

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.027

基于改进 SCKF 算法的机车目标跟踪速度误差分析

何宗文¹,张岩²

(1. 西咸新区轨道交通投资建设有限公司,陕西 西安 710016;

2. 新风光电子科技股份有限公司,山东 汶上 272509)

摘要:为实现机车目标的高效跟踪,构建一种可以实现自适应匀加速分析的模型并能够进行波形自主调控的平方根容积卡尔曼滤波跟踪算法。在确定发射波形的过程中,应确保后续时刻达到最低的目标状态估计误差。利用波形捷变的方法可以得到最优波形参数,显著增强系统跟踪机车目标的能力。研究表明:经过波形调控后,本算法可以使目标方位误差减小 89.56%、运动速度误差减小 84.04%,加速度误差减小 59.54%,并使耗时降低不明显;可以实现方位误差以及速度误差的缓慢降低,具备优异鲁棒性;信噪比减小后,表现出更优的性能。与其他各算法相比,本算法能够自适应调节各项参数,获得更高的跟踪精度,所需的计算量也较小。

关键词:机车目标跟踪;速度误差;波形调度;平方根容积卡尔曼滤波

中图分类号:TN953 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)01-0133-04

Speed Error Analysis of Maneuvering Target Tracking Based on Improved SCKF Algorithm

HE Zongwen¹, ZHANG Yan²

(1. Xixian New Area Rail Transit Investment & Construction Co., Ltd., Xi'an 710016, China;

2. Xinfeng Optoelectronic Technology Co., Ltd., Wenshang 272509, China)

Abstract: In order to realize efficient maneuvering target tracking, this paper proposes an adaptive uniform velocity model and a square-root volume kalman filter tracking algorithm with function of autonomous waveform scheduling. In the process of determining transmitting waveform, the subsequent moments are ensured to achieve the minimum targeting status of estimated errors. The waveform agility method is applied to obtain the optimal waveform parameters, which significantly enhances the capability of maneuvering target tracking systematically. The research results show that the proposed algorithm, after waveform scheduling, reduces the errors of target azimuth, speed and acceleration respectively by 89.56%, 84.04% and 59.54%, with no obvious time consumption. The improved algorithm has high quality robustness for the slowdown of azimuth and speed errors, and exhibits better performance for the reduction of signal-to-noise ratio. Comparing with other algorithms, the algorithm can adaptively regulate various parameters for higher tracking accuracy with less computation.

Keywords: maneuvering target tracking; speed error; waveform scheduling; square root volume kalman filtering

0 引言

机动目标跟踪技术就是当目标发生机动时,仍然保证跟踪滤波器能跟上目标运动,输出正确的目标运动轨迹。有效跟踪机车目标已经成为一项重要的研究课题,其具备随机变化以及复杂性很高的特征,引起了众多研究学者的关注。大部分研究内容都是从以下两个方面进行的,包括改善目标模型鲁棒性并提高算法精度。可以利用单模型或者多模型两种方式来构建目标的运动分析模型。当多个模型保持并行工作方式将会显著增

加算法计算量,从而无法保障算法的实时性,制约了实际应用过程。目前形成的单模型算法包括 CS 模型、Jerk 模型等^[1-5]。采用 CS 模型可以对目标机动能力进行更有效的分析,但需要设定先验参数并面临自适应性过低的缺陷。有学者针对上述情况进行了相应处理,可以自适应改变机动加速度方差以及频率参数,但增加状态维度则需要明显增加计算开销^[6-10]。此外,滤波算法也实现了显著发展。可以看到,容积卡尔曼滤波(CKF)所需计算量更低并具备更优的鲁棒性,从而获得了广泛应用^[11-13]。平方根容积卡尔曼滤波

基金项目:陕西科技创新基础开发一般项目(2019A5100263)

第一作者简介:何宗文(1975—),男,陕西西安人,高级工程师,硕士,研究方向为城市轨道交通,ano3173327@163.com。

(SCKF)方法是以 CKF 为基础并结合正交三角分解的方式,再对协方差矩阵平方根实施迭代处理。以上各项处理方法都只是从单一数据处理的层面来达到优化的目的。如果能够综合考虑信号分析和数据处理的过程,便可以全面改善机车目标跟踪效果。有学者采用波形选择模块来实现目标跟踪的功能,通过参数分析的方法建立发射信号模糊函数和量测噪声之间的关系,由此得到发射波形和跟踪滤波的相互关系^[14]。同时,文献[5]探讨了 CKF 与粒子滤波进行波形选择的过程。但上述方法对波形进行确定时,都需要分别对各波形实施寻优分析,需要花费很大的计算量。

根据以上分析可以发现,提升滤波精度、运动目标建模与选择何种发射波形等方面都对机车目标跟踪具有显著影响,这 3 种处理方法相互联系,形成一个统一的整体。本文根据上述各方法的优势,进一步得到了一种可以实现自适应匀加速(CA)分析的模型,并能够进行波形自主调控的 SCKF 跟踪算法,最终实现机车目标的高效跟踪。

1 改进 SCKF 算法

1.1 平方根容积卡尔曼滤波

从本质层面上看,SCKF 属于一类通过求积近似进行分析的高斯滤波方法,是以积分方式来实现对非线性滤波的积分处理。考虑到当前 SCKF 算法的分析较多,其具体过程见文献[14-15]。其具备明显的多激励应用,适用于研究机车目标跟踪。

1.2 波形捷变方式

跟踪目标的过程需对运动速度以及距离进行测试,此时可以对距离与速度二维空间实施波形捷变,具体过程如下:先构建得到由 2 个变量误差组成的克拉美罗下界(CRLB),再通过椭圆误差正交方法来获得最优的波形结构。

1.3 量测误差的 CRLB

在进行实际检测时, k 时形成的发射波形参数对于噪声协方差 R_k 具有明显影响。以 $A(\tau, f_d)$ 来表示发射波形 $s(t)$ 对应的模糊函数,其形式如下:

$$A(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(t - \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{j2\pi f_d t} dt \quad (1)$$

Fisher 信息矩阵为

$$\mathbf{J} = -\eta \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} & \frac{\partial^2 A}{\partial \tau \partial f_d} \\ \frac{\partial^2 A}{\partial f_d \partial \tau} & \frac{\partial^2 A}{\partial f_d^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 η 表示信噪比。 R_k 和 \mathbf{J} 具有以下关系:

$$R_k = T^T \mathbf{J}^{-1} T \quad (3)$$

根据式(3)可知,在 k 时形成的波形参数可以获得对应的 R_k 。并且跟踪目标时, R_k 还跟目标状态估计误差存在密切联系。在确定发射波形的过程中,应确保后续时刻达到最低的目标状态估计误差。将其表示为

$$\boldsymbol{\theta}_{k+1}^* = \text{argmindet}(P_{k+1|k}) \quad (4)$$

式中 $\boldsymbol{\theta}^* = [\tau, f_d]^T$, 表示由发射波形参数构成的矢量。跟踪目标期间,在 k 时形成的波形参数将改变量测噪声协方差从而使目标在 $k+1$ 时的状态估计误差也发生变化。由此可见,利用波形捷变的方法可以得到最优波形参数,显著增强系统跟踪机车目标的能力。

1.4 基于 FFT 的最优波形选择

以 $s_0(t)$ 表示基础发射波形,同时以 $A(\tau, f_d)$ 表示模糊函数,以 \mathbf{R}_0 表示量测噪声的协方差矩阵,利用 $s_0(t)$ 来完成分数阶因子 φ_k 的傅里叶转换过程,由此实现量测误差椭圆和估计误差实现椭圆正交的结构。其中,误差椭圆的建立可以通过下述方法对随机变量协方差进行描述:一个随机变量 $[x, y]$ 对应的协方差矩阵是 $[\sigma_x, \sigma_y]$ 。满足以下等式:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_k & -\sin \varphi_k \\ \sin \varphi_k & \cos \varphi_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

计算出误差椭圆对应的旋转角度 φ_k :

$$\varphi_k = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}\right) \quad (6)$$

当把运动速度与距离参数进一步扩展至角度、距离、速度组成的空间,再通过误差椭圆法进行正交,由此实现在 τ - f_d 平面中完成模糊函数的 φ_k 旋转(考虑到模糊函数并不会受到角度的影响,因此在不同角度下保持恒定),由此得到以下表达式:

$$\mathbf{J}_k = [\mathbf{L}(\varphi_k)]^T \mathbf{J}_0 \mathbf{L}(\varphi_k) \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_k = [\mathbf{L}(\varphi_k)]^T \mathbf{R}_0 \mathbf{L}(\varphi_k) \quad (8)$$

式中: \mathbf{J}_k 与 \mathbf{R}_k 是经过角度旋转形成的 Fisher 信息矩阵; $\mathbf{L}(\varphi_k)$ 为旋转矩阵,将其表示成如下形式:

$$\mathbf{L}(\varphi_k) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_k & -\sin\varphi_k & 0 \\ \sin\varphi_k & \cos\varphi_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

以 $P_{k+1|k}$ 表示 k 时对应的目标状态估计预测误差协方差,发射波形 FrFT 分数阶因子 φ_{k+1} :

$$\varphi_{k+1} = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2\det(\mathbf{P}_{12})}{\det(\mathbf{P}_{11}) - \det(\mathbf{P}_{22})} \right] \quad (10)$$

同时,满足:

$$\mathbf{P}_{11} = \begin{bmatrix} P_{k+1|k}(x, x) & P_{k+1|k}(x, y) \\ P_{k+1|k}(y, x) & P_{k+1|k}(y, y) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_{12} = \begin{bmatrix} P_{k+1|k}(x, x) & P_{k+1|k}(x, y) \\ P_{k+1|k}(y, x) & P_{k+1|k}(y, y) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}_{22} = \begin{bmatrix} P_{k+1|k}(x, x) & P_{k+1|k}(x, y) \\ P_{k+1|k}(y, x) & P_{k+1|k}(y, y) \end{bmatrix}。$$

计算出旋转角 φ_{k+1} 并将其代到式(9)中便可以计算出 $k+1$ 时对应的 R_{k+1} , 由此得到 $k+1$ 时预测误差协方差 $P_{k+2|k+1}$, 通过上述迭代过程可以得到后续时刻对应的最佳发射波形参数。

2 仿真校验

2.1 仿真设置

本文以某实际铁路干线用机车作为研究对象,轨距 1 435 mm,无配重 138 t,加配重后 150 t,机车总效率 ≥ 0.85 ,功率因数 ≥ 0.98 。

改进 SCKF 算法采用 CV 模型,噪声标准差为 0.1,模型转换概率为 0.9。进行 600 次蒙特卡洛实验并取平均值,设定雷达与目标运动轨迹位于同一平面。选用 LDS-50C-C30E 型雷达,其激光波长 (905 ± 15) nm,激光频率 30 kHz,回波强度 0~254,最大功率 2.2 W。采样间隔 1 s,测量范围 300 km。

在跟踪目标过程中,雷达可在距离和速度二维空间进行波形捷变,建立 2 个变量误差的克拉美罗下界,利用椭圆误差正交法实现发射最优波形。图 1 为雷达信号相关特征。单个脉冲宽度为 0.64 ns,带宽为 1.56 GHz。这是一种优良的雷达信号,具有检测不模糊、目标提取能力强等优点。

2.2 结果对比

目标初始位置为 $[100, 100]$ m/s,初始速度为 $[-50, 200]$ m/s, x 方向的加速度由 -10 m/s² 增加到 10 m/s² 之后匀速, y 方向的加速度由 -20 m/s² 增加到 30 m/s² 之后匀速。通过测试得到表 1 所示结果,经对比可知本算法具备比其他各算法更

高的跟踪精度。与 MCS-UKF 算法进行比较可知,经过波形调控之后,本算法可以使目标方位误差减小 89.56%,运动速度误差减小 84.04%,加速度误差减小 59.54%,耗时降低不明显。与其他算法进行比较可知,方位误差、速度误差、加速度误差均发生了明显的降低,耗时变化不大。通过波形调度方法将会引起算法计算量的提高,不过并不会造成实时性的较大改变,同时还可以有效提高跟踪精度。由此可见,可以通过略微增加计算量的方式来提升跟踪精度。

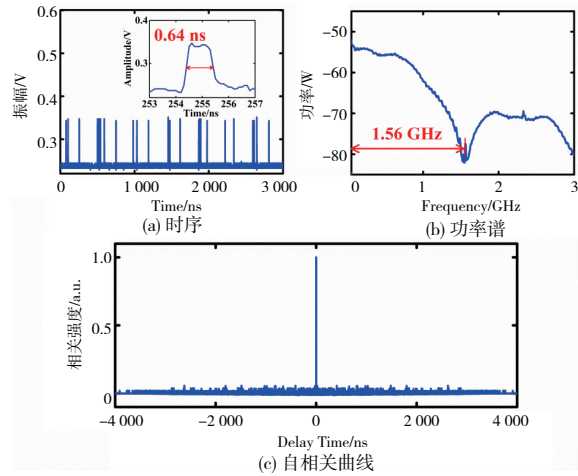


图 1 雷达信号相关特征

表 1 平均估计误差和运行时间对比

算法	平均误差			平均耗时/s
	位置/m	速度/(m/s)	加速度/(m/s ²)	
改进 SCKF (无波形调度)	16.889 3	19.101 3	9.772 3	0.063 3
改进 SCKF (波形调度)	8.901 7	11.892 5	9.017 4	0.070 1
MCS-UKF	115.246 1	74.528 1	22.287 1	0.070 0
IMM-SCKF	83.562 0	51.340 1	15.335 9	0.112 6
CS-SCKF	66.001 2	65.432 0	19.987 2	0.060 7
CA-SCKF	172.101 2	96.345 6	22.302 4	0.049 2

在初始信噪比为 0 的情况下,各信噪比条件下的算法性能见图 2—图 4。通过对比可知,当信噪比减小后,各算法的性能都发生了降低。根据图 1 及图 2 可以发现,本算法可以实现方位误差以及速度误差的缓慢降低,从而具备优异鲁棒性。同时还可以发现,当信噪比减小后,本算法表现出了更优的性能。本算法处于 -20 dB 状态下形成的加速度误差略微高于别的算法,而当信噪比 ≥ -15 dB 时,

本算法表现出更优的性能。同时,进行目标跟踪时,重点是对运动速度与方位坐标参数进行测试,这使得本算法处于信噪比小于-15 dB的情况下并不会因为加速度精度的问题而对整体性能造成明显干扰。

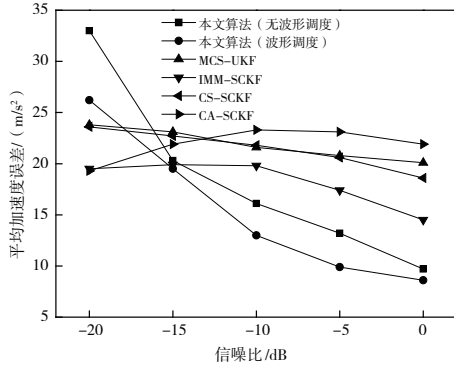


图2 不同信噪比下平均位置误差

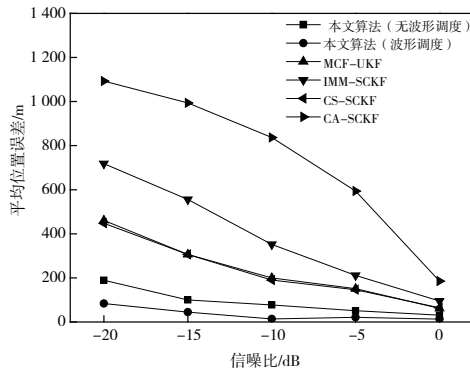


图3 不同信噪比下平均速度误差

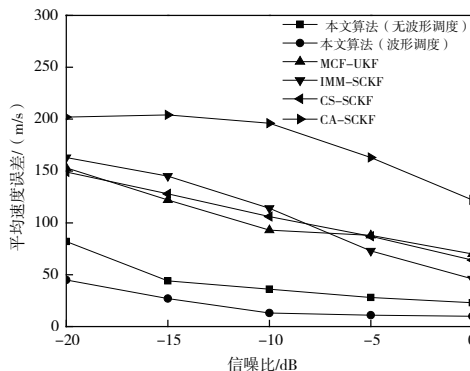


图4 不同信噪比下平均加速度误差

根据上述内容可以发现,与其他各算法相比,本算法能够自适应调节各项参数,从而获得更高的跟踪精度,同时该系统的结构较为简单,所需的计算量也较小。

3 结语

1) 经过波形调控后,本算法可以使目标方位误

差减小 89.56%,运动速度误差减小 84.04%,加速度误差减小 59.54%,耗时降低不明显。通过波形调度方法会引起算法计算量提高,有效提高跟踪精度。

2) 本算法可以实现方位误差以及速度误差的缓慢降低,具备优异鲁棒性。信噪比减小后,本算法表现出了更优的性能。与其他各算法相比,本算法能够自适应调节各项参数,获得更高的跟踪精度,所需的计算量也较小。

参考文献:

- [1] 刘明华,汪传生,胡强,等. 多模型协作的分块目标跟踪[J]. 软件学报,2020,31(2):1-20.
- [2] 王楠,许蕴山,夏海宝,等. 一种相控阵雷达跟踪波束优化控制方法[J]. 导航定位学报,2019,7(1):48-53.
- [3] 曾孟恩,周航,韩丹,等. 粒子滤波目标跟踪算法综述[J]. 计算机工程与应用,2019,55(5):8-17,59.
- [4] 于莉媛,郭云雷,牛萍娟,等. 基于尾灯的夜间前方车辆检测与跟踪方法[J]. 天津工业大学学报,2019,38(1):61-68.
- [5] 陈欣佳,刘艳霞,洪晓斌,等. 基于 SSD-CF 的无人艇目标检测跟踪方法[J]. 中国测试,2019,45(2):145-150.
- [6] 叶泽浩,毕红葵,谭贤四,等. 改进的平方根 UKF 在再入滑翔目标跟踪中的应用[J]. 宇航学报,2019,40(2):215-222.
- [7] 刘万军,孙虎,姜文涛. 自适应特征选择的相关滤波跟踪算法[J]. 光学学报,2019,39(6):234-247.
- [8] 柳超,张志国,孙进平. 基于幅度信息的海上多目标稳健跟踪方法[J]. 通信学报,2019,40(2):60-69.
- [9] 张强,陆耀宾,于俊朋. 面向应用的 GM-CPHD 雷达多目标跟踪技术[J]. 工业控制计算机,2019,32(2):80-82,85.
- [10] 周启晨,李云栋. 基于深度学习的目标跟踪方法及其实现[J]. 工业控制计算机,2019,32(2):89-90.
- [11] 潘迪夫,李耀通,韩锟. 一种基于多相关滤波器组合的目标跟踪方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(2):112-122.
- [12] 盛琥,赵温波. 引入斜距和高程预测的 BLUE 跟踪方法[J]. 信号处理,2019,35(2):285-292.
- [13] 王林茜,胡晓曦,韩勋,等. 单目标跟踪技术发展研究[J]. 空间电子技术,2019,16(1):1-10.
- [14] 刘红庆,刘燕,舒底清,等. 移动追踪的最小 Sigma 点斜率无迹粒子重构滤波[J]. 控制工程,2019,26(2):355-361.
- [15] 田野,万华,秦国政,等. STSS 预警卫星目标跟踪能力研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2019,14(2):184-188.

收稿日期:2022-07-06