

# 机载雷达、红外、电子支援措施协同跟踪与管理

吴巍<sup>1</sup>, 王国宏<sup>1</sup>, 柳毅<sup>2</sup>, 李世忠<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院信息融合研究所, 山东烟台 264001; 2. 洛阳电光设备研究所, 河南洛阳 471009)

**摘要:** 针对辐射限制下的目标跟踪问题, 提出了一种机载雷达、红外传感器(infrared search and track,IRST)、电子支援措施(electronic support measure, ESM)协同跟踪与管理的方法。针对雷达、红外、ESM量测时间不一致的特点, 采用顺序处理结构的多传感器集中式融合方式对目标进行跟踪, 利用跟踪过程中的预测协方差与预定门限进行比较控制雷达辐射, 并分析了红外、ESM不同间歇时间、不同控制门限与雷达辐射时间的相对关系。研究结论有助于提高作战飞机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.2011.07.16

## Airborne radar/IRST/ESM synergistic tracking and management

WU Wei<sup>1</sup>, WANG Guo-hong<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>, LI Shi-zhong<sup>1</sup>

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

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** For target tracking problem with emission constraints, an airborne radar/infrared search and track (IRST)/electronic support measure (ESM) synergistic tracking and management method is proposed. Since the measurements of radar/IRST/ESM are not coming at the same time, sequential centralized multisensor fusion algorithm is chosen for target tracking, the comparison of the predicted covariance and the given threshold is used to decide the radar to radiate, and the relation between radar's radiation time with different IRST/ESM intermissions and different thresholds is analyzed. The research conclusion can help to increase the combat aircraft's concealment capacity and survival capacity.

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

## 0 引言

作战飞机多传感器系统, 主要包括机载(3D)雷达、电子支援措施(electronic support measure, ESM)、红外传感器(infrared search and track, IRST)等, 对机载雷达、红外、ESM等传感器的协同管理可以保证跟踪精度的前提下减少雷达电磁辐射, 提高作战飞机的隐蔽性。美军的F-22战机就使用了某种辐射控制原理对雷达辐射实施严格管制, 为提高生存能力, 尽可能少用有源雷达已经成为其作战原则。

在多传感器协同探测与管理方面国内外学者做了一些工作: 针对同类多传感器管理方面, 文献[1-5]利用协方差控制策略做了较深入的研究; 文献[6-10]针对基于主动雷达的被动红外跟踪系统, 研究了一些关联、滤波和估计的算法; 文献[11-12]针对雷达/红外组成的跟踪系统, 利用雷达、红外同时开机时的量测信息, 构造出一组时间多项式, 在雷达关机期间, 利用该组时间多项式估计目标的运动状态, 辅助红外传感器进行跟踪; 文献[13]研究了用时间窗方法求取一段时间内的平均新息, 利用平均新息表示跟踪精

度对雷达辐射进行控制; 文献[14-15]利用协方差控制完成主被动传感器融合跟踪。

本文提出了一种机载雷达、红外、ESM协同跟踪与管理的方法。采用基于交互多模型的主被动多传感器顺序处理结构的集中式融合算法对目标进行跟踪, 利用跟踪过程中的预测协方差与预定门限比较对雷达辐射进行控制。对不同门限下目标跟踪情况和雷达辐射次数进行分析, 得出了一些有意义的结论。利用研究结论可以在保证跟踪质量的前提下减少雷达辐射, 提高多传感器系统的隐蔽性, 从而提升载机的生存能力。同时, 研究的成果还可以推广到其他平台的系统中, 如舰载多传感器系统、编队多传感器系统、岸基雷达组网系统等, 具有重要的军事意义和广阔的应用前景。

## 1 融合坐标系的选取

在单架载机信息融合系统中, 载机内部各个传感器彼此距离较近, 可认为它们是共原点的。各个机载传感器量测数据一般在载机传感器平台坐标系下产生, 其中雷达能测得目标的距离 $\rho$ 、方位角 $\theta$ 、俯仰角 $\epsilon$ , 红外传感器能测得目标的方

收稿日期: 2010-07-22; 修回日期: 2011-03-30。

基金项目: 国家自然科学基金(61032001, 60972159, 61002006); 航空科学基金(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, 博士研究生, 主要研究方向为信息融合和传感器管理。E-mail: wkw\_wuwei@126.com

位角  $\theta'$ 、俯仰角  $\epsilon'$ ，ESM 能测得目标的方位角  $\theta''$ 、俯仰角  $\epsilon''$ 。跟踪融合的坐标系通常可以选取地心坐标系或载机地理坐标系，由于被动传感器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。坐标系的转化过程如图 1 所示。

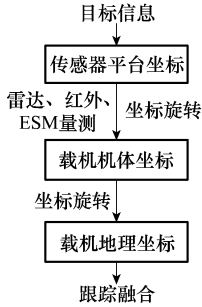


图 1 坐标转换示意图

## 2 融合跟踪模型

### 2.1 融合跟踪结构

机载红外探测距离较近，如果目标距离较远，红外传感器可能测不到目标，或是探测到断断续续的量测。机载 ESM 是利用接收敌方电磁辐射来判断目标的方位，但敌方电磁辐射可能是断断续续的，那么 ESM 量测往往也是间歇的。采用雷达辐射控制的雷达、红外、ESM 融合跟踪时，雷达静默阶段，红外、ESM 量测到来的时间不确定，且红外、ESM 没有距离信息，利用内插外推进行时间对准会产生较大误差，因此雷达、红外、ESM 利用顺序处理结构进行融合跟踪。顺序处理结构融合跟踪的流程图如图 2 所示。

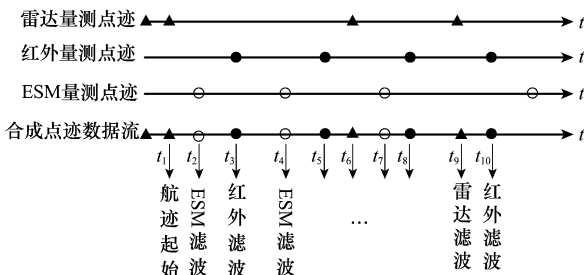


图 2 顺序处理结构的雷达、红外、ESM 融合跟踪结构图

如图 2 所示，顺序处理结构的机载雷达、红外、ESM 融

合跟踪的流程为：首先用雷达量测起始航迹，得到初始状态  $\hat{X}(2|2)$  和初始协方差  $P(2|2)$ ，再根据各个传感器量测的时间顺序进行滤波跟踪。

### 2.2 雷达、红外、ESM 跟踪模型

目标航迹起始，得到初始  $\hat{X}(2|2)$  和初始协方差  $P(2|2)$ ，然后采用交互多模型对目标进行跟踪，融合跟踪的步骤如下：

**步骤 1** 初始化各个模型（采用三个模型）的初始状态和初始协方差

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{2|2}^1 &= \hat{\mathbf{X}}(2|2) \\ \mathbf{X}_{2|2}^2 &= \hat{\mathbf{X}}(2|2) \\ \mathbf{X}_{2|2}^3 &= \hat{\mathbf{X}}(2|2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{2|2}^1 &= \mathbf{P}(2|2) \\ \mathbf{P}_{2|2}^2 &= \mathbf{P}(2|2) \\ \mathbf{P}_{2|2}^3 &= \mathbf{P}(2|2) \end{aligned} \quad (2)$$

**步骤 2** 进入顺序处理结构的融合跟踪滤波。模型  $j(j=1,2,3)$  在  $k$  时刻的混合状态  $M_k^j$  估计

$$\mathbf{X}_{k-1|k-1}^{0j} = \sum_{i=1}^3 \mu_{k-1|k-1}^{ij} \mathbf{X}_{k-1|k-1}^i \quad (3)$$

式中， $\mu_{k-1|k-1}^{ij} = \frac{1}{c_j} p_{ij} \mu_{k-1}^i$ ， $c_j = \sum_{i=1}^N p_{ij} \mu_{k-1}^i$ ， $P_{ij}$  为模型之间的转移概率。

$M_k^j$  的混合协方差为

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k-1|k-1}^{0j} &= \sum_{i=1}^3 \mu_{k-1|k-1}^{ij} [\mathbf{P}_{k-1|k-1}^i + (\mathbf{X}_{k-1|k-1}^i - \mathbf{X}_{k-1|k-1}^{0j}) \cdot \\ & (\mathbf{X}_{k-1|k-1}^i - \mathbf{X}_{k-1|k-1}^{0j})^T] \end{aligned} \quad (4)$$

利用扩展 Kalman 滤波算法对各个模型滤波更新

$$\mathbf{X}_{k|k}^i = \mathbf{X}_{k|k-1}^i + \mathbf{K}_k^i [\tilde{\mathbf{Z}}_k^i], \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{k|k}^i = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^i \mathbf{H}_k^i] \mathbf{P}_{k|k-1}^i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中， $i=1$  表示雷达； $i=2$  表示红外； $i=3$  表示 ESM。

$$\tilde{\mathbf{Z}}_k^{(i)} = \mathbf{Z}_k^{(i)} - \mathbf{H}_k^i \mathbf{X}_{k|k-1}^i \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_k^{(i)} = \mathbf{P}_{k|k-1}^{(i)} (\mathbf{H}_k^i)^T (\mathbf{S}_k^{(i)})^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{S}_k^{(i)} = \mathbf{H}_k^i \mathbf{P}_{k|k-1}^{(i)} (\mathbf{H}_k^i)^T + \mathbf{R}_k^{(i)} \quad (9)$$

式中，当量测为雷达量测时

$$\mathbf{R}_k^{(1)} = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{\rho_{\text{radar}}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\sigma}_{\theta_{\text{radar}}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\sigma}_{\epsilon_{\text{radar}}}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{Z}_k^{(1)} = [\rho_{\text{radar}}(k), \theta_{\text{radar}}(k), \epsilon_{\text{radar}}(k)]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{H}_k^{(1)} = \begin{bmatrix} \hat{x}(k|k-1) & 0 & \hat{y}(k|k-1) & 0 & \hat{z}(k|k-1) & 0 \\ \hat{r} & & \hat{r} & & \hat{r}^2 & \\ -\hat{y}(k|k-1) & 0 & \hat{x}(k|k-1) & 0 & 0 & 0 \\ \hat{r}^2 & & \hat{r}^2 & & 0 & 0 \\ -\hat{x}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1) & 0 & -\hat{y}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1) & 0 & \hat{r} & 0 \\ \hat{r}\hat{R}^2 & & \hat{r}\hat{R}^2 & & \hat{R}^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中

$$\hat{r} = \sqrt{\hat{x}^2(k|k-1) + \hat{y}^2(k|k-1)}$$

$$\hat{R} = \sqrt{\hat{r}^2 + \hat{z}^2(k|k-1)}$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{F}_{k-1}^i \mathbf{X}_{k-1|k-1}^i \mu_{k-1}^i$$

当量测为红外时

$$\mathbf{R}_k^{(2)} = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{\theta_{\text{IRST}}}^2 & 0 \\ 0 & \hat{\sigma}_{\epsilon_{\text{IRST}}}^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{Z}_k^{(2)} = [\theta_{\text{IRST}}(k), \epsilon_{\text{IRST}}(k)]^T \quad (14)$$

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

式中

$$\begin{aligned} \hat{r} &= \sqrt{[\hat{x}(k|k-1)]^2 + [\hat{y}(k|k-1)]^2} \\ \hat{R} &= \sqrt{\hat{r}^2 + [\hat{z}(k|k-1)]^2} \\ \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} &= \sum_{i=1}^3 \mathbf{F}_{k-1}^i \mathbf{X}_{k-1|k-1}^i \mu_{k-1}^i \end{aligned}$$

当量测为 ESM 量测时

$$\mathbf{R}_k^{(3)} = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{\text{ESM}}^2 & 0 \\ 0 & \hat{\sigma}_{\text{ESM}}^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{Z}_k^{(3)} = [\theta_{\text{ESM}}(k), \epsilon_{\text{ESM}}(k)]^T \quad (17)$$

$$\mathbf{H}_k^{(3)} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{y}(k|k-1)}{\hat{r}^2} & 0 & \frac{\hat{x}(k|k-1)}{\hat{r}^2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\hat{x}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}\hat{R}^2} & 0 & -\frac{\hat{y}(k|k-1)\hat{z}(k|k-1)}{\hat{r}\hat{R}^2} & 0 & \frac{\hat{r}}{\hat{R}^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中

$$\begin{aligned} \hat{r} &= \sqrt{[\hat{x}(k|k-1)]^2 + [\hat{y}(k|k-1)]^2} \\ \hat{R} &= \sqrt{\hat{r}^2 + [\hat{z}(k|k-1)]^2} \\ \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} &= \sum_{i=1}^3 \mathbf{F}_{k-1}^i \mathbf{X}_{k-1|k-1}^i \mu_{k-1}^i \end{aligned}$$

计算各个模型可能性计算

$$\Delta_k^i = \frac{1}{\sqrt{|2\pi\mathbf{S}_k^i|}} \exp[-0.5(\tilde{\mathbf{Z}}_k^i)^T (\mathbf{S}_k^i)^{-1} \tilde{\mathbf{Z}}_k^i] \quad (19)$$

模型概率更新

$$\mu_k^i = \frac{1}{c} \Delta_k^i \bar{c}_i \quad (20)$$

式中,  $c = \sum_{i=1}^3 \Delta_k^i \bar{c}_i$ 。合并状态估计,可得

$$\mathbf{X}_{k|k} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{X}_{k|k}^i \mu_k^i \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = \sum_{i=1}^3 \mu_k^i [\mathbf{P}_{k|k}^i + (\mathbf{X}_{k|k}^i - \mathbf{X}_{k|k})(\mathbf{X}_{k|k}^i - \mathbf{X}_{k|k})^T] \quad (22)$$

### 3 传感器管理模型

根据上述滤波算法的输出状态估计和协方差预测下一次雷达辐射时机,利用预测协方差与预先设置的门限比较来控制雷达辐射。当预测协方差小于门限值时,雷达不辐射;当预测协方差超过门限时,雷达辐射。即

$$\bar{\mathbf{P}}_{k+T|k} \leq \bar{\mathbf{P}}_{\text{th}} \quad (23)$$

式中,  $\bar{\mathbf{P}}_{k+T|k}$  表示预测位置误差;  $\bar{\mathbf{P}}_{\text{th}}$  为门限,可表示为

$$\bar{\mathbf{P}}_{\text{th}} = \lambda \mathbf{R}_k^{\text{XYZ}} = \mathbf{U}_k \mathbf{R}^1 \mathbf{U}_k^T \quad (24)$$

$\mathbf{P}_{k+T|k}$  可表示为

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{P}}_{k+T|k} &= \sum_{i=1}^3 \mu_k^i (\mathbf{F}_k^i \mathbf{P}_{k|k}^i (\mathbf{F}_k^i)^T + \mathbf{G}_k^i \mathbf{Q}_k^i (\mathbf{G}_k^i)^T + \\ &\quad \mathbf{F}_k^i \mathbf{X}_{k|k}^i (\mathbf{F}_k^i \mathbf{X}_{k|k}^i)^T) - \bar{\mathbf{X}}_{k+T|k} \bar{\mathbf{X}}_{k+T|k}^T \end{aligned} \quad (25)$$

式中,  $\mu_k^i$  表示当前的模型概率;  $\bar{\mathbf{X}}_{k+T|k}$  表示  $k+T$  时刻的位置状态预测

$$\bar{\mathbf{X}}_{k+T|k} = \sum_{i=1}^3 \mu_k^i \mathbf{F}_k^i \mathbf{X}_{k|k}^i \quad (26)$$

由于雷达的量测误差为极坐标下的,因此,预测协方差与门限的比较在极坐标系下进行,即

$$\bar{\mathbf{P}}_{\text{th}}^{\text{Sp}} = \mathbf{U}_k^T \bar{\mathbf{P}}_{\text{th}} \mathbf{U}_k = \lambda \mathbf{R}^1 \text{ 和 } \bar{\mathbf{P}}_{k|k-1}^{\text{Sp}} = \mathbf{U}_k^T \bar{\mathbf{P}}_{k|k-1}^{1,3,5} \mathbf{U}_k$$

式中,  $\bar{\mathbf{P}}_{k|k-1}^{1,3,5}$  表示  $\bar{\mathbf{P}}_{k+T|k}$  协方差中位置的预测协方差。

那么求取下一次雷达辐射的时间间隔为解下面方程

$$\bar{\mathbf{P}}_{k|k-1}^{\text{Sp}}(1,1) = \lambda^2 \hat{\sigma}_{\rho_{\text{radar}}}^2 \quad (27)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{k|k-1}^{\text{Sp}}(2,2) = \lambda^2 \hat{\sigma}_{\theta_{\text{radar}}}^2 \quad (28)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{k|k-1}^{\text{Sp}}(3,3) = \lambda^2 \hat{\sigma}_{\epsilon_{\text{radar}}}^2 \quad (29)$$

分别求方程(27)~(29)中的时间间隔  $T_s^\rho$ 、 $T_s^\theta$  和  $T_s^\epsilon$ ,取  $T_s = \min\{T_s^\rho, T_s^\theta, T_s^\epsilon\}$  为下一次雷达辐射的时间间隔。求取  $T_s^\rho$  的方法如下( $T_s^\theta, T_s^\epsilon$ 求法类似):

(1) 设  $T_{\text{left}} = T_{\text{min}}, T_{\text{right}} = T_{\text{max}}$  ( $T_{\text{min}}, T_{\text{max}}$  为雷达最小和最大辐射时间间隔);

(2) 如果  $T_{\text{right}} - T_{\text{left}} \leq \epsilon$  ( $\epsilon$  为给定的一个较小的常数),跳到第(4)步;

(3) 如果  $T_{\text{right}} - T_{\text{left}} > \epsilon$  令  $T_{\text{test}} = T_{\text{left}} + [(T_{\text{right}} - T_{\text{left}}) / 2]$ 。将  $T = T_{\text{test}}$  带入式(27),得到  $\bar{\mathbf{P}}_{k|k-1}^{\text{Sp}}(1,1)$ 。如果  $\bar{\mathbf{P}}_{k|k-1}^{\text{Sp}}(1,1) \leq \lambda^2 \hat{\sigma}_{\rho_{\text{radar}}}^2$  则  $T_{\text{left}} = T_{\text{test}}$ , 否则  $T_{\text{right}} = T_{\text{test}}$ , 回到第(2)步;

(4) 取出  $T_s^\rho = T_{\text{left}}$  或  $T_s^\rho = T_{\text{right}}$  为式(27)的解。

### 4 仿真实验

#### 4.1 仿真环境设置

我和目标的运动在地理坐标系下建模,跟踪过程在我机载机地理坐标系下进行。我机初始位置纬度、经度、高度分别为(36.1°, 121.1°, 5 901.5 m), 初始速度在纬度、经

度、高度方向为(100 m/s, 100 m/s, 0 m/s), 在 0 s~120 s 内做匀速运动; 红外和 ESM 量测最小间隔为 0.5 s, 红外在方位和俯仰上的量测噪声均方根误差为 0.1°, ESM 在方位和俯仰上的量测噪声均方根误差为 0.3°, 雷达测距噪声均方根误差为 100 m, 方位和俯仰上的量测噪声均方根误差为 0.2°; 目标运动模型初始位置纬度、经度、高度为 (36.1°, 120°, 8 111.3 m), 初始速度在纬度、经度、高度方向为(-200 m/s, -300 m/s, 0 m/s)。目标运动方式有两种:

- (1) 在整个过程中做匀速直线运动。
- (2) 在 0 s~30 s, 90 s~120 s 内做匀速直线运动, 在 30 s~60 s 内做左转弯运动, 在 60 s~90 s 做右转弯运动, 转弯的角速度均为 6 rad/s。

**仿真情况 1** 目标匀速直线运动, 设置控制因子  $\lambda=3$ , 红外传感器量测在跟踪时间内有随机的 60 个点迹, ESM 量测在跟踪时间内也有随机的 60 个点迹, 雷达起始航迹后进入辐射控制阶段。

- 仿真情况 2** 目标蛇形机动, 其他参数和情况 1 相同。
- 仿真情况 3** 针对匀速直线运动和蛇形机动, 设置不同的辐射控制因子, 不同红外/ESM 量测数, 蒙特卡罗仿真 100 次比较雷达的平均辐射次数。

**4.2 仿真结果与分析**

**情况 1** 目标做匀速直线运动时的真实轨迹和跟踪轨迹如图 3 所示, 雷达实时辐射时机图如图 4 所示, 红外量测到来时机图如图 5 所示, ESM 量测到来时机图如图 6 所示。跟踪过程中距离、方位、俯仰上的误差图如图 7~图 9 所示。

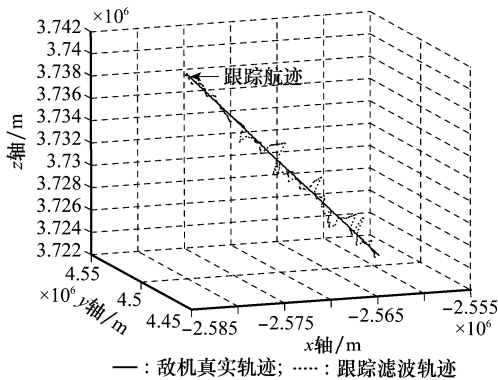


图 3 目标匀速运动跟踪示意图

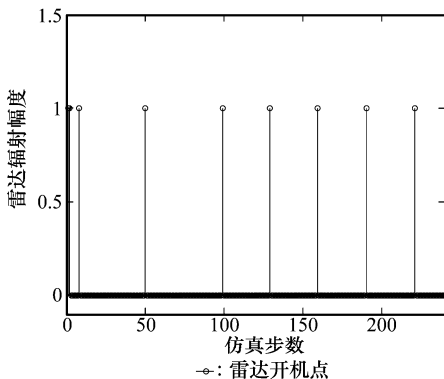


图 4 目标匀速运动雷达辐射时机图

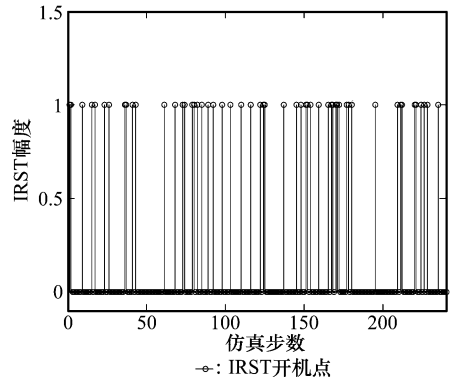


图 5 目标匀速运动红外量测点分布图

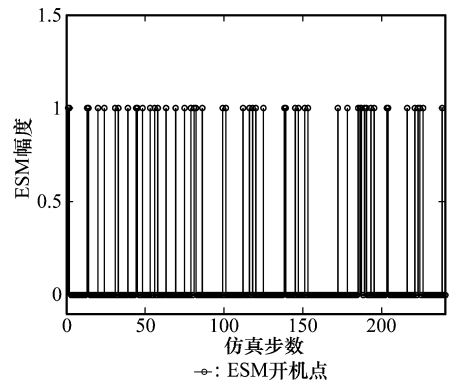


图 6 目标匀速运动 ESM 量测点分布图

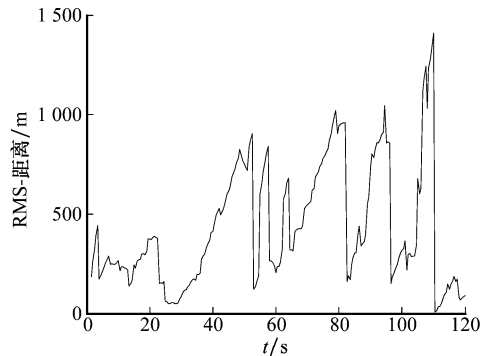


图 7 目标匀速运动距离跟踪误差图

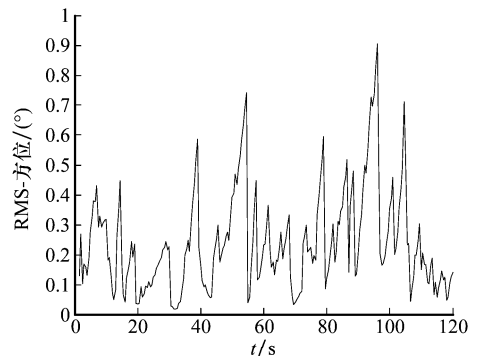


图 8 目标匀速运动方位跟踪误差图

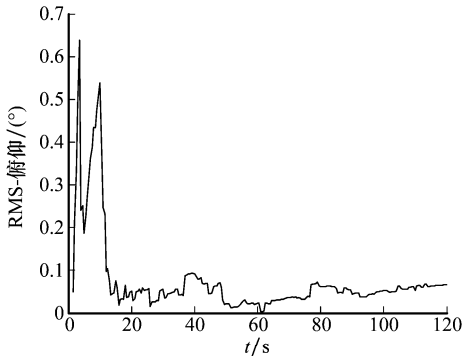


图 9 目标匀速运动俯仰跟踪误差图

从情况 1 的仿真结果可以看出,本文提出的机载雷达、红外、ESM 协同跟踪与管理方法能对匀速运动目标进行跟踪和辐射控制。在雷达开机点,对应的距离、方位上的跟踪误差变小;雷达关机时,距离上的误差逐渐增大。

**情况 2** 目标做蛇形机动时的真实轨迹和跟踪轨迹如图 10 所示,雷达实时辐射时机图如图 11 所示,红外量测到来时机图如图 12 所示,ESM 量测到来时机图如图 13 所示。跟踪过程中距离、方位、俯仰上的误差图如图 14~图 16 所示。

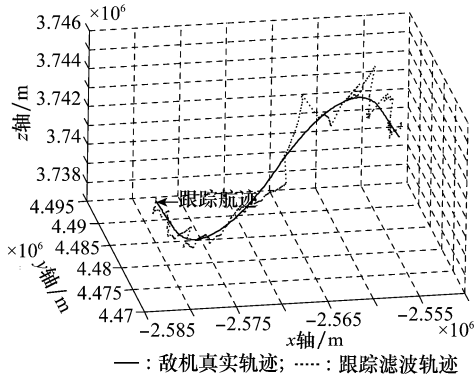


图 10 目标蛇形机动跟踪示意图

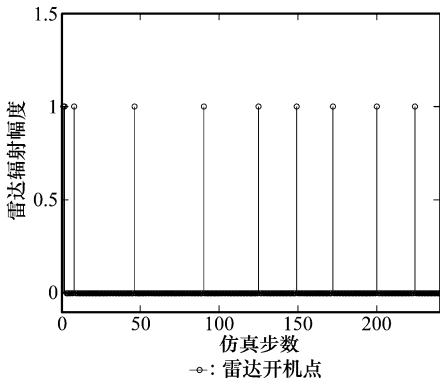


图 11 目标蛇形机动雷达辐射时机图

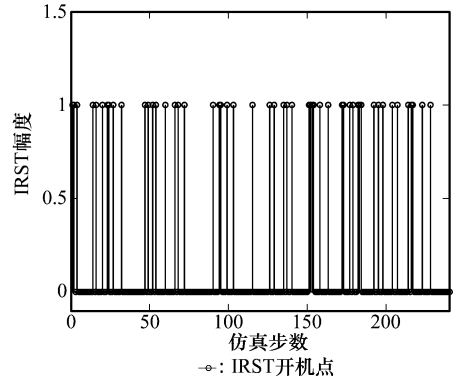


图 12 目标蛇形机动红外量测图

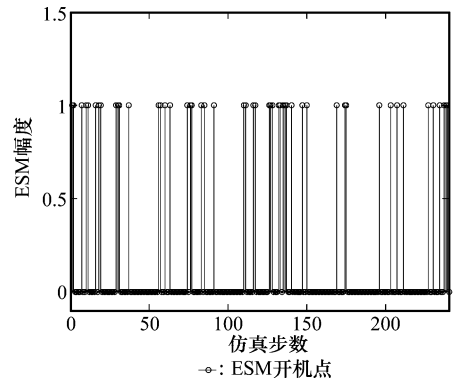


图 13 目标蛇形机动 ESM 量测图

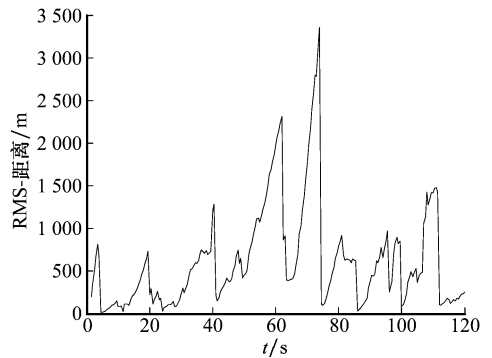


图 14 目标蛇形机动距离跟踪误差图

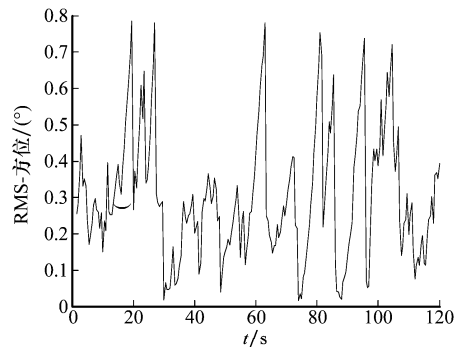


图 15 目标蛇形机动方位跟踪误差图

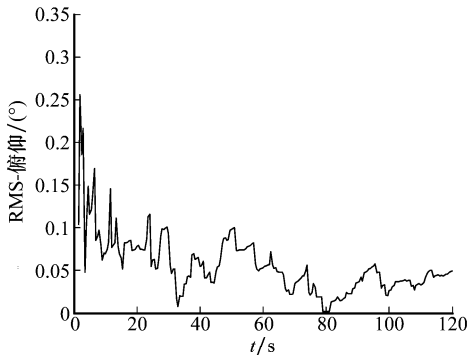


图 16 目标蛇形机动俯仰跟踪误差图

比较图 4 和图 11 可以看出,选取相同的辐射控制因子,跟踪匀速运动目标比跟踪机动目标时雷达辐射次数要少。从图 7 和图 14 可以看出,由于被动传感器(红外、ESM)量测没有距离信息,当雷达关机时,被动传感器对目标进行跟踪,跟踪过程中距离误差逐渐变大;红外、ESM 量测是断断续续的,当雷达关机且被动量测在一段时间内也没有时,角度上的跟踪误差也会变大;当误差增大到一定的程度,即误差达到辐射因子平方乘上量测误差时,雷达开机辐射;雷达开机,目标在距离、方位、俯仰上的误差立刻变小,雷达再次关机。因此在实际应用中,可以根据跟踪精度和被动量测的数据率选取合适的辐射控制因子。

**情况 3** 对于不同的目标运动方式、不同的辐射因子、不同的红外/ESM 间歇时间情况下的雷达平均辐射次数比较如表 1 所示。

**表 1 目标运动方式、雷达控制因子、红外/ESM 间歇等  
不同时的雷达辐射比较** 次

运动方式	不同时的雷达辐射比较					
	匀速运动			蛇形机动		
辐射因子	3	4	5	3	4	5
红外连续	6.62	4.42	3.3	12.42	5.36	4.02
ESM 连续	13.22	9.76	8.14	16.16	11.82	9.78
红外关机	15.08	11.12	9.3	20.86	15.22	12.42
ESM 连续	18.86	16.26	10.76	25.12	20.9	14.8
红外 20 点	20.06	18.98	10.16	28.42	26.16	15.72
ESM 20 点	20.18	21.02	9.14	30.26	27.66	16.42
红外 5 个点						
ESM 5 个点						
红外关机						
ESM 关机						

从仿真情况 3 的结果可以看出,相同辐射控制因子,相同的红外和 ESM 量测情况下,跟踪匀速运动目标比跟踪机动目标雷达辐射次数少;若只有一种被动传感器与雷达协同时,由于红外的测角精度高,相同的红外和 ESM 量测分别协同雷达进行融合跟踪时,红外辅助时雷达辐射次数少;对于相同的辐射控制门限,无红外、ESM 协同的情况雷达辐射次数明显多于红外和 ESM 辅助雷达跟踪时的情况,证明了红外、ESM 和雷达协同跟踪能在保证一定精度的情况下减少雷达的电磁辐射。同时,对于间歇情况下的红外和 ESM 量测辅助雷达跟踪的情况,量测越多,雷达辐射次数就越少。

在仿真过程发现,利用红外、ESM 辅助雷达进行机动目标跟踪时,辐射控制因子选取要合适,如果因子选取过

大,可能会导致目标的跟踪误差很大、甚至跟踪发散。辐射控制因子大小的选取原则还有待进一步研究。

### 5 结 论

本文研究了一种机载雷达、红外、ESM 协同跟踪与管理的方法。针对雷达、红外、ESM 量测时间不一致的特点,采用三种传感器顺序处理结构融合滤波对目标进行跟踪,利用跟踪的预测协方差与预定门限进行比较控制雷达辐射。仿真表明该辐射控制方法能很好地控制雷达辐射,并可以根据对目标跟踪过程中不同红外、ESM 间歇时间、不同测量精度以及不同的跟踪精度要求来设置辐射控制门限。研究结论有助于提高作战飞机的抗侦察和抗干扰能力,从而提高其整体的生存能力。

### 参考文献:

- [1] Kalandros M. Managing multiple sensor resources using covariance control techniques for tracking systems with data association [D]. Boulder: University of Colorado,2000.
- [2] Kalandros M, Pao L Y. Sensor management for tracking interacting targets[C]// *Proc. of the Workshop on Estimation, Tracking, Fusion and Control*,2001;221-248.
- [3] Kalandros M, Pao L Y. Covariance control for multisensor systems[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2002,38(4):1138-1157.
- [4] Kalandros M, Pao L Y. Covariance control for sensor management in cluttered tracking environments[J]. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*,2004,27(3):493-496.
- [5] Kalandros M, Pao L Y. Multisensor covariance control strategies for reducing bias effects in interacting target scenarios[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*,2005,41(1):153-173.
- [6] Cui N Z, Xie W X, Yu X N, et al. Multisensor distributed extended Kalman filtering algorithm and its application to radar/IR target tracking[C]// *Proc. of the International Society for Optical Engineering*,1997;323-330.
- [7] Blackman S S, Dempster R J, Roszkowski S H. IMM/MHT applications to radar and IR multitarget tracking[C]// *Proc. of the International Society for Optical Engineering*,1997;429-439.
- [8] Huyssteen D V, Farooq M. Performance analysis of bearing only target tracking algorithm[C]// *Proc. of the International Society for Optical Engineering*,1998;139-149.
- [9] Simard M A, Begin F. Central level fusion of radar andIRST contacts and the choice of coordinate system[C]// *Proc. of the International Society for Optical Engineering*,1993;462-472.
- [10] Maltese D, Lucas A. Data fusion: Principles and applications in air defense[C]// *Proc. of the International Society for Optical Engineering*,1998;329-336.
- [11] Li A P, Jing Z L, Hu S Q. UKF-based multi-sensor passive tracking with active assistance[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*,2006,17(2):245-250.
- [12] Dou L H, Yang G S. Synergy decision for radar andIRST data fusion[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*,2002,3(11):229-231.
- [13] 程咏梅,潘泉,张洪才. 红外/雷达传感器协同跟踪算法研究. 火力与指挥控制,2001,3(21):20-23. (Cheng Y M, Pan Q, Zhang H C. Study on infrared and radar sensor synergistic tracking algorithm[J]. *Fire Control and Command Control*,2001,3(21):20-23.)
- [14] Olivier B, Laurent R. Radar scheduling with emission constraints[C]// *Proc. of the International Society for Optical Engineering*,1993;153-156.
- [15] Watson G A, Blair W D. Revisit calculation and waveform control for a multifunction radar[C]// *Proc. of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control*,1993;448-453.