

· 仿真与评估 ·

机动目标跟踪算法仿真

刘顺成, 吴晓露, 韩奎侠, 韩卫华

(解放军第二炮兵青州士官学校, 山东 青州 262500)

摘要: 针对目前应用最广的几种目标跟踪算法进行了介绍, 目的是研究其在不同的跟踪条件下这些方法的性能差异, 从而在此基础上发展出更加鲁棒的模型. 确立了跟踪算法性能评价的相对均方根误差均值准则, 通过 Monte-Carlo 方法, 利用大量的仿真结果分析, 得到了一些有益的结论.

关键词: 目标跟踪; 仿真; 动态模型; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)05-0067-03

Tracking Algorithms Simulation for Maneuvering Target

LIU Shun-cheng, WU Xiao-lu, HAN Kui-xia, HAN Wei-hua

(The Second Artillery Sergeant School, Qingzhou 262500, China)

Abstract: For developing a more robust model, the most popular target tracking algorithms are introduced, and the capacity difference of these methods in different tracking condition is compared. After establishing the relative square root error mean rule for evaluating tracking algorithm capacity, a lot of simulation results were analyzed with Monte-Carlo, and some valuable conclusion was made.

Key words: target tracking; simulation; dynamic model; Kalman filter

目标跟踪的首要问题是确定目标飞行器的动态模型和基于该模型的跟踪估计算法^[1]. 研究动态模型和跟踪估计算法有利于提高跟踪结果的实时性和精确性. 国外学者在该领域已开展过大量的研究工作, 有很多成果可以借鉴. 对于不同的目标, 其运动物理特征不同, 因此要针对各目标的运动特点选择合适的动态模型和算法, 否则将出现跟踪目标丢失的情况. 从目前的研究成果看到, 绝大部分新模型、新算法都是在现有的一些基本模型上的变种和改进中获得的^[2], 因此, 对于这些基本模型的进一步探索也具有重要意义. 文中对目前常用的一些动态模型进行了大量的仿真研究, 以期对各种算法的参数、性能和适用范围得到较充分的认识, 得到了一些有益的结论.

1 跟踪效果评价准则的确立

随机模拟中的均方根误差 $RMSE(k)$ 在度量特定问题时具有积极意义, 也是目前绝大多数仿真研究的判定准则之一^[3]. 但是通过实验发现, $RMSE(k)$ 在度量多个不同仿真条件下的算法时不能起到直观有效的指标作用. 如表 1 所示, 若仿真条件 A、B 下的观测误差分别是 10 km、10 m, C 算法在 A 条件

表 1 2 种仿真条件下算法的跟踪精度对比

	量测噪声 σ	RMSE	修正量
仿真条件 A, 算法 C/km	10	5	5
仿真条件 B, 算法 D/m	10	9	1

收稿日期: 2009-05-11

作者简介: 刘顺成(1982-), 男, 湖北襄樊人, 硕士, 助教, 主要从事建模与仿真、机动目标跟踪的研究; 吴晓露(1984-), 女, 安徽蚌埠人, 硕士, 助教, 主要从事地球物理、智能信息处理等方面的研究.

下 $RMSE_C = 5 \text{ km}$ 、 D 在 B 条件下 $RMSE_D = 9 \text{ m}$ ，虽然 $RMSE_D \ll RMSE_C$ ，但 C 算法对观测误差的修正量却明显优于 D ，因此用单纯的均方根误差值度量跟踪精度存在不足，特提出了一种可以衡量多仿真条件下算法优劣的指标——相对均方根误差均值。

定义：若雷达量测噪声的标准差为 σ ，定义状态估计的相对均方根误差均值为

$$MRMSE = \frac{\sum_{k=1}^N RMSE(k)}{N \cdot \sigma} \quad (1)$$

式(1)用来衡量算法在整体上的相对跟踪精确度。

由均方根误差的意义可知，当 $RMSE < \sigma$ 时，在统计意义上滤波值和真实值之间的误差要小于噪声值，反之则说明他们之间的误差要大于噪声值。因此，对于形式各异的探测系统以及它们不同的量测噪声水平，选择 $MRMSE$ 来比较跟踪的性能比单纯的 $RMSE$ 更具有直观性和统一性。另外，均方根误差描述了跟踪过程中各时间点的跟踪精度，选取均方根误差最大的时间点来考虑该最大误差的出现是否是由畸点产生，对评价算法的稳定性也是必要的。所以主要以这 2 个指标来衡量算法的跟踪效果。根据作战飞行器可能采取的战术动作情况，选择了一些比较典型的仿真实验条件。

2 跟踪算法仿真分析

2.1 非机动目标跟踪算法

非机动动态模型一般用来描述目标的匀速或匀加速直线运动。目前研究比较成熟且被人们所熟知的有常速模型(Constant Velocity, CV)、常加速模型(Constant Acceleration, CA)。其实非机动动态模型的运用范围远远小于机动动态模型，但是非机动运动状态作为物体运动存在的一种重要形式，需对其进行必要的研究。

仿真条件一：目标在与 X 轴成 $\pi/4$ 夹角方向上以 10 m/s 做匀速直线运动。目标初始状态选择 $X_0 = [20 \ 0 \ 10 \ 0]^T$ (单位： m)，量测噪声均值为 0， x 方向量测噪声方差为 100 m^2 ， y 方向量测噪声方差为 400 m^2 ，雷达采样周期为 1 s 。匀速运动模拟目标的巡航飞行阶段，此阶段飞行器做近似的匀速直线运动。用 CV 模型进行 Monte-Carlo 仿真的结果见图 1~图 4 和表 2 所示。

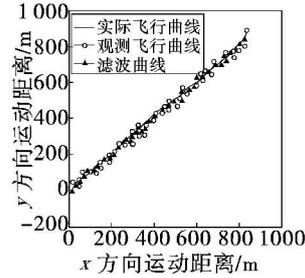


图 1 实际运动轨迹及滤波估计轨迹

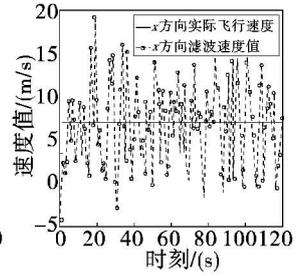


图 2 x 方向实际速度与滤波值比较

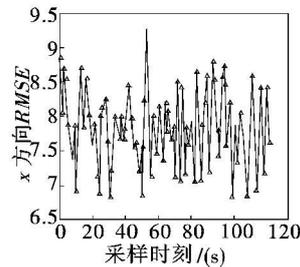


图 3 x 方向位置滤波估计的 RMSE

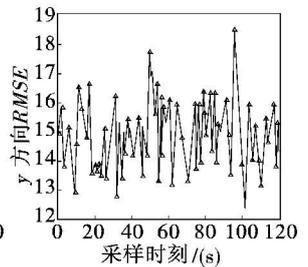


图 4 y 方向位置滤波估计的 RMSE

表 2 CV 模型在匀速巡航目标跟踪中的应用

RMSE 最大值/m		MRMSE	
x 方向位置	y 方向位置	x 方向位置	y 方向位置
9.271 5	18.412 0	0.782 6	0.743 4

由仿真结果可知，在实验参数条件下，采用 Kalman 滤波算法和 CV 动态模型跟踪匀速运动目标的估计精度比较高，不论是 x 方向还是 y 方向，模型都具有较稳定的跟踪性能，若以相对均方根误差的误差均值来考虑，估计的准确性在量测噪声值的基础上至少提高了 20%。

仿真条件二：目标在与 X 轴成 $\pi/4$ 夹角方向上以 10 m/s 的初速度做匀加速运动，加速度大小为 20 m/s^2 。目标初始状态选 $X_0 = [20 \ 0 \ 10 \ 0]^T$ (单位： m)，量测噪声均值为 0， x 方向量测噪声方差为 100 m^2 ， y 方向量测噪声方差为 400 m^2 ，雷达采样周期为 1 s 。匀加速运动用来模拟飞机、巡航导弹加速摆脱跟踪阶段，当错误地采用 CV 模型来对其跟踪时，仿真结果见图 5~图 8 和表 3。

可以看出，因模型的不匹配而造成的跟踪目标丢失问题比较严重(图 5 显示的滤波曲线和实际曲线重合是由于相对于量测噪声，位移的数量级太大

造成的), CV 模型本质上是一个无加速度项的跟踪模型, 所以这里估计误差将量测误差放大了 3~4 倍. 实验结果证明, 动态模型有其适用的运动模式, 对特定运动模式应选择合适的动态模型, 否则将不能实现对目标的精确跟踪.

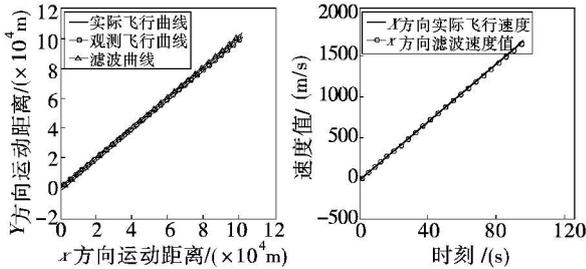


图 5 实际运动轨迹及滤波估计轨迹图

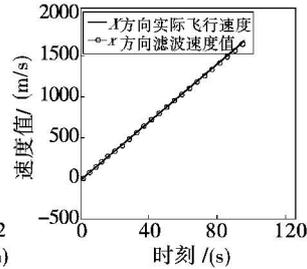


图 6 x 方向实际速度与滤波值比较图

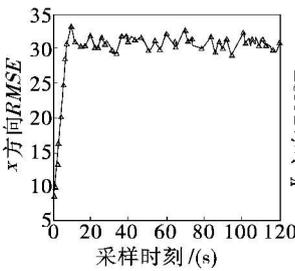


图 7 x 方向位置滤波估计的 RMSE

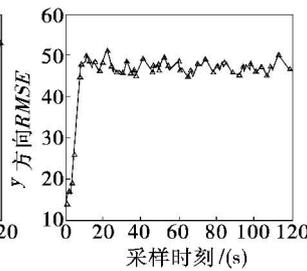


图 8 y 方向位置滤波估计的 RMSE

表 3 CV 模型在匀加速目标跟踪中的应用

RMSE 最大值/m		MRMSE	
x 方向位置	y 方向位置	x 方向位置	y 方向位置
33.314 0	51.453 3	3.002 0	2.290 9

2.2 机动目标跟踪算法

所谓机动是指目标由于某种原因作改变原来规律的运动, 如转向、俯冲、下滑、爬升、蛇形、增速、减速等. 机动目标跟踪就是要解决目标机动的情况下稳定、快速、精确跟踪问题. 当前应用较为广泛的包括 Singer 模型、“当前”统计模型(Current Statistical Model, CS)^[4]以及 Jerk 模型. 下面的仿真运用前 2 种模型和 CA 模型一起对机动的目标进行跟踪, 对比研究这几种模型的相关特征.

仿真条件三: 目标在 x 方向上作初速度为 0.02

km/s 的匀速-加速-加速-加速的加速度阶跃运动. 在前 20 次采样周期中, 加速度为 0; 20~50 次采样中, 加速度为 0.4 g; 50~90 次采样中加速度为 -0.1 g; 90 次采样后, 加速度为 0.1 g. 目标初始状态选 $X_0 = [10 \ 0 \ 0 \ 5 \ 0 \ 0]^T$ (单位: km), 量测噪声均值为 0, 方差为 4 km², 雷达采样周期为 1 s, 其中 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$. 阶跃加速运动用来模拟目标变加速摆脱跟踪阶段, 在坐标不耦合的目标跟踪问题中, 对飞行器 x 方向运动状态的跟踪进行研究. 仿真结果见图 9~图 12, 表 4 所示.

可以看出, 对阶跃加速运动目标的跟踪性能排序应是 $CS > Singer > CA$. 大量的研究结果也表明, CS 模型是处理机动问题的有效模型, Singer 模型是介于匀速和匀加速之间的一种模型, 因此 Singer 模型较 CV 和 CA 有更宽的覆盖面, 它虽然被划分在机动目标动态模型之中, 但其对于非机动目标的跟踪精度也比较高.

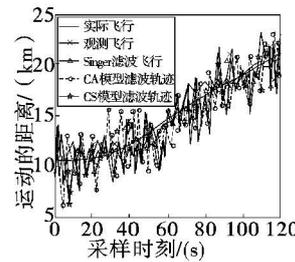


图 9 实际运动轨迹及滤波估计轨迹

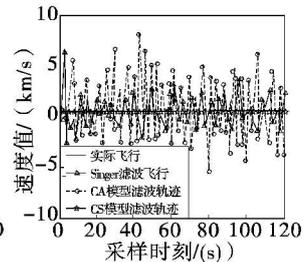


图 10 x 方向实际速度与滤波值比较

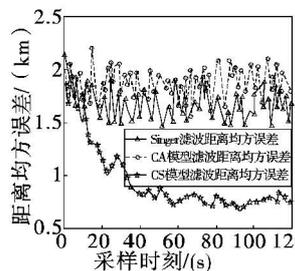


图 11 x 方向位置滤波估计的 RMSE

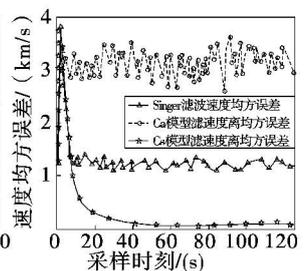


图 12 y 方向位置滤波估计的 RMSE

由以上 3 个不同背景下的仿真实验看出, CS 模型和 Singer 模型在对机动目标的跟踪中精度更高, 而 CV 模型和 CA 模型则更适用于目标非机动情况. 在充分认识各模型的适用范围后才可以做到对

(下转第 72 页)

差在 1 ms 之内,则满足要求。

4 实时校正

实时校正分 2 个过程:首次校正和中间校正。

由于测算的周期与实际周期的误差正负是未知的,且误差范围大小不确定。因此,校正需进行 2 个方向的校正,即如果向增加的方向校正一定时间后,仍然没有收到回波,则改为向负的方向校正。通常情况下,校正步长取值小于 $\tau_e/2$ 。

经首次校正后,可确认目标,可能收到一个或多个回波后,回波再次丢失。必须进行再次校正。校正方向为前一次校正的反方向,校正步长为前一次校正步长的 1/2。通过这种“边发边校”的实时校正过程,回波率将逐渐增加。

5 结 束 语

在对激光回波信号进行仿真分析的基础上,通

过数学建模等分析手段,提出了红外探测器件扫描周期的解算算法,并对该算法的误差进行分析,探讨了实时校正的过程与方法。在仿真的过程中,对激光的大气传输等环境条件和接收的激光回波信号都是采用较理想的条件进行分析的,今后还应对上述算法进行进一步的验证和确认。

参考文献

- [1] 陈小天,沈振康.空空导弹红外成像制导系统仿真研究[J].系统仿真学报,2008,20(20):20-22.
- [2] 赵超,杨号.红外制导的发展趋势及其关键技术[J].电光与控制,2008,15(5):48-53.
- [3] 杨磊,杨亚培,郑永超.激光技术对抗红外成像制导的应用研究[J].红外,2008,29(7):28-31.
- [4] 耿峰,祝小平.精确制导武器红外成像导引头控制系统研究[J].宇航学报,2007,28(3):535-538.
- [5] 陈治宣,周晓东,娄树理,等.红外焦平面阵列非均匀性校正研究[J].海军航空工程学院学报,2006,21(4):444-448.

(上接第 69 页)

表 4 CA、Singer、CS 模型在阶跃加速目标跟踪中的对比

	位置 RMSE 最大值/km	速度 RMSE 最大值/(km/s)	位置 MRMSE	速度 MRMSE
CA 模型	2.225 1	3.656 0	0.957 6	1.554 6
Singer 模型	2.119 6	3.815 4	0.836 4	0.642 4
CS 模型	1.946 4	3.289 9	0.473 5	0.127 0

不同运动形式目标的跟踪,还可以在此基础上开发出更加精确、鲁棒的模型。

3 结 束 语

机动目标跟踪成功的关键在于从测量值中提取有关目标状态的有用信息,一个好的目标跟踪算法将有利于这种信息的提取。大多数跟踪算法都是以模型为基础的,文中针对目前机动目标跟踪研究中应用范围最广的几种跟踪算法(模型)进行了较为深入的分析,依托多种不同环境、条件仿真下的结果较

全面地体现了各模型的特点及优劣,为模型的进一步研究和应用提供了一定的实验依据。

参考文献

- [1] 韩崇昭,朱红艳,段战胜,等.多源信息融合[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [2] 何友,修建娟,张晶炜,等.雷达数据处理及应用[M].北京:电子工业出版社,2006.
- [3] 王洪峰,单甘霖,梅卫.低空反导机动目标跟踪技术研究[J].电光与控制,2006,13(2):8-10.
- [4] 周宏仁,敬忠良,王培德.机动目标跟踪[M].北京:国防工业出版社,1994.