

# 采用信息融合技术的 IR/ MMW 复合导引头的目标跟踪

崔智社 曾涛 龙腾

(北京理工大学电子工程系, 北京, 100081)

**摘要** 从误差测量环节入手, 基于 IR/ MMW 双模结构, 采用信息融合处理技术提高其估计跟踪精度, 最终达到降低制导误差, 提高武器性能的目的. 仿真结果验证了该方法的有效性.

**关键词** 跟踪, 复合导引头, 跟踪误差, 视线角速度, 信息融合.

## TARGET TRACKING FOR IR/ MMW COMBINED SEEKER BASED ON DATA FUSION \*

Cui Zhi-she ZENG Tao LONG Teng

(Department of Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** Based on IR/ MMW dual - mode, information fusion technology, was provided to improve estimated tracking precision, finally reduce guidance error and enhance performance of weapons. Simulation results show that the technology is effective.

**Key words** tracking error, combined seeker, LOS angular rate, information fusion.

### 引言

制导精度是衡量寻的制导武器性能的一项重要指标. 导引头视线角速度的估计精度是制约制导精度的主要因素之一. 影响视线角速度估计精度的主要原因是误差测量元件的精度.

### 1 问题的提出

制导精度是衡量寻的制导武器性能的一项重要指标, 是寻的制导控制回路设计的根本任务<sup>[1]</sup>. 影响制导精度的因素较多, 但对采用比例导引规律的寻的制导武器来讲, 视线角速度的估计精度是其主要原因之一. 视线角速度的估计精度主要取决于误差测量元件的精度. 早期提出 IR/ MMW 复合制导, 主要是利用红外传感器和毫米波雷达性能的互补性来提高武器制导精度、抗干扰和全天候作战能力. 尽管 IR/ MMW 复合制导武器性能较单模制导武器有所提高, 但复合导引头大多工作在转换模式上, 对红

外和毫米波传感器获取的信息没有得到充分的综合利用, 使得武器在某一制导段的精度、检测概率、识别能力等性能停留在单传感器的水平上, 即是说 IR/ MMW 复合制导武器总体性能的提高是红外和毫米波单模制导武器性能的简单集成. 导引头的这种工作模式对探测系统获取的信息资源没有充分利用, 武器性能的提高还有较大空间. 本文正是基于这一思路, 提出利用数据融合技术提高视线角速度估计精度的两种方法, 并通过仿真验证了所提出算法的正确性和有效性.

### 2 被测误差角变化规律分析

导引头在制导控制回路中是一个角速度测量环节, 其有用信息就是由于目标运动而引起的误差角(角跟踪回路稳态时的动态滞后误差)<sup>[2]</sup>. 被测视线的角速度与误差角(动态滞后误差)成正比, 导引头正是通过估计误差角来达到估计目标视线角速度的目的.

\* 国防预研基金(批准号 514210302) 资助项目  
稿件收到日期 2001- 07-16, 修改稿收到日期: 2002- 03- 07

\* The project supported by the preliminary Research Foundation of National Defense (No. 514210302)  
Received 2001- 07-16, revised 2002- 03- 07

由于探测机理的不同,红外传感器的测量精度比毫米波雷达高一个数量级.对于同控式红外和毫米波复合导引头,通过信息融合可以得到比单个传感器更高的估计精度.

对于不同的目标运动模型,可以采用不同融合方法.误差角的变化主要取决于目标的运动.如目标没有机动,而是等角速度运动,那么视线角速度应该等于目标运动的角速度,也就是说跟踪系统稳态时的动态误差(误差角)与目标运动的角速度成比例.如果目标以一恒角加速度机动,则目标视线角可用下式来近似表示<sup>[2]</sup>

$$q(t) = A_0 + A_1 t + \frac{1}{2} A_2 t^2, \quad (1)$$

式(1)中  $A_0$ —视线的起始角位置; $A_1$ —视线的角速度; $A_2$ —视线的角加速度.那么,稳态时的动态误差角可表示为

$$q_\theta = \frac{A_1}{K_v} + \frac{A_2(K_v T_f - 1)}{K_v^2} + \frac{A_2}{K_v} t. \quad (2)$$

式(2)中  $K_v$ —角跟踪系统开环增益; $T_f$ —接收机输出滤波器时间常数; $t$ —目标恒角加速度机动持续时间.由式(2)可知:当视线不转动或跟踪固定目标时,即  $A_1 = A_2 = 0$  动态误差为零.如果视线以某一恒定角速率转动  $A_1 \neq 0, A_2 = 0$ ,则动态误差为一常数:

$q_\theta = \frac{A_1}{K_v}$ , 导引头接收机输出端的控制电压为:

$u_k = kq$ ,  $k$  为一个与跟踪系统参数有关的常数,  $q = A_1$  为常值.当目标以一恒角加速度机动时,所产生的

的误差角随时间线性规律增大,即  $q_\theta = \frac{A_2}{K_v} t$ ;如果目标机动时间过长,就有可能逃逸出跟踪天线波束的视场角,随之而来的就是要求导引头测量目标角速度范围要宽.

目标可分为机动性较强和较弱两类目标:机动性较弱的目标包括舰船、地面军用车辆、巡航导弹、战略轰炸机、侦察机和电子干扰机等;机动性好的目标包括歼击机、强击机等.对于机动性较弱的目标,由其机动所引起的动态误差较小,在具体处理时,可以将被测误差角看作平衡随机过程或方差平稳随机过程来处理.对于机动性能较强的目标采用基于卡尔曼滤波的航迹融合算法.以下给出跟踪层融合的两种方法.

### 3 信息融合对复合导引头误差角估计精度的改善

采用 IR/MMW 复合导引头主要目的是提高武

器的抗干扰能力和制导精度.提高武器制导精度除了选择适当的制导规律和系统参数外,另一条主要途径就是信息融合.在寻的制导武器中,信息融合主要应用在检测、识别和跟踪三个层次上.本文主要研究信息融合在跟踪层的应用;在实现跟踪层融合时,具体采用那一种方法,要根据被攻击目标的运动规律及被测参量的变化规律来确定.

#### 3.1 测量融合算法

对于机动性能较差的目标,导引头角跟踪系统的跟踪误差(误差角)近似为平稳随机过程或者方差平稳、均值具有趋向性的非平稳随机过程;对于这一类目标均可以采用该方法对测量值进行融合.

##### (1) 融合算法

设红外传感器和毫米波雷达的量测值和方差分别为  $y_1, \sigma_1^2$  和  $y_2, \sigma_2^2$ , 融合估计和方差为  $y$  和  $\sigma^2$ , 根据自适应加权融合估计算法<sup>[3]</sup>,  $y$  和  $\sigma^2$  可用下式来表示

$$y = \frac{\frac{2}{\sigma_1^2}}{\frac{2}{\sigma_1^2} + \frac{2}{\sigma_2^2}} y_1 + \frac{\frac{2}{\sigma_2^2}}{\frac{2}{\sigma_1^2} + \frac{2}{\sigma_2^2}} y_2, \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\frac{2}{\sigma_1^2} \frac{2}{\sigma_2^2}}{\frac{2}{\sigma_1^2} + \frac{2}{\sigma_2^2}}, \quad (4)$$

该估计具有线性无偏最小方差性<sup>[4]</sup>.

##### (2) 方差的计算

从以上公式可以看出,该算法的核心是如何根据各个传感器的测量值求出其对应方差.针对平稳随机过程可采用以下算法来求解其方差(称为算法1)<sup>[4,5]</sup>设 MMW 和 IR 传感器支路的测量值分别为  $X_p, X_q$ , 则其方差为

$$\sigma_p^2 = R_{pp} - R_{pq}, \quad (5)$$

$$\sigma_q^2 = R_{qq} - R_{pq}, \quad (6)$$

$$R_{pp}(k) = \frac{k-1}{k} R_{pp}(k-1) + \frac{1}{k} X_p(k) X_p(k), \quad (7)$$

$$R_{pq}(k) = \frac{k-1}{k} R_{pq}(k-1) + \frac{1}{k} X_p(k) X_q(k), \quad (8)$$

$$R_{qq}(k) = \frac{k-1}{k} R_{qq}(k-1) + \frac{1}{k} X_q(k) X_q(k). \quad (9)$$

对于方差平稳、均值具有趋向性的非平稳随机过程,如直接采用算法1,系统的收敛速度和性能将大大降低.为了提高系统的收敛速度,改善系统的性能,采取在进行融合处理之前首先通过一阶差分法将非平稳随机过程转化为平稳随机过程,然后再计算其方差和权值,最后进行加权融合,该方法称为算法2.

设其中一个传感器的量测值为  $y_1$ , 经过一阶差分处理后得到的平稳随机过程记为  $s_1$ , 则

$$s_1 = \nabla y_1(k) = y_1(k) - y_1(k-1) \quad (10)$$

对另一个传感器的量测值也作同样的处理;后续步骤与平稳随机过程相同。

算法 2 隐含两个假设: MMW 和 IR 支路量测的角误差数据是方差平稳、均值具有趋向性的非平稳随机序列: 该类非平稳随机过程经过一阶差分处理可以转化为平稳随机过程。这两个假设基本符合导弹攻击机动性能较差目标的实际情况。导引头角误差数据的测量方差取决于传感器的精度,可以认为是平稳的,其均值是慢变化的;由于其均值是慢变化的,所以经过一阶差分处理后得到的随机过程可以近似为是平稳随机过程。

### 3.2 基于航迹融合的状态估计算法

#### (1) 数学模型

在球坐标系中,选择状态变量为  $X(k) = [x_1 x_2 x_3 x_4]^T = [ \quad ]^T$ , 测量向量为  $Z(k) = [ \quad ]^T$ ,  $\quad$  分别为目标视线角速度在弹上测量坐标系  $y$  轴和  $z$  轴上的分量。由前一节分析可知,这两个参量对应的是稳定跟踪时的误差角;则系统动态模型和量测模型分别为

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} T^2/20 \\ 0 \\ T^2/20 \\ 0 \end{bmatrix} V(k)$$

$$Z_i(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} X(k+1) + W_i(k+1), \quad (11)$$

$V(k) \quad R^h \times 1$  是零均值白高斯过程噪声向量,代表的物理意义是视线角加速度,如不考虑双通道之间的交叉耦合,则其协方差矩阵为一对角阵即  $Q(k) =$

$$\begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{bmatrix}. W_i(k+1) \text{ 是均值为零且相互独立的高斯序列,其物理意义是测量误差,对应协方差为 } R(k) =$$

$$\begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{bmatrix}; \text{ 而且 } E \left\{ \begin{bmatrix} V(k) \\ W_i(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(l) \\ W_i(l) \end{bmatrix} \right\} =$$

$$\begin{bmatrix} Q(k) & 0 \\ 0 & R_i(k) \end{bmatrix} \delta_{k,l}, \text{ 同时 } COV\{X(0), W_i(k)\} = 0. \text{ 初始状态}$$

$X(0)$  是均值为  $\mu$  和协方差矩阵为  $P_0$  的一个高斯随机向量,且  $COV\{X(0), V(k)\} = 0$ .

#### (2) 状态融合估计算法

多传感器系统状态估计可分为集中式和分布式两类。集中式有两种实现方法:一种是对量测方程进行扩展而得到广义量测方程,然后再直接应用卡尔曼滤波进行递推估计;另一种是序贯 kalman 滤波处

理。分布式系统状态估计通常称为航迹融合,其实现结构有几种变型,但其基本思路是每个传感器分别独立采用 kalman 滤波进行状态估计而得到各自的目标航迹,然后将这些航迹送至融合中心进行融合而得到全局航迹。从理论上讲集中式的性能要优于分布式,但在现实系统中,应用分布式结构可能会更多一些。如果假定各传感器到融合节点是全数据率通信,即没有信息损失,并且传感器的状态估计时刻与航迹融合节点的航迹融合时刻相同,则集中式估计与分布式估计是完全等价的,同时为最优的<sup>[6]</sup>。

航迹融合可用以下一组递推公式进行估计进行<sup>[6]</sup>

$$X(k+1 \quad k+1) = X(k+1 \quad k) + \sum_{i=1}^{N_j} P_i(k+1 \quad k+1)^{-1} \cdot [X_i(k+1 \quad k+1) + \quad - X(k+1 \quad k)] - P_i(k+1 \quad k)^{-1} [X_i(k+1 \quad k) + \quad - X(k+1 \quad k)] \quad (12)$$

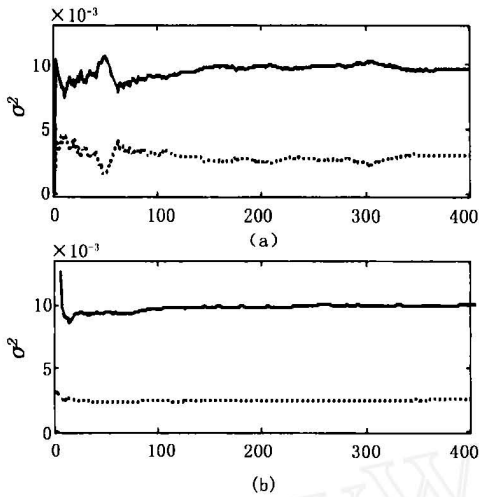
$$P(k+1 \quad k+1)^{-1} = P(k+1 \quad k)^{-1} + \sum_{i=1}^{N_j} [P_i(k+1 \quad k+1)^{-1} - P_i(k+1 \quad k)^{-1}] = [P(k+1 \quad k)^{-1} + \sum_{i=1}^{N_j} H_i(k+1) R_i^{-1}(k+1) H_i(k+1)] \quad (13)$$

$$P(k+1 \quad k) = \Phi(k) P(k/k) \Phi(k) + G(k) Q(k) G(k) X(k+1 \quad k) = \Phi(k) X(k/k), \quad (14)$$

当过程噪声为零即系统为确定性系统,并不考虑初始条件的影晌时,可以得到次优融合算法:

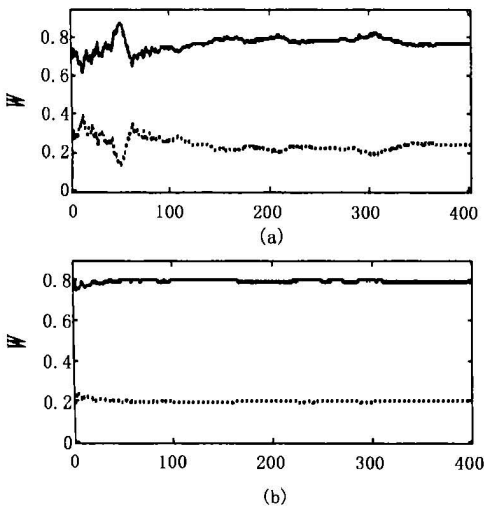
$$X(k \quad k) = P(k \quad k) \left\{ \sum_{i=1}^{N_j} P_i(k \quad k)^{-1} [X_i(k \quad k) + \quad ] \right\} P(k \quad k) = \left[ \sum_{i=1}^{N_j} P_i(k \quad k)^{-1} \right]^{-1} \quad (15)$$

最优和次优是相对的。当分布式航迹融合和集中式数据融合相比较时,前者是次优而后者是最优,主要原因是各传感器在形成局部航迹时有信息损失,文献<sup>[7]</sup>证明了有 7% 的均方误差损失。当不考虑过程噪声的影响时,式(15)相对于式(12)来讲,是次优,而式(12)是最优的。



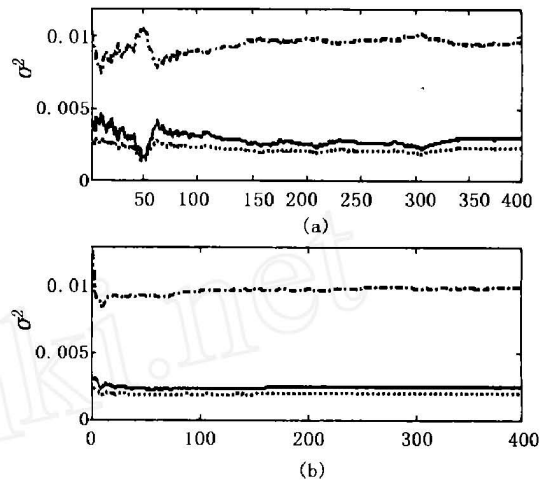
横轴为采样点数  $k$   
 图 1 双传感器方差估计  
 (a) 算法 1 (b) 算法 2  
 —— 传感器 1 方差估计曲线  
 ..... 传感器 2 方差估计曲线

Fig. 1 Curve of variance estimation for two sensors  
 (a) algorithm 1 (b) algorithm 2  
 —— variance estimation curve of sensor 1  
 ..... variance estimation curve of sensor 2



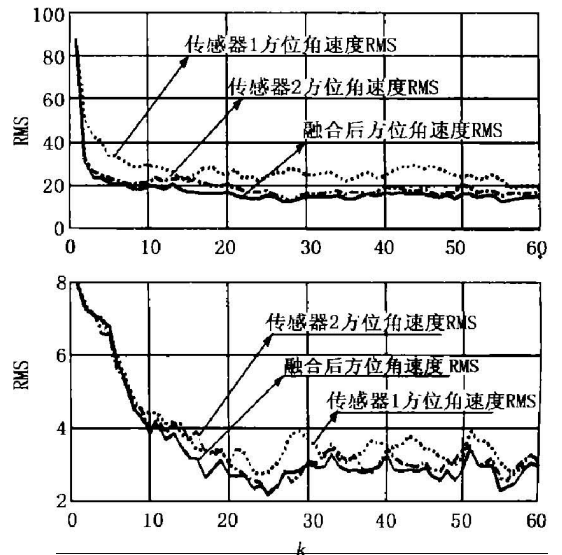
横轴为采样点数  $k$   
 图 2 双传感器加权因子估计  
 (a) 算法 1 (b) 算法 2  
 —— 传感器 2 估计曲线  
 ..... 传感器 1 估计曲线

Fig. 2 Curve of weighted factor estimation for two sensors  
 (a) algorithm 1 (b) algorithm 2  
 —— estimation curve of sensor 2  
 ..... estimation curve of sensor 1



横轴为采样点数  $k$   
 图 3 双传感器方差融合估计  
 (a) 算法 1 (b) 算法 2  
 ..... 传感器 1 方差估计曲线  
 —— 传感器 2 方差估计曲线  
 ..... 方差融合估计曲线

Fig. 3 Curve of fusion-based variance estimation for two sensors  
 (a) algorithm 1 (b) algorithm 2  
 ..... variance estimation curve of sensor 1  
 —— Variance estimation curve of sensor 2  
 ..... fusion-based variance estimation curve



横轴为采样点数  $k$   
 图 4 方位误差角和方位误差角速度的滤波 RMS 及融合航迹 RMS 曲线  
 Fig. 4 RMS Curves of filtering and fusion track for azimuth angle error and azimuth angle rate error

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 测量融合仿真结果

两个传感器量测值的变化规律用慢变化的正弦波来描述,其随机性用方差分别为 0.01 和 0.0025 的白噪声来描述.将慢变化的正弦波与方差分别为 0.01 和 0.0025 的白噪声数据相加,即可模拟出两个传感器的量测数据.分别采用算法 1 和算法 2 对这些数据进行 50 次 Monte Carlo 仿真,仿真结果如图 1~图 3 所示.从图中可以看出,采用算法 2 所估计的结果(b)图与算法 1(a)图相比,其方差、加权因子和融合方差等参量的收敛速度比较快;这对于 IR/MMW 复合导引头这样实时性要求较高的系统来讲是很重要的.同时从图 3 也可以看出:融合后的方差小于单个传感器估计的方差.

### 4.2 航迹融合仿真结果

设红外传感器和毫米波雷达的数据采样周期均为  $T = 1$  秒,测量噪声标准差分别为  $\sigma_{IR} = 4\text{mrad}$ ,  $\sigma_{MMW} = 4\text{mrad}$ ;目标作等角加速度运动,即目标视线误差角随机动时间线性增加.为方便计算,假定过程噪声为零均值高斯噪声过程噪声参数选为:  $\sigma = 1\text{mrad/s}^3$ .初始角速度(等价于稳态跟踪误差)取为 2 倍真实角速度,初始角加速度取为 1.2 倍真实角加速度.采用由式(12)~式(14)组成的航迹融合算法,作 50 次 Monte Carlo 仿真,仿真结果如图 4 所示.为简单起见,仅仅给出方位通道的滤波 RMS 和融合 RMS 曲线,所得结论不失一般性.图 4 中的上、下两图分别为方位角速度(方位误差角)和方位角加速度(方位误差角速度)的滤波 RMS 和融合 RMS 曲线.仿真结果表明:融合跟踪性能比单一传感器的跟踪性能要好.

## 5 结论

视线角速度的估计精度是影响导弹制导精度的主要因素之一.为了提高视线角速度估计精度,本文将信息融合技术应用于 IR/MMW 复合导引头信息处理中,并提出基于量测融合和航迹融合的视线角速度估计方法.基于量测融合的估计方法适用于目

标作等角速度运动即角误差为平稳随机过程或均值具有趋向性的方差平稳随机过程情况;基于航迹融合的估计方法适用于目标作等角加速度运动情况,对于复杂模型可以进行简化或采用 IMM 等算法.仿真结果表明该算法的有效性.该算法简单、实用、可操作性强,具有一定的工程应用背景和较广泛的实用价值.同时应该指出:本文的研究工作仅仅是实现复合导引头信息智能化处理的第一步,进一步研究应包括基于融合识别来提高系统的目标检测概率和目标识别率、机动目标跟踪、反馈的跟踪信息在检测识别过程中的综合利用等.

## REFERENCES

- [1] ZHAO Shan You. *Design of Control System for Air-defence homing Guidance Missile*. Beijing: Publishing House of Astronautics (赵善友. 防空导弹武器寻的制导控制系统设计. 北京: 宇航出版社), 1992, 148 — 156
- [2] MU Hong. *Design of Radar Seeker for Air-defence Missile*. Beijing: Publishing House of Astronautics (穆虹. 防空导弹雷达导引头设计. 北京: 宇航出版社), 1996, 416
- [3] Blackman, Samuel S. *Design and Analysis of Modern Tracking Systems[M]*. Boston: Artech House, 1999, 667 — 677
- [4] ZHAI YILI, DAI Yi-Song. Study of adaptive weighted fusion estimated algorithm of multisensor data [J]. *ACTA Metrologica Sinica* (翟翌立, 戴逸松. 多传感器数据自适应加权融合估计算法的研究[J]. 计量学报) 1998, 1: 69 — 75
- [5] LU Da-Jin. *Stochastic Processes and Its Applications [M]*. Beijing: Tsinghua University Press (陆大金. 随机过程及其应用. [M]. 北京: 清华大学出版社), 1998, 291
- [6] HE You, WANG Guo-Hong, LU Da-Jin, et al. *Multisensor Information Fusion with Application [M]*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (何友, 王国宏, 陆大金, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社). 2000, 242 — 245
- [7] Roecker J A, McGillem C D. *Comparison of two sensor tracking methods based on state vector fusion and measurement fusion. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(4): 447 — 449, 0018 — 9251