

## 红外搜索跟踪系统中跟踪门算法研究\*

胡磊力<sup>1)</sup> 陈钰清<sup>1)</sup> 邹盛怀<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江, 杭州, 310027;

<sup>2)</sup>中国航空总公司第 613 研究所, 河南, 洛阳, 471009)

**摘要** 分析了多目标跟踪过程中预测误差的来源、分布及传递关系, 计算出目标的测量误差和本机的速度测量误差在坐标转换后的偏差, 并根据目标的机动特性建立了相应的机动加速度模型, 讨论了如何在保证正确判定概率  $P_{CD}$  条件下选取尽可能小的跟踪门体积, 给出了跟踪门的设计, 并说明了系统扫描方式对跟踪门设计的影响, 还建立了目标的状态方程和测量方程, 运用标准 Kalman 滤波, 实现了机载IRST系统的多目标跟踪, 并对仿真结果进行了分析。

**关键词** 多目标跟踪, 跟踪门, 测量误差。

## DESIGN OF TRACKING GATE IN INFRARED SEARCH AND TRACK SYSTEMS\*

HU Lei-Li<sup>1)</sup> CHEN Yu-Qing<sup>1)</sup> ZOU Sheng-Huai<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

<sup>2)</sup>613th Research Institute of AVIC, Luoyang, Henan 471009, China)

**Abstract** The sources of the prediction error were analyzed; and the distribution and the propagation of the error were considered. The measurement error of the target and the velocity error of the ownship were calculated. The error caused by target maneuvering was considered. Then how to obtain the tracking gate of the minimum volume was discussed. The relation between the scanning method of the system and the tracking gate was also analyzed. After the state equation and measurement equation were formed, a conventional Kalman filter was used for multi-target tracking. And the result illustrates that the design of tracking gate is better than before.

**Key words** multiple target tracking, tracking gate, measurement error.

### 引言

近年来,多目标跟踪问题受到了越来越广泛的关注。对于机载红外搜索跟踪系统而言,在对视场进行扫描过程中,红外探测信号经转换而产生一帧图像,经预处理并使用目标判据,确定出多个目标点,对于多目标跟踪,必须对图像中的目标点与预测轨迹进行配对,并对每个目标进行下一帧的轨迹预测,跟踪门的设计作为解决多目标跟踪问题的前提和基础,直接影响了各目标轨迹的预测估计的准确度,并有助于在数据并联过程中确定最合理的观测/轨迹配对<sup>[1,2]</sup>。目前,由于矩形跟踪门和椭球形跟踪门的

普遍应用,以及数据关联算法的不断发展完善,有关跟踪门设计的研究相对较少,而在很多情形下,矩形跟踪门和椭球形跟踪门的效果不是很好。

本文着重从误差分析的角度研究跟踪门的设计方法,分析了多目标跟踪过程中预测误差的来源及其分布和传递关系,其中考虑在坐标转换过程中目标测量误差和本机位置计算误差起偏,建立起误差的统计模型,并根据目标的机动特性建立起相应的机动加速度模型,并讨论了如何在保证正确判定概率  $P_{CD}$  条件下选取尽可能小的跟踪门体积;或构造出最佳形状的跟踪门,使目标的误差尽可能地处于在跟踪门范围之内,本文给出了类水滴形的跟踪门,

\* 国家九五重点预研基金(编号: 39. 3. 3)资助项目  
稿件收到日期 2000-03-20, 修改稿收到日期 2000-06-04

\* The project supported by the National "9. 5" Key Preliminary Research Foundation of China (No. 39. 3. 3)  
Received 2000-03-20, revised 2000-06-04

并把它与普通的椭球形跟踪门进行了比较,还说明了系统扫描方式对跟踪门设计的影响,并建立了目标的状态方程和测量方程,运用标准 Kalman 滤波,实现机载IRST系统的多目标跟踪,仿真结果证明了在高分辨率、低扫描频率的情况下,采用类水滴形跟踪门对改善目标跟踪起到了积极的作用。

## 1 跟踪门设计依据

首先给出正确判定概率  $P_{CD}^{[3]}$  的定义:

$$P_{CD} = P_D P_{CC/D} + (1 - P_D) P_{NE}, \quad (1)$$

式(1)中,  $P_D$  为目标探测概率;  $P_{CC/D}$  为探测到目标后,能够进行正确相关的概率;  $P_{NE}$  为目标未探测到情况下,跟踪门无相关的概率,  $P_D$  和  $P_{NE}$  可以根据系统分析确定,我们主要关心的是目标估计值落在跟踪门内的概率,首先分析多目标跟踪过程中预测误差的来源及其分布,误差来源主要包括测量误差和目标自身的机动造成的误差,

### 1.1 测量误差

对于机载红外搜索跟踪系统以及大多数探测系统,其目标实际测量向量  $Y_p$  是由当前时刻本机在球面坐标系下测得的俯仰角  $\theta$  和方位角  $\beta$ , 以及距离测量值  $r$  构成的,即  $Y_p = [r \ \theta \ \beta]^T$ 。为了得到线性的测量方程,一种简单而有效的方法是将目标测量值转换到直角坐标系上,由于本机也在运动,所以还要将本机的运动方程考虑进去。本文认为本机在采样时间间隔中作匀速运动,其速度向量  $v_p = [v \ \theta \ \beta]^T$ 。当然实际上对本机的运动并没有任何限制,只要知道本机在每一时刻的运动姿态和各种参数,本机在采样时间间隔中位置的移动量总是容易获得的,以本机在初始时刻的观测器直角坐标系  $OXYZ$  为参考坐标系,使用转换后目标的  $x, y$  和  $z$  坐标为测量向量的三个分量,即  $Y = [x \ y \ z]^T$ 。在这一坐标系下,选取  $(x \ y \ z > \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z})^T$  作为目标的状态向量,可以方便地建立起线性的状态方程。与测量方程联立,就可以通过标准 Kalman 滤波和预测来估计每个目标的位置、速度和加速度。

要注意的是,由于测量向量  $Y_p$  和本机的速度向量  $v_p$  的计算是在球面系下完成的,而零均值误差在转换到直角坐标系下会起偏,所以要对转换后测量向量误差和本机的速度向量误差的统计特性进行分析,求出由于坐标变换产生的起偏值,即测量向量误差  $\Delta Y$  和本机速度向量误差  $\Delta v$  的均值  $E\{\Delta Y\}$  和  $E\{\Delta v\}$ 。这样对  $Y_p$  和  $v_p$  进行校正后可得到  $Y^{[4]}$ :

$$\begin{aligned} Y &= \text{Transfer}(Y_p) + \text{Transfer}(T v_p) \\ &\quad - E\{\Delta Y\} - TE\{\Delta v\} \\ &= \begin{bmatrix} r \cos \theta \cos \beta + T v \cos \theta \cos \beta \\ r \cos \theta \sin \beta + T v \cos \theta \sin \beta \\ r \sin \theta + T v \sin \theta \end{bmatrix} - \\ &\quad E\{\Delta Y\} - TE\{\Delta v\}, \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,  $T$  为采样时间:

$$\begin{aligned} E\{\Delta Y\} &= - \begin{bmatrix} r \cos \theta \cos \beta \left[ \exp\left(-\frac{\sigma_{\Delta\theta}^2 + \sigma_{\Delta\beta}^2}{2}\right) - \exp\left(-\sigma_{\Delta\theta}^2 - \sigma_{\Delta\beta}^2\right) \right] \\ r \cos \theta \sin \beta \left[ \exp\left(-\frac{\sigma_{\Delta\theta}^2 + \sigma_{\Delta\beta}^2}{2}\right) - \exp\left(-\sigma_{\Delta\theta}^2 - \sigma_{\Delta\beta}^2\right) \right] \\ r \sin \theta \left[ \exp\left(-\frac{\sigma_{\Delta\theta}^2}{2}\right) - \exp\left(-\sigma_{\Delta\theta}^2\right) \right] \end{bmatrix}; \\ E\{\Delta v\} &= - \begin{bmatrix} v \cos \theta \cos \beta \left[ \exp\left(-\frac{\sigma_{\Delta\theta}^2 + \sigma_{\Delta\beta}^2}{2}\right) - \exp\left(-\sigma_{\Delta\theta}^2 - \sigma_{\Delta\beta}^2\right) \right] \\ v \cos \theta \sin \beta \left[ \exp\left(-\frac{\sigma_{\Delta\theta}^2 + \sigma_{\Delta\beta}^2}{2}\right) - \exp\left(-\sigma_{\Delta\theta}^2 - \sigma_{\Delta\beta}^2\right) \right] \\ v \sin \theta \left[ \exp\left(-\frac{\sigma_{\Delta\theta}^2}{2}\right) - \exp\left(-\sigma_{\Delta\theta}^2\right) \right] \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中,  $\sigma_{\Delta\theta}$  和  $\sigma_{\Delta\beta}$  为机载红外搜索跟踪系统的俯仰、方位测量的标准偏差,  $\sigma_{\Delta v}$ 、 $\sigma_{\Delta\beta}$  为本机速度的俯仰、方位测量的标准偏差。

式(2)中  $E\{\Delta Y\}$  的推导是基于机载红外搜索跟踪系统的实际测量向量  $Y_p$  的各个分量相互独立,并可以进一步假设  $Y_p$  各个分量的误差均服从零均值截断正态分布,根据其联合概率密度函数  $f_{\Delta R, \Delta\theta, \Delta\beta}$  ( $\Delta r, \Delta\theta, \Delta\beta$ ), 并经过简化,可推导出  $\Delta Y$  各个分量的边缘概率密度函数<sup>[4]</sup>。同理,还可以得到  $\Delta v$  各个分量的边缘概率密度函数为:

$$\begin{aligned} f_{\Delta x}(\Delta x) &= \int_{-M_{\Delta\theta}^{\sigma_{\Delta\theta}}}^{M_{\Delta\theta}^{\sigma_{\Delta\theta}}} \int_{-M_{\Delta\beta}^{\sigma_{\Delta\beta}}}^{M_{\Delta\beta}^{\sigma_{\Delta\beta}}} f_{\Delta R, \Delta\theta, \Delta\beta}(\Delta r, \Delta\theta, \Delta\beta) \\ &\quad \frac{d(\Delta\theta)d(\Delta\beta)}{|\cos(\theta + \Delta\theta)\cos(\beta + \Delta\beta)|} \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} f_{\Delta y}(\Delta y) &= \int_{-M_{\Delta\theta}^{\sigma_{\Delta\theta}}}^{M_{\Delta\theta}^{\sigma_{\Delta\theta}}} \int_{-M_{\Delta\beta}^{\sigma_{\Delta\beta}}}^{M_{\Delta\beta}^{\sigma_{\Delta\beta}}} f_{\Delta R, \Delta\theta, \Delta\beta}(\Delta r, \Delta\theta, \Delta\beta) \\ &\quad \frac{d(\Delta\theta)d(\Delta\beta)}{|\cos(\theta + \Delta\theta)\sin(\beta + \Delta\beta)|} \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} f_{\Delta z}(\Delta z) &= \int_{-M_{\Delta\theta}^{\sigma_{\Delta\theta}}}^{M_{\Delta\theta}^{\sigma_{\Delta\theta}}} \int_{-M_{\Delta\beta}^{\sigma_{\Delta\beta}}}^{M_{\Delta\beta}^{\sigma_{\Delta\beta}}} f_{\Delta R, \Delta\theta}(\Delta r, \Delta\theta) \\ &\quad \frac{d(\Delta\theta)}{|\sin(\theta + \Delta\theta)|} \end{aligned} \quad (3c)$$

$$f_{\Delta x_i}(\Delta x_i) = \int_{-M_{\Delta\theta_i}^{\sigma_{\Delta\theta_i}}}^{M_{\Delta\theta_i}^{\sigma_{\Delta\theta_i}}} \int_{-M_{\Delta\beta_i}^{\sigma_{\Delta\beta_i}}}^{M_{\Delta\beta_i}^{\sigma_{\Delta\beta_i}}} \frac{f_{\Delta\nu, \Delta\theta_i, \Delta\beta_i}(\Delta\nu, \Delta\theta_i, \Delta\beta_i)}{|\cos(\theta_i + \Delta\theta_i)\cos(\beta_i + \Delta\beta_i)|} d(\Delta\theta_i)d(\Delta\beta_i) \quad (3d)$$

$$f_{\Delta y_i}(\Delta y_i) = \int_{-M_{\Delta\theta_i}^{\sigma_{\Delta\theta_i}}}^{M_{\Delta\theta_i}^{\sigma_{\Delta\theta_i}}} \int_{-M_{\Delta\beta_i}^{\sigma_{\Delta\beta_i}}}^{M_{\Delta\beta_i}^{\sigma_{\Delta\beta_i}}} \frac{f_{\Delta\nu, \Delta\theta_i, \Delta\beta_i}(\Delta\nu, \Delta\theta_i, \Delta\beta_i)}{|\cos(\theta_i + \Delta\theta_i)\sin(\beta_i + \Delta\beta_i)|} d(\Delta\theta_i)d(\Delta\beta_i) \quad (3e)$$

$$f_{\Delta z_i}(\Delta z_i) = \int_{-M_{\Delta\theta_i}^{\sigma_{\Delta\theta_i}}}^{M_{\Delta\theta_i}^{\sigma_{\Delta\theta_i}}} \int_{-M_{\Delta\beta_i}^{\sigma_{\Delta\beta_i}}}^{M_{\Delta\beta_i}^{\sigma_{\Delta\beta_i}}} \frac{f_{\Delta\nu, \Delta\theta_i, \Delta\beta_i}(\Delta\nu, \Delta\theta_i, \Delta\beta_i)}{|\sin(\theta_i + \Delta\theta_i)|} d(\Delta\theta_i) \quad (3f)$$

其中,  $M_{\Delta\theta}$ 、 $M_{\Delta\beta}$ 、 $M_{\Delta\nu}$  和  $M_{\Delta\beta}$  为截断误差限。由此可见,  $\Delta y_i$  个分量的边缘概率密度函数与目标实际测量的误差分布和目标当前所在的位置有关;  $\Delta\nu$  各个分量的边缘概率密度函数与获取到的本机速度的误差分布和本机当前的速度有关。

### 1.2 目标机动造成的误差

用的目标坐标系  $O_T X_T Y_T Z_T$  与参考坐标系  $OXYZ$  的关系如图 1 所示。

实际中, 只需考虑每一时刻机动的发生概率, 即机动加速度当前概率密度, 而这一概率密度函数将对应于目标当前加速度的变化。目标机动时, 机动加速度的当前概率密度为修正瑞利密度<sup>[5]</sup>; 当前目标无机动, 即机动加速度为 0 时, 机动加速度概率密度用正态模型。如式(4)和式(5)为目标法向加速度和

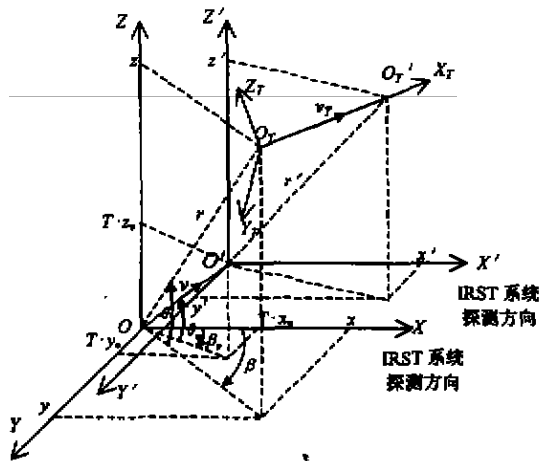


图 1 参考直角坐标系 OXYZ 和目标坐标系  $O_T X_T Y_T Z_T$  示意图

Fig.1 Schematic diagram of the reference Cartesian coordinates OXYZ and the target Cartesian coordinates  $O_T X_T Y_T Z_T$

切向加速度的概率密度  $P_a(a_n)$  和  $P_a(a_t)$ :

$$P_a(a_n) = \begin{cases} \frac{a_{n,\max} - a_n}{\mu_n^2} \exp\left[-\frac{(a_{n,\max} - a_n)^2}{2\mu_n^2}\right], & a_{n,\delta} \leq a_n < a_{n,\max} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a_n}} \exp\left[-\frac{a_n^2}{2\sigma_{a_n}^2}\right], & 0 \leq a_n < a_{n,\delta} \end{cases} \quad (4)$$

$$P_a(a_t) = \begin{cases} \frac{a_{t,\max} - a_t}{\mu_t^2} \exp\left[-\frac{(a_{t,\max} - a_t)^2}{2\mu_t^2}\right], & a_{t,\delta} \leq a_t < a_{t,\max} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a_t}} \exp\left[-\frac{a_t^2}{2\sigma_{a_t}^2}\right], & -a_{t,\delta} \leq a_t < a_{t,\delta} \\ \frac{a_t - a_{t,-\max}}{\mu_t^2} \exp\left[-\frac{(a_t - a_{t,-\max})^2}{2\mu_t^2}\right], & a_{t,-\max} \leq a_t < a_{t,\delta} \end{cases} \quad (5)$$

其中  $a_{n,\max}$  和  $a_{t,\max} > 0$  为目标法向加速度和切向加速度的正上限;  $a_{t,\max} < 0$  为目标切向加速度负上限;  $a_{n,\delta}$  和  $a_{t,\delta} > 0$  为目标法向加速度和切向加速度零附近的领域门限。  $\mu_n$ 、 $\mu_t$ 、 $\sigma_{a_n}$  和  $\sigma_{a_t} > 0$  为常数。

方向角  $\theta_a$  为目标法向加速度与  $O_T Z_T$  轴的夹角, 可按  $(\bar{\theta}_a - \pi, \bar{\theta}_a + \pi)$  上的均匀分布处理, 其中,  $\bar{\theta}_a$  为加速度的方向角的当前瞬间的值。

式(6)为目标加速度在目标坐标系  $O_T X_T Y_T Z_T$  下的 3 个分量:

$$\begin{cases} a_x = a_n \\ a_y = a_n \sin(\theta_a) \\ a_z = a_n \cos(\theta_a) \end{cases} \quad (6)$$

机动加速度造成的误差即为考虑常加速度(CA)模型处理跟踪问题时, 由机动加速度所造成的目标位置误差。

## 2 跟踪门的确定

根据测量误差和目标机动造成的误差分布, 可得总误差分布。目标机载 IRST 系统的红外探测器的分辨率达到  $3'$ , 其扫描机构在其方位和俯仰上的控制精度为  $9'$ , 加上其它因素的影响, 总的测量误差  $< 15'$ ; 视场扫描一次的时间为 5s。按此技术条件计算, 按照 0.95 的正确判决概率对误差的分布求包容线, 并根据形状将其优化成类水滴形跟踪门<sup>[6]</sup>, 得到此跟踪门在目标坐标系  $O_T X_T Y_T Z_T$  下的方程:

$$a_1(y+z)^2 - b_1 \leq x \leq a_2(y+z)^2 + b_2, \quad (7)$$

式(7)中,  $a_1, a_2, b_1, b_2 > 0$ . 跟踪门对  $X_T$  轴旋转对称.

做 10 万次的误差模拟试验, 得到总误差分布云如图 2(a)所示, 可以看出误差分布很好地位于式(7)所确定的类水滴形跟踪门之内. 同时, 对于另外 3 种常见条件也进行了同样的试验, 其总误差分布云见图 2(b)、2(c)和 2(d), 其具体条件标注于图中, 图中实线表示包容面在  $O_T X_T Y_T$  截面上的曲线.

由图可见, 当测量误差较大、扫描频率较高时, 误差分布趋于椭球形, 这种情形下, 采用普通的椭球形跟踪门较为合适.

### 3 系统扫描方式对跟踪门设计的影响

典型的机载红外搜索跟踪系统采用大场和小场两种扫描方式, 如图 3(a)和图 3(b)所示. 在大场扫描中,IRST 系统从起始点 1 按四行扫描线进行扫描, 图 4(a)为方位角  $\beta$  和俯仰角  $\theta$  的变化曲线, 扫

描一周的时间为 5s; 在小场扫描中, 红外搜索跟踪系统从起始点 1 按两行扫描线进行扫描, 图 4(b)为方位角  $\beta$  和俯仰角  $\theta$  的变化曲线. 扫描一周的时间为 1s.

假定多个目标均在当前视场中运动, 那么不同的扫描方式下, 跟踪门的设计有所不同. 小场扫描频率高可采用椭圆形跟踪门; 大场扫描频率低, 宜采用类水滴形跟踪门.

扫描的行进路线也会对目标的跟踪产生影响. 这是因为扫描到目标的时间和应用 Kalman 滤波预测的时间存在误差, Kalman 滤波预测中使用的时是以扫描周期为最小刻度的. 如本例中大场扫描周期 5s, 而目标指示却可能产生于 5s 周期中的任一时刻. 要消除这一误差, 可用准实时目标指示方法, 同时在算法上采用变步长的 Kalman 滤波和预测.

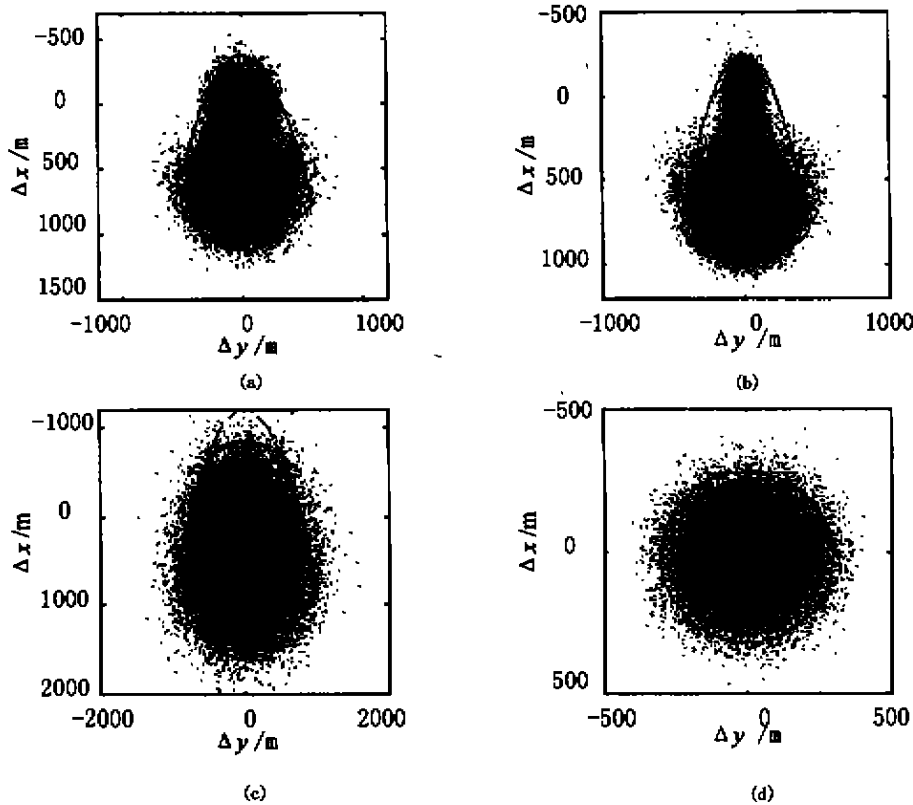


图 2 不同条件下总误差分布云和等高线

- (a) 测量误差为 15', 扫描频率为 1/5Hz, 跟踪门体积为  $7.9262 \times 10^6 \text{m}^3$
- (b) 测量误差为 9', 扫描频率为 1/5Hz, 跟踪门体积为  $3.9761 \times 10^6 \text{m}^3$
- (c) 测量误差为 45', 扫描频率为 1/5Hz, 跟踪门体积为  $4.3982 \times 10^6 \text{m}^3$
- (d) 测量误差为 15', 扫描频率为 1Hz, 跟踪门体积为  $1.1310 \times 10^6 \text{m}^3$

Fig. 2 The distribution cloud and the contour line of the total error under different conditions  
 (a) measurement error 15', scanning frequency 1/5Hz, volume of the tracking gate  $7.9262 \times 10^6 \text{m}^3$   
 (b) measurement error 9', scanning frequency 1/5Hz, volume of the tracking gate  $3.9761 \times 10^6 \text{m}^3$   
 (c) measurement error 45', scanning frequency 1/5Hz, volume of the tracking gate  $4.3982 \times 10^6 \text{m}^3$   
 (d) measurement error 15', scanning frequency 1Hz, volume of the tracking gate  $1.1310 \times 10^6 \text{m}^3$

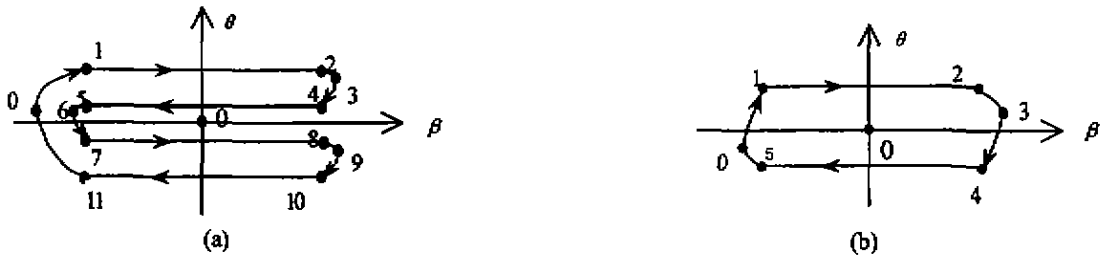


图 3 扫描行进路线图  
(a) 大场扫描 (b) 小场扫描

Fig. 3 Scanning routes  
(a) in the large field (b) in the small field

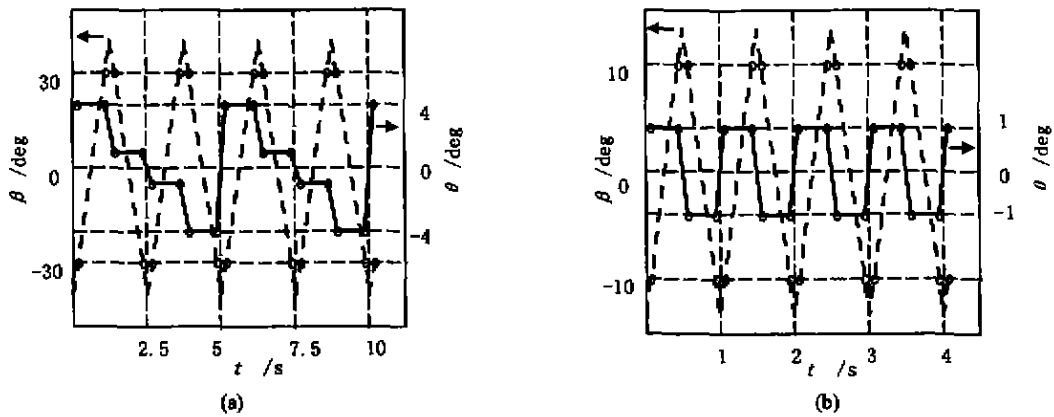


图 4 方位角  $\beta$  和俯仰角  $\theta$  的变化曲线  
(a) 大场扫描 (b) 小场扫描

Fig. 4 Scanning curves of the azimuth angle  $\beta$  and elevation angle  $\theta$   
(a) in the large field (b) in the small field

### 4 仿真结果

进行 Monte Carlo 仿真试验,对 10 个模拟的机动目标进行跟踪,方位、俯仰角测量误差为  $15'$ ,采样时间为  $5s$ ;同时采用同体积的椭球跟踪门和类水滴形跟踪门,次数为 200 次。

选用参考直角坐标系  $OXYZ$ ,选取 6 分量状态向量  $X = (x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z})^T$ ,建立目标状态方程和测量方程(见式(8)),并按式(9)建立 Kalman 滤波与预测方程。

$$\begin{cases} X_{k+1} = \Phi X_k + \tau \xi_k \\ Y_k = H X_k + \epsilon_k \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tilde{P}_{k+1} = \Phi P_k \Phi^T + \tau Q_k \tau^T, \\ K_{k+1} = \tilde{P}_{k+1} H^T (H \tilde{P}_{k+1} H^T + R_{k+1})^{-1}, \\ P_{k+1} = (I - K_{k+1} H) \tilde{P}_{k+1}, \\ \hat{X}_{k+1} = \Phi \hat{X}_k + K_{k+1} (Y_{k+1} - H \Phi \hat{X}_k). \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{其中,状态转移矩阵 } \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{输入矩阵 } \tau = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \text{状态随机干扰向量 } \xi_k =$$

$(\xi_x \ \xi_y \ \xi_z)^T$ ,其 3 个分量均认为是高斯白噪声,其协方差矩阵为  $Q_k$ ,测量向量  $Y$  按式(2)代入,测量矩阵

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 为定常阵.}$$

$\epsilon_k$  为测量干扰向量,其协方差矩阵  $R_k$  可由式(2)和式(3)计算得到。

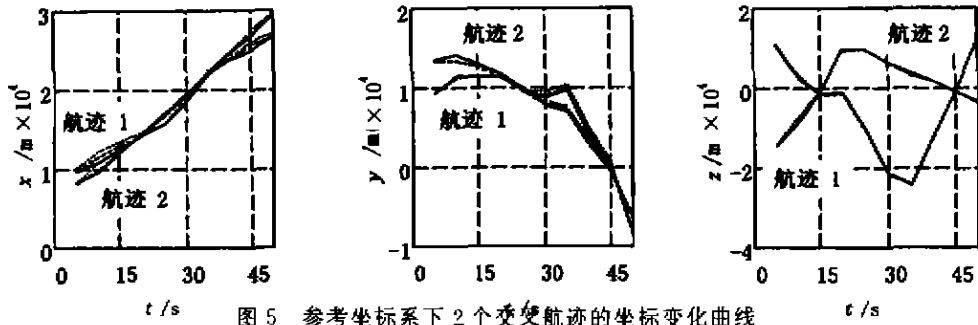


图5 参考坐标系下2个交叉航迹的坐标变化曲线

--- 目标的真实轨迹 ..... 目标的测量轨迹 —— 目标的预测轨迹

Fig. 5 Position curves of track1 and track2

--- real track ..... measured track —— predicted track

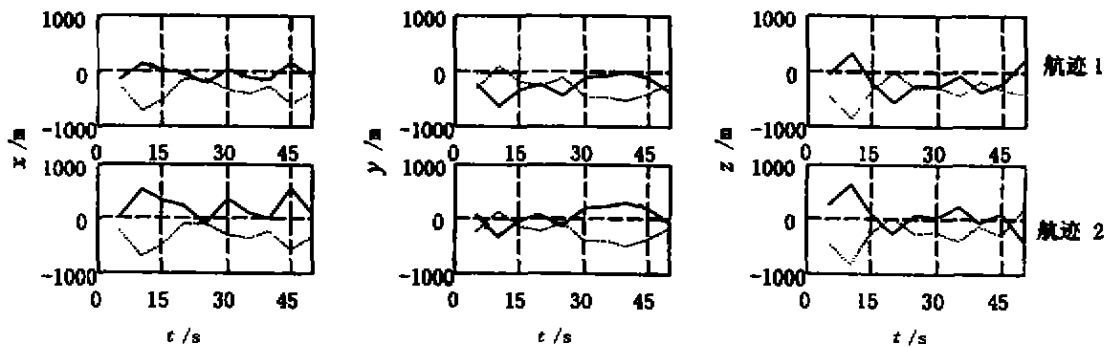


图6 航迹1和航迹2的测量误差和预测误差的曲线

..... 测量误差 —— 预测误差

Fig. 6 Measurement error and prediction error curves of track1 and track2

..... measurement error —— prediction error

图5为作交叉飞行的2个目标的3坐标曲线图,图6为它们的测量误差和预测误差的曲线图。

在200次仿真试验中,用椭球跟踪门出现了3次丢失目标的情形和7次误相关的情形,而使用类水滴形跟踪门,未出现丢失目标或误差等情形。由此可见,在测量误差较小、扫描频率较低条件下,类水滴形跟踪门在性能上优于同体积的椭球跟踪门。

## REFERENCES

- [1] Roy L Streit. Track initiation sensitivity in clutter. *SPIE*, 1998, 2561: 460—461
- [2] Li X R. The PDF of nearest neighbor measurement and a probabilistic nearest neighbor filter for tracking in clutter. *Proc. IEEE Conference on Decision and Control*, San Antonio, Texas, December, 1993: 918-920
- [3] Samuel S Blackman. *Multiple Target Tracking with Radar Applications*. Dedham: Artech House, 1986: 86-87
- [4] HU Lei-Li, CHEN Yu-Qing, ZOU Sheng-Huai, et al. Design of associated region in multiple target tracking. *Opto-Electronic Engineering* (胡磊力, 陈钰清, 邹盛怀等. 多目标跟踪问题中关联区域的设计方法, 光电工程), 2000, 27(1): 6-12
- [5] ZHOU Hong-Ren, JING Zhong-Liang, WANG Pei-De. *Tracking of Maneuvering Targets*. Beijing: National Defence Publishing House (周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪. 北京: 国防工业出版社), 1991: 178-181
- [6] HU Lei-Li, CHEN Yu-Qing, ZHOU Hai-Xian, et al. Multiple target tracking using quasi-drip-shaped gating. *SPIE*, 2000, 4048—4065