

复合制导中的信息融合技术研究

殷艳华^{1,2}, 王学伟²

(1. 海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001; 2. 92497 部队, 海南 陵水 572425)

摘要:针对雷达/红外复合制导系统中的信息融合技术,提出了一种基于测量噪声相关情况下的带反馈的加权航迹融合方法,并对该方法进行了仿真,仿真结果表明,该方法融合效果理想,可以满足复合制导的融合技术要求。

关键词:复合制导;信息融合;航迹关联;航迹融合

中图分类号:TJ765.3 **文献标识码:**A

Research on Information Fusion in Compound Guidance

YIN Yan-hua^{1,2}, WANG Xue-wei²

(1. Department of Controlling Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. The 92497th Unit of PLA, Lingshui 572425, China)

Abstract: Under the condition of measurement noises correlating, a weighted track fusion method with feedback is proposed for track fusion in radar/IR compound guidance, and the results of simulation show that this track fusion method is precise to meet the need of radar/IR compound guidance.

Key words: compound guidance; information fusion; track association; track fusion

1 引言

复合制导就是通过采用不同工作模式或体制的传感器共同来完成导弹的制导任务,既可以是不同频谱的复合(如红外/雷达),也可以是不同体制的复合(如主动/被动)。复合制导按组合方式不同,可分为串联式、并联式和混合式。串联式就是通过逻辑判断,使得导引头在不同波段或体制工作的传感器间进行转换,是基于传感器“交接班”来完成复合制导的,在同一时刻,只有一个传感器工作;并联式是基于多传感器信息融合技术来完成复合制导的,能够充分发挥各个传感器的优点,理论和实践证明,与单一制导模式相比,基于多传感器信息融合技术的复合制导可以有效提高导弹的远程攻击能力、多目标跟踪识别能力、导弹全天候工作能力和抗干扰能力,信息融合技术的产生和发展,使得复合制导产生了质的飞跃。

信息融合作为复合制导的关键技术之一,已成为很多学者研究的热点。本文就雷达/红外复合制导中

的信息融合技术进行了研究。包括融合结构选择、滤波方法与航迹关联,重点分析一种在测量噪声相关情况下带反馈的雷达、红外航迹融合算法,仿真结果表明,该算法融合精度较高,可以满足复合制导需求。

2 融合结构与滤波器的选择

2.1 融合结构的选择

对于雷达/红外复合制导来说,既可以采用基于集中式结构的测量数据融合,也可以采用基于分布式的航迹融合。集中式结构是将传感器的测量数据送到融合中心,在融合中心进行数据预处理(时空对准、数据关联)与航迹滤波。这种结构的最大优点是信息损失小,但是要求系统有大容量的能力,计算负担重,系统的生存能力较差^[1]。对于基于测量数据的雷达与红外融合我们已经做了相关研究^[2]。分布式结构因为具有局部独立跟踪能力和较大的容

作者简介:殷艳华(1983-),男,硕士,研究方向为复合制导和信息融合。

收稿日期:2008-09-13; **修订日期:**2008-11-01

错能力而得到了广泛的应用。在分布式结构中,每个传感器先由它自己的数据处理产生目标的跟踪航迹,然后把处理后的航迹信息送到融合中心,融合中心对其进行航迹关联和航迹融合,从而产生状态的全局估计。

由于雷达/红外信号处理差别很大,信息融合系统采用分布式结构,雷达和红外各自自由自己的信息处理系统形成各自的航迹,然后融合系统再对来自雷达和红外建立的航迹进行融合处理,以得到更为精确的目标航迹。航迹融合示意图如图1所示。

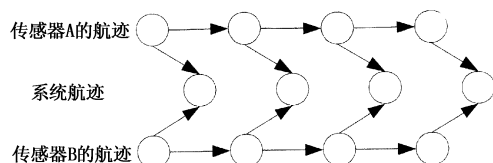


图1 航迹融合示意图

2.2 跟踪滤波器的选择

由于红外系统是仅有角度测量的跟踪问题,因而在对目标的跟踪过程中面临的一个重要而困难的问题是系统对目标距离的非线性和不可观测性问题。但是因为导弹的机动性能通常很大,当导弹进行一定的机动时,可以在直角坐标系中使用扩展的Kalman(EKF)对目标进行跟踪。本文对于雷达、红外导引头均采用EKF进行滤波。

3 数据预处理与航迹关联

数据预处理是进行航迹关联和融合的前提,因为雷达与红外传感器的采样时间、测量坐标系不同,因此需要对测量数据进行时空对准,另外还要对测量数据中的野值进行剔除,以提高后续数据处理的精度和稳定性。时间对准可以使用线性插值方法^[3],空间对准采用坐标转换原理即可完成,关于野值剔除技术,可以参考文献[4]。

因为雷达和红外各自形成了航迹,那么一个重要的问题是,如何判断来自于不同子系统的两条航迹是否来自于同一个目标,这就是航迹关联需要解决的问题,实际上,航迹关联就是解决传感器空间覆盖区域中的重复跟踪问题,航迹关联也叫去重复。

用于航迹关联算法通常分为两类:即基于统计的航迹关联算法和基于模糊数学的航迹关联算法。基于统计的关联算法有加权法、独立序贯法、修正法、相关序贯法、经典分配法、广义分配法、独立双门限法、相关双门限法、最近邻域法、K近邻域法等;基于模糊数学的方法要有模糊双门限关联算法、基于模糊综合函数的航迹关联算法、多因素模糊综合决策航迹关联算法等^[5]。

考虑到导弹的作战使命和实时性要求,雷达/红

外复合制导采用加权航迹关联算法比较合理。其原理如下:

记雷达传感器为节点1,红外成像为节点2。它们的航迹号合分别为:

$$U_1 = \{1, 2, \dots, n_1\}, U_2 = \{1, 2, \dots, n_2\} \quad (3)$$

又记 X_i^1, X_j^2 分别是雷达第 i 个航迹号对应目标和红外第 j 个航迹号对应目标的真实状态, $\hat{X}_i^1, \hat{X}_j^2$ 分别是雷达和红外对它们的估计。令:

$$\hat{\Delta}_{ij} = \hat{X}_i^1(l|l) - \hat{X}_j^2(l|l) \quad (i \in U_1, j \in U_2) \quad (4)$$

于是有下列假设检验:

$$H_0: \hat{X}_i^1(l|l) \text{ 和 } \hat{X}_j^2(l|l) \text{ 是同一目标的航迹估计};$$

$$H_1: \hat{X}_i^1(l|l) \text{ 和 } \hat{X}_j^2(l|l) \text{ 不是同一目标的航迹估计}.$$

假定两个传感器对同一目标的状态估计误差统计独立,即当 $X_i^1(l) = X_j^2(l)$ 时,估计误差 $\tilde{X}_i^1(l) =$

$X_i^1(l) - \hat{X}_i^1(l|l)$ 与 $\tilde{X}_j^2(l) = X_j^2(l) - \hat{X}_j^2(l|l)$ 统计独立,在 H_0 成立条件下,式(4)协方差为:

$$\begin{aligned} C_{ij}(l|l) &= E\{\hat{\Delta}_{ij}(l)\hat{\Delta}_{ij}^T(l)\} \\ &= P_i^1(l|l) + P_j^2(l|l) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $P_i^1(l|l)$ 和 $P_j^2(l|l)$ 分别是雷达对目标 i 和红外对目标 j 的状态估计误差协方差。可按Kalman滤波方法求解。

构造统计量

$$\alpha_{ij}(l) = [\hat{X}_i^1(l|l) - \hat{X}_j^2(l|l)]^T [P_i^1(l|l) + P_j^2(l|l)]^{-1} [\hat{X}_i^1(l|l) - \hat{X}_j^2(l|l)] \quad (6)$$

故 $\alpha_{ij}(l)$ 服从自由度为状态向量维数的 χ^2 分布,可用其来进行假设检验,如果 $\alpha_{ij}(l)$ 低于 χ^2 分布获得的某一个值,接受 H_0 ,航迹关联成功;否则接受 H_1 。

4 测量噪声相关情况下的带反馈的航迹融合算法

4.1 测量噪声相关情况下的加权线性最小方差最优融合

传统的航迹融合算法大多建立在基于测量噪声不相关的情况下。而在实际问题中,很多情况下,不同传感器对同一目标的测量噪声都是有关联的^[6]。在这种情况下。忽略测量噪声间的相关性势必会导致融合精度的下降。因此,本文采用基于测量噪声相关联的加权协方差融合算法,设状态方程和观测方程如下:

$$\begin{cases} X(k+1) = FX(k) + \Gamma V(k) \\ Z^1(k) = h^1(X(k)) + W^1(k) \\ Z^2(k) = h^2(X(k)) + W^2(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $X = (x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z})^T$ 为状态向量,

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 为状态转移矩阵;}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix} \text{ 为过程噪声分别矩阵; } V \text{ 为具有}$$

零均值方差为 Q 的高斯型过程噪声; $Z^i (i=1,2)$ 分别为雷达和红外的测量向量; W^1, W^2 分别为其测量噪声 (零均值的高斯噪声), 且其协方差为 R^{12} ; $h^1(X(k)) = (\sqrt{z^2 + y^2 + x^2}, \arctan(y/x), \arctan(z/\sqrt{y^2 + x^2}))^T$, $h^2(X(k)) = (\arctan(y/x), \arctan(z/\sqrt{y^2 + x^2}))^T$ 。

基于测量数据相关的融合方法可表示为^[6]:

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}^1(k|k) + [P^1(k|k) - P^{12}(k|k)] \times [P^1(k|k) + P^2(k|k) - P^{12}(k|k) - P^{21}(k|k)]^{-1} \times [\hat{X}^2(k|k) - \hat{X}^1(k|k)] \quad (8)$$

$$P(k|k) = P^1(k|k) - [P^1(k|k) - P^{12}(k|k)] \times [P^1(k|k) + P^2(k|k) - P^{12}(k|k) - P^{21}(k|k)]^{-1} \times [P^1(k|k) - P^{12}(k|k)] \quad (9)$$

$$P^{12}(k|k) = [I - K^1(k)H^1(k)] \{FP^{12}(k-1|k-1)F^T + \Gamma Q \Gamma^T\} \times [I - K^2(k)H^2(k)]^T + K^1(k)R^{12}(k)[K^2(k)]^T \quad (10)$$

$$P^{21}(k|k) = [P^{12}(k|k)]^T \quad (11)$$

式中, $\hat{X}, \hat{X}^1, \hat{X}^2$ 分别为融合状态估计、雷达状态估计和红外状态估计; P, P^1, P^2 分别为其协方差矩阵; P^{12}, P^{21} 是交互协方差矩阵; K^1, K^2 分别为雷达和红外的增益; H^1, H^2 分别为其雅可比矩阵; R^{12} 为雷达、红外测量噪声协方差矩阵; I 为单位矩阵。

4.2 引入反馈的航迹融合方法

因为融合航迹较单一传感器滤波航迹具有更高的精度。因此,很自然想到引入反馈机制,将最新融合状态反馈到雷达、红外,进行局部节点状态的修正。即令 $\hat{X}^1 = \hat{X}, \hat{X}^2 = \hat{X}$, 再进行下一时间点的状态预测与滤波。

5 融合跟踪仿真分析

设雷达和红外传感器采样时间均为 $T=1s$, 且同地配置, 过程噪声方差为 $Q=25I_{3 \times 3}$, 雷达测距误差标准差为 20m, 测角 (方位、俯仰) 标准差为

0.01rad, 红外测角标准差为 0.001rad, 雷达与红外测量方位噪声之间以及俯仰噪声之间的相关系数均为 0.5, 初始状态为 $X(0) = (5000, 100, 5000, 100, -5000, 50)^T$, 跟踪 50 步, 做 50 次蒙特卡洛仿真。得到雷达、红外以及融合后的航迹在三个坐标上的均方根误差分别如图 2~图 4 所示。仿真结果表明, 该融合方法具有较高的融合精度, 雷达/红外复合制导利用此融合方法技术上可行。

位置均方根误差

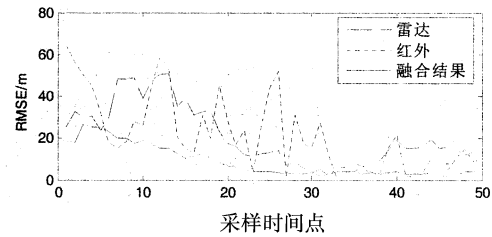


图2 距离均方根误差

速度均方根误差

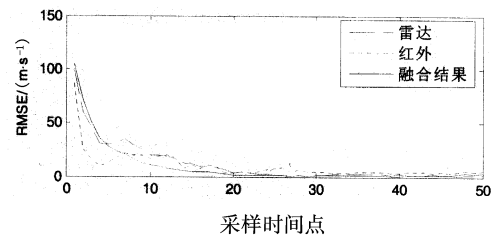


图3 速度均方根误差

6 结束语

本文对其信息融合技术进行了研究。在基于测量噪声相关的情况下,通过引入反馈机制对加权协方差融合跟踪算法进行了改进,仿真结果表明该方法的有较好的融合精度。

主动雷达/红外成像复合制导是反舰导弹发展的重要方向,充分利用雷达信息和红外信息对于提高复合制导精度具有重要的意义。充分利用红外图像获得的目标姿态信息、图像像素数与距离的关系等都有很强的研究价值,这将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 何友,王国宏,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000,11:36-45.
- [2] 殷艳华,王学伟,等. 一种新的红外/雷达传感器数据融合算法[J]. 激光与红外,2008,38(7):727-729.
- [3] 夏克强,周凤歧,等. 红外/雷达复合制导数据融合技术中的时间校准方法研究[J]. 航天控制,2007,1:8-12.
- [4] 王学伟,殷艳华,等. 基于模板卷积的平滑滤波在野值剔除中的应用[J]. 红外技术,2008,6:321-323.
- [5] 何友,王国宏,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000,11:114-167.
- [6] 巴宏欣,杨飞,等. 测量噪声相关情况下的航迹融合和测量融合[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,(3):473-476.