

## 基于贝叶斯理论的电子支援侦察搜索调度方法

杜浩<sup>1</sup>, 毕大平<sup>1,2</sup>, 李敏乐<sup>1</sup>

(1. 电子工程学院, 合肥 230037; 2. 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥 230037)

**摘要:** 针对电子支援侦察中信号的搜索截获问题, 在目标引导侦察接收系统工作的逆向思维指导下, 首先通过 *Beta* 分布对已有情报信息进行融合处理, 再根据贝叶斯方法更新得到下一时刻的概率分布值, 最后结合最优搜索理论和熵的有关内容, 给出了搜索调度的具体方法, 并结合仿真从截获目标次数、侦察区域内不确定性减少量和侦察所用时长三项指标进行分析, 证明了所提搜索调度方法的优越性。

**关键词:** 雷达对抗侦察; 资源调度; 搜索策略; 贝叶斯理论

**中图分类号:** TN971.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2017)01-0014-05

## Scheduling Method of Electronic Support Measure Based on Bayesian Theory

DU Hao<sup>1</sup>, BI Da-ping<sup>1,2</sup>, LI Min-le<sup>1</sup>

(1. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Considering the deficiency of signal interception in Electronic Support Measure (ESM), a new method was proposed under the reverse thinking of taking the characteristics of targets as the primary index. First, the known intelligence from different sources is fused via *Beta* distribution, and then the probability distribution of the next moment is estimated by using the instrument of Bayesian theory. Based on the probability distribution, a resource scheduling method is proposed by using the theory of optimal search and Shannon entropy. Finally, the simulation results proves the effectiveness of this method according to three indexes as the total number of interception, the remained uncertainty of task domain and intercept time used.

**Key words:** radar reconnaissance; resource scheduling; search strategy; Bayesian theory

### 0 引言

雷达对抗侦察是一项长期持续的侦察行动, 侦察获得的电子情报可为战略部署、技战术行动等提供信息支持, 按照侦察的任务和作用, 可以分为情报侦察(ELINT)、雷达寻的和告警(RWR)以及电子支援侦察(ESM)<sup>[1]</sup>。其中, ESM 需要根据实时作战任务, 侦察对方雷达当前的工作状态、配置位置和部署转移等信息, 并在尽量短的时间内对重点目标进行核实验证。电子侦察的工作流程大致分为信号截获、检测、处理分析和辐射源识别<sup>[2]</sup>4个阶段, 而信号截获是后续行动的先决条件。由于侦察区域通常远大于侦察系统的

瞬时覆盖范围, 为了提高信号在一定时间内的截获概率, 需要合理安排频域、空域的搜索时序和停留时长, 设计高效的搜索调度方法。

为了提高截获效率, SELF 和 SMITH<sup>[2]</sup> 较早对该问题进行了研究, 通过采用窗口函数和泊松概率模型对截获事件进行了建模, 推导得到了周期信号最大截获时间的算式, 为后人的研究奠定了基础; 文献[3]对周期脉冲信号的截获问题进一步讨论, 采用了数论和丢番图近似的方法对侦察系统在不同频段的停留时间进行了分配, 但该方法需要详尽、准确的先验信息进行引导; 文献[4]研究了先验信息不充分情况下的优化搜索问题, 提出了基于连续时间马尔可夫过程的随机搜索方法, 使侦察系统的最大截获时间随雷达扫描周期的增大而线性增长, 但采用的搜索方法为随机方式, 搜索行为的可控性不强; 文献[5]采用遗传算法对信道化接收体制的侦察系统进行研究, 提出的搜索调度方法可在毫秒级控制侦察

收稿日期: 2015-12-11

修回日期: 2016-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(61171170)

作者简介: 杜浩(1990—), 男, 山东莱州人, 硕士生, 研究方向为电子对抗侦察系统。

行为,但该方法中的适应度函数构建过程较为复杂,需要明确对方雷达的方位和载频等信息。

上述搜索方法大多都需要明确目标的方位和载频信息,而在实际应用中上述信息很难精确获知。考虑到雷达对抗侦察作为一项长期持续进行的活动,前期的侦察数据较为详实,侦察记录有迹可循,领域专家对目标有着较为充分的研究,因此在已有先验信息不够精确的情况下,本文提出可以结合目标数据库、专家知识库、已有侦察记录等已知信息进行数据的融合处理,对目标的空域、频域区间分布做出初步的推断;通过贝叶斯方法依据每一步的侦察结果,实时更新各区间的概率分布值;再根据熵的变化针对性地引导侦察的频率和方位,每一步的停留时长借助最优搜索理论进行确认,由此形成高效的搜索调度方法。

## 1 情报信息的收集整理

ESM 行动的情报信息来源广泛,包括前期的侦察记录、领域专家的经验判断、系统仿真模拟以及友邻单位的情报支援等。这些数据反映了待侦察目标过去的行为规律和状态预判,具有一定的参考价值。通常通过充分利用已有的情报信息可为后续的侦察提供指引,调整搜索的优先级、频段、方位等,如图1所示。

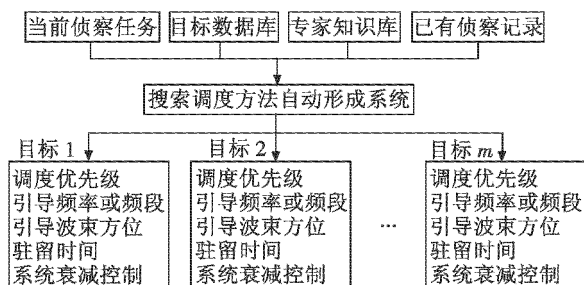


图1 搜索调度方法的形成原理

Fig.1 The principle of search scheduling method

目标在空域的先验信息可以根据历史数据获取;对于频域信息的获取既要参考已有情报信息,同时又要防止目标启用备用频段工作,相关先验信息的分析整理需要兼顾历史数据和雷达的器件工艺水平联合判定,下面进行详细分析。

### 1.1 空域信息的分析整理

已有情报信息通常可以提供待侦察目标在过去时间里侦察空域内的出现记录,但由于探测存在虚警、漏警、误报、漏报等系统或人工因素,目标的部署位置、实际工作频率也存在变动的可能,需要对大量已有数据进行整理和筛选。本文采用概率分布拟合的方法,根据历史数据拟合得到概率分布曲线,再根据侦察天线的波束宽度得到每一个待侦察区间内目标的先验概率。概率分布拟合采用  $Beta$  分布函数进行拟合,

$Beta(\alpha, \beta)$  分布含有两个超参数,根据参数取值的不同,  $Beta$  分布能够逼近多种分布形式,如正态分布 ( $\alpha = \beta = 4$ )、均匀分布 ( $\alpha = \beta = 1$ )、瑞利分布 ( $\alpha = 2, \beta = 3.4$ )、梯形分布 ( $\alpha = \beta = 2$ ) 等<sup>[6]</sup>。在数据处理中统一采用  $Beta$  分布进行表述,再根据样本信息估算分布参数,可以不用预先判断数据的分布形态,简化计算。此外,  $Beta$  分布是有界函数,与实际问题更加符合。

雷达空域位置的先验分布函数表达式为

$$Beta(\varphi, \alpha, \beta, a, b) = \frac{1}{(b-a)B(\alpha, \beta)} \left( \frac{\varphi-a}{b-a} \right)^{\alpha-1} \left( 1 - \frac{\varphi-a}{b-a} \right)^{\beta-1} \quad a \leq \varphi \leq b \quad (1)$$

式中:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 z^{\alpha-1} (1-z)^{\beta-1} dz \quad \alpha, \beta > 0; \quad (2)$$

$$z = \frac{\varphi-a}{b-a} \quad (3)$$

$Beta$  分布的超参数  $\alpha, \beta$  可以利用已有数据求解均值  $E(\varphi)$  和方差  $var(\varphi)$  得到<sup>[7]</sup>

$$\begin{cases} \alpha = \frac{[E(\varphi) - a]^2 [b - E(\varphi)]^2 - var(\varphi) [E(\varphi) - a]}{var(\varphi) \cdot (b - a)} \\ \beta = \frac{[E(\varphi) - a]^2 [b - E(\varphi)]^2 - var(\varphi) [b - E(\varphi)]}{var(\varphi) \cdot (b - a)} \end{cases} \quad (4)$$

将分布曲线在对应的波位区间进行测算可得到目标在各波位区间的分布概率  $\pi_{\varphi(k)}$ , 即

$$\pi_{\varphi(k)} = \int_{\varphi_{k_{\min}}}^{\varphi_{k_{\max}}} Beta(\varphi, \alpha, \beta, a, b) d\varphi \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中:  $[\varphi_{k_{\min}}, \varphi_{k_{\max}}]$  为波位  $k$  的角度覆盖范围;  $M$  为侦察空域划分的波位区间数。

### 1.2 频域信息的分析整理

根据已有数据,参照空域信息的处理方法同样可以得到目标在频域的先验分布函数  $Beta(f, \alpha', \beta', a', b')$ 。但是,由于雷达通常会留有与平时工作频率具有一定差异性的备用频段以便在重要任务中使用,如果侦察系统在对雷达探测时只参考历史数据进行调度,则可能存在搜索盲点。

考虑到雷达受装载平台、天线尺寸、射频器件、工艺水平等因素的制约,为保证侦察探测的可靠执行,雷达备用频段与常用频段会有所区别,但频率差值不会太大,仍可借助已有情报信息缩小对雷达载频的探测范围。参照装备可靠性检验的贝叶斯方法<sup>[8]</sup>,引入继承因子  $\rho$  构造雷达载频的混合先验分布表达式

$$\pi_f = \rho \cdot Beta(f, \alpha', \beta', a', b') + (1 - \rho) \cdot [u(f - f_{\min}) - u(f - f_{\max})] \quad \rho \in [0, 1] \quad (6)$$

式中:  $f_{\min}$  为同技术体制雷达工作频率的理论值下限;  $f_{\max}$  为同技术体制雷达工作频率的理论值上限。对理

论上、下限频率变化区间取均匀分布,既能防止探测频点的遗漏,又能够比全域侦察搜索范围小。式中, $\rho$ 值表示了当前侦察任务中,对方雷达探测行为与过去行为规律的相似程度。 $\rho$ 值确定有两种方法:一种是依靠专家经验进行赋值;另一种是根据已有记录与实际观测到的数据集的相似程度的度量,用两总体的拟合优度检验进行实时的修正。

结合侦察接收机的瞬时频率覆盖范围对雷达载频的混合先验分布函数进行等区间的划分(区间总数为 $N$ ),区间 $i$ 内存在雷达信号的概率为 $\pi_{f(i)}$ ,即

$$\pi_{f(i)} = \int_{f_{i,\min}}^{f_{i,\max}} \pi_f df \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

值得注意的是,对不同来源的先验信息进行整合处理时,还应考虑不同信息来源的分布一致性与可信性,不同先验分布所提供的信息质量是不同的,甚至有时运用不同的先验分布进行统计推断,可能得出完全相反的结论<sup>[9]</sup>。因此,对先验信息进行分析时需考虑多个验前信息之间的一致性以及验前分布本身的可信性,再进行融合汇总。

## 2 基于贝叶斯方法的概率分布更新

通过对已有数据进行分析整理,可以得到目标在空域和频域不同区间处的先验分布概率,这些概率可作为起始时刻 $t_n$ 的概率值。目标的概率分布可作为实时侦察的调度依据,雷达对抗侦察系统在搜索过程中将不断截获到电磁信息,根据搜索结果,目标在不同区间的概率分布将随之更新,更新得到的概率分布又可以为下一时刻的搜索调度提供信息,从而依次递推得到整个搜索调度流程。下面以目标在空域的概率分布递推计算为例(频域的概率分布更新方法相同),采用贝叶斯方法,依据目标在 $t_n$ 时刻的概率值计算得到目标在 $t_{n+1}$ 时刻的概率分布。

令 $P_d$ 表示接收机的截获概率, $P_f$ 为虚警概率, $H_k = 1$ ,表示第 $k$ 个波位存在目标( $H_k$ 取0表示不存在目标), $z_k = 1$ ,表示在波位 $k$ 探测到目标( $z_k$ 取0表示未探测到目标),根据 $t_n$ 时刻的搜索策略分别得到侦察位置和未侦察位置两种类型的概率分布更新。

### 1) 侦察位置的概率更新。

发现目标的情况下,该区间 $t_{n+1}$ 时刻的概率值

$$\pi_{\varphi(k)}(t_{n+1}) = P(H_k = 1 | z_k = 1) = \frac{\pi_{\varphi(k)}(t_n)P_d}{\pi_{\varphi(k)}(t_n)P_d + (1 - \pi_{\varphi(k)}(t_n))P_f} \quad (8)$$

未发现目标的情况下,该区间 $t_{n+1}$ 时刻的概率值

$$\pi_{\varphi(k)}(t_{n+1}) = P(H_k = 1 | z_k = 0) = \frac{\pi_{\varphi(k)}(t_n)(1 - P_d)}{\pi_{\varphi(k)}(t_n)(1 - P_d) + (1 - \pi_{\varphi(k)}(t_n))(1 - P_f)}. \quad (9)$$

### 2) 未侦察到的位置的概率更新。

其他侦察区间发现目标的情况下,该侦察区间 $t_{n+1}$ 时刻的概率值为

$$\pi_{\varphi(k)}(t_{n+1}) = P(H_k = 1 | z_k = 1) = \frac{\pi_{\varphi(k)}(t_n)P_f}{\pi_{\varphi(k)}(t_n)P_d + (1 - \pi_{\varphi(k)}(t_n))P_f} \quad (10)$$

其他侦察区间未发现目标的情况下,该侦察区间 $t_{n+1}$ 时刻的概率值为

$$\pi_{\varphi(k)}(t_{n+1}) = P(H_k = 1 | z_k = 0) = \frac{\pi_{\varphi(k)}(t_n)(1 - P_f)}{\pi_{\varphi(k)}(t_n)(1 - P_d) + (1 - \pi_{\varphi(k)}(t_n))(1 - P_f)} \quad (11)$$

要计算 $t_{n+1}$ 时刻各位置的概率分布,还应知道 $t_n$ 时刻对侦察区间 $j(t_n)$ 的侦察结果。若已知 $j(t_n)$ ,则搜索结果 $z_{j(t_n)}$ 的预测表达式为

$$P(z_{j(t_n)}) = P(z_{j(t_n)} | H_{j(t_n)} = 1) \cdot \pi_{j(t_n)}(t_n) + P(z_{j(t_n)} | H_{j(t_n)} = 0) \cdot (1 - \pi_{j(t_n)}(t_n)) \quad (12)$$

每一次的侦察结果根据式(12)进行预判,再相应地代入式(8)~式(11),即可实现目标概率分布的递推更新。

## 3 频域和空域的侦察调度方法

### 3.1 优化调度指标

根据先验信息对重点目标群进行侦察,需要制定侦察调度的准则,本文采用加权 Shannon 熵作为搜索调度的指标。

单目标的侦察调度,可直接采用 Shannon 熵 $H$ 对搜索前后两个时刻相应区间不确定性的减少量进行度量<sup>[10]</sup>。对于多目标,需要根据每个目标的威胁等级 $W$ 对各目标在各区间熵值进行加权,得到加权 Shannon 熵 $W \cdot H$ 。若 $t_n$ 时刻对 $j(t_n)$ 区域进行侦察,则该侦察行为对各目标不确定性的减少量可以用加权 Shannon 熵算式进行度量。每一步的搜索区间都选择使加权 Shannon 熵变化最大的区间即可得到最佳搜索调度策略。

加权 Shannon 熵计算式为

$$J = \sum_{e=1}^{N_e} W_e \cdot (H_e(t_n) - H_e(t_{n+1} | j(t_n))) \quad (13)$$

式中,

$$H_e(t_n) = - \left[ \sum_{k=1}^M \pi_{e,\varphi(k)}(t_n) + \sum_{i=1}^N \pi_{e,f(i)}(t_n) \right]. \quad (14)$$

### 3.2 每一步调度的最优时长

根据优化调度指标得到每一步的搜索调度区间,每一步的搜索时长可以根据最优搜索理论进行计算,进一步提高侦察调度的效率。

根据最优搜索理论,若目标在侦察的区间内,可认为探测的时间越长则探测到目标的概率越大,由此得到侦察区间 $j$ 的正则探测函数 $b(j, t)$ <sup>[11]</sup>为

$$b(j,t) = 1 - e^{-rt} \quad t \geq 0, r \text{ 为经验常数。} \quad (15)$$

目标的实际发现概率  $P(t)$  可视作目标分布概率  $p_j$  与探测函数  $b(j,t)$  的乘积,即

$$P(f) = \sum_{j=1}^n p_j b(j, f(j)) P_d \quad (16)$$

式中:  $p_j$  为拟侦察区间的概率值(若目标的载频和方位均未知,则  $p_j$  取频域概率分布  $\pi_{f(j)}$  和空域概率分布  $\pi_{e(j)}$  的最大值);  $f(j)$  为每一步调度的搜索时长。

考虑到侦察任务的时效性和系统资源的有限性,假设侦察探测的总时间约束为  $T_0$ ,允许的最大调度次数为  $n$ ,单次调度时长  $f(j)$  为

$$\max P(f) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n f(j) \leq T_0, f(j) \geq 0 \quad (17)$$

构造拉格朗日函数

$$l(j, \lambda, f(j)) = p_j b[j, f(j)] P_d - \lambda [T_0 - \sum_{j=1}^n f(j)] \quad j = 1, \dots, n \quad (18)$$

解得

$$\lambda = e^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{r} \ln [p_j P_d e^{-r f(j)} - T_0]} \quad (19)$$

则每次调度的最佳时长为

$$f^*(j) = \frac{1}{r} \ln (p_j / \lambda) \quad 1 \leq j \leq n \quad (20)$$

### 3.3 侦察调度算法

1) 根据侦察任务和已有情报信息,明确侦察目标(目标数目、各目标威胁等级)和侦察时间上限  $T_0$ ,结合已有情报信息,根据式(1)~式(4)和式(6)得到待侦察目标的空域和频域的概率分布。

2) 根据侦察系统的波位编排和瞬时频率覆盖范围,利用式(5)、式(7)计算得到初始时刻各区间的先验概率值。

3) 假定侦察区间为  $j$ ,通过贝叶斯方法,根据式(8)~式(12)对下一步的侦察调度结果进行估计,并对各区间的概率分布值进行更新。

4) 遍历  $j$  的取值,分别得到相应的加权 Shannon 熵。

5) 选取使加权 Shannon 熵最大的侦察区间为实际侦察区间,最佳侦察时长  $f(j)$  由式(20)确定。

6) 判断侦察用时,若侦察总用时  $\sum_j f^*(j)$  超过最大侦察时长  $T$ ,则算法结束;否则,返回 3) 继续进行下一步搜索。

## 4 仿真结果及分析

仿真实验:假定某次任务需要重点侦察 8 个目标,结合情报数据得到目标在各区间的分布概率,见表 1。

表 1 待侦察目标在各区间的概率分布

Table 1 Probability distribution of threat emitters in each interval

目标编号	区间 1	区间 2	区间 3	区间 4	区间 5	区间 6	区间 7	区间 8	区间 9	目标威胁度
1	0.065	0.110	0.065	0.110	0.300	0.110	0.065	0.110	0.065	5
2	0.125	0.075	0.065	0.085	0.100	0.235	0.180	0.095	0.040	7
3	0.035	0.100	0.175	0.220	0.120	0.075	0.055	0.110	0.110	3
4	0.185	0.305	0.055	0.100	0.210	0.005	0.035	0.035	0.070	1
5	0.120	0.065	0.040	0.095	0.105	0.130	0.230	0.105	0.110	4
6	0.095	0.105	0.210	0.160	0.265	0.065	0.050	0.030	0.020	2
7	0.075	0.160	0.265	0.105	0.050	0.110	0.105	0.085	0.045	6
8	0.039	0.110	0.258	0.146	0.321	0.009	0.017	0.068	0.032	8

侦察接收系统采用 DBF 体制的天线波束和快速调谐本振,能迅速跃迁至待侦察的区间。设目标的工作载频各不相同,侦察系统一次只能选取其中一个频率区间进行搜索,单次侦察过程中,目标未离开原有侦察系统的天线波束的波位覆盖范围。设定如下评价指标,对本文的侦察调度算法的性能进行分析:

- 1) 截获目标信号的次数;
- 2) 侦察区域内不确定性的减少比例

$$\frac{\sum_{e=1}^{N_e} W_e \cdot (H_e(t_n) - H_e(t_0))}{\sum_{e=1}^{N_e} W_e \cdot H_e(t_0)} ;$$

- 3) 侦察调度所用时长  $\sum_j f^*(j)$ 。

现引入周期搜索、随机搜索和最大截获概率搜索 3 种调度方法与本文的调度方法进行对比。其中:周期搜索是以固定时长按照目标威胁度的大小依次在各区间进行搜索;随机搜索方法是每次随机选取一个目标的区间进行搜索,并记录搜索结果;最大截获概率搜索是每次搜索时按照目标的威胁度选取当前时刻下目标存在概率最大的区间进行搜索,并根据搜索结果更新各区间的概率分布。采用蒙特卡罗方法对每种搜索模型均进行 50 次仿真,对仿真结果取均值。

图 2 分别给出了各算法在截获目标信号次数、侦察区域内不确定性减少比例和搜索所用时长 3 项指标上的性能比较。由图可知,综合截获信号次数和侦察区域不确定性减少量两项指标,本文的调度算法性能整体最优,既能够较好地截获目标,又可以有效降低整个侦察

任务区域的不确定性。随机搜索调度方法的性能最差,这是由于该方法每次都是随机选取目标区间进行侦察,搜索的延续性不强,不能利用已有信息对搜索过程进行优化。最大截获概率搜索算法的截获信号次数最高,但是该算法过于依赖先验信息,只对先验信息高的区间进行关注和搜索,整体区域的不确定性仍保持较高水平,对任务侦察区域的有效探测程度并不高,此外,由于以最大截获概率为调度指标,该方法对已截获目标的区间依然会重复侦察,当先验信息不够准确时,该方法的性能将受到影响;周期搜索方法依次对各区间进行侦察,侦察区域内不确定性的减少比例是所有方法中最优的,但该方法在截获目标的效率上不如本文调度方法,周期调度方法截获目标的次数随着调度步骤的增加近似呈现线性增长,但增速较为缓慢。在搜索用时方面,周期搜索采用固定时长对每个区间依次搜索;其他3种方法均根据最优搜索理论确定搜索时长,由于最大截获概率搜索方法每一步都选取目标概率分布最大的区间进行侦察,所以每一步的耗时都比较高;随机搜索方法在每一步的搜索时长呈现无规律性,但整体耗时小于最大截获概率搜索方法;本文的搜索方法前期的搜索用时较长,后期的搜索用时有所降低,这是由于为使整体熵值减小,本文的搜索方法会兼顾先验概率较小的区间进行侦察,根据最优搜索理论,侦察用时与截获概率正相关,所以实际搜索用时也不会高。

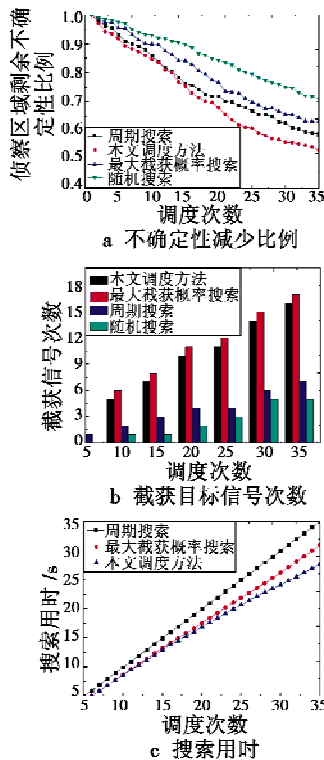


图2 各调度方法的性能对比

Fig. 2 The performance of different scheduling methods

图3分别给出了搜索调度20次后,各区间上单目标出现的概率(图2中的目标编号为5,假定目标位于区间7,即先验信息最大的区间;图3中的目标编号为8,假定目标位于区间4,即先验信息存在偏差)。

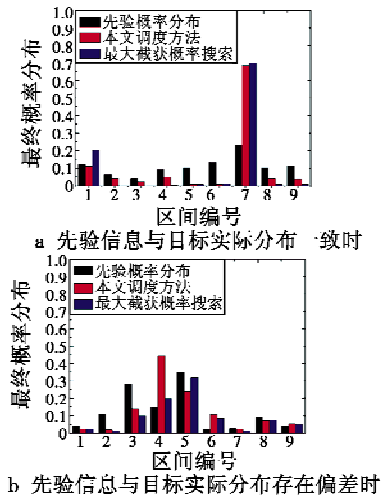


图3 各区间检测到目标的概率分布

Fig. 3 The detection probability distribution of different intervals

如图3所示,周期搜索、随机搜索由于不利用先验信息,两次搜索的性能基本无变化;本文的调度方法在两种情况下的搜索性能均较为稳定,侦察性能相对最优;最大截获概率搜索在先验信息存在偏差时搜索性能下降明显,这是由于侦察系统反复对先验概率最大处进行搜索但一直未发现目标,各波位的概率分布不断根据侦察结果调整,当其他区间出现概率最大值时,侦察系统才会变换搜索区间。

### 5 结束语

本文提出了一种在情报信息不完备情况下的雷达对抗侦察的搜索调度方法。首先对已有先验信息进行融合整理,得到具体的概率分布函数;再根据贝叶斯方法对不同调度时刻的概率分布值进行更新;通过引入加权 Shannon 熵确定调度指标,根据最优搜索理论得到每一步调度时长,从而形成具体的搜索调度流程。通过仿真实验,对不同搜索调度方法在侦察时间内的截获目标信号次数、区域不确定性减少比例和搜索所用时长3项指标进行对比,并对先验信息存在偏差时调度方法的搜索性能进行了分析,证明了本文调度方法的可行性和优越性,在如何利用已有情报信息设计雷达对抗搜索调度方法方面进行了一些探索。

### 参考文献

[1] WILEYRG. 电子情报(ELINT)——雷达信号截获与 (下转第62页)

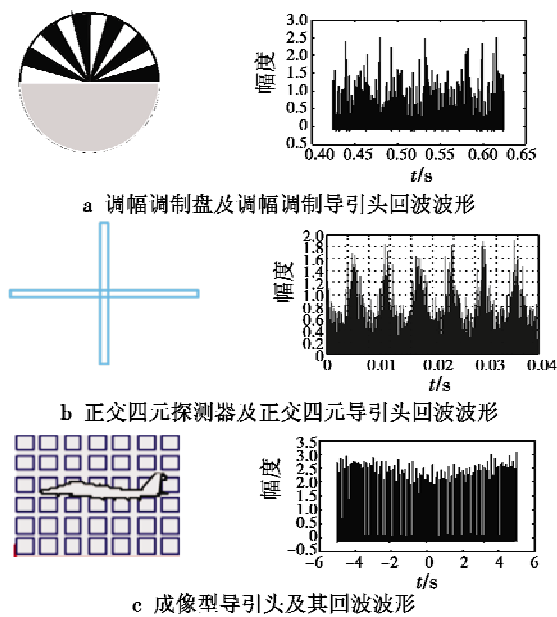


图9 不同类型红外导引头激光回波波形图

Fig. 9 Laser echo signal waveforms of different infrared seekers

图10所示为对成像型导引头干扰前后的成像效果对比图,验证样机通过选择恰当的干扰激光编码实现了多型导引头的高效干扰。

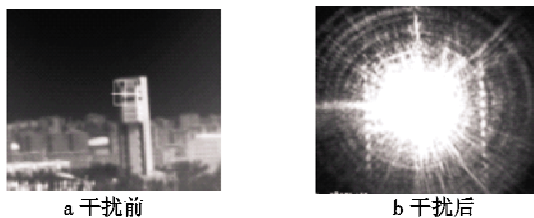


图10 红外导引头激光干扰效果图

Fig. 10 Laser jamming effect of infrared seeker

## 5 结论

闭环定向红外对抗技术是激光定向红外对抗系统的重要发展方向,目前国外已经开展了大量的技术验证工作,但均未形成装备。随着闭环定向红外对抗技术成熟度的提升,未来闭环定向红外对抗系统将有望取代开环定向红外对抗系统,广泛装备于各型飞机平台。为有效提升飞机平台的自我防护能力,建议国内积极开展闭环定向红外对抗技术的研究和产品研制工作,不断提升作战飞机的战场生存能力。

## 参考文献

(上接第18页)

- 分析[M]. 吕跃广,全寿文,王胜开,等译. 北京:电子工业出版社,2008.
- [2] SELF A G, SMITH B G. Intercept time and its prediction [J]. *Communications Radar & Signal Processing*, 1985, 132(4):215-220.
- [3] CLARKSON I V L. Optimization of periodic search strategies for electronic support [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3):1770-1784.
- [4] EL-MAHASSNI E D, HOWARD S D, CLARKSON I V L. A Markov-chain model for sensor scheduling in electronic support[C]//*The 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computing*, IEEE, 2004:2183-2187.
- [5] WINSOR C, HUGHES E J. Optimization and evaluation of receiver search strategies for electronic support [J]. *IET*

- Radar, Sonar and Navigation*, 2012, 6(4):233-240.
- [6] 弗诗松,汤银才. 贝叶斯统计[M]. 北京:中国统计出版社,2012.
- [7] 邢云燕,武小悦. 成败型系统总体下的 Bayes 可靠性试验鉴定方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(2):323-327.
- [8] 王玮,周海云,尹国举,等. 使用混合 Beta 分布的 Bayes 方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 25(9):142-144.
- [9] 刘琦,武小悦. Bayes 方法应用中验前分布选择的一致性与可信性原则[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(11):2356-2359.
- [10] 胡卫东,郁文贤,卢建斌,等. 相控阵雷达资源管理的理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [11] STONE L D. *Theory of optimal search* [M]. New York: Academic Press, 1975.