

文章编号: 1001-0920(2002)05-0591-04

效能评估方法在多目标跟踪系统中的应用

龙翔¹, 敬忠良², 金德琨¹, 王安¹

(1. 西北工业大学 自动控制系, 陕西 西安 710072; 2. 上海交通大学 航空航天信息与控制研究所, 上海 200030)

摘要: 基于系统工程理论, 分析了影响机动多目标跟踪系统基本效能的各要素, 给出机动多目标跟踪系统的基本效能指标及其定义, 从而建立了雷达机动多目标跟踪系统的效能评估模型。最后通过仿真分析给出 3 种多目标跟踪算法的效能评估结果。

关键词: 机动多目标跟踪; 效能; 效能评估

中图分类号: V 243.2 **文献标识码:** A

Analysis of the effectiveness of radar multi-target tracking

LON G X iang¹, J I N G Zhong-liang², J I N D e-kun¹, W A N G A n¹

(1. Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Institute of Aerospace Information and Control, Shanghai Jiao tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the theory of system engineering, factors influencing the basic effectiveness of maneuvering multi-target tracking are discussed. Concepts and expressions of effectiveness of maneuvering multi-target tracking are introduced so that a model of radar maneuvering multi-target tracking is established. Simulation results are given to show the use of the model.

Key words: maneuvering multi-target tracking; effectiveness; analysis of effectiveness

1 引言

多目标跟踪的基本概念是由 Wax 于 1955 年提出的。1964 年, Sittler 在包括数据关联等内容多目标跟踪理论方面取得了开创性突破, 但因其工作出现在广泛应用递推卡尔曼滤波技术之前, 所以一直难为人们重视。直到 20 世纪 70 年代初期, 多目标跟踪理论才引起人们的极大兴趣。之后, 由 Bar-Shalom^[1] 和 Singer^[2] 等所进行的工作才开始了现代目标跟踪理论及其应用的研究, 其主要标志是数据关联与滤波理论的有机结合。特别是 80 年代以来, 以非线性大规模并行分布式处理为主流的神经网络

研究的再次兴起, 以及模糊理论在工程中的广泛应用, 为多目标跟踪的研究注入了新的活力, 给传统跟踪理论中计算组合爆炸等问题的有效解决带来了光明^[3,4]。

雷达多目标跟踪系统是现代航空电子系统的一部分, 雷达多目标跟踪系统的效能对于现代航空电子系统的效能影响占有越来越重要的地位。对雷达多目标跟踪系统的特征进行分析, 并且评估其效能, 不仅有助于雷达多目标跟踪系统在现代军用飞机系统中的最优使用, 而且可用于支持新算法的研究和发展。

收稿日期: 2001-03-04; 修回日期: 2001-05-21

作者简介: 龙翔(1970—), 男, 四川成都人, 博士生, 从事多目标跟踪、图像处理及效能评估等研究; 敬忠良(1960—), 男, 四川南部人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事多目标跟踪、信息融合及神经网络等研究。

2 基本概念和方法

雷达多目标跟踪系统的效能评估是航空综合体作战效能评估的一个重要组成部分^[5]。所谓航空综合体,是指由飞机(含机体、动力装置、飞行控制系统)、机载设备系统(含火力控制系统)、武器系统、地面保障系统(含机场)、机组等组成的,旨在完成某个军事任务集的综合大系统,而雷达多目标跟踪系统则存在于机载设备系统和地面保障系统中。

按照美国工业武器系统效能咨询委员会的定义^[6],武器系统的效能是指系统完成任务的能力,是一个系统满足一组特定任务要求程度的度量。它是系统可用性、可信赖性和固有能力的综合反映。可用性是指在开始执行任务时系统所处的状态,它受硬件、人员和程序关系的影响,用以表示系统在开始执行任务时处于不同状态的概率,即

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (1)$$

其中 a_i 为系统在执行任务时处于状态 i 的概率。

可信赖性是指系统在工作和执行任务的过程中处于某一种状态程度的度量,用以表示系统在执行任务过程中各状态之间的转移情况。可用矩阵表示为

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2)$$

其中 d_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$) 为系统由状态 i 转移到状态 j 的可信度(概率)。

系统在完成任务的整个过程中必将处于这几种状态之中,故有

$$\prod_{j=1}^n d_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

综上所述,雷达多目标跟踪系统的基本效能模型可表示为

$$E = A \cdot D \quad (4)$$

其中, E 为雷达多目标跟踪系统的基本效能, A 为可用性, D 为可信赖性; 符号 \cdot 表示直积, 即 A 中的每一个元素与 B 中的每一个元素相乘。

3 雷达多目标跟踪系统的基本效能分析

根据以上武器系统效能评估的概念, 我们提出

了雷达多目标跟踪系统基本效能的概念。对机动多目标跟踪系统而言, 跟踪效能的优劣主要反映在目标状态估计精度和轨迹起始与终结质量方面。为此, 我们提出了轨迹起始与终结概率、置信区间估计以及望小特性的信噪(SN)比等效效能评估指标。

3.1 目标起始与终结概率

设跟踪空间的大小为 V_T , 各目标跟踪门大小为 V_j ($j = 1, 2, \dots, n$), 其中 n 为跟踪空间内当前被跟踪的目标个数。定义主跟踪子空间 V_{T1} 为所有 V_j 的并集, 边缘跟踪子空间 V_{T2} 为 V_T 与 V_{T1} 的差集, 即

$$V_{T1} = \bigcup_{j=1}^n V_j \quad (5)$$

$$V_{T2} = V_T - V_{T1} = V_T - \bigcup_{j=1}^n V_j \quad (6)$$

目标运动时, 其空间位置和机动水平是时变的, 显然, V_{T1} 和 V_{T2} 的大小及空间位置也是时变的。在 V_{T1} 内, 目标已被稳定地跟踪, 信噪比足够高, 以致于新目标出现的可能性很小; 另一方面, 若目标逃离 V_{T1} , 便存在着目标在 V_T 内消失的可能性。因此, 关于 V_{T1} 仅需考虑跟踪终结问题, V_{T2} 是一个应特别重视的区域, 位于该区域内的目标信噪比很小, 虚警率相当高; 同时, 新目标也有可能从跟踪区域外进入该区域。因此, 任何位于 V_{T2} 内而原先又没有目标档案的回波, 都应作为潜在的新目标加以考虑, 即解决跟踪起始问题。

给定量测集合 D_k 条件下轨迹为真的后验概率为

$$P(T/D_k) = \frac{L_k P(T/D_{k-1})}{L_k P(T/D_{k-1}) + 1 - P(T/D_{k-1})} \quad (7)$$

数据似然比为

$$L_k = \begin{cases} \frac{P_D V_j \exp[-g_j^e(k)/2]}{(2\pi)^{M/2} \sqrt{|S_j^e(k)|}}, & \text{不漏检} \\ (1 - P_D)/(1 - P_F), & \text{漏检} \end{cases} \quad (8)$$

其中, V_j 为目标 j 的关联区域体积, $g_j^e(k)$ 和 $S_j^e(k)$ 分别为“全邻”等效回波残差范数和其协方差矩阵, P_F 为

$$P_F = V_j/V_T \quad (9)$$

真实目标的初始概率为

$$P_0 = \frac{\beta_{VT}}{\beta_{VT} + \beta_{FT}} \quad (10)$$

当且仅当

$$P(T/D_L) = P_{TC} \quad (11)$$

时, 接受跟踪起始假设。一旦进入跟踪维持,

$P(T/D_k)$ 保持为 1.0, 当且仅当

$$P(T/D_k) = P_{TT} \quad (12)$$

时, 接受跟踪终结假设。

3.2 置信区间估计

机动多目标跟踪的跟踪误差服从正态分布, 均值误差为 $\bar{X} = ME$, 均方根误差为 $S = RMSE$, 修正

均方根误差为 $S^* = \sqrt{\frac{N}{N-1}} RMSE$ 。由概率论和数理统计理论可知, 未知方差 DX , 求均值 EX 的置信

区间时, 可引出随机变量 $T = \frac{\bar{X} - \mu}{S^* / \sqrt{N}}$ (N 为样本数), 且 $T \sim t(N-1)$ 。对于给定的置信度 $(1-\alpha)$, 存在 $t_{\alpha/2}(N-1)$, 使得

$$P\{|T| < t_{\alpha/2}(N-1)\} = 1 - \alpha \quad (13)$$

这里, $t_{\alpha/2}(N-1)$ 是自由度为 $N-1$ 的 t 分布关于 $\alpha/2$ 的上侧分位数, $t_{\alpha/2}(N-1)$ 的数值可查表得到。于是有

$$P\left\{\left|\frac{\bar{X} - \mu}{S^* / \sqrt{N}}\right| < t_{\alpha/2}(N-1)\right\} = 1 - \alpha \quad (14)$$

故 EX 的置信度为 $(1-\alpha)$ 的置信区间为

$$\left\{\bar{X} - t_{\alpha/2}^*(N-1) \frac{S^*}{\sqrt{N}}, \bar{X} + t_{\alpha/2}^*(N-1) \frac{S^*}{\sqrt{N}}\right\} \quad (15)$$

在我们所进行的雷达跟踪仿真过程中, 由于 $N = 100$, 可以认为样本容量为大样本, 因此式(15)可改写为

$$\left\{\bar{X} - u_{\alpha/2} \frac{S^*}{\sqrt{N}}, \bar{X} + u_{\alpha/2} \frac{S^*}{\sqrt{N}}\right\} \quad (16)$$

由上可知, 置信区间长度为

$$L = \left[\bar{X} + u_{\alpha/2} \frac{S^*}{\sqrt{N}}\right] - \left[\bar{X} - u_{\alpha/2} \frac{S^*}{\sqrt{N}}\right] = 2 \left[u_{\alpha/2} \frac{S^*}{\sqrt{N}}\right] \quad (17)$$

在置信度 $(1-\alpha)$ 的前提下, 置信区间长度应尽可能短。

3.3 望小特性信噪比

设均值误差为 $\bar{X} = ME$, 均方根误差为 $S = RMSE$, 则 \bar{X} 和 S 均应小。这时自然希望 $\bar{X}^2 + S^2$ 越小越好, 于是可取

$$SN = \frac{1}{\bar{X}^2 + S^2} \quad (18)$$

由望小特性的信噪比的定义可知, 信噪比越大, 则均值误差和均方根误差越小。

4 多目标跟踪系统的效能

综上所述, 雷达多目标跟踪系统的效能可写成

$$E = P(T/D_k) (1 - \alpha), \quad \{a, b\} \quad (19)$$

其中, $P(T/D_k)$ 为给定量测集合 D_k 条件下轨迹为真的后验概率, $(1-\alpha)$ 为目标跟踪置信度, $\{a, b\}$ 为目标跟踪置信区间。

5 仿真研究

这里仅给出当存在 4 个目标, 并且进行盘旋运动时, 采用 3 种目标跟踪方法对其进行跟踪时的一次仿真结果。在仿真中均选取如下参数: 采样周期 $T = 1$ s, 机动频率 $\alpha = 0.1$, 检测概率 $P_D = 0.99$, 跟踪门限 $\gamma = 11.34$, 跟踪门接收正确回波的概率 $P_G = 0.99$, 最大加速度 $a_{Rmax} = 100 \text{ m/s}^2$, $a_{\Lambda_{xmax}} = a_{\Lambda_{ymax}} = 100 \text{ rad/s}^2$, 三通道初始滤波误差方差阵

$$P_R = \text{diag}(40\ 000, 40\ 000, 40\ 000)$$

$$P_{XY} = \text{diag}(4\ 000, 4\ 000, 4\ 000)$$

量测噪声方差 $\sigma_x^2 = (0.025R)^2$, $\sigma_y^2 = (0.4\pi/180)^2$, 置信度为 95% 或 99.5%, 轨迹确定门限 $P_{TC} = 0.85$, 轨迹终结门限 $P_{TT} = 0.1$ 。

目标轨迹的起始与终结概率的仿真曲线如图 1 和图 2 所示。

从仿真结果可以看出, 跟踪误差具有较小的置信区间长度和较大的望小特性; 从目标跟踪起始和终结概率变化曲线可以看出, 系统具有较快的目标起始和终结速度, 因此系统具有较好的跟踪效能。

表 1 置信度与置信区间长度

跟踪方法	置信度 /%	置信上限	置信下限	置信区间长度	望小特性
最近邻方法	5.0	- 0.026 772	0.013 622	0.049 344	96.761 08
	99.5	- 0.033 103	- 0.006 550	0.053 106	
SJPDA 方法	95.0	- 0.024 731	0.012 700	0.037 431	104.330 0
	99.5	- 0.030 651	- 0.006 015	0.049 232	
神经网络方法	95.0	- 0.024 345	0.012 553	0.036 898	103.848 2
	99.5	- 0.030 181	- 0.005 896	0.048 570	

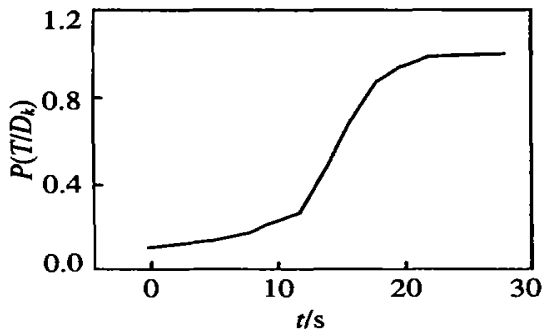


图1 目标跟踪起始概率 $P(T/D_k)$ 变化曲线

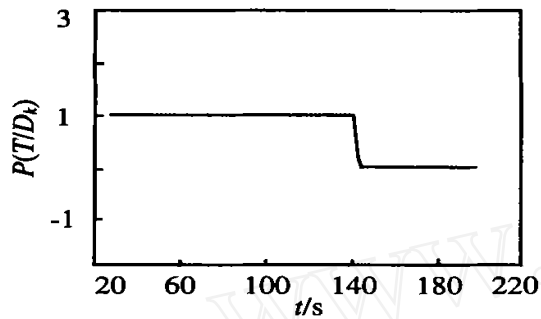


图2 目标跟踪终结概率 $P(T/D_k)$ 变化曲线

参考文献(References):

- [1] Bar Shalom Y, Tse E. Tracking in a cluttered environment with probabilistic data association[J]. *Automatica*, 1975, 11(9): 451-460
- [2] Singer R A, Stein J J. An optimal tracking filter for processing sensor data of imprecisely determined origin in surveillance systems[A]. *Proc of the 1971 IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Miami Beach, 1971. 171-175
- [3] Kachejian K C, Vujcic D. Combat cueing[A]. *Proc of the Int Society for Optical Engineering* [C]. Orlando, 1998. 252-263
- [4] H Leung, Z Hu, M Blanchette. Evaluation of multiple target initiation techniques in real radar tracking environments[J]. *IEE Proc—Radar, Sonar, Navig*, 1996, 143(8): 246-254
- [5] 艾剑良, 钱国红. 攻击性航空综合体作战效能分析的模型构成[J]. *火力与指挥控制*, 1999, 24(12): 10-15
- [6] 高尚. 可靠性与维修性指标综合权衡[J]. *系统工程与电子技术*, 1998, 28(10): 78-80

(上接第 590 页)

6 结 语

本文提出并讨论了模糊和随机混合机会约束的规划模型, 该模型是传统优化模型的发展。由于同时含有模糊和随机参数, 传统的计算方法已难以适用, 为此提出了采用基于随机和模糊混合模拟技术的遗传算法进行求解。通过对生产过程决策应用问题的分析建模和数值计算, 说明了该模型和算法的适用性和有效性。经过大量的实验, 证明新的最优解与给出的最优生产计划的误差非常小, 得到最优解的试验概率和可能性可达 95% 以上。

本文工作不仅为在不确定性环境下更切合实际地分析解决实际问题提供了适用的模型和算法, 同时作为随机或模糊规划的一种推广, 丰富了不确定规划的内容。

参考文献(References):

- [1] Charnes A, Cooper W W. Chance-constrained programming[J]. *Management Science*, 1959, 6(1): 73-79
- [2] Liu B, Iwamura K. Chance constrained programming with fuzzy parameters[J]. *Fuzzy Sets & Systems*, 1998, 94(2): 227-237
- [3] 方述成, 汪定伟. 模糊数学与模糊优化[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [4] Kall P, Wallace S W. *Stochastic Programming* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1994
- [5] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998
- [6] Iwamura K, Liu B. A genetic algorithm for chance constrained programming [J]. *J of Infor & Optim Sci*, 1996, 17(2): 40-47