

引用格式:贾舒宜,张贇,唐田田,等.变维的机动目标跟踪算法[J].电光与控制,2017,24(8):1-4. JIA S Y, ZHANG Y, TANG T T, et al. A maneuvering target tracking algorithm with variable dimensions[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(8):1-4.

变维的机动目标跟踪算法

贾舒宜^a, 张贇^b, 唐田田^a, 潘新龙^a

(海军航空大学, a. 信息融合所; b. 飞行器工程系, 山东烟台 264001)

摘要:为改善现有机动目标跟踪方法存在的跟踪精度不高、滤波易发散的问题,提出了一种 RA-Jerk-EKF 算法,该算法将目标径向加速度信息引入量测向量,通过增加雷达量测向量维数提高机动目标的跟踪精度。在信号处理阶段利用分数阶傅里叶变换(FRFT)估计出目标的径向加速度,并将其通过坐标转换引入量测向量中;在数据处理阶段采用 Jerk 模型和扩展卡尔曼滤波(EKF)算法解决滤波算法中非线性量测方程问题;最后将该方法与传统的不带径向加速度的 Jerk-EKF 方法进行了仿真比较。结果表明,该方法在跟踪精度、位置、加速度和速度估计精度方面均有所改善。

关键词:机动目标; 径向加速度; 扩展卡尔曼滤波; Jerk 模型; 分数阶傅里叶变换

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.08.001

A Maneuvering Target Tracking Algorithm with Variable Dimensions

JIA Shu-yi^a, ZHANG Yun^b, TANG Tian-tian^a, PAN Xin-long^a

(Naval Aeronautical and Astronautical University, a. Institute of Information Fusion;
b. Institute of Aircraft Engineering, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to improve the performance of maneuvering target tracking, a RA-Jerk-EKF method is proposed by integrating the target radial acceleration into the measurement matrix, thus to improve the tracking accuracy by increasing the dimensions of measurement matrix. In the proposed method, the radial acceleration is derived based on Fractional Fourier Transformation (FRFT) in signal processing phase, and is then brought into the measurement vector through coordinate transformation. In data processing phase, a method of Extended Kalman Filter (EKF) based on Jerk model is adopted to resolve the problem of the non-linearity of the measurement equation in filtering. Simulation is made to compare the proposed method with the traditional Jerk model based EKF without acceleration measurement. The results show that the proposed algorithm has better performance on tracking accuracy, and estimation accuracies of position, acceleration and velocity are improved at the same time.

Key words: maneuvering target; radial acceleration; EKF; Jerk model; FRFT

0 引言

目前机动目标跟踪方法主要是利用机动目标模型实现机动目标跟踪^[1-5],然而在目标机动较大情况下会出现跟踪精度差甚至跟踪发散的问题。研究表明,提高跟踪性能的一种措施是增加输入信息,即增加观测量^[6-7]。当雷达发射恒定载频信号时,径向多普勒

加速度信息体现在雷达回波信号的调频率上,通过对回波信号调频率的提取可得到目标径向加速度信息,如果能将机动目标加速度信息引入到量测矩阵中便可以提高机动目标的跟踪性能。因此,提出了 RA-Jerk-EKF 算法,该算法在信号处理阶段采用分数阶傅里叶变换(FRFT)估计出目标径向加速度,再将径向加速度估计值进行坐标转换引入滤波算法的量测向量中,为解决滤波算法中非线性量测方程问题,在数据处理阶段采用了 Jerk 模型和扩展卡尔曼滤波算法(EKF)实现径向加速度量测到状态向量的转换。仿真验证了该方法的有效性,并与传统的不带径向加速度量测的 Jerk-EKF 方法进行了比较,仿真结果表明,该方法虽然在计

收稿日期:2016-07-26

修回日期:2016-09-02

基金项目:国家自然科学基金重点基金(61531020);国家自然科学基金面上项目(6147383)

作者简介:贾舒宜(1984—),女,山东滨州人,博士,讲师,研究方向为机动目标跟踪。

算量上稍有增加,但跟踪精度性能明显提高,并且在位置、加速度和速度估计精度方面也有所改善。

1 RA-Jerk-EKF 算法

1.1 信号处理阶段径向加速度估计

假设脉冲多普勒雷达发射恒定载频信号,对于远距离单机动点目标,在径向运动规律为 $R(t) = R_0 + v_0 t + at^2/2$ (R_0 为目标到雷达的初始距离),只考虑加速运动情况,忽略短时间内回波幅度的变化和距离徙动影响,其多普勒变化率为

$$\Delta f = \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} (v_0 + at) \quad (1)$$

式中: λ 为雷达发射信号波长; $v_0 = f_0 \frac{2v_0}{c} = \frac{2f_d}{\lambda}$ 为初始速度; f_d 为初始频率; $a = f_0 \frac{2k}{c} = \frac{2k}{\lambda}$ 为目标径向加速度, k 为目标加速度引起的多普勒变化率,其多普勒呈线性变化,因此回波可以看成是一个线性调频信号。回波信号的调频率 k 包含了雷达的径向加速度 a 的信息, a 的算式为

$$a = \frac{k\lambda}{2} \quad (2)$$

FRFT 定义为^[8]

$$X_p(u) = \begin{cases} \sqrt{1-j\cot\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{j\pi(t^2+u^2)\cot\alpha - j2\pi t u \csc\alpha} dt & \alpha \neq n\pi \\ x(t) & \alpha = 2n\pi \\ -x(t) & \alpha = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\alpha = p\pi/2, p \in [0, 4]$ 。FRFT 从本质上讲是对信号的“旋转”,对于有限长的线性调频信号,选择合适的旋转角度 $\cot\alpha = -2a/\lambda$ 对信号进行分数阶傅里叶变换,可使信号在某个特定的分数阶傅里叶域上呈现出能量的聚集,其幅度出现明显的峰值,可实现雷达匀加速机动目标径向运动参数的估计。选用 FRFT 的分解型快速算法,算式为^[9]

$$X_\alpha(m) = \frac{A(\alpha)}{2F} \sum_{n=-N/2}^{N/2} e^{j\pi(-m^2\cot\alpha + 2mn\csc\alpha - n^2\cot\alpha)/(2F)^2} x\left(\frac{n}{2F}\right) \quad (4)$$

式中: $2F$ 为信号 $e^{j\pi t^2 \cot\alpha} x(t)$ 具有的带宽; $A(\alpha) = \sqrt{1-j\cot\alpha}$ 。这种算法可利用 FFT 实现,计算复杂度为 $O(N \lg N)$ 。估计信号径向加速度一般是建立在二维搜索的基础上,以旋转角 α 为变量,对观测信号进行分数阶傅里叶变换,形成 (α, u) 的二维平面,在此平面上按假定阈值进行峰值点的二维搜索即可得到径向多普勒加速度和径向多普勒速度的估计值,设 $(\hat{\alpha}_{\max}, \hat{u}_{\max})$ 为峰值点坐标值,径向加速度估计值为

$$a_r = -\frac{\lambda f_s}{2t} \cot(\hat{\alpha}_{\max}) \quad (5)$$

式中: f_s 为采样频率; t 为观测时间。

1.2 状态方程

状态方程是由目标的运动模型决定的,基于 Jerk 模型的机动目标状态方程可以表示为^[10-11]

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k+1, k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (6)$$

其中,状态向量

$$\mathbf{X}(k+1) = [x_{k+1} \quad \dot{x}_{k+1} \quad \ddot{x}_{k+1} \quad y_{k+1} \quad \dot{y}_{k+1} \quad \ddot{y}_{k+1}]^T \quad (7)$$

式中, $x_{k+1}, \dot{x}_{k+1}, \ddot{x}_{k+1}$ 和 $y_{k+1}, \dot{y}_{k+1}, \ddot{y}_{k+1}$ 分别表示 $k+1$ 时刻目标 x 方向和 y 方向的位置、速度、加速度和加加速度。

状态转移矩阵

$$\mathbf{F}(k+1, k) = \text{diag}(\mathbf{F}_{11}(k+1, k), \mathbf{F}_{22}(k+1, k)) \quad (8)$$

$$\text{式中, } \mathbf{F}_{11}(k+1, k) = \mathbf{F}_{22}(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 & p_1 \\ 0 & 1 & T & q_1 \\ 0 & 0 & 1 & r_1 \\ 0 & 0 & 0 & s_1 \end{bmatrix},$$

$p_1 = (2 - 2\alpha T + \alpha^2 T^2 - 2e^{-\alpha T}) / (2\alpha^3), q_1 = (e^{-\alpha T} - 1 + \alpha T) / \alpha^2, r_1 = (1 - e^{-\alpha T}) / \alpha, s_1 = e^{-\alpha T}, \alpha$ 为机动时间常数, T 为采样周期。

1.3 量测方程

普通雷达在极坐标系下可获得位置量测(距离和方位角),利用 FRFT 变换方法可以得到径向速度量测和径向加速度量测,因此测量向量表示为

$$\mathbf{Z}_k^m = [r_k^m \quad \theta_k^m \quad v_{rk}^m \quad a_{rk}^m]^T =$$

$$[r \quad \theta \quad v \quad a]^T + [\tilde{r} \quad \tilde{\theta} \quad \tilde{v} \quad \tilde{a}]^T \quad (9)$$

式中: $r = \sqrt{x^2 + y^2}; \theta = \arctan(y/x); \mathbf{Z}_k^m$ 为 k 时刻从雷达信号处理阶段获得的测量向量,其中包括距离量测 r_k^m 、方位角量测 θ_k^m 、径向速度量测 v_{rk}^m 和径向加速度量测 a_{rk}^m ; r, θ, v 和 a 分别为距离、方位角、径向速度和径向加速度的真值。 $\tilde{r}, \tilde{\theta}, \tilde{v}$ 和 \tilde{a} 为相应的量测误差,假设它们都是均值为零的高斯白噪声序列且相互统计独立,方差分别为 $\sigma_r^2, \sigma_\theta^2, \sigma_v^2$ 和 σ_a^2 。

1) 位置转换测量方程。

从极坐标到直角坐标的位置转换测量方程可表示为

$$\mathbf{Z}_1(k) = \mathbf{H}_1(k)\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} [x \quad y \quad \dot{x} \quad \dot{y} \quad \ddot{x} \quad \ddot{y}]^T \quad (10)$$

$\mathbf{Z}_1(k)$ 为 k 时刻目标的量测,转换测量协方差为

$$R_1 = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\sigma_x^2 = \frac{1}{2}(r^2 + \sigma_\rho^2)(1 + \lambda'_\theta \cos 2\theta) + (\lambda_\theta^{-2} - 2)r^2 \cos^2 \theta$;

$\sigma_y^2 = \frac{1}{2}(r^2 + \sigma_\rho^2)(1 - \lambda'_\theta \cos 2\theta) + (\lambda_\theta^{-2} - 2)r^2 \sin^2 \theta$; $\sigma_{xy} =$

$\frac{1}{2}(r^2 + \sigma_\rho^2)\lambda'_\theta \sin 2\theta + (\lambda_\theta^{-2} - 2)r^2 \sin \theta \cos \theta$, $\lambda'_\theta = e^{-2\sigma_\theta^2} = \lambda_\theta^4$ 。

2) 径向加速度和径向速度量测方程。

从极坐标到直角坐标的径向加速度和径向速度量测方程进行线性化处理得到

$$Z_2(k) = h(k, X(k)) + W(k) = \begin{bmatrix} S_1(k) & S_2(k) & 0 & S_3(k) & S_4(k) & 0 \\ S_5(k) & 0 & S_6(k) & S_7(k) & 0 & S_8(k) \end{bmatrix} \cdot [x \ y \ \dot{x} \ \dot{y} \ \ddot{x} \ \ddot{y}]^T + W(k) \quad (12)$$

式中: $W(k)$ 为量测噪声, 假定为加性零均值白噪声;

$$S_1(k)|_{X=X(k)} = \frac{\dot{x}y \sin \theta}{x^2 + y^2} - \frac{y\dot{y} \cos \theta}{x^2 + y^2}; S_2(k)|_{X=X(k)} = \cos \theta;$$

$$S_3(k)|_{X=X(k)} = -\frac{\dot{x}x \sin \theta}{x^2 + y^2} + \frac{x\dot{y} \cos \theta}{x^2 + y^2}; S_4(k)|_{X=X(k)} = \sin \theta;$$

$$S_5(k)|_{X=X(k)} = \frac{\ddot{x}y \sin \theta}{x^2 + y^2} - \frac{y\ddot{y} \cos \theta}{x^2 + y^2} - \frac{x\dot{x}(\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta)^2}{(x^2 + y^2)\sqrt{x^2 + y^2}} +$$

$$\frac{2(\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta)(-y\dot{x} \cos \theta - y\dot{y} \sin \theta)}{(x^2 + y^2)\sqrt{x^2 + y^2}}; S_6(k)|_{X=X(k)} =$$

$$\cos \theta; S_7(k)|_{X=X(k)} = -\frac{\ddot{x}x \sin \theta}{x^2 + y^2} + \frac{x\ddot{y} \cos \theta}{x^2 + y^2} -$$

$$\frac{y\dot{y}(\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta)^2}{(x^2 + y^2)\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{2(\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta)(x\dot{x} \cos \theta + x\dot{y} \sin \theta)}{(x^2 + y^2)\sqrt{x^2 + y^2}};$$

$$S_8(k)|_{X=X(k)} = \sin \theta。$$

2 仿真实验

为验证算法的性能和有效性, 设定一种典型的机动目标运动情况, 从算法耗时和跟踪精度两个方面分析算法的跟踪性能, 并与传统的不带径向加速度的 Jerk-EKF 目标跟踪算法进行比较。

在仿真过程中, 假设雷达波长 $\lambda = 8 \text{ mm}$, 雷达在信号处理阶段采样间隔为 $T_s = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$, 观测时间为 $t = 50 \text{ ms}$, 信噪比为 0 dB , FRFT 算法中, 变换域分割个数 u 和搜索角度 α 分别取值为 500 和 0.0625° 。雷达在数据处理阶段采样间隔为 $T'_s = 1 \text{ s}$, 距离量测误差 $\tilde{r} = 100 \text{ m}$, 角度量测误差 $\tilde{\theta} = 0.5^\circ$, 加速度测量误差 $\tilde{a} = 1 \text{ m/s}^2$, 目标起始状态: $X(0) = [120000 \text{ m}, -426 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2, 2000 \text{ m}, 0 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2]^T$, 目标运动过程历时 90 s ,

目标发生机动时刻及加速度大小如表 1 所示, 目标直角坐标系下运动轨迹如图 1 所示。

表 1 目标机动运动情况表

Table 1 The movement of maneuvering target

	目标发生机动时刻						
	第 31 秒	第 38 秒	第 49 秒	第 61 秒	第 65 秒	第 66 秒	第 81 秒
X 方向加速度值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	5	-8	10	0	-10	-5	5
Y 方向加速度值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	-10	18	-20	30	-8	0	-10

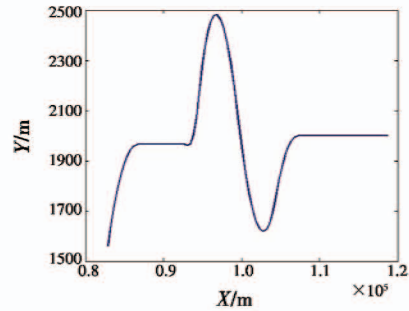


图 1 目标运动轨迹

Fig. 1 Target trajectory

由上述条件下得到信号模型为

$$s(t) = \exp(j2\pi \times f_d t + j2\pi \times kt^2) + w(t) \quad (13)$$

式中, $w(t)$ 表示均值为 1 的高斯白噪声。首先将 $s(t)$ 通过采样器以采样间隔 T_s 进行采样, 变为离散信号 $s(nT_s)$, 其中, n 表示采样点序号; 将 $s(nT_s)$ 送入雷达信号处理计算机进行 FRFT 变换, 寻找匹配分数傅里叶变换域峰值, 并根据峰值对应的数据和式 (5) 得到目标径向加速度估计。由于信号处理阶段利用 FRFT 方法估计目标径向加速度所需信号持续时间 T 较短, 并远小于数据处理 T'_s 的采样间隔, 因此可能会出现个别估计结果失真的情况。为了保证数据处理阶段接收到的径向加速度值具有较高精度, 采用中值滤波方法对这些估计值进行中值滤波, 所得估计结果如图 2 所示, 并将其作为量测向量中径向加速度量测值。在数据处理阶段, 利用 Jerk 模型和 EKF 算法对目标进行跟踪, 仿真 10 次, 结果如图 3 和表 2 所示, 从仿真结果中可以看出, 该算法较传统的不带径向加速度的 Jerk-EKF 算法, 在计算时间上有所增加, 但由于径向加速度的引入增加了量测向量的维数, 因而目标跟踪精度明显提高, 同时目标位置、加速度和速度的估计精度也有明显改善。由图 3 还可以看出, 在 X 轴方向的跟踪精度要明显优于 Y 轴方向的跟踪精度, 这是由于当目标处于不同位置时引入径向加速度对跟踪精度影响程度是不一样的, 目标跟踪精度的改善效果与其所处位置有关, 目标越靠近哪个坐标轴方向, 这个轴的跟踪精度越高。

表2 计算时间比较

Table 2 The comparison of computation time

	仿真次数									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RA-Jerk-EKF 耗时	5.0	5.5	6.0	5.6	5.9	6.2	5.7	6.4	6.5	5.2
Jerk-EKF 耗时	7.2	7.8	8.0	7.8	8.0	8.0	7.8	8.2	8.0	8.5

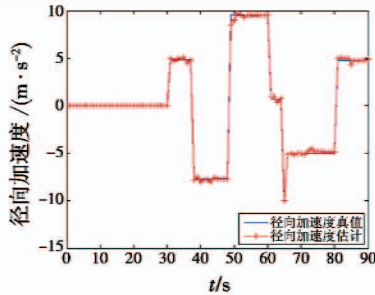


图2 径向加速度真实和估计值

Fig. 2 The actual and estimated value of radial acceleration

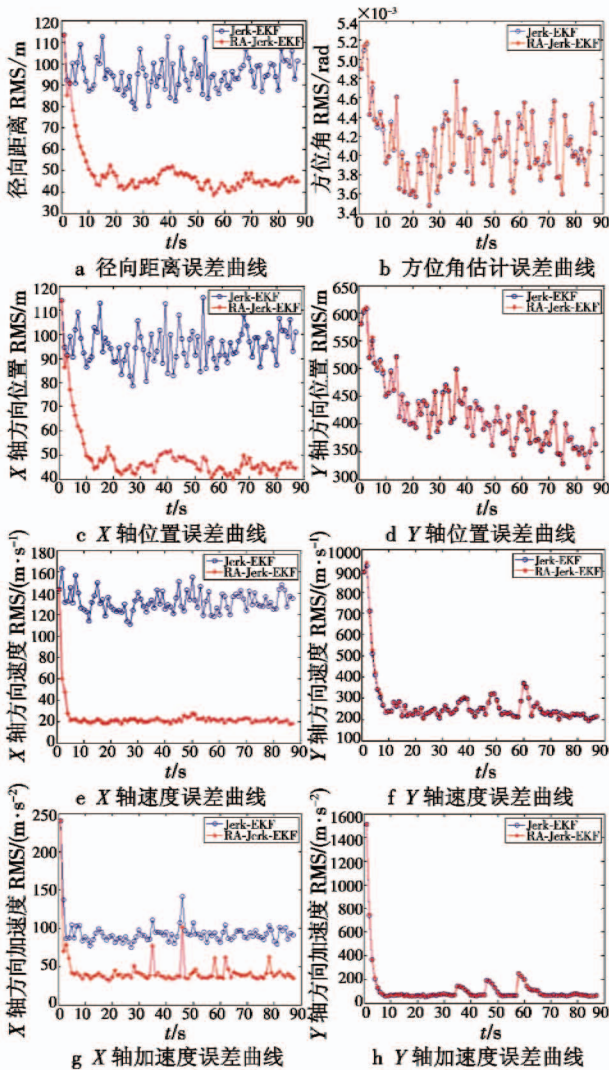


图3 基于 Jerk-EKF 和 RA-Jerk-EKF 算法的性能比较

Fig. 3 Performance comparison of Jerk-EKF and RA-Jerk-EKF based algorithms

3 结论

本文提出一种带径向加速度的 RA-Jerk-EKF 机动目标跟踪算法。该算法在信号处理阶段利用 FRFT 方法精确提取机动目标径向加速度,将其引入测量向量中,通过增加雷达量测向量维数提高机动目标的跟踪精度,并在一种典型的机动目标运动情况下,验证了该方法在机动条件下的跟踪效果要优于传统的 Jerk-EKF 算法。利用该方法的研究成果,不仅可以为脉冲多普勒雷达提供目标的径向多普勒加速度信息,而且机动目标的跟踪性能也有明显提高。

参考文献

- [1] ZHU H Y, GUO K, CHEN S. Fusion of Gaussian mixture models for maneuvering target tracking in the presence of unknown cross-correlation [J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 25(2): 270-276.
- [2] 蔡宗平, 牛创, 戴定成. 基于简化 CKF 的 IMM 算法 [J]. 现代防御技术, 2015, 43(6): 99-103.
- [3] 王络, 郑宏兴, 邓东民, 等. 卡尔曼滤波和最小二乘法结合的机动目标轨迹仿真 [J]. 天津职业技术师范大学学报, 2016, 26(1): 10-13.
- [4] 曾东, 彭冬亮. 强机动目标自适应变结构多模型跟踪算法 [J]. 计算机系统应用, 2012, 21(10): 114-117.
- [5] GAO C C, CHEN W. Ground moving target tracking with VS-IMM using mean shift unscented particle filter [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 622-630.
- [6] CASTELLA R R. Tracking accuracies with position and rate measurements [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1981, 17(3): 433-437.
- [7] JIAO L M, PAN Q, LIANG Y, et al. A nonlinear tracking algorithm with range-rate measurements based on unbiased measurement conversion [C]//The 15th International Conference on Information Fusion, 2012: 1400-1405.
- [8] 王茂汶, 周涛, 刘俊江. FrFT 对 LFM 信号相位测量性能研究 [J]. 电子对抗, 2016(2): 11-13.
- [9] 杜文超, 王国宏, 高学强. 低信噪比条件下在短时信号中提取目标径向加速度方法研究 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(7): 923-943.
- [10] 戴即武, 方君, 戴洪德, 等. 基于改进 CS-Jerk 模型的强机动目标跟踪算法 [J]. 电光与控制, 2016, 23(3): 11-15.
- [11] 侯俊林. 高机动目标 Jerk 模型跟踪算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.