

# 基于改进 UKF 的转弯机动目标跟踪算法研究

李盈萱<sup>1</sup>, 王中训<sup>1</sup>, 董云龙<sup>2</sup>

(1. 烟台大学 物理与电子信息学院, 山东 烟台 264005; 2. 海军航空大学信息融合研究所, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对转弯率未知或变化条件下的精确跟踪问题开展研究, 给出了基于 UKF 的自适应协同转弯跟踪算法, 该算法充分利用了扩维技术和自适应渐消因子技术, 不断实时估计转弯率, 同时基于渐消因子调节过程噪声及其对应的增益, 并对不敏卡尔曼滤波算法的采样范围进行自适应调节, 使采样点更接近目标真实状态。仿真表明该算法在转弯率变化时获得了较好的跟踪性能, 有效提升了对于转弯机动目标跟踪的准确性和稳定性。

**关键词:** 机动目标跟踪; 不敏卡尔曼滤波; 自适应转弯模型; 自适应渐消因子; 采样范围

中图分类号: TN953

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223084

中文引用格式: 李盈萱, 王中训, 董云龙. 基于改进 UKF 的转弯机动目标跟踪算法研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(9): 27-31.

英文引用格式: Li Yingxuan, Wang Zhongxun, Dong Yunlong. Research on turning maneuvering target tracking algorithm based on improved UKF[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(9): 27-31.

## Research on turning maneuvering target tracking algorithm based on improved UKF

Li Yingxuan<sup>1</sup>, Wang Zhongxun<sup>1</sup>, Dong Yunlong<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Information Fusion Institute, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** This paper studies the accurate tracking problem under the condition of unknown or changing turning rate, an adaptive coordinated turning tracking algorithm based on UKF is proposed. The algorithm makes full use of the dimensionality extension technology and the adaptive fading factor technology, continuously estimates the turning rate in real time and adjusts the process noise and its corresponding gain based on the fading factor. At the same time, adaptively adjusts the sampling range of the unscented Kalman filter algorithm to make the sampling points closer to the real state of the target. Simulation results show that the algorithm achieves good tracking performance when the turning rate changes, and effectively improves the accuracy and stability of tracking maneuvering target.

**Key words:** maneuvering target tracking; unscented Kalman filter; adaptive-turning model; adaptive fading factor; sampling range

### 0 引言

机动目标跟踪广泛应用于军用及民用领域, 且一直是目标跟踪领域研究的重点和难点<sup>[1]</sup>, 其核心在于建立与目标实际运动状态匹配的系统模型和选择合适滤波算法<sup>[2-3]</sup>。

在目标的各种运动中, 转弯运动是一种常见的运动形式, 对做转弯运动的目标进行跟踪时, 如果跟踪模型中设置的转弯率与实际情况不符, 会产生较大的估计误差<sup>[4]</sup>, 而实际上, 目标运动的转弯率多数情况下都是未知的。因此, 人们在固定转弯率的协同转弯(Coordinated Turning, CT)模型基础上进行了各种改进, 以提高跟踪转弯运动目标的准确性和稳定性。主要有两种改进方法<sup>[5]</sup>, 一是对多个转弯率建立相应的跟踪模型<sup>[6]</sup>, 构建交互式多模型, 二是通过实时计算实现转弯率自适应调节<sup>[7-10]</sup>。

除了要建立合适的系统模型, 滤波算法的选择也十分重要。自 20 世纪 60 年代卡尔曼滤波理论提出至今, 针对不同问题的各种滤波算法层出不穷。扩展卡尔曼滤波(Expanded Kalman Filter, EKF)算法<sup>[11-12]</sup>、不敏卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)算法<sup>[13]</sup>、粒子滤波(Particle Filter, PF)算法是几种常用的非线性滤波算法。

文献[14]在 UKF 中引入自适应估计原理, 调节状态预测和量测信息的权值比重, 降低异常对滤波造成的影响。文献[15]结合强跟踪正交性原理提出一种强跟踪 UKF 滤波算法, 改进渐消矩阵的求解方法, 解决 UKF 与紧耦合模型不匹配的问题。文献[16]采用 UKF 对神经网络进行训练, 并研究了基于 UKF 神经网络的全局信息融合。文献[17]使用 BP 神经网络改进的 UKF 修正滤波误差, 通过最优加权的方法得到系统的全局最优估计值。

UKF 算法不需要对状态方程和量测方程做线性化处理,且滤波精度较高,因而获得更多的关注和更广泛的应用<sup>[18]</sup>。

## 1 基于 UKF 的转弯机动目标跟踪

### 1.1 转弯模型

CT 模型原理图如图 1 所示,假设目标以转弯率  $\omega$  在二维平面内做转弯运动,根据转弯率定义 CT 模型原理图如图 1 所示,假设目标以转弯率  $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$  和式(1)描述的空间运动转换关系,可以得到状态方程式(2):

$$\begin{cases} v_x(t) = v(t) \cos \varphi \\ v_y(t) = v(t) \sin \varphi \end{cases} \quad (1)$$

$$X(k+1) = F(k)X(k) + \Gamma(k)v(k) \quad (2)$$

其中,状态向量表示为  $X = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y}]$ ,  $v$  为过程噪声向量,  $F(k)$  为系统的状态转移矩阵,  $\Gamma(k)$  为过程噪声分布矩阵。

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin \omega T}{\omega} & 0 & -\frac{1 - \cos \omega T}{\omega} \\ 0 & \cos \omega T & 0 & -\sin \omega T \\ 0 & \frac{1 - \cos \omega T}{\omega} & 1 & \frac{\sin \omega T}{\omega} \\ 0 & \sin \omega T & 0 & \cos \omega T \end{bmatrix} \quad (3)$$

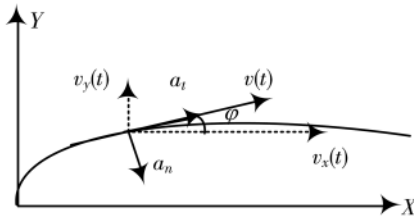


图 1 CT 模型原理图

转弯机动模型的跟踪效果非常依赖于模型中转弯率与目标实际运动转弯率的匹配程度。而在实际的跟踪系统中,转弯率一般是未知的。此时,可将转弯率作为状态变量加入转弯模型中,构造扩维转弯机动模型,利用滤波器对转弯率进行实时计算并更新,状态向量表示为  $X = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ \omega]$ ,对应的状态转移矩阵调整为:

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin \omega T}{\omega} & 0 & -\frac{1 - \cos \omega T}{\omega} & 0 \\ 0 & \cos \omega T & 0 & -\sin \omega T & 0 \\ 0 & \frac{1 - \cos \omega T}{\omega} & 1 & \frac{\sin \omega T}{\omega} & 0 \\ 0 & \sin \omega T & 0 & \cos \omega T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

目标转弯率与其他各状态变量之间是一种非线性关系,所以滤波时应采用能够处理非线性模型的滤波算法,本文采用不敏卡尔曼滤波进行跟踪。

### 1.2 UKF 算法

不敏卡尔曼滤波器的核心是不敏变换,其原理是以前一时刻的估计值为中心,选取一系列对称分布点的采样点,对前一时刻的概率分布规律进行模拟。不敏卡尔曼滤波过程可简述如下:

(1)以前一时刻的状态估计点为中心,通过状态协方差估计向量确定采样范围,计算出  $(2n_x + 1)$  个  $\delta$  采样点  $\xi_i$  并赋予相应的权值  $W_i$ 。其中,  $n_x$  为状态向量维数,  $\bar{X}$  和  $P_x$  表示  $k$  时刻目标状态和协方差估计向量,  $\kappa$  表示尺度参数。

$$\begin{cases} \xi_0 = \bar{X} & i=0 \\ \xi_i = \bar{X} + (\sqrt{(n_x + \kappa)P_x})_i & i=1, \dots, n_x \\ \xi_{i+n_x} = \bar{X} - (\sqrt{(n_x + \kappa)P_x})_i & i=1, \dots, n_x \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} W_0 = \frac{\kappa}{n_x + \kappa} & i=0 \\ W_i = \frac{1}{[2(n_x + \kappa)]} & i=1, \dots, n_x \\ W_{i+n_x} = \frac{1}{[2(n_x + \kappa)]} & i=1, \dots, n_x \end{cases} \quad (6)$$

(2)根据状态方程,得到采样点的一步预测,进而利用采样点的一步预测及对应权值得到状态和状态协方差估计向量,已知  $Q(k)$  为过程噪声协方差,状态方程为  $\xi_i(k+1|k) = f(k, \xi_i(k|k))$ , 则:

$$\hat{X}(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n_x} W_i \xi_i(k+1|k) \quad (7)$$

$$\Delta X_i(k+1|k) = \xi_i(k+1|k) - \hat{X}(k+1|k) \quad (8)$$

$$P(k+1|k) = Q(k) + \sum_{i=0}^{2n_x} W_i \Delta X_i(k+1|k) \Delta X_i^T(k+1|k) \quad (9)$$

(3)根据量测方程和采样点一步预测得到量测和相应协方差及量测和状态向量的交互协方差。已知量测方程  $\zeta_i(k+1|k) = h(k+1, \xi_i(k+1|k))$ , 则:

$$\hat{Z}(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n_x} W_i \zeta_i(k+1|k) \quad (10)$$

$$\Delta Z_i(k+1|k) = \zeta_i(k+1|k) - \hat{Z}(k+1|k) \quad (11)$$

$$P_{zz}(k+1) = R(k+1) + \sum_{i=0}^{2n_x} W_i \Delta Z_i(k+1|k) \Delta Z_i^T(k+1|k) \quad (12)$$

$$P_{zx} = \sum_{i=0}^{2n_x} W_i \Delta X_i(k+1|k) \Delta Z_i^T(k+1|k) \quad (13)$$

(4)对状态向量和协方差进行更新

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)[Z(k+1) - \hat{Z}(k+1|k)] \quad (14)$$

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - K(k+1)S(k+1)K^T(k+1) \quad (15)$$

其中,  $K(k+1) = P_{zx} P_{zz}^{-1}$ 。

## 2 改进的 UKF 算法

通过式(5)可以看出,不敏卡尔曼滤波是以前一时刻的状态估计为中心,在通过状态协方差的估计向量  $P_x$  确

定的范围内选取采样点的,当目标机动状态在较长一段时间内不发生改变或系统达到稳态时, $P_x$ 将趋于极小值,以此确定的采样范围将十分有限,导致下一时刻大部分采样点确定的转弯率十分相近甚至相同,如果目标继续维持先前的运动状态,跟踪滤波可以顺利进行,但如果此时目标发生机动,采样范围将不能及时做出调整,因而无法保证采样点的多样性和准确性,从而使滤波器基本丧失对突变状态的跟踪能力。基于此,本文提出了一种利用滤波新息构造修正因子 $\lambda$ ,对UKF采样范围进行自适应调整的方法。

文献[19]中提出了一种利用新息和新息协方差计算修正因子的简便方法,并用仿真证明了该方法具有良好的抑制发散的能力。本文中修正因子的计算主要借鉴这一方法。

首先利用实际量测和式(10)确定的量测估计值计算新息协方差 $\bar{S}(k+1)$ 。

$$V(k+1)=Z(k+1)-\hat{Z}(k+1|k) \quad (16)$$

$$\bar{S}(k+1)=\begin{cases} \frac{\lambda_k V(k+1)V(k+1)^T}{1+\lambda_k}, & k \geq 1 \\ \frac{1}{2} V(0)V(0)^T, & k=0 \end{cases} \quad (17)$$

然后通过不敏卡尔曼滤波方程计算得到估计量测的估计协方差 $P_z$ :

$$P_z=R(k+1)+\sum_{i=0}^{2n_k} W_i \Delta Z_i(k+1|k) \Delta Z_i^T(k+1|k) \quad (18)$$

则修正因子可以表示为:

$$\lambda=\max\left\{1, \frac{\text{trace}(\bar{S}_{k+1})}{\text{trace}(P_z)}\right\} \quad (19)$$

利用 $\lambda$ 对 $P_x$ 矩阵进行放大,自适应调整采样范围后,选取的采样点可表示为:

$$\begin{cases} \xi_0=\bar{X} & i=0 \\ \xi_i=\bar{X}+(\sqrt{\lambda(n_x+\kappa)P_x})_i & i=1, \dots, n_x \\ \xi_{i+n_x}=\bar{X}-(\sqrt{\lambda(n_x+\kappa)P_x})_i & i=1, \dots, n_x \end{cases} \quad (20)$$

新息 $V$ 越大说明实际量测与量测估计的偏差越大,目标发生机动的可能性越大。此时,在进行不敏变换选取采样点的时候,应扩大采样范围,以覆盖更大的机动范围,提高跟踪的鲁棒性。通过上式计算得到的修正因子 $\lambda$ 在新息变大的同时也同步变大,以它作为系数对采样范围进行自适应放大,既增加了采样点各维度特别是转弯率的多样性,又不会因误差过大而影响跟踪精度,很好地满足了理论要求,并且计算过程简单,计算量小。

### 3 仿真验证

为了验证本文所提方法的有效性和优越性,设计如下仿真环境:雷达测距误差为100 m,测角误差为0.5°。目标运动起点为(12 000 m, 2 000 m)处,运动时间持续200 s,前100 s做转弯率多次突变的转弯机动运动,即假

设目标在一段时间内保持匀速转弯运动,在某几个特定时刻目标转弯率突然发生变化,导致目标机动状态改变,后100 s做转弯率不变的匀速转弯运动。具体机动情况如表1所示。

表1 目标机动参数明细

| 机动时刻/s | t=31 | t=38 | t=49 | t=61 | t=65 | t=66 | t=81 | t=100 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 转弯率/%  | 9    | -4   | 4    | 6    | -6   | -8   | 8    | 10    |

分别采用常规UKF、用固定倍数放大 $P_x$ 矩阵(分别设定放大倍数为1.05、1.1和1.2)的UKF、固定模型集IMM算法(包含转弯率为10°/s、4°/s、-6°/s、-8°/s的四个协同转弯跟踪模型)以及转弯率自适应调节(利用加速度除以线速度计算得到实时转弯率)的IMM算法与本文所提自适应放大矩阵 $P_x$ 的UKF方法对上述机动目标进行跟踪滤波,结果如图2~图5所示。

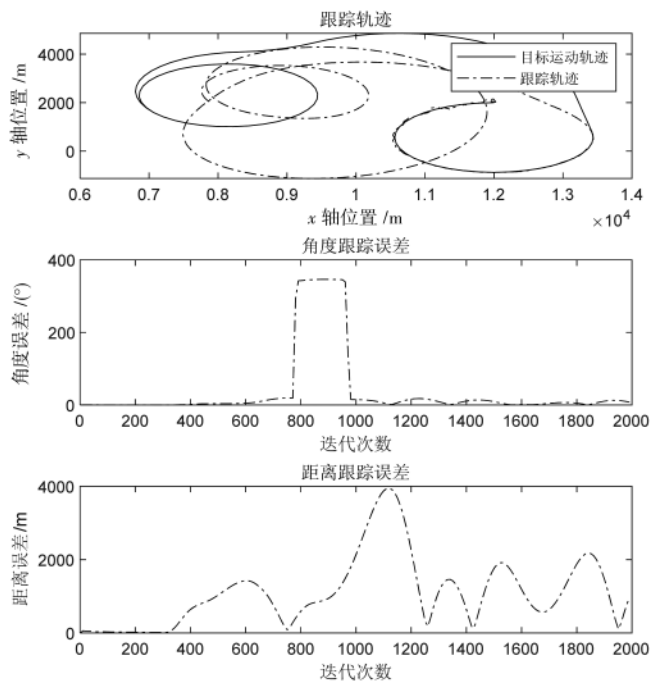


图2 常规UKF跟踪结果

从图2可以看出,利用常规UKF方法对目标进行跟踪,在目标运动起始阶段转弯率稳定不变时,跟踪效果较好,但转弯率发生改变后,跟踪轨迹与目标实际运动轨迹的偏差越来越大,滤波器逐渐失去估计作用,无法对目标进行稳定跟踪。

从图3( $P_x$ 矩阵固定放大1.05倍和自适应放大 $P_x$ 矩阵的UKF对目标的跟踪结果对比)可以看出,相比于常规UKF,两种改进方法的跟踪效果都有了明显改善,均能实现一定精度的跟踪,未出现滤波发散的现象。尤其在目标运动的后半段,即目标进行恒定转弯率的转弯运动时,两种方法的跟踪精度相近,误差小、跟踪效果稳定。但在目标运动的前半段,即转弯率多次发生改变的运动

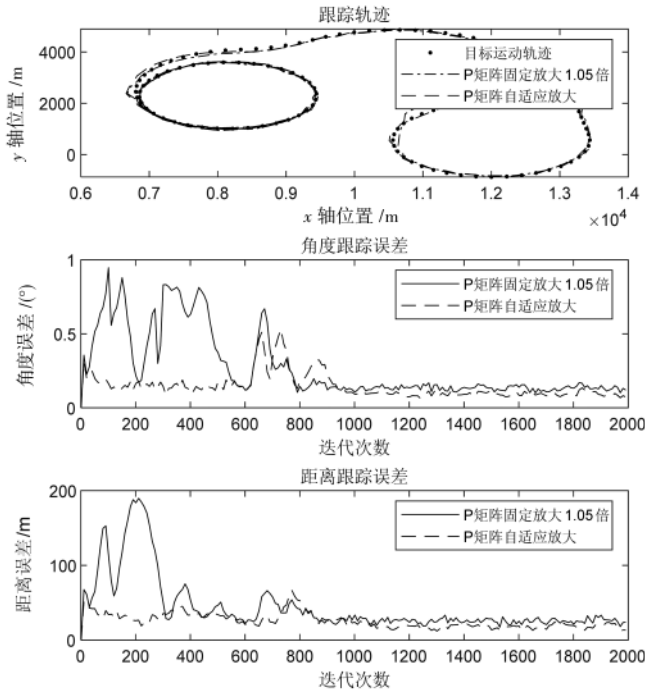


图3  $P_x$  矩阵固定放大 1.05 倍与自适应放大的跟踪效果对比

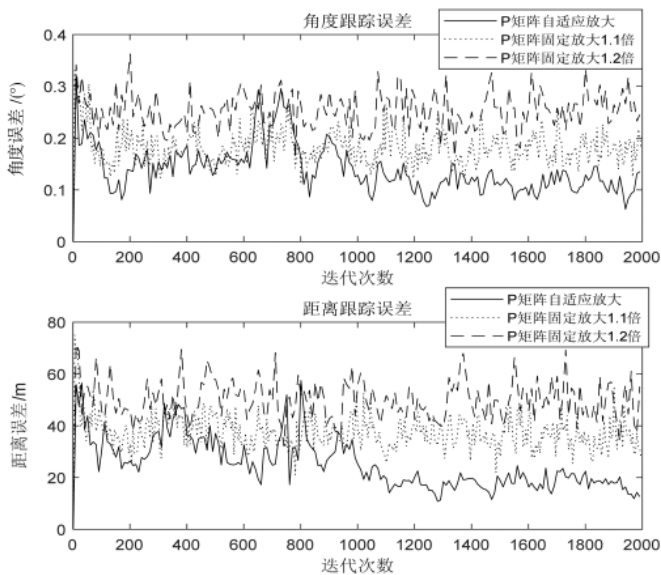


图4  $P_x$  矩阵固定放大 1.1、1.2 倍与自适应放大的跟踪效果对比

阶段,将  $P_x$  矩阵固定放大 1.05 倍的跟踪效果极不稳定,且误差明显大于自适应放大  $P_x$  矩阵的跟踪效果。

从图 4 中  $P_x$  矩阵固定放大 1.1、1.2 倍和自适应放大  $P_x$  矩阵的 UKF 对目标的跟踪结果可以看出,三种方法都能对目标进行有效跟踪,在转弯率多次发生突变的运动阶段,自适应放大  $P_x$  矩阵和以 1.1 作为固定倍数对  $P_x$  矩阵进行放大的方法跟踪效果相近,而在转弯率稳定不变的运动阶段,前者的跟踪效果明显优于后者。而无论是在转弯率多次发生改变的运动阶段还是在转弯率稳定不变的运动阶段,自适应放大  $P_x$  矩阵方法的跟踪效

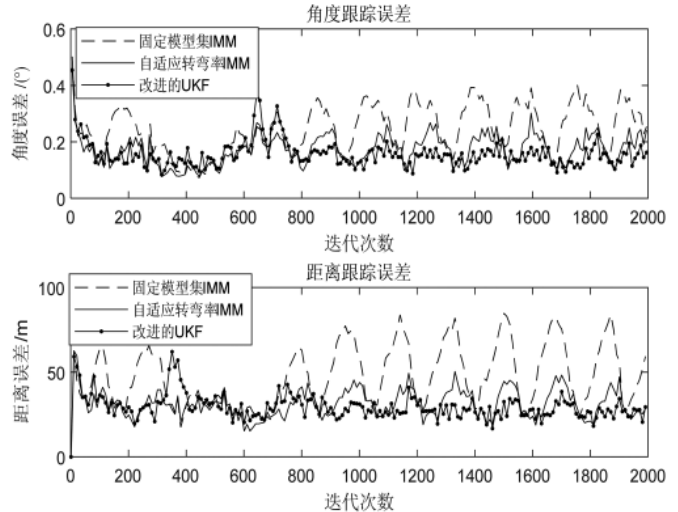


图5  $P_x$  矩阵自适应放大与两种 IMM 算法的跟踪效果对比

果都明显优于以 1.2 作为固定倍数对  $P_x$  矩阵进行放大的方法的跟踪效果。即过多的对采样范围进行放大,使采样点偏离中心值过大,反而降低了算法的跟踪精度,影响了跟踪效果。

通过图 5 中跟踪对比结果可以看出,利用滤波得到的状态信息计算转弯率对 IMM 模型集中模型进行修正,相比于固定模型集 IMM 滤波结果有明显改善,但用本文提出的方法进行跟踪结果更加稳定,且误差值更小。

由图 2~图 5 的跟踪结果可知,对采样范围进行适当放大,可以有效改善常规不敏卡尔曼滤波方法的跟踪性能,但若选取的放大倍数较小,对于机动目标的跟踪效果改善并不明显,选取的放大倍数较大,又会降低对于非机动目标的跟踪精度。因此,难以找到一个能够同时兼顾机动和非机动目标的合适的固定值。本文提出的改进方法,利用新息构造修正因子对采样范围进行自适应地放大,不仅能够很好地改善对于机动目标的跟踪效果,而且不会降低对于非机动目标的跟踪精度。

#### 4 结论

目标机动状态发生突变时,常规 UKF 方法不能及时调整采样范围,导致采样点无法及时准确模拟目标实际状态,最终导致滤波发散。而以某一固定倍数对采样范围进行放大,虽然有一定的改善效果,但难以同时兼顾目标机动和非机动运动情况。本文提出的方法,利用新息构造修正因子对 UKF 算法的采样范围进行自适应的放大,将改进后的 UKF 算法用于转弯机动目标的跟踪,滤波器在先验信息不准确的情况下能够进行自适应调节,保持良好的跟踪结果。

新方法不仅保留了常规 UKF 解决非线性系统状态估计问题的能力,同时改善了由于滤波器本身存在机动响应延迟带来的鲁棒性差的问题。本文算法原理简单、计算量小,跟踪精度较高,理论分析和仿真实验都证明了其具有较强的适用性,可以应用于工程实践。但该算

法虽然能够有效提高非线性系统目标跟踪的精度,但目前只是在高斯噪声的环境下进行处理,若系统是在非高斯的环境下,则可能出现较大误差,笔者将会继续对非高斯的环境下算法的应用进行研究和改进。

#### 参考文献

- [1] 朱洪峰,熊伟,崔亚奇,等.新的自适应转弯模型的IMM算法研究[J].计算机工程与应用,2019,55(17):252-258.
- [2] 何友,修建娟,关欣.雷达数据处理及应用[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [3] ROONIZI A K.An efficient algorithm for maneuvering target tracking(Tips & Tricks)[J].IEEE Signal Processing Magazine, 2021,38(1):122-130.
- [4] 齐立峰,惠小平.转弯机动目标跟踪算法研究[J].现代雷达,2014,36(9):40-43.
- [5] 程遥,吕植勇.基于自适应转弯模型的交互式多模型算法研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2020,44(2):369-372.
- [6] LIU Z X,WU D H,XIE W X,et al.Tracking the turn maneuvering target using the multi-target Bayes filter with an adaptive estimation of turn rate[J].Sensors,2017,17(2):373.
- [7] ZHU H,XIONG W,CUI Y,et al.Research on IMM algorithm of new adaptive turn model[J].Computer Engineering and Applications,2019,55(17):252-258.
- [8] LI X R,JILKOV V P.Survey of maneuvering target tracking. Part I.Dynamic models[J].IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems,2004,39(4):1333-1364.
- [9] 于红娟,牛竹云,张春涛,等.基于变结构多模型的机动目标跟踪算法[J].火力与指挥控制,2012(S1):36-39.
- [10] WANG H,KIRUBARAJAN T.Precision large scale air traffic surveillance using IMM/assignment estimators[J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,1999,35(1):

255-266.

- [11] 彭志刚,李宝鹏,李大龙.基于LMS的多模型高机动目标跟踪方法[J].火力与指挥控制,2020,45(12):111-114,120.
- [12] 宁倩慧,张艳兵,刘莉,等.扩展卡尔曼滤波的目标跟踪优化算法[J].探测与控制学报,2016,38(1):90-94.
- [13] 温镇铭,刘松涛,姜宁.基于改进UKF的蛇形机动目标跟踪方法[J].电光与控制,2020,27(9):9-13,23.
- [14] 马晓杰,林雪原,孙巧妍,等.一种改进的UKF滤波算法在BDS/SINS组合导航系统中的应用研究[J].大地测量与地球动力学,2021,41(4):351-356.
- [15] 符强,赵鸿悦,孙希延,等.改进的强跟踪UKF在组合导航中的应用研究[J].计算机仿真,2021,38(2):29-33.
- [16] 马野,王孝通,戴耀.基于UKF的神经网络自适应全局信息融合方法[J].电子学报,2005,33(10):1914-1916.
- [17] 于耕,方鸿涛.基于BP神经网络改进UKF的组合导航算法[J].电子技术应用,2019,45(4):29-33.
- [18] 赖福天.机动目标跟踪方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2020.
- [19] 刘国情,王悦,袁俊泉,等.基于改进当前统计模型的容积卡尔曼滤波算法[J].空军预警学院学报,2018,32(1):55-60.

(收稿日期:2022-06-14)

#### 作者简介:

李盈萱(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向:高速运动平台机动目标跟踪。

王中训(1965-),男,博士,教授,主要研究方向:信源信道编码。

董云龙(1974-),男,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向:雷达信息处理、多传感器信息融合。



扫码下载电子文档

(上接第26页)

统[M].刘树棠,译.北京:电子工业出版社,2003.

- [6] JESD204B.01,Serial Interface for data converters[S].JEDEC, 2011-07.
- [7] DELOS P.Phase-locked loop noise transfer functions.high frequency electronics[Z].2016.
- [8] 祝毅.室内定位系统L波段射频前端设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015:16-32.
- [9] JESD204 v7.2 LogiCORE IP product guide[Z].Xilinx, 2017-10.
- [10] 杜勇.数字滤波器的MATLAB与FPGA实现[M].北京:电子工业出版社,2019.

- [11] 王森.宽带数字信道化接收机FPGA实现技术研究[D].成都:电子科技大学,2008.

(收稿日期:2022-05-06)

#### 作者简介:

林文成(1984-),通信作者,男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:智能采集处理存储系统,E-mail:linwencheng@cetc.com.cn.

董郑宇(1994-),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:高速模拟信号采集和存储技术。

李琼(1989-),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:高速模拟信号采集和存储技术的控制软件。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所