

# 红外成像/毫米波雷达复合导引头信息融合研究

章 蕾,高志峰,李黎明,耿满足  
(西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

**摘 要:**分析了红外成像/毫米波复合导引头的技术特点和工作状态,介绍一种红外成像传感器目标偏差角计算方法,针对红外成像/毫米波雷达复合导引头中平面毫米波雷达无法提供目标俯仰角信息这一特点,提出一种利用弹载测高仪提供的飞行高度推算出平面雷达俯仰角,并利用最优加权平均法对红外和雷达提供的信息进行融合,取得了较好的融合效果。

**关键词:**数据融合;红外成像/毫米波雷达复合制导;最优估计

**中图分类号:**TJ765.3<sup>+</sup>3 **文献标识码:**A

## Study on data fusion of infrared imaging/millimeter wave radar combined seeker

ZHANG Lei, GAO Zhi-feng, LI Li-ming, GENG Man-zu  
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Analyzes the technical characters and working states of IR Imaging/MMW Radar combined seeker, introduces the method of calculating the angle between target and IR imaging sensor. Since the plane MMW Radar cannot supply the pitch angle of target, in this paper, using the altitude supply by altitude indicator in the missile, a new method is presented to calculate the pitch angle, and fuse the information got from IR and MMW system through the algorithm of optimal weighted mean, study shows that a better result can be get through this way.

**Key words:** data fusion; IR imaging/MMW radar combined guidance; optimal estimation

### 1 引 言

随着科学技术的发展,现代战场环境变得日益复杂,以往单一模式的导引头已不能适应现代战争全天候、高精度的作战需求,在作战需求牵引下,多模复合导引头成为各国研究的一个重点方向。在多种形式的复合导引技术中,由于红外成像(IR)传感器和毫米波雷达(MMW)在探测方式、探测信息等方面具有很强的互补性,因此两者组成的双模复合导引技术成为各国研究的热点。

信息融合技术作为红外成像/毫米波雷达复合导引头系统中一项关键技术,主要是对红外子系统和雷达子系统以及弹上设备提供的数据进行有效的融合,从而提高导引头的跟踪精度和抗干扰能力。红外成像/毫米波雷达复合导引头在结构上可分为共孔径和

分孔径,由于分孔径技术比较简单,文中复合导引头采用分孔径设置:即红外子系统和毫米波雷达子系统的视线(场)分开,瞄准线保持平行,两者各有一套扫描系统,两者工作互不影响<sup>[1]</sup>,其结构如图1所示。

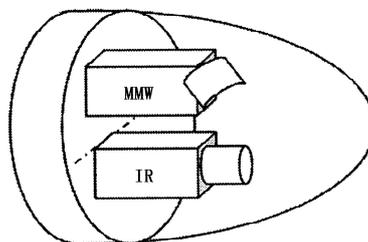


图1 IR/MMW分孔径示意图

作者简介:章 蕾(1984-),男,硕士研究生,主要从事复合导引头信息融合研究。E-mail:zhanglei\_336@sina.com  
收稿日期:2009-08-19

由于雷达工作时要向空中辐射大功率电磁波,易被敌方发现而遭受电子干扰,因此雷达工作一定要受到限制,从而保证良好的隐蔽性。复合导引头工作状态可分为以下三种:

1)毫米波雷达子系统单独工作:分为两种情况,一种是目标进入雷达的探测范围而未达到红外成像范围内;另一种是当红外子系统受到干扰或者故障不能正常工作。

2)红外子系统单独工作:也分为两种情况,一是雷达完成扫描进入静默后红外子系统单独工作;二是当雷达受到强电磁干扰或者故障时红外单独工作。

3)红外成像和毫米波雷达并行工作:当弹目距达到目标红外成像范围时,两者同时工作,此时需要对两者送出的目标信息进行融合,从而提高精度,其原理如图2所示。

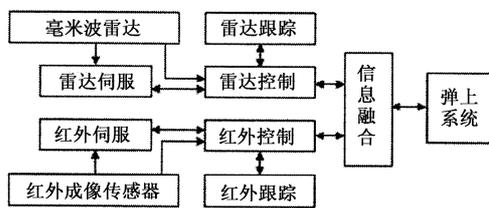


图2 IR/MMW 复合导引头原理图

由以上可知,信息融合在本系统的主要工作可以概括为两方面:一方面是对红外和毫米波雷达系统进行有效的管理,从而提高整个系统的可靠性和抗干扰能力;另一方面是在两个子系统同时工作时对送来的目标状态数据进行融合,从而提高系统的跟踪精度。

信息融合采用带反馈的集中式融合,如图3所示。当红外和毫米波雷达同时工作时,首先要提取目标红外图像的质心,换算成角度信息经时空对准,然后与雷达提供的距离角度信息用最优估计进行数据融合,然后再把融合结果作为测量值用于滤波,进而对目标状态进行更新并反馈给红外和雷达。

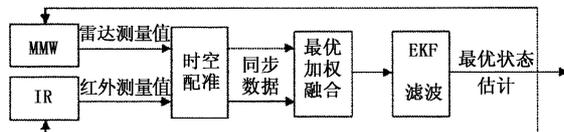


图3 带反馈的集中融合法

## 2 红外目标偏差角度计算

红外目标偏差角的计算方法有多种,本文是通过目标的质心来计算,当红外目标进入视场的时候,通过图像分割技术分离出目标图像,计算出目标质

心<sup>[2]</sup>,目标相对红外光轴的偏差角度主要是通过红外目标质心相对光轴的偏差像素来求得的。

定义视场中心为坐标原点,原点即为光轴所处位置,横坐标为  $x$  轴,原点右侧  $x$  为正,左侧为负;纵坐标为  $y$  轴,原点以上为正,以下为负,如图4所示。

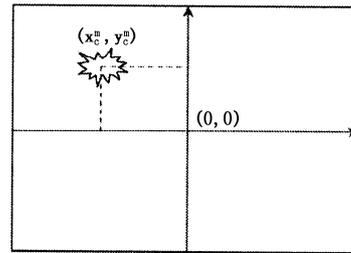


图4 目标位于红外视场位置示意图

设  $g(i, j)$  表示经过目标分割后红外图像位于  $(i, j)$  点的灰度值,红外图像大小为  $M \times N$ ,红外光学视场大小为  $\Phi^\circ \times \Psi^\circ$ ,像元张角  $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$  为:

$$\Delta\theta \approx \Phi/M$$

$$\Delta\varphi \approx \Psi/N$$

目标的质心坐标可以表示为:

$$Z_c = (x_c^m, y_c^m) = \left( \frac{\sum_{i=-M/2}^{i=M/2} \sum_{j=-N/2}^{j=N/2} x_{ij} g(i, j)}{\sum_{i=-M/2}^{i=M/2} \sum_{j=-N/2}^{j=N/2} g(i, j)}, \frac{\sum_{i=-M/2}^{i=M/2} \sum_{j=-N/2}^{j=N/2} y_{ij} g(i, j)}{\sum_{i=-M/2}^{i=M/2} \sum_{j=-N/2}^{j=N/2} g(i, j)} \right)$$

进而可得目标图像质心对光轴的夹角为:

$$\Delta\theta_c \approx x_c^m \times \Delta\theta$$

$$\Delta\varphi_c \approx y_c^m \times \Delta\varphi$$

## 3 平面毫米波雷达目标俯仰角计算

平面毫米波雷达属于2D雷达,仅能提供目标的距离和航向角度,不能提供目标在雷达探测范围内的俯仰角,则当雷达发现目标对红外进行引导时无法给出目标的俯仰角,为此可利用弹载测高仪传来的高度信息和目标的距离信息计算目标俯仰角,雷达俯仰角的计算主要是当雷达发现目标的时候用来对红外子系统的精确引导。

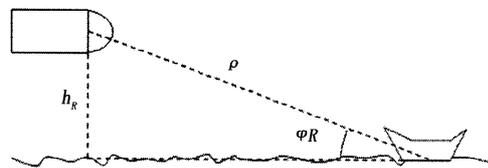


图5 目标雷达俯仰角计算示意图

如图5所示,攻击目标为水面舰艇,当末制导导引头开机工作的时候距离目标的距离比较近,可以忽略地球曲率,认为海平面为纯平面,由图可以求得目标的俯仰角为:

$$\varphi_R = \arcsin \frac{h_R}{\rho}$$

#### 4 测量数据时空配准

由于红外和雷达系统是两个相对比较独立的系统,各有自己的空间坐标原点和时钟,因此在对其测得的数据进行信息融合前首先要进行时空配准,使其处于同一时空坐标中。

时间的同步根据其工作体制可以分类(为)两大类,一类是红外和毫米波雷达系统公用一个时钟源或中断源,使其传送给信息融合中心的数据同时到达融合中心,且周期相等;另一类是两个子系统相互独立,两者送给信息融合中心的数据异步,对于这类情况主要方法有最小二乘法、内插外推法、曲线拟合法等,其中以最小二乘法的实时性最好。

红外和雷达是以各自的坐标系为基准测得的数据,融合前首先要统一到弹上坐标系中,由于红外和雷达两者在空间上处于水平平行配置,光轴和电轴平行,此处假定光轴、电轴、弹轴三者位于同一铅垂平面上,如图6所示,即红外和雷达测得的目标的航向角即为目标相对弹轴的航向角,即:

$$\theta_{RM} = \theta_R, \theta_{IM} = \theta_I$$

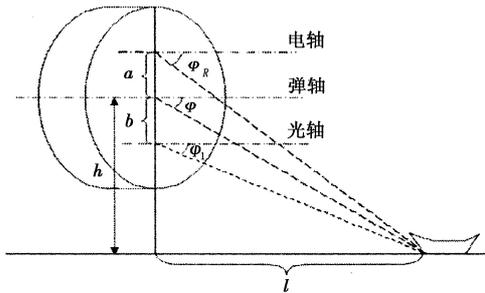


图6 雷达红外俯仰角空间配准图

俯仰角的配准是利用弹的高度信息以及光轴、电轴和弹轴的间距,把雷达和红外测得的目标俯仰角配准到弹上坐标系,由图6可得以下两组方程:

$$\begin{cases} \tan \varphi_R = \frac{a+h}{l} \\ \tan \varphi_{RM} = \frac{h}{l} \end{cases}, \begin{cases} \tan \varphi_I = \frac{h-b}{l} \\ \tan \varphi_{IM} = \frac{h}{l} \end{cases}$$

分别解方程组可得:

$$\varphi_{RM} = \arctan \frac{\tan \varphi_R}{a+h}, \varphi_{IM} = \arctan \frac{\tan \varphi_I}{h-b}$$

#### 5 红外和毫米波雷达信息融合算法<sup>[3]</sup>

加权平均算法是多传感器信息融合时比较常用的一种算法,特别适用于多传感器对同一目标的测

量,算法的主要思想是通过对各个传感器测得的数据进行加权然后取平均值,因此权值的选择对融合结果影响比较大,为使融合后的精度达到最优,采用拉格朗日乘数法求得的约束极值作为加权系数。设毫米波雷达测得的目标航向和俯仰角分别为 $\theta_{RM}$ 和 $\varphi_{RM}$ ,红外测得的目标航向和俯仰角分别为 $\theta_{IM}$ 和 $\varphi_{IM}$ ,则在 $t_k$ 时刻红外和毫米波雷达的融合结果和方差可以表示为:

$$\text{航向角: } \theta_M(k) = R_M^\theta \left[ \frac{\theta_{RM}(k)}{R_{RM}^\theta} + \frac{\theta_{IM}(k)}{R_{IM}^\theta} \right]$$

$$R_M^\theta = \frac{R_{RM}^\theta R_{IM}^\theta}{R_{RM}^\theta + R_{IM}^\theta}$$

$$\text{俯仰角: } \varphi_M(k) = R_M^\varphi \left[ \frac{\varphi_{RM}(k)}{R_{RM}^\varphi} + \frac{\varphi_{IM}(k)}{R_{IM}^\varphi} \right]$$

$$R_M^\varphi = \frac{R_{RM}^\varphi R_{IM}^\varphi}{R_{RM}^\varphi + R_{IM}^\varphi}$$

#### 6 目标运动模型和滤波器的设计

水面舰艇的航行速度一般都比较低,可近似认为是恒速运动,可用CV模型对其运动状态进行描述,同时由于目标处于水面上,导弹末导阶段飞行高度较低且基本保持不变,同时为了减少运算量,近似认为导弹和目标在同一二维平面内运动:

$$\text{状态方程: } X(k+1) = \Phi(k)X(k) + W(k)$$

$$\text{测量方程: } Z(k+1) = F[X(k+1)] + V(k+1)$$

其中, $X = [x, \dot{x}, y, \dot{y}]'$ 为系统的状态向量; $\Phi$ 为状态转移矩阵; $W(k)$ 为均值为零、协方差为 $Q(k)$ 系统噪声; $Z(k) = [r(k), \theta(k)]'$ 为目标的观测向量; $V(k)$ 为均值为零、协方差为 $R(k)$ 观测噪声; $F(\cdot)$ 为非线性函数,有:

$$F(X) = \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2} \\ \arctan \frac{y}{x} \end{bmatrix}$$

由于观测矩阵非线性,因而采用扩展卡尔曼(EKF)<sup>[4]</sup>滤波器对其状态进行估计,滤波计算公式如下:

$$\hat{X}(k+1/k) = \Phi(k)\hat{X}(k)$$

$$P(k+1/k) = \Phi(k)P(k)\Phi(k)^T + Q(k)$$

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k+1/k) + K(k+1) \{ [Z(k+1) - F[\hat{X}(k+1/k)]] \}$$

$$K(k+1) = P(k+1/k)H^T(k+1)S^{-1}(k+1)$$

$$H(k+1) = \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{X(k+1/k)}$$

$$S(k+1) = H(k+1)P(k+1/k)H^T(k+1) + R(k)$$

$$P(k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)]P(k+1/k)$$

7 仿真结果与分析

设导引头直角坐标系中坐标原点,沿 X 轴正向飞行,导弹的飞行速度为 300 m/s,船的初始坐标为 (6000, 400), 沿 Y 轴负方向航行,航行速度为 20 m/s(约 40 节),雷达探测距离的精度为 15 m,航向角精度为 10 mrad,红外航向角精度为 1 mrad,红外和雷达的采样周期同为 30 ms,滤波器采用两点法启动<sup>[5]</sup>,采用本文所述融合算法进行 100 次 Monte Carlo 仿真,图 7 为目标在雷达坐标系中的运动轨迹以及 EKF 预测值,其中虚线为目标真实轨迹,实线为融合预测轨迹;图 8 为三者航向角误差。

从仿真结果可以看出:目标融合预测轨迹和真实轨迹基本重合;航向角融合精度远高于毫米波雷达的精度,且优于红外精度,取得了比较好的融合效果。

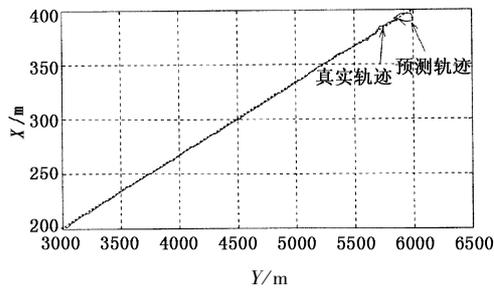


图 7 目标在雷达坐标系中运动轨迹

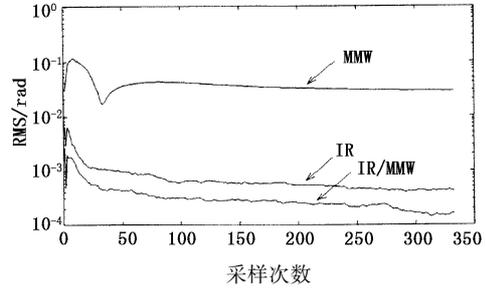


图 8 航向角误差

8 结 论

信息融合技术作为当今发展的一个重点方向,受到越来越多科研人员的关注,本文结合反舰导弹红外成像/毫米波雷达复合导引头论述了信息融合技术在其中的应用,并介绍了红外成像/毫米波雷达复合导引头工作的基本原理,其中仍存在许多问题,有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 胡体玲,李兴国.毫米波/红外复合导引头关键技术分析[J].激光与红外,2007,37(2):101-106.
- [2] 何友,王国宏,陆大瑜,等.多传感器信息融合及应用[M].第2版,北京:电子工业出版社,2007:223-230.
- [3] 王炯琦,周海银,吴翊.基于最优估计的数据融合理论[J].应用数学,2007,20(2):392-399.
- [4] Mohinder S Grewal, Angus P Andrews. Kalman Filtering-Theory and Practice[M]. New York:John Wiley & Sons, 2001:169-200.
- [5] 杨万海.多传感器数据融合及其应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2006:35-40.