

红外制导弹药协同定位跟踪方法研究

臧路尧¹, 林德福¹, 杨哲², 王武刚³

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 中国北方工业公司军贸技术研究院, 北京 100053;
3. 西北工业集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 针对红外制导导弹无法直接测量弹目距离、视线角速度及目标加速度等制导信息, 且单枚导弹的可观测量少, 目标定位误差大的问题, 考虑红外导引头的测量特性, 利用多枚导弹与目标的几何关系对目标进行协同定位。建立多枚导弹对目标的协同跟踪模型, 通过计算导弹间相对运动关系估算弹目距离, 并将其作为伪量测量, 结合导引头测角信息构建新的量测方程, 利用卡尔曼滤波估计出弹目距离和视线角速度等制导信息。针对机动目标, 研究了一种基于交互式多模型滤波方法, 利用多个目标机动模型加权融合的方法来估计真实目标机动模型。数学仿真表明该方法有效提高了对固定/机动目标的估计精度。

关键词: 协同定位; 卡尔曼滤波; 交互式多模型; 目标机动

中图分类号: TJ765.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0404008

Research on cooperative location and tracking approach of infrared guided munition

Zang Luyao¹, Lin Defu¹, Yang Zhe², Wang Wugang³

(1. School of Aerospace, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. International Armament Research & Development Center, China North Industries Corp, Beijing 100053, China;
3. Northwest Industries Group Co. Ltd, Xi'an 710043, China)

Abstract: Aiming at the problem that infrared guided missile cannot measure guidance information such as the relative distance, line of sight (LOS) rate and target acceleration directly, the observability of a single missile was less, and the target location error was large, considering the measurement characteristics of infrared seeker, geometrical relationship among multiple missiles and the target was used to locate the target cooperatively. Multiple missiles cooperative tracking the target model was established. The distance between missiles and the target was estimated by calculating the relative motion between missiles, and it was used as pseudo quantity measurement. The new measurement equation was constructed combined with the angle measurement information of seeker. The relative distance and LOS rate was estimated by Kalman filtering algorithm. Aiming at the maneuvering target, an interactive

收稿日期: 2017-11-05; 修订日期: 2017-12-03

基金项目: 北京理工大学基础研究基金(20130142017)

作者简介: 臧路尧(1987-), 男, 博士生, 主要从事飞行器制导与控制方面的研究。Email: luyao_jizi@126.com

导师简介: 林德福(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事导航、制导与控制、飞行器系统动力学与控制方面的研究。

Email: lindf_jizi@bit.edu.cn

multiple model filtering cooperative tracking method was studied. The maneuvering model of real target was estimated by weighted fusion of multiple target maneuvering models. Simulation results show that the proposed method can effectively improve the estimation accuracy of the stationary/maneuvering target.

Key words: cooperative location; Kalman filtering; interacting multiple model; maneuvering target

0 引言

随着军工科技的快速发展,现代战争已经完成由“地毯式轰炸”到“外科手术式打击”的转变,精确打击已经成为现代局部战争的主要作战方式之一。美国未来军事变革纲领性文件《Joint Vision 2020》中提出,精确打击是信息时代美军掌握战争主动权的四种必备作战理念之一^[1]。作为精确打击的主要手段,精确制导武器如导弹、制导炮弹和制导炸弹等在现代局部战争中的使用比重逐步提高。

红外导引头由于具有制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好等优点,已经成为精确制导武器的重要技术手段。然而,由于其只能测出导弹相对目标的方位角,无法直接获取目标加速度、弹目相对距离等制导信息,且单枚导弹所测目标方位角误差较大,对目标探测与跟踪能力较差。建立目标跟踪模型,利用卡尔曼滤波技术可在一定程度上提高对目标的定位与跟踪能力^[2]。但是对红外制导弹药,仅依靠视线角估计出的目标信息收敛速度较慢且估计精度不高。多枚导弹从不同角度协同攻击目标,这不仅增加了敌方防御系统的拦截难度,还可以通过导弹间数据共享实现对目标的协同定位和探测,提高了导弹编队对目标的探测与跟踪精度^[3-4],为多约束制导律提供所需的制导信息。董继鹏^[5]根据交叉定位原理研究了一种基于两枚导弹测角信息的目标协同定位算法。王家炜^[6]将不同位置的导弹对目标的观测和估计数据加以综合,利用数据融合提高对目标运动状态的估计精度。叶继坤^[7]考虑导弹间不同量测信息交互,利用多模型滤波思想对目标进行协同估计。刘延芳^[8]假定两枚导弹通过数据交互实现信息共享,通过弹-弹-目的几何关系实现对弹目剩余距离的估计。Shamferman^[9]研究了两枚导弹协同拦截机动目标场景,建立了含两枚导弹测角信息的协同目标跟踪模型,利用非线性滤波算法估计拦截机动目标所需

制导信息。Wheeler^[10]结合试验验证了多飞行器对目标协同定位与跟踪的可行性。

文中基于以上研究,利用多导弹与目标的几何运动关系对目标进行协同定位。建立多导弹对目标的协同跟踪模型,通过计算导弹间相对运动关系估算出的弹目距离作为伪量测量,结合导引头测角信息构建新的量测方程,利用扩展卡尔曼滤波估计出弹目距离和视线角速度信息。针对非常值机动目标,研究了一种基于交互式多模型滤波方法,利用多个目标机动模型加权融合来估计真实目标机动模型。

1 目标协同定位与可观测性分析

在多导弹对目标协同探测过程中,假设导弹间可以实现导弹位置信息共享且不考虑信息传输的延迟。以两枚导弹为例,协同探测示意图如图 1 所示。 (x_{mi}, y_{mi}) , (x_{mj}, y_{mj}) 和 (x_T, y_T) 分别表示导弹 i 、 j 和目标的当前位置, λ_i 和 λ_j 分别表示两枚导弹的弹目视线角。

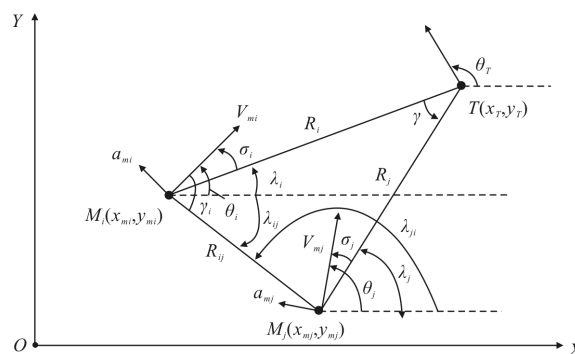


图 1 协同定位示意图

Fig.1 Diagram of cooperative location

根据导弹坐标及量测的目标方位角协同定位可得到目标坐标 (x_T, y_T) , 其中

$$\begin{cases} x_T = \frac{y_{mj} - y_{mi} + x_{mi} \tan \lambda_i - x_{mj} \tan \lambda_j}{\tan \lambda_i - \tan \lambda_j} \\ y_T = \frac{y_{mj} \tan \lambda_i - y_{mi} \tan \lambda_j + \tan \lambda_i \tan \lambda_j (x_{mi} - x_{mj})}{\tan \lambda_i - \tan \lambda_j} \end{cases} \quad (1)$$

同时导弹还可以估计出各自的弹目距离。

图 1 中 R_i 、 R_j 和 R_{ij} 分别表示导弹 i 、 j 与目标及两枚导弹之间的距离; λ_{ij} 和 λ_i 分别表示两弹连线与第 i 枚导弹水平线和第 j 枚导弹水平线的夹角; γ 表示两弹目视线的夹角, 称为视线分离角; γ_i 和 γ_j 分别为导弹 i 和导弹 j 连线与弹目连线的夹角, 三者关系如下:

$$\gamma = \pi - \gamma_i - \gamma_j \quad (2)$$

追踪三角形 $\Delta M_i M_j T$ 内, 由正弦定理可得导弹 i 、 j 与目标的相对距离分别为:

$$\begin{cases} R_i = R_{ij}(\sin \gamma_j / \sin \gamma) \\ R_j = R_{ij}(\sin \gamma_i / \sin \gamma) \end{cases} \quad (3)$$

对公式(3)中一式求偏导

$$\begin{aligned} \delta R_i = & \frac{\sin \gamma_j}{\sin \gamma} \delta R_{ij} + \frac{R_{ij} \cos \gamma_j}{\sin \gamma} \delta \gamma_j - \frac{R_{ij} \cos \gamma \sin \gamma_j}{\sin^2 \gamma} \delta \gamma = \\ & \frac{1}{\sin \gamma} \{ \sin \gamma_j \delta R_{ij} - R_{ij} \sin \gamma_j \cot(\gamma_i + \gamma_j) \delta \gamma_j + \\ & R_{ij} [\cos \gamma_j - \sin \gamma_j \cot(\gamma_i + \gamma_j)] \delta \gamma_j \} \end{aligned} \quad (4)$$

由公式(4)可以看出, 第 i 枚导弹的弹目估计误差与 δR_{ij} 、 $\delta \gamma_j$ 和 $\delta \gamma$ 有关。当视线分离角 $\gamma = \pi/2$ 时, 距离估计误差最小; 当视线分离角达到 0 或 π 时, 距离估计误差达到无穷大。此时, 导弹与目标在一条直线上, 双导弹探测退化为单导弹探测问题, 目标可观测性降低, 无法实现对距离的估计。为了保证两枚导弹能完成对目标实时探测及弹目距离估计, 两枚导弹与目标必须满足三角形几何关系, 且当视线分离角越接近 $\gamma = \pi/2$, 距离估计效果越好。因此目标协同跟踪及协同制导过程中需考虑两枚导弹的分离角 γ , 视线分离角过小会影响目标协同跟踪的可观测性。

2 固定目标协同跟踪

2.1 数学模型建立

以两枚导弹协同攻击同一目标为例, 建立双导弹对固定目标的协同跟踪模型。每枚导弹可独立测量出弹目视线角, 导弹通过惯导和/或 GPS 测量自身位置信息, 同时导弹间可实现导弹位置共享。

导弹 i 在极坐标下的弹目运动状态量可表示为:

$$X_i = [R_i \quad \ddot{R}_i \quad \lambda_i \quad \dot{\lambda}_i]^T \quad (5)$$

由弹目运动学方程可得:

$$\begin{cases} \ddot{R}_i = R_i \dot{\lambda}_i^2 - a_m \sin(\lambda_i - \theta_i) \\ \ddot{\lambda}_i = -2\dot{R}_i \dot{\lambda}_i / R_i - a_m \cos(\lambda_i - \theta_i) / R_i \end{cases} \quad (6)$$

导弹 i 的视线角量测模型为:

$$z_{Ni} = h_{i,1}(X_i) + v_{Ni} = \lambda_i + v_{Ni} \quad (7)$$

式中: v_{Ni} 为视线角量测噪声, 假定视线角噪声为相互独立的零均值高斯白噪声, 有:

$$v_{Ni} \sim N(0, \sigma_{Ni}^2) \quad E(v_{Ni}, v_{Ni}) = 0 \quad (8)$$

利用两导弹与目标在空间构成拦截三角形几何关系可以计算出导弹 i 与目标的距离。由正弦定理可得:

$$R_{ij} / \sin \gamma = R_i / \sin \gamma_j = R_j / \sin \gamma_i \quad (9)$$

$$R_{ij} = \sqrt{(x_{mj} - x_{mi})^2 + (y_{mj} - y_{mi})^2} \quad (10)$$

$$\gamma = \pi - \gamma_i - \gamma_j = \lambda_j - \lambda_i \quad (11)$$

$$\begin{cases} \gamma_i = \lambda_i - \lambda_{ij} \\ \gamma_j = \lambda_j - \lambda_j \end{cases} \quad (12)$$

将计算得出的弹目距离 R_i 作为伪量测值输入, 可以得出导弹 i 与目标的距离量测模型:

$$z_{Ri} = h_{i,2}(X_i) + v_{Ri} = R_i + v_{Ri} = \frac{\sin(\lambda_{ij} - \lambda_i)}{\sin(\lambda_j - \lambda_i)} R_{ij} + v_{Ri} \quad (13)$$

式中: v_{Ri} 为伪量测距离项的量测噪声, $v_{Ri} \sim N(0, \sigma_{Ri}^2)$ 。伪量测距离的方差 σ_{Ri}^2 可由两导弹的视线角方差 σ_{Ni}^2 和 σ_{Nj}^2 非线性表示。根据随机变量非线性函数的期望方差近似求法, 可得:

$$\sigma_{Ri}^2 = \frac{R_{ij}^2 \sqrt{\sin^2(\gamma_i) \sigma_{Ni}^2 + \sin^2 \gamma_j \cos^2 \gamma \sigma_{Nj}^2}}{\sin^2 \gamma} \quad (14)$$

由公式(14)可以看出, 当两枚导弹的视线分离角 γ 变小时, 伪量测量的弹目距离量测方差 σ_{Ri}^2 会增加, 这会导致目导弹编队对目标的状态估计精度下降, 结论与上节可观测性分析一致。

综上, 可得信息共享模式下两枚导弹的量测模型

$$z_i = h_i(x_{mi}) + v_i \Rightarrow \begin{bmatrix} z_{Ni} \\ z_{Ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_i \\ R_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{Ni} \\ v_{Ri} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: z_{Ni} 为导弹 i 直接测量的弹目视线角; z_{Ri} 为两导弹通过信息共享协同计算出的弹目相对距离。

2.2 基于扩展卡尔曼滤波目标状态估计

根据建立的两导弹拦截同一目标状态方程和量测方程, 估计目标状态信息, 极坐标系下状态公式(6)为非线性方程, 应用扩展卡尔曼滤波 EKF, 首先需要非线性状态方程线性化。状态转移矩阵为:

$$A(X) = \frac{\partial f(X)}{\partial X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$F_{21}=\dot{\lambda}^2 \quad F_{41}=(1/R^2)[2\dot{R}\dot{\lambda}+a_m\cos(\lambda-\theta)]$$

$$F_{22}=0 \quad F_{42}=-2\dot{\lambda}/R$$

$$F_{23}=-a_m\cos(\lambda-\theta) \quad F_{43}=a_m\sin(\lambda-\theta)/R$$

$$F_{24}=2R\dot{\lambda} \quad F_{44}=-2\dot{R}/R$$

观测矩阵及量测噪声为:

$$H_k=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R_k=\text{diag}\{\sigma_\lambda^2, \sigma_r^2\} \quad (17)$$

式中:伪量测距离的均方差 σ_r 已由公式(14)得出。

3 机动目标协同跟踪

3.1 数学模型建立

相比于固定目标跟踪模型, 机动目标协同跟踪模型不仅需要估计弹目距离信息, 还需要根据测角信息为制导指令提供目标机动大小和方向。两导弹协同跟踪机动目标的示意图如图 2 所示。

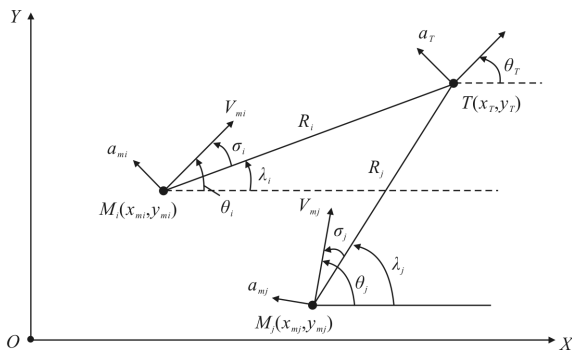


图 2 协同跟踪机动目标示意图

Fig.2 Diagram of cooperative tracking maneuvering target

导弹 i 的目标状态为:

$$X_i=[R_i \quad \dot{R}_i \quad \lambda_i \quad \dot{\lambda}_i \quad \theta_i \quad a_T] \quad (18)$$

目标的侧向加速度是通过成型滤波器进行有限维线性近似随机过程^[11], 成型滤波器通过维纳过程加速度模型对状态估计进行增强。考虑目标机动的导弹 i 的弹目运学方程可表示为:

$$\begin{cases} \ddot{R}_i=R_i\dot{\lambda}_i^2+a_T\sin(\lambda_i-\theta_i)-a_m\sin(\lambda_i-\theta_i) \\ \ddot{\lambda}_i=-2\frac{\dot{R}_i\dot{\lambda}_i}{R_i}+\frac{a_T\cos(\lambda_i-\theta_i)}{R_i}-\frac{a_m\cos(\lambda_i-\theta_i)}{R_i} \\ \dot{\theta}_i=\frac{a_T}{V_T} \\ \dot{a}_T=w_T \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} w_T \sim N(0, \sigma_{a_T}^2) \\ \sigma_{a_T}^2=(a_T^{\max})^2/T_F \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\sigma_{a_T}^2$ 表示加速度过程密度; T_F 为导弹攻击目标所需飞行时间。在小偏差线性化假设条件下, 导弹 i 攻击目标所需飞行时间 T_{Fi} 可近似为:

$$T_{Fi}=\frac{r_{i0}}{V_m\cos(\theta_{i0}-\lambda_{i0})+V_T\cos(\theta_T-\lambda_{i0})} \quad (21)$$

上述弹目相对运动状态方程可表示为矢量形式:

$$\dot{x}_i=f(x_i, a_M)+Gw_T \quad (22)$$

$$G=[0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (23)$$

两被动测角导弹攻击机动目标时的量测模型与上节建立攻击固定目标的量测模型相同, 量测方程为:

$$z_i=h_i(X_{mi})+v_i \quad (24)$$

上式中, $\begin{cases} z_i=[z_{\lambda_i}, z_{r_i}]^T \\ v_i=[v_{\lambda_i}, v_{r_i}]^T \end{cases}$, 观测矩阵及量测噪声分别为:

$$H_k=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R_k=\text{diag}\{\sigma_\lambda^2, \sigma_r^2\} \quad (25)$$

攻击机动目标时两导弹制导律采用考虑目标机动的增强型时变协同制导律^[12], 表达式如下:

$$a_M=N_i(t)v_M\dot{\lambda}_i+(N/2)a_T \quad (26)$$

式中: $N_i(t)$ 为时变协同导引系数。

3.2 基于交互式多模型滤波机动目标协同跟踪

当目标存在机动时, 传统的卡尔曼滤波往往估计效果不理想。交互式多模型 (Interactive Multiple Model, IMM) 滤波算法基本思想是使用多个滤波器并行计算目标可能出现的机动模型, 最后通过有效的加权融合估计系统状态。IMM 滤波方法可避免使用单一机动模型时与实际目标机动相差过大引起的估计误差。

假定目标有 r 种运动状态, 对应有 r 个运动模型 (即 r 个状态转移方程), 设第 j 个模型表示的目标状态方程为:

$$X_j(k+1)=\Phi(k)X_j(k)+G_j(k)W_j(k) \quad (27)$$

量测方程为:

$$Z(k)=H_j(k)+X_j(k)+V_j(k) \quad (28)$$

各目标运动模型的关系可由马尔科夫概率矩阵表示, 定义如下:

$$P=\begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{r1} & \cdots & p_{rr} \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中：元素 p_{ij} 表示目标第 i 个运动模型转移到第 j 个运动模型的概率。

IMM 算法以递推的方式进行，每次递推主要分为以下四个步骤：

(1) 输入交互(模型 j)

由目标的状态估计 $\hat{X}_i(k-1|k-1)$ 与上一步中每个滤波器的模型概率 $u_j(k-1)$ 得到混合估计 $\hat{X}_0(k-1|k-1)$ 和协方差 $P_0(k-1|k-1)$ ，将其作为当前循环的初始状态估计。参数计算如下：

模型 j 的预测概率(归一化常数)为：

$$\bar{c}_j = \sum_{i=1}^r p_{ij} u_i(k-1) \quad (30)$$

模型 i 到模型 j 的混合概率为：

$$u_{ij}(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r p_{ij} u_i(k-1) \bar{c}_j \quad (31)$$

模型 j 的混合状态估计：

$$\hat{X}_0(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r \hat{X}_i(k-1|k-1) u_{ij}(k-1|k-1) \quad (32)$$

模型 j 的混合协方差估计：

$$P_0(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^r u_{ij}(k-1|k-1) \{ p_i(k-1|k-1) + [\hat{X}_i(k-1|k-1) - \hat{X}_0(k-1|k-1)] \times [\hat{X}_i(k-1|k-1) - \hat{X}_0(k-1|k-1)]^T \} \quad (33)$$

(2) 卡尔曼滤波(模型 j)

以 $\hat{X}_0(k-1|k-1)$ 、 $P_0(k-1|k-1)$ 及 $Z(k)$ 作为输入进行卡尔曼滤波，来更新 k 时刻状态 $\hat{X}_j(k|k)$ 和滤波协方差 $P_j(k|k)$ 。

预测：

$$\hat{X}_j(k-1|k-1) = \Phi_j(k-1) \hat{X}_0(k-1|k-1) \quad (34)$$

预测误差协方差：

$$P_j(k|k-1) = \Phi_j P_0(k-1|k-1) \Phi_j^T + G_j Q_j \Phi_j^T \quad (35)$$

卡尔曼增益：

$$K_j(k) = P_j(k|k-1) H^T [H P_j(k|k-1) H^T + R]^{-1} \quad (36)$$

滤波：

$$\hat{X}_j(k|k) = \hat{X}_j(k|k-1) + K_j(k) [Z(k) - H(k) \hat{X}_j(k|k-1)] \quad (37)$$

滤波协方差：

$$P_j(k|k) = [I - K_j(k) H(k)] P_j(k|k-1) \quad (38)$$

(3) 模型概率更新

采用似然函数来更新模型概率 $u_j(k)$ ，模型 j 的似然函数为：

$$\Lambda_j(k) = \frac{1}{(2\pi)^{m/2} |S_j(k)|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} v_j^T S_j^{-1}(k) v_j \right\} \quad (39)$$

$$\begin{cases} v_j(k) = Z(k) - H(k) \hat{X}_j(k|k-1) \\ S_j(k) = H(k) P_j(k|k-1) H^T(k) + R(k) \end{cases} \quad (40)$$

模型 j 的概率为：

$$u_j(k) = \Lambda_j(k) \bar{c}_j / c \quad (41)$$

式中： c 为归一化常数，且 $c = \sum_{j=1}^r \Lambda_j(k) \bar{c}_j$ 。

(4) 输出交互

基于模型概率 $u_j(k)$ ，对各滤波器的估计结果加权合并：

$$\hat{X}(k|k) = \sum_{i=1}^r \hat{X}_i(k|k) u_i \quad (42)$$

协方差估计：

$$P(k|k) = \sum_{j=1}^r u_j(k) \{ P_j(k|k) + [\hat{X}_j(k|k) - \hat{X}(k|k)] \times [\hat{X}_j(k|k) - \hat{X}(k|k)]^T \}$$

可以看出，IMM 滤波的状态估计实际上是多个滤波器估计加权平均的结果，模型概率表示当前时刻某一模型描述真实目标运动的权重。

4 仿真实验

4.1 固定目标协同跟踪性能验证

在二维平面内验证双导弹编队对固定目标协同跟踪的可行性。两枚导弹的初始位置分别为 $(-5000, 3000)$ m 和 $(-3000, 6000)$ m，目标位于 $(0,0)$ m。导弹速度为 250 m/s，初始速度方位角为 0° 。制导律采用基于比例导引的时变导引系数时间协同制导律。假定被动测角导弹的视线角量测噪声为 $0.3^\circ(1\sigma)$ ，同时考虑各导弹自身位置定位精度误差为 10 m(1σ)。根据量测角度和导弹自身位置信息，可给出滤波器的初始状态 $X_0[\hat{R}_0 \quad -V_M \cos \lambda_0 \quad \hat{\lambda}_0 \quad 0]^T$ ， $\hat{\lambda}_0$ 和 \hat{R}_0 分别为量测视线角和伪距离量测量。

图 3 给出协同制导律作用下两枚导弹攻击同一目标的仿真结果，两枚导弹从不同位置实现对目标的协同攻击。图 4 和图 5 分别为导弹 i 和 j 的协同跟踪状态估计结果。其中，图 4(a)、图 5(a) 为弹目距离，图 4(b)、图 5(b) 为视线角速度。当存在导弹定

位误差时,制导末段估计误差略有增加,但仍在可接受范围内。相比单枚被动测角导弹的目标跟踪方法,采用两导弹协同跟踪模式的目标状态估计收敛速度快,估计精度大大提高。

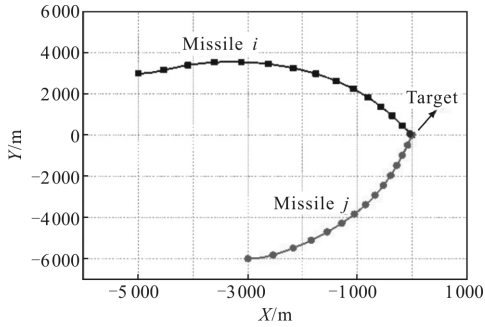


图 3 导弹跟踪固定目标弹道曲线

Fig.3 Trajectories of missile tracking stationary target

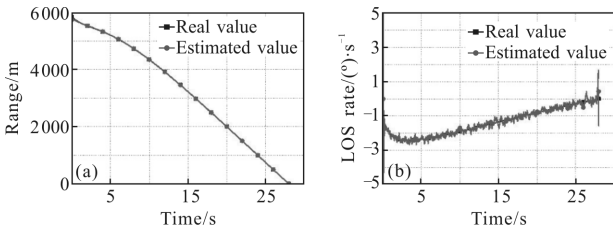


图 4 导弹 i 的滤波估计

Fig.4 Filtering estimation of missile i

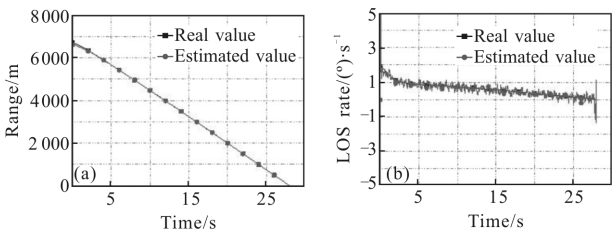


图 5 导弹 j 的滤波估计

Fig.5 Filtering estimation of missile j

4.2 机动目标协同跟踪性能验证

在二维平面内验证双导弹对机动目标协同跟踪模型的性能。两枚导弹的初始位置分别为(-15 000, 3 000)m 和(3 000, -16 000)m,导弹速度均为 500 m/s,初始速度方向角均为 0°。目标位于(0,0)m,目标速度 200 m/s,初始速度方向角为 0°目标作正弦加速度机动 $a_T(t)=20\sin(\pi t/20)$ 。针对非常值机动目标,文中采用 CV 模型、CA 模型和 Singer 模型三种不同目标机动模型的交互式多模型卡尔曼滤波跟踪估计目标状态。

假定被动测角导弹的视线角测量噪声为 $0.3^\circ(1\sigma)$,同时考虑各导弹自身位置定位精度误差为 10m(1σ)。根据量测角度和导弹自身位置信息,可给出滤波器的估计初值 $X_{i0}[\hat{R}_{i0} -V_M\cos\lambda_{i0} \hat{\lambda}_{i0} 0]^T$,其中, $\hat{\lambda}_{i0}$ 和 \hat{R}_{i0} 分别为量测视线角和伪距离量测量。

两导弹编队协同攻击同一机动目标的弹道曲线如图 6 所示。

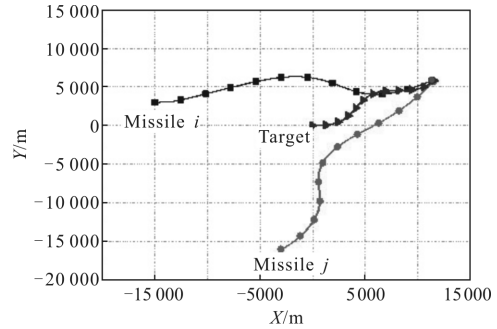
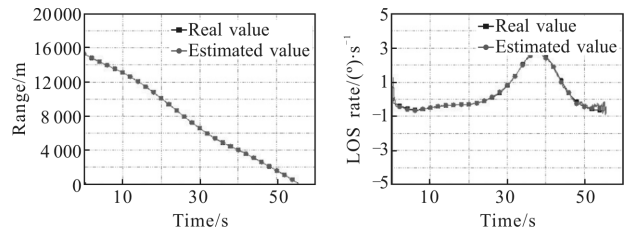


图 6 导弹跟踪机动目标弹道曲线

Fig.6 Trajectories of missile tracking maneuvering target

图 7 和图 8 和分别给出导弹 i 和 j 的目标跟踪滤波结果。仿真结果表明,尽管目标作正弦机动,采用交互式卡尔曼滤波的机动目标跟踪模型可以实时准确地估计弹目距离、视线角速度及目标加速度等信息。

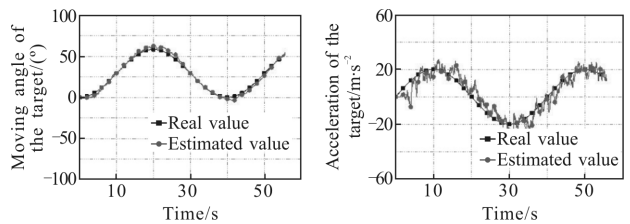


(a) 弹目距离

(b) 视线角速度

(a) Distance of missile and target

(b) LOS rate



(c) 目标速度方向角

(d) 目标加速度

(c) Moving angle of the target (d) Acceleration of the target

图 7 导弹 i 的滤波估计

Fig.7 Filtering estimation of missile i

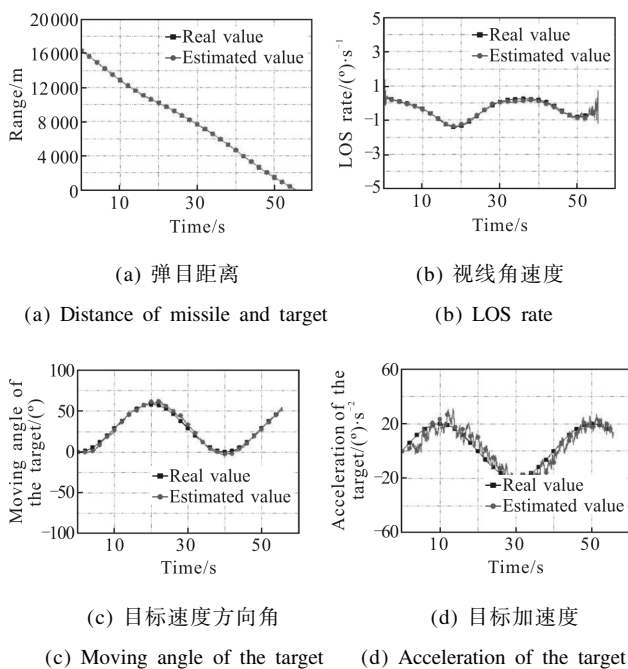


图 8 导弹 j 的滤波估计

Fig.8 Filtering estimation of missile j

5 结论

文中研究了红外制导导弹编队在二维平面内的目标协同跟踪问题。首先利用双导弹编队与目标组成的追踪三角形对目标协同定位, 根据导弹编队空间位置及导引头量测信息估算出弹目距离, 并将其作为伪量测量, 提高被动测角导弹的目标可观测性。同时, 建立目标协同跟踪模型, 实时估计弹目距离、视线角速度等信息。针对机动目标特点, 研究了一种交互式多模型卡尔曼滤波方法, 利用多个目标机动模型加权融合来估计真实目标的机动模型, 有效提高了机动目标的估计精度。相关成果可以为目标协同定位与跟踪方法提供参考, 具有潜在的工程应用价值。该方法同样适用于三维空间目标协同定位与跟踪, 将在后续文章中继续研究讨论。

参考文献:

[1] Sun Weimeng. Research on guidance law design with terminal

impact angle constraints in air-to-surface guided weapon [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)

[2] Shi Yanlong. Application of nonlinear filtering in ballistic target tracking [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[3] Chen T, Xu S. Approach guidance with double-line-of-sight measuring navigation constraint for autonomous rendezvous [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, 34(3): 678-687.

[4] Wang Kai, Chen Tong, Xu Shijie. A method of double line-of-sight measurement relative navigation[J]. *Acta Aeronautica et Aeronautica Sinica*, 2011, 32(6): 1084-1091. (in Chinese)

[5] Dong Jipeng, Tang Dong. An algorithm of target tracking based on two missiles cooperative location information [J]. *Aero Weaponry*, 2014(3): 3-7. (in Chinese)

[6] Wang Jiawei. Research on cooperative guidance and control for multiple interceptors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

[7] Ye Jikun, Lei Humin, Xue Dongfeng, et al. Multiple missiles cooperative tracking algorithm base on geometric relation[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2012, 32(10): 2332-2338. (in Chinese)

[8] Liu Yanfang. Research on end-game guidance law for interceptor missile based on differential game theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

[9] Shaferman V, Oshman Y. Cooperative Interception in a Multi-Missile Engagement [C]//Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences, 2009.

[10] M W, B S, W W, et al. Cooperative Tracking of Moving Targets by a Team of Autonomous UAVs [C]//IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference, 2006: 1-9.

[11] Zarchan P. Representation of realistic evasive maneuvers by the use of shaping filters [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1979, 2(4): 290-295.

[12] Jeon I, Lee J, Tahk M. Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(1): 275-280.