

多无源传感器之属性信息数据关联的规则与结构模型

鹿传国¹, 冯新喜¹, 孔云波¹, 张迪^{2,3}, 曾蓉⁴

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 中国航空博物馆, 北京 102211;
3. 装甲兵工程学院, 北京 100072; 4. 中国人民解放军94936部队, 杭州 310021)

摘要: 属性信息具有提高数据关联算法性能的巨大潜力, 是多无源传感器信息数据关联研究的趋势之一。对属性信息在多无源传感器数据关联问题中的应用进行了综述, 分析了基于属性信息的数据关联问题的研究进展, 抽象出属性信息应用的问题模型, 给出了基于统计、不确定推理的属性信息关联规则, 总结了属性信息应用于多无源传感器数据关联的处理结构模型, 并比较了各处理结构的优缺点, 最后指出了未来属性信息辅助数据关联要解决的关键问题。

关键词: 多无源传感器; 属性信息; 数据关联; 规则; 结构

中图分类号: V271.4; TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)07-0006-05

Attribute Information Data Association Rules and Structure Models for Multi-Passive-Sensor System

LU Chuan'guo¹, FENG Xinxi¹, KONG Yunbo¹, ZHANG Di^{2,3}, ZENG Rong⁴

(1. College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Chinese Aviation Museum, Beijing 102211, China; 3. Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China; 4. No. 94936 Unit of PLA, Hangzhou 310021, China)

Abstract: Attribute information has great potential to improve the performance of data association algorithm, and has become one of the research tendencies on information data association for multi-passive-sensor. The application of attribute information in data association problems for multi-passive-sensor was summarized. The research development of data association problems based on attribute information was analyzed. The problem models of attribute information application were formulated, and association rules based on the statistic method and uncertainty reasoning were given. Then processing structure models of attribute information applied in multi-passive-sensor data association were summarized, and their advantages and disadvantages were presented as well. Finally, several key issues to be solved in the future were pointed out.

Key words: multi-passive-sensor; attribute information; data association; rule; structure

0 引言

无源传感器具有隐蔽性好、生存能力强、探测距离远、信息种类丰富、抗电子干扰能力强、频率分配不受限制以及一定的反隐身能力等优点^[1-2], 已成为现代预警探测系统的重要组成部分。然而, 单一无源传感器定位精度低、可观测性差^[3]等又限制了其作战效能的发挥, 因此, 构造多无源传感器信息融合系统已成为无源探测发展的必然趋势。然而, 多传感器信息融合

系统中传感器观测过程与多目标环境中的各种不确定性和随机性破坏了回波与目标的映射关系, 因此, 必须运用“数据关联”技术来寻求解决办法^[4]。

与有源系统相比, 无源传感器数据关联十分困难。一方面, 它所给出的角度信息与目标运动状态呈强非线性, 若非同地配置无法直接构造检验统计量, 而采用几何定位技术将角度转化为位置信息, 则会出现大量的虚假定位点^[5], 有效剔除虚假定位点是一项极具挑战性的工作; 另一方面, 无源传感器难以得到目标的径向距离信息, 通常情况下, 难以完全解算出目标的状态参数^[6], 这都增加了无源传感器数据关联问题的难度。

但无源传感器具有一个有源传感器无法比拟的优势, 即它可以获得丰富的目标属性信息^[7], 属性往往是

收稿日期: 2011-09-25 修回日期: 2012-06-04

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2011JM8023)

作者简介: 鹿传国(1986—), 男, 山东鱼台人, 博士生, 研究方向为目标运动分析、数据关联。

关于目标状态、身份等某一方面的信息。源自同一辐射源目标的属性信息往往是相同的,这是属性数据可以用于数据关联的物理基础。然而,属性信息的多样性、属性数据量测的模糊性以及各信息之间的相关性,都极大地增加了属性信息应用的难度。

目前,属性数据在多传感器数据关联中的应用已有不少研究成果^[8-21],但总体上看,大多集中在对某类属性信息的应用或是针对某个具体工程应用问题,处于初步探索阶段,缺乏一个全面、层次清晰的系统框架和模型。本文抽象出属性数据在多无源传感器数据关联中的应用问题模型,结合近年来国内外的研究进展,总结了属性信息应用的算法结构模型、关联逻辑规则,指出了未来属性信息应用要解决的若干关键问题。

1 属性信息应用关联问题模型

数据关联技术是信息融合领域的核心研究问题之一。在多无源传感器数据关联问题中,应用属性信息的主要目的在于协同完成方位数据与目标之间的映射分类。属性数据应用于数据关联问题的基本模型如图1所示。

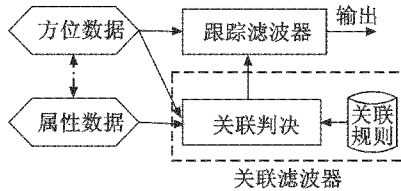


图1 属性信息应用数据关联模型

Fig.1 Application of attribute information in data association

为便于论述,这里对传感器获得的量测信息做出如下定义:传感器 $S_i (i=1,2,\dots,M)$ 在 k 时刻获得的第 $j (j=1,2,\dots,N)$ 个量测向量记为 $M_{ij}^k = [b_{ij}^k, a_{i1}^k, a_{i2}^k, \dots, a_{ic}^k]^T$,其中: M, N 分别为传感器和目标的数目; b_{ij}^k 代表了量测向量中的方位数据; $a_{i1}^k, a_{i2}^k, \dots, a_{ic}^k (c$ 为属性数据的数目)为量测向量中的属性数据。对传感器而言,获得的各量测向量都是无区分的,与目标的映射关系并不明确。下文中为论述简便,以 a_{ij}^k 泛指属性数据。

由于无源传感器在各扫描周期上的测量值是一个包含了属性数据和方位数据的测量向量。换言之,也就是属性数据与方位数据间存在着明显的对应关系,正如图1中虚线表示的双箭头所示,记其关系符为“ \leftrightarrow ”,则对于任一量测向量 $M_{ij}^k = [b_{ij}^k, a_{ij}^k]^T$ 都有

$$m_{ij}^k: b_{ij}^k \leftrightarrow a_{ij}^k \quad (1)$$

“ \leftrightarrow ”关系具有明显的唯一性和排他性,即 $m_{ij}^k = 1$ 当且仅当

$$b_{ij}^k \in M_{ij}^k \parallel a_{ij}^k \in M_{ij}^k \quad (2)$$

式(2)给出的准则是应用属性信息进行数据关联

的基础之一,其本质上是将属性信息作为方位数据的“硬币的另外一面”。在对属性信息之间的关联判决的基础上,基于式(2)所提出的共生关系,结合关联关系的传递性,即可实现方位数据的有效关联。

关联滤波器的核心在于关联规则的制定。关联规则直接决定了属性信息的应用方式和关联判决的结果。目前并没有通用的关联规则,往往取决于参与判决的属性信息的类别、统计特性等因素。

2 属性信息关联规则

目前常用的属性信息包括载频、脉宽、幅度、类别等。载频通常集中在若干频点上,稳定性好;脉宽数值分布集中,平稳性好;幅度暗含了径向信息;类别则直接给出了关于目标的身份信息。属性信息的多样性诚然可以提供丰富的关联测度信息,然而各属性信息统计特性不尽相同,内在关系复杂,这都为属性信息的应用造成了极大的困难。本节根据属性信息的统计特性,给出了几类常用的关联逻辑。

2.1 基于统计的关联规则

对于连续型的属性变量,通常利用可描述的统计模型对其建模,如高斯模型。但是完整的概率描述很难实现,主要是因为概率密度函数中的参数通常是非先验的,一般做法是对起始阶段获得的属性信息的多次测量作概率统计,视测量值的期望和方差为属性变量的一二阶矩。

连续型属性数据的应用方法一般是采用统计距离的方法构造检验统计量,继而实现不同传感器的量测向量关联判决。在单独利用属性信息可有效区分的情况下,考虑到属性信息量测的误差影响,通常采用统计距离测度信息 $\|\cdot\|$,关联规则为

$$\begin{aligned} \text{if } \|a_{ij}^k - a_{i'j}^k\| \leq \delta \parallel m_{ij}^k = 1 \parallel m_{i'j}^k = 1 \\ \text{then } b_{ij}^k \sim b_{i'j}^k \end{aligned} \quad (3)$$

式中: δ 为阈值;“ \sim ”为关联关系符;“ \parallel ”为逻辑“并”运算符。如满足式(3)所确定的规则即可判定传感器 i 的第 j 个量测向量方位数据与传感器 i' 的第 j' 个量测向量方位数据关联。文献[7]正是基于这一准则在讨论动态和属性信息应用时给出了综合属性和运动学数据的联合后验概率。

基于距离测度的关联规则具有坚实的数学基础,但是要求明确属性信息的统计特性,如文献[9-10]都是在将属性信息抽象为理想的高斯型随机变量进行关联判决的。Bar Shalom提出过一种利用贝努利模型和马尔可夫链构造类别信息辅助数据关联的统计关联算法,但是需要预设状态转移矩阵等一系列先验信息。

但对大多数属性信息,特别是离散型的属性信息

(如类别信息等)来讲是难以实现的,且连续型属性信息的统计特性参数也是极精确而难确定的,需要确定一系列的先验概率和条件概率,这都限制了该规则的适用性。

2.2 基于推理的关联规则

基于推理的关联规则的基本方法是构造能够反映测量向量中属性信息相似性的测度函数,继而将各属性信息进行融合得到总体的关联测度信息。该方法对属性信息的统计特性无严格要求,既可处理连续性的属性信息,也可处理离散型的特征参数,大大提高了算法的适用性。

测度函数的定义是指定关联规则的核心内容,该函数量化了不同量测向量中属性信息的相似性或差异性信息,为关联判决提供直接的决策依据。对不同的工程应用问题,需定义不同的测度函数。同时,由于属性信息的误差干扰,测度函数应具有一定的模糊性。这里定义一般的负定性测度函数为 $Bel(\cdot)$,在属性信息参与关联时,规则为

$$\begin{aligned} \text{if } Bel(a_{ij}^k, a_{i'j'}^k) \leq \delta \|m_{ij}^k = 1 \|m_{i'j'}^k = 1 \\ \text{then } b_{ij}^k \sim b_{i'j'}^k \end{aligned} \quad (4)$$

其中,各符号含义同上文所述。满足规则(4)则认定对应的量测向量关联。如满足式(4)所确定的规则即可判定传感器 i 的第 j 个量测向量方位数据与传感器 i' 的第 j' 个量测向量方位数据关联。

不确定推理理论包括证据理论^[11]、贝叶斯网络^[12]、模糊逻辑^[13]、灰理论^[14]等,已成功应用于解决数据关联问题。此类方法既能克服实际工程应用的不确定性与模糊性,又能客观反映各参量间的内在关系。

2.3 非完全区分关联规则

属性信息为数据关联提供了丰富的依据信息,但也带来了数据处理的复杂性。理想情况下,基于属性信息即可对测量向量做出完全区分。然而,实际问题并非如此简单,比如说,在当前目的区域的两个不同目标的属性信息极为相似,几乎难以分辨,如果仍按照属性信息关联即判定方位数据关联的逻辑,则会进一步混乱量测与目标的映射关系。

在属性信息无法完全区分目标的前提下,根据式(3)、式(4)制定的关联规则是不严格的。从这个意义上讲,式(3)、式(4)只是方位数据关联的必要条件,而非充分条件。为解决这一算法漏洞,工程应用中往往根据“逆反定理”的等价性,给出逻辑规则为

$$\begin{aligned} \text{if } \|a_{ij}^k - a_{i'j'}^k\| > \delta \|m_{ij}^k = 1 \|m_{i'j'}^k = 1 \\ \text{then } b_{ij}^k \simeq b_{i'j'}^k \end{aligned} \quad (5)$$

或

$$\text{if } Bel(a_{ij}^k, a_{i'j'}^k) > \delta \|m_{ij}^k = 1 \|m_{i'j'}^k = 1$$

$$\text{then } b_{ij}^k \simeq b_{i'j'}^k \quad (6)$$

式中: δ 为阈值;“ \simeq ”为“不关联”关系符。式(5)、式(6)的物理意义在于:如果两个量测向量属性参数的差异较大的话,那么方位数据必然不关联。该规则实质上给出了一种非关联数据的排除方法,尽管无法完全实现关联判决,但可以有效降低关联算法的复杂度。对比式(3)、式(4)和式(5)、式(6)不难发现,式(5)、式(6)的内在逻辑更为严密,适用范围更广。文献[15]正是采用了这一方法,将属性信息视为一种粗关联的辅助信息。

3 关联处理结构模型

属性信息的应用可集成于“量测-量测”关联和“量测-航迹”关联两大层面,对于简化运算复杂度、提高关联正确率均具有重要意义。按照属性信息在数据关联算法流程中的层次和地位来看,应用属性信息的关联算法具有3种典型的处理结构:串行处理结构、并行处理结构和混合式处理结构。

3.1 串行处理结构

从属性信息应用的发展历程来看,属性信息最初是作为辅助信息参与数据关联解算的,通常采用串行处理结构,如图2所示。

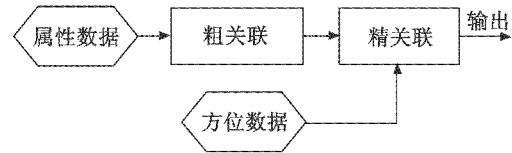


图2 串行数据关联结构模型

Fig. 2 Serial data association model

串行处理模型是一种分级式多层处理结构,本质上是将多无源传感器数据关联问题分解为时序上的两个子问题。文献[15-16]给出了串行处理结构详细算法流程。该处理模型首先利用属性信息排除明显不关联的关联组合,完成所谓的“粗关联”;继而方位数据参与运算,利用极大似然等方法进行“精关联”。需指出的一点是,串行处理结构并未限定“属性数据”和“运动学数据”的顺序,二者的地位并无严格的主次之分,采用何种顺序往往需视具体问题而定。

串行处理结构的一个突出优点是将复杂的数据关联问题进行分解,各级模块只承担单一的子任务,继而利用时间上的多级处理来降低总体的计算复杂度。但该处理结构的缺点也十分明显,方位信息和属性信息在算法结构中是完全隔离的,属性信息对方位信息是不可见的。通常情况下,属性信息与方位信息并非完全独立,串行处理结构强制地割裂了属性信息和方位信息的内在联系,与实际情况不符,严重降低了算法的适用性。

3.2 并行处理结构

并行处理结构是目前属性信息应用于多无源传感器数据关联最常用的结构,如图3所示。

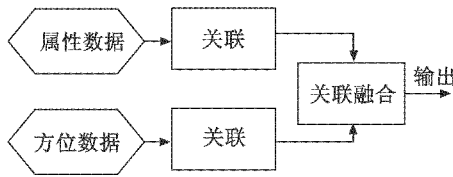


图3 并行数据关联结构模型

Fig. 3 Parallel data association model

并行处理与串行处理结构主要有以下两点不同之处:并行处理结构中的属性信息作为一种独立的关联依据,与方位信息的地位是完全等价的;串行处理结构侧重于分解关联流程,而并行处理结构则是对关联结果的融合。

在并行处理结构中,属性信息和方位信息作为关联滤波器的输入,分别在属性空间和欧氏空间完成关联判决,继而将其输入至“关联融合”模块,实现关联结果的融合输出。利用属性信息获得的关联结果可以视为对方位数据关联结果的一种确认。文献[9, 14, 17-18]都采用了并行结构,均取得了较好的处理结果,区别在于所使用的融合算法不同。

并行处理结构能够充分利用属性信息,依据属性信息和方位信息获得的关联结果都将作为最终关联判决的证据。“关联融合”模块中融合算法的设计将是并行处理结构的难题,关键在于如何有效处理属性信息和方位信息的相关性^[12]。

3.3 混合式处理结构

如图4所示的混合式处理结构,保留了上述两类算法结构的优点,但进一步复杂了算法流程,在计算开销上要付出更大的代价。该结构可以充分利用多类属性信息,在关联正确率等方面均有较大的优势。

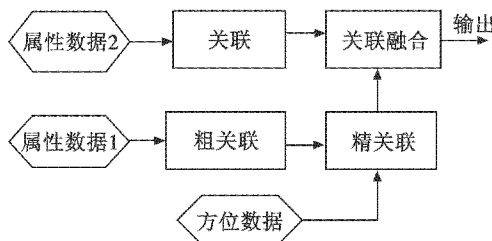


图4 混合数据关联结构模型

Fig. 4 Integrated data association model

上述数据关联结构模型并无严格的优劣之分,针对特定的应用背景和不同的目标要求,可对上述模型进行灵活的选择、组合。

4 未来要解决的问题

属性信息具有解决多无源传感器数据关联问题的

巨大潜力,已得到国内外研究人员的关注,取得了一定的研究成果,然而从整体上看,该问题的研究仍处于探索阶段,仍有诸多问题需要解决。

4.1 属性信息的优选、提取与综合性处理

属性信息的多样性增加了关联判决的依据,可进一步提高关联正确率,但同时显著增加了计算的复杂性。综合利用多属性信息可以有效提高关联正确率。然而属性信息往往具有一定的不确定性,且各属性信息之间关系复杂,必须建立能够综合处理多元属性信息的数学模型。

降低计算复杂度的一种方法是用尽可能少的属性信息参与关联判决,故提取、组合和挖掘具有大区度度的新的属性信息具有重要意义。如文献[19-22]分别用提取的速度、航向、角度变化率和极化特征等信息来辅助进行数据关联工作。一方面要进一步提取新的属性信息,这是由于近年来,对于基于单脉冲的脉内调制特征,尤其是脉内瞬时频率特征提取方法的研究受到高度重视^[23-24];另一方面要对现有的属性信息的关联能力进行评估,优选具有最大区分度的属性信息(组合)作为关联判决的依据信息。

4.2 不确定性属性信息的关联处理

随着战场环境的日益复杂,探测系统的不确定性问题也愈发突出。系统信息获取、存储、分发等能力的限制使得属性信息不精确、不完备,主要表现为属性信息结构不完整及信息获取周期随机。如何借助于智能信息处理方法来自适应地调整算法结构以适应不确定性属性信息是需要解决的关键问题之一。

4.3 综合属性信息与运动学信息的关联判决

属性信息不仅具有增强目标识别的潜力,而且能够有效改进数据关联和目标跟踪效果。综合运用属性信息和运动学信息对提高数据关联正确率具有重要意义。

从统计意义上看,运动学信息与属性信息的统计特性不尽相同,且二者并非统计独立。应用统计理论描述相关性时,需要采集大量时间样本来确定概率,计算复杂度难以接受;传统的证据理论、模糊理论等难以严格描述各信息间的联系,寻求能够兼容处理异类信息并且简化相关性描述的新型数学工具具有重要意义。贝叶斯网络技术是较为理想的备选手段之一:一方面对随机变量的统计特性未做限制,利用网络拓扑的形式描述相关性模型;另一方面,贝叶斯理论又提供了处理不确定性和误差的机制。

从物理意义上看,从幅度、功率等属性信息中可以解算出目标的距离信息,从而弥补被动探测的可观测性。被动测距技术亦是未来从根本上解决无源传感器数据关联问题的可行方向之一。但目前来看,基于属

性信息的被动测距定位技术精度仍有待进一步改进, 必须要求高鲁棒性的数据关联方法以及高精度的被动定位手段。

5 总结

受探测体制的影响, 多无源传感器数据关联技术的发展遭遇“瓶颈”, 而属性信息为推进多无源传感器数据关联问题的研究提供了新的依据和手段。属性信息的多样性、模糊性和随机性都决定了其应用的复杂性。充分利用现有属性信息提供的信息量, 挖掘提取新的属性信息和综合利用运动学信息都将是属性信息研究应用的重要层面。多无源传感器数据关联中属性信息的应用研究成果必将为多无源传感器实现目标的精确定位与实时跟踪、多无源传感器信息融合系统的战术应用提供技术支撑, 对复杂环境下态势感知能力的提高具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] DEB S, PATTIPATI K R, BAR-SHALOM Y. A multisensor-multitarget data association algorithm for heterogeneous sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(2): 560-568.
- [3] NARDONE S C, AIDALA V J. Observability criteria for bearings-only target motion analysis [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-17, 1981 (2): 162-166.
- [4] BAR-SHALOM Y. Tracking and data association [M]. Boston: Academic Press, 1987.
- [5] BEARD M, ARULAMPALAM S. Comparison of data association algorithms for bearing-only multi-sensor-multitarget tracking [C]//The 10th International Conference on Information Fusion, 2007: 1-7.
- [6] LIDGREN A G, GONG K F. Position and velocity estimation via bearing observation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-14, 1978: 564-577.
- [7] 李侠, 万山虎. 国外雷达装备技术与发展[M]. 北京: 国防大学出版社, 2002.
- [8] 何友, 王国宏, 陆大绘, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [9] 郭磊, 唐斌, 刘刚. 基于辐射源信号特征信息的 JPDA 无源跟踪算法[J]. 电子科技大学学报: 自然科学版, 2007, 36(1): 27-29.
- [10] 郭磊, 唐斌, 刘刚. 基于信号特征确定矩阵的 JPDA 无源跟踪算法[C]//首届电子战博士学位论坛论文集(电子对抗国防重点实验室), 2006: 163-166.
- [11] 赵帮绪, 杨宏文. 基于 D-S 证据理论的阵群目标数据关联算法[J]. 信号处理, 2011, 27(9): 1347-1351.
- [12] KRIEG M L. Kinematic and attribute fusion using a bayesian belief network framework [R]. Intelligence Surveillance and Reconnaissance Division Defense Science and Technology Organisation, 2006, DSTO-RR-0315.
- [13] STUBBERUD S C, KRAMER K A. Data association for multiple sensor types using fuzzy logic [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(6): 2292-2303.
- [14] 王杰贵, 罗景青, 靳学明. 无源跟踪中基于灰关联信息融合的概率数据关联算法[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 391-395.
- [15] 修建娟, 何友, 王国宏, 等. 两站无源定位系统中的多目标跟踪算法研究[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1763-1767.
- [16] 修建娟, 何友, 修建华. 多目标纯方位定位和跟踪[J]. 现代雷达, 2004, 26(8): 45-48.
- [17] HUGOT H, VANDERPOOTEN D, VANPEPERSTRAETE J M. A bi-criteria approach for the data association problem [J]. Annals of Operations Research, 2006, 147(1): 217-234.
- [18] 胡炜薇, 杨莘元, 杨雷, 等. 分类信息辅助的多目标跟踪方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5570-5573.
- [19] 王健, 金永镛, 董华春, 等. 航向信息辅助目标数据关联改进方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(11): 3374-3377.
- [20] 王健, 金永镛, 董华春, 等. 速度信息辅助雷达目标数据关联方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(12): 2333-2335.
- [21] 王国宏. 利用角度、角度变化率和 ITG 信息的主被动传感器数据关联[J]. 雷达科学与技术, 2003, 1(1): 39-45.
- [22] XU Zhenhai, NI Youping, GONG Xiangyi, et al. Using target's polarization for data association in multiple target tracking [C]//The 8th International Conference on Signal Processing, 2006, 4: 16-20.
- [23] BECK A, STOCIA P, LI Jian. Exact and approximate solutions of source localization problems [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2008, 56(5): 1770-1778.
- [24] DELPART N, ESCUDIE B, GUILLEMAIN P, et al. Asymptotic wavelet and gabor analysis: Extraction of instantaneous frequencies [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 644-664.