

文章编号: 1001-893X(2012)10-1624-04

基于小波变换的异类传感器机动目标的模糊航迹关联^{*}

张波雷, 许蕴山, 夏海宝

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要:针对雷达和电子对抗测量对机动目标的航迹关联问题,提出了一种基于小波变换的模糊航迹关联算法。首先通过小波分析对航迹序列进行去噪、粗关联,然后根据目标的特性建立模糊因子集,进行精关联。仿真实验表明:与传统的加权法相比,该算法有效地解决了机动目标航迹关联问题,并提高了航迹关联的概率。

关键词:机动目标;航迹关联;小波变换;异类传感器;扩展卡尔曼滤波

中图分类号: TN974; TP391 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.10.013

Maneuvering Targets Fuzzy Tracks Correlation of Heterogeneous Sensor Based on Wavelet Transform

ZHANG Bo-lei, XU Yun-shan, XIA Hai-bao

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: For the tracks correlation problem of radar and ESM(Electronic Support Measurement) to the maneuvering targets, a new fuzzy tracks correlation algorithm is proposed based on the wavelet transform. Firstly, the target track data sequence is processed to remove the noise and cursorily correlated, and then the fuzzy factor subset is determined to accomplish elaborately correlating according to the properties of the targets. The simulation result indicates that the proposed algorithm solves the problem of maneuvering target tracks correlation compared with the traditional weighted algorithms, and also increases the correct probability of tracks correlation.

Key words: maneuvering targets; tracks correlation; wavelet transform; heterogeneous sensors; extended Kalman filter

1 引 言

在传感器网络体系中,雷达和电子对抗测量(ESM)作为有源和无源传感器的典型代表,在传感器网络中占据相当重要的地位。如何将两者测得的数据进行融合,充分发挥其互补性,一直是国内外研究的热点。航迹关联作为数据融合中的关键技术,随着“打击链”技术的不断发展,异类传感器的航迹关联技术显得更加重要。目前,航迹关联的算法主要分为两类,一种是基于统计的方法^[1-2],另一类是

基于模糊数学的方法^[3-4]。基于统计的方法虽然较早提出,但其计算量大,并且随着目标数目的增多,特别是当目标机动时,其关联概率明显下降^[5]。模糊法具有良好的适应性,但其系统参数设置需要经过大量的实验来确定^[6]。

文献[7-9]将小波变换引入到航迹关联的研究当中,其主要思想是先对航迹进行小波分解,对目标航迹进行去噪和特征提取,然后对小波信号进行重构实现关联。文献[10-12]介绍了基于模糊数学的方法对航迹进行关联。本文通过对机动目标的特性

^{*} 收稿日期:2012-03-27;修回日期:2012-05-09

基金项目:陕西省电子信息系统集成重点实验室基金(201107Y03)

Foundation Item: Research Fund of Shaanxi Key Laboratory of Electronic Information System Integration(201107Y03)

进行分析,提出了一种基于小波变换的机动目标异类传感器模糊航迹关联方法。该算法利用扩展 Kalman 滤波(EKF)得到目标航迹,通过小波变换对目标航迹进行去噪,得到航迹的整体走势,然后建立模糊子集,实现航迹的精关联。理论分析和仿真实验证明了该算法的有效性和合理性。

2 目标状态方程和传感器量测方程

本文研究的是机动目标的航迹关联特性,目标的运动模型是非线性模型,故本文采用一阶扩展 Kalman 滤波对系统进行描述。

假设系统的状态方程为

$$x(k+1) = f(k, x(k)) + W(k) \quad (1)$$

式中, $x(k) \in R^n$ 是 k 时刻的状态向量; f 是一个向量函数,描述了系统的状态转移映射; $W(k) \in R^n$ 为过程噪声,且服从均值为 0、协方差为 $Q(k)$ 的高斯白噪声。

传感器的观测方程为

$$z(k) = h(k, x(k)) + V(k) \quad (2)$$

式中, $z(k) \in R^m$ 是传感器在 k 时刻的观测向量; h 是一个向量函数,描述观测映射; $V(k) \in R^m$ 是量测噪声矩阵,且 $V(k)$ 与 $W(k)$ 相互独立,也服从均值为 0、协方差为 $R(k)$ 的高斯白噪声。

扩展 Kalman 滤波公式如下:

$k+1$ 时刻状态一步预测值为

$$\hat{x}(k+1|k) = f(k, \hat{x}(k|k)) \quad (3)$$

状态更新方程为

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1) \cdot [z(k+1) - \hat{z}(k+1|k)] \quad (4)$$

滤波器增益为

$$K(k+1) = P(k+1|k) h_x^T(k+1) S^{-1}(k+1) \quad (5)$$

观测一步预测误差协方差为

$$S(k+1) = h_x(k+1) P(k+1|k) h_x^T(k+1) + R(k+1) \quad (6)$$

滤波误差协方差更新方程为

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - K(k+1) \cdot S(k+1) K^T(k+1) \quad (7)$$

3 小波粗关联

在进行航迹关联时,将某个时间段内的目标航迹当做一段信号来处理,这样就可以利用小波分析的方法来处理航迹关联的问题。在整个过程中,低

频部分代表着信号的整体趋势,高频部分代表着信号的细节变化;相应地,在航迹关联过程中,其低频部分代表着航迹的整体发展趋势,而高频部分代表着噪声和干扰。

假定信号 $f(x) \in V_j$, 即:

$$f(x) = \sum_k a_{j,k} \varphi_{j,k}(x) \quad (8)$$

其中,系数 $\{a_{j,k}, k \in Z\}$ 为已知。如果我们希望将其分解为在 V_{j-1} 和 W_{j-1} 空间的两个分量之和,即:

$$f(x) = \sum a_{j-1,k} \varphi_{j-1,k}(x) + \sum d_{j-1,k} \varphi_{j-1,k}(x) \quad (9)$$

也就是由已知序列 $\{a_{j,k}\}$ 分别求出 $j-1$ 级的近似序列 $\{a_{j-1,k}\}$ 和 $j-1$ 级细节序列 $\{d_{j-1,k}\}$ 。此处只希望得到 $f(x)$ 向尺度空间 V_{j-1} 投影后所得到的概貌信号,故此处假定

$$f(x) = \sum a_{j-1,k} \varphi_{j-1,k}(x) \quad (10)$$

其中, $a_{j-1,k} = \langle f(x), \varphi_{j-1,k}(x) \rangle$ 为尺度展开系数。

假设两个传感器的时间已经配准,对同一目标的观测航迹分别为 $X_1(t)$ 和 $X_2(t)$,对观测航迹使用 Mallat 快速算法得到尺度函数的系数 a_{x_1} 和 a_{x_2} ,对尺度函数系数进行比较,即可判断两条航迹的整体走势。即 $\|a_{x_1} - a_{x_2}\|^2 \leq \gamma$, 其中 γ 为阈值,它近似等于 $\chi^2(s)$, s 表示 N 级小波分解后尺度系数的长度。若尺度函数系数在此阈值内,则认为两条航迹的整体走势相同。通过对航迹信号进行小波分解,得到了航迹的整体走势,对与目标航迹整体走势不相同的航迹予以舍弃,由于本文研究的是机动目标,故还需对剩余航迹进行进一步判定。

4 模糊精关联

4.1 模糊子集的建立

设模糊子集为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_n\}$, 其中 u_k 表示第 k 个模糊因素。对于各类传感器,可以用于航迹关联判断的模糊因素通常有:目标位置间、速度间、加速度、加速度变化率、航向之间和航向变化率之间的欧氏距离等模糊因素。对于雷达而言,可选择可用信息有目标的距离、位置、速度、航向等,而对于 ESM,对目标进行跟踪之后得到的航迹信息有:目标不同时刻的位置、速度、航向、机动性等。本文着重研究机动目标的航迹关联问题,因此我们选取 $U = \{u_1, u_2, u_3\}$ (u_1 = 目标加速度之间的欧氏距离, u_2 = 目标速度之间的欧氏距离, u_3 = 目标航向

夹角之间的欧氏距离)作为判断相似度的模糊子集。

4.2 权值的分配

权值的分配主要是反映各个相关因素对判决的重要程度。由于本文研究的是机动目标的航迹关联问题,故目标间的加速度变化应当是最重要的,其次应当是速度和航向夹角的变化。对上述因素集的权分配为 U 上的模糊集 $A = (a_1, a_2, \cdots, a_k, \cdots, a_n)$,其中 a_k 为第 k 个因素 u_k 所对应的权值,且 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$,权值的选取根据所对应因素的重要程度来确定。对应前面选取的模糊子集,对应的权值为 $A = (a_1, a_2, a_3)$ 。由于目标的加速度变化是最重要的,速度和航向夹角间的变化影响较小,故速度和航向夹角间的变化的模糊因素权值设置为相对较小的值。

4.3 隶属度函数的选择

隶属度函数可以选择正态分布、柯西分布、居中分布或降 Γ 分布等函数形式。本文选用正态隶属度函数,基于第 l 个因素判为两航迹相似的隶属度为 $\mu_{ij}(l) = \exp[-\tau_k((\mu_{ij}(l))^2/\sigma_k^2)]$, $l = 1, 2, \cdots, n$

(11)

根据式(11)可以得到局部传感器 1 的 n_1 条航迹和局部传感器 2 的 n_2 条航迹之间的模糊关系,采用如下模糊关联矩阵表示,即:

$$F(k) = \begin{bmatrix} f_{11}(k) & f_{12}(k) & \cdots & f_{1n_2}(k) \\ f_{21}(k) & f_{22}(k) & \cdots & f_{2n_2}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n_11}(k) & f_{n_12}(k) & \cdots & f_{n_1n_2}(k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

在模糊关联矩阵的基础上,采用最大综合相似度和阈值判别的原则对航迹之间的关联性进行分析,其过程如下:

- (1)在 $F(k)$ 中找到最大元素 $f_{ij}(k)$,若 $f_{ij}(k) > \epsilon$ (参数 ϵ 是阈值,通常取 $0.5 \leq \epsilon \leq 1$),则判定局部传感器 1 的航迹 i 和局部传感器 2 的航迹 j 为关联;
- (2)从矩阵 $F(k)$ 中划去 $f_{ij}(k)$ 所对应的行、列元素,得到新的降阶模糊关联矩阵,但原矩阵的行、列号(即航迹号)不变;
- (3)对 $F(k)$ 重复过程(1)和(2),直至模糊关联矩阵中的所有元素均小于 ϵ 为止,剩下的元素所对应的行、列号在 k 时刻为不关联航迹,其输出形式根据整个航迹的历史来确定,这样就完成了 k 时刻两局部节点间航迹的相似性检验。

5 仿真分析

为了验证此算法的有效性,对算法进行了 Monte Carlo 仿真验证,假设时空配准已经完成,为了问题讨论的方便,此处只对目标航迹的一个方向(X 轴方向)进行分析,图 1 为该算法的流程图。

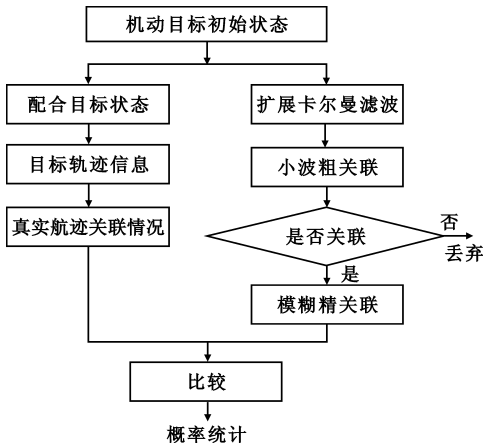


图 1 算法流程
Fig. 1 Flowchart of algorithm

假设两部传感器的噪声方差分别为 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 0.5$,对目标航迹进行小波变换时,采用 Sym2 小波函数,分解层次为 3 级。模糊因素集选为 U ,与之相对应的权值向量为 $A = \{a_1 = 0.5, a_2 = 0.3, a_3 = 0.2\}$ 。

表 1 模拟了 10 批机动目标的运动情况。

表 1 目标的机动情况				
Table 1 Maneuvering situation of targets				
目标	初始速度 /(m·s ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)		
		扫描周期 1 ~ 5 s	扫描周期 6 ~ 20 s	扫描周期 21 ~ 30 s
T1	220	0	10	- 30
T2	400	0	15	- 50
T3	- 150	0	20	- 40
T4	450	0	- 35	40
T5	305	0	40	- 20
T6	550	0	20	- 80
T7	610	0	- 10	30
T8	- 240	0	- 15	45
T9	460	0	50	- 30
T10	- 310	0	- 25	30

图 2 为正确关联概率和错误关联概率,从仿真结果可以看出,近邻法在关联时的正确概率为 0.72 ~ 0.85,而本文算法的正确概率为 0.88 ~ 0.93,正确概率明显高于近邻法,且正确关联概率相对比较稳定,当回波密度较大时,收敛速度也相对较快,从而证明了该算法的有效性。

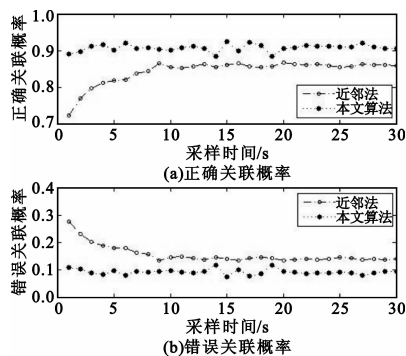


图 2 关联概率
Fig.2 Probability of correlation

6 结束语

本文研究了异类传感器机动目标的航迹关联问题,提出了一种基于小波变换的模糊航迹关联算法。该算法通过小波变换滤除高频噪声的同时,对航迹进行粗关联,再结合目标本身的特性,建立模糊子集,利用模糊算法对航迹进行精关联。仿真实验表明该算法具有关联概率较高的优点,在机动目标航迹关联方面的有效性和合理性,目前此方法已在某型机载传感器信息融合仿真与评估系统中得到实际应用。而小波分析作为一种有力的工具,许多特性可以应用到数据融合领域中来,如何利用小波的特性并进一步优化算法,将是下一步的主要研究方向。另外,在基于模糊理论进行权值确定时,由于缺乏先验知识,对权值的确定还得更多地依靠经验,如何更有效、准确地确定模糊权值,也将是下一步研究的重要方向。

参考文献:

- [1] 何友,王国宏.多传感器信息融合及应用[M].北京:电子工业出版社,2007.
HE You, WANG Guo-hong. Multi-sensor Information Fusion and Application [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜.多源信息融合[M].北京:清华大学出版社,2010.
HAN Chong-zhao, ZHU Hong-yan, DUAN Zhan-sheng. Multi-source Information Fusion [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 刘普寅,吴孟达.模糊理论及其应用[M].长沙:国防科技大学出版社,1998.
LIU Pu-yan, WU Meng-da. Fuzzy Theory and Application [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [4] Li X R. Track Association and Track Fusion with Nondeterministic Target Dynamics[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 659 – 688.

- [5] 张池平.多传感器信息融合方法及其在空间目标识别中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
ZHANG Chi-ping. Methods of Multi-sensor Data Fusion and their Application in the Spatial Targets Recognition [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] 冉金和,张玉.基于航迹隶属度的分布式系统数据融合算法[J].信号处理,2011,27(2):226 – 229.
RAN Jin-he, ZHANG Yu. Distributed System Data Fusion Algorithm Based on Track Fuzzy Membership [J]. Signal Processing, 2011, 27(2): 226 – 229. (in Chinese)
- [7] 徐毓,金以慧.多尺度小波变换提取趋向的异步航迹关联方法[J].信号处理,2003,19(2):432 – 436.
XU Yu, JIN Yi-hui. Asynchronous Tracks Association Based on Tendency with Wavelet Transform [J]. Signal Processing, 2003, 19(2): 432 – 436. (in Chinese)
- [8] 程正兴,杨守志,冯晓霞.小波分析的理论算法进展和应用[M].北京:国防工业出版社,2007.
CHENG Zheng-xing, YANG Shou-zhi, FENG Xiao-xia. Wavelet Analysis Theory Algorithm Evolving and Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 张鹏里.多传感器多目标航迹关联技术及其在数据链中的应用[D].西安:西安电子科技大学,2005.
ZHANG Peng-li. Multi-sensor Multi-targets Tracks Correlation Technology and Application in Datalink [D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)
- [10] Wide P. Fuzzy Logic Data Correlation Approach in Multi-sensor Multi-target Tracking System [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 76(2): 195 – 209.
- [11] 陈非石,孔祥维,赵坤,等.双红外传感器模糊序贯航迹关联算法与仿真[J].系统仿真学报,2004,16(8), 1652 – 1664.
CHEN Fei-shi, KONG Xiang-wei, ZHAO Kun, et al. Algorithm and Simulation of Dual-band Infrared Sensors Fuzzy Sequential Track Correlation [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(8), 1652 – 1664. (in Chinese)
- [12] 丁峰,姜秋喜.分布式系统模糊关联算法分析[J].计算机仿真,2008,25(2):104 – 107.
DING Feng, JIANG Qiu-xi. An Algorithm for Fuzzy Correlation of Tracks from Distributed Systems [J]. Computer Simulation, 2008, 25(2): 104 – 107. (in Chinese)

作者简介:

张波雷(1985—),男,陕西兴平人,2008年于空军工程大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为雷达信号与信息处理;

ZHANG Bo-lei was born in Xingping, Shaanxi Province, in 1985. He received the B.S. degree from Air Force Engineering University in 2008. He is now a graduate student. His research concerns radar signal and information processing.

Email: zhangbolei@163.com

许蕴山(1968—),男,陕西西安人,教授、硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理;

XU Yun-shan was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1968. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research direction is signal and information processing.

夏海宝(1970—),男,甘肃庆阳人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理;

XIA Hai-bao was born in Qingyang, Gansu Province, in 1970. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research direction is signal and information processing.