

网络信息支持下目标“虚拟跟踪”方法研究

付昭旺¹, 于雷¹, 刘霞², 曲大鹏³

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 广州军区空军指挥自动化工作站, 广州 510004;
3. 广州军区空军装备部, 广州 510004)

摘要: 针对隐身战斗机作战的电磁隐蔽性需求, 提出网络信息支持下的目标“虚拟跟踪”方法。基于虚拟量测转换建立“虚拟跟踪”的状态模型, 针对网络信息精度和战斗机状态估计误差, 基于量测无偏转换原理对状态模型进行修正。为提高对机动目标“虚拟跟踪”的状态估计精度, 设计基于“当前”统计模型的交互式多模型无迹卡尔曼滤波算法进行滤波处理。针对机动目标跟踪下不同误差影响对比进行的仿真表明, “虚拟跟踪”方法能快速获得稳定的目标状态估计, 通过提高信息更新频率和战斗机的姿态估计精度, 能获得较高精度水平的目标信息。

关键词: 网络信息; 虚拟跟踪; 交互式多模型; 当前“统计”模型; 量测转换; 无迹卡尔曼滤波
中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)04-0001-06

A Method for Virtual Tracking of Target Based on Network Information

FU Zhaowang¹, YU Lei¹, LIU Xia², QU Dapeng³

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Command Automation Work Station for Guangzhou Air force Military Region, Guangzhou, 510004, China;
3. Air Force Equipment Department of Guangzhou Military Region, Guangzhou 510004, China)

Abstract: Considering the the strict electromagnetic concealment requirement for stealth fighters in combat, we proposed a virtual target tracking method based on network information. State model of virtual tracking was established based on the measurement transformation process, in which the network information precision and fighter state estimate error were taken into consideration. The state model was revised based on unbiased transformation principle. In order to improve the precision of target state estimation, Unscented Kalman Filter of Interacting Multiple Mode (IMM-UKF) algorithm based on current statistical mode was proposed. Finally, simulation was made for maneuvering target tracking under different error conditions. The result showed that “virtual tracking” method can get a stable target state estimation with fast convergence speed and high precision.

Key words: network information; virtual tracking; Interacting Multiple Model (IMM); current statistical mode; measurement transformation; Unscented Kalman Filter(UKF)

0 引言

随着隐身技术的迅猛发展, 隐身战斗机的隐身性能日益增强, 反隐身作战的手段也层出不穷, 信息控制与反控制逐渐成为空战对抗的焦点, 战斗机的隐身能

力在空战对抗中的优势日益凸显^[1-2]。战斗机要发挥良好的隐蔽作战能力, 除了采用对雷达目标特性的缩减技术, 战术使用也是非常重要的一个方面^[3]。隐身战斗机为了保证隐身作战需求, 必须进行严格的射频管理^[4], 致使隐身战斗机机载雷达的使用受到极大约束, 影响其作战性能的发挥。为了充分发挥先进战斗机的隐身性能、提升其作战优势, 迫切需要积极探索与此相适应的支撑技术。随着数据链技术的发展及其军事应用, 数据链支持下的网络作战将成为未来一种基本的作战模式。

收稿日期: 2012-05-27

修回日期: 2012-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(61172083); 航空科学基金(20095196012)

作者简介: 付昭旺(1985—), 男, 湖南邵阳人, 博士生, 研究方向为航空武器系统总体、控制与仿真。

基于此,本文提出一种网络信息支持下的目标“虚拟跟踪”方法:战斗机通过网络信息源获得目标坐标信息支持,通过坐标转换和滤波处理,在自身火控系统得到与自身雷达跟踪等同的目标状态参数,并用于火控计算。“虚拟跟踪”可以通过射频控制实现战术隐身,有力提升战斗机的隐蔽作战能力。

1 目标“虚拟跟踪”状态模型

1.1 “虚拟跟踪”状态空间描述

目标“虚拟跟踪”由外部信息源提供输入信息,战斗机根据自身与信息源的位置关系,并结合自身运动状态变换得到目标的相对运动状态,“虚拟跟踪”的原理如图1所示。

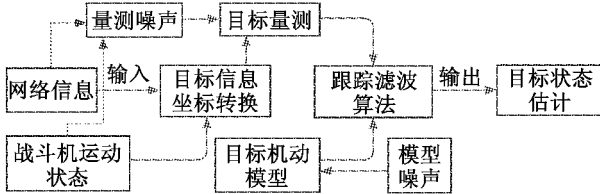


图1 目标“虚拟跟踪”的原理

Fig.1 Principle of target virtual tracking

由图1可以看出,“虚拟跟踪”为最优估计问题。设战斗机飞机坐标系下的目标位置、速度和加速度分别为 X_{fm} 、 \dot{X}_{fm} 和 \ddot{X}_{fm} 。取系统状态为 $X = [X_{fm}, \dot{X}_{fm}, \ddot{X}_{fm}]$, 则目标“虚拟跟踪”的状态空间可表示为

$$\begin{cases} \dot{X}_k = \Phi_{k+1,k} X_k + w_k \\ Z_k = H_k X_k + v_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_k 为 k 时刻系统状态向量; Z_k 为量测向量, 即 k 时刻信息源传递的目标信息; $\Phi_{k+1,k}$ 和 H_k 分别为状态转移函数和量测函数; w_k 和 v_k 分别表示系统不相关的过程误差和量测误差, 且满足 $w_k \sim N(0, Q)$ 、 $v_k \sim N(0, R)$, 其中 Q 和 R 分别为 w_k 和 v_k 的方差统计值。

1.2 虚拟量测矢量转换

目标量测转换是在一定的相关坐标系中进行的, 文中需要使用的坐标系为地球坐标系 $(OXYZ)_d$ 、“北天东”地理坐标系 $(OXYZ)_e$ 和“升力 Y ”飞机坐标系 $(OXYZ)_f$, 坐标系的定义及转换关系见文献[5]。

设网络信息源位于 $O_b(\lambda_b, L_b, H_b)$ 点, λ_b 、 L_b 和 H_b 分别表示经度、纬度和高度。以 O_b 为原点建立地理坐标系 $(OXYZ)_{be}$, 设 $(OXYZ)_{be}$ 中的目标位置矢量为 X_m , 将 X_m 转换到 $(OXYZ)_d$ 中为

$$X_{dm} = [x_{dm} \ y_{dm} \ z_{dm}]^T = T_{d,be} \cdot X_m + X_{ob} \quad (2)$$

式中, $T_{d,be}$ 为 $(OXYZ)_{be}$ 到 $(OXYZ)_d$ 的转换矩阵, X_{ob} 为信息源在 $(OXYZ)_d$ 中的位置矢量。

$$T_{d,be} = \begin{bmatrix} -\cos \lambda_b \sin L_b & \cos L_b \cos \lambda_b & -\sin \lambda_b \\ -\sin L_b \sin \lambda_b & \sin \lambda_b \cos L_b & \cos \lambda_b \\ \cos \lambda_b \sin L_b & \sin L_b & 0 \end{bmatrix}$$

$$X_{ob} = \begin{bmatrix} x_{ob} \\ y_{ob} \\ z_{ob} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_e + H_b) \cos L_b \cos \lambda_b \\ (R_e + H_b) \cos L_b \sin \lambda_b \\ (R_e(1 - e^2) + H_b) \sin L_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $R_e = a/\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$, 为地球曲率半径, a 为椭球长半轴, e 为椭球第一偏心率。

战斗机根据导航定位系统获得自身的位置 $O_f(\lambda_f, L_f, H_f)$, 则 $(OXYZ)_d$ 中战斗机的位置为

$$X_{of} = \begin{bmatrix} x_{of} \\ y_{of} \\ z_{of} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_e + H_f) \cos L_f \cos \lambda_f \\ (R_e + H_f) \cos L_f \sin \lambda_f \\ (R_e(1 - e^2) + H_f) \sin L_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

以 O_f 为原点建立当地地理坐标系 $(OXYZ)_{fe}$, 则可得 $(OXYZ)_{fe}$ 下目标的位置为

$$X_{em} = T_{fe,d} \cdot (X_{dm} - X_{of}) \quad (5)$$

式中, $T_{fe,d}$ 为 $(OXYZ)_d$ 到 $(OXYZ)_{fe}$ 的转换矩阵。

$$T_{fe,d} = \begin{bmatrix} -\cos \lambda_f \sin L_f & -\sin L_f \sin \lambda_f & \cos \lambda_f \sin L_f \\ \cos L_f \cos \lambda_f & \sin \lambda_f \cos L_f & \sin L_f \\ -\sin \lambda_f & \cos \lambda_f & 0 \end{bmatrix}$$

则, 可得战斗机飞机坐标系下的目标位置为

$$X_{fm} = [x_{fm} \ y_{fm} \ z_{fm}]^T = T_{f,fe} \cdot X_{em} \quad (6)$$

式中, $T_{f,fe}$ 为战斗机所在地理坐标系向飞机坐标系的转换矩阵。

$$T_{f,fe} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & \sin \theta & -\sin \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \sin \gamma - \sin \theta \cos \varphi \cos \gamma & \cos \theta \cos \gamma & \cos \theta \sin \gamma + \sin \varphi \sin \theta \cos \gamma \\ \sin \varphi \cos \gamma + \sin \theta \cos \varphi \sin \gamma & -\cos \theta \sin \gamma & \cos \varphi \cos \gamma - \sin \varphi \sin \theta \sin \gamma \end{bmatrix}$$

X_{fm} 即为目标虚拟跟踪中战斗机的虚拟量测。

1.3 状态模型修正

由于虚拟跟踪必须进行量测转换, 所以, 量测误差受参数转换过程的影响, 同时, 网络信息传递延时也会对虚拟量测产生误差, 由于数据链延时引入的误差可通过滤波外推进行补偿^[6-7], 所以在此不将其作为量测误差考虑。

战斗机的空间位置通常采用经度、纬度和高度来表示, 分别采用经度误差 $\delta\lambda$ 、纬度误差 δL 和高度误差 δh 来描述定位误差, 而定姿误差可采用姿态角测量误差 $\delta\varphi$ 、 $\delta\theta$ 和 $\delta\gamma$ 来描述, 且设

$$\delta x \sim N(0, \sigma_x^2) \quad (7)$$

式中, $N(\cdot)$ 表示正态分布, $x\{\lambda, L, H, \varphi, \theta, \gamma\}$ 。

设信息源处的目标量测误差为 $\delta X_m \sim (0, \sigma_x^2)$ 。

考虑误差作用下, 将误差源引入到量测转换过程, 则根据式(2)~式(6)进行计算, 可得误差影响下的目

标量测转换为 X'_{jm} , 则量测误差可表示为

$$\Delta X_m = X_{jm} - X'_{jm} \quad (8)$$

由于信息源的测量误差和战斗机状态估计误差具有随机性, 多种误差综合作用下, 量测误差是时变非线性的。为了解决这种非线性, 根据无偏量测转换的思想, 对虚拟跟踪的状态模型进行修正

$$\begin{cases} X_{k+1} = \Phi_{k+1k} X_k + w_k \\ Z_k = H_k X_k + \eta_k \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\eta_k = H_k \Delta X_{mk} + v_k$ 为量测转换影响下的虚拟量测误差。显然, η_k 与 w_k 不相关, 且

$$E(\eta_k) = H_k E(\Delta X_{mk}) \quad (10)$$

$$\tilde{R} = E(\eta_k \cdot \eta_k^T) = E(\Delta X_{mk} \cdot \Delta X_{mk}^T) + R \quad (11)$$

2 IMM-UKF 滤波算法

交互式多模型(Interacting Multiple Model, IMM)滤波算法^[8-9]被认为是目前处理目标跟踪最有效的滤波算法之一。它基于马尔可夫链进行软切换, 通过不同模型之间交互得到多模型融合的状态估计, 因其能有效提高滤波估计的收敛速度和估计精度而得到广泛应用, 近年来发展的无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)是一种高效费比的非线性滤波算法^[10-12], 能有效获得非线性系统的状态估计^[13]。因此, 本文采用 IMM 与 UKF 相结合的 IMM-UKF 算法进行“虚拟跟踪”目标状态估计。

2.1 基于“当前”统计模型的模型集

采用 IMM 算法时, 模型集的选择十分重要, 文献[8]通过仿真证明当前“统计”模型能够较好地适应各种类型的目标机动。因此, 本文选择文献[14]中改进的当前统计模型。

设网络信息的更新周期为 T , 为了更符合实际情况, 本文假定 T 不固定, 而是服从一定范围的随机值。取系统状态向量为

$$X_k = [x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k, z_k, \dot{z}_k, \ddot{z}_k]^T \quad (12)$$

系统的状态方程为

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1k} X_k + G_k \bar{a}_k + w_k \quad (13)$$

式中, Φ_{k+1k} 为目标状态转移矩阵, G_k 为输入控制矩阵。

$$\Phi_{k+1k} = \begin{bmatrix} \Phi & & \\ & \Phi & \\ & & \Phi \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$G_k = \begin{bmatrix} G & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & G & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & G \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,

$$\Phi = e^{AT} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{\alpha T - 1 + e^{-\alpha T}}{\alpha^2} \\ 0 & 1 & \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} \left(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \right) \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (17)$$

α 为机动频率, 本文通过设置不同 α 来构建多个目标运动模型。 \bar{a}_k 为机动加速度的均值, 且

$$\bar{a}_k = [\bar{a}_{kx}, \bar{a}_{ky}, \bar{a}_{kz}]^T \quad (18)$$

过程噪声 w_k 的协方差为

$$Q_k = \begin{bmatrix} Q_x & & \\ & Q_y & \\ & & Q_z \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, $Q_\Omega = 2a\sigma_{a\Omega}^2 \cdot Q$ (Ω 为 x, y 或 z),

$$\sigma_{a\Omega}^2 = \begin{cases} \frac{4 - \pi}{\pi} [a_{\Omega \max} - \bar{a}_{k\Omega}]^2, & \bar{a}_{k\Omega} \geq 0 \\ \frac{4 - \pi}{\pi} [a_{-\Omega \max} + \bar{a}_{k\Omega}]^2, & \bar{a}_{k\Omega} < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$a_{\Omega \max}$ 和 $a_{-\Omega \max}$ 分别为 Ω 方向上的最大正、负加速度, Q 的取值参见文献[8]。

2.2 IMM-UKF 算法

IMM-UKF 算法可归纳为如下几步。

1) 模型条件的重初始化。

设有 m 个模型, 每个模型给定一个典型机动频率和最大正负加速度以及模型转移概率 $\Pi_{m \times m}$, 令

$$\Pi_{m \times m} = \pi_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

设时刻 k , 模型 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 的概率为 μ_{klk}^i , 模型的预测概率为

$$\mu_{k+1k}^i = \sum_{j=1}^m \pi_{ji} \mu_{klk}^j, \quad (22)$$

模型 i 混合估计为

$$\hat{X}_{klk}^i = \sum_{j=1}^m \pi_{ji} \frac{\mu_{klk}^j}{\mu_{k+1k}^i} \hat{X}_{klk}^j \quad (23)$$

模型 i 混合协方差估计为

$$P_{klk}^i = \sum_{j=1}^m \pi_{ji} \frac{\mu_{klk}^j}{\mu_{k+1k}^i} \times \{ P_{klk}^j + [\hat{X}_{klk}^j - \hat{X}_{klk}^i] \cdot [\hat{X}_{klk}^j - \hat{X}_{klk}^i]^T \} \quad (24)$$

2) 模型条件滤波。

① 根据 1) 计算得到的 \hat{X}_{klk}^i 和 P_{klk}^i , 构造 σ 点 χ_{klk}^i 。

$$\begin{cases} \hat{X}_{k|k}^i, & i=0 \\ \hat{X}_{k|k}^i + [\sqrt{(n+\mu_c)P_{k|k}^i}]_i, & i=1, \dots, n \\ \hat{X}_{k|k}^i - [\sqrt{(n+\mu_c)P_{k|k}^i}]_{i-n}, & i=n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (25)$$

$$\mu_c = \alpha_\mu^2 (n + \kappa_\mu) - n \quad (26)$$

其中: μ_c 为刻度参数; α_μ 为尺度因子, 决定 σ 点的散布程度; κ_μ 为第二刻度参数, 用于调整 UT 的逼近精度, 通常取为 0; $[\cdot]_i$ 及 $[\cdot]_{i-n}$ 分别表示矩阵的第 i 和 $i-n$ 列。

② 时间更新。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1|k}^i = \Phi_{k+1|k}^i \mathbf{X}_{k|k}^i + \mathbf{G}_{k+1|k}^i \mathbf{a}_k^i \\ \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^i = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \mathbf{X}_{k+1|k}^i \\ \mathbf{P}_{k+1|k}^i = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(o)} (\mathbf{X}_{k+1|k}^i - \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^i) (\mathbf{X}_{k+1|k}^i - \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^i)^T + \mathbf{Q}_k^i \\ \mathbf{Y}_{k+1|k}^i = \mathbf{H}_k^i \mathbf{X}_{k+1|k}^i \\ \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^i = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \mathbf{Y}_{k+1|k}^i \end{cases} \quad (27)$$

上式中 \mathbf{Q}_k^i 中的 $\sigma_{a\Omega}^2$ 需要根据模型概率由式(20)进行修正

$$\sigma_{i,\Omega}^2 = \begin{cases} \frac{4-\pi}{\pi} [\mu_{k|k}^i a_{i,\Omega \max} - \bar{a}_{k\Omega}]^2, & \bar{a}_{k\Omega} \geq 0 \\ \frac{4-\pi}{\pi} [\mu_{k|k}^i a_{i,\Omega \max} + \bar{a}_{k\Omega}]^2, & \bar{a}_{k\Omega} < 0 \end{cases} \quad \circ$$

③ 量测更新。

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{Z_k}^i = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(o)} (\mathbf{Y}_{k+1|k}^i - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^i) (\mathbf{Y}_{k+1|k}^i - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^i)^T + \tilde{\mathbf{R}}_k^i \\ \mathbf{P}_{X_k, Z_k}^i = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(o)} (\mathbf{X}_{k+1|k}^i - \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^i) (\mathbf{Y}_{k+1|k}^i - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^i)^T \\ \mathbf{K}_{k+1}^i = \mathbf{P}_{X_k, Z_k}^i (\mathbf{P}_{Z_k}^i)^{-1} \\ \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}^i = \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^i + \mathbf{K}_{k+1}^i (\mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^i) \\ \mathbf{P}_{k+1|k+1}^i = \mathbf{P}_{k+1|k}^i - \mathbf{K}_{k+1}^i \mathbf{P}_{Z_k}^i \mathbf{K}_{k+1}^{iT} \end{cases} \quad (28)$$

其中 $W_i^{(m)}$ 和 $W_i^{(o)}$ ($i=1, \dots, 2n$) 分别为均值和方差的权重系数, 其计算如下:

$$W_0^{(m)} = \mu_c / (n + \mu_c) \quad (29)$$

$$W_0^{(o)} = \mu_c / (n + \mu_c) + (1 - \alpha^2 + \beta) \quad (30)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(o)} = 1 / [2(n + \mu_c)] \quad (31)$$

3) 模型概率更新。

模型似然函数为

$$\Lambda_{k+1}^i = (2\pi)^{-1} [\mathbf{P}_{Z_k}^i]^{-1/2} \times \exp\left\{-\frac{1}{2} [\mathbf{Z}_{k+1} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^i]^T [\mathbf{P}_{Z_k}^i]^{-1} [\mathbf{Z}_{k+1} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^i]\right\} \quad (32)$$

模型更新概率为

$$\mu_{k+1|k+1}^i = \frac{\mu_{k+1|k}^i \Lambda_{k+1}^i}{\sum_{i=1}^m \mu_{k+1|k}^i \Lambda_{k+1}^i} \quad (33)$$

4) 估计融合。

目标状态估计为

$$\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k+1} = \sum_{i=1}^m \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}^i \mu_{k+1|k+1}^i \quad (34)$$

协方差估计为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}}_{k+1|k+1} &= \sum_{i=1}^m \mu_{k+1|k+1}^i \cdot \{\mathbf{P}_{k+1|k+1}^i + \\ &[\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k+1} - \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}^i] \cdot [\bar{\mathbf{X}}_{k+1|k+1} - \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}^i]^T\} \end{aligned} \quad (35)$$

步骤 1) ~ 4) 构成了 IMM-UKF 算法的一个循环, 重复以上步骤, 即能实现目标状态估计。

3 目标状态参数计算

为了实现目标攻击, 火控计算需要获得准确的目标距离和角坐标及其变化率等信息。所以, “虚拟跟踪”需要得到目标的距离、距变率、角坐标及其角变率等状态参数, 用以火控计算。基于目标运动状态估计, 给出各状态参数的计算方法如下。

战斗机与目标的相对距离为

$$D = \|\mathbf{X}_{fm}\|_2 = \sqrt{x_{fm}^2 + y_{fm}^2 + z_{fm}^2} \quad (36)$$

战斗机与目标的距变率为

$$\dot{D} = (x_{fm} \dot{x}_{fm} + y_{fm} \dot{y}_{fm} + z_{fm} \dot{z}_{fm}) / D \quad (37)$$

定义目标方位角以目标位于飞机左侧为正, 则

$$\mu = \begin{cases} \pi + \arctan \frac{z_{fm}}{x_{fm}}, & x_{fm} < 0, z_{fm} > 0 \\ \pi/2, & x_{fm} = 0, z_{fm} > 0 \\ -\arctan \frac{z_{fm}}{x_{fm}}, & x_{fm} > 0 \\ -\pi/2, & x_{fm} = 0, z_{fm} < 0 \\ \pi - \arctan \frac{z_{fm}}{x_{fm}}, & x_{fm} < 0, z_{fm} < 0 \end{cases} \quad (38)$$

定义目标俯仰角以目标处于飞机上方为正, 则

$$v = \begin{cases} \pi/2, & x_{fm}^2 + z_{fm}^2 = 0, y_{fm} > 0 \\ \arctan \frac{y_{fm}}{\sqrt{x_{fm}^2 + y_{fm}^2}}, & x_{fm}^2 + z_{fm}^2 \neq 0 \\ -\pi/2, & x_{fm}^2 + z_{fm}^2 = 0, y_{fm} < 0 \end{cases} \quad (39)$$

目标的角变率采用下式进行计算。

$$\dot{\mu} = \begin{cases} 0, & \text{if } x_{fm}^2 + z_{fm}^2 = 0 \\ \frac{\dot{x}_{fm} z_{fm} - \dot{z}_{fm} x_{fm}}{x_{fm}^2 + z_{fm}^2}, & \text{else} \end{cases} \quad (40)$$

$$\dot{v} = \begin{cases} 0, & \text{if } (x_{fm}^2 + y_{fm}^2) = 0 \\ \frac{(x_{fm}^2 + z_{fm}^2) \dot{y}_{fm} - \dot{x}_{fm} x_{fm} y_{fm} - y_{fm} \dot{z}_{fm} z_{fm}}{(x_{fm}^2 + y_{fm}^2 + z_{fm}^2) \cdot \sqrt{(x_{fm}^2 + z_{fm}^2)}}, & \text{else} \end{cases} \quad (41)$$

4 仿真分析

设网络信息源位置为 $O_b(110^\circ, 60^\circ, 10 \text{ km})$, 假设

信息源固定。目标的模拟轨迹为：目标相对于 O_b 的初始位置为 $X_m = [100 \text{ km}, 5 \text{ km}, 100 \text{ km}]$ 。初始航向角和俯仰角分别为 $\psi_i = -60^\circ$ 和 $\theta_i = 0^\circ$ 。0 ~ 100 s, 目标以 $a_m = 0.75 \text{ m/s}^2$ 作匀加速直线运动; 100 ~ 180 s, 目标以 $a_m = -1 \text{ m/s}^2$ 、 $d\psi_i = -2 (\text{ }^\circ)/\text{s}$ 和 $d\theta_i = 0.2 (\text{ }^\circ)/\text{s}$ 作减速转弯运动; 180 ~ 300 s, 目标以 $d\psi_i = -1 (\text{ }^\circ)/\text{s}$ 和 $d\theta_i = -0.1 (\text{ }^\circ)/\text{s}$ 作匀速转弯运动。载机初始位置为 $O_{f0}(110.5^\circ, 59.5^\circ, 6 \text{ km})$, 以 $V = 330 \text{ m/s}$ 、 $d\varphi = -0.1 (\text{ }^\circ)/\text{s}$ 和 $d\theta = 0.02 (\text{ }^\circ)/\text{s}$ 运动。网络信息更新周期设置为 $T \in [0.1 \text{ s}, 0.5 \text{ s}]$ 之间的随机值。误差条件设置为: $\sigma_{x_m} = I_3 \cdot 50 \text{ m}$, $\sigma_\lambda = \sigma_L = 0.001^\circ$, $\sigma_H = 50 \text{ m}$, $\sigma_\varphi = \sigma_\theta = \sigma_\gamma = 0.1^\circ$ 。

在以上初始条件下,选择合适的滤波参数,采用 IMM-UKF 算法进行仿真。在滤波的同时,对距变率和角变率进行拟合估计,得到其平滑估计值。仿真结果如图 2 ~ 图 6 所示,图 2 为战斗机与目标的运动轨迹,图 3 为目标相对位置估计,图 4 为目标位置估计误差,图 5 为目标距离、距变率估计,图 6 为目标角坐标及角变率估计。

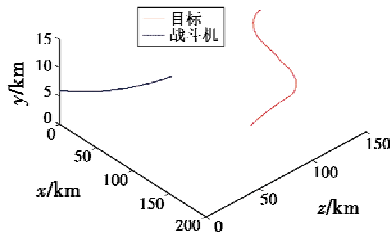


图 2 载机和目标运动轨迹

Fig. 2 Trajectory of target and fighter

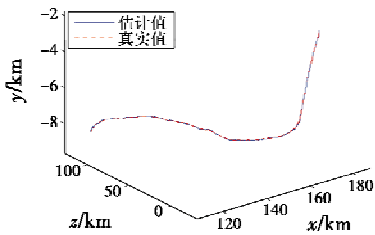


图 3 目标相对位置估计

Fig. 3 Relative position of target and fighter

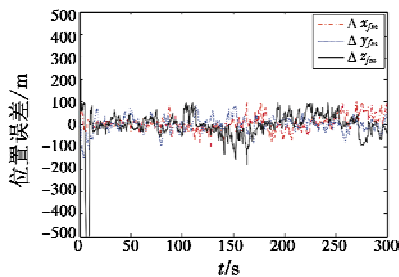


图 4 目标位置估计误差

Fig. 4 Target position error

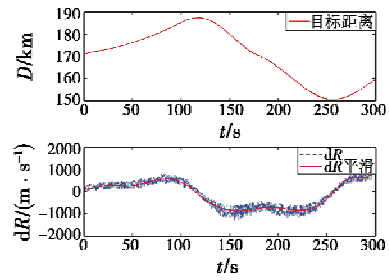


图 5 目标距离和距变率估计

Fig. 5 Distance and range rate estimation of target

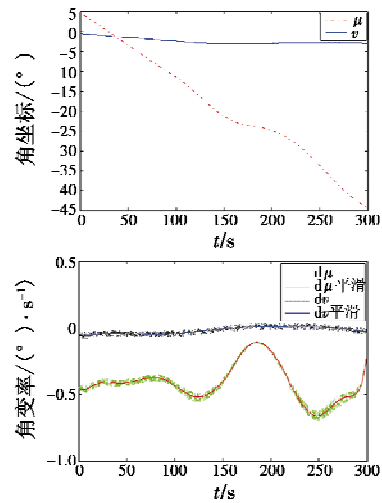
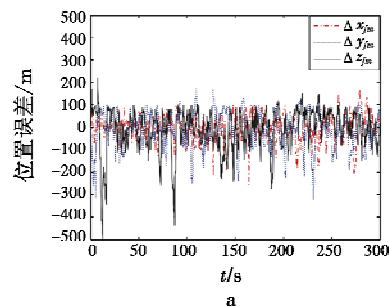


图 6 目标角坐标及角变率估计

Fig. 6 Target perspective and angular rate estimation

由图 4 可以看出,基于 IMM-UKF 的滤波处理后,目标的位置估计精度较为稳定。在目标作大机动时,滤波误差增大,但是没有发散,说明滤波算法具有较强的鲁棒性。由图 5 和图 6 可以看出,目标状态估计的效果较好,通过采用拟合平滑处理,能获得稳定准确的目标距变率和角变率值,这说明“虚拟跟踪”模型是有效的。

为了分析各误差源以及信息更新周期对跟踪精度的影响,逐个改变误差源(每次只改变一个误差源)进行仿真,分别设置以下 4 组条件:1) $\sigma_{x_m} = I_3 \cdot 200 \text{ m}$; 2) $\sigma_\lambda = \sigma_L = 0.005^\circ$, $\sigma_H = 200 \text{ m}$; 3) $\sigma_\varphi = \sigma_\theta = \sigma_\gamma = 0.4^\circ$; 4) $T \in [1.5 \text{ s}, 2.0 \text{ s}]$ 的随机值,得到目标位置估计误差如图 7 中 a、b、c、d 所示。



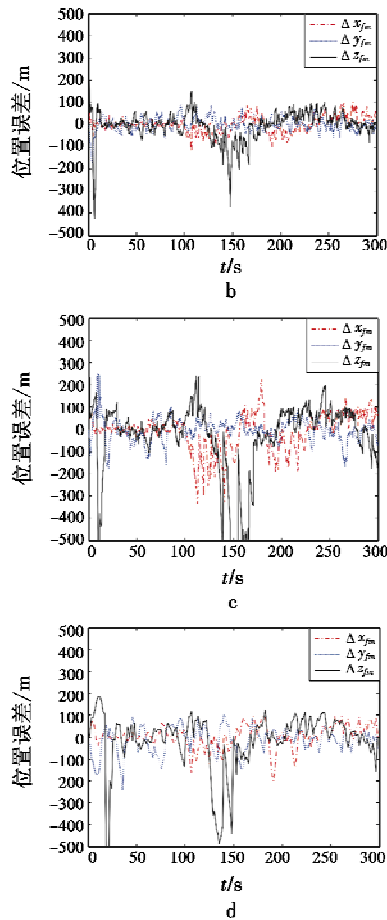


图7 四组误差条件下的仿真结果

Fig. 7 Simulation results for four sets of error conditions

将图7与图4进行对比可以看出,信息源的误差对于“虚拟跟踪”的精度具有直接影响;战斗机定位误差对跟踪精度影响较小;战斗机的姿态误差和信息更新频率对跟踪精度具有较大的影响,尤其是目标机动时这种影响更为明显。

通过仿真分析可以得到如下结论:1)为了提高跟踪精度,必须控制载机姿态误差;2)网络信息在传递前进行噪声预处理能有效提高跟踪精度;3)可以根据目标不同运动状态采用不同的信息更新频率,目标大机动时必须提高信息更新频率。

5 结论

本文针对隐身战斗机作战的电磁隐蔽性需求,提出网络信息支持下对目标实施“虚拟跟踪”的方法。建立了量测误差修正的“虚拟跟踪”状态模型,设计了基于当前“统计”模型的 IMM-UKF 算法进行滤波处理。仿真结果表明,“虚拟跟踪”能获得稳定准确的目标状

态估计,且收敛速度快、具有较高的估计精度。最后对误差的影响进行了仿真对比分析,表明通过提升信息更新频率和姿态测量精度,“虚拟跟踪”能获得较高精度水平的目标信息。本文的研究成果为战斗机协同作战和隐身战斗机的隐身性能的发挥提供了理论指导和技术支撑。

参考文献

- [1] 孙子杰,毛根旺,栗金平,等. 隐身技术在飞行器上的应用[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2011,25(2):106-111.
- [2] 高劲松,陈哨东. 国外隐身战斗机超视距空战问题[J]. 电光与控制,2011,18(8):17-21.
- [3] 徐安,于雷,寇英信,等. 基于MDP框架的飞行器隐蔽接敌策略[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(5):1063-1068.
- [4] LYNCH D. 射频隐身导论[M]. 沈玉芳,等译. 西安:西北大学出版社,2009.
- [5] 周志刚. 航空综合火力控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:21-40.
- [6] 王冬旭,姚佩阳,李项军. 战术数据链通信延时的补偿方法研究[J]. 电光与控制,2010,17(6):21-24.
- [7] 吴龙,刘正敏,姜长生,等. 基于卡尔曼滤波算法的数据链延时补偿[J]. 航空兵器,2010(5):14-18.
- [8] 刘建书,李人厚,刘云龙. 基于“当前”统计模型的交互式多模型算法[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(7):1351-1354.
- [9] 孙松斌,宋建梅,张婧. 超低空拦截导弹武器系统的UKF-IMM目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(10):23-26.
- [10] WANG Xiaoxu, ZHAO Lin, XIA Quanxi, et al. Strong tracking filter based on unscented transformation[J]. Control and Decision, 2010, 25(7):1063-1068.
- [11] 孙尧,张强,万磊. 基于自适应UKF算法的小型水下机器人导航系统[J]. 自动化学报,2011,37(3):342-353.
- [12] 石勇,韩崇昭. 自适应UKF算法在目标跟踪中的应用[J]. 自动化学报,2011,37(6):755-758.
- [13] ARASARATNAM I, HAYKIN S, ELLIOTT R J. Discrete-time non-linear iterated algorithms using Gauss-Hermite quadrature[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(5):953-977.
- [14] 谭顺成,王国宏,王娜,等. 改进的交互式当前统计模型算法[J]. 电光与控制,2011,18(4):21-25.