

多机载平台多目标跟踪与辐射控制

吴巍¹, 王国宏¹, 双炜², 李世忠¹

(1. 海军航空工程学院信息融合技术研究所, 山东烟台 264001;

2. 山东航天电子技术研究所, 山东烟台 264003)

摘要: 针对作战飞机编队多目标跟踪中的辐射控制问题, 提出了一种多机多传感器协同多目标跟踪与辐射控制方法。该方法首先根据目标与我机编队之间的距离, 利用模糊逻辑设定不同目标的跟踪精度, 然后以目标跟踪精度为任务需求, 在时间上控制雷达辐射。建立了目标的威胁评估模型, 并根据目标相对我机的不同威胁度在空间上控制雷达辐射, 选择威胁度最小的一个或几个雷达辐射。同时, 利用多平台间的机载地理坐标系转换, 进行多平台序贯滤波, 实现传感器管理下的目标跟踪。仿真结果证明了方法的合理性和有效性, 研究结论有助于提高作战飞机编队的抗侦察和抗干扰能力, 从而提升整体的生存能力。

关键词: 多传感器信息融合; 辐射控制; 目标跟踪; 传感器管理

中图分类号: TN 957

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.03.12

Multi-airborne-platform multi-target tracking and radiation control technology

WU Wei¹, WANG Guo-hong¹, SHUANG Wei², LI Shi-zhong¹

(1. *Institute of Information Fusion Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;*

2. *Shandong Institute of Space Electronics Technology, Yantai 264003, China*)

Abstract: Aiming at the radiation control problem appearing in the multi-target tracking of aircraft formation, a method of multi-aircraft synergistic multi-target tracking and radar radiation control is proposed. Firstly the tracking accuracy of different targets are set up based on the distance of targets to our side formation using fuzzy logic, then the radars' radiation is controlled in time with the task requirement of target tracking accuracies. The target threat assessment model is set up, and the radars' radiation is controlled in space based on the different threat degrees of targets to our aircraft, the radar radiation with a minimum threat degree is selected. Meanwhile, an airborne geographical coordinate system transformation among multi-platforms is used for target tracking with multi-platform sequential filter. Simulation result proves the model's effectualness. The research conclusion is helpful for enhancing the anti-reconnaissance and anti-jamming ability of the combat aircraft formation, thus upgrading the whole viability.

Keywords: multisensor information fusion; radiation control; target tracking; sensor management

0 引言

多个平台的机载多传感器系统能从不同的角度和视野获取信息, 对传感器系统进行有效地协同和控制可以增加信息的质量和鲁棒性; 另一方面, 有源雷达的持续量测会对战斗机平台的生存性带来影响。因此, 为了更有效地发挥机载多平台多传感器系统的优势, 优化多平台传感器资源的配

置, 同时控制有源雷达辐射, 增强作战飞机的抗侦察能力, 就必须对多平台的多传感器系统进行协同管理。美军的 F-22 战机采用了某种辐射控制方法, 采用时间上间歇开机和空间上交替开机的传感器管理技术来对多个目标进行探测和跟踪, 并以此来对抗反辐射导弹, 从而极大地提高了自身生存能力。

针对多传感器目标跟踪与协同管理方面, 国内外学者提出了一些模型和算法。文献[1-4]主要针对单平台上的

收稿日期: 2011-06-13; 修回日期: 2011-08-04。

基金项目: 国家自然科学基金(61032001, 60972159, 61002006); 航空科学基金(20115584006, 20085184003); “泰山学者”建设工程专项经费资助课题

作者简介: 吴巍(1981-), 男, 博士, 主要研究方向为信息融合与传感器管理。E-mail: wkw_wuwei@126.com

雷达,对其工作模式、数据率等方面的管理和控制进行了研究。文献[5-8]针对单平台上的多个传感器,研究了多个传感器数据融合来对目标进行跟踪,从而改善跟踪性能。文献[9]给出了一种机载雷达组网资源管理的框架。文献[10-15]主要对多机多目标中的任务分配问题进行了研究,主要方法是通过建立任务分配的目标函数,通过一些优化方法(如拍卖算法、贝叶斯最优化理论等)来优化任务分配。文献[16]首先利用矩阵求迹的方式度量跟踪任务的信息需求,然后在分析任务优先级和传感器使用代价的基础上,建立以任务需求为驱动的多传感器集中式管理模型,并根据多个跟踪任务的信息需求自适应地分配传感器资源。

以上文献的研究主要集中在两个方面:(1)单平台的主被动传感器协同目标跟踪问题;(2)多平台的任务分配问题。针对多个平台协同跟踪与辐射控制方面的研究还未见报道,而目前作战飞机作战样式主要是编队作战。本文提出了一种多机多传感器协同多目标跟踪与辐射控制方法。该方法首先利用模糊逻辑根据目标与我机编队之间的距离设定不同目标的跟踪精度,然后以目标跟踪精度为任务需求在时间上控制雷达辐射;建立目标的威胁评估模型,并根据目标相对我机的不同威胁度在空间上控制雷达辐射,选择威胁度最小的一个或几个雷达辐射。同时,利用多平台间的机载地理坐标转换进行多平台序贯滤波,实现传感器管理下的目标跟踪。

1 传感器管理优化模型

在多平台机载多传感器目标跟踪过程中,一方面多传感器系统要根据不同任务需求,将不同目标跟踪到相应的需求精度(如监视需求精度、武器发射精度等);另一方面,又需要尽量不让对方探测到自己。虽然机载被动传感器不辐射电磁波,但被动传感器只能探测目标的方位和俯仰信息,信息的缺维会导致跟踪精度不高,甚至发散,必须利用雷达间歇辐射来保证跟踪的精度和航迹的连续性。因此,雷达辐射首先要考虑任务需求,同时尽量减少自身威胁。

1.1 跟踪任务需求模型

根据机载传感器的探测能力及指控系统的要求,处于不同空间位置的目标有不同的跟踪需求,从功能上可分为监视、粗跟踪、精跟踪等。不同功能要求下目标跟踪精度要求不同,比如监视任务的精度要求很低,粗跟踪的精度稍高些,精跟踪精度最高(如达到武器发射要求精度)。由于传感器的探测范围和火力覆盖范围主要与目标的距离有关,这里给出一种基于目标距离的跟踪任务需求模型。

定义目标到编队的距离为目标与其距离我机编队中距离最近的某架飞机之间的距离,那么根据目标到编队的距离设定不同目标的跟踪任务需求门限如下

$$th_i(r_i) = \begin{cases} th_1, & r_i \leq r_1 \\ \frac{(th_2 - th_1)(r_i - r_1)}{r_2 - r_1} + th_1, & r_1 < r_i < r_2 \\ th_2, & r_i \geq r_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, r_i 表示目标*i*与我机编队距离, r_1 表示精跟踪门限,当目标与编队距离小于 r_1 时,跟踪误差门限为 th_1 ; r_2 表示监视门限,当目标与我机编队距离大于 r_2 时,跟踪误差门限为 th_2 ;当目标与我机编队距离大于 r_1 且小于 r_2 时,跟踪误差门限在 th_1 和 th_2 之间线性变化。

1.2 目标威胁评估模型

在多机多目标环境下,不同目标对不同平台的威胁不同,因此,每个目标对于每个平台都存在一个威胁度。威胁度的评估依据原则很多,可以根据目标属性(如轰炸机、预警机、直升机及防空导弹等)来确定威胁度,或是根据需求人工确定优先级,在不能区别目标类型的时候,可以根据目标的参数来确定威胁度。这里给出一种根据目标的距离和接近速度来判别威胁度的模型,定义目标*i*对我机*j*的威胁度为

$$\delta_{ij}(k) = \frac{1}{\frac{r_{ij}(k)}{\dot{r}_{ij}(k)}} \quad (2)$$

式中,*i*为目标编号,*j*为我机编号; $\delta_{ij}(k)$ 表示*k*时刻目标*i*对我机*j*的威胁度; $r_{ij}(k)$ 表示*k*时刻目标*i*与我机*j*之间的距离, $\dot{r}_{ij}(k)$ 表示*k*时刻目标*i*相对我机*j*的径向速度。从公式(2)可以看出, $\delta_{ij}(k)$ 越大表示目标*i*对我机*j*的威胁越大, $\delta_{ij}(k)$ 越小表示目标*i*对我机*j*的威胁越小;目标面向我飞行径向速度为正,背向我机飞行目标径向速度为负,因此 $\delta_{ij}(k)$ 随着速度由大到小、再负向增加,先减小再变为负值,即 $\delta_{ij}(k)$ 数值越大表示目标的威胁度越大,反之目标的威胁度越小。

1.3 雷达辐射控制准则

基于任务需求和目标威胁的传感器管理流程分两步:

步骤 1 时间上雷达辐射控制准则

在时间上,雷达辐射通过比较需求精度和实际跟踪精度进行控制。比较实际跟踪精度和需求精度可以选用很多方法,常用方法有矩阵 2-范数、矩阵的迹、行列式等。不同方法的度量结果会对传感器管理产生一定的影响^[17-18],本文选择利用*k*时刻目标跟踪协方差矩阵(或预测协方差矩阵)的对角线 *x-y-z* 位置误差和开方与任务需求精度之差来控制雷达在时间上辐射,即

$$f(P_i^k, th_i) = \sqrt{P_i^k(1,1) + P_i^k(3,3) + P_i^k(5,5)} - th_i(r_i) \quad (3)$$

式中, P_i^k 表示*k*时刻目标*i*的跟踪协方差(或预测协方差),当 $f(P_i^k, th_i) \leq 0$,说明没有任务需求,雷达关机;如果 $f(P_i^k, th_i) > 0$ 说明跟踪精度没有达到任务需求,雷达在时间上需要辐射,那么雷达开机辐射。

步骤 2 空间上雷达辐射控制准则

多机环境下,在步骤 1 中确定了时间上雷达何时需要辐射,还需要确定空间上哪架(或哪几架)飞机雷达辐射。这里采用空间上威胁度最小的飞机雷达进行辐射。具体步骤为:

步骤 1 初始化 *k* 时刻辐射控制矩阵

$$\mathbf{R}_m(k) = \text{zeros}(m_n, t_n) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{R}_m(k)$ 表示辐射控制矩阵,为一个 *m_n* 行 *t_n* 列的

矩阵, m_n 表示我机数目, l_n 表示目标数目; 矩阵中元素 0 表示雷达对目标不辐射, 1 表示雷达对该目标辐射。初始化时, 将矩阵中所有元素定义为 0。

步骤 2 对于第 i 个目标, 如果 $f(P_i^k, th_i) > 0$, 判断雷达需要辐射。求取威胁最小的飞机进行辐射, $\text{Plane_NO}_i^k = \arg \min_{j=1,2,\dots} \delta_{ij}(k)$, 计算该飞机雷达辐射后的滤波协方差 P_i^k , 将 $\mathbf{R}_m(\text{Plane_NO}_i^k, i) = 1$ 。再次计算 $f(P_i^k, th_i)$, 如果 $f(P_i^k, th_i) > 0$, 说明任务需求还没有达到, 还需要另外雷达开机, 则寻找 $\delta_{ij}(k)$ 中威胁度次小的我机编号 Plane_NO_i^k , 然后计算该飞机雷达辐射后的滤波协方差 P_i^k , 令

$$\mathbf{R}_m(\text{Plane_NO}_i^k, i) = 1 \quad (5)$$

依次类推, 直到 $f(P_i^k, th_i) < 0$ 。

步骤 3 得到 k 时刻所有飞机对所有目标的辐射情况矩阵 $\mathbf{R}_m(k)$, 利用 $\mathbf{R}_m(k)$ 控制各个雷达对不同目标进行辐射。

2 多平台协同跟踪模型与算法

2.1 协同跟踪模型

多个平台的多传感器量测信息在时间上往往不一致, 利用时间对准后再融合往往会产生误差。因此, 多平台多传感器协同跟踪可以选用某一架飞机(如编队中的长机)为融合中心, 利用集中式的顺序融合结构进行融合。

2.1.1 融合坐标系的选择和转换

由于机载被动传感器(红外搜索跟踪(infrared search and track,IRST)系统、电子支援措施(electronic support measures,ESM))的量测只有方位和俯仰, 不能直接将量测转换到地心坐标系下, 因此这里选择载机地理坐标系作为跟踪融合坐标系。对于平台间的融合跟踪过程中, 需要将机载平台 b 的跟踪航迹转换到融合中心——机载平台 a 的坐标系。融合航迹转换过程如图 1 所示, 融合中心为机载平台 a, 要将平台 b 的载机地理坐标系先转换到地球坐标系, 再将地球坐标系转换到平台 a 的载机地理坐标下。如果编队飞机大于 2 架时, 可以进行类似的处理。

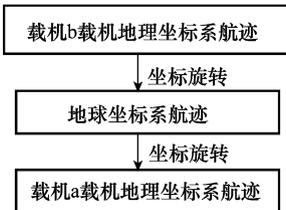


图 1 平台间坐标转换示意图

2.1.2 平台间的多传感器的序贯融合模型

对于平台间的雷达量测, 可以通过如图 1 所示的坐标转换将平台 b 的雷达量测转化到融合坐标系, 然后在融合中心利用单平台序贯融合的方式进行航迹更新。对于平台间的红外或 ESM 量测, 由于它们只有方位角和俯仰角信息, 没有距离信息, 因而无法将其量测转化到融合坐标系进行航迹更新。那么, 可先将融合中心前一刻的航迹利用

图 1 的转化方式转化到平台 b 的载机地理坐标系下, 然后在载机地理坐标系下按照图 2 的方式进行多平台多传感器之间序贯滤波。

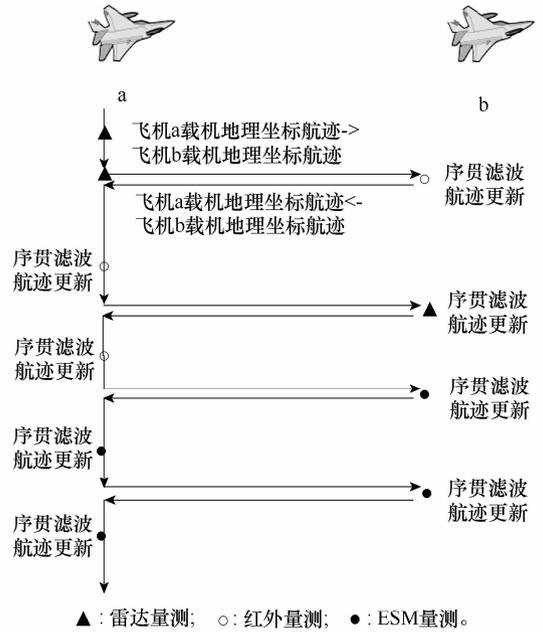


图 2 多平台序贯融合示意图

2.2 雷达、红外、ESM 的序贯跟踪算法

在序贯跟踪过程中, 雷达跟踪模型可选用转换量测卡尔曼滤波, 扩展卡尔曼滤波、不敏卡尔曼滤波、交互多模型滤波等滤波算法。对于红外和 ESM 的跟踪模型, 由于 IRST-ESM 是被动传感器, 用于滤波的量测只有方位和俯仰, 对应的跟踪算法选用被动的 EKF 和被动的交互多模型。这里给出基于扩展卡尔曼滤波的雷达、红外、ESM 序贯滤波跟踪模型, 具体流程为:

步骤 1 滤波初始阶段, 雷达开机起始航迹、滤波初始化, 得到初始 $\hat{\mathbf{X}}(2|2)$ 和初始协方差 $\mathbf{P}(2|2)$ 。

步骤 2 利用状态估计进行外推, 得到一步预测值

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k-1) = \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{X}}(k-1|k-1) \quad (6)$$

预测协方差

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{P}(k-1|k-1) \cdot \mathbf{F}^T \quad (7)$$

步骤 3 如果下一时刻量测为雷达量测则量测预测值为

$$\begin{bmatrix} \theta_{\text{radar}}(k|k-1) \\ \theta_{\text{radar}}(k|k-1) \\ \epsilon_{\text{radar}}(k|k-1) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{x(k|k-1)^2 + y(k|k-1)^2 + z(k|k-1)^2} \\ \arctan 2[-z(k|k-1), x(k|k-1)] \\ \arctan 2[y(k|k-1), \sqrt{x^2(k|k-1) + z^2(k|k-1)}] \end{bmatrix} \quad (8)$$

对应的量测矩阵为

$$\mathbf{H}_{\text{radar}} = \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}(k|k-1)}{\hat{r}} & 0 & \frac{\hat{y}(k|k-1)}{\hat{r}} & 0 & \frac{\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\hat{x}(k|k-1)}{\hat{r}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\hat{x}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}\hat{R}^2} & 0 & \frac{\hat{r}}{\hat{R}^2} & 0 & -\frac{\hat{y}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}\hat{R}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将上述式(8)和式(9)带入 EKF 式(10)~(12),可以得到状态更新和协方差更新。

$$\mathbf{K}(k|k-1) = \mathbf{P}(k|k-1) \cdot \mathbf{H}(k)^T \cdot [\mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{P}(k|k-1) \cdot \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}(k|k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{P}(k|k-1) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k) = \mathbf{X}(k|k-1) + \mathbf{K}(k|k-1) \cdot [\mathbf{Z}(k) - \mathbf{h}(k|k-1)] \quad (12)$$

式中

$$\mathbf{h}(k|k-1) = [R_{\text{radar}}(k|k-1), \theta_{\text{ESM}}(k|k-1),$$

$$\epsilon_{\text{ESM}}(k|k-1)]', \mathbf{Z}(k) = [R_{\text{radar}}(k), \theta_{\text{radar}}(k), \epsilon_{\text{radar}}(k)]'$$

步骤 4 如果下一量测为红外或 ESM,得到红外和 ESM 量测预测分别为

$$\begin{bmatrix} \theta_{\text{IR}}(k|k-1) \\ \epsilon_{\text{IR}}(k|k-1) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \arctan 2[-z(k|k-1), x(k|k-1)] \\ \arctan 2[y(k|k-1), \sqrt{x^2(k|k-1) + z^2(k|k-1)}] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{\text{ESM}}(k|k-1) \\ \epsilon_{\text{ESM}}(k|k-1) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \arctan 2[-z(k|k-1), x(k|k-1)] \\ \arctan 2[y(k|k-1), \sqrt{x^2(k|k-1) + z^2(k|k-1)}] \end{bmatrix} \quad (13)$$

步骤 5 对应的量测矩阵分别为

$$\mathbf{H}_{\text{IR}} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\hat{x}(k|k-1)}{\hat{r}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\hat{x}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}\hat{R}^2} & 0 & \frac{\hat{r}}{\hat{R}^2} & 0 & -\frac{\hat{y}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}\hat{R}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{H}_{\text{ESM}} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\hat{x}(k|k-1)}{\hat{r}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\hat{x}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}\hat{R}^2} & 0 & \frac{\hat{r}}{\hat{R}^2} & 0 & -\frac{\hat{y}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}\hat{R}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, $\hat{r} = \sqrt{[\hat{x}(k|k-1)]^2 + [\hat{z}(k|k-1)]^2}$, $\hat{R} = \sqrt{\hat{r}^2 + [\hat{y}(k|k-1)]^2}$ 。

步骤 6 将上述两式带入式(10)~(12),可以得到状态更新和协方差更新。其中,对于红外和 ESM,对应的量测预测和量测值分别为 $\mathbf{h}(k|k-1) = [\theta_{\text{IR}}(k|k-1), \epsilon_{\text{IR}}(k|k-1)]'$, $\mathbf{Z}(k) = [\theta_{\text{IR}}(k), \epsilon_{\text{IR}}(k)]'$ 和 $\mathbf{h}(k|k-1) = [\theta_{\text{ESM}}(k|k-1), \epsilon_{\text{ESM}}(k|k-1)]'$, $\mathbf{Z}(k) = [\theta_{\text{ESM}}(k), \epsilon_{\text{ESM}}(k)]'$ 。

这样就得到了雷达、红外、ESM 扩展卡尔曼序贯滤波一个滤波循环,如此循环下去,就可以完成雷达、红外、ESM 的协同跟踪。(以上公式计算中,载体地理坐标系中 x - y - z 分别对应北-天-东)

2.3 辐射控制下目标跟踪的实现

根据上述传感器管理模型和目标跟踪算法,在目标跟踪过程中每隔一段时间 Δt 判断一次该时刻的雷达辐射组合。由此得到辐射控制下目标跟踪的实现步骤如下:

步骤 1 雷达开机起始航迹、滤波初始化;

步骤 2 k 时刻更新当前时刻目标的跟踪协方差矩阵

\mathbf{P}_k (有被动量测时为滤波协方差、没有任何量测时为预测协方差);

步骤 3 根据 1.3 节中雷达辐射准则,得到 k 时刻雷达辐射控制矩阵 $\mathbf{R}_m(k)$;

步骤 4 $k+1$ 时刻根据 $\mathbf{R}_m(k)$ 控制雷达辐射,根据探测的信息,进行目标跟踪滤波处理(或航迹预测),返回步骤 2 进行循环。

3 仿真实验

假设我方飞机双机编队,地理坐标经度、纬度、高度分别为 $(36.14^\circ, 119.5^\circ, 5901.5 \text{ m})$ 、 $(36.12^\circ, 119.5^\circ, 5901.5 \text{ m})$,初始速度在经、纬、高方向都为 $(0, -100 \text{ m/s}, 0)$;两架目标飞机的地理坐标分别为 $(36.14^\circ, 120^\circ, 5901.5 \text{ m})$ 、 $(36.12^\circ, 120^\circ, 5901.5 \text{ m})$,目标飞机速度都为 $(0, 100 \text{ m/s}, 0)$;目标机、我方飞机均做匀速直线运动;机载雷达最小辐射间隔为 1 s,IRSF-ESM 最小量测间隔也为 1 s,仿真总时间 200 s。雷达距离测量均方根误差为

100 m,方位角测量均方根误差为 0.2° ,俯仰角测量均方根误差为 0.2° ;红外方位角测量均方根误差为 0.1° ,俯仰角测量均方根误差为 0.1° ;ESM量测的方位角测量均方根误差为 0.3° ,俯仰角测量均方根误差为 0.3° 。假设200 s的仿真过程中,红外和ESM量测连续且数据间隔时间为1 s。辐射控制中对应的门限参数分别为: $r_1 = 50 \times 10^3$ m, $r_2 = 20 \times 10^3$ m, $th_1 = 100$ m, $th_2 = 500$ m。目标和我机飞行地心坐标系下轨迹如图3所示。

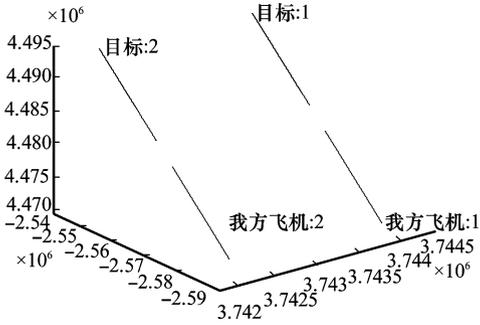


图3 地心坐标系下目标、我机的飞机轨迹图

从图3可以看出,目标编队正对我机编队飞行,由远到近。利用上述的传感器管理方法和目标跟踪方法对目标进行协同跟踪,此过程中雷达辐射情况分别如图4~图7所示。

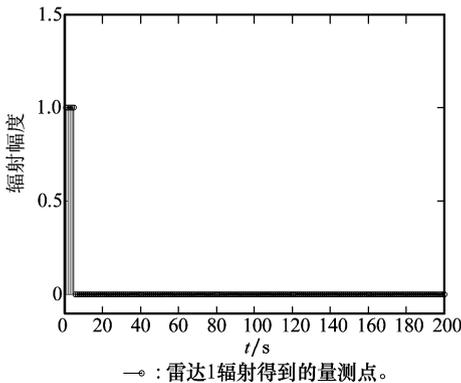


图4 我机1雷达对目标1的辐射时机图

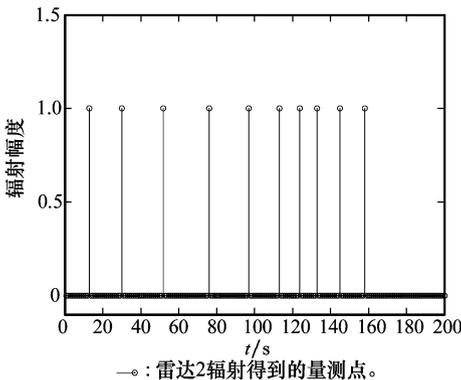


图5 我机2雷达对目标1的辐射时机图

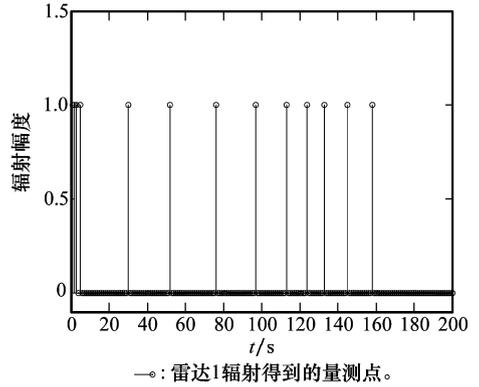


图6 我机1雷达对目标2的辐射时机图

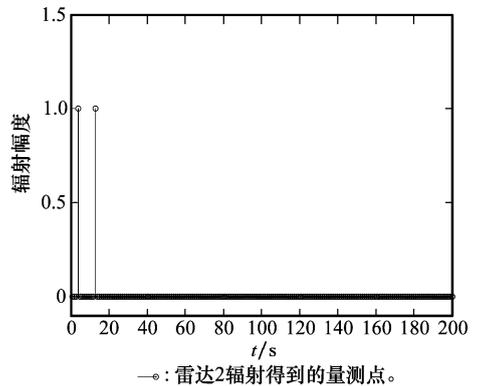


图7 我机2雷达对目标2的辐射时机图

从图4~图7可以看出,开始阶段,目标的跟踪精度较低,两个雷达同时对一个目标进行辐射,随着跟踪精度的增加,选择威胁度小的飞机进行辐射;同时,由于目标飞机越来越远,要求的跟踪精度越来越高,那么雷达的辐射间隔也就越来越小。目标1和目标2整个过程中的跟踪效果图如图8~图13所示。从图8~图13可以看出,整个过程目标跟踪误差得到了很好的控制,并且目标随着时间增加距离我机编队越来越近,跟踪精度也根据控制逐渐变小。

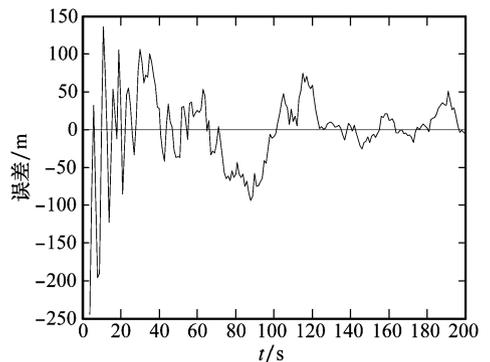


图8 目标1直角坐标系下X方向跟踪误差图

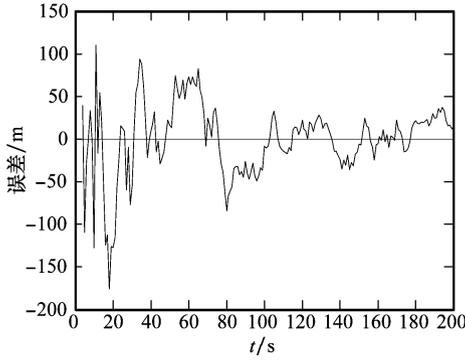


图 9 目标 1 直角坐标系下 Y 方向跟踪误差图

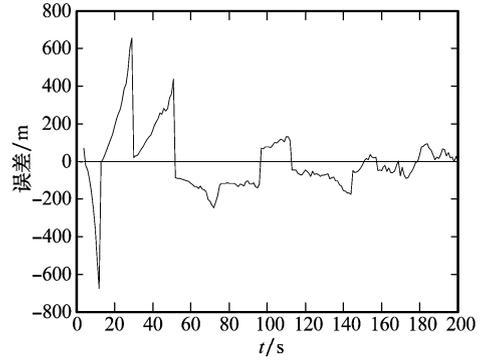


图 13 目标 2 直角坐标系下 Z 方向跟踪误差图

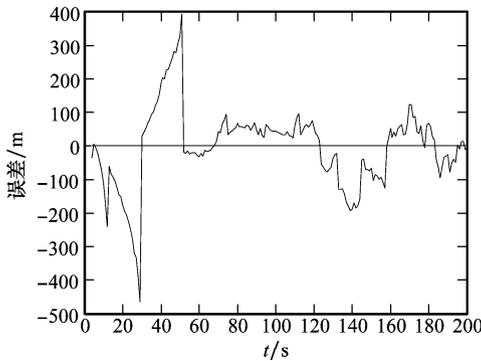


图 10 目标 1 直角坐标系下 Z 方向跟踪误差图

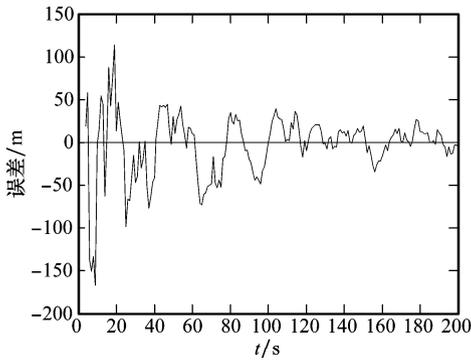


图 11 目标 2 直角坐标系下 X 方向跟踪误差图

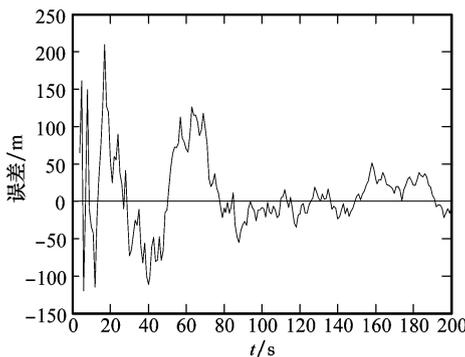


图 12 目标 2 直角坐标系下 Y 方向跟踪误差图

在实际应用过程中,IRST 和 ESM 的数据往往不是连续的。下面,分别设置不同的 IRST 和 ESM 数据间隔,不同的雷达辐射控制门限,蒙特卡罗仿真 100 次,比较雷达辐射的平均辐射次数。

表 1 不同情况下多平台雷达辐射次数

ESM 量测次数	IRST 量测次数	th_1/m	th_2/m	飞机雷达辐射次数/次			
				目标 1		目标 2	
				飞机 1	飞机 2	飞机 1	飞机 2
200	200	100	500	4.6	13.8	10.4	1.2
100	100	100	500	5.8	14.6	11.2	2.4
200	200	50	300	5.7	41.6	38.8	2.7
100	100	50	300	6.8	47.0	44.5	4.3

从表 1 可以看出,IRST-ESM 量测越多,雷达的辐射次数越少;辐射门限越大,辐射次数越少。在实际应用时可以根据距离精度要求选择相应的门限。

4 结论

本文提出了一种多机多传感器协同多目标跟踪与辐射控制方法。该方法首先根据目标与我机编队之间的距离利用模糊逻辑设定不同目标的跟踪精度,然后以目标跟踪精度为任务需求在时间上控制雷达辐射;建立了目标的威胁评估模型,并根据目标飞机之间的威胁度在空间上控制雷达辐射,选择威胁最小的一个或几个雷达辐射。同时,利用多平台间的机载地理坐标系转换进行多平台序贯滤波,实现传感器管理下的目标跟踪。仿真结果表明,提出的方法能对飞机编队多传感器系统进行很好的协同,对机载雷达的电磁辐射进行有效的控制。研究结论还能推广到岸基雷达组网、航空监视预警系统、舰艇编队协同探测系统等,有助于提高各系统的抗侦察和抗干扰能力,从而提升整体的生存能力。

参考文献:

[1] Wang Q, Zhou D Y, Lu H. Airborne radar mode management algorithm based on FDT[C]// *Proc. of the International Forum on Information Technology and Applications*, 2010:212 - 215.

- [2] Rezaeian M, Moran B. Constrained multi-object Markov decision scheduling with application to radar resource management[C]// *Proc. of the 13th Conference on Information Fusion*, 2010; 1-8.
- [3] Fan L, Wang, J K, Wang B. Radar resource management in multifunction radar[C]// *Proc. of the International Conference on Computer Design and Applications*, 2010; 4580-4583.
- [4] Krishnamurthy V, Djonin D V. Optimal threshold policies for multivariate POMDPs in radar resource management[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2009, 57(10): 3954-3969.
- [5] 吴巍, 王国宏, 柳毅, 等. 机载雷达、红外、电子支援措施协同跟踪与管理[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(7): 1517-1522. (Wu W, Wang G H, Liu Y, et al. Airborne radar/IRST/ESM synergistic tracking and management[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(7): 1517-1522.)
- [6] Aughenbaugh J M, Yocom B A, La Cour B R. Active clutter reduction through fusion with passive data[C]// *Proc. of the 13th Conference on Information Fusion*, 2010; 1-8.
- [7] Meng F, Hao Y L, Xia Q X, et al. A particle PHD filter for multi-sensor multi-target tracking based on sequential fusion[C]// *Proc. of the International Conference on Information Engineering and Computer Science*, 2009; 1-5.
- [8] El-Fallah A, Zatezalo A, Mehra R K. Situational awareness sensor management of space-based EO/IR and airborne GMTI radar for road targets tracking[C]// *Proc. of the International Society for Optical Engineering*, 2010; 1-12.
- [9] Gu X J, Wang X M, Zhao K R, et al. Autonomous resource management system of netted radar for tactical aircrafts[C]// *Proc. of the International Conference on Control and Automation*, 2009; 931-935.
- [10] Wei X X, Duan H B, Wang Y R. Hybrid game theory and D-S evidence approach to multiple UCAVs cooperative air combat decision[C]// *Proc. of the Advances in Neural Networks*, 2009; 236-246.
- [11] Shi Z F, Yang B, Liu H Y. Modeling and simulation of UCAV swarm cooperative task assignment[C]// *Proc. of the 3rd International Conference on Information and Computing*, 2010; 308-311.
- [12] Liu J X, Zhao D M, Zhao C L, et al. Study on mental attribution of decisions of multi-aircrafts cooperative combat command control[C]// *Proc. of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2009; 2002-2005.
- [13] Fei Y, Qing W, Wu Z D. Cooperative combat system action planning method based on multi-agent system[C]// *Proc. of the 2nd International Workshop on Education Technology and Computer Science*, 2010; 490-493.
- [14] 黄俊, 滕鹏, 于雷, 等. C4ISR多传感器跟踪资源协同分配方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(3): 850-855. (Huang J, Teng P, Yu L, et al. Research on coordinated allocation of C4ISR multi-sensor tracking resource[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(3): 850-855.)
- [15] Ramdaras U D, Bolderheij F. Performance-based sensor selection for optimal target tracking[C]// *Proc. of the 12th International Conference on Information Fusion*, 2009; 1687-1694.
- [16] Wang L, Yang H Y, Yu L, et al. Task requirement driven sensor management method[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 2009; 205-211.
- [17] 周文辉, 胡卫东, 郁文贤. 基于 Riccati 方程的稳态传感器分配算法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(7): 863-866. (Zhou W H, Hu W D, Yu W X. Steady-state sensor allocation algorithm based on Riccati equation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(7): 863-866.)
- [18] Mo W, Chen G, Blasch E, et al. Game theoretic multiple mobile sensor management under adversarial environments[C]// *Proc. of the 11th IEEE International Conference on Information Fusion*, 2008; 1-8. (INSPC Accession No. 10365769)