

多目标快速跟踪系统

刘永坦 权太范

(哈尔滨工业大学电子工程研究所)

摘 要

本文提出了从系统观点设计多目标快速跟踪系统的方法。它主要包括系统最优结构设计、基于知识工程技术的真假目标分类以及变结构自校正跟踪滤波器。系统实验结果表明,这种方法可提高系统精度和快速性。

关键词——机动目标跟踪,估计器,知识工程,模糊集。

一、问题的提出

近二十年来,目标跟踪处理问题一直是状态估计的一个重要研究领域。目标跟踪滤波器本身的设计已不再是一个难题,但是把跟踪滤波器综合成一个完整的系统(如指挥、跟踪、通信等),则是当前需要引起注意的问题^[1]。本文的重点是研究如何从系统观点设计一个快速跟踪多目标的实际系统。并以多目标跟踪数据处理机的研制为主要背景,研究了三个问题。一是系统结构设计。随着目标的高速度、强机动以及目标群的庞大,快速跟踪问题变得极为重要。跟踪处理系统作为一个计算机软件系统,其快速性问题不仅取决于系统算法结构,更重要的是取决于系统数据处理结构。二是真假目标分类。在实际系统中,由于有杂波存在,往往使滤波器迷惑而建立虚假的跟踪航迹。因此在存在漏检和虚警的情况下,独立的跟踪器是无法正常工作的。本文在文[2]基础上提出了基于知识工程技术的真假目标的分类方法。三是跟踪算法。对于在很短的采样周期内要跟踪数百批机动目标的跟踪系统来说,由于卡尔曼滤波器存在计算量大、对模型敏感等缺点很少被采用。为此在文[3—5]基础上提出了变结构自校正跟踪滤波器的设计方法。

二、系统结构及数据结构

1. 系统结构

目标跟踪处理系统的主要任务是在剔去假目标基础上进行对目标截获、互联、跟踪、预测以及航迹处理等,如图1所示。该系统主要由雷达、数据处理器、态势显示器、数据通信以及绘图仪组成。软件均由8087汇编实现,程序约占261KB,数据库占243KB。数据

处理器主要由观测空间分割、特征向量计算、真假目标分类、跟踪以及航迹质量的评估等模块构成。其中航迹质量评估的任务是根据给定的航迹质量指标对航迹进行编号、更新、分叉、撤消等，最后形成可靠航迹、暂时航迹、固定航迹等三类文件。

2. 数据处理结构

从观测空间观点看，跟踪快速性问题是一个如何实现查找路径最短的问题，而从软件结构上看，则是一个如何合理地设计数据处理结构，以便实现快速检索的问题。为叙述简便，设观测空间

Ω_{Σ} 为距离 R 和方位角 θ 的平面，并将其划分为大、中、小三层，分别记作 $\Omega_L, \Omega_M, \Omega_S$ 。若设 $G(X)$ 为 R 和 θ 的可能的所有分割集合，则分割水平 g_1, g_2, g_3 满足

$$g_i \in G(X), \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.1)$$

$$g_1 < g_2 < g_3. \quad (2.2)$$

就线性赋范空间来说，分类水平就是一个范数。在实际系统中需要控制分类水平，构成合理的假设树。

定义 1. 每子空间顺序号 $i_i (i = 1, 2, 3)$ 指的是空间 $\Omega_j (j = L, M, S)$ 经划分后按 R, θ 大小顺序进行排队的序号。

引理 1.

$$\bigcup_{i=1}^{l_0} \Omega_L(i) = \Omega_{\Sigma}, \quad (2.3)$$

$$\bigcup_{i=1}^{m_0} \Omega_M(i) = \Omega_L, \quad (2.4)$$

$$\bigcup_{i=1}^{s_0} \Omega_S(i) = \Omega_M, \quad (2.5)$$

式中 l_0, m_0, s_0 分别为大、中、小子空间的个数。

定义 2. 由任一点迹在观测空间中的顺序号 t_1, t_2, t_3 构成的三维向量叫做该点迹的特征向量，并记为 $T(t_1, t_2, t_3)$ 。可见观测空间的每一点迹对应一个特征向量，并根据特征向量设计数据库，实现检索、分类相关的快速处理。

三、基于规则库技术的真假目标分类法

真假目标分类是在杂波环境中实现以多目标跟踪为前提的。核心问题是如何选择其准则。在以往的分类方法中难以确定相关波门大小和相关积累次数。在目标密集的环境下，为提高真实航迹发现概率要用大的波门，但这可能引起虚假航迹概率的增加。实际上这种界限(指波门大小)往往是含有模糊的，而且人们在思维和判断中使用的大部分知识是属于经验性的。为此本文应用以规则为基础的知识库系统^[6] (Rule-Based Knowledge Base System) 技术提出了新的分类方法。如图 2 所示。首先根据预测值特征向量确定

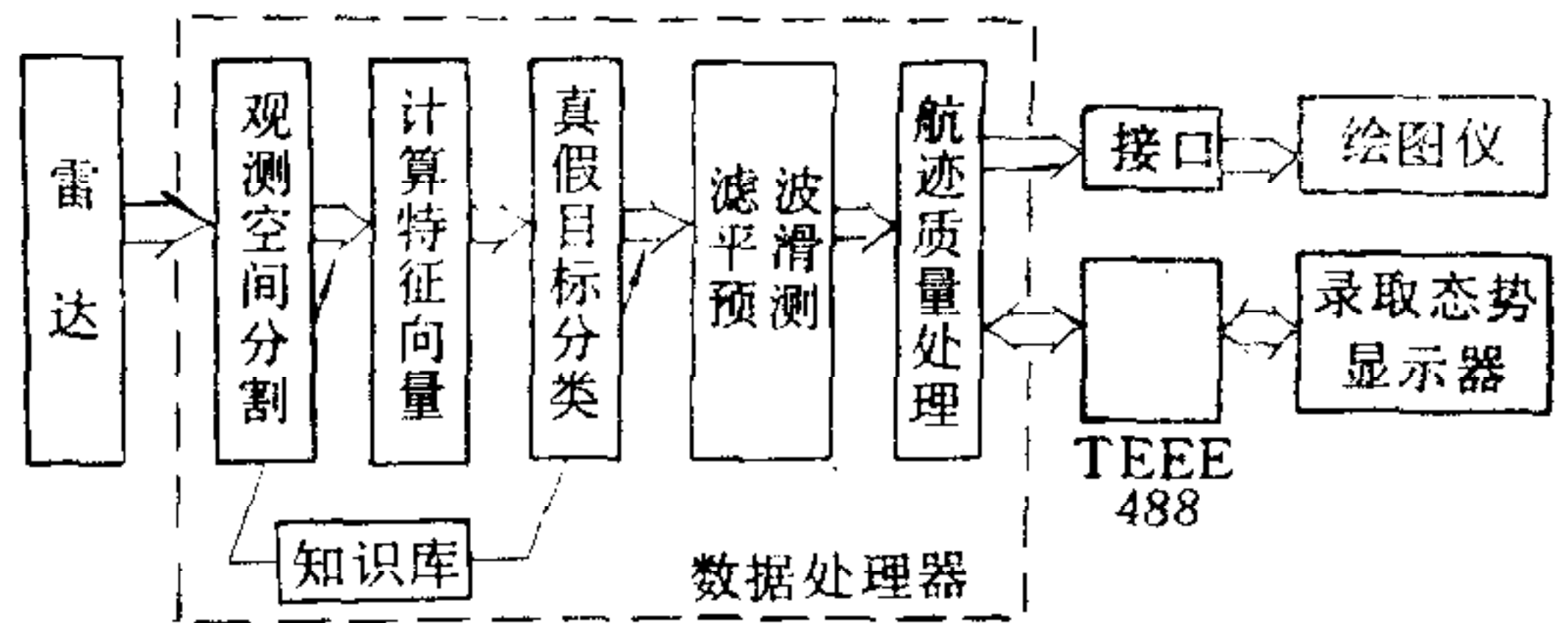


图 1 系统结构图

要分类(或搜索)的相关区域 S 。然后以波门中心到待判定的点迹之间的模糊状态量为输入量进行判别。因篇幅有限,本节只论述模糊关系阵的加权设计和混合判断算法。

设输入量为 $\Delta X = (\tilde{R}, \tilde{\theta})$,

其中 \tilde{R} 为波门中心到 S 域中任一点迹之间的距离 R 经模糊化后论域为 Φ 的模糊集; $\tilde{\theta}$ 为波门中心到该点迹之间方位角差 θ 经模糊化后论域中 ψ 的模糊集。设系统输入为 $\tilde{R}_i, \tilde{\theta}_i$, 输出为 \tilde{M}_i , 则输入、输出之间模糊关系阵 \tilde{H}_i 为

$$\tilde{H}_i = \tilde{R}_i \times \tilde{\theta}_i \times \tilde{M}_i \in \mu_{n \times m}, \quad (3.1)$$

且系统总的模糊关系阵 \tilde{H} 为

$$\tilde{H} = \bigcup_{i=1}^n w_i \tilde{H}_i \in \mu_{n \times m}, \quad (3.2)$$

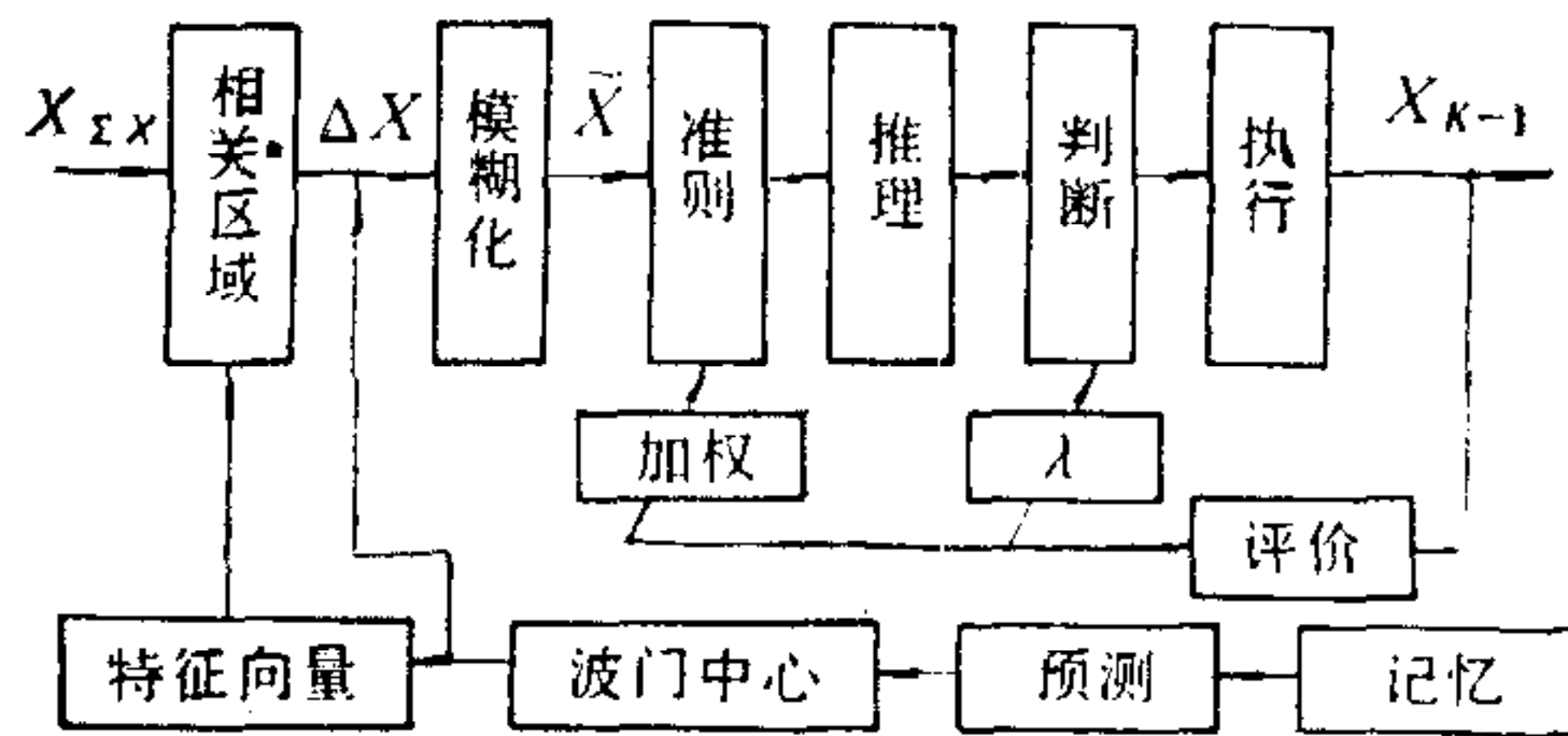


图2 真假目标分类框图

式中加权系数 w_i 满足 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, w_i 反映对第 i 个规则的加权。为确定 w_i , 需要对规则集按轻重进行排序。与 LQG 调节器权阵问题一样,最终 w_i 由系统调试确定^[7]。

若给定由 $\tilde{R}_i, \tilde{\theta}_i$ 构成向量 $\tilde{A}(a_{ij}) \in \mu_{1 \times m}$, 则根据模糊推理原理,系统模糊响应为

$$\tilde{C}(c_{li}) = \tilde{A} \circ \tilde{H} \in \mu_{1 \times m}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (3.3)$$

$$c_{li} = \bigvee_{j=1}^{m^*} (a_{lj} \wedge^* h_{ji}), \quad (3.4)$$

式中模糊算子 \bigvee^*, \wedge^* 分别表示广义与和广义或运算。

若取 min-max 合成,则式(3.4)为

$$c_{li} = \bigvee_{j=1}^m (a_{lj} \wedge h_{ji}), \quad (3.5)$$

这是一种保守(悲观)的判断。反之取 max-min 合成,则式(3.4)成为

$$c_{li} = \bigwedge_{j=1}^m (a_{lj} \vee h_{ji}), \quad (3.6)$$

这是一种大胆(乐观)的判断。为克服以往独立判断的局限性,并统筹兼顾保守(谨慎)和大胆(冒险)的判断,引入协调因子 λ , 得到混合判断为

$$c_{li} = (1 - \lambda) \left[\bigvee_{j=1}^m (a_{lj} \wedge h_{ji}) \right] + \lambda \left[\bigwedge_{j=1}^m (a_{lj} \vee h_{ji}) \right], \quad (3.7)$$

其中 $0 \leq \lambda \leq 1$, 它直接反映了对两种判断的加权。设由式(3.3)和式(3.7)得到的最终决策序列为 $\{\tilde{C}(k)\}$, 则鲁棒测度 $s(k)$ 可表示为

$$s(k) = \text{median}_{j=0}^{N-1} \tilde{C}(k-j)/0.6745, \quad (3.8)$$

k 时刻决策统计量表示为

$$M(k) = \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{C}(k-i)/0.6745. \quad (3.9)$$

根据给定的 ξ 截集作为真假目标的分类界线, 与 $M(k)$ 比较得到最终分类。为提高分类和航迹互联质量, 在图2推理部分包括已知航迹寻找相关状态的正向推理和已知点迹状

态寻找相关航迹的反向推理。最终根据正反向推理结果,把输入点迹分为目标、假目标以及可疑点迹等。

四、变结构自校正 α - β 滤波器

α - β 滤波器与卡尔曼滤波器相比, α - β 滤波器具有许多优点。然而其本身的结构又决定了它不能精确地跟踪机动目标。为此本文提出了变结构自校正 α - β 滤波器,它主要由机动检测器、改进型 α - β 滤波器^[3]以及自校正 α - β 滤波器^[4]构成。当目标处于机动时采用自校正 α - β ,否则采用改进型 α - β 滤波器。可见,为驱动该滤波器首先要判断何时开始机动,其次要确定自校正规律。

1. 自校正规律

设 α - β 滤波器矩阵方程为

$$\hat{X}(k) = A(k)\hat{X}(k-1) + K(k)Z(k), \quad (4.1)$$

其中
$$A = \begin{pmatrix} 1 - \alpha & (1 - \alpha)/T \\ -\beta/T & (1 - \beta) \end{pmatrix}, \quad X(k) = (x(k) \dot{x}(k))',$$

$Z(k)$ 为 k 时刻测量值, $\hat{X}(k)$ 为 k 时刻滤波值,增益阵为 $K(k) = (\alpha(k) \beta(k)/T)'$, T 为采样周期。这时滤波值协方差阵为

$$\begin{aligned} P(k) &= E\{[\hat{X}(k) - E(\hat{X}(k))][\hat{X}(k) - E(\hat{X}(k))]'\} \\ &= A(k)P(k-1)A'(k) + B(k)R(k)B'(k), \end{aligned} \quad (4.2)$$

式中 $R(k)$ 为 k 时刻测量误差的方差。

使 $P(k) \rightarrow \min$ 的 $\alpha(k)$, $\beta(k)$ 为^[4]

$$\alpha(k) = M/(M + R(k)), \quad (4.3)$$

$$\beta(k) = (TP_{11}(k-1) + T^2P_{22}(k-1))/(M + R(k)), \quad (4.4)$$

其中

$$M = P_{11}(k-1) + 2TP_{12}(k-1) + T^2P_{22}(k-1), \quad (4.5)$$

$R(k)$ 由次优无偏 MAP 估值器求出^[8]。

为提高系统的鲁棒特性,可用胡倍尔 (Huber) 第二提案^[9]剔去野值。即

$$\psi(\tilde{Z}) = \begin{cases} \tilde{Z}, & |\tilde{Z}| \leq g, \\ g \operatorname{sgn}(\tilde{Z}), & |\tilde{Z}| > g, \end{cases} \quad (4.6)$$

其中 $\tilde{Z}(k)$ 为新息序列。

胡倍尔根据极大极小 M 估计,给出门限 g 与噪声污染度 ε 的关系。然而在实际系统中难以实时计算 ε ,为此本文取 $g = (2-3)\sigma$, σ 为噪声方差。在具体系统设计中为解决线性化目标动态模型产生大动态误差问题,采用直角坐标系描述机动目标状态方程,观测方程取极坐标系,并通过雅可比变换,进行两个坐标系的转换。

2. 机动检测器

机动检测算法是一种判决机制。为此构造观测统计量 $L(k)$ 为

$$L(k) = \tilde{Z}^2(k)V^{-1}(k) + \tilde{Z}^2(k-1)V^{-1}(k-1), \quad (4.7)$$

其中 $\tilde{Z}(k)$ 为 k 时刻残差, $V(k)$ 为残差的方差。根据皮尔逊 χ^2 检验定理,可做出如下判

断:

$$\begin{aligned} L(k) > L_s: & \text{目标机动, 自校正 } \alpha\text{-}\beta; \\ L(k) \leq L_s: & \text{目标无机动, 改进型 } \alpha\text{-}\beta. \end{aligned} \quad (4.8)$$

式中门限 L_s 由 χ^2 分布表查得. 门限 L_s 愈高, 虚警概率 P_f 愈小, 遗漏概率愈大, 且判定滞后时间愈长. 反之, L_s 愈低, P_f 愈大, 遗漏概率愈小. 因此可根据实际系统折中考虑 L_s 的大小和连续过门限的次数.

五、实验结果

本测试系统主要由模拟信号源、信号处理器(二维 FFT)、检测器、估值器、数据处理

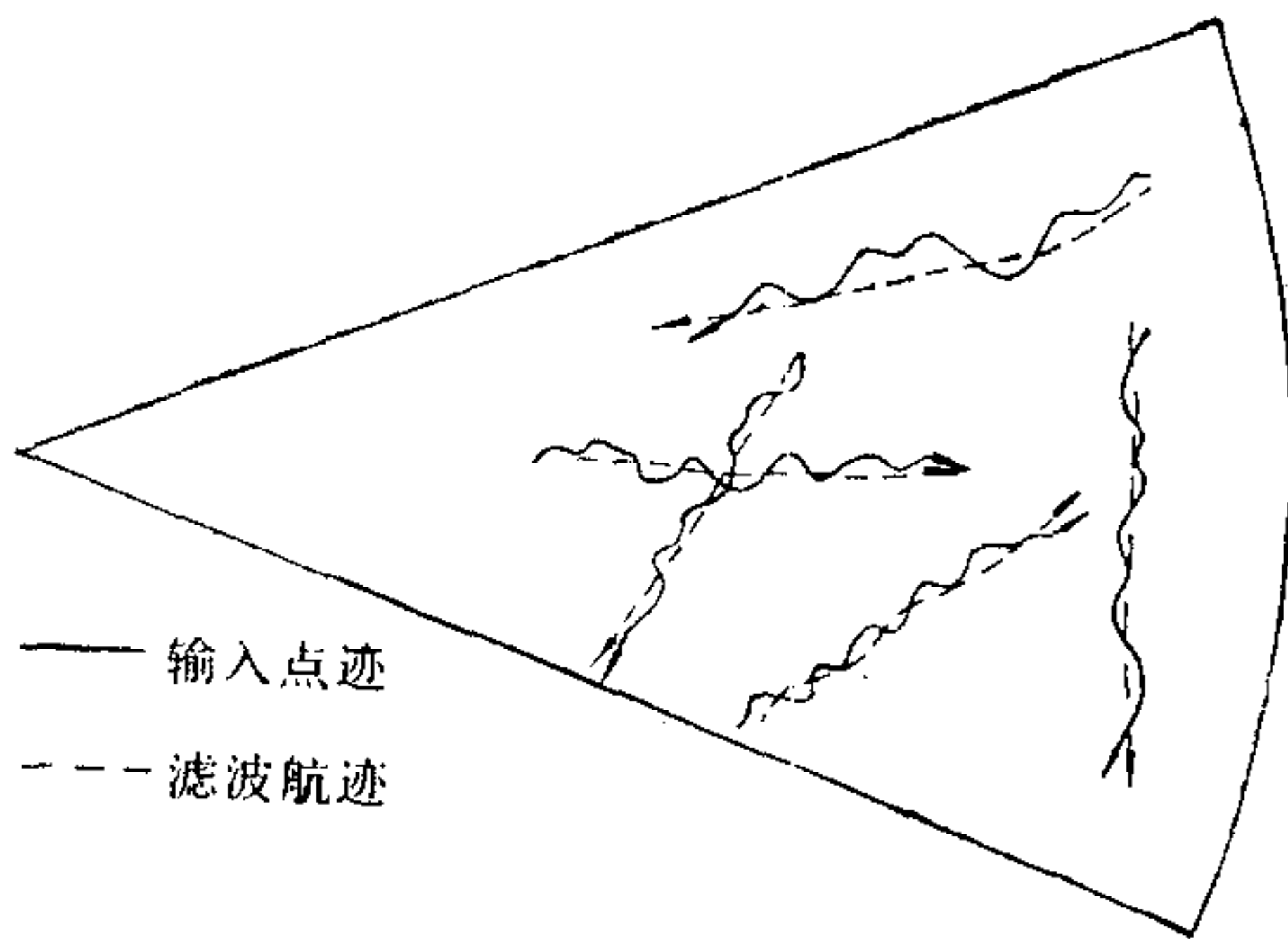


图3 航迹

器、航迹处理器、态势显示器等六台微型机联网构成. 设目标为舰船, 海杂波为主要噪声. 图中模拟信号源实时模拟在强海杂波下目标的回波信号, 并把信号送给二维 FFT 处理机进行谱分析. 其运算结果一路送给谱线显示器, 另一路送给检测器进行检测. 估计器将消去“泄漏假目标”, 并进行估值. 最后由数据处理器进行自动录取、跟踪及航迹处理等后, 数据传输到态势显示器. 图3表示了态势显示器上的几条典型的航迹.

表1比较了变结构自校正滤波器和卡尔曼滤波器估计方差. 表中 N 为采样次数, E_k 为卡尔曼滤波器, E_a 为自校正滤波器. 测试结果证明, 对各种运动目标来说, 当采样次数大于15时, 其精度通常与卡尔曼滤波器相一致, 且计算量比卡尔曼滤波器减少一半以上.

表 1

N	5	10	15	20	25	30	40	50	100
E_k	0.51	0.63	0.70	0.72	0.83	0.96	0.98	0.99	0.99
E_a	0.60	0.61	0.68	0.73	0.91	0.99	0.98	0.994	0.996

结束语

从系统观点综合考虑剔除假目标、跟踪算法、航迹处理以及软硬件实施是提高多目标跟踪系统性能的关键, 其性能是以最终的航迹质量为准则的. 本文提出的特征向量法, 无论是基于知识工程技术的真假目标分类还是变结构自校正 $\alpha\text{-}\beta$ 滤波器等均可看作是兼顾系统误差和跟踪快速性两个指标的一种方法.

参 考 文 献

- [1] Chang Chawbing et al., Application of State Estimation to Target Tracking, *IEEE. Trans. AC-29*(1984), 2, 98—109.
- [2] 权太范, 专家系统及其在雷达数据处理系统中应用, *自动化技术与应用*, 4(1985), 4, 65—68.
- [3] Quan taifan and Liu yongtan, A New Method to Improve Tracking Accuracy of Maneuvering Targets, the Third Conference on Control Engineering, Australia, (1985), 201—204.
- [4] Liu yongtan, Quan taifan and Guo jian, Design of Self-tuning Filter, International Confernce on Digital Singnal Processing, Italy, (1987), 112—119.
- [5] Liu yongtan, Quan taifan and Qin ling, Desgin of Prediction Control System for a Variant Construction and Multiple Targets, SICE'87, Japan, (1987), 352—355.
- [6] Waterman D. A., A Guide to Espert Systems, Addison—Wesley, Reading, Mass, (1986).
- [7] 王子才、权太范, 设计最优调节器的混合法, *自动化学报*, 12(1986), 1, 96—99.
- [8] Soeda, T. et al., A Suboptimal Identification of Noise Covariance in Discrete Time Linear Systems. *Int. J. Control*, 27(1979), 3, 393—406.
- [9] Huber, P. J., Robust Statistics, Johu wileg, (1981).

THE FAST TRACKING SYSTEM FOR MULTIPLE TARGETS

LIU YONGTAN QUAN TAIFAN

(Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology)

ABSTRACT

In this paper, a new method is proposed for the design of a multiple target tracking system from the system viewpoint. It consists mainly of the optimal design of system structure, the target classification based on knowledge engeneering, and the variable structure self-tuning tracking filter. Practical measured values, some of which are presented here, have shown that the tracking accuracy and real-time response have been improvedd.

Key words ——Maneuvering target tracking; estimator; knowledge engineering; fuzzy set.