

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.08.025

机载信息融合的现状与发展*

古悦源**

(成都飞机设计研究所,成都 610091)

摘要:论述了机载信息融合的典型需求及其应用现状,从理论研究和工程应用两个方面综述了信息融合的模式结构,并提出适合未来作战飞机的动态信息融合体系结构。系统地梳理了时空预处理的相关概念,概括了空间配准算法的研究现状及优缺点,指出机载空间配准研究的紧迫性。结合工程实践,指出目标相关、状态估计和目标识别等模块处理方式与策略的重要性,并在此基础上归纳总结了模块处理算法,对机载信息融合算法研究及工程实践有一定的指导作用。

关键词:机载信息融合;时空预处理;目标相关;状态估计;目标识别

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)08-1100-06

Current Research Status and Development of Airborne Information Fusion

GU Yue-yuan

(Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract: The requirements and prospective of airborne information fusion are summarized. The models and architectures of airborne information fusion are overviewed based on theoretical research and engineering application, and a practical and dynamical information fusion architecture is proposed. The current status, advantages and disadvantages of spatial registration are analyzed after some concepts of space-time preprocess are listed systematically, which is a hot issue for airborne information fusion application. The essential suggestion and characteristic of track association, state estimation and target identification are presented. The key techniques and approach of track association, state estimation and target identification are also discussed. The research in this paper is helpful to information fusion algorithm and application research.

Key words: airborne information fusion; space-time preprocess; target association; state estimation; target identification

1 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^[1],在物理综合的基础之上,对数据、信息层次的综合提出了更高的要求。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、红外搜索与跟踪系统(IRST)、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,获得统一的目标态势信息,支撑态势感知、火控攻击或指挥引导等任务。

国内外已出现一些文献对信息融合技术进行了综述,包括基于功能模型和体系结构的综述^[2]、基于信息融合方法或算法的综述^[3]、基于不同领域的技术发展与应用现状的综述^[4]等,本文在借鉴这些文献经验的基础上,结合工程实践,专门对机载信息融合的国内外应用现状与需求、功能模型与体系结构、

* 收稿日期:2013-05-16;修回日期:2013-07-17 Received date:2013-05-16;Revised date:2013-07-17

** 通讯作者:guyueyuan_0306@sina.cn Corresponding author:guyueyuan_0306@sina.cn

以及关键技术模块的处理流程与算法进行了归纳总结,在体系结构、目标相关、状态估计等方面,特别提出了一些作者多年工作经验的研究思路与建议。

2 机载信息融合需求与应用现状

机载信息融合自 20 世纪 70 年代出现以来取得了巨大发展和进步,国外已有装备应用的机载信息融合系统,国内机载信息融合起步相对较晚,目前还处于实验室阶段。

F-35 的主承包商洛克希德·马丁公司负责任务系统的副总裁 Eric Branyan 指出:F-35 的主要创新之处就在于它能够大量信息融合在一起,并将其整理为能被飞行员所使用的知识,从而让飞行员能够集中精力于获得全面优势的战术和策略。一体化中央处理器对来自多源的数据进行汇集和相关,并综合来自各个传感器的最佳数据向飞行员提供解决方案,这能使 F-35 的探测距离最大化并能向飞行员提供威胁规避、交战、对抗或干扰的最佳选择。

F-22 明确提出并实现了信息融合处理。针对近距离高威胁等级的辐射源目标,如果敌方雷达开机,则使用电子战系统 AN/ALR-94 提供导弹攻击所需的全部信息,引导空空导弹实施反辐射攻击,否则由雷达提供距离和速度数据引导导弹攻击。俄罗斯苏-35 机载相控阵雷达锁定一个目标后,将瞄准信息自动传送到机上导航系统,随后雷达停止辐射,飞机以雷达静默方式接近目标,抵达预定区域后,雷达系统重新启动,更新预置瞄准数据并将它传送到武器系统,在静默接近过程中,该机可通过电子战或IRST 等被动传感器对目标进行测向。这些过程都需要通过信息融合技术支撑实现。

除了本平台多传感器的信息融合外,还涉及机外数据链的多平台信息融合。比如美军 F-22 通过机间数据链形成作战编队执行任务时,当目标在雷达系统探测范围之外时,其中一架飞机可以关闭雷达系统悄悄靠近目标,并在此过程中藉由机间数据链共享编队内其他打开雷达的战机获得的目标信息,当进入攻击距离之后,就利用这些目标信息对目标实施攻击,在此过程中,实施攻击的战机可以始终关闭雷达,使得敌方战机在被攻击的过程毫无察觉。但是有报道指出,由于采用 Link16 和常规通信形成的信息综合态势中假航迹数目能达到 35%~50%。

俄罗斯的第三代战机苏-27 的 TsVM-80 火控计算机能将红外瞄准、激光、光学和多模式雷达输入综

合起来向平显提供信号,具有一定程度的多传感器数据融合能力。法国“阵风”战斗机的综合多传感器系统包括雷达、前扇区光学系统、频谱电子战系统和数据链。数据融合将这些传感器收集到的数据进行综合和比较,精确地定位和正确地识别目标,形成一幅战术图像显示在平视大屏幕上。加拿大“曙光女神”(Aurora)海上巡逻监视机建立了一种“自适应数据融合试验台”,该项目的发展分 3 个阶段,第三阶段多平台点迹航迹混合融合结构重点解决协方差无法直接获得或进行准确估计的问题。

1996 年科索沃战争中,美军研制的“目标快速精确捕获系统”,从数据接收、信息融合到火力打击这一过程最快只需 5 min,使得识别目标和攻击目标几乎能同时完成。2002 年阿富汗战争中,“协同空战中心第 10 单元”成功地缩短信息处理时间,自动给出目标的精确坐标,使美军多年追求的“缩短传感器到射手”的时间成为可能。2003 年伊拉克战争中,通过某演习中进一步完善的“协同空战中心第 10 单元”再次证明了网络化信息融合的巨大优势。

3 机载信息融合体系结构

美国 20 世纪 80 年代制定了一系列航空电子技术发展计划和先进机载技术综合计划,其中就包含传感器信息融合技术、人工智能和驾驶员辅助等^[5]。随后在 1994 年初,美国莱特实验室专门成立了航空电子小组(IFTA),小组下面专门成立了信息融合工作组(IFWG),IFTA/IFWG 针对航空电子信息融合提出了 4 项具体建议。紧接着,美国莱特实验室专门针对作战飞机提出五级信息融合模型方案,并对各作战任务下的数据需求、应用需求及实现框架提出了可行的建议^[6]。

国外已提出多种信息融合功能模型,包括 JDL 模型、Dssarathy 模型、Waterfall 模型、Omnibus 模型等^[7-9],前面 3 个模型的共同特点是将信息融合处理划分为多个层次,区别在于层次划分信息的着眼点和划分的详细程度。Omnibus 模型试图综合并扩展前面几种模型。JDL 功能模型是最出名也是最常用的模型,强调以下两层含义:一是包括四级融合层次及其过程评估,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;二是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。为使信息融合体系结构工程化、实用化,必须对这些基础模型进行完

善与适应性改造,发展起来的新方法有融合元、本体论、SOA、AGENT 等方法^[10-11]。

子对象估计通常被纳入传感器数据处理范畴。另外,为了更好地适应未来作战飞机面临信息需求多变、任务多样、环境复杂等特点,未来信息融合系统架构实现时,需增加信息融合服务功能,完成对各融合层次的估计及其评估过程进行管理与控制,如图 1 所示。

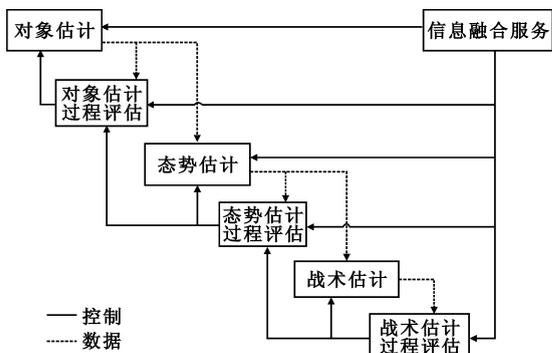


图 1 动态信息融合体系结构

Fig. 1 Dynamic information fusion architecture

该体系结构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。

4 关键技术的研究情况

根据图 1 所示的体系结构,目标对象估计包含目标相关、状态估计和目标识别等内容。目标对象估计是信息融合的基础和重点,也是现阶段工程重点关注和发展的内容,以下将对对象估计涉及的几个关键技术进行探讨。

4.1 时空预处理

对机载传感器数据的时空预处理是后续目标相关、状态估计等处理过程的基础。首先介绍几个与时空预处理相关的概念。

时间对准指在确定的时间同步基准的基础上,将

不同采样率的传感器数据对准到同一时刻的过程。

空间对准指将不同坐标系下的传感器数据统一坐标系的过程。

时空校准指通过物理手段将传感器时空误差(包括系统误差和随机误差)减至最小的处理过程,包括检测、标校、平台定位定姿与合理配置以及模拟或实装试验等手段,根据误差累积状况定期或不定期进行时空标校。

空间配准指通过数据处理手段将传感器空间误差控制在容许范围内的过程。空间配准是在确定的时空基准之上,对空间累积偏差定时或实时的误差消减处理。绝对空间配准指基于合作目标定位曲线进行,能使绝对系统误差减至最小;相对空间配准基于两个以上传感器对同一目标的覆盖测量进行,在一定程度上消除或减少传感器系统误差。

以上概念中时间对准和空间对准问题相对简单,在此不再论述。空间配准的研究主要集中在算法研究方面,根据处理方式可分为在线处理法、离线处理法及系统误差与状态同时估计的方法等三大类。离线处理法主要有最小二乘法、RTQC 法^[12]、EML 方法^[13]等;在线处理法主要有 1993 年 Helmick 提出的系统误差估计方法^[14]、2004 年前后 Bar-Shalom 发表的精确空间配准系列文章^[15]。系统误差与状态同时估计的方法主要有 Fiedland 提出的状态解耦方法、1999 年 Nabaa 提出的状态扩维方法^[16]。第二类方法根据是否有合作目标参与配准分为合作目标法和非合作目标的覆盖量测法。基于覆盖量测的在线配准方法包括误差参数解耦后对误差进行实时估计、通过状态变量扩维同时估计误差和目标运动参数两种。扩维方法需要使用目标相关的先验知识,不适合应用于工程应用。解耦方法是发展的重点。根据传感器类型还可以分为主动传感器配准、被动传感器配准及异类传感器配准 3 种。被动传感器配准及异类传感器配准文献非常少。

笔者总结发现,不管是哪种方法,空间配准问题最终都可以归结为解超定方程,基础的算法主要包括最小二乘法、滤波法及极大似然法 3 类。空间配准的核心问题为配准算法、可观测性及可估计性分析。估计是否收敛、收敛的速度和精度取决于观测站对目标的可观测性和可估计性。

从应用上来说,固定平台的空间配准在技术上已相当成熟,并已成功应用。运动平台上的空间配准特别是机载平台的空间配准处于模型计算阶段,当需要平台姿态误差和传感器误差同时估计时,问

题变得非常复杂,建议各方紧密配合完成模型的简化,以获得可行的工程解决方案。已有文献报道:E-3 AWACS 把空间配准作为一个重点难点技术加以突破,但其具体应用情况不明。另外,平台误差与姿态误差同时估计问题理论上还没有得到解决,必须分开解耦估计。

4.2 目标相关

机载传感器信息融合通常会涉及点迹与目标相关、航迹与目标相关等两种情况,两类相关的基本思想和处理过程类似。大量研究文献把目标相关研究仅仅归结为相关算法,包括统计法、模糊法、灰色关联法等^[17-18],这些文献的主要不足是:第一,没有考虑目标相关的处理策略与方法;第二,对目标相关过程细化的力度不够。笔者认为,目标相关应该包括目标相关策略、目标相关向量的选择与度量、相似度计算与判定、目标分配等内容,而且各项研究内容均包含丰富的研究价值。

目标相关的基本处理流程是:在选定的目标相关策略下,选择并计算相关向量后,计算所有可能目标相关对在当前时刻的状态偏差的统计量或相似度,然后应用门限检测技术对统计量或相似度进行检验,排除那些不可能关联的航迹对,同时建立相关矩阵,然后采用目标分配算法完成相关分配,找到最优解或次优解。

目标相关策略包括传感器航迹与传感器航迹的两两相关、传感器航迹与指定航迹的相关、传感器航迹与系统航迹的相关 3 种。在传感器航迹与传感器航迹的相关方式下,传感器航迹与传感器航迹之间两两相关,然后综合每对传感器的目标相关结果,这种相关方式思路清晰、流程简单,但是可能存在相关结果的矛盾问题。在传感器航迹与系统航迹的相关方式下,各类传感器的局部航迹依次与已有的系统航迹进行相关处理,可依据相关结论确定局部航迹与已有某系统航迹的归属关系,进而融合生成新的系统航迹,实现该系统航迹的更新与延续。这种目标相关策略的流程比较复杂,如果出现相关错误,很难定位哪个传感器的哪个目标导致目标相关错误。

常用的目标相关向量包括位置信息、属性信息及其他信息等,为消除随机性,可以采用多周期的状态偏差样本的统计特征进行度量。相似度计算与判定指基于两个目标航迹的状态偏差向量,采用门限检测技术进行相关判定。门限检测方法可以包括硬判定门限法和软判定门限法,或包括单门限法和多门限法,或包括单假设判定法、多假设判定法和似然

比判定法等。

国外学者提出的目标分配方法可以分为唯一分配法和非唯一分配两大类。唯一分配法假设落入波门内的有效量测仅来自一个目标或杂波,唯一分配符合真实情况,但当目标密集时,测量误差会引起分配错误。唯一分配法的典型算法有最邻近分配算法、最大后验准则算法和极大似然分配算法。非唯一分配法假设落入波门内的有效量测可能来自于多个目标,也可能来自于杂波,此时将所有位于波门内的测量皆以一定权值分配给该目标,非唯一分配不符合真实情况,只是人们处理模糊关联的一种方法。非唯一分配法的典型算法有联合概率数据关联(JPDA)算法及随机集转移算法等。

国外对机载目标相关进行了深入研究,主要研究机构有洛克希德·马丁公司、雷声公司、数值计算商业公司等,指出雷达与 ESM 相关与坐标系选择有很大关系,可以选择的坐标系包括直角坐标系、极坐标系和修改极坐标系;并指出目标相关性能与敌我平台位置、目标场景过程、传感器及噪声性能有很大关系。据报道:E-3 AWACS 采用交互多模型与 JVC (Joncker-Volgenant-Castanon) 统计学法实现目标相关,并在实装中应用。

国内的研究主要是采用学习跟踪国外的方式。海军航空工程学院何友、王国宏较早跟踪国外的研究,并进行了系统的研究与发展。王国宏的博士论文对雷达与 ESM 相关进行了深入研究,选择的相关因素包括角度相关法、定位求出距离的方法、角度与动态测量信息相结合 3 种;王国宏还提出,目前的方法不能在线评估相关的性能,不能根据性能调整相关算法的门限,漏相关概率与关联概率计算公式有关。武汉 709 所周永丰对灰色关联法非常感兴趣,并与哈工大联合培养研究生对此问题进行了深入研究。

目标相关是后续状态估计及目标识别的基础,目标相关错误或带来假目标将对下一级处理带来灾难性的影响,特别是当把此目标相关结果作为中间产品传给下一次融合处理时,这个问题更加严重。目标相关的难点包括传感器测量维数的不匹配、传感器测量特性的不匹配、存在系统误差等。另外,目标相关过程中可利用多帧数据积累来提高相关性能。

4.3 状态估计

与目标相关类似,大量研究文献把状态估计研究归结为融合算法本身的研究,没有考虑状态估计方式。笔者认为,状态估计^[19-20]应该是传感器性能与环境的函数,对多传感器的状态进行选择、组合

或综合,生成最优的航迹状态。在不同作战场景下,可相应选择以下 3 种状态估计方式:航迹加权方式、航迹增强方式、航迹滤波方式。

航迹加权方式对多个航迹的状态信息进行加权,其特殊情况为航迹选择和航迹平均。航迹选择方式通常应用于当某局部传感器的工作状态和性能都远远好于其他传感器时,从局部航迹中选择一条最佳航迹作为系统航迹,此时,中心级的航迹误差最小,但随机误差较大。航迹平均方式通常应用于目标跟踪的初始阶段,不知道各传感器的滤波协方差阵的大小,而且各目标跟踪也未达到稳定的跟踪阶段,这时可以采用航迹平均法融合各传感器的航迹。此时,随机误差小,但动态误差大。

在航迹加权融合方式下,国内外提出了很多加权融合算法。这些加权算法的原理相似,主要区别在于对以下两类误差考虑的全面性,一类是各局部状态估计之间由于共同的过程噪声、相关的量测噪声以及共同的先验估计而产生的误差相关性;另一类是当融合中心具备记忆能力并存在多条传感器至融合中心的信息传播途径,局部状态估计与全局状态估计之间也存在有相关性。在传感器航迹估计误差互不相关的假设下,R. Singer 提出了协方差加权融合算法。由于各部传感器可能因为相对于目标距离的不同或处于不同的观测位置而给出数值不同的滤波协方差阵 P_i ,这个协方差阵表征了不同传感器精度的差别,可以用 P_i^{-1} 作为加权因子对航迹进行融合。

航迹增强方式应用于当某局部传感器的工作状态略好于其他传感器时,每个局部传感器产生一条航迹,选择其中之一作为系统航迹,用其他局部航迹数据对其进行修正。此时,随机误差小,但动态误差大。

航迹滤波方式类似于把航迹数据看成点迹,在局部传感器航迹自主滤波产品的基础上的再一次滤波,对所有航迹数据进行集中式滤波处理或序贯滤波处理。这种方式下的重点和难点是数据压缩和变采样滤波等。

在工程实践中发现,影响多传感器目标跟踪精度的主要原因有两个:一是传感器设备存在严重的质量不均衡现象,二是科技发展使得战场电磁环境更加复杂与恶劣。所以,在设计融合算法时,需要考虑更多的实际因素,系统中的各种客观条件限制了理论成果的成功转化,如传感器可能存在较大系统偏差等,此时,基于传感器的置信度获取问题将是研究重点。

4.4 目标识别

目标识别能够提供敌我属性识别、目标类型识别、目标型号识别等多个层次的信息,相控阵雷达能够提供运动参数、RCS、目标大小等特征,电子战能够提供敌我属性、目标类型等识别信息,IRST 能够提供目标大小、辐射特性等特征,分布孔径系统提供辐射特性、目标类型等参数,敌我识别器能够提供飞机编码、敌我识别等信息,数据链能够提供敌我属性、目标类型等识别信息,另外,新型数据链还具有网内识别功能。

机载目标识别是在电子支撑措施的非协作目标识别和敌我识别器的协作目标识别发展起来的,机载目标识别通常也包括库内目标识别和非库内目标识别两类处理流程。在这两大类流程的基础上,根据相关证据信息、冲突证据信息、互补证据信息等特征进行专门的算法处理。这些特殊算法的处理通常又包括以下两个级别的处理:决策级识别和特征级识别。机载目标识别处理流程通常是在特征级识别的基础上进行决策级识别,特征级识别的方法有基于特征的模式识别方法、基于知识的数据库方法及混合方法等^[20]。其中,数据库方法需要大量的实际数据支撑,如果有装备实际采集的数据对目标识别的应用非常有作用。决策级识别的基本原理就是合理构造一个映射函数,对来自多传感器输入的识别信息进行变换,以获得识别置信度和识别率等技术指标的提升。经典的方法有 Bayes 推理法、Dempster-Shafer 证据理论法、模糊集理论法、基于知识的专家系统法及神经网络法等^[21]。

5 结 论

本文的主要结论与贡献小结如下:

(1)提出了适合未来作战飞机航空电子系统的动态信息融合体系结构,包括信息融合服务和融合任务实施两个主要部分;

(2)系统地总结了国内外空间配准算法的研究现状及优缺点,并指出机载信息融合空间配准研究的紧迫性;

(3)结合工程实践,指出目标相关、状态估计和目标识别等模块处理方式与策略的重要性,而不仅仅局限于探讨某个具体算法。

最后需要指出的是,信息融合是一门应用学科,涉及诸多传统学科,其理论方法结构正处于发展中,尚不能构成完整的体系,理论、方法及其实现技术均

与具体应用紧密相关。在日益追求综合化、体系化、网络化、智能化的今天,机载信息融合一定能得到蓬勃发展,希望本文所提出的一些观点能对同行有一些启发。

本文仅对 JDL 模型第一级目标对象估计的相关内容进行了论述,后续的研究将针对更高层次的融合估计、图像融合等方面进行。

参考文献:

- [1] 何志强. 综合化航空电子系统发展历程及重要支撑技术[J]. 电讯技术, 2004, 44(4): 1-5.
HE Zhi-qiang. Development and Important Supporting Technology of Integrated Avionics System[J]. Telecommunication Engineering, 2004, 44(4): 1-5. (in Chinese)
- [2] 赵宗贵. 信息融合技术现状、概念与结构模型[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006(4): 307-312.
ZHAO Zong-gui. Current Status. Concept and Structure Model of Information Fusion Technology[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2006(4): 307-312. (in Chinese)
- [3] 乔向东, 李涛. 多传感器航迹融合综述[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 245-250.
QIAO Xiang-dong, LI Tao. Survey of multi-sensor track fusion [J]. System Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 245-250. (in Chinese)
- [4] 巴宏欣, 赵宗贵. 多传感器数据融合数学模型与方法概述[J]. 舰船科学与技术, 2005, 27(6): 48-53.
BA Hong-xin, ZHAO Zong-gui. A survey on mathematic models and methods of multisensor data fusion [J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(6): 48-53. (in Chinese)
- [5] Clark V. Information fusion architectures for next generation avionics systems[C]//Proceedings of 1996 IEEE Conference on Aerospace and Electronics. Dayton, OH: IEEE, 1996: 137-144.
- [6] 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]//ADA391672. Nashua NH: Sanders Inc, 1999.
- [7] Hall D L, Linas J L. Handbook of Multi-sensor Information Fusion[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2001.
- [8] Esteban J, Bryanston P. A Review of Information Fusion Models and Architectures Towards Engineering Guidelines[J]. Neural Computation & Application, 2005(12): 273-281.
- [9] Steinberg A N, Bowman C L. Rethinking the JDL Data Fusion Levels[C]//Proceedings of MSS National Symposium on Sensor and Information Fusion. Columbia, SC, USA: IEEE, 2004: 545-552.

- [10] Bowman C L. Data Integration (Fusion) Tree Paradigm [C]//Proceedings of 1992 International Conference on Signal and Data Processing of Small Targets. Bellingham: IEEE, 1992: 372-381.
- [11] Leuchter S. Agent-based Web for Information Fusion in Military Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance[C] // Proceedings of 2008 IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics. Singapore: IEEE, 2008: 3732-3737.
- [12] Burke J J. The SAGE Real Time Quality Control Function and Its Interface with BUICII/BUIC III [R]//MITRC Corporation Technical Report No. 308. Belford, MA, USA: MITRC Corporation, 1996.
- [13] Zhou Y, Leung H. An Exact Maximum Likelihood Registration Algorithm for Information Fusion [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(6): 1560-1573.
- [14] Helmick R E, Rice R. Removal of Alignment Errors in An Integrated System of Two 3D Sensors[J]. IEEE Transactions on AES, 1993, 27(10): 1333-1343.
- [15] Lin X D, Bar-Shalom Y. Exact Multi-sensor Dynamic Bias Estimation with Local Tracks [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(2): 576-590.
- [16] Aoki E H, Bruno M. Distributed registration of a network of asynchronous sensors[J]. IEEE Transactions on Information Fusion, 2010, 8(2): 1354-1363.
- [17] Castella F R. Theoretical Performance of a Multi-sensor Track-to-track Correlation Technique[J]. IEE Proceedings of Radar, Sonar & Navigation, 1995, 142(6): 281-285.
- [18] Richard O, Yaakov B S, Peter W. Track-to-Track Association with Augmented State[J]. IEEE Transactions on Information Fusion, 2011(2): 1119-1133.
- [19] Chen Lingji, Arambel P O. Estimation under Unknown Correlation: Covariance Intersection Revisited[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(11): 1879-1882.
- [20] Nihesen W. Information Fusion Based on Fast Covariance Intersection Filtering[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. Annapolis, MD, USA: IEEE, 2002: 901-905.
- [21] Mitchell R A, Westerkamp J J. Robust Statistical Feature Based Aircraft Identification [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 1077-1094.

作者简介:



古悦源(1971—),女,四川资中人,1993年获学士学位,现为高级工程师,主要从事机载射频系统应用研究。

GU Yue-yuan was born in Zizhong, Sichuan Province, in 1971. She received the B.S. degree in 1993. She is now a senior engineer. Her research concerns airborne RF system.

Email: guyueyuan_0306@sina.cn