

A New Algorithm for Tracking Strong Maneuvering Target in Cluttered Environment

HUANG Shuanghua, DAI Lu

College of electronic engineering, Naval university of engineering, Wuhan, China

Abstract: To improve the tracking performance of a sudden maneuvering target in cluttered environment, a new adaptive probability data association (PDA) algorithm is presented based on ACA(Adaptive Constant Acceleration)model that uses a fading factor for tracking sudden maneuvering. By modifying the computing method of CA(Constant Acceleration) model's acceleration self-covariance and adapting strong tracking filter so as to adjust filter gain, improve adaptively the tracking performance of the strong maneuvering target and still has the same high precision. The simulation results show that this algorithm is more effective than the probability data association based on strong tracking filter.

Keywords: state estimation; adaptive constant acceleration model; strong tracking filter; maneuvering target track; probability data association

杂波环境中强机动目标跟踪新算法

黄双华, 戴路

海军工程大学 电子工程学院, 湖北, 武汉 430033

摘要: 为提高密集杂波环境下传统概率数据关联算法对突发机动目标跟踪性能, 提出了一种基于采用渐消因子的自适应匀加速模型 (ACA) 的概率数据关联算法。该算法改进了传统的匀加速模型中加速度方差的计算方式, 并在滤波算法中采用了渐消因子, 在保持跟踪精度的前提下, 能自适应调整滤波器带宽, 增强了系统对突发机动的跟踪能力。理论分析和仿真结果表明, 该算法对比采用强跟踪滤波器的概率数据关联算法更有效。

关键词: 状态估计; 自适应匀加速模型; 强跟踪滤波器; 机动目标跟踪; 概率数据关联

1 引言

目标跟踪领域的一个研究重点是如何解决密集杂波环境中突发强机动的目标跟踪问题。概率数据关联算法(PDA)是密集杂波环境下的有效算法。在传统的PDA算法中,大都是建立在Kalman滤波器(KF)或扩展Kalman滤波器(EKF)理论上。由于KF或EKF存在一些不足^[1]:对模型参数不确定性的鲁棒性较差;当系统达到稳态时,会丧失对突变状态的跟踪能力;对初始值的依赖性较大。而强跟踪滤波器^[2](Strong Tracking Filter, STF)针对上述问题通过引进渐消因子,迫使输出残差近似正交,可以看成是一种自适应的非线性滤波器,使得滤波器具有自适应在线校正估计偏差和迅速跟踪状态变化的能力。用于状态与参数的联合估计时,能够取代KF和EKF。

目标运动模型是影响PDA算法性能好坏的另一个重要因素。传统的CS算法由于依赖于模型本身需

要预先设定的两个参数:机动频率和最大机动加速度,当两者取值过大或者过小时,算法的性能均会降低,且一旦目标机动超过预先设定的值,其跟踪性能将明显恶化。另一方面,传统CS算法是建立在KF或EKF理论上,仍然存在KF与EKF的不足。

针对于此,一些学者做出改进。文献^[3]提出最大加速度模型集合自适应的变结构交互多模型方法,但设计适当的最大加速度模型集合十分复杂,并且使用多模型不仅增加了计算复杂性而且模型间的竞争也降低了跟踪性能;文献^[4]利用残差进行假设检验从而调整模型中目标的机动频率,但仅考虑了机动频率忽视了最大加速度的影响。文献^[5]根据传统CS模型提出一种基于匀加速模型(CA)的自适应加速度运动模型(ACA),采用该模型能有效简化跟踪算法,并有良好的精度和性能。

本文针对密集杂波环境下突发目标机动问题,采用带有渐消因子的自适应加速度运动模型(ACA),

提出了一种新的自适应概率数据关联算法。通过重新设计 CA 模型加速度方差的计算方法,使得噪声协方差对强机动自适应调整滤波器带宽,改善滤波精度,增强了对突发强机动目标的跟踪性能。通过与基于 STF 的 PDA 算法比较证实了算法的有效性。

2 基于 STF 的自适应加速度运动模型 (ACA) 及跟踪算法

2.1 自适应匀加速模型 (ACA)

匀加速统计模型的离散状态方程为:

$$X(k+1) = F(k)X(k) + \omega(k) \quad (1)$$

其中: $X(k) = [X(k) \dot{X}(k) \ddot{X}(k)]^T$ 。

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, T 为采样周期。

过程噪声 $\omega(k)$ 是均值为零, 方差为 $Q(k)$ 的 $Q(k) = E[\omega(k)\omega^T(k)]$

$$= q \begin{pmatrix} T^5/20 & T^4/8 & T^3/6 \\ T^4/8 & T^3/3 & T^2/2 \\ T^3/6 & T^2/2 & T \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据非零均值时间相关模型中最典型的算法“当前”统计模型的启发, 设 (2) 式中 q 值选取如下:

$$q = C_q \psi[a_{\max} - |\bar{a}(k)|]$$

式中 a_{\max} 为目标可能的最大机动加速度值, $\bar{a}(k)$ 为 k 时刻加速度均值, C_q 为大于零的量纲变换系数, 可由仿真计算调整, $\psi[\cdot]$ 为某种简单非负函数, 这里取 $\psi(x) = |x|$, 得到:

$$q = C_q \psi |a_{\max} - |\bar{a}(k)|| \quad (3)$$

非零均值时间相关模型本质上是一种宽带设计的基于 CA 模型的滤波器, 特别是在稳态时, 两者几乎完全一致。但 CA 模型的计算及参数调整均比时间相关模型容易。将 $\ddot{X}(k)$ 的一步预测 $\dot{X}(k+1|k)$ 作为在 KT 时刻的当前加速度, 即代替机动加速度的均值 \bar{a} , 使得 $Q(k)$ 对强机动自适应调整滤波器带宽, 改善滤波器精度。在 $Q(k)$ 为零时, 以牺牲跟踪精度为代价, 保持系统足够带宽, 以保证对突发强机动的快速反应性

能。ACA 模型在具有更大的参数调整性时, 亦不失参数稳定性, 可以通过不同的参数设计来适用不同的需求, 从而其工程实用性更强。

2.2 强跟踪滤波理论

强跟踪滤波器是在预测协方差矩阵中引入加权因子 λ , 如下式所示:

$$P(k+1|k) = \lambda(k+1)\Phi(k)P(k|k)\Phi^T(k) + \Gamma(k)Q(k)\Gamma^T(k) \quad (4)$$

一种次优的加权因子的近似算法如下:

$$\lambda(k+1) = \begin{cases} \eta(k+1) & \eta(k+1) > 1 \\ 1 & \eta(k+1) \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\eta(k+1) = \frac{tr[N(k+1)]}{tr[M(k+1)]}$$

$$\begin{aligned} N(k+1) &= V_0(k+1) - \beta R(k+1) - \\ & H(k+1)\Gamma(k)Q(k)\Gamma^T(k)H^T(k+1) \\ M(k+1) &= H(k+1)\Phi(k)P(k|k)\Phi^T(k)H^T(k+1) \end{aligned}$$

其中, $V_0(k+1)$ 是新息协方差矩阵:

$$\begin{aligned} V_0(k+1) &= E[d(k+1)d^T(k+1)] \\ &= \begin{cases} d(1)d^T(1) & k=0 \\ \frac{\rho V_0(k) + d(k+1)d^T(k+1)}{1+\rho} & k \geq 1 \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

$1 < \rho \leq 1$ 是遗忘因子, 一般取 $\rho = 0.95$, $tr[\cdot]$ 表示对矩阵求迹, $d(1)$ 是初始残差。 $\beta \geq 1$ 是衰减因子, 根据经验或仿真设定。

将渐消因子 λ 带入“当前”统计模型中, 得到 STF 的改进的“当前”统计模型算法:

$$X(k+1|k) = \Phi(k)X(k|k) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{X}(k+1|k+1) &= X(k+1|k) \\ &+ K(k+1)d(k+1) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} K(k+1) &= P(k+1|k)H^T(k+1) \\ &[H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) + R(k)]^{-1} \quad (9) \end{aligned}$$

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)]P(k+1|k) \quad (10)$$

算法借鉴强跟踪滤波器的思想, 通过引入时变的

渐消因子 $\lambda(k+1)$ ，促使测量残差近似正交，使得滤波器关于模型不确定保持了较好的鲁棒性。并根据输出残差 $d(k)$ 实时调节过程噪声方差 $P(k+1|k)$ 和系统增益 $K(k)$ ，增大了目标状态估计的补偿值，从而提高对机动目标估计和跟踪精度。

在跟踪一般机动目标时，输出残差方差较小，使得渐消因子 $\lambda(k+1)$ 为 1，此时本算法退化为提出的改进“当前”统计模型及自适应算法，保持了对一般机动目标的较高跟踪精度。在目标发生突发机动或者机动加速度变化较大时，强跟踪滤波器根据残差的增大而增大渐消因子，自适应地调节增益，迫使残差近似正交，从而提高状态突变时的跟踪性能。

3 自适应概率数据关联算法

概率数据关联算法的核心在于计算每一候选回波来自被跟踪目标的后验概率。这一概率的计算依赖于下面 3 个基本假设：虚警在跟踪门内服从均匀分布，正确量测服从正态分布及每个采样时刻至多有一个真实量测，该事件发生的概率是 P_D (探测器的检测概率)。依据以上假设，经推导得到概率数据关联算法的数学表达式为：

(1) 滤波

应用 (4) (7) (8) (9) (10) 式进行滤波

(2) 回波验证

计算残差的范数：

$$g_i(k) = d_i'(k)S^{-1}(k)d_i(k) \quad (11)$$

其中 $d_i(k) = Z_i(k) - H_i\hat{X}_i(k|k-1)$ 为第 i 个回波的残差， $S(k)$ 为其协方差矩阵。

然后判断所接收到的回波是否满足条件： $g_i(k) \leq \gamma$ 其中 γ 为跟踪门限。满足该条件的回波保留，作为关联区域内的候选回波；否则摒弃其余的回波。椭圆跟踪门的体积为： $V_k = c_{n_z} |\gamma S(k)|^{n_z/2}$ 其中， n_z 是量测向量的维数， $c_1 = 2$ ， $c_2 = \pi$ ， $c_3 = 4\pi/3$ 。

(3) 计算关联概率

首先定义如下事件：

$$\theta_i(k) = \{Z_i(k) \text{ 为目标的量测值}\} \quad i = 1, 2, \dots, m_k$$

$$\theta_0(k) = \{\text{在 } k \text{ 时刻目标无量测值}\}$$

本文设跟踪门内虚警量测数服从参数为 λV_k 的泊松 (Poisson) 分布，此时则第 i 个候选回波来自被跟踪目标的后验概率(有效量测和预测量测的关联概率)为：

$$\beta_i(k) = \begin{cases} \frac{e_i(k)}{b(k) + \sum_{j=1}^{m_k} e_j(k)} & i = 1, 2, \dots, m_k \\ \frac{b}{b(k) + \sum_{j=1}^{m_k} e_j(k)} & i = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中：

$$e_i(k) = \exp\left\{-\frac{1}{2} d_i'(k)S^{-1}(k)d_i(k)\right\}$$

$$b(k) = \lambda |2\pi S(k)|^{-1/2} (1 - P_D P_G) / P_D$$

(4) 目标状态更新

应用全概率公式对目标状态进行更新，得到目标的状态估计公式为：

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k) \sum_{i=1}^{m_k} \beta_i(k) d_i(k) \quad (13)$$

目标状态估计的协方差矩阵：

$$P(k|k) = \beta_0(k)P(k|k-1) + [1 - \beta_0(k)]P^c(k|k) + \tilde{P}(k) \quad (14)$$

其中

$$P^c(k|k) = [I - W(k)H(k)]P(k|k-1)$$

$$\tilde{P}(k) = K(k) \left[\sum_{i=1}^{m_k} \beta_i(k) d_i(k) d_i'(k) - d_i(k) d_i'(k) \right] K'(k)$$

4 仿真结果

通过 200 次 Monte-Carlo 仿真来验证算法的有效性。对比算法采用基于 STF 及 CS 模型的 PDA 算法。假设测量噪声符合零均值高斯分布。假设目标在二维空间运动，目标运动过程为 100s，采样周期为 $T=1s$ ，初始位置为(5000m, 3000m)，初始速度为(100m/s, 80m/s)。在 0-30 秒保持匀速运动；从 31-50 秒目标机动，在 X-轴上加速度为-2g，在 Y-轴加速度为-0.5g；从 51-70 秒目标机动，在 X-轴上加速度为 4g，在 Y-轴加速度为 1g；71-100 秒保持匀速运动。目标机动模拟如表 1 及图 1 所示。

最大加速度 $a_{\max} = 60m/s^2$ ，系统噪声方差为 20m，观测噪声标准值为 100m。杂波密度为 $\lambda=1 \times 10^{-8}m/s$ ，

Tab1 target maneuvering simulation
表 1 目标机动模拟

序号	机动时刻	X 轴方向 加速度	y 轴方向 加速度
1	$T=1s$	0	0
2	$T=31s$	-2g	-0.5g
3	$T=51s$	4g	1g
4	$T=71s$	0	0

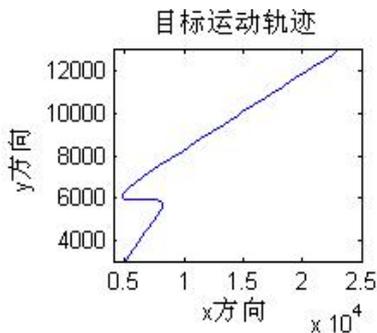


Figure 1. trail of a maneuvering target
图 1. 目标运动轨迹

跟踪门限 $\gamma = 9.21$, 正确回波落入跟踪门的概率 $P_G = 0.995$, 检测概率 $PD = 1$, 遗忘因子 $\rho = 0.95$, 衰减因子 $\beta = 5$, 量纲 C 为 20。仿真结果图 2 和图 3 所示:

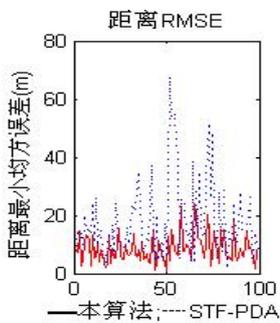


Figure 2. range RMSE
图 2. 距离 RMSE

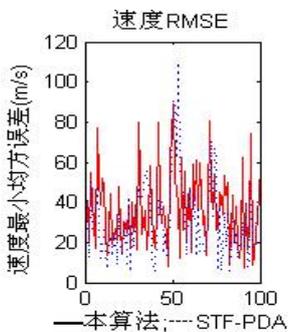


Figure 3. velocity RMSE
图 3. 速度 RMSE

在机动目标模拟中, X 轴方向加速度差值最大达到了 6g, 相对于 a_{max} 来说属于强机动。当在 50s 时刻目标发生强机动。通过比较距离和速度最小均方误差, 可以看出本文提出的算法效果相比较 STF-PDA 算法均有很大提升。进行 200 次仿真, 本文提出算法耗时约 3.57 秒, 而 STF-PDA 耗时约 3.49 秒, 仅以增加不大的计算量就获得了比较好的效果。由此得出结论, 本文提出的算法优于相比较的 STF-PDA 算法。

5 总结

通过以上理论分析和仿真结果可以看出, 本文提出的自适应概率数据关联算法通过重新设计 CA 模型加速度方差的计算方法, 使得噪声协方差对强机动能自适应调整滤波器带宽, 改善滤波精度。并采用渐消因子增强了对突发强机动目标的跟踪性能。仿真实验结果表明, 在计算量增加不大的情况下, 有效提高了跟踪精度, 具有良好的跟踪性能。

References (参考文献)

- [1] XU Yu, YANG Rui-juan, ZHOU Yan. An Algorithm STF-PDA for Maneuvering Target Tracking with Dynamic Mode[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2003, 31(7):981-984. 徐毓, 杨瑞娟, 周焰. 一种实现机动目标跟踪的 STF 动态模型 PDA 算法[J]. 电子学报, 2003, 31(7):981-984.
- [2] ZHOU Dong-hua, YE Yin-zhong. Modern fault diagnose and control[M]. Beijing: Public of Tsinghua University, 2000. 250-260. 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 250-260.
- [3] Ji Chengxin, Xu Jianghu, Zhang Yongsheng, et al. A variable-structure IMM filtering algorithm for tracking a maneuvering target[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(5):595-599. 嵇成新, 许江湖, 张永胜, 等. 一种跟踪机动目标的变结构交互多模型滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(5):595.
- [4] LIU Chang-yun, LIU Jin-mang, CHEN Chang-xing, et al. Maneuvering frequency adaptive algorithm of tracking a maneuvering object. Control Theory & Applications, 2004, 21(6):961-965. 刘昌云, 刘进忙, 陈长兴, 等. 机动目标跟踪的机动频率自适应算法[J]. 控制理论与应用, 2004, 26(4):961-965.
- [5] LIU Gang. Multi-targets tracking algorithm and realization research[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2003. 12-34. 刘刚. 多目标跟踪算法及实现研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003. 12-34.
- [6] KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y. Probabilistic data association techniques for target tracking in clutter[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3):536-557.
- [7] Li X R, Jilkov V P. A survey of maneuvering target tracking-part I: dynamic models[J]. IEEE Trans On Aerospace and Electronic Systems, 2003, 4(39):1333-1363.
- [8] Fan Xiao-jun, Liu Feng. A New IMM Method for Tracking Maneuvering Target[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(3):532-535. 范小军, 刘锋. 一种新的机动目标跟踪的多模型算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3):532-535.