

移动式雷达/红外辐射控制的调度方法

张昀普¹, 徐公国¹, 单甘霖¹, 段修生²

- (1. 陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;
2. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 针对降低移动式雷达/红外协同跟踪时的辐射风险问题, 提出了一种移动式雷达/红外辐射控制的调度方法。首先, 结合平台和目标的运动状态建立了目标跟踪模型, 利用容积卡尔曼滤波预测跟踪精度; 并引入辐射度影响建立了雷达辐射模型, 给出了雷达辐射状态和系统辐射代价的预测方法; 然后, 以跟踪精度满足任务要求为约束条件, 以长期辐射代价最小化为优化目标, 构建了长期调度的目标函数; 最后, 针对求解时计算复杂度高的难题, 设计了一种决策树搜索算法。仿真结果表明, 文中所提调度方法与短期调度相比, 具有更好的辐射控制效果, 在决策步长为 3 时, 其辐射代价下降了 26.5%; 且与固定位置调度比, 文中方法能在改善跟踪性能的同时, 降低辐射代价, 在跟踪低速目标时, 其跟踪误差和辐射代价分别下降了 29.9% 和 30.5%。

关键词: 雷达; 红外传感器; 传感器调度; 辐射控制; 决策树

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0904004

Scheduling approach of mobile radar/infrared radiation control

Zhang Yunpu¹, Xu Gongguo¹, Shan Ganlin¹, Duan Xiusheng²

- (1. Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China;
2. College of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: To reduce the radiation risk of mobile radar/infrared cooperative tracking, a scheduling approach of mobile radar/infrared radiation control was proposed. Firstly, a target tracking model was established based on the moving state of the platform and the target, and the tracking accuracy was predicted by using the cubature Kalman filter. Secondly, the radar radiation model was established by introducing the radiation effect, and the prediction methods of the radar radiation status and the system radiation cost were given. Then, the objective function of non-myopic scheduling was constructed with tracking accuracy satisfying task requirements as constraints and non-myopic radiation cost minimization as optimization objectives. Finally, a decision tree search algorithm was designed to solve the problem of high computational complexity. The simulation results show that the proposed scheduling approach has better radiation control effect than the myopic scheduling approach. When the decision step is 3, the radiation cost decreases by 26.5%. Compared with the fixed position scheduling approach, the proposed

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期: 2019-05-03

基金项目: 国防预研基金(012015012600A2203)

作者简介: 张昀普(1995-), 男, 硕士生, 主要从事传感器管理及目标跟踪技术方面的研究。Email: zysensor@163.com

导师简介: 单甘霖(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事信息融合与武器系统仿真方面的研究。Email: shansensor@163.com

approach can improve the tracking performance and reduce the radiation cost. When tracking low-speed targets, the tracking error and radiation cost are reduced by 29.9% and 30.5%, respectively.

Key words: radar; infrared sensor; sensor scheduling; radiation control; decision tree

0 引言

在网络化战争中,以雷达和红外传感器为代表的各类传感器发挥着越来越重要的作用,为了获得最大的作战收益,需要对其进行有效管理^[1]。在侦察时,雷达能够获得完整的量测信息,但会辐射电磁波,易受到敌方反辐射武器的攻击,而红外传感器虽只能获得目标的角度信息,但其不向外辐射电磁波,具有更好的抗干扰性能和生存能力^[2]。因此,如何利用两类传感器性能互补的特点,在获得良好作战收益的同时,降低系统的辐射风险,已成为了传感器管理领域的研究热点。吴巍等构建了辐射限制下雷达/红外协同跟踪模型,将跟踪时的状态估计误差与跟踪精度要求进行比较,当红外能满足要求时,优先调度红外,以减少雷达的开机次数^[3]。李世忠等利用该思想,提出了一种在导弹复合制导跟踪中雷达/红外协同工作方法^[4]。然而此类方法仅以雷达开机次数衡量辐射风险,无法衡量不同雷达的辐射特性差异。乔成林等面向杂波环境下的目标跟踪问题,将不同雷达的辐射风险量化为不同的固定值,综合考虑目标跟踪精度、雷达辐射和虚假测量概率构建了目标函数,并制定出两类传感器的协同跟踪方案,在满足跟踪任务需求的同时,有效减少了系统的辐射代价^[5]。然而,随着雷达开机时间的增长,其辐射风险并不总是固定的。

此外,上述文献均以静态传感器为研究对象,随着传感器载体机动能力的增强,可通过对可移动载体的控制,实现传感器的观测精度、空间覆盖率和通信质量等性能的提升^[6]。现阶段,可移动传感器的研究主要集中在大型传感器网络控制^[7]和单传感器路径规划方面^[8-9],针对可移动多传感器协同目标跟踪的相关研究还很少。

针对上述问题,并结合目标跟踪任务背景,文中引入辐射度影响(Emission Level Impact, ELI)^[10]量化雷达的辐射风险,并将传感器平台的运动状态由静态拓展到动态上来,提出一种移动式雷达/红外辐射

控制的调度方法。仿真结果表明,文中所提调度方法能够对雷达/红外进行合理调度,确保在满足跟踪任务要求的同时,有效控制系统的辐射风险。

1 目标跟踪模型

1.1 传感器分配方案

假设我方在地面上部署有 N 个可移动平台协同跟踪一个敌方目标,每个平台上包含一部雷达和一部红外传感器。定义 k 时刻所确定的平台工作方案为 $a_k=(a_k^n)_{N \times 1}(n=1,2,\dots,N)$,其中 $a_k^n=1$ 或 $a_k^n=0$ 表示在 $k+1$ 时刻是否调度平台 n 上的传感器跟踪目标;定义传感器工作方案 $b_k=(b_k^n)_{N \times 1}$,当 $a_k^n=1$ 时, $b_k^n=1$ 或 $b_k^n=-1$ 分别表示在 $k+1$ 时刻开启平台 n 上的雷达或红外传感器,当 $a_k^n=0$ 时, $b_k^n=0$ 。假定每个时刻只开启一部传感器跟踪目标,即 $\sum_{n=1}^N |a_k^n b_k^n|=1$ 。

1.2 平台运动状态

定义 k 时刻平台的运动状态为 $S_k=(S_k^n)_{N \times 1}$,其中 $S_k^n=[x_{s,k}^n, y_{s,k}^n, z_{s,k}^n]^T$ 表示 k 时刻平台 n 的位置坐标。

文中假定平台做匀速直线运动,在一次采样间隔内的移动距离为 L ,同时考虑移动时的惯性,设定其只能在 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 范围内移动,如图 1 所示。

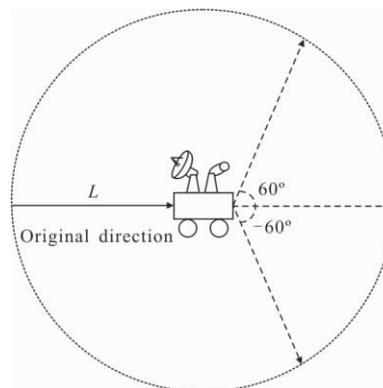


图 1 平台移动示意图

Fig.1 Platform movement

定义平台在 k 时刻的移动方向与 $k-1$ 方向的夹角集合为 $\theta_k=(\theta_k^n)_{N \times 1}$, 则平台 n 的运动状态的转移函数为:

$$S_{k+1}^n = S_k^n + [L^* \cos(\theta_k^n), L^* \sin(\theta_k^n), 0]^T \quad (1)$$

1.3 调度动作

定义系统在 $k+1$ 时刻的调度动作为 $M_k=(M_k^n)_{N \times 1}$, 其中 $M_k^n=[a_k^n, b_k^n, \theta_k^n]$, 包含了传感器的分配方案和运动方案。定义在时域 $[k+1, k+H]$ 上的调度序列为 $M_{k:k+H-1}=[M_k, M_{k+1}, \dots, M_{k+H-1}]$ 。

1.4 目标运动状态

定义 k 时刻目标的运动状态 $X_k=[x_k, \dot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, z_k, \dot{z}_k]^T$, 包含了 k 时刻目标在三维笛卡尔坐标系下的位置和速度信息, 其下一时刻的运动状态可按照状态转移函数进行转移:

$$X_{k+1} = F_k X_k + G_k \varepsilon_k \quad (2)$$

式中: F_k 、 G_k 和 ε_k 分别为 k 时刻目标的状态转移矩阵、过程噪声增益矩阵和高斯过程噪声。

目标在 k 时刻的状态观测值 Z_k 需通过雷达或红外量测获得, 其表达式如下:

$$Z_k = H(X_k, M_k) + \gamma_k \quad (3)$$

式中: $H(X_k, M_k)$ 和 γ_k 分别表示在 k 时刻的量测方程和量测高斯噪声向量。

若使用雷达进行量测, 其量测信息为斜距离 r 、方位角 α 和高低角 φ , 即:

$$H(X_k, M_k) = [r_k, \alpha_k, \varphi_k]^T \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} r_k &= \sqrt{(x_k - x_{s,k})^2 + (y_k - y_{s,k})^2 + (z_k - z_{s,k})^2} \\ \alpha_k &= \arctan \frac{y_k - y_{s,k}}{x_k - x_{s,k}} \\ \varphi_k &= \arctan \frac{z_k - z_{s,k}}{\sqrt{(x_k - x_{s,k})^2 + (y_k - y_{s,k})^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

对于红外传感器, 其量测信息为方位角和高低角, 即:

$$H(X_k, M_k) = [\alpha_k, \varphi_k]^T \quad (6)$$

1.5 目标跟踪精度预测

目标在下一决策周期内的跟踪精度是制定调度方案的重要依据, 对目标跟踪精度的预测的实质为对目标状态的预测。由于目标转移过程噪声和传感器量测噪声均为高斯噪声, 所以目标的状态预测可

以通过容积卡尔曼滤波^[11]得到, 这里不再展开分析, 只给出主要公式:

$$\begin{cases} \hat{X}_{k+1|k} = \frac{1}{2K} \sum_{h=1}^{2K} \chi_{k+1|k}^h \\ P_{k+1|k} = \frac{1}{2K} \sum_{h=1}^{2K} (\chi_{k+1|k}^h - \hat{X}_{k+1|k})(\chi_{k+1|k}^h - \hat{X}_{k+1|k})^T + Q_{k+1} \\ \hat{Z}_{k+1|k} = \frac{1}{2K} \sum_{h=1}^{2K} \psi_{k+1|k}^h \\ \hat{X}_{k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + C_{k+1}(B_{k+1})^{-1}(\hat{Z}_{k+1} - \hat{Z}_{k+1|k}) \\ P_{k+1} = P_{k+1|k} - C_{k+1}(B_{k+1})^{-1}C_{k+1}^T \end{cases} \quad (7)$$

式中: K 为目标状态维数; $\chi_{k+1|k}^h$ 和 $\psi_{k+1|k}^h$ 为通过容积变换所得到的量测容积点, 共 $2K$ 个, Q_{k+1} 为高斯过程噪声的协方差矩阵, \hat{Z}_{k+1} 、 C_{k+1} 和 B_{k+1} 分别表示目标在 $k+1$ 时刻的量测预测值、互协方差矩阵和新息协方差矩阵。

文中利用目标状态估计的协方差矩阵衡量目标跟踪精度^[5], 则在 $k+1$ 时刻目标的跟踪精度预测值为:

$$\hat{\rho}_{k+1} = \sqrt{P_{k+1}(1, 1) + P_{k+1}(3, 3) + P_{k+1}(5, 5)} \quad (8)$$

考虑调度动作, 对目标进行 H 次滤波, 可得目标在时域 $[k+1, k+H]$ 上的长期跟踪精度预测值为:

$$\hat{\rho}_{k+1:k+H}(M_{k:k+H-1}) = \sum_{h=1}^H \hat{\rho}_{k+h}(M_{k+h-1}) \quad (9)$$

式中: $\hat{\rho}_{k+h}(M_{k+h-1})$ 表示在执行调度动作 M_{k+h-1} 后, 在 $k+h$ 时刻目标的跟踪精度预测值。

2 雷达辐射模型

2.1 辐射状态

定义 k 时刻系统辐射状态 $E_k=(E_k^n)_{N \times 1}$, 其中, E_k^n ($n=1, \dots, N$) 为平台 n 上雷达 (下文简称雷达 n) 的 ELI 状态, 表示截止到 k 时刻该雷达被敌方接收机累积接收的辐射量, 其取值可量化为正整数集合 $\{1, 2, \dots, E_{\max}\}$, 集合中的每个数值对应一个 ELI 真值, 其值越大, 雷达被截获概率就越大^[10]。

若开启雷达 n 跟踪目标, 则该雷达会向外辐射电磁波, 但由于我方电磁干扰等协助手段的使用, 其 ELI 值并不总是增加的。可将 ELI 状态转移过程视为马尔可夫过程, 引入状态转移矩阵 T^n 来描述其状态转移^[10], 即:

$$T^n = (t_{i,j}^n)_{i,j \in \{1,2,3,\dots,E_{\max}\}} \quad (10)$$

其中, $t_{i,j}^n = p(E_k^n = j | E_{k-1}^n = i)$ 。

当雷达处于关闭状态时, T^n 为 E_{\max} 维单位矩阵。

2.2 辐射观测值

定义 k 时刻雷达辐射状态的观测集合 $Z_{E_k} = (Z_{E_k}^n)_{N \times 1}$ 。

其中, $Z_{E_k}^n (n=1, \dots, N)$ 表示 k 时刻雷达 n 的瞬时辐射量 $e_k^n = E_k^n - E_{k-1}^n$ 的观测值, 将瞬时辐射量的观测值量化为有限正整数集合 $\{1, 2, 3, \dots, O_{\max}\}$, 定义该集合为瞬时观测辐射等级, 集合中的每个数值对应着一个 e_k^n 的真值。文中使用一组观测矩阵来表示其概率分布, 如下所示:

$$W(Z_{E_k}^n = o) = (w_{o,i,j}^n)_{i,j \in \{1,2,3,\dots,E_{\max}\}} \quad (11)$$

式中: $w_{o,i,j}^n = p(Z_{E_k}^n = o | E_k^n = j, E_{k-1}^n = i)$, $o \in \{1, 2, 3, \dots, O_{\max}\}$ 表示当雷达的 ELI 状态由 i 转移到 j 时, 其瞬时观测辐射等级为 o 的概率。

当雷达处于关闭状态时, 其观测矩阵为 O_{\max} 维单位矩阵。

2.3 辐射代价预测

由于在实际作战中, 雷达的 ELI 状态不可观测, 因此使用向量 c_k^n 表示在 k 时刻雷达 n ELI 值的概率分布。 c_k^n 是所有历史信息的充分统计量, 可根据所有雷达的初始 ELI 状态 E_0 , 历史调度序列 $M_{0:k-1}$ 和历史观测集合 $Z_{E_{1:k}}$, 表示在 k 时刻 ELI 值为 i 的概率 $c_k^n(i)$, 即:

$$c_k^n(i) = p(E_k^n = i | E_0, M_{0:k-1}, Z_{E_{1:k}}) \quad (12)$$

若在 $k+1$ 时刻开启雷达 n 跟踪目标, 且已知其辐射观测值 $Z_{E_{k+1}}^n$, 则可利用隐马尔科夫滤波器得到 c_{k+1}^n :

$$c_{k+1}^n = \frac{[W(Z_{E_k}^n) \odot T^n]^T c_k^n}{1^T [W(Z_{E_k}^n) \odot T^n]^T c_k^n} \quad (13)$$

式中: 符号 \odot 表示 Hadamard 积; 1 为 E_{\max} 维单位向量。当雷达处于关闭状态时, $c_{k+1}^n = c_k^n$ 。

然而在实际过程中, 无法预知 $k+1$ 时刻雷达 n 的辐射观测 $Z_{E_{k+1}}^n$, 但是可以根据历史信息得到其概率分布, 即对 $\forall Z_{E_k}^n \in \{1, 2, 3, \dots, O_{\max}\}$, 有:

$$p(Z_{E_k}^n | c_k^n) = \sum_{E_{k+1}^n=1}^{E_{\max}} \sum_{E_k^n=1}^{E_{\max}} p(Z_{E_k}^n | E_{k+1}^n, E_k^n | c_k^n) = \sum_{E_{k+1}^n=1}^{E_{\max}} \sum_{E_k^n=1}^{E_{\max}} p(Z_{E_k}^n | E_{k+1}^n, E_k^n) p(E_{k+1}^n | E_k^n) c_k^n \quad (14)$$

其矩阵形式为:

$$p(Z_{E_k}^n | c_k^n) = 1^T [W(Z_{E_{k+1}}^n) \odot T^n]^T c_k^n \quad (15)$$

根据公式(13)和(15), 可求出 c_{k+1}^n 的预测值:

$$\hat{c}_{k+1}^n = \sum_{Z_{E_k}^n=1}^{O_{\max}} \frac{[W(Z_{E_k}^n) \odot T^n]^T c_k^n}{1^T [W(Z_{E_k}^n) \odot T^n]^T c_k^n} \cdot p(Z_{E_k}^n | c_k^n) = \sum_{Z_{E_k}^n=1}^{O_{\max}} [W(Z_{E_k}^n) \odot T^n]^T c_k^n = \left\{ \left[\sum_{Z_{E_k}^n=1}^{O_{\max}} W(Z_{E_k}^n) \right]^T \odot (T^n)^T \right\} c_k^n = (T^n)^T c_k^n \quad (16)$$

定义 $k+1$ 时刻雷达 n 的辐射代价为其 ELI 值的期望, 即:

$$Y_{k+1}^n = V^T \hat{c}_{k+1}^n = V^T (T^n)^T c_k^n \quad (17)$$

其中, $V = [1, 2, \dots, E_{\max}]^T$ 。

结合调度动作, 可得传感器系统在时域 $[k+1, k+H]$ 上的长期辐射代价预测值为:

$$Y_{k+1:k+H} = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^N Y_{k+h} = \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^N \sigma(a_{k+h-1}^n, b_{k+h-1}^n) V^T \left[\begin{matrix} \sum_{i=1}^k \sigma(a_i^n, b_i^n) \\ (T^n) \end{matrix} \right]^T c_k^n \quad (18)$$

式中: 函数 $\sigma(x, y)$ 为指示函数, 仅当 $xy=1$ 时, 取值为 1, 否则恒为 0。

3 调度问题求解

调度方法可分为短期调度与长期调度两类, 短期调度以未来一步收益(损失)为决策依据, 忽略了当前调度动作对系统未来状态的影响, 而相比之下, 长期调度以多步收益为决策依据, 其性能往往要优于短期调度^[12], 因此, 文中建立了长期调度的目标函数以追求更高的作战收益。

3.1 目标函数

文中旨在寻找最优的调度动作使系统能够在满足跟踪任务要求的同时, 辐射代价达到最小。综合考虑任务要求和雷达辐射代价, 根据公式(9)和(18), 建立决策步长为 H 时的目标函数:

$$J_{k+1:k+H} = \min \left(\sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^N Y_{k+h} \right) =$$

$$\min \left\{ \sum_{h=1}^H \sum_{n=1}^N \sigma(a_{k+h-1}^n, b_{k+h-1}^n) V^T \left[(T^n)^{\sum_{t=k}^k \sigma(a_t^n, b_t^n)} \right]^T c_k^n \right\}$$

s.t. $\hat{\rho}_{k+h}(M_{k+h-1}) \leq \rho_{th}, h=1, 2, \dots, H-1$ (19)

式中： ρ_{th} 为跟踪任务所要求的精度阈值，通过设置阈值，可以保证所调度的传感器必须优先满足跟踪任务的要求，避免了一味追求小的辐射风险而增大跟踪误差。目标函数的最优解 $M_{k:k+H-1}^{opt} = [a_{k:k+H-1}, b_{k:k+H-1}, \theta_{k:k+H-1}]^{opt}$ 。

由于平台的移动方向 $\theta_{k:k+H-1}$ 的解空间为无穷大，很难得到解析解。为此，文中将移动方向离散化，规定平台只能朝 9 个方向移动，即 $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 40^\circ$ 和 $\pm 60^\circ$ 。尽管如此，随着步长的增加，决策方案数会呈指数增长，在求解时计算量巨大。为了减少计算复杂度，文中将调度问题转化为决策树搜索问题，提出一种基于阈值 ε 的标准代价搜索算法。

3.2 基于阈值 ε 的标准代价搜索算法

图 2 给出了 $H=3, N=2$ 时的决策树示意图，在决策树中，决策树的深度表示决策步长 H ，每一层的节点数表示此时的调度方案数，最底层的节点数为目标函数的解数量。因此，寻找目标函数的最优解就是在决策树中搜索出满足约束条件且长期辐射代价最小的底层节点。

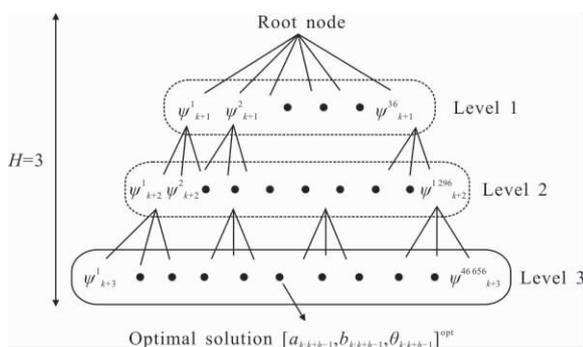


图 2 决策树示意图 ($H=3, N=2$)

Fig.2 Schematic of decision tree ($H=3, N=2$)

常用的决策树搜索主要有三种方法，即宽度优先搜索 (breadth-first search, BFS)、深度优先搜索 (depth-first search, DFS) 和标准代价搜索 (uniform cost search, UCS)。与遍历全部节点的 BFS 和 DFS 相比，UCS 优先打开代价最小的节点，搜索速度最快^[13]。但由于每一层的节点数目呈指数增长，UCS 依然需

要耗费大量的时间。为加快求解速度，文中引入阈值法^[14]进行决策树剪枝。

阈值法的思想是设定一个阈值 $\varepsilon (0 \leq \varepsilon \leq 1)$ ，当某节点对应的代价值大于当前最优目标函数值的 $1/(1+\varepsilon)$ 倍时，将该节点及其子节点删除。

由于阈值法需要将节点对应的代价值与当前全局最优目标函数值进行比较，但 UCS 方法不以深度优先为搜索原则，可能无法较快打开最底层节点得到一个目标函数值用于阈值比较。因此，文中借鉴贪婪搜索思想，首先对决策树进行贪婪搜索以快速获取一个全局次优目标函数值，再进行 UCS 搜索。综上所述，基于阈值 ε 的 UCS 算法流程如下所示：

(1) 初始化，将根节点放入列表，并规定每次打开节点后，先根据公式(7)和(8)计算所有子节点的跟踪精度，并删除跟踪精度大于 ρ_{th} 的节点及其子节点，再进行其他运算。

(2) 打开并删除根节点，利用贪婪搜索方法，得到一个全局次优目标函数值 $\tilde{J}_{k+1:k+H}$ 。

(3) 根据公式(15)~(17)计算第一层未被删除节点的辐射代价，删除辐射代价大于 $\tilde{J}_{k+1:k+H}/(1+\varepsilon)$ 的节点及其所有子节点，并将剩余节点按照辐射代价的顺序由小到大存入列表。

(4) 若列表不为空，则打开列表中第一个节点并删除。

若未到达最底层 H ，则计算所有子节点的辐射代价，删除辐射代价大于 $\tilde{J}_{k+1:k+H}/(1+\varepsilon)$ 的节点及其所有子节点，并将剩余节点按照辐射代价的顺序由小到大存入列表，转到步骤(4)。

若到达最底层 H ，则计算所有子节点的辐射代价，找出辐射代价最小的子节点，将该节点的目标函数值赋给 $\tilde{J}_{k+1:k+H}$ ，并记录该节点所在的路径，转到步骤(4)。

(5) 当列表为空时，搜索结束，此时 $\tilde{J}_{k+1:k+H}$ 为最优长期辐射代价，其对应路径为最优调度动作。若无解，则调度量测性能最好的雷达跟踪目标。

4 仿真结果与分析

文中仿真所用的开发平台为 MATLAB R2017a，并基于如下作战想定进行仿真：敌方目标已进入我

方传感器网络的可探测区域内,为了给下一步作战决策提供信息支撑,我方将使用传感器对敌方目标进行持续跟踪。同时,由于目标上装备有辐射接收机,为了保证我方传感器的生存性能,需要在跟踪的同时进行辐射控制。

仿真参数设置如下:我方共有 3 个可移动传感器平台用于目标跟踪,各平台上均部署一部雷达和一部红外传感器。平台 1、2、3 上雷达的斜距离量测标准差分别为 100、75、50 m;方位角量测标准差分别为 10、7、7 mrad;方位角量测标准差分别为 10、7、7 mrad;所有红外传感器的方位角和高低角量测标准差均为 5 mrad。平台 1、2、3 的初始位置分别为 (2, 2, 0)、(4, 2, 0)、(2, 4, 0) km,初始运动方向与 X 轴正方向的夹角分别为 30°、15°、-45°。将雷达的 ELI 状态量化为 {1, 2, 3}, 瞬时观测辐射等级量化为 {1, 2, 3}, 为了不失一般性,设定量测精度高的雷达更容易处于高 ELI 状态,设定各平台上雷达的 ELI 状态转移矩阵为:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.7 \end{bmatrix}, T_3 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.3 & 0.2 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 \end{bmatrix}$$

此外,传感器采样间隔为 1 s,仿真时间为 60 s,平台每次移动距离为 20 m,阈值 $\varepsilon=4$ 。

4.1 不同 H 下性能的比较

为比较短期与长期调度性能的优劣,本节对比了 H=1、2、3 和 4 时的调度性能。设定目标做匀速直线运动,其初始位置和速度分别为 (5 000, 5 000, 5 000) m 和 (-350, -350, 50) m/s,跟踪精度阈值 $\rho_{th}=50$ m。

图 3 和图 4 分别给出了不同决策步长下的目标位置均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 和累积辐射代价的对比图。从图 3 可以看出,在 0~10 s 内,所有曲线都存在 RMSE 大于阈值的时刻,此情况与目标的初始协方差阵的设置有关。在 10 s 后,短期调度 H=1 和 H=2 时均存在 RMSE 大于阈值的时刻,但 H=2 时相对较少,在 H=3 和 4 时,所有时刻均能满足阈值要求,可很好地完成跟踪任务。从图 4 可以看出,随着 H 的增加,累积辐射代价越来越小,在 H=2、3 和 4 时,分别比短期调度减少了 8.4(15.4%)、14.5(26.5%)、15.9(29.1%),说明长期调度的性能优于短期调度。同时可以看出,随着 H 的增加,累积辐射代价减少的幅度越来越小,由于 H=3

和 4 时辐射代价相差很小,且决策步长的增加会使计算复杂度呈指数增长,因此在后续仿真中决策步长取 H=3。

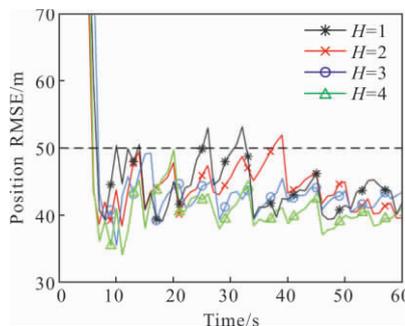


图 3 不同决策步长下的目标位置 RMSE

Fig.3 Target position RMSE under different decision steps

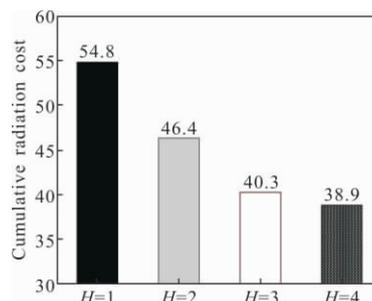


图 4 不同决策步长下的累积辐射代价

Fig.4 Cumulative radiation cost under different decision steps

4.2 与常用调度方法性能的比较

为了说明文中提出的可移动式雷达/红外调度方法的有效性和合理性,采用参考文献[4]中提出的固定位置的长期调度方法与之比较。同时,为充分验证文中方法的优势,设定以下两个场景:

(1) 场景一 目标状态与 4.1 节相同, $\rho_{th}=50$ m。

(2) 场景二 目标速度较低,为 (-55, -45, 0) m/s, $\rho_{th}=30$ m,其余参数与场景一相同。

图 5 和图 6 分别为不同调度方法在两个场景下的位置 RMSE 和累积辐射代价的对比图。从图 5 可以看出在场景一中,两种调度方法均可较好地完成任务,但相较之下文中方法的 RMSE 更低。在场景二中,固定位置方法对低速目标的跟踪精度较差,在大多数时刻无法达到跟踪任务的要求,但文中方法可较好地完成任务。通过对图 5(b)中每时刻 RMSE 值的统计得出,场景二中固定位置方法的 RMSE 的时间平均值为 34.5 m,文中方法为 24.2 m,

相较固定位置方法减少了 10.3 m(29.9%)。从图 6 可以看出, 在两个场景中中文方法在辐射控制上的效果均更优, 产生的辐射代价相比于固定调度方法分别减少了 3.7(8.5%)和 14.8(30.5%)。因此, 说明文中方法能够在满足跟踪任务要求的同时, 有效控制辐射风险, 提高传感器系统的生存性能, 且在跟踪低速目标时具有更大的性能优势。

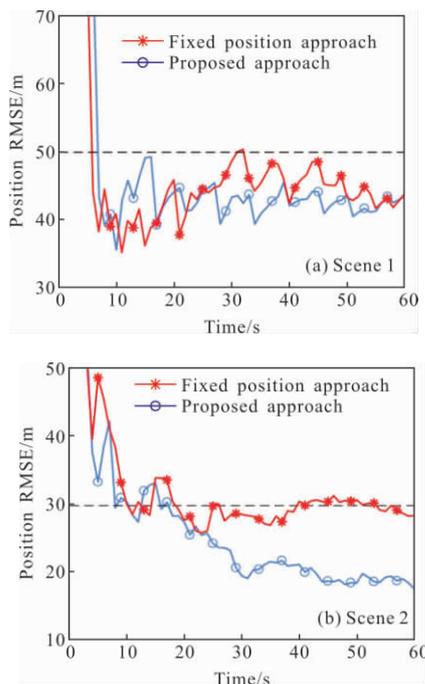


图 5 不同调度方法的目标位置 RMSE

Fig.5 Target position RMSE under different scheduling approaches

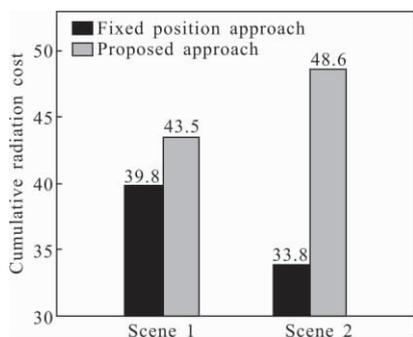


图 6 不同调度方法的累积辐射代价

Fig.6 Cumulative radiation cost under different scheduling approaches

以场景二为例, 图 7 给出了目标航迹及平台运动轨迹在 X-Y 平面的投影, 图 8 和图 9 给出了两种调度方法在整个仿真时间内的传感器分配方案。目标航迹通过给定的仿真参数生成, 平台运动轨迹和

传感器的分配方案均为求解目标函数所得。结合图 7~9 可知, 文中方法可以通过对平台运动方向的控制, 找出每一时刻最佳的量测位置, 并实现雷达/红外的合理切换, 使平台 1、2 和 3 上的雷达开机次数与固定位置方法相比分别减少了 4、3 和 3 次, 有效控制了辐射风险。

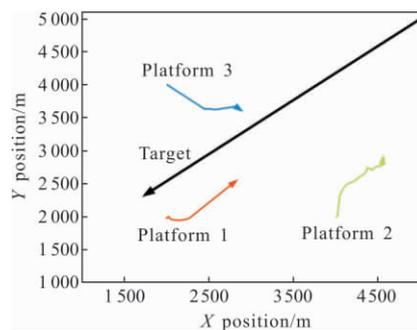


图 7 场景二中目标航迹及平台运动示意图

Fig.7 Target trajectory and platform motion in Scene 2

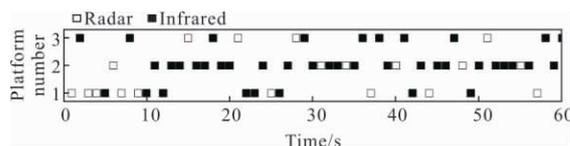


图 8 场景二中中文方法的分配方案

Fig.8 Assignment scheme of the proposed approach in Scene 2

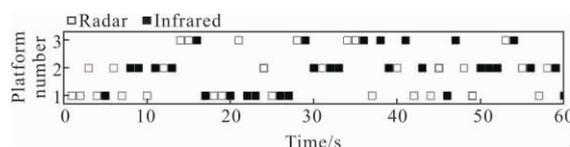


图 9 场景二中固定位置方法的分配方案

Fig.9 Assignment scheme of the fixed position approach in Scene 2

5 结论

文中对目标跟踪任务背景下的雷达/红外协同跟踪方法进行研究, 提出一种移动式雷达/红外辐射控制的调度方法。该方法结合传感器平台的运动状态、目标跟踪任务要求和雷达辐射代价建立了调度模型, 并通过建立长期调度的目标函数以避免决策时的短视性。仿真实验表明, 与短期调度方法相比, 该方法能够在不丢失跟踪精度的同时大幅减少辐射代价, 且在决策步长为 3 时性能最优; 与固定位置调度方法相比, 该方法能够通过控制平台的移动, 找到最佳量测位置, 在提升跟踪性能的同时, 减少了雷达

的开机次数,提升了传感器系统的生存性能。

由于文中研究的是单目标跟踪问题,未考虑多个目标航迹相互关联的情况,今后将针对这一点开展研究。同时,可结合地形、机动方式等建立更符合实际战场情况的平台运动模型。

参考文献:

- [1] Wang Weijia, Bai Peng, Liang Xiaolong, et al. Cooperative tracking algorithm of radar aided optic-electric tracking system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1217006. (in Chinese)
- [2] Qiao Chenglin, Yu Yuantao, Shan Ganlin, et al. A sensor selection algorithm with improved accuracy constraint for maneuvering target tracking [C]//Wuhan: The 37th Chinese Control Conference, 2018: 2489–2493.
- [3] Wu Wei, Wang Guohong, Liu Yi, et al. Cooperative tracking and management of airborne radar, infrared and electronic support measures [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(7): 1517–1522. (in Chinese)
- [4] Li Shizhong, Wang Guohong, Wu Wei, et al. Radar/infrared composite guidance tracking under intermittent radar operation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1405–1410. (in Chinese)
- [5] Qiao Chenglin, Shan Ganlin, Duan Xiusheng, et al. Non-myopic scheduling algorithm of multi-platform active/passive sensors for collaboration tracking [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(1): 115–123. (in Chinese)
- [6] Xu Gongguo, Shan Ganlin, Duan Xiusheng. Non-myopic scheduling method of active mobile sensor for target tracking [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(2): 244–250. (in Chinese)
- [7] Wang X, Hoseinnezhad R, Gostar A K, et al. Multi-sensor control for multi-object Bayes filters [J]. *Signal Processing*, 2018, 142(1): 260–270.
- [8] Chen Hui, Han Chongzhao. Sensor control strategy for maneuvering multi-target tracking [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(4): 512–523. (in Chinese)
- [9] Lou Ke, Cui Baotong, Li Wen. Target tracking algorithm of mobile sensor networks based on flocking control[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(11): 1637–1642, 1649. (in Chinese)
- [10] Krishnamurthy V. Emission management for low probability intercept sensors in network centric warfare [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(1): 133–151.
- [11] Arasaratnam I, Haykin S. Cubature Kalman filters [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1254–1269.
- [12] Angley D, Ristic B, Suvorova S, et al. Non-myopic sensor scheduling for multistatic sonobuoy fields [J]. *Iet Radar Sonar and Navigation*, 2017, 11(12):1770–1775.
- [13] Qiao Chenglin, Duan Xiusheng, Shan Ganlin. Scheduling algorithm for multi-sensor collaboration tracking and radiation control [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(7): 1472–1480. (in Chinese)
- [14] Zhang Z N, Shan G L. UTS-based foresight optimization of sensor scheduling for low interception risk tracking [J]. *International Journal of Adaptive Control & Signal Processing*, 2015, 28(10): 921–931.