2014年12月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2014)06-0865-05

基于 FISST 的多源异类信息配准算法

叶 宏^a,曹学军^b,李 军^a,李世玲^a,屈新芬^a,杨战平^a

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对超高速、超强机动等特定目标的探测和跟踪问题, 雷达等传统传感器的量测值 少, 难于获得有效的探测跟踪, 还需要人工情报、专家库信息等异类信息, 对于这些信息的配准 融合处理尚无有效方法。基于有限集合统计学(FISST)理论, 在对几种异类信息进行统一表示并给 出相应的滤波处理方法基础上, 提出了焦点目标的匹配概率(匹配度)作为异类信息配准指标, 并采 用卡尔曼证据滤波方法进行计算。最后给出了仿真实例, 验证了方法的有效性和可行性。

关键词:多源信息;有限随机集;信息融合;系统配准

中图分类号:TN953;V243.2 文献标识码:A doi:10.11805/TKYDA201406.0865

FISST based dissimilar information of multi-source registration algorithm

YE Hong^a, CAO Xue-jun^b, LI Jun^a, LI Shi-ling^a, QU Xin-fen^a, YANG Zhan-ping^a

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: It is hard to detect and track special targets with super high-speed and super strongmaneuverability efficiently, only by traditional sensors such as radar. Therefore, intelligence information and expertise base etc. should be needed. Nevertheless, there are no practicable means for the management of multi-source heterogeneous information registration. The characteristics of special targets are introduced and analyzed firstly. Some kinds of heterogeneous information are expressed in Finite-Set Statistics(FISST) theory and some corresponding filtering algorithms are put forward. The matching probability of focused targets is taken as the registration index of heterogeneous information, and the results are computed with Kalman evidence filter. Numerical simulation validates the feasibility of the proposed method.

Key words: multi-source information; Finite-Set Statistics; information fusion; registration algorithm

多源异类信息是指完全不同质的信息,如人工情报信息、传感器对目标的位置、速度量测值等。从融合层次 看,主要有数据层级、特征层与决策级融合3个层次,考虑多源异类信息的特殊性,数据级融合存在本质的困难, 现有的基本思路是在特征层或决策级上进行多源异类信息的融合方法研究。以X-37B 空天飞行器^[1-3]目标为例, 它的最大飞行速度可达到25 Ma(1 Ma ~ 340 m/s=1 224 km/h),飞行高度在444 km~281 km 之间,X-37B 曾多次改 变飞行轨道和飞行方向,神秘失踪,它的大范围机动变轨能力使得其难以探测和跟踪,仅能获得少量的传感器量 测值,人工情报的支持、多传感器的大范围覆盖探测以及智能专家数据库的分析推理都是必要的系统组成。

由于多源异类信息的异质特性,要实现融合处理,首先要解决的是异类信息的统一描述方法,而经典的数学 工具很难实现,应用随机有限集合理论来描述异类信息,得到统一的描述形式是可行的。而完成多源异类信息的 融合关键步骤是建立时间配准、空间配准和 DS 证据合成算法^[4]。

1 有限集合统计学理论

有限集合统计学(FISST)理论^[5-8]是把研究随机变量的统计理论推广到研究随机有限集的统计理论,1994年由 美国洛克希德马丁公司的 Mahler 提出,结合近些年加以完善的有限集合统计学理论,为信息融合领域的问题提 出一种可能的解决框架。在多传感器多目标跟踪领域,根据单目标单传感器的规范 Bayesian 方法 推广到多目标多传感器领域,并采用有限集合统 计学理论描述状态估计问题,证明模糊逻辑、D-S 理论和基于规则的推理是规范 Bayesian 方法的特 例或推论。但与其他自顶向下方法一样,也存在 计算瓶颈。对于多目标多传感器的复杂情况,提 出了多目标滤波的近似计算方法,包括粒子滤波 近似方法、多伯努利近似方法和多目标矩近似计 算法^[8]。



有限随机理论对各种异类信息方法的统一描



述如图1所示。从图1可看出,不同来源的各种异类信息,都可采用随机集(子集)的方式以统一形式描述。

以对空天飞行器 X-37B 的监测为例。首先对能够获得的信息进行分类,其中人工情报属于先验信息,可根据模糊集理论进行数学描述;而专家库信息采用推理规则—条件事件代数进行组合描述;雷达或其他传感器量测值的统计数据是传统的观测数据。从有限随机集合的角度看,这几种信息或量测数据都可以用集合来表示,目标的位置是集合的构成元素,且具有相应的时间属性。

2 异类信息配准算法

对于异类信息进行融合处理的关键与传统多传感器量测值一样,在于建立时间配准和空间配准。这些广义量 测值都具有相应的时间属性,由于时钟频率和量测周期的原因,传统量测值的量测时间存在时间随机误差,但相 对比较精确,对应的多传感器时间配准理论和应用相对来说比较简单且成熟。广义量测值的时间配准无法直接采 用已有的成熟算法,经过分析比较,存在以下几方面的原因。

模糊 DS 量测值 O_{k+1} ,规则量测值 ρ_{k+1} ,以及模糊逻辑量测值 g_{k+1} 信息本身没有严格的时间戳信息,即量测时刻,即使有,比如人工情报的获取时间只需要满足相对于雷达传感器量测时刻之前就可以,但是信息本身所蕴含的时间特性,如在某个时间目标将会进行机动变轨,传感器就可以根据这个信息预先瞄准某个范围进行扫描探测,获得兴趣目标的量测信息;而推理规则得出的结论为,对从传统量测值获得的目标运动特性进行专家推理且得出探测到的目标是否为兴趣目标。相应的空间配准也是一样的原理。因此,上述几种异类信息的时空配准的目的与传统传感器量测值的时间、空间配准完全不同,而是一种证据合成算法的证据误差的估计与补偿。

2.1 卡尔曼证据滤波方法

通过 FISST 方法定义异类量测值并建立相应的似然函数,这些量测值和似然函数非线性、非高斯,其中既 包括传统的线性高斯传感器量测值 z_{k+1} ,也有 O_{k+1} , ρ_{k+1} 以及 g_{k+1} 。传统的卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)、扩展 卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)等方法无法处理,但采用卡尔曼证据滤波(Kalman Evidential Filter, KEF)^[7]方法可以处理这些类型的广义量测数据。

定义:模糊 DS 状态 $\mu(f)$, f(x) 为模糊成员函数。则

$$f(x) = \hat{N}_C(x - x_0) \triangleq \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - x_0)^{\mathrm{T}} C^{-1}(x - x_0)\right\}$$
(1)

$$f\left(x\mid\mu\right) \triangleq \frac{1}{\left|\mu\right|} \sum_{f} \mu\left(f\right) f\left(x\right)$$
⁽²⁾

式中: $\hat{N}_{c}(x-x_{0})$ 是正态分布函数估计; $|\mu| \triangleq \sum_{f} \mu(f) \int f(x)$ 。

EAP(期望后验概率)估计:

$$x_{k+1|k+1}^{\text{EAP}} = \frac{\sum_{i,j} \mu_{i,j} \sqrt{\det E_{i,j}} e_{i,j}}{\sum_{i,j} \mu_{i,j} \sqrt{\det E_{i,j}}}$$
(3)

式中: $\mu_{i,j}$ 为权值 $\mu_{k+1|k+1}$ 的质量函数; $e_{i,j}$ 和 $E_{i,j}$ 是由标准 KF 形式 得到的 EKF 估计余差和期望表示。

卡尔曼证据滤波算法流程如图 2 所示。

2.2 异类信息配准指标

由于多源异类信息的数据形式多种多样,包括了多传感器探测的多目标的未知数量、目标的未知身法和运动方程,图像传感器获得的图像数据,传感器系统采集或分发的目标特征、自然语言表述、规则等模糊量测值,使得传统的滤波估计方法无法进行融合处理。而基于有限集合统计理论能给出统一的表述形式,相应的贝叶斯滤波能够扩展到证据滤波方法,能够采用模糊证据来处理多源多目标估计,而不是与原来的滤波估计方法一样,只采用单一的距离、角度等量测值,仅仅实现量测报告——航迹形式的检测、识别与跟踪。

由于原始数据的多样化、异质化和处理理论方法的不同,相 应的配准融合指标已不能延用传统的时间、空间配准指标。如前 所述,异类信息的时空配准的目的与传统传感器量测值的时间、 空间配准完全不同,是一种证据合成算法的证据误差的估计与补 偿。因此把各异类信息包含的时空区域的焦点目标的匹配概率 *p_m* 作为异类信息配准指标。



异类传感器信息报告^[9-10]表示形式为:

 $S/T/t/a/l/w/h/x/y/z/v_x/v_y/v_z/a_x/a_y/a_z//, 其中, S 是传感器类型, T 是目标类型, t 为量测时间, a 是 目标行为, l 是目标机身长度, w 为翼展, x,y,z 是量测到的目标坐标, <math>v_x,v_y,v_z$ 是相应方向的速度, a_x,a_y,a_z 是相应 的加速度。

2.3 算法主要步骤

在融合中心收到不同传感器或信息源的量 测报告后,首先需要转换为有限随机集形式来表 示,并对数据质量进行门限过滤,去除异常数据, 然后通过 KEF 方法对量测报告、专家知识与模 糊证据信息进行滤波处理,得到匹配概率估计, 即异类信息的配准偏差,最后对目标信任度进行 补偿,得到匹配概率补偿后的焦点目标信任度。 焦点目标匹配度量算法流程如图 3 所示。

3 数值实例

多源异类信息的数值仿真算例场景设置:一个高速高机动飞行目标,飞行器初始轨道是近地点 403 km,远地点 420 km,初始速度为 15 Ma,



Fig.3 Flow diagram of method for focus target matching metric 图 3 焦点目标匹配度量算法流程图

某次机动后轨道变为近地点 281 km, 远地点为 292 km, 速度达到 25 Ma。则目标飞行器在该时间段内的飞行速 度范围是 15 Ma~25 Ma(或 5 100 m/s~8 500 m/s), 相应飞行高度范围是 281 km~420 km, 目标飞行器在 XY 平面的 飞行轨迹如图 4 所示。

传感器量测信息: 传感器波束半径 $r_w=0.6^\circ$, 当目标飞行器飞行高度范围 $R_{target} \in (281,444)$ km 时,在不考虑 雷达天线增益、扫描速度以及回波信号接收等问题的情况下,由简单的雷达方程^[9]估算可得: 波束覆盖范围半径 $r_c \in (2~942,4~648)$ m。传感器在时间 $t_1 \sim t_2$ 获得目标飞行器的 2 个量测值(位置,速度);时间 $t_2 \sim t_3$ 内,目标消失;在时间 $t_3 \sim t_4$ 获得目标飞行器的 3 个量测值。

专家库信息表述: *EXT / X*37*B / t / a*/8.9/4.5/2.9/ $x/y/z/v_x / v_y / v_z / a_x/a_y/a_z//$,其中,*EXT*表示信息来源是专家库。



获得的人工情报信息:在时段 t2~t3内目标飞行器将会执行机动变轨指令,转换成报告格式则有:

INT/X37B/t₂~t₃/OM/8.9/4.5/2.9/-/-/-/-/-/-/-/// SAR 雷达^[11-12]在 t₃~t₄时间段探测到的目标飞行

器信息表述:

 $SAR/-/t_3 \sim t_4/OM/8.9/4.5/2.9/-/-/-/-/-/-/-////$

3D 雷达在 $t_1 \sim t_2$ 时间段探测到的目标飞行器信息 表述:

SEN1/X37B/t₁~t₂/CV/-/-/-/x/y/z/v_x/v_y/v_z/0/0/0//
SEN1/X37B/t₁~t₂/CV/-/-/-/x/y/z/v_x/v_y/v_z/0/0/0//
3D 雷达在 t₃~t₄时间段探测到的目标飞行器信息

表述:

$$\begin{split} & SEN1/X37B/t_3 \sim t_4/CV/-/-/-x/y/z/v_x/v_y/v_z/0/0/0//\\ & SEN1/X37B/t_3 \sim t_4/CV/-/-/-x/y/z/v_x/v_y/v_z/0/0/0//\\ & SEN1/X37B/t_3 \sim t_4/CV/-/-/-x/y/z/v_x/v_y/v_z/0/0/0// \end{split}$$

图 5 是异类信息在 XY 平面上的时空分布。表 1 是各异类信息报告相应的置信概率以及估计的目标 编号,通过对信息概率的处理,最后得到量测值的后 验概率曲线图(如图 6 所示)。从图中可以得到,在 8 个异类信息得到目标航迹的匹配概率为 *p*_m=0.85,置 信概率属性可作为决策依据。

4 结论

对于异质传感器的量测数据的研究较多,如雷达、电子支援侦察(Electronic Support Measure, ESM)、

表1 异类信息置信概率 Table1 Confidence probability of heterogeneous measurements

Table1 Confidence probability of heterogeneous measurements			
target no.	estimated I.D.	reports no.	probability
1	1	1	0.99
1	1	2	0.98
1	1	3	0.98
1	2	4	0.99
1	3	5	0.95
1	4	6	0.98
1	4	7	0.98
1	4	8	0.98



图 6 量测值的后验概率

红外等异质传感器,但它们的量测数据均为目标斜距、方位、仰角等数据信息,采用现有的配准融合方法是完全 可以处理的。而对于特定目标,仅获得少量的传感器探测数据不能满足实际应用需要,且还需要人工情报信息、 专家库信息等不同类别的多源信息,要对这几种信息进行融合处理,需要采用新理论和方法。本章针对特定目标 的监视与探测系统在信息融合方法方面所遇到的问题,简单介绍了有限随机集合理论,给出了适用的滤波处理方 法,提出了异类信息配准融合指标,通过数值仿真实例,验证了算法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] 谭立忠,朱风云. 美国 X-37B 轨道试验飞行器发展研究[J]. 飞航导弹, 2011(6):33-36. (TAN Li-zhong, ZHU Feng-yun. Research on orbit experimental vehicle:X37B of USA[J]. Winged Missiles Journal, 2011(6):33-36.)
- [2] 李想.太空霸天虎深度解析美国 X-37B 空间机动飞机器[J].现代兵器, 2010(9):16-22. (LI Xiang. Deep analysis on space shuttle:X-37B of United States[J]. Modern Weaponry, 2010(9):16-22.)
- [3] Jameson A D. X-37 space vehicle: starting a new age in space control[R]. Air Command and Staff Coll., Maxwell AFB, AL, 2003(U0305).
- [4] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜. 多源信息融合[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2010. (HAN Chong-zhao,ZHU Hong-yan,DUAN Zhan-sheng. Multisource Information Fusion[M]. 2nd ed. Beijing:Tsinghua University Press, 2010.)
- [5] Goodman I R, Hung T N. Mathematics of Data Fusion[M]. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [6] Mahler R P. "Statistics 101" for multisensor, multitarget data fusion[J]. IEEE A&E systems magazine, 2004, 19(1):53-64.
- [7] Mahler R P. The random-set approach to data fusion[J]. SPIE, 1994,2234:287–295.
- [8] Mahler R P. Multisource-multitarget Information Fusion[M]. [S.I.]:Artech house, 2007.
- [9] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. 2nd ed. [S.l.]:McGraw-Hill Companies, 1990.
- [10] Mahler R P S,Leavitt P,Warner J,et al. Nonlinear filtering with really bad data[C]// SPIE Conference on Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recongnition VIII. Orlando, Florida:[s.n.], 1999:59-70.
- [11] 王维莉,张顺生,孔令坤. 一种基于 DCFT 的三维 ISAR 成像方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(5):546-550.
 (WANG Wei-li,ZHANG Shun-sheng,KONG Ling-kun. Three-dimensional ISAR imaging based on DCFT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(5):546-550.)
- [12] 高叶盛,朱岱寅.环视 SAR 成像处理中的几何失真校正方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,6(3):297-302. (GAO Ye-sheng,ZHU Dai-yin. Geometric distortion correction in the circular scanning SAR imaging processing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,6(3):297-302.)

作者简介:



叶 宏(1976-),男,四川省三台县人,在 读博士研究生,助理研究员,主要研究方向为 信息融合技术、计算机应用技术.email:yehoon @163.com.

屈新芬(1972-), 女,四川省邻水县人,博士,副研究员,主要研究方向为信号与信息处理、组合导航等.

曹学军(1974-),男,重庆市人,助理研究员, 主要研究方向为数学仿真计算.

李 军(1970-),男,江西省上饶市人,研究员,主要研究方向为信号与信息处理.

李世玲(1972-), 女,重庆市人,博士,研究员,主要研究方向为计算机控制与仿真、模式识别等.

杨战平(1966-),男,四川省绵阳市人,研究员,博士生导师,主要研究方向为复杂系统的分析与综合、信息融合技术等.