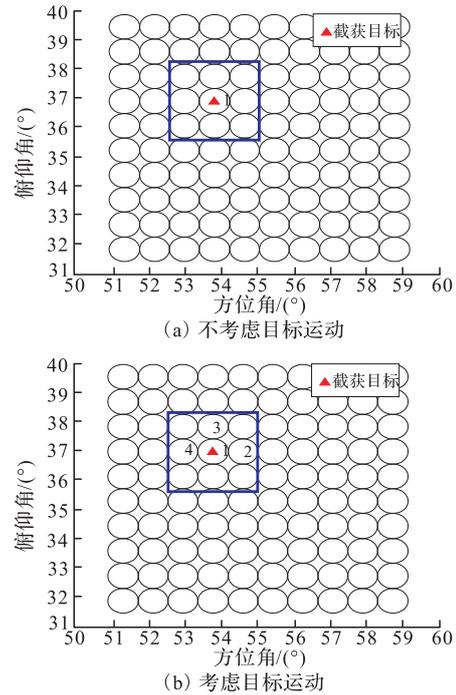


图 4 单目标精确引导 AESA 雷达的波位编排  
Fig.4 Single-target accurate cueing AESA radar beam position arrangement

图 4 是单目标精确引导条件下 AESA 雷达波位编排的结果。图 4(a)是不考虑目标相对运动时的波位编排。图中表达的含义是,当指示传感器测角精度高于 AESA 雷达传感器测角精度时,若不考虑目标运动 AESA 雷达只需要对准牵引信息的位置进行搜索,就可直接完成目标捕获。本文场景下,捕获概率为 81.8%,达到捕获概率门限值。图 4(b)表达了当目标与载机之间发生相对运动时 AESA 雷达的搜索策略。由于空战场目标运动的特性,这种相对运动几乎是必然存在的,然而由于空基预警探测系统传感器作用距离较远,因此相对运动偏差并不会太大。本文仿真时设  $S_m$  为  $[0.5^\circ, 0.5^\circ]$ 。通过图 4(b)可以得到如下结论:考虑到目标与载机的相对运动,AESA 雷达对准牵引信息的位置进行搜索的方式不能达到捕获概率的门限,文中仿真结果为 57.9%。AESA 雷达必须经过几个波位的搜索才能保证目标成功捕获。在仿真中,经过 4 个波位的搜索,捕获率达到 85.2%,目标捕获成功。图 4 中的蓝色实线框是根据  $3\sigma$  准则确定的搜索空域,显然本文提出的搜索方法降低了搜索空域范围,消除了搜索的盲目性,提高了搜索时效性。

场景 2:单目标粗略引导。当 ESM/CSM 传感器牵引 AESA 雷达时,属于这种情况。

图 5 是单目标粗略引导条件下 AESA 雷达波位编排的结果。从图中可以看到,粗略引导条件下, AESA 雷达需要在更大范围内搜索才能确保捕获目标。不考虑目标运动时经过 40 个波位,捕获概率达到 80.5%,完成目标的捕获。考虑目标运动时经过 42 个波位,捕获概率达到 80.3%,完成目标捕获。2 种情况差别不大,这是由于运动偏差与传感器量测误差相比小得多。若基于  $3\sigma$  准则,搜索空域为目标估计值周围的 144 个波位,远大于本文提出方法的搜索空域。

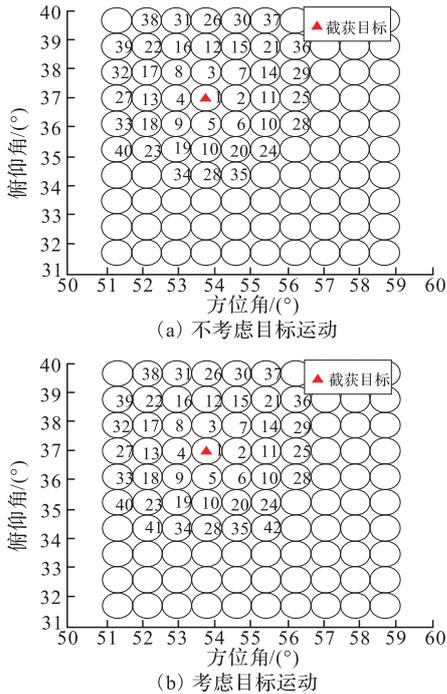


图 5 单目标粗略引导 AESA 雷达的波位编排  
Fig.5 Single-target rough cueing AESA radar beam position arrangement

场景 3:多目标精确引导。当 IRST 传感器牵引 AESA 雷达时,由于 IRST 精度较高,在一定空域内可能搜索到多个目标 AESA 雷达却不能区分,此时雷达按照单目标的搜索方法可能会造成较高的误交接概率。尤其是目标运动偏差与引导传感器量测误差可以比拟的时候,造成误交接的可能性更大。为此设置以下场景进行仿真验证。

假设 IRST 在需要交接目标附近还探测到另外 2 个目标,记做干扰目标。位置估计值分别为  $[54.5^\circ, 38^\circ]$  和  $[55^\circ, 37.5^\circ]$ 。相对运动偏差  $S_m$  为  $[0.5^\circ, 0.5^\circ]$ 。

图 6 是多目标精确引导条件下 AESA 雷达波位编排的结果。从图中可以看到,由于考虑了干扰目标的影响,舍弃了误交接概率较高的波位,选择了偏离干扰目标的波位。由于要满足捕获概率门限值要求,搜索波位总数有所增加。进一步计算图 6(a) 中搜索策略的捕获概率 85.2%,误交接概率高达

32.8%。图 6(b)中捕获概率为 81.2%,误交接概率下降到 6.5%。因此在多目标精确引导条件下,按照本文提出的搜索策略通过改变搜索波位和适当增加搜索波位的方法,降低了误交接概率。

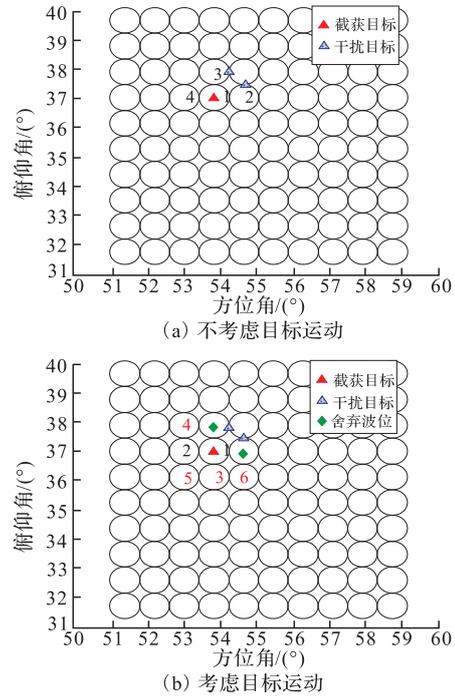


图 6 多目标精确引导 AESA 雷达的波位编排  
Fig.6 Multi-targets accurate cueing AESA radar beam position arrangement

场景 4:多目标粗略引导。当 ESM/CSM 传感器牵引 AESA 雷达时,由于 ESM/CSM 精度较低,搜索到多个目标的估计值会偏离交接目标较远,然而由于测量误差较大,如果时效性要求较高可能会产生交接失败的现象。

假设 ESM/CSM 在需要交接目标附近还探测到另外 2 个目标,记做干扰目标。位置估计值分别为  $[56^\circ, 40^\circ]$  和  $[58^\circ, 39^\circ]$ 。相对运动偏差  $S_m$  为  $[0.5^\circ, 0.5^\circ]$ 。

图 7 是多目标粗略引导条件下 AESA 雷达波位编排的结果。与场景 3 类似,搜索策略通过远离干扰目标,增加搜索波位的方式满足捕获要求,同时降低误交接概率。计算结果图 7(a)中搜索策略的捕获概率 80.3%,误交接概率 49.6%。图 7(b)中捕获概率为 80.1%,误交接概率 14.8%。

由于文中仿真时效性要求设为 60 个波位,可以推测,若时效性要求提高,则图 7(b)方法就会由于超过时效性要求导致交接失败。在实际探测过程中,交接时效性、指示成功率门限值过高、引导精度太差、目标较密集等因素都有可能造成目标指示交接的失败。因此降低时效性要求(即增加搜索波位数量)、降低指示成功率门限、或者提高误交接概率门限、提高引导信息精度等措施都可以帮助实现数学上的“交接成功”。然而,这些让步除了提高引导信息精度外,都有

可能带来真实目标的交接失败,因此在实际使用时应该结合具体装备谨慎选取参数取值。

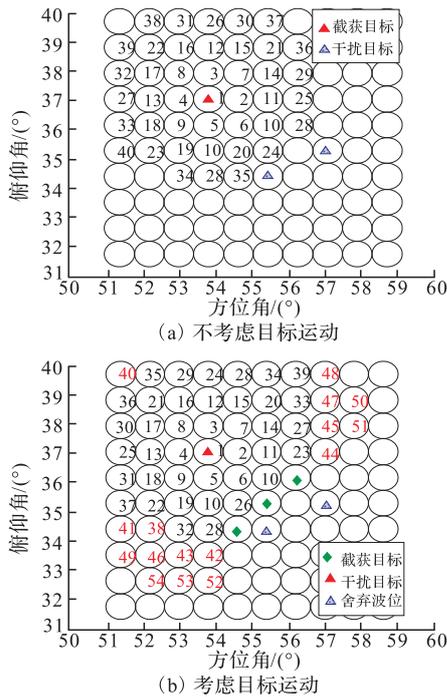


图7 多目标粗略引导 AESA 雷达的波位编排

Fig.7 Multi-targets rough cueing AESA radar beam position arrangement

### 4 结语

无源传感器牵引 AESA 雷达实现协同探测是空基预警探测系统一种重要的传感器协同方式。尤其是在有多个目标,不同运动特性的复杂战场环境下,如何快速准确的进行目标指示与交接是本文研究的核心问题。本文首先考虑了传感器观测误差以及由于目标运动带来的误差,建立了多目标情况下的目标出现概率密度模型,定义了捕获概率、误交接概率、交接时效性,在此基础上提出了在满足时效性及指示成功率和误交接概率约束条件下,以捕获概率高的波位先搜索为准则的搜索策略。通过多种场景下的仿真计算,证明了本文提出的搜索策略能够适应多种复杂场景,在保证捕获概率、交接时效性、降低误交接概率等方面具有综合优势。文章研究成果为无源传感器牵引有源传感器协同探测目标指示与交接的实现提供了技术支持。

### 参考文献(References):

[1] A Benaskeur, H Irandoust. Sensor Management for Tactical Surveillance Operations [R]. North Quebec City: Defence R&D Canada, 2007.

[2] Ng G W, Ng K H, Wong L T. Sensor Management Control and Cue[C]//The Third International Conference on Information Fusion. Singapore: [s.n], 2000.

[3] 樊浩, 黄树彩, 高美凤. 多传感器交叉提示多目标探测动态

联盟技术研究[J]. 宇航学报, 2013(11): 2381-2386.

FAN Hao, HUANG Shucui, GAO Meifeng. Research on Technique of Multi-target Detection Using Multi-sensor Cross-cueing Based on Dynamic Coalition[J]. Journal of Astronautics, 2013(11): 2381-2386. (in Chinese)

[4] Mahendra Mallick, Vikram Krishnamurthy Ba-Ngu Vo. Integrated Tracking, Classification, and Sensor Management [M]. Canada: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013.

[5] Blackman S, Popoli R. Design and Analysis of Modern-tracking System[M]. Massachusetts: Artech House, 1999.

[6] 王国宏, 何友, 毛士艺.IRST 对 3D 雷达引导性能分析[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1-4.

WANG Guohong, HE You, MAO Shiyi. Performance Analysis of Using An IRST Sensor Cueing A 3D Radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1-4. (in Chinese)

[7] 张华睿, 杨宏文, 胡卫东, 等.警戒雷达与跟踪雷达的目标指示交接方法[J].现代雷达, 2011, 33(9): 19-24.

ZHANG Huarui, YANG Hongwen, HU Weidong, et al. Target Cueing and Handoff Method of Two-dimension Early Warning Radar and Tracking Radar[J]. Modern Radar, 2011, 33(9): 19-24. (in Chinese)

[8] 彭锐晖, 王树宗, 吕永胜, 等.异地配置下 ESM 对 2D 雷达的引导分析[J].现代雷达, 2009, 31(1): 13-17.

PENG Ruihui, WANG Shuzong, LÜ Yongsheng, et al. Analysis of ESM cueing 2D radar located at different sites[J]. Modern Radar, 2009, 31(1): 13-17. (in Chinese)

[9] 张华睿, 杨宏文, 郁文贤.多目标情况下 IRST 和雷达的指示交接问题[J].电子与信息学报, 2011, 33(5): 1101-1106.

ZHANG Huarui, YANG Hongwen, YU Wenxian. The Handoff Method of IRST and Radar Under Multi-target Scenario[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(5): 1101-1106. (in Chinese)

[10] Wakayama C, Grimmert D, Rockie R. Active Multistatic Track Initiation Cued by Passive Acoustic Detection[C]//The 15th International Conference on Information Fusion. Singapore: [s.n], 2012.

[11] 路志伟, 李明, 季晓光.基于传感器协同技术的雷达搜索空域研究[J].航空计算技术, 2006, 36(5): 28-31.

LU Zhiwei, LI Ming, JI Xiaoguang. Research on Radar searching Volume Based on Mutil-sensor Cooperation Technology[J]. Aeronautical Computing Technique, 2006, 36(5): 28-31. (in Chinese)

[12] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春.雷达原理[M].北京: 电子工业出版社, 2011.

DING Lufei, GENG Fulu, CHEN Jianchun. Radar Principle [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)

[13] 刘华军, 张荣涛, 耿党辉.组网雷达跟踪弹道导弹的交接班模型研究[J].现代雷达, 2009, 31(6): 20-23.

LIU Huajun, ZHANG Rongtao, GENG Danghui. A Study on Mission Shifting Model of Netted Radars for Tracking Ballistic Missiles[J]. Modern Radar, 2009, 31(6): 20-23. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)