

文章编号: 1001-0920(2012)01-0120-04

## 基于决策信息的毫米波/红外复合制导信息融合

许建忠<sup>1,2</sup>, 王祖林<sup>1</sup>, 郭旭静<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191; 2. 河北大学 物理科学与技术学院, 河北 保定 071002)

**摘要:** 针对复杂环境下的毫米波/红外复合制导, 提出一种基于决策信息的改进加权融合算法. 通过分析导弹运行状态和受干扰情况, 获得制导的决策信息. 对经无迹卡尔曼滤波(UKF)估计分别得到的毫米波/红外量测信息进行改进的自适应加权融合, 得到融合后的制导信息. 仿真实验表明, 所提方法融合精度高, 能有效提高复合制导的性能.

**关键词:** 决策信息; 复合制导; 无迹卡尔曼滤波; 融合算法

中图分类号: TJ765.3; TP391

文献标识码: A

## Information fusion based on decision information for millimeter wave and infrared compound guidance

XU Jian-zhong<sup>1,2</sup>, WANG Zu-lin<sup>1</sup>, GUO Xu-jing<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 2. College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China. Correspondent: XU Jian-zhong, E-mail: bdxjz@sina.com)

**Abstract:** According to millimeter wave and infrared compound guidance under the complex background, an improvement weighting fusion algorithm based on decision information is proposed. The decision information of guidance is obtained by analyzing missile running status and the disturbed condition. The measured information of millimeter wave and infrared is acquired by unscented Kalman filter(UKF) estimation respectively. With an improvement self-adapting weighting fusion algorithm, fused guidance information is obtained. The simulation result shows that the precision of this method is high, and the performance of combined guidance can be improved effectively.

**Key words:** decision information; combined guidance; UKF; fusion algorithm

### 1 引言

毫米波雷达制导具有全天候、测角和测距、环境适应性好等优点, 但其测角精度较低, 且是主动制导, 容易受到敌方的电子干扰; 红外制导接收目标辐射的热能进行探测和定位, 具有测角精度较高、测量连续、目标识别能力强等特点, 但其探测距离近, 且不能提供目标的距离信息. 因此, 将毫米波制导和红外制导配合使用, 形成双模制导, 将二者提供的目标信息进行有效的融合, 可大大提高制导的精度<sup>[1]</sup>.

多传感器信息融合是毫米波雷达与红外双模制导系统的关键技术. 文献[2]提出了红外与雷达协同跟踪方法, 并通过利用无迹卡尔曼滤波(UKF)提高了目标的跟踪精度; [3]提出了基于量测融合的估计方法和航迹融合的视线角速度估计方法, 降低了制导误差; [4]通过对两传感器的滤波协方差矩阵的相关估

计, 将滤波协方差矩阵和状态估计进行融合, 得到比单模制导系统目标跟踪精度高的效果; [5]提出了基于交互式多模型算法, 以红外估计距离为伪距离量测进行主动雷达和红外的融合. 但这些方法没有考虑到导弹的工作状况和受干扰情况.

本文根据毫米波雷达和红外制导系统的工作特点、制导武器面临的复杂环境, 首先利用UKF分别对毫米波雷达和红外测量数据进行滤波估计, 然后采用基于决策信息的自适应加权融合算法进行制导信息融合. 仿真实验结果表明了该方法的有效性.

### 2 毫米波与红外跟踪的滤波估计

#### 2.1 毫米波与红外跟踪的数学模型

假设导弹上的毫米波雷达与红外制导系统共孔径并在同一坐标系下, 系统的运动状态模型和测量模

收稿日期: 2010-08-06; 修回日期: 2010-12-26.

基金项目: 教育部博士点基金项目(20091102120010).

作者简介: 许建忠(1968—), 男, 博士生, 从事红外图像处理、信息融合等研究; 王祖林(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事图像通信、卫星通信等研究.

型为<sup>[6]</sup>

$$X(k+1) = AX(k) + Ba_M(k) + Cw(k), \quad (1)$$

$$Z(k) = h(X(k), v(k)). \quad (2)$$

其中:  $X(k) = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]$  为系统的状态向量, 分别为目标相对于导弹的位置、速度及加速度在以弹体为中心的直角坐标系3个轴上的投影分量;  $a_M(k) = [a_{Mx} \ a_{My} \ a_{Mz}]$  为导弹的机动向量, 为系统中的控制量;  $w(k)$  和  $v(k)$  分别为状态噪声和观测噪声, 均为零均值的白噪声, 且线性无关;  $h$  为测量矩阵。

以目标相对于弹体的距离、方位角和俯仰角作为观测向量, 毫米波雷达制导系统可测量目标的距离、方位角及俯仰角的测量方程为

$$\begin{bmatrix} r_R(k) \\ \theta_R(k) \\ \varphi_R(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)} \\ \arctan(y(k)/x(k)) \\ \arctan\left(z(k)/\sqrt{x^2(k) + y^2(k)}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{r_R}(k) \\ v_{\theta_R}(k) \\ v_{\varphi_R}(k) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中:  $r_R(k)$ ,  $\theta_R(k)$ ,  $\varphi_R(k)$  分别为目标距离、方位角及俯仰角的测量值;  $v_{r_R}(k)$ ,  $v_{\theta_R}(k)$ ,  $v_{\varphi_R}(k)$  为均值为零、方差分别为  $\sigma_{r_R}^2$ ,  $\sigma_{\theta_R}^2$ ,  $\sigma_{\varphi_R}^2$  的高斯白噪声。

红外制导系统只能测量目标的方位角  $\theta_I(k)$  和俯仰角  $\varphi_I(k)$ , 其测量方程为

$$\begin{bmatrix} \theta_I(k) \\ \varphi_I(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan(y(k)/x(k)) \\ \arctan\left(z(k)/\sqrt{x^2(k) + y^2(k)}\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\theta_I}(k) \\ v_{\varphi_I}(k) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中:  $\theta_I(k)$ ,  $\varphi_I(k)$  分别为目标方位角及俯仰角的测量值;  $v_{\theta_I}(k)$ ,  $v_{\varphi_I}(k)$  为均值为零、方差分别为  $\sigma_{\theta_I}^2$ ,  $\sigma_{\varphi_I}^2$  的高斯白噪声。

## 2.2 基于 UKF 的滤波算法

UKF 算法是一种基于 UT 变换的滤波算法。该算法克服了对非线性函数进行线性化、忽略高阶项带来的误差影响, 从统计学的角度对测量数据进行滤波估计。其滤波过程如下<sup>[7]</sup>:

1) 初始化。给定  $t_{k-1}$  时刻的系统状态向量  $X(k-1/k-1)$  和协方差  $P_{XX}(k-1/k-1)$ , 得到状态向量  $X$  的 Sigma 采样点  $\{\chi_i(k-1/k-1)\}$  和权值  $\{W_i\}$ 。

2) 时间预测。利用状态模型和测量模型分别得到状态预测 Sigma 采样点  $\{\chi_i(k/k-1)\}$ , 测量预测 Sigma 采样点  $\{Z_i(k/k-1)\}$ , 并利用权值  $\{W_i\}$  计算, 分别得到状态预测值  $X(k/k-1)$  和测量预测值  $\bar{Z}(k/k-1)$ 。由此可得  $X$  的预测协方差  $P_{XX}(k/k-1)$ , 状态与测量的互协方差  $P_{XZ}(k/k-1)$  以及新息协方差

$$P_{ZZ}(k/k-1).$$

3) 测量更新。UKF 增益、状态更新和协方差更新分别为

$$K = P_{XZ}(k/k-1)/P_{ZZ}(k/k-1), \quad (5)$$

$$X(k/k) = X(k/k-1) + K[Z(k) - \bar{Z}(k/k-1)], \quad (6)$$

$$P_{XX}(k/k) = P_{XX}(k/k-1) - KP_{ZZ}(k/k-1)K^T. \quad (7)$$

## 3 毫米波与红外制导信息的融合

### 3.1 毫米波/红外制导的融合决策分析

在现代战争中, 导引头工作的电磁环境越来越复杂, 复合导引头即是综合运用毫米波和红外制导信息, 通过融合提高制导性能。

#### 3.1.1 毫米波/红外制导的搜索策略

在导弹运行的不同阶段, 由于毫米波雷达和红外制导系统的探测距离不同, 其搜索作用也是不同的<sup>[8]</sup>。假设  $Ra_d$ ,  $IR_d$  分别为毫米波雷达和红外制导系统的探测指令, 当毫米波雷达制导系统接收到目标信息时, 取  $Ra_d$  为 0, 否则为 1; 当红外制导系统接收到目标信息时, 取  $IR_d$  为 0, 否则为 1。因此有: 1) 当弹目距离大于毫米波雷达探测距离时, 毫米波雷达与红外制导系统均处于搜索状态, 取  $Ra_d = 1$ ,  $IR_d = 1$ ; 2) 当弹目距离小于毫米波雷达探测距离而大于红外探测距离时, 红外制导系统处于搜索状态, 毫米波雷达制导系统工作, 且引导红外制导系统, 并有  $Ra_d = 0$ ,  $IR_d = 1$ ; 3) 当弹目距离小于红外探测距离时, 毫米波雷达、红外制导系统融合工作, 输出融合后的制导信息, 此时有  $Ra_d = 0$ ,  $IR_d = 0$ ; 4) 当弹目距离接近 100 m 时, 由于存在毫米波角闪烁效应, 此时只需运用红外制导系统提供的制导信息对目标进行攻击, 有  $Ra_d = 1$ ,  $IR_d = 0$ 。

#### 3.1.2 毫米波/红外制导的抗干扰策略

在毫米波制导和红外制导同时工作时, 由于复杂背景环境和干扰等的影响, 毫米波雷达和红外制导系统获得的制导信息在融合时需要进行优化考虑。如果在毫米波雷达受到干扰和噪声影响时, 超出系统的置信度, 则认为毫米波雷达制导不可用, 启用红外单模制导; 而在红外制导受到干扰、噪声过大时, 则选用毫米波雷达单模制导等。

由测量的信息  $v(k) = Z(k) - \bar{Z}(k/k-1)$  和信息协方差  $S(k) = P_{ZZ}(k/k-1)$  可得估计误差之间的距离<sup>[9]</sup>

$$\eta(k) = v^T(k)S^{-1}(k)v(k), \quad (8)$$

并且服从自由度为  $l$  的  $\chi^2$  分布。由于毫米波雷达制导

量测信息包括距离、俯仰角和方位角,取  $l = 3$ ; 而红外制导的量测信息只包括俯仰角和方位角,取  $l = 2$ . 根据  $\chi^2$  分布规律,可定义不同置信水平上的制导信息有效域:预先定义阈值  $G$ ,如果  $\eta(k) \geq G$ ,则该制导信息无效;如果  $\eta(k) < G$ ,则认为该制导信息有效. 设  $R_{a_{ai}}$ ,  $IR_{a_{ai}}$  分别为毫米波雷达和红外制导系统抗干扰工作指令,当毫米波雷达制导的干扰和噪声影响在置信度以内时,取  $R_{a_{ai}} = 0$ ; 否则  $R_{a_{ai}} = 1$ . 同样,当红外制导系统的干扰和噪声影响在置信度以内时,取  $IR_{a_{ai}} = 0$ ; 否则  $IR_{a_{ai}} = 1$ .

### 3.2 基于决策信息的改进融合算法

通过基于 UKF 的滤波估计,分别得到毫米波雷达与红外制导系统的目标跟踪信息,设毫米波雷达的量测估计值和方差分别为  $[r_R \ \theta_R \ \varphi_R]$  和  $[\sigma_{R_r}^2 \ \sigma_{R_\theta}^2 \ \sigma_{R_\varphi}^2]$ , 红外传感器的量测估计值和方差分别为  $[\theta_I \ \varphi_I]$  和  $[\sigma_{I_\theta}^2 \ \sigma_{I_\varphi}^2]$ . 假设毫米波与红外的跟踪信息已经过时空配准,并经航迹关联处理后,确认来自于同一目标. 根据前述融合决策的分析,对自适应加权融合算法<sup>[10]</sup>进行了改进. 通过增加两个决策系数  $d_I$  和  $d_R$  调节红外制导和毫米波雷达制导信息在融合算法中的权重,以反映制导过程中系统的决策信息,改进的融合算法为

$$\theta_{IR} = \frac{d_R \sigma_{R_\theta}^2}{d_I \sigma_{I_\theta}^2 + d_R \sigma_{R_\theta}^2} \theta_I + \frac{d_I \sigma_{I_\theta}^2}{d_I \sigma_{I_\theta}^2 + d_R \sigma_{R_\theta}^2} \theta_R, \quad (9)$$

$$\varphi_{IR} = \frac{d_R \sigma_{R_\varphi}^2}{d_I \sigma_{I_\varphi}^2 + d_R \sigma_{R_\varphi}^2} \varphi_I + \frac{d_I \sigma_{I_\varphi}^2}{d_I \sigma_{I_\varphi}^2 + d_R \sigma_{R_\varphi}^2} \varphi_R. \quad (10)$$

其中:决策系数  $d_I$  和  $d_R$  与导弹的制导融合决策有关,由以下逻辑关系可得:

1) 在  $\overline{IR}_d \cap \overline{IR}_{ai} = 0$ ,  $\overline{Ra}_d \cap \overline{Ra}_{ai} = 1$  时,毫米波雷达制导信息有效,则决策系数  $d_I = 1$ ,  $d_R = 0$ .

2) 在  $\overline{IR}_d \cap \overline{IR}_{ai} = 1$ ,  $\overline{Ra}_d \cap \overline{Ra}_{ai} = 1$  时,毫米波雷达与红外制导信息融合,且当航迹关联时,决策系数  $d_I = 1$ ,  $d_R = 1$ ; 当航迹不关联时,取毫米波与红外制导信息置信水平高的决策系数为 0,低的为 1.

3) 在  $\overline{IR}_d \cap \overline{IR}_{ai} = 1$ ,  $\overline{Ra}_d \cap \overline{Ra}_{ai} = 0$  时,红外制导信息有效,则决策系数  $d_I = 0$ ,  $d_R = 1$ .

4) 在  $\overline{IR}_d \cap \overline{IR}_{ai} = 0$ ,  $\overline{Ra}_d \cap \overline{Ra}_{ai} = 0$  时,双模制导信息均无效.

## 4 仿真结果与分析

假设在直角坐标系下,导弹与目标的初始时刻相对位置为  $x = 15 \text{ km}$ ,  $y = 10 \text{ km}$ ,  $z = 5 \text{ km}$ ; 导弹与目标的相向速度为  $\dot{x} = -400 \text{ m/s}$ ,  $\dot{y} = -267 \text{ m/s}$ ,  $\dot{z} = -134 \text{ m/s}$ ; 加速度向量为  $\ddot{x} = \ddot{y} = \ddot{z} = 10 \text{ m/s}^2$ . 设导弹飞行过程中的状态噪声均方差为  $10 \text{ m/s}^2$ , 毫米波

雷达制导的角度量测噪声均方差为  $4 \text{ mrad}$ , 距离量测噪声均方差为  $50 \text{ m}$ , 红外制导角度量测噪声均方差为  $2 \text{ mrad}$ . 仿真实验中,取采样周期  $T = 0.01 \text{ s}$ , 观测时间为  $20 \text{ s}$ . 在 UKF 算法中,各参数设定为  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 2$ ,  $\kappa = 0$ .

### 4.1 融合算法仿真

图 1 为导弹相对于目标的运行轨迹估计. 图 2 为毫米波雷达与红外成像制导系统的量测和滤波估计结果(由于篇幅所限,本文只给出了方位角估计). 由图 2 可以看出,经过 UKF 后,滤波估计后的误差减小. 图 3 为经过加权融合后的方位角估计,可以看到经过融合后的方位角估计误差进一步减小,而且小于序贯融合方法<sup>[11]</sup>的估计误差.

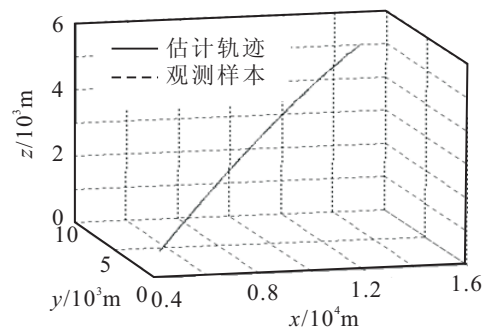


图 1 导弹相对于目标的运行轨迹

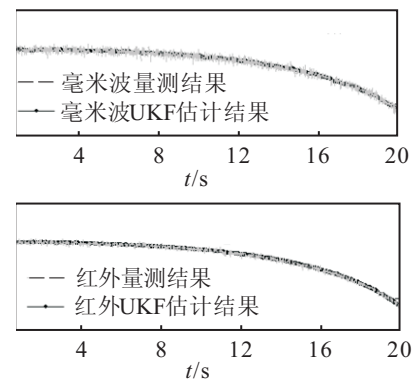


图 2 方位角量测和滤波估计结果

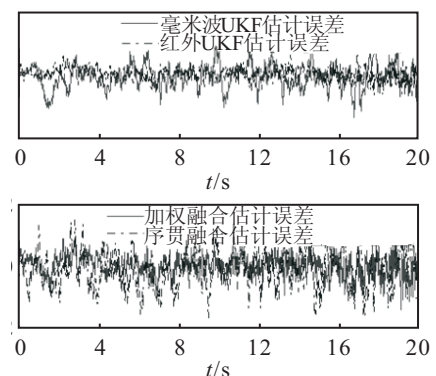


图 3 方位角滤波估计误差与融合误差

表 1 为复合制导量测估计与融合的 RMSE. 由表 1 可知, 毫米波和红外量测经过滤波估计后误差减小, 经过加权融合后, 精度进一步得到提高, 而且优于序贯融合方法.

表 1 复合制导量测估计与融合的 RMSE mrad

方法	方位角	俯仰角
红外	0.7	0.8
毫米波	0.8	0.9
序贯融合	0.6	0.6
加权融合	0.3	0.4

### 4.2 基于决策信息的改进融合算法仿真

#### 4.2.1 复合制导不同搜索状态下的融合

假设导弹在攻击过程中, 前 5 s 中红外制导系统处于搜索状态, 5 s ~ 18 s 时红外与毫米波雷达制导系统同时工作, 18 s ~ 20 s 时只有红外制导系统工作, 其他条件同上. 图 4 为毫米波雷达和红外制导系统进行角度测量与融合估计的结果. 从图 4 可以看出, 毫米波雷达制导系统和红外制导系统分别工作在各自的时间段内, 经过融合后, 制导系统工作在全时间段, 并且融合估计误差进一步减小.

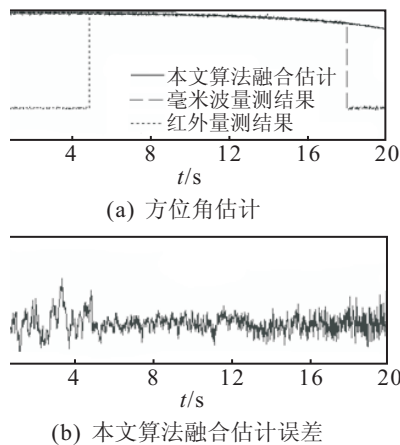


图 4 搜索状态方位角估计及其融合误差

#### 4.2.2 复合制导干扰状态下的融合

假设导弹在攻击过程中, 在 98% 的置信水平下, 在 4 s ~ 6 s 时毫米波雷达制导系统受到的干扰超出了门限, 毫米波雷达制导信息不可用; 在 14 s ~ 16 s 时红外制导系统受到的干扰超出门限, 制导信息不可用, 其他条件同上. 图 5 为毫米波雷达和红外制导系统进行角度测量与融合估计的结果. 从图 5 可看出, 毫米波雷达与红外传感器都受到了强干扰, 制导信息不稳定, 经融合后制导信息平稳, 减小了制导信息的误差.

## 5 结 论

本文提出了一种用于复杂环境背景下, 基于决策信息的毫米波/红外复合制导的融合算法. 通过对毫米波雷达和红外传感器的测量, 分别进行基于UKF

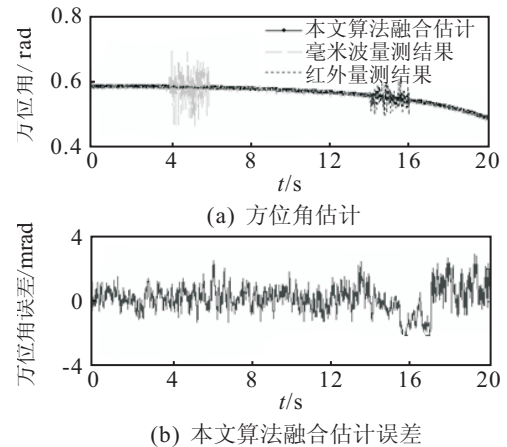


图 5 干扰状态方位角估计及其融合误差

的滤波估计得到目标的跟踪信息. 将制导系统的不同工作状态和干扰情况作为决策信息, 改进自适应加权融合算法, 从而获得融合后的制导信息, 以提高制导的精度. 仿真结果验证了本文方法的有效性.

### 参考文献(References)

- [1] Rao G A, Mahulika S P. New criterion for aircraft susceptibility to infrared guided missiles[J]. Aerospace Science and Technology, 2005, 9(8): 701-712.
- [2] Saha R K, Chang K C. An efficient algorithm for multi-sensor track fusion[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronics Systems, 1998, 34(1): 200-210.
- [3] 崔智社, 曾涛, 龙腾. 采用信息融合技术的 IR/ MMW 复合导引头的目标跟踪[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6): 460-464.  
(Cui Z S, Zeng T, Long T. Target tracking for IR/MMW combined seeker based on data fusion[J]. J of Infrared Millim Waves, 2002, 21(6): 460-464.)
- [4] 朱安福, 景占荣. 多传感器信息融合的目标跟踪研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(25): 7-9.  
(Zhu A F, Jing Z R. Multi sensor information fusion for target tracking[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(25): 7-9.)
- [5] 曾宪伟, 方洋旺, 伍友利, 等. 一种新的雷达和红外融合算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(2): 240-243.  
(Zeng X W, Fang Y W, Wu Y L, et al. New active radar and infrared seeker fusion algorithm[J]. Control and Decision, 2009, 24(2): 240-243.)
- [6] 曾宪伟, 方洋旺, 王锋, 等. 雷达间或工作下雷达/红外融合跟踪[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 10-14.  
(Zeng X W, Fang Y W, Wang F, et al. Fusion tracking of radar/IR dual-mode seeker with radar under intermittent-working state[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6): 10-14.)