

多目标情况下IRST和雷达的指示交接问题

张华睿^{*①} 杨宏文^① 郁文贤^②

^①(国防科学技术大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

^②(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200030)

摘要: 指示交接是IRST和雷达协同探测系统的关键环节,但多目标情况下的指示交接问题却鲜有研究。该文研究了在IRST引导下雷达捕获目标时的最优搜索波位编排,并充分考虑了多目标情况下干扰目标对交接性能的影响。对比只考虑单目标时得到的结论,仿真实验验证了该文方法的有效性。

关键词: 雷达; 红外传感器; 指示交接; 多目标

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1101-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00982

The Handoff Method of IRST and Radar Under Multi-target Scenario

Zhang Hua-rui^① Yang Hong-wen^① Yu Wen-xian^②

^①(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Cueing and handoff is the key of IRST and radar cooperatively detective system, but research on handoff method under multi-target scenario is rarely heard. An optimal radar search schedule is proposed under IRST cueing, and influence on performance of handoff caused by disturbed targets is considered. Compared to conclusions gotten under single scenario, the effectiveness of this method is testified by simulation results.

Key words: Radar; InfraRed Search and Track (IRST); Cueing and handoff; Multi-target

1 引言

由于雷达在工作时会产生大量的电磁辐射,因此极易暴露己方位置而遭致敌方的干扰和攻击。为了保护己方雷达,减少辐射时间,可利用红外传感器(IRST)和雷达协同完成探测任务^[1]。在这种工作模式中,首先由IRST对目标进行被动搜索,并对发现的目标进行识别,确定需要跟踪的目标,然后雷达根据IRST的指示信息迅速捕获目标,转入主动跟踪。

IRST与雷达协同探测的关键为目标的指示交接问题,多个文献对其进行过研究。文献[2,3]描述了指示交接的方法和影响成功交接的一些因素。文献[4]介绍了在现代舰艇编队防空作战时,对指示交接的需求及其对作战性能的影响。文献[5-7]分析了在不同传感器之间的指示交接性能。文献[8,9]研究了在预警雷达引导下,相控阵跟踪雷达捕获弹道导弹时的最优波位搜索时序。这些文献均只考虑了单目标背景情况下的指示交接问题。然而在实际作战时,交接空域可能会存在多个目标。此时,邻近目标可能对目标交接造成较大影响,特别是当交接区

域内同时存在我方和敌方目标时,发生敌我目标的误交接事件将带来非常严重的后果。

本文针对多目标情况下IRST和跟踪雷达的指示交接问题展开研究。首先分析了交接搜索策略和评价交接性能的影响因素,然后逐步给出了解决多目标指示交接问题的方法:(1)利用贝叶斯准则计算出了交接目标的判决空域;(2)结合交接性能指标给出了搜索空域的最优化式,并针对优化式子的高计算量,提出了一种次优近似解法;(3)在充分考虑误交接问题的情况下,进行了搜索波位的编排;(4)为了降低积分算法的复杂度,给出了一种数值近似解法。最后的仿真实验表明,本文方法在各种场景下均能有效降低误交接概率。

2 问题描述

假设IRST提供的指示信息表明,在交接空域内有 $N+1$ 个目标,需交接的目标为第0号目标。目标在方位和俯仰上的观测分别为 (θ_i, φ_i) ,观测误差为相互独立的零均值高斯白噪声,标准差为 $(\sigma_{\theta_i}, \sigma_{\varphi_i})$,则各目标在交接空域中出现的概率密度可表示为

$$f_i(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\theta_i}\sigma_{\varphi_i}} \exp\left[-\frac{(\theta - \theta_i)^2}{2\sigma_{\theta_i}^2} - \frac{(\varphi - \varphi_i)^2}{2\sigma_{\varphi_i}^2}\right],$$
$$i = 0, 1, \dots, N \quad (1)$$

2010-09-10 收到, 2011-01-06 改回

国家部委基金资助课题

*通信作者: 张华睿 zhanghuarui2020@sohu.com

为了简洁,在下文中将函数 $f_i(\theta, \varphi)$ 表示为 $f_i(z)$, 关于 $f_i(\theta, \varphi)$ 的多维积分也表示为 $\int_Z f_i(z) dz$ 的形式,

其中 dz 表示 $d\theta d\varphi$, Z 表示积分空域。

IRST 和跟踪雷达的指示交接,就是根据 IRST 的目标指示信息,确定跟踪雷达的搜索策略,并在跟踪雷达上重新捕获该目标的过程。本文假定跟踪雷达为相控阵雷达,则其搜索策略主要包括搜索空域和波位编排顺序两方面的内容。在多目标情况下,指示交接过程的优化评价涉及以下因素:目标的捕获概率、误交接概率和交接所花费的时间。下面将针对这 3 方面要求,制定跟踪雷达的搜索策略,确定最优交接过程。

3 判决域

在制定跟踪雷达的搜索策略之前,首先需要明确判决空域,即在此空域内捕获到的目标,才判定其为交接目标。由于只关注交接目标,因此在判决域外搜索是没有意义的。交接目标判决域的确定可表示成一个多元假设检验问题。定义 $\{H_0, H_1, \dots, H_N\}$ 为 $N+1$ 种可能假设,其中 H_i 表示捕获到的目标为第 i 号目标。根据贝叶斯准则确定第 0 号目标的判决域,其贝叶斯平均代价函数为

$$\begin{aligned} C &= \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N C_{ij} P(D_i, H_j) \\ &= \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N C_{ij} P(D_i | H_j) P(H_j) \\ &= \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N C_{ij} \int_{Z_i} f_j(z) dz P(H_j) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $P(D_i, H_j)$ 表示 H_j 为真时,判定 H_i 成立的概率, C_{ij} 为相应的代价值。 $Z_i, i=0, \dots, N$ 表示第 i 号目标的判决空域。由于交接过程只关注捕获到的目标是否为目标 0, 所以代价值可定义为

$$C_{ij} = \begin{cases} 0, & i=0, j=0 \\ 1, & i=0, j \neq 0 \\ 0, & i \neq 0, j \neq 0 \\ 1, & i \neq 0, j=0 \end{cases} \quad (3)$$

将其代入代价函数,同时设定各个目标的先验概率相等,为常数 P_T , 则得到

$$\begin{aligned} C &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} \int_{Z_i} f_j(z) dz P(H_j) + C_{00} \int_{Z_0} f_0(z) dz P(H_0) \\ &\quad + \sum_{i=1}^N C_{i0} \int_{Z_i} f_0(z) dz P(H_0) + \sum_{j=1}^N C_{0j} \int_{Z_0} f_j(z) dz P(H_j) \\ &= \left(\int_{Z_0} \sum_{j=1}^N f_j(z) dz + \int_{\bar{Z}_0} f_0(z) dz \right) P_T \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \bar{Z}_0 为 Z_0 关于交接全空域的补集。由式(4)可以看出,对于观测 z , 可分别计算 $\sum_{j=1}^N f_j(z)$ 和 $f_0(z)$,

为了使平均代价函数最小,当

$$f_0(z) > \sum_{j=1}^N f_j(z) \quad (5)$$

时,判定观测到的为目标 0。则目标 0 的判决域 Z_0 为

$$Z_0 : \left\{ z \left| f_0(z) > \sum_{j=1}^N f_j(z) \right. \right\} \quad (6)$$

4 搜索空域

搜索空域即跟踪雷达在单次交接过程中最大可能搜索的空域。在确定跟踪雷达的搜索空域时,需综合考虑捕获概率、交接所花费的时间和误交接概率。对于捕获概率,预先设定门限值,要求交接目标在搜索空域 Ω 内出现的概率大于此门限值,同时为了防止浪费搜索资源,在捕获概率已大于门限值时,无需再次扩大搜索空域^[10]。设定捕获概率门限为 P_0 , 此约束条件可表述为

$$P_d = \int_{\Omega} f_0(z) dz > P_0 \quad (7)$$

由于交接的时效性,交接所花费的时间也有限定。若在规定的时间内未找到目标,则认为交接失败,应停止搜索。设单个波位驻留时间为 t_0 , 交接限定时间间隔为 T_0 , 则可确定在此时间段内最多可搜索波位数为

$$N_0 = T_0/t_0 \quad (8)$$

在搜索区域 Ω 内,定义误交接概率 P_f 为捕获到的目标是非 0 号目标的概率,即

$$P_f = \frac{\int_{\Omega} \sum_{i=1}^N f_i(z) dz}{\int_{\Omega} \sum_{k=0}^N f_k(z) dz} \quad (9)$$

在捕获概率门限和交接时效性两个因素的影响已确定的情况下,误交接概率应达到最小。则搜索区域的优化公式可表示为

$$\begin{aligned} \Omega_{\text{opt}} &= \arg \min_{\Omega} P_f \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{array}{l} \int_{\Omega} f_0(z) dz \geq P_0 \\ N(\Omega) \leq N_0 \\ \Omega \subset Z_0 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $N(\Omega)$ 为搜索空域的波位数。特别地,若目标过于密集,不等式

$$\int_{Z_0} f_0(z) dz > P_0 \quad (11)$$

已不能成立。即判决域过小, 整个判决域都已不能满足捕获概率的约束条件。这时需放宽捕获概率门限, 或者接受在判决区域外捕获到的目标。

对于优化式, 若判决空域由 M 个波位组成, 交接时间间隔内可搜索 N_0 个, 则优化计算量约正比于 M^{N_0} 。庞大的计算量会消耗较多的时间, 影响交接的时效性。在此提出一种次优近似解法。

假定最终确定的搜索空域的波位数恰好等于 N_0 , 且各个波位无相交空域, 则搜索空域可表示为

$$\Omega = \{\Omega_j\}_{j=1}^{N_0} \quad (12)$$

误交接概率和捕获概率可转化为

$$\left. \begin{aligned} P_f &= \frac{\int_{\Omega} \sum_{i=1}^N f_i(z) dz}{\int_{\Omega} \sum_{k=0}^N f_k(z) dz} = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \int_{\Omega_j} \sum_{i=1}^N f_i(z) dz}{\sum_{j=1}^{N_0} \int_{\Omega_j} \sum_{k=0}^N f_k(z) dz} \\ P_d &= \int_{\Omega} f_0(z) dz = \sum_{j=1}^{N_0} \int_{\Omega_j} f_0(z) dz \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

定义跟踪雷达在波位 j 的误交接概率和捕获概率分别为

$$P_f^j = \frac{\int_{\Omega_j} \sum_{i=1}^N f_i(z) dz}{\int_{\Omega_j} \sum_{k=0}^N f_k(z) dz}, \quad P_d^j = \int_{\Omega_j} f_0(z) dz \quad (14)$$

依据式(13), 式(14)可知, 若已确定 k 个波位组成的搜索空域, 则新增 1 个波位, 使得 $k+1$ 个波位组成的搜索空域误交接概率最小, 等价于选择增加波位误交接概率最小的波位, 同时注意到波位捕获概率满足可加性, 为此可对这 N_0 个波位分步优化, 逐步求解。次优近似解法步骤如下:

步骤 1 在判决域 Z_0 内确定波位捕获概率最大的 N_0 个波位, 这 N_0 个波位组成搜索空域 Ω ;

步骤 2 从 Ω 中找出波位虚警概率最大的波位 $i^0, i^0 = \arg \max_{i \in \Omega} P_f^i$;

步骤 3 在剩余的波位中找出波位虚警概率小于 $P_f^{i^0}$ 的波位组成的集合 $\bar{\Omega}$,

$$\bar{\Omega} = \left\{ j \mid P_f^j < P_f^{i^0}, j \in (Z_0 - \Omega) \right\}$$

步骤 4 在 $\bar{\Omega}$ 中确定波位捕获概率最大的波位 $j^0, j^0 = \arg \max_{j \in \bar{\Omega}} P_d^j$

步骤 5 将波位 j^0 与 i^0 交换, 组成新的搜索空域 Ω' , $\Omega' = \Omega - \{i^0\} + \{j^0\}$;

步骤 6 若此时目标落入 Ω' 中的概率仍然大于等于门限 P_0 , 则用 Ω' 替换 Ω , 同时在判决域中舍弃波位 i^0 , $Z_0 = Z_0 - \{i^0\}$, 回到步骤 2。若此时目

标落入 Ω' 中的概率小于门限 P_0 , 则算法结束, Ω 即为最终的搜索空域。

5 搜索波位编排

在编排搜索波位时, 单目标情况下的指示交接方法只需考虑如何在最短的时间内捕获到目标, 其编排波位时, 优先检测第 0 号目标出现概率高的波位, 而且捕获到一个目标之后, 即可停止搜索。但是当存在多目标时, 在搜索空域内可能捕获到多个目标, 不能只单纯地追求搜索速度, 还需考虑捕获到的多个目标的筛选和由此引入的误交接问题。

波位误交接概率表述了在单个波位内捕获到目标, 判定其为干扰目标的概率。如图 1 所示(为了简洁, 在此以 1 维图描述), 在波位 A 内, 目标 0 出现的概率较高, 但同时此波位内干扰目标出现的概率也很高, 若将在此波位内捕获到的目标认定为目标 0 时, 会造成较大的误交接概率。反之, 在波位 B 内, 目标 0 并没有在波位 A 内出现的概率高, 但是干扰目标几乎不会在波位 B 内出现, 则在波位 B 内捕获到的目标误交接概率相对较小。在对捕获到的多个目标进行筛选时, 若在 A, B 波位内同时捕获到目标, 确定波位 B 内的目标为交接目标, 可获得较低的误交接概率。因此, 若跟踪雷达已在波位 B 内捕获到一个目标, 已没有必要再去检测波位 A 。同时假定, 在规定时间内搜索到目标均认为同等的完成交接任务, 而且上节已确定了搜索区域, 保证了在此区域内对 0 号目标的捕获概率。因此波位编排时, 只需重点关注误交接概率。在进行交接搜索时, 波位编排以各个波位的误交接概率为基准, 误交接概率小的波位先搜索。这种波位编排方法保证了首次捕获到的目标即为最优筛选目标。因此首次捕获到目标, 即可停止搜索, 无需检测整个搜索空域和筛选最优交接目标, 有效地节约了搜索时间。

6 基于蒙特卡洛采样的算法实现

在本文的算法中, 涉及到在各个波位上的积分运算, 由于 2 维积分运算比较复杂, 很难得到解析形式的积分结果。这里借助蒙特卡洛采样方法来完成积分运算。

蒙特卡洛采样基本原理: 对一个概率分布函数 $p(x)$, 基于其采样 $K \gg 1$ 个采样点 $\{x^i \sim p(x); i = 1, \dots, K\}$, 则 $p(x)$ 可近似地通过采样点表述。即

$$p(x) \approx \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \delta(x - x^i) \quad (15)$$

其中 $\delta(\bullet)$ 表示 Dirac delta 函数。

若 $p(x)$ 难以直接采样, 则另外定义易于计算的, 且与 $p(x)$ 相似的采样函数 $q(x)$ 作为重要度分布函

数。然后基于 $q(x)$ 采样得到采样点 $\{x^i \sim q(x); i = 1, \dots, K\}$, 则概率密度函数 $p(x)$ 近似为

$$p(x) \approx \sum_{i=1}^K w^i \delta(x - x^i) \tag{16}$$

其中 w^i 为第 i 个采样点的归一化权重, 计算式为

$$w^i \propto p(x^i)/q(x^i) \tag{17}$$

按照此思想对目标的分布函数 $f(z)$ 进行采样, 得到采样点 $\{[\theta^i, \varphi^i], w^i\}_{i=1}^K$, 采样点落入跟踪雷达各个搜索波位 $\{\Omega_j\}_{j=1}^M$ 之内, 则分布函数关于各个波位的积分可近似表示为

$$\int_{\Omega_j} f(z) dz = \sum_{[\theta^i, \varphi^i] \in \Omega_j} w^i \tag{18}$$

这种方法避免了复杂的积分运算, 提高了算法的适用性。

7 仿真实验

假设根据 IRST 指示信息, 已知交接空域内有 3 个目标, 分别为第 0、1 和 2 号目标, 其在方位和俯仰的位置为 $[44^\circ, 44^\circ]$, $[47^\circ, 46^\circ]$ 和 $[46^\circ, 47^\circ]$, 误差为相互独立的零均值高斯白噪声, 误差标准差在方位向和俯仰向上均为 1° 。需交接目标为第 0 号目标。相控阵跟踪雷达波束宽度为 $1^\circ \times 1^\circ$, 在交接时间间隔内, 可搜索的波位数为 20 个。对目标的捕获概率门限值为 0.9。对每个目标的位置分布函数采样 5000 点。运算得到搜索策略示意图如图 2 所示, 其中 Δ 表示指示信息给出的目标位置, 实线 \bigcirc 表示判决域内的波位。对于第 0 号目标出现概率过小的波位, 在此忽略不计, 未计入判决域中。数字 1-20 为搜索空域内波位的编排顺序。可以看出, 由于右上角存在干扰目标, 相对于正中观测位置, 搜索空域往左下角偏移, 但是由于捕获概率的限制, 搜索空域并没有完全放弃交接目标和干扰目标出现概率均较高的波位。此时搜索空域内目标捕获概率为 0.9018, 略高于门限值, 满足要求。搜索波位的编排顺序则完全以波位误交接概率为准, 如排位第 13 的波位, 交接目标在此出现概率最高, 但是由于干

扰目标的影响, 其搜索顺序后移。

传统的单目标指示交接方法, 搜索空域和搜索波位编排只考虑了目标捕获概率, 则其搜索空域以指示信息对目标的观测为中心, 搜索波位的编排顺序与中心的距离有关, 越靠近中心, 搜索顺序越靠前^[5]。其搜索策略示意图如图 3 所示。

为了比较这两种搜索策略的性能, 将其应用在多种不同场景。本文设置了 4 种场景, 涉及到影响交接性能的各方面因素, 包括干扰目标的个数、目标间的距离和目标位置的误差。4 种场景的示意图如图 4 所示, 其中圆表征目标的位置误差大小, 箭头指向需交接目标即第 0 号目标。

对每种场景均运行 1000 次, 从成功交接、误交接、交接失败的次数和交接平均搜索波位数 4 个指标进行比较。成功交接指捕获到第 0 号目标, 误交接指捕获到非 0 号目标, 交接失败指未捕获到任何目标。两种搜索策略在各种场景的性能如表 1 所示, 其中方法 1 为本文提出的方法, 方法 2 为传统的只考虑捕获概率的方法。

从表 1 可以看出, 方法 1 的误交接次数相对于方法 2 有大幅度的降低。误交接次数降低的一个因素是波位编排时, 优先搜索误交接概率低的波位, 另一个因素为拒绝搜索判决域外的波位, 因此方法 1 的交接失败次数高于方法 2, 而且其平均搜索波位数也较高。对于交接成功次数, 由于方法 2 未考虑干扰目标的影响, 其交接成功次数均低于方法 1。

从以上 4 个场景的仿真结果还可以看出交接空域的目标密集程度与目标的个数、目标间的距离和目标位置的误差均有关。如场景 2 相对于场景 3, 虽然其目标数较少, 但是目标的位置误差较大, 导致目标间的区分度严重下降, 相应于目标密集度高。此时, 两种方法在场景 3 中的各项性能指标均优于场景 2。

对以上仿真实验分析得到, 本文提出的多目标指示交接方法, 在保证搜索捕获概率的情况下, 能有效的降低误交接概率。

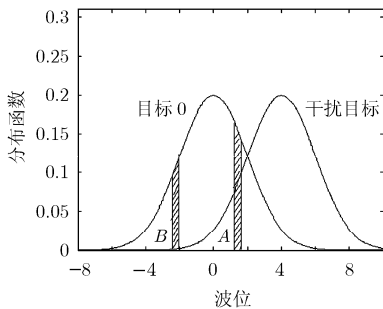


图 1 分布函数示意图

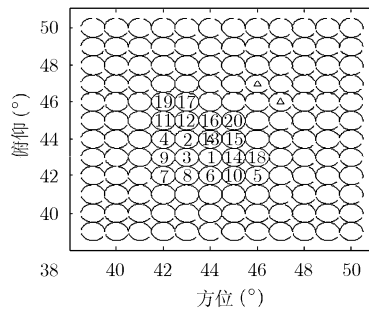


图 2 搜索策略示意图

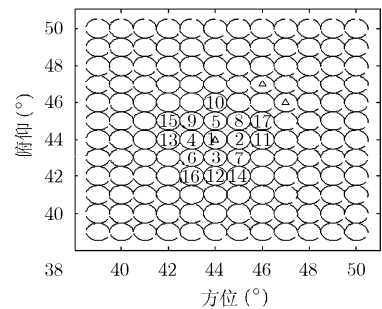


图 3 传统搜索策略示意图

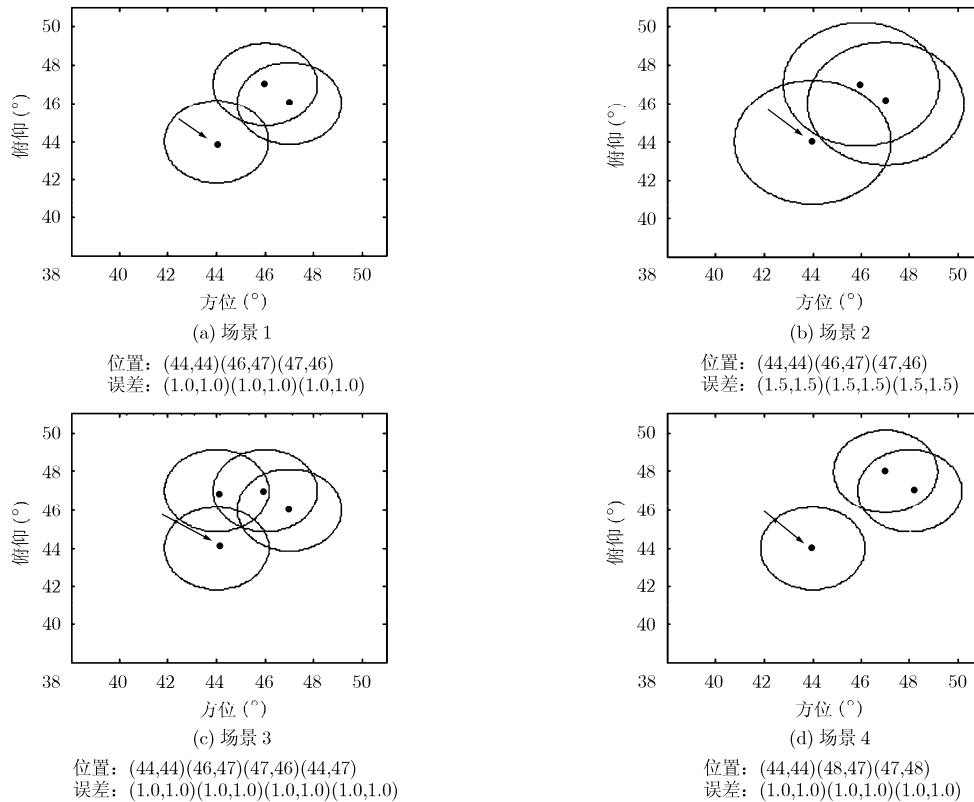


图4 仿真场景

表1 性能比较

	误交接		交接失败		交接成功		平均搜索波位数	
	方法1	方法2	方法1	方法2	方法1	方法2	方法1	方法2
场景1	6	38	66	82	928	880	11.292	6.755
场景2	73	240	244	177	683	583	13.311	10.311
场景3	30	125	82	71	888	804	11.616	6.713
场景4	0	3	81	100	919	897	8.634	6.913

8 结论

IRST与雷达协同探测是一种重要的传感器协作手段,其中的关键为目标的指示交接问题,但是多目标情况下的指示交接过程却鲜有研究。本文针对多目标情况下IRST与雷达的指示交接问题展开了研究。首先通过分析指示搜索的过程和评价交接性能的因素,明确了解决多目标指示交接问题的步骤和优化方向;然后逐步对指示交接过程给出了优化解,并针对其中优化子式的高计算量和运算的高复杂性分别提出了相应的解决方案。最后的仿真实验表明,在搜索时间略有加长的情况下,本文方法在各种场景下均能有效降低误交接概率。

参考文献

[1] 何友,王国宏,陆大经,彭应宁. 多传感器信息融合及应用

[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 1-12.

He You, Wang Guo-hong, Lu Da-jin, and Peng Ying-ning. MultiSensor Information Fusion with Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 1-12.

[2] 孙仲康. 雷达数据数字处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 350-362.

Sun Zhong-kang. Digital Processing of Radar Data[M]. Beijing: Publishing House of Defense Industry, 1983: 350-362.

[3] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 数据融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 69-72.

Liu Tong-ming, Xia Zu-xun, and Xie Hong-cheng. Data Fusion Techniques and Its Applications[M]. Beijing: Publishing House of Defense Industry, 1998: 69-72.

[4] Benaskeur A and Irandoust H. Sensor Management for Tactical Surveillance Operations[R]. North Quebec City: Defence R&D Canada, 2007: 37-38.

- [5] 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 Guo-hong, He You, and Mao Shi-yi. Performance analysis of using an IRST sensor cueing a 3D radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(12): 1-4.
- [6] 吕永胜, 王树宗, 彭锐晖, 王向伟. 异地配置下IRST对3D雷达的引导分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 911-915.
Lü Yong-sheng, Wang Shu-zong, Peng Rui-hui, and Wang Xiang-wei. Analysis of IRST cueing to 3D radar at different sites[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 911-915.
- [7] 彭锐晖, 王树宗, 吕永胜, 王向伟. 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 Rui-hui, Wang Shu-zong, Lü Yong-sheng, and Wang Xiang-wei. Analysis of ESM cueing 2D radar located at different sites[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(1): 13-17.
- [8] 赵锋, 毕莉, 杨建华, 肖顺平. 反导跟踪雷达最优搜索时序研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(9): 28-31.
Zhao Feng, Bi Li, Yang Jian-hua, and Xiao Shun-ping. A study on optimal search order of anti-missile tracking radars[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(9): 28-31.
- [9] 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 Hua-jun, Zhang Rong-tao, and Geng Dang-hui. A study on mission shifting model of netted radars for tracking ballistic missiles[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(6): 20-23.
- [10] 卢建斌. 相控阵雷达资源优化管理的理论与方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007: 33-39.
Lu Jian-bin. Theory and method of resource optimization and management for phased array radars[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007: 33-39.
- 张华睿: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为数据融合与传感器管理.
- 杨宏文: 男, 1971年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为数据融合与目标跟踪.
- 郁文贤: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信息处理、数据融合、神经网络等.