

一种实用的机载信息融合体系结构

王成刚^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司航空电子信息系统技术重点实验室, 成都 610036;

2. 中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036)

摘要: 总结现有信息融合体系结构设计及评估方法的不足, 结合航空电子系统传感器的数据特点及信息融合需求, 提出基于修正 JDL 模型和数据融合树的体系结构设计思想。基于作战用例的体系结构运行机制表明: 所提体系结构不仅能够动态配置, 还能大大减少计算量, 并且符合指挥控制体系的要求。引入系统评估方法, 对按照上述方法设计的两种体系结构进行定性和定量评估, 证明了该评估机制的科学性和有效性。

关键词: 航空电子系统; 机载信息融合; 体系结构设计; 体系结构评估; 数据融合树

中图分类号: TP274.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)05-0055-05

A Practical Airborne Information Fusion System Architecture

WANG Cheng-gang^{1,2}

(1. CETC Key Laboratory of Avionic Information System Technology, Chengdu 610036, China;

2. The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: The shortcomings of the methods for system architecture design and evaluation are summarized. Analysis is made to data characteristics and information fusion requirement of sensors in avionic system, and a system design approach is proposed based on modified JDL model and data fusion tree. The operating mechanism of the system architecture based on a combat case shows that; the system architecture has the advantages of dynamic configuration and less calculation cost, and can satisfy the requirements of command and control system. System evaluation method is introduced to make qualitative and quantitative analysis to two typical system architectures, which shows that the evaluation scheme is scientific and effective.

Key words: avionics; airborne information fusion; system architecture design; system architecture evaluation; data fusion tree

0 引言

航空电子系统经历了从独立式、联合式到综合化的发展过程, 新一代综合化航空电子系统的物理综合为减小体积、减轻总量做出了巨大贡献, 在物理综合的基础之上, 对数据、信息层次的综合也提出了更高的要求。机载信息融合是物理综合基础上的一个重要应用, 对雷达、电子战、光学传感器、敌我识别设备等各类机载传感器探测到的目标信息及数据链获取的目标信息进行综合处理, 获得统一的目标状态信息、目标属性信息及态势信息等, 支撑指挥引导、态势感知及火控攻

击等任务。

信息融合体系结构是融合系统开发的基本问题, 融合结构的选择直接影响着处理逻辑的复杂性、带宽需求及融合质量与性能。国外已有文献对不同平台信息融合体系结构进行了研究, 如航空电子开放式融合架构^[1]、美国新一代战斗机信息融合体系结构^[2]、加拿大海空巡逻机信息融合结构^[3]等; 国内方面, 包括 C³I 系统信息融合体系结构^[4]、新型海战场信息融合体系结构^[5], 以及面向作战任务的航空平台信息融合体系结构^[6]等。上述信息融合体系结构设计存在以下不足: 1) 体系结构的可扩展性不好, 难以满足指挥控制体系及其用例提取要求, 更不能满足未来网络中心战需求; 2) 不能对融合过程实施动态组织与配置, 以应对各类多任务的复杂对抗环境, 如面临大量隐身高速目标时, 需考虑

采用特殊算法提高某个目标的跟踪精度,同时还需考虑距离信息的快速响应与补充;3) 没有对体系结构进行预先评估,依赖主观判断,更没有科学的评估机制;4) 缺少指导系统开发的系统工程设计准则,更不能实施协同开发,重复研究和开发现象很突出。

从工程研制经验来看,合理的信息融合结构设计是保证在一段较长时间内不因单项技术或算法的发展而对整个系统产生颠覆的必要条件,提倡在方案论证阶段对体系结构进行预先科学评估,不仅能节省人力物力,还能保证工程研制的质量。综合考虑以上因素,本文提出基于数据融合树的系统工程思想进行机载信息融合体系结构设计,可以分解各信息融合功能的计算量,还可以动态配置信息融合功能;引入系统评估理论结合作战应用对体系结构进行定性和定量评估,证明了所提评估方法的科学性和有效性。

1 信息融合体系结构设计

1.1 设计思路

为使信息融合体系结构工程化、实用化,必须对 JDL 模型^[7]、Dssarathy 模型、Waterfall 模型、Omnibus 模型等^[8]基础的功能模型进行完善与适应性改造,常用的方法有数据融合树、融合元、本体论、SOA 和 AGENT 等方法^[9-10]。文献[11]首次提出数据融合树思想,文献[12]在《多传感器信息融合手册》一书中论述了数据融合树的概念及设计步骤,但目前很少有数据融合树具体应用情况的文献报道。

通过对机载传感器的数据特点及信息融合需求进行分析,以 2004 年 BOWMAN 提出的修正 JDL 功能模型为基础,采用数据融合树系统工程思想进行体系结构设计。BOWMAN 提出 JDL 功能模型强调两层含义:1) 包含四级融合层次及其过程评估,以及人机交互模块,每个层次表示不同的信息综合级别,具体包括子对象估计、对象估计、态势估计与战术估计;2) 各融合层次的主要过程均包含数据的检测、关联、相关、估计与综合等。数据融合树的基本思想是通过输入输出信息进行分类、对融合功能点进行分解,使系统信息融合问题分解、简单化;同时将数据模型与数据处理功能分离,实现处理功能与数据模型之间的松耦合,有利于模块的修改和替换。

基于修正 JDL 模型与数据融合树思想的具体设计步骤如下所述。

1) 顶层设计。选择某信息融合功能模型,根据业务需求添加功能或裁剪功能,使其更具可操作性。

2) 融合功能设计。采用数据融合树方法对输入信息、输出信息融合功能进行分类分解。数据融合树

分割原则包括信息源类型、数据类型、时间序列、互联关系等。

3) 融合节点设计。以数据分割后的各层次融合功能所选用的融合结构为基础,如目标跟踪功能的分布式航迹融合、集中式点迹融合、目标识别功能的特征级识别、决策级识别等,结合具体处理流程,在步骤 1) 的基础上抽象出融合节点。

4) 融合算法设计。以融合节点为基础,根据具体算法与应用的特点,归纳融合函数形态。

在上述各步骤中,均需同时考虑计算量、软硬件资源等实现约束。顶层设计与飞机平台的业务流程紧密相关。融合功能设计是设计的重点和难点,融合节点设计与融合处理流程相关。融合算法设计与具体作战使用需求紧密相关。

1.2 顶层设计与融合功能设计

鉴于作战飞机的实时性要求,通常仅考虑传输航迹信息,故不研究基于点迹信号的子对象估计。影响估计主要指威胁估计。另外,基于作战飞机面临信息需求多变、任务多样、环境复杂等特点,人机交互模块修改为信息融合服务功能,实现对各融合层次的估计及其评估过程的管理与控制。所提出的动态可配置信息融合体系结构如图 1 所示。

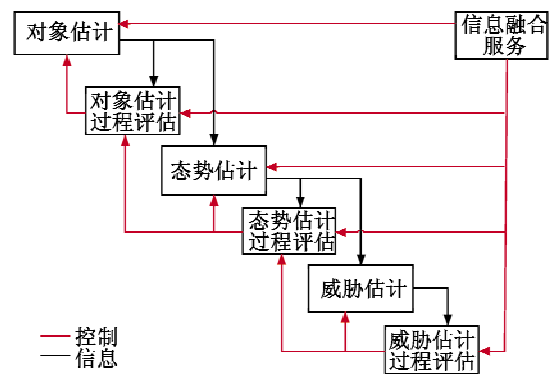


图 1 顶层体系结构

Fig. 1 System architecture

该结构所表现的信息融合处理是一个由信息需求驱动和模型驱动相结合的动态过程,该过程分为两个阶段:第一阶段为信息融合服务阶段,包括信息需求的产生、融合任务的形成,以及根据所生成的融合任务完成融合策略的修改与融合参数的动态配置;第二阶段为融合任务实施阶段,包括修正规范的信息融合模型的所有内容,其任务是按第一阶段生成的策略及参数配置,生成各层次融合估计产品和过程评估产品。

在信息融合服务的管理、调度下,逐级完成目标对象估计及其过程评估、态势估计及其过程评估、战术估计及其过程评估,易于提取各级别的态势用例,包括本机态势、机外态势等,也符合指挥控制体系。

1.3 融合节点与融合算法设计

由于JDL模型规定的每个融合层次可能包含多种类型的融合产品,例如目标对象估计包括目标跟踪估计和目标识别估计,需要对每个融合层次的功能进一步设计。本文提出的数据融合树分割准则如下:首先按照信息源类型分为机内融合、机外融合和机内外融合,机外融合分为同类数据链网络的融合、不同类数据链网络的异类融合;然后按照功能模型分为目标跟踪和目标识别。为方便后续比较,暂称此信息融合分割准则获得的融合功能设计结果为方案一。第一层融合目标对象估计的融合功能设计如图2所示。

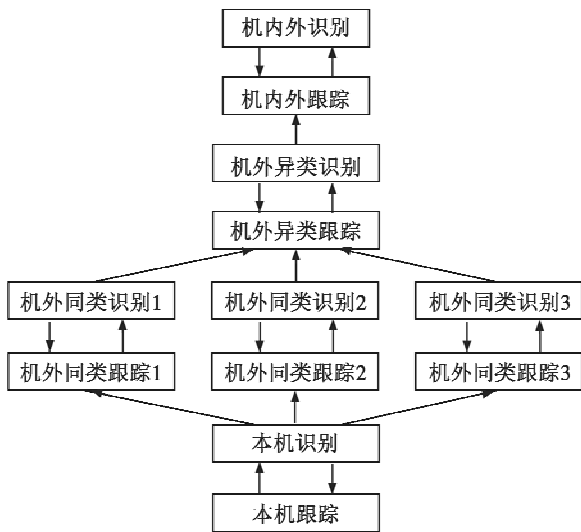


图2 方案一的融合功能设计

Fig.2 Data fusion function of scheme 1

从图2可以看出,对目标对象估计的目标跟踪功能和目标识别功能还可以进一步设计,目标跟踪功能融合节点的设计准则依次如下:根据目标跟踪的融合结构分为分布式航迹融合结构、集中式点迹融合结构和混合式点航融合结构;根据分布式航迹融合结构的处理流程,又包括传感器子源与传感器子源处理流程、传感器子源与系统航迹处理流程;对于传感器子源与系统航迹处理流程,又包括数据的时空预处理功能点、航迹相关功能点和航迹融合功能点;航迹融合功能点又包含航迹加权子功能点、航迹增强子功能点和航迹滤波子功能点。

融合算法设计方面:航迹融合算法可以分解为凸组合算法、交叉协方差算法和信息矩阵算法等,各类算法又包括机动目标模型和非机动目标模型。按照上述思路展开,可以获得图3所示的数据融合树设计效果。

从图3不难看出,该体系结构具有以下特征:

1) 融合节点的每个功能模块可以独立工作,模块只需要处理自己的输入数据和输出计算结果,不需要了解其他模块的工作情况;

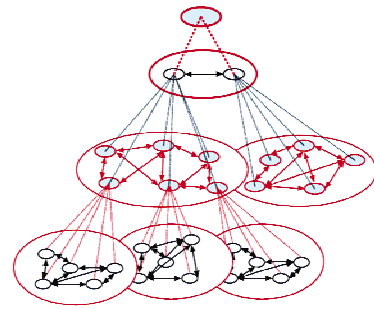


图3 树节点设计

Fig.3 Data fusion node design

2) 不同融合节点内的数据流及控制流是互不相同的,因此必须根据各个节点的特性与功能选择合适的算法;

3) 所有数据是由下往上传递的,符合指挥控制体系;

4) 各个融合节点可以根据实际需求选择相应的模块配置成不同的信息融合功能。

1.4 运行机制

作战飞机面临的作战任务多样,信息需求涉及多个层次,信息融合体系结构的动态可配置性使得系统结构不但自适应于各类作战任务,而且自适应于处理过程中节点间信息关系的动态变化,实现模型驱动与数据驱动的有机结合,满足各类机载任务的应用需求,具有易于实现的实用特点。

作战飞机面临的战场态势瞬息万变,实现某个目标快速响应以支撑火控攻击的同时,还可能满足另一个目标精确计算以提高其跟踪精度。以此作战任务为例,信息融合系统需要根据融合任务动态生成两个具体的融合产品及评估产品。为实现快速响应支撑火控攻击,通常考虑本机传感器数据精度高稳定性好的特点,而不考虑低速率、高时延的数据链信息,采用子源与系统关联流程,融合算法采用简单加权算法等。为了提高跟踪精度,需对所有传感器数据进行子源与子源的精确相关及高精度的滤波估计。就是说,在作战过程中,融合节点之间的信息关系不是一成不变的,一个节点的信息不是总对另外的节点有用,所以在信息融合系统设计过程中必须充分考虑信息源之间或处理节点之间的信息互补关系。

作战飞机典型的应用需求还包括电子战发现目标后快速配置节点获得距离测量信息的补充、某个目标需要快速响应身份属性确认等。

2 体系结构评估

目前比较缺乏针对信息融合体系结构评估方面的研究。在方案论证的前期,大多依靠经验判断,这种判断缺乏理论依据,对工程研制来说,既存在风险也不科

学;还有采用信息融合系统的性能评估方法来评估信息融合体系结构的,这些方法需要建立完善的信息融合流程与算法以及软硬件环境支撑,花费大量人力物力,且无法预先评估。体系结构评估突出了早期设计抉择的作用,对随后的系统开发和工程实施有深远影响,尽早地分析和评估体系结构就成为确保和提高设计质量的关键。

考虑到融合功能设计是体系结构设计重点和难点,本文提出两种基于数据融合树的典型设计,并将其进行比较。1.3节已经给出方案一的融合功能设计,方案二的融合功能设计数据融合树分割准则如下:首先按照功能模型分为目标跟踪和目标识别;然后按照信息源类型分为机内融合、机外融合和机内外融合,机外融合分为同类数据链网络的融合、不同类数据链网络的异类融合。方案二设计结果如图4所示。

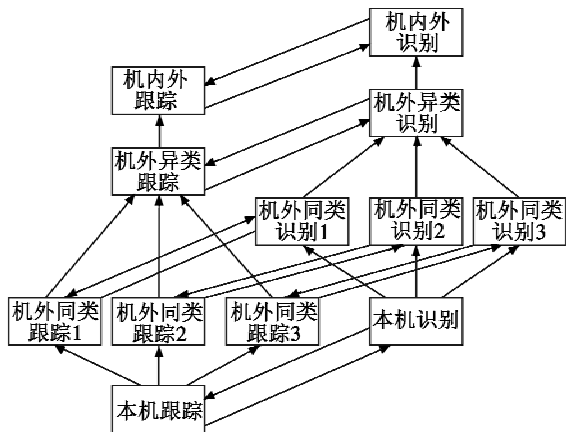


图4 方案二的融合功能设计

Fig.4 Data fusion function of scheme 2

本文引入系统评估思想,结合作战应用对体系结构进行定量和定性评估。对所设计建模的两种体系结构的网络拓扑结构、数据耦合度、系统容错性、功能分布性、集成复杂度及基于用例的作战流程复杂度等指标进行先期的定性评估,然后对功能节点数量、接口数量、点对点通信的延迟、路由效率、通信负载、信息消费节点的分布等进行定量评估。体系结构评估结果如表1所示。

数据融合树网络拓扑结构的类型包括树形结构、树环结构、层次结构和环形结构等。本文所介绍数据融合树中的“树”、“树节点层次”与计算机领域数据结构中“树”的概念一致。“树”是没有闭合路径的图,也就是说,在“树”中不可能从同一点出发,经过边(不考虑它们的方向),重新回到起点。“树”是最简单的一类图,包含需要连接给定顶点的最少的边。方案一是典型的树形结构,底层节点复杂高层节点简单。信息融合系统中不存在回路,树环结构意味着存在融合与

决策自相矛盾的回路,回路越多融合决策越混乱。

表1 体系结构的评估

Table 1 Evaluation on system architecture

比较内容	方案一	方案二
数据融合树类型	树形结构	树环结构
树节点层数	8	8
通信负载	5	6
路由效率/%	2.63	1.92
复杂度	低	高
容错性	好	差
可扩展性	好	差
基于用例的作战流程复杂度	简单	复杂

通信负载 φ 定义为所有节点的通信路由支路的最大值,值越大说明通信负载越大。

$$\varphi = \max(a_1, a_2, \dots, a_N) \quad (1)$$

式中: N 为节点总数; a_i 为参与任务的各节点通信路由支路的数目。

路由效率 η 定义为完成某个具体融合任务所需要完成的通信路由支路总数的倒数,百分比的值越大,说明路由效率越高,即

$$\eta = \frac{1}{\sum_{i=1}^N a_i} \times 100\% \quad (2)$$

表1的计算结果以完成对象估计任务为例,由此可以看出,本文提出的体系结构评估方法从定性和定量两个方面证明了方案一相比于方案二的优越性。

3 结束语

本文的主要结论与贡献小结如下。

1) 总结现有信息融合体系结构的不足,从机载传感器的数据特点与信息融合设计需求出发,采用数据融合树系统工程设计思想,提出了动态配置的机载信息融合体系结构,并从运行机制与运行效率上证明了所提体系结构的优越性,具有可动态配置的实用特点,且符合指挥控制体系,又减少计算量。

2) 从系统评估、作战应用两大方面对体系结构进行了定性和定量评估,与常用的信息融合系统评估方法需要建立完善的算法、流程和软硬件环境支撑相比,这种科学的有效评估机制不仅能节省人力物力,而且有利于工程实施以及确保后续的工程质量。

需要指出的是,本文所提出的体系结构设计思路容易扩展至舰船或地面信息融合体系结构设计、C³L/C⁴ISR网络信息融合体系结构设计等。

参考文献

- [1] CLARK V. Information fusion architectures for next generation avionics systems [C]//IEEE Conference on Aero-

- space and Electronics, 1996:137-144.
- [2] YANNONE R M. Exploring architectures and algorithms for the 5 JDL/DFS levels of fusion required for advanced fighter aircraft for the 21st century [R]. Sanders, Lockheed Martin Company, 1999.
- [3] SHAHBAZIAN E, GAGNON L, DUQUET J-R, et al. Fusion of imaging and non-imaging data for surveillance aircraft [C]//SPIE Proc, Orlando, 1997:3067-3077.
- [4] 孙尧,朱林,徐兴杰. 基于数据融合树的C³I信息融合系统体系结构设计[J]. 航空学报, 2006, 27(2):305-309. (SUN Y, ZHU L, XU X J. Design of C³I information fusion system architecture basing on data fusion tree [J]. *Ecta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(2):305-309.)
- [5] 吴传利,孙尧,何佳洲. 新型海战场信息融合体系结构[J]. 船舶工程, 2005, 27(2):49-53. (WU C L, SUN Y, HE J Z. Novel maritime information fusion architecture [J]. *Ship Engineering*, 2005, 27(2):49-53.)
- [6] 牟之英,吴建民. 多平台信息融合与智能化传感器管理技术综述[J]. 航空电子技术, 2005, 36(4):20-24. (MOU Z Y, WU J M. Survey of multiplatform information fusion and intelligent sensor management techniques [J]. *Avionics Technology*, 2005, 36(4):20-24.)
- [7] STEINBERG A N, BOWMAN C L. Rethinking the JDL data fusion levels [C]//Proceedings of MSS National Symposium on Sensor and Data Fusion, Laurel, Maryland, 2004:1-18.
- [8] ESTEBAN J, STARR A, WILLETTS R, et al. A review of data fusion models and architectures towards engineering guidelines [J]. *Neural Computation & Application*, 2005, 14(4):273-281.
- [9] 李明国,郁文贤,庄钊文,等. C4ISR系统信息融合模型研究[J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(1):8-10. (LI M G, YU W X, ZHUANG Z W, et al. Research on information fusion model of C4ISR system [J]. *Fire Control & Command Control*, 2002, 27(1):8-10.)
- [10] LEUCHTER S, MUHLENBERG D, SCHONBEIN R. Agent-based web for information fusion in military intelligence, surveillance, and reconnaissance [C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2008:3732-3737.
- [11] BOWMAN C L. Data integration (fusion) tree paradigm [C]//Proceedings of SPIE, Signal and Data Processing of Small Targets, Bellingham; SPIE, 1992:372-381.
- [12] HALL D L, LINAS J L. Handbook of multisensor data fusion [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.

(上接第44页)

本文提出的基于预滤波器的矢量跟踪算法作为实现基于矢量跟踪的级联式深组合导航系统的关键技术,将在未来有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 李传军,李兴城. 一种INS辅助GNSS高动态弱信号标量跟踪方法[J]. 宇航学报, 2013, 34(10):1378-1386. (LI C J, LI X C. A high dynamic tracking method of INS-aided GNSS receiver for a scalar-based weak signal tracking loop [J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(10):1378-1386.)
- [2] 程俊仁,刘光斌,姚志成. GNSS接收机矢量跟踪算法研究综述[J]. 宇航学报, 2014, 35(4):380-386. (CHENG J R, LIU G B, YAO Z C. Review on vector tracking algorithm for GNSS receiver [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(4):380-386.)
- [3] 谢非,刘建业,李荣冰,等. 基于快速相关运算的卫星接收机矢量跟踪算法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1):94-99. (XIE F, LIU J Y, LI R B, et al. Vector tracking algorithm based on fast correlation operation in GNSS receivers [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(1):94-99.)
- [4] SUN D B, PETOVELLO M G, CANNON M E. Ultra-tight GPS/reduced-IMU integration for land vehicle navigation [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3):1781-1791.
- [5] WON J H, EISSFELLER B. Effectiveness analysis of vector-tracking-loop in signal fading environment [C]//The 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), 2010:1-6.
- [6] 何航平. 基于矢量跟踪环的GPS/INS深组合导航系统研究与设计[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014. (HE H P. Research and design of deeply GPS/INS integrated navigation system based on vector tracking loop [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)
- [7] 罗勇. GNSS/INS深组合导航系统信息匹配问题与跟踪算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012. (LUO Y. Research on the information matching problem and tracking algorithm in GNSS/INS deeply integrated navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.)