

中国造船工程学会人才与教育学术委员会教材建设学组推荐

舰船现代化丛书

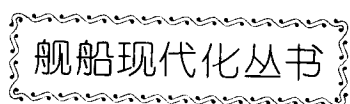
C³I系统中的数据融合技术

主编 王小非



哈尔滨工程大学出版社

中国造船工程学会人才与教育学术委员会教材建设学组推荐



C³I 系统中的数据融合技术

主 编 王小非
副主编 周永丰

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书以 C³I 系统工程实践为背景,系统地介绍了数据融合的理论及其应用。全书共六章:第一章介绍数据融合的定义、级别、功能和结构模型,提出 C³I 系统中数据融合的主要任务;第二章集中罗列了研究数据融合涉及到的一些数学基础知识;第三、四、五章分别叙述了 C³I 系统中的具有实际应用背景的三个重点问题,即目标的跟踪与滤波、数据关联、目标综合识别;第六章简单介绍了态势评估和威胁评估的一些概念性内容。

本书可供从事数据融合研究的工程技术人员参考,也可作为研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

C³I 系统中的数据融合技术/王小非主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2006
ISBN 7 - 81073 - 876 - 3

I . C… II . 王… III . 指挥工程 - 数据融合
IV . E917

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 122302 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 10
字 数 256 千字
版 次 2006 年 10 月第 1 版
印 次 2006 年 10 月第 1 次印刷
印 数 1—1 000 册
定 价 50.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

作为军事指挥、控制、通信和情报(C³I)系统的一个专门领域,数据融合描述这样一门技术,它处理各类传感器和各种来源的情报数据,实时获取目标的运动状态和身份估计,进行态势评估和威胁估计,为军事指挥人员提供一个作战需要的完整、连续的态势图形以便指挥人员及时地作出准确的判断与决策。

本书旨在向研究人员和工程技术人员介绍 C³I 系统中数据融合的基本理论及其应用,以期对实际系统的研制有所裨益,本书也可用作研究生教材。

全书共分六章。第一章由雷达信息系统处理的发展引入数据融合的定义、级别、功能和结构模型,提出 C³I 系统中数据融合的主要任务,以便读者对数据融合技术有一个基本的了解。第二章集中罗列了研究数据融合涉及到的一些数学基础知识,包括线性代数和概率论,以便阅读后续各章。第三、四、五章占用了本书大部分篇幅,分别叙述 C³I 系统中的具有实际应用背景的三个重点问题:目标的跟踪与滤波、数据关联、目标综合识别。第六章简单介绍了态势评估和威胁评估的一些概念性内容。

本书由王小非同志任主编,周永丰同志任副主编,负责全书写作的组织、结构安排和内容审阅。

参加本书编写工作的人员,依章节次序有:第一章,概述——周永丰;第二章,数学基础知识——黄登斌;第三章,目标跟踪与滤波——陈世友;第四章,数据关联——周永丰;第五章,目标综合识别——王元斌;第六章,态势评估与威胁评估——孙为民。

书中引用了一些作者的论著及其研究成果,编者在此向他们表示感谢!

耿伯英教授、刘轼研究员、孙潮义研究员等仔细地审阅了本书的内容,提出了许多有益的意见和建议,在此特致谢意!

本书得以出版,还应感谢哈尔滨工程大学出版社领导和责任编辑,他们为提高全书的质量花费了很多精力。

限于编著者的水平和参考资料的局限,书中定有不当之处,欢迎读者批评指正。

谨以此书献给武汉数字工程研究所建所 50 周年!

编 者

二〇〇六年六月于武汉

目 录

第1章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 数据融合的定义和级别	9
1.3 数据融合的功能模型和结构模型	13
1.4 当前 C ³ I 系统中数据融合的主要任务	18
参考文献	19
第2章 数学基础知识	20
2.1 线性代数	20
2.2 概率论	26
参考文献	40
第3章 目标跟踪与滤波	41
3.1 概述	41
3.2 目标运动模型	46
3.3 测量模型	59
3.4 基本的滤波方法	63
3.5 多模型滤波方法	71
3.6 应用示例	77
参考文献	81
第4章 数据关联	82
4.1 引言	82
4.2 单雷达多目标的点迹与航迹的相关	82
4.3 多源数据的相关	85
参考文献	108
第5章 目标综合识别	109
5.1 概述	109
5.2 平台数据库	112
5.3 特征提取	113
5.4 分类识别	117
5.5 身份融合	127
5.6 应用举例:基于电子侦察和光学成像侦察的目标综合识别算法	137
参考文献	140
第6章 态势评估和威胁评估	142
6.1 有关数据融合层次关系模型的讨论	142
6.2 态势评估	144

6.3 威胁评估 149

6.4 结束语 152

参考文献 153

第 1 章 概 述

1.1 引 言

1.1.1 概况

在 20 世纪 80 年代初,有关数据融合方面的文献尚且少见,但到 80 年代末,美国便每年举行两个关于数据融合领域的会议。它们是由美国国防部联合指导实验室 C³I 技术委员会和国际光学工程学会分别赞助召开的,每年发表大量的关于电子信息系统和多传感器数据融合方面的论文。十多年来,随着科学技术的发展,特别是微电子技术、集成电路及其设计技术、计算机技术、近代信号处理技术和传感器技术的发展,多传感器数据融合已经发展成为一个新的学科方向和研究领域。由于人类在各种不同电子信息系统中采用了大量的不同类型的传感器,因此,有时也将多传感器数据融合称为多传感器融合。

实际上,在第二次世界大战期间就已经把多传感器数据融合应用到实际系统中了,当时在高炮火控雷达上加装了光学测距系统,综合利用雷达和光学传感器给出的两种信息,不仅大大地提高了系统的测距精度,同时也大大提高了系统的抗干扰能力。不过那时没有使用计算机,对数据的处理、综合、判断都是由人工完成的。从这种意义上说,多传感器数据融合系统在二战期间就达到了实用程度,但数据融合(Data Fusion)一词是 20 世纪 70 年代出现的。另外,在民航的交通管制系统中,一次雷达和二次雷达配对也应用的是数据融合的概念,所以,在 20 世纪 70 年代之前,多传感器数据融合在民用领域也已经得到了应用。

近 20 年来,随着各种先进武器系统的出现与发展,世界各国都在发展或完善自己的 C³I (Command, Control, Communication, Intelligence)系统,以完成指定的战略和战术任务。C³I 系统如何将利用各类传感器所收集的大量信息和情报进行分析、处理、综合,作出正确的决策,就成了数据处理的一个新的和重要的分支,即 C³I 系统的数据融合技术。

到 20 世纪 90 年代初,美国已经研制了几十个军用数据融合系统。如“军用分析系统”、“多传感器多平台跟踪情报相关处理系统”、“海洋监视融合专家系统”和“雷达与 ESM 情报关联系统”、“超级座舱”、“自主式地面车辆系统”等。美国国防部将“多传感器数据融合”列为 20 世纪 90 年代重点研究、开发的主要关键技术之一,从 1992 年起,每年投巨资用于数据融合技术的开发与研究。其他国家的研发成果,如英国的“炮兵智能数据融合示范系统”等,也早已面世。从目前看到的资料,诸如此类已经应用的系统已超过 80 个,涉及陆、海、空各军兵种,这还没有考虑其他领域的各种应用系统。从国外的这些系统看,没有哪一个系统是完善的,或者说开始就有一个完善的多传感器数据融合系统。实际上,这都是一点一点逐步地发展起来的,由不完善到完善,由功能少到功能多。通过对国外的 80 多个系统的分析可以看出,目前的数据融合系统大约有以下几个特点:

1. 所采用的传感器类型,一般以雷达,电子情报(ELINT)接收机,电子支援测量(ESM)系统,红外、激光和可见光、声音传感器为主;

2. 所采用的融合算法,应用最多的是数据关联和多目标跟踪算法,其次是身份估计和基于知识系统的技术;

3. 所采用的系统按融合级别分,状态与身份估计、态势评估和威胁评估的比例约为8:5:1。威胁评估目前应用最少,可能是因为它最贴近战争,出于保密的原因,报道很少。

国内的研究是 20 世纪 90 年代以后才被重视起来的,可以说起步较晚,但目前已经有部分高校和研究所从事此领域的研究工作,已有部分专著面世,每年约有几百篇学术论文在国内、外学术刊物和会议上发表。

多传感器信息融合研究的对象是各类传感器提供的信息,这些信息是以信号、波形、图像、数据、文字或声音等形式给出的。传感器本身对数据融合系统来说是非常重要的,它们的工作原理、工作方式、给出的信号形式和给出测量数据的精度,都是我们研究、分析和设计多传感器信息系统,甚至研究各种信息处理方法所要了解或掌握的。各种类型的传感器是电子信息系统最关键的组成部分,它们是电子信息系统的信息源。如气象信息,可能是由气象雷达提供的;遥感信息可能是由合成孔径雷达(SAR)提供的;敌方用弹道导弹对我某战略要地的攻击信息可能是由预警雷达提供的等等。之所以说“可能”,是因为对每一种信息的获得,不一定只使用一种传感器。我们将各种传感器直接给出的信息称作源信息。如果传感器给出的信息是已经数字化的信息,就称作源数据;如果给出的是图像,就是源图像。源信息是信息系统处理的对象。信息系统的功能就是把各种各样的传感器提供的信息进行加工、处理,以获得人们所期待的、可以直接使用的某些波形、数据、图像或结论。基础理论的发展和技术的进步,使传感器技术更加成熟,特别在 20 世纪 80 年代之后,各种各样的具有不同功能的传感器如雨后春笋般相继面世,有无线电的、红外的、激光的、可见光的、声音的、电磁的等等。它们有非常优良的性能,已经被用于人类生活的各个领域。

源信息、传感器与环境之间的关系如图 1-1 所示。

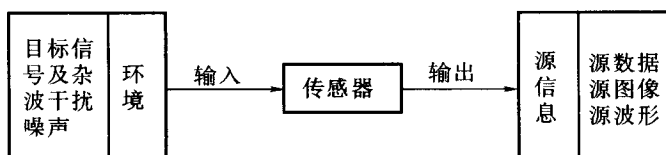


图 1-1 传感器、源信息与环境的关系

各种传感器的互补特性为获得更多的信息提供了技术支撑。但是,随着多传感器的利用,又出现了如何对多传感器信息进行联合处理的问题。消除噪声与干扰,实现对观测目标或实体的连续跟踪和测量,并对其属性进行分类与识别,分析敌我双方的兵力对比,提供敌方各类平台的瞬时位置及其企图,作出威胁判断等一系列多层次的处理,就是多传感器数据融合技术,有时也称作多传感器信息融合(Multi-Sensor Information Fusion)技术或多传感器融合(Multi-Sensor Fusion)技术,它是对多传感器信息进行处理的最关键技术。它在军事和非军事领域的应用都非常广泛。其在军事领域的应用包括海上监视、地面防空、战略防御与监视等,其中最典型的就是 C³I 系统;在非军事领域的应用包括机器人系统、生物医学工程系统和工业控制自动监视系统等。在多传感器系统中所用到的各种传感器又分有源传感器和无源传感器。有源传感器发射某种形式的辐射或信息,然后接收环境和目标对此的反射、

散射或应答,形成源信息,如各种类型的有源雷达、激光测距系统和敌我识别系统等;而无源传感器则不发射任何形式的辐射或信息,完全靠接收环境和目标的辐射来形成源信息,如红外无源探测器、被动接收无线电定位系统和电视跟踪系统等,它们分别接收目标发出的热辐射、无线电信号和可见光信号。

前面已经指出,数据融合在军事领域最典型的应用是 C^3I 系统,而 C^3I 系统中最主要的传感器是具有不同体制和功能的雷达。尽管第二次世界大战之后雷达有了很大的发展,但真正大的进步还是最近二十几年的事情。采用各种先进技术的各种不同体制的现代雷达已数不胜数。现代雷达信息处理技术已成为现代雷达技术的核心。

1.1.2 雷达信息处理系统的发展过程

C^3I 系统的一个重要使命是实时情报的接收、处理、显示和分发,数据融合则是情报处理的核心。情报的起源地应该是各类传感器,这些传感器中,最早使用、应用最广的是各种型号的雷达,因此,本节以雷达信息处理技术的发展为线索,叙述数据融合技术的发展。

在雷达应用早期,它完全依靠操纵员在荧光屏上对目标的有无进行人工判断。如发现目标,由操纵员根据雷达荧光屏上的刻度估计目标的距离和方位(目标的点迹),并对每个刚发现的目标由人工给予一个批号,然后向上级站口报所发现目标的坐标和批号。上级站在收到各雷达站报来的数据的同时,根据相应的坐标和批号,在标图板上进行标图。若干周期之后,便可在标图板上绘出目标的航迹。从这里可以看出,早期雷达的点迹与航迹的关联是由人工完成的,每条航迹都是由同一个批号的点迹形成的,对目标的跟踪是由操纵员和标图员在标图板上完成的。随着科学技术的发展,雷达体制越来越多样化,雷达发射波形越来越复杂,特别是电子计算机的普及和应用,使雷达的数据处理发生了革命性变化。雷达信号处理、信号检测和数据处理的技术、方法和手段更丰富、更先进,在干扰背景中能提取的信息越来越多;不仅能发现空中目标,而且能自动录取目标的坐标,并把它们连成航迹,判断目标是否机动,判断目标的类型、架次,飞行的意图,携带的武器等。要完成这些任务,就需要有坚实的理论基础、新的信息处理方法和其他高新技术,这是雷达系统乃至 C^3I 系统的核心技术,因此几十年来一直都是国内外研究的热点。从技术的角度来说,目前都采用雷达组网来提高系统发现目标的能力,这就必然导致从单雷达多目标数据处理演变到多雷达多目标数据处理,即多雷达数据融合。随着区域性的现代 C^3I 系统的研制,进而发展为多源数据的融合。

1. 在雷达发展过程中,雷达信号的检测、录取和数据处理可以概括为如下几个阶段。

(1) 在雷达站,由操纵员在荧光屏上通过人工的方法进行目标有无的判断,并估计目标的坐标,同时给予新目标一个批号。若目标存在,加上目标的坐标便是我们所说的目标点迹或测量。在雷达站的标图板上进行标图,并向上级站进行口头报告,在上级站的标图板上也按相同的方式进行人工标图。经多个扫描周期之后,在标图板上根据上报的目标形成若干条航迹,没有形成航迹的那些点迹通常称为孤立点迹,在后续若干扫描周期中没有延续点迹与它相关,则认为是噪声或杂波剩余所形成的虚警。

(2) 在雷达站,由操纵员在荧光屏上通过人工的方法进行目标有无的判断,如果是两坐标雷达,操纵员利用摸球或操纵杆产生一个瞬时信号,在距离和方位传感器上读出当时的坐标,给予一个批号,并同时批号和坐标数据显示在荧光屏上该目标附近,然后将坐标数据和批号送往电子标图板进行自动标图,同时通过数传机或口报将该点迹送往上级站。这种

录取方式便称为半自动录取。经多个扫描周期之后,最后在电子标图板上形成若干条航迹,没有形成航迹的那些点迹可能是虚警或新目标的点迹。这种工作方式的点迹与航迹的关联也是通过批号完成的,即每条航迹的各个点迹的批号是相同的。

(3)在雷达站,由雷达信号处理机通过雷达目标检测器自动判断目标的有无。如果存在目标,便自动在各种坐标传感器上读取坐标数据,这种工作方式便称作自动检测与录取。然后将坐标数据送往上级站进行数据处理,在上级站的综合显示器上显示目标的航迹和一些假点迹或孤立点迹。

(4)对多部雷达组成的雷达网,每部雷达均进行自动检测与录取,然后将各自的坐标数据送往信息处理中心,进行数据融合,这就是所谓的集中式处理方式。

以上过程就是雷达数据处理由人工向自动化发展的过程。这个发展过程,是科学发展的必然,也是战争发展的需要。我们知道,一个熟练的操纵员,在典型搜索雷达的一个扫描周期中,通过人工录取和口报的目标个数是有限的,而在现代战争中,目标可能有几十到几百批,甚至上千批,加上大量的杂波和干扰,传统的方法已经不能适应现代战争的需要。另一方面,由于战争的需要使雷达有了突飞猛进的发展,这主要体现在新的体制、新的技术和计算机的应用等方面。现代雷达的功能、抗杂波和抗干扰能力更强了,信息处理速度更快了,处理容量更大了。特别是,在现代战争中广泛使用具有不同功能、不同覆盖范围、不同频段的各种传感器以获取更多的信息,这就必须利用现代信号与数据处理的手段,实时处理来自多传感器大容量的雷达目标回波和杂波数据。这就是多雷达/多传感器多目标数据融合技术。

2. 现代雷达信息处理技术是现代雷达系统的核心技术。通常,人们把现代雷达信息处理技术分成三个层次,即雷达信号处理与目标检测、单部雷达的数据处理和多部雷达系统的数据处理,有时也分别称其为雷达信息一次处理、雷达信息二次处理和雷达信息三次处理。在雷达信息处理的基础上,人们又进一步发展了多传感器数据处理和多源数据处理。

(1) 雷达信号处理和目标检测

通常,经典的雷达信号处理主要是指雷达中频信号经相干检波或包络检波后,经动目标显示(MTI),自适应动目标显示(AMTI)、动目标检测(MTD),脉冲压缩(PC),恒虚警处理(CFAR)、视频积累等一系列处理。经信号处理之后,根据尼曼-皮尔逊准则给出有无目标的判断;如有目标存在,则录取其坐标,给出状态码,以形成点迹(Plot),也称测量。前者称为信号检测,后者称为信号录取。当然,目标的存在是在虚警概率一定的情况下,以概率出现的,这就是我们所说的发现概率。

20世纪80年代后期发展起来的阵列信号处理技术、自适应波束形成技术、自适应旁瓣相消技术、多普勒波束锐化(DBS)技术、各种成像技术和时-空二维处理技术等均属信号处理的范畴。通常把雷达信号处理与检测称作雷达信息一次处理。雷达信息一次处理是在每一部雷达的雷达站进行的,通常它利用的是同一部雷达、同一扫描周期、同一距离单元或距离门的信息。

雷达信息一次处理的作用是在杂波、噪声和各种有源或无源干扰的背景中,提取有用信息,即提升信号,抑制杂波、噪声和干扰,提高信噪比,以较高的概率发现目标。尽管现代雷达采用了很多信号处理技术,包括各种滤波技术,但由于杂波谱特性和滤波器特性不是很完美,总会有一小部分杂波和干扰信号漏过去,即滤波滤得不是很干净。这一部分杂波和干扰信号,我们称其为杂波剩余。

一次处理之后,有时为了减轻后续处理计算机的负担和防止计算机饱和,提高系统性能,还要对一次处理所给出的点迹(测量)进行过滤,以便进一步去掉或减少信号处理所产生的杂波剩余、噪声或远区杂波形成的假点迹。去野值及由于距离分割和目标检测准则等因素引起的目标分裂,也需要在这里进行目标合并处理。这些工作也可以看作是二次处理的预处理。

(2)单雷达数据处理

单雷达多目标的航迹处理是一个重要的而且是基础的课题。这里主要介绍边扫描边跟踪(Track - While - Scan)系统中单雷达多目标航迹处理过程。

将雷达信息一次处理中获得的目标回波视频信号转换为数字信号,就形成数字形式的目标点迹,这就是单部雷达数据处理的对象,构成数据处理单元的输入。航迹就是目标的运动轨迹,它们是由录取到的多个点迹按一定的准则连接而成的。一条完整的目标航迹通常包括航迹的时间参数、坐标参数、运动参数和属性参数等。单雷达目标的航迹处理(以下简称航迹处理),是指系统对单一雷达获取的目标信息进行的航迹处理。由于现代战争复杂而且条件恶劣,这种处理常是在多目标密集环境下进行的,从而也推动了航迹处理理论的发展。值得指出的是,尽管人们已提供了各种各样的方法,但目前这方面的工作尚无统一的理论,仍处于边研究边应用的状态。

通过录取获得的目标信息是在时间和空间上离散的一些孤立点迹。由于环境噪声、探测器材噪声等的影响,在这些录取到的点迹中,还可能存在大量的虚假点迹。如何根据这些离散的、存在虚警的点迹来建立、保持航迹,是航迹处理最基本的任务。具体地说,航迹处理包括以下的一些基本内容:点迹与点迹相关,目标航迹的起始;点迹与航迹的相关,即对新录取到的点迹与已有航迹的相关处理;滤波计算,即根据已有的点迹数据求取目标当前的坐标和运动参数;外推计算,即根据已有的航迹数据外推下一周期目标可能出现的位置,形成目标的下一周期的预测点;以预测值为中心建立一个波门,以限制其他目标和杂波进入该波门,等待下一采样周期该航迹对应目标的点迹

的到来,进行新的相关,相关上之后,再进行滤波计算,更新目标的位置和运动状态,周而复始,直至确认无该目标点迹的到来;航迹的质量管理,包括对航迹质量的评估和撤消;如果雷达工作环境是多目标环境,还要考虑航迹的交叉等处理。上述的一系列工作过程也叫跟踪,参见图 1-2。通过这种方法,我们实现了单一搜索雷达对多个目标边扫描边自动跟踪,摆脱过去用人工标图获取战场态势图的落后方法,从而大大缩短系统的反应时间,极大地提高了系统处理的目标批数。

单雷达数据处理单元的输出是所形成的(多)目标航迹。数据处理时所用到的主要滤波

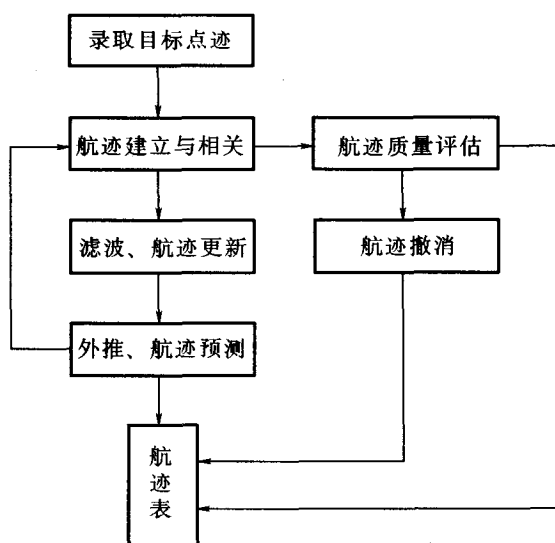


图 1-2 航迹处理流程

技术包括： $\alpha-\beta$ 滤波器、自适应 $\alpha-\beta$ 滤波器、 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波器、卡尔曼滤波器、扩展卡尔曼滤波器、自适应卡尔曼滤波器、多模型滤波器等。通常把雷达数据处理称作雷达信息二次处理。二次处理是在一次处理的基础上，针对同一部雷达、不同扫描周期的信息，实现对多目标的滤波、跟踪，对多目标的运动参数和特征参数的估计。它可以在各个雷达站的雷达录取终端上进行，也可以在雷达网的信息处理中心或C³I系统指挥中心进行。

(3)多雷达数据融合

雷达信息的三次处理通常是在信息处理中心完成的，它所完成的是多雷达或多传感器的信息处理。信息处理中心接收各部雷达送来的点迹或航迹，对它们继续进行数据处理。对多部雷达或传感器的点迹或航迹的处理通常称作多雷达数据处理或多传感器数据融合。每部雷达送来的航迹，通常称作局部航迹；对各雷达的局部航迹要进行相关判定，确定它们是否表示现实中的一个目标；如果是一个目标，则要对多雷达的数据进行合成处理，形成供本地指挥员使用的航迹，称作全局航迹或系统航迹，也称为合成航迹。根据不同的雷达网络结构，融合又分点迹融合和航迹融合。有时融合系统的结构确定了信息处理的关系，甚至影响其系统的性能。一般集中式网络结构采用点迹融合，分布式结构采用航迹融合。信息处理中心所接收的是多雷达的一次处理后的点迹或二次处理后的航迹，它们是三次处理的对象。三次处理不像二次处理是在一次处理之后进行的，有一个严格的时间顺序，它与二次处理之间没有严格的时间界限，它是二次信息处理的扩展和自然延伸，主要表现在空间和维数上。因此，三次处理所采用的技术，如数据关联方法、滤波方法等也是二次处理的扩展。三次处理用的是多部雷达或多传感器不同扫描周期的信息。

三次处理的功能是通过多部雷达或多传感器的多目标关联，进行目标的状态估计、属性或身份估计或识别，以便后续处理时实现态势和行为与威胁评估，为指挥员提供决策方案，即实现辅助决策。

图 1-3 所示为雷达信息处理的层次示意图。

(4)多传感器数据融合

不同传感器录取目标以后，获得目标的数据形式是不同的。搜索雷达、主动声呐获取的是目标的点迹数据；被动声呐、电子侦察机、雷达的被动工作方式等获得的是目标的方位数据；红外探测设备获得的是目标的方位数据和仰角数据；通信网络传输目标的点迹数据或目标的航迹数据；而如敌我识别器这一类传感器获得的是目标的一些属性参数。

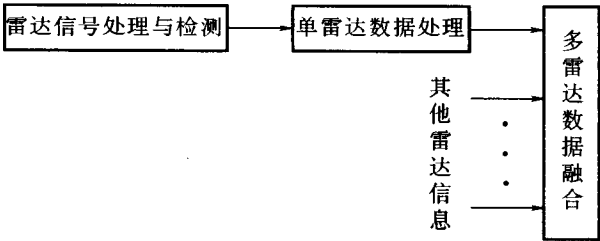


图 1-3 雷达信息处理层次图

人们发展雷达信息处理技术的同时，也关注着如何综合利用这众多类型传感器获得的众多格式的目标参数，综合出完整的战场态势。这就是多传感器数据融合。

现实中的不同传感器的输入呈现多种多样的形态。为研究方便，我们按传感器输出信息中含有的独立测量的个数来进行分类，我们称其为维数。某些传感器，如电子侦察设备(ESM)和被动工作方式下的声呐等，只能报出所测目标的方位(角度量)测量值，我们将它们的数据概括为一维数据；工程中大量使用的岸基、舰载、机载二坐标雷达能报出目标的方位、距离测量值，其特征是给出了目标的水平位置，我们称其为二维数据；二个具有不同地理位

置的一维传感器对同一目标的方位测量,经交叉定位解算,可以得到目标的水平位置,此时也就是获得了一个二维数据;岸基、舰载、机载三坐标雷达能报出目标的方位、距离、仰角的测量值,其特征是给出了目标的空间位置,我们称其为三维数据;红外设备是一种特殊的探测器,它能报出目标的方位、仰角(均为角度量)测量值,但得不到目标的水平位置估计;它在本质上是多个一维数据,为便于研究,将其单列,称为双一维数据。

多传感器数据融合就是判定各个同类、不同类传感器数据是否表示同一个目标,特别是判定不同维数数据的相关性;如果表示同一个目标,如何将它们合成起来,特别是将不同维数的数据合成。前者为多传感器数据的相关判定,后者为多传感器数据的合成。

(5)多源数据融合

在 C³I 系统中,以数据融合为主要工作内容的各级军事情报处理中心一般附着于各级指挥所。一个国家、一个军种的军事指挥体制是由多级指挥所构成的。各类传感器则按预定的情报报知关系将传感器信息报送指挥所,例如,海上舰载各类传感器将探测信息报送本舰指控系统、岸基雷达站报送基地或直送舰队等。而某一级指挥所不仅可能接收传感器信息,还可能接收经下级指挥所数据融合处理的综合情报。我们称前者为直接情报源信息,后者为间接情报源信息。

多源数据融合既包含直接情报源信息与直接情报源信息的融合,又包含间接情报源信息与间接情报源信息的融合,也包含直接情报源信息与间接情报源信息的融合。研究多源数据融合是符合 C³I 系统的特点和需要的。

1.1.3 数据融合系统中的主要传感器

科学技术的发展使现代战争的层次越来越高,反过来战争又推动科学技术的发展。特别是 20 世纪 70 年代之后发展起来的高科技兵器,如精确制导武器和远程打击武器等的出现,使现代战场扩大到了陆、海、空、天和电磁五维空间。目标探测传感器也从单一类型发展到多种类型,并可安装在多种武器平台上,以收集战场目标和环境信息,对目标或事件及时准确地定位和识别,准确地给出战场的态势和威胁评估,这就必须对所获得的信息进行综合处理、分析、判断,给指挥员提供高质量的决策信息。目前,在 C³I 系统中的各类传感器主要有以下几种。

1.1.3.1 雷达

1.按环境分

空中:机载脉冲多普勒(PD)雷达、机载预警雷达、机载火控雷达、合成孔径雷达(SAR)、逆合成孔径雷达(ISAR)等。

地面:地面搜索雷达、地面跟踪雷达、地面火控雷达、引导雷达等。

水面:舰载火控雷达、舰载搜索雷达、舰载导航雷达等。

水下:各种类型的声呐。

2.按技术分

相控阵雷达、动目标指示雷达、脉冲压缩雷达、单脉冲雷达、天波或地波超视距雷达、双基地雷达、连续波雷达等,是对所采用的技术而言的,它们都可能用在不同的环境中。

1.1.3.2 其他

电子情报(ELINT)接收机、电子支援测量(ESM)系统、红外(IR)探测与跟踪器、通信情报接收机、雷达告警机、激光测距及告警机、电视跟踪和光电(EO)传感器、敌-我-中识别器

(IFFN)等。

从这些传感器可以看出,它们所利用的频谱范围是很宽的。从音频、视频、微波、毫米波,一直到紫外和 γ 射线频段。其中紫外频段还分近紫外和远紫外频段;红外频段分近红外、短波红外、中波红外、长波红外和远红外频段;微波频段分Ka,K,Ku,X,C,S,L频段。需要注意的是,不同国家和不同技术领域对频段的定义可能略有差别。

有源和无源声呐、地震仪和直接声音探测仪利用的是音频信号,它可以从零点几赫兹到几十千赫兹;雷达所用的频段更宽,从短波一直到毫米波;红外频段尽管很宽,但云雨杂波衰减严重,红外探测器只有 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的两个窗口利用较多。表1-1给出了各个频段的名称、相对应的波长和频率范围。

表 1-1 信号波谱图

名称	波长	频率范围
γ 射线	$0.003\sim 0.1\text{ nm}$	$3\times 10^{12}\sim 10^{14}\text{ MHz}$
紫外线	$10\text{ nm}\sim 0.4\mu\text{m}$	$7.5\times 10^8\sim 3\times 10^{10}\text{ MHz}$
可见光	$0.38\sim 0.76\mu\text{m}$	$3.95\times 10^8\sim 7.5\times 10^8\text{ MHz}$
红外线	$0.76\sim 1\,000\mu\text{m}$	$3\times 10^5\sim 3.95\times 10^8\text{ MHz}$
毫米波	$0.1\sim 1.0\text{ cm}$	$30\sim 300\text{ GHz}$
厘米波	$1.0\sim 10.0\text{ cm}$	$3\sim 30\text{ GHz}$
分米波	$10.0\sim 100.0\text{ cm}$	$300\sim 3\,000\text{ MHz}$
米波	$1.0\sim 10.0\text{ m}$	$30\sim 300\text{ MHz}$
短波	$10.0\sim 100.0\text{ m}$	$3\sim 30\text{ MHz}$
中波	$100.0\sim 1\,000\text{ m}$	$0.3\sim 3\text{ MHz}$
长波	$1.0\sim 10.0\text{ km}$	$30\sim 300\text{ kHz}$
超长波	$10.0\sim 100.0\text{ km}$	$3\sim 30\text{ kHz}$

这些传感器可能分布在空间的各种运动平台上,但在性能上,它们可能有很大的差异,以雷达为例说明如下。

(1)有不同的精度。不同体制和功能的雷达,可能有不同的测距、测角、测高和测速精度。影响雷达精度的误差主要有两部分,即系统误差和随机误差。不同的雷达可能有不同的误差,这就使雷达有精度上的差异。

(2)有不同的分辨率。不同体制和功能的雷达的天线波束宽度和发射脉冲宽度不可能相同,必然有着不同的距离和角度分辨率。

(3)有不同的维数。根据战术和技术用途的不同,雷达有两坐标雷达和三坐标雷达之分,甚至还有专门用于测距、测角和测速的雷达。

(4)有不同的频段。如有米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达等,其中每个频段又可能分成很多波段。如厘米波雷达,又分X波段、C波段、S波段等;毫米波雷达又分 35 mm 和 96 mm 等。

(5)有不同的覆盖范围。根据用途不同,各种雷达的覆盖范围可能相差很大,远程雷达可探测几千公里,近程可能只有几十公里,某些特殊用途的雷达可能只能探测几米到几十

米,如探地雷达等。

实践证明,到目前为止还没有哪一个传感器能够取代一切其他传感器。传感器所提供的数据包含各种各样的信息,如目标的位置(距离、方位和仰角或高度)、速度、机型、架次、航班号、飞行方向以及它们所携带的电子装备、武器类型等。这些信息是数据融合中状态估计、身份估计、态势评估和威胁评估以及指挥员辅助决策非常重要的依据。每个传感器都是一个信息源,它们为多传感器系统提供多源数据。

在未来的战争中有非常多的武器装备运载平台,它们又都携带各种各样的传感器,这样就出现了需求。如何对它们所收集到的各种信息进行处理,去掉冗余信息,滤掉杂波和干扰,把有用的信息提取出来,这是一个非常艰巨的任务。解决这一问题的唯一手段就是数据融合或信息融合。实际上,对多传感器多目标进行融合的过程就是对多源数据进行处理的过程,它是单传感器多目标处理的扩展。

实际上,进行多传感器多目标数据融合是科学技术发展的必然结果,是科学技术的发展适应了现代战争在战术和战略上的需要。我们知道,现代战争的进攻策略多采用多批次、多层次、多方向的进攻,不仅目标数量多,而且类型也多样化,因此就要采用多种传感器搜集这些信息或数据。

图 1-4 所示为数据融合技术在 C³I 系统中应用的示例。

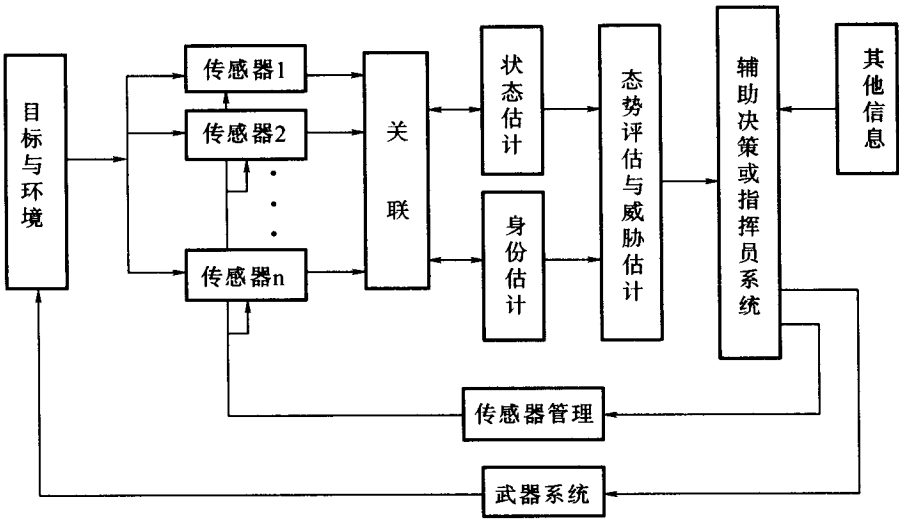


图 1-4 数据融合技术在 C³I 系统中的应用

1.2 数据融合的定义和级别

1.2.1 数据融合的定义

从军事角度上讲,数据融合最容易理解的定义恐怕要算是“对来自多源的信息和数据进

行检测、关联、相关、估计和综合等多级多方面的处理,以得到精确的状态和身份估计和完整、及时的态势和威胁估计”。这个定义强调数据融合的三个主要方面:

- (1)数据融合是在几个层次上对多源数据的处理,每个层次表示不同的数据提取级别;
- (2)数据融合的过程包括数据的检测、关联、相关、估计和组合;
- (3)数据融合的结果包括低层次的状况和身份估计,和较高层次的整个战术态势的评估。

因此,数据融合的基本目标简单说来就是通过组合获得比从任何单个输入元素更多的信息。这是最佳协调的结果:即通过多传感器协调和联合运行的优势来提高传感器系统的有效性。

1.2.2 数据融合的级别

按照信息抽象的五个层次,融合可分为五级,即检测级融合、位置级融合、属性(目标识别)级融合、态势评估与威胁估计。

1.2.2.1 检测级融合

检测级融合是直接的多传感器分布检测系统中检测判决或信号层上进行的融合。它最初仅应用在军事指挥、控制和通信中,现在它的应用已拓广到气象预报、医疗诊断和组织管理决策等众多领域。它在多雷达系统中的应用可以提高反应速度和生存能力、增加覆盖区域和监视目标数,并且提高系统在单个传感器情况下的可靠性。

在经典的多传感器检测中,所有的局部传感器将检测到的原始观测信号全部直接送给中心处理器,然后利用由经典的统计推断理论设计的算法完成最优目标检测任务。在多传感器分布检测系统中,每个传感器对所获得的观测先进行一定的预处理,然后将压缩的信息传送给其他传感器,最后在某一中心汇总和融合这些信息产生全局检测判决。通常有两种信号处理形式,一种是硬判决融合,即融合中心处理 0,1 形式的局部判决;另一种是软判决融合,中心除了处理硬判决信息外,还处理来自局部节点的统计量。在分布检测系统中,对信息的压缩性预处理降低了对通信带宽的要求。分散的信号处理方式可以增加计算容量。在利用高速通信网的条件下可以完成非常复杂的算法。

统计推理理论可以粗略地分为假设检测和估计,相应地,分布式信号处理也可分为分布式检测和分布式估计。在分布式检测系统中,由于融合中心只能得到经过压缩后的观测信息,因此相对于集中式检测会有性能损失。通过对传感器信息的最优局部处理和融合可以减小性能损失。大多数的研究就是开发高效的局部处理算法和融合算法。此外,还有网络结构的研究,例如网络在通信或传感器故障时的结构重构问题,以及传感器间的通信及传感器与融合中心间的通信问题。

1.2.2.2 位置级融合

位置级融合是直接传感器的观测报告或测量点迹和传感器的状态估计上进行的融合,包括时间和空间上的融合,是跟踪级的融合,属于中间层次,也是最重要的融合。对单传感器跟踪系统来说,主要是按时间先后对目标在不同时间的观测值即检测报告的融合,如边扫描边跟踪(TWS)雷达系统,红外和声呐等传感器的多目标跟踪与估计技术都属于这类性质的融合。在多传感器跟踪系统中,主要有集中式、分布式、混合式和多级式结构。

在集中式多传感器跟踪系统中,首先按对目标观测的时间先后对测量点迹进行时间融合,然后对各个传感器在同一时刻对同一目标的观测进行空间融合,它包括了多传感器综合

跟踪与状态估计的全过程。这类系统常见的有多雷达综合跟踪和多传感器海上监视与跟踪系统。

在分布式多传感器跟踪系统中,各传感器首先完成单传感器的多目标跟踪与状态估计,也就是完成时间上的信息融合,接下来各传感器把获得的目标航迹信息送入融合节点,并在融合节点完成坐标变换、时间校准或对准,然后基于这些传感器的目标状态估计进行航迹关联(相关)处理,最后对来自同一目标的航迹估计进行航迹融合,即实现目标航迹估计的空间融合。这类系统常见的有空中交通管制系统、舰载多传感器分布跟踪系统和机载多传感器信息综合系统等。

混合式位置信息融合是集中式和分布式多传感器系统相组合的混合结构。传感器的检测报告和目标状态估计的航迹信息都被送入融合中心,在那里既进行时间融合,也进行空间融合。由于这种结构要同时处理检测报告和航迹估计,并进行优化组合,它需要复杂的处理逻辑。混合式方法也可以根据所运行问题的需要,在集中式和分布式结构中进行选择变换。这种结构的通信和计算量都比其他结构大,因为控制传感器同时发送探测报告和航迹估计信息,通信链路必须是双向的;另外,在融合中心除加工来自局部节点的航迹信息外,还要处理传感器送来的探测报告,使计算量成倍增加。

多级式位置信息融合是上述三种结构的直接发展,它主要根据来自下一层融合中心的航迹估计信息,通过坐标变换、时间对正和航迹关联后,完成高层次空间融合,即航迹间的状态融合。这类系统主要是指海上多平台、各种战略和战役 C³I 系统。

1.2.2.3 目标识别级的融合

目标识别亦称属性分类或身份估计。在军事上,信息融合的目的是对观测实体进行定位、表征和识别。一个具体的例子是在一架作战飞机上装载威胁告警传感器,以便确定武器制导装置何时照射到该飞机;另一个例子是使用雷达截面积(RCS)数据来确定一个实体是不是一个火箭体、碎片或再入大气层的飞船。敌-我识别(IFF)设备使用特征波形和有关数据来识别敌我飞机;有时需要进行更详细和耗时的分析以辨别或识别发射机或武器平台。身份估计的非军事运用包括复杂系统设备故障的识别和隔离,使用传感器数据监视生产过程,及借助医学监视器对人的健康状况进行半自动监视等。用于目标识别的技术主要有模板法、聚类分类、自适应神经网络,或识别实体身份的基于知识的技术。

目标识别(属性)层的信息融合有三种方法,即决策级融合、特征级融合和数据级融合。

1. 决策级融合

在决策级融合方法中,每个传感器都完成变换以便获得独立的身份估计,然后再对来自每个传感器的属性分类进行融合。用于融合身份估计的技术包括表决法、Bayes 推理、Dempste-Shafer 方法、推广的证据处理理论、模糊集法以及其他各种特定方法。

2. 特征级融合

在特征级融合方法中,每个传感器观测一个目标并完成特征提取以获得来自每个传感器的特征向量。然后融合这些特征向量并基于获得的联合特征向量来产生身份估计。在这种方法中,必须使用关联处理把特征向量分成有意义的群组。由于特征向量很可能是具有巨大差别的量,因而位置级的融合信息在这一关联过程中通常是有用的。

3. 数据级融合

在数据级融合方法中,对来自同等量级的传感器原始数据直接进行融合,然后基于融合的传感器数据进行特征提取和身份估计。为了实现这种数据级的信息融合,所有传感器必