

数据融合方法概论

ESSENTIALS OF TECHNIQUES
IN DATA FUSION

赵宗贵 编译



电子工业部第二十八研究所
一九九八年四月

序

随着科学技术的发展,特别在进入二十世纪七十年代以后,高技术兵器尤其是精确制导武器和远程打击武器的出现,已使战场范围扩大到陆、海、空、天、电磁多维空间。目标探测传感器也从单一类型发展到多种类型,并且可装载在多种侦察/武器平台上,以各类战场目标和环境信息进行收集。由于每类传感器只是以一种介质或手段探测/收集战场目标的某一类表征信息,因此为及时准确地对目标进行定位和识别,进而给出准确的战场态势估计和威胁估计,必须对多传感器信息进行融合,以获得任一单类传感器无法达到的裨益。可以说,多传感器数据/信息融合已成为现代技术特别是高技术条件下各种战争样式中,正确决策指挥和克敌制胜所不可缺少的一项关键技术。

“数据融合”一词是美国1973年提出的,当时在美国国防部资助下,进行声纳信号理解的研究,对多个独立连续的信号进行融合,以检测某一海域中的敌方潜艇。1992年,美国国防部将其列为二十项重点关键技术之一,并在1987—1997财年中投入9亿美元进行数据融合技术研究。在海湾战争中,数据融合技术在战场目标识别和态势估计中发挥了重要作用。当前美国等军事强国的各类作战指挥自动化系统(C³I、C⁴ISR)和战场情报收集/处理系统中都具有较强的数据融合功能。多传感器数据融合的非军事应用也是显而易见的,在资源探测、机器人应用、自动监控、医疗诊断、辑毒辑私等诸多领域都有成功应用先例。

不难看出,数据融合系统所面对的专业内容跨越广阔的领域,其应用技术涉及众多的学科门类。本书

主要介绍数据融合系统所采用的技术和数学方法。从战术功能上看,这些融合处理包括战场目标定位和身份识别、战场态势估计和威胁估计等,当然被融合的信息既来自各类探测/侦察传感器,也来自各类技侦、部侦信息;还包括收集存贮在数据库/文件库中的已知信息和作战方案/计划信息等等。从融合技术上看,包含数据关联算法和估计算法(位置/状态关联估计和身份关联估计算法)。从学科类型上看,包含解析方法、统计方法和人工智能方法等。值得指出的是,由于信息来源带有不确定性和随机性,因此,数据融合涉及众多的不确定性处理方法,并且人工智能中的专家系统和神经网络技术在这里展现出广阔的应用前景。本文偏重对数据融合军事应用的描述,并且对融合系统的实现给出了有宜读者应用的建议。

本文是电子工业部第二十八研究所研究员级高级工程师赵宗贵主要以 David L.Hall 的“Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion”一书为基础编著的,供我所从事数据/信息融合课题研究使用和同行专家参考,不当之处请批评指正。

王维斌

前言

多传感器数据融合是涉及怎样组合多种(可能不同类型)传感器数据以对物理事件、行为或态势进行推断这一类问题而引伸出的技术。数据融合的应用跨越了广阔的范围,包括军事应用如战场监视、战术态势估计和威胁估计,以及非军事应用如机器人应用、自动制造业、以及遥感等。近年来,出现两个独立的数据融合团体,一个主要涉及军事应用,而另一个则集中于理论研究和非军事应用。面向军事应用的数据融合团体主要以会议形式进行交流,如每年一次在 Baltimore Maryland 举行的三军数据融合研讨会,在 Bournemouth England 举行的 C³MISC 会议,以及关于自动目标识别(ATR)和非协同目标识别(NCTR)的几年一次的交流会。这些会议所提出的意见强调军事问题以及解决这些问题的应用技术。为了推动不同的应用团体间的交流,隶属于联合试验领导组的 C³ 技术组的数据融合小组正在努力尝试建立标准的数据融合专用词汇。

第二个数据融合团体集中于非军事应用并借助各种技术杂志进行交流,如关于自动控制的 IEEE 学报和国际机器人学杂志;也通过学术会议,如关于传感器融合的半年一次的 SPIE 学术会进行交流。这些会议所提出的研究内容强调解决数据融合问题的理论上的技术。

数据融合研究工作由于跨越这两个团体的广阔应用和应用技术的多样性而变得复杂起来:数据融合技术所描述的似乎是一个大杂烩,它们来自统计学、人工智能、运筹学、数字信号处理、以及判定理论等诸多领域。学生、研究人员和应用工程师很难对这些应用和技术进行分类以确定对具体问题可使用的方法。

本书的目的是帮助研究人员和应用工程师理解基本的多传感器数据融合技术。在一定意义上,本书可以作为 E.Waltz 与 J.Llinas 的“多传感器数据融合”一书的一个分册。那部书提供了军事数据融合应用的一个概观

和基本问题的讨论。与其对照，本书集中讨论进行数据融合的数学方法，意图是介绍解决数据融合问题的各种形式的技术，并提供最原始的参考资料。大多数情况都没提供所介绍方法的推导。然而，对这些技术的讨论力图使读者理解这些方法，以及它们对数据融合的用途和处理流程。这里介绍的方法已广泛地用于军事和非军事应用中。

第 1 章重点提供对军事应用的数据融合介绍。该章描述了融合术语、功能、输入数据和输出的推断结果。介绍了一个数据融合模型，以及对融合裨益、结构思想的一个概述，并且介绍了作为关键的实现问题。还提供了对数据融合应用的一个概括。

第 2 章给出了数据融合技术和算法的一个概观。描述了位置和身份融合以及有关的辅助或支持功能的分类。该分类在数学上并不是严格的，它只是提供了一个可应用于数据融合的各种方法的途径和组织思想。

第 3 章阐述了数据关联问题。数据关联面对的问题是怎样将观测分组，并使每一组是表示同一个物理实体或事件的观测。对于同时观测多目标环境中的多目标跟踪来说，这个问题是特别严峻的。数据关联方法度量观测之间的相似性并给出观测能否归并到一起的判定逻辑。第 3 章描述了具体的关联度量标准、可选的判定策略。以及一般的关联处理流程。

第 4 章介绍了估计的概念和为估计表示系统特征的状态向量而进行数据融合的数学方法。在这个意义上，状态向量由描述物理实体或态势的基本变量构成。状态向量可以包含坐标(X,Y,Z)、运动变量(如速度)、或表征实体属性的参数(如实体尺寸，发射机频率等等)。估计技术包括成批最小平方和极大似然估计，以及序贯技术如 Kalman 或 $\alpha - \beta$ 滤波等。第 4 章描述了这些方法并提供了详细的处理流程。

第 5 章和第 6 章阐述了身份估计方法。第 5 章集中于基于特征的方法上，如聚集算法、自适应神经网络、以及参数模板等方法。第 6 章把讨论扩展到决策级融合，包括对来自多传感的说明进行融合。传统的方法，如

经典推理、Bayes 推理、和 Dempster-shafer 方法，并描述了一些新技术如 Thomopoulos 的推广的证据处理(GEP)方法，以及模仿人的意见处理方法等。

第 7 章提供了对基于知识技术的一个概观。在人工智能方面介绍了专家系统技术和逻辑模板法。特别强调了专家系统的实现问题，包括知识工程和测试与评估。所介绍的这些方法作为获得高级别的推理的工具，是态势估计、威胁估计、以及人类分析员进行的类似推理所需要的。

最后，第 8 章描述了实现数据融合系统中的一些主要题目：结构选择、适宜的算法选择、支持功能的开发如数据库管理和人/计算机界面、以及对测试与评估的讨论等。还描述了 54 个军事数据融合系统，具有 100 个原始来源的参考文献。第 8 章通过提供怎样实现实际应用的数据融合系统的建议作为本书的结束。

本书是供高年级大学生、研究生、数据融合研究开发人员、以及应用开发工程师使用的。对系统、参考文献和技术描述的综述会对理解和实现数据融合系统提供帮助。我希望本书对激励和迅速出现的多传感器数据融合领域有所贡献。

目 录

前言

第 1 章 多传感器数据融合引论

1.1 引言	1
1.2 融合应用	2
1.3 传感器和传感器数据	7
1.4 推理层次:输出数据	18
1.5 一个数据融合模型	21
1.6 数据融合的裨益	25
1.7 体系结构概念和问题	32
参考文献	41

第 2 章 多传感数据融合算法的分类

2.1 分类方法回顾	43
2.2 位置融合算法分类	45
2.3 身份融合算法分类	50
2.4 辅助支持算法分类	55
2.5 总结	61
参考文献	62

第 3 章 数据关联

3.1 引言	64
3.2 通用关联处理	69
3.3 门限滤除	75
3.4 关联度量标准	77
3.5 分配	87
3.6 总结	92
参考文献	93

第 4 章 估计

4.1 引言	94
4.2 估计的可选方法回顾	96
4.3 批估计	109
4.4 序贯估计	119
4.5 协方差误差估计	128
参考文献.....	132
第 5 章 身份说明	
5.1 身份说明与模式识别	134
5.2 特征提取	141
5.3 参数模板	149
5.4 聚集分析技术	151
5.5 自适应神经网络	158
5.6 物理模型	161
5.7 基于知识的方法	164
参考文献.....	166
第 6 章 决策级身份融合	
6.1 引言	169
6.2 经典推理	174
6.3 Bayes 推理	179
6.4 Dempster—Shafer 方法	185
6.5 推广的证据处理理论	194
6.6 身份融合的启发式方法	196
6.7 实现与调整	198
参考文献.....	201
第 7 章 基于知识的方法	
7.1 人工智能引论	203
7.2 专家系统综述	207
7.3 专家系统的实现	234
7.4 逻辑模板技术	248

参考文献.....	255
第 8 章 数据融合系统的实现	
8.1 数据融合系统的实现问题	258
8.2 结构选择	259
8.3 数据融合技术的选择	265
8.4 辅助支持功能的开发	271
8.5 数据融合系统的测试与评估	283
8.6 军事应用综述	285
8.7 看法和评述	295
参考文献.....	297

第一章 多传感器数据融合引论

1.1 引言

近几年,发展了一个新的学科,称为多传感器数据融合或分布式传感,以解决具有共同特征的各种问题。多传感器数据融合试图组合来自多个传感器的数据,以完成一个单一传感器独自所不能进行的推理。其应用复盖了各种军事问题,如自动目标识别,战场态势分析和威胁估计等。其它应用包括遥感问题,如地面植被的成份,矿产资源定位,工业上的应用如复杂机器(例如核电站)或自动生产的控制等。来自不同传感器的数据和这些传感器的类型使用下述学科技术进行组合,这些学科是:信号处理、统计学、人工智能、模式识别、认识心理学、信息论等。来自传感器的输入数据可以包含参量位置数据,如角度数据(例如方位、仰角和图象坐标--image coordinates),距离信息或距离率,以及与对象身份有关的数据(例如来自某一传感器的实际身份说明,可能与身份有关的参量数据如雷达横截面或频谱数据等)。

数据融合与人们汇集其连续感知的数据以对外部世界进行推断所使用的认识过程类似。人们接收感觉的数据--视、听、嗅、尝、触--然后才能进行估计,以得到关于环境及其所指内容的结论。例如为了识别一个很长时间没有见过的一个熟人,可以对某些要素进行鉴别,如通过表面形态识别其特定的的外观面貌(如突起的鼻子、头发颜色等),识别其声调模式,甚至到特殊的走路方式或手势。喜剧演员模仿知名人物的特殊外貌以引起尝识并讽刺别人。人类对一个态势的识别和估计在很大程度上受到训练状况、注意力、情绪、物理条件,以及其它因素的影响。一个医生对朋友或偶然相识的人进行诊断时,在认识上有很大差别。然而,人们总是利用对感知数据的自然融合去识别外界事件。为数据融合开发的许多技术都试图仿效人的能力来实现融合。

本章提供了数据融合问题的一个介绍并定义了基本术语。介绍了一个数据融合处理模型,其中含对应用、输入数据、输出、传感器类型和基本的实现问题进行了概述。值得注意的是,数据融合并不是如信号处理或数值方法那样具有较完好定义的意义下的学科,尚不存在完好定义的技术、术语和一个专业团体。而数据融合正在试图寻求一组折衷的算法和技术,以对付各种不同的问题。该领域中的第一本书是Waltz和Llinas的[1]。一个公认的技术和应用分类仅仅刚开始研究[2]。编撰数据融合一书的最主要的努力来自C3技术组的数据融合小组。C³I技术组是国防部(DOD)联合领导试验室(JDL)的几个专业组之一。联合领导试验室又把研究动态报告给负责C³I的助理国防部长。这个委员会由设在San Diego(圣地亚哥)的海军海上系统中心(NOSC)的Frank White主持。该委员会组织每年三军数据融合会议并每年考察美国军事学术团体,以确定研究方向、共同问题领域和已实现的系统。该委员会还力图改进融合处理模型和术语的一致性。所出现的另一个讨论会是由国际光学工程学会(SPIE--Society for Optical Engineering)发起的年会[3-6]。

本书将描述这个呈现出的一致意见并使用国防部发起的数据融合研究成果。的确,数据融合作为推进美国国防部态势的20项关键技术之一已列入国防部的关键技术计划。数据融合研究的其它倡议者包括SPIE主持的传感器和数据融合专题讨论会和在联合王国的Bournemouth每年支持的C3MIS会议。本书还介绍了取自工业、商业和其它领域的技术和例子。

1.2 融合应用

数据融合应用跨越了包括如表1.1所概括的军事和外军事应用的广阔领域。军事应用包括海上监视、空-空和地-空防御、战场情报、监视和目标获取以及战略预警和防御等。非军事应用包括法律执行、遥感、设备的自动监视,医疗诊断和机器人技术等。下面进行这些应用的概述。关于军事应用的其它信息可以在Waltz[7]和Blackman与Broida[8]中找到。第8章提供了实现数据融合系统的一个综览。

表1.1 多传感器数据融合应用的例子

具体应用	DF处理所得到的推断	原始观测数据	监视空间	传感器平台
海上监视	<ul style="list-style-type: none"> • 检测、跟踪、目标/事件识别 	<ul style="list-style-type: none"> • 声学、EM(电磁)辐射 • 核粒子 	<ul style="list-style-type: none"> • 100海里 • 空中/水面/水下 	<ul style="list-style-type: none"> • 船只 • 飞机 • 陆基 • 海基 • 潜艇
空--空地--空 防御	<ul style="list-style-type: none"> • 检测、跟踪、飞机识别 	<ul style="list-style-type: none"> • EMI辐射 	<ul style="list-style-type: none"> • 100海里(战略级) • 海里(战术级) 	<ul style="list-style-type: none"> • 陆基 • 飞机
战场情报监视与目标获取	<ul style="list-style-type: none"> • 可能的地面目标的探测和识别 	<ul style="list-style-type: none"> • EM辐射 • 核粒子 	<ul style="list-style-type: none"> • 一个战场10-100海里 	<ul style="list-style-type: none"> • 陆基 • 飞机
战备预警和防御	<ul style="list-style-type: none"> • 临近的战略行动迹象探测 • 弹道导弹和弹头探测/跟踪 	<ul style="list-style-type: none"> • EM辐射 • 核粒子 	<ul style="list-style-type: none"> • 全球 	<ul style="list-style-type: none"> • 卫星 • 飞机
法律的执行--毒品禁止	<ul style="list-style-type: none"> • 药品装船的运输/定位 	<ul style="list-style-type: none"> • EM辐射 	<ul style="list-style-type: none"> • 国境内 	<ul style="list-style-type: none"> • 拴绳气球 • 飞机 • 陆基
遥感	<ul style="list-style-type: none"> • 矿产蕴藏、庄稼和森林条件识别/定位 	<ul style="list-style-type: none"> • EM辐射 	<ul style="list-style-type: none"> • 100海里 	<ul style="list-style-type: none"> • 飞机 • 卫星
设备自动监视	<ul style="list-style-type: none"> • 识别/监视设备状态 • 识别/定位设备故障 	<ul style="list-style-type: none"> • EM辐射 • 电子流 	<ul style="list-style-type: none"> • 被监视设备的体积 	<ul style="list-style-type: none"> • N/A
医疗诊断	<ul style="list-style-type: none"> • 疾病、肿瘤等的诊断 	<ul style="list-style-type: none"> • EM辐射 • 核磁共振 • 化学反应 • 生物数据 	<ul style="list-style-type: none"> • 人体 	<ul style="list-style-type: none"> • N/A
机器人系统	<ul style="list-style-type: none"> • 障碍物识别和定位 	<ul style="list-style-type: none"> • EM辐射 	<ul style="list-style-type: none"> • 米/英尺 	<ul style="list-style-type: none"> • 机器人平台

取自Waltz[7]

海面监视力图探测、跟踪和识别目标、事件及作战行动。敌人重要行动的例子是从一个潜水艇发射鱼雷，一个水下发射的导弹的水面开口，以及潜水艇与其它舰船的通信等。海上监视范围包括其尺寸能够复盖的地球的一个有效空间的水下、水面、和机载目标。大量的舰船、潜艇、和飞机都包含在该监视中，并且作为重要目标处理。观察的数据类型跨越整个物理范围，从借助声纳浮标、拖曳的传声阵列和 underwater 阵列获得的声音数据，直到电磁频谱、核粒子和非核粒子。

空--空防御和地--空防御力图对武器的允许机动范围或使用范围内的飞机进行探测、跟踪和识别。识别单个飞机的系统有时称为IFFN(识别我、敌、中属性)系统，主要的可观测现象包括电磁辐射(红外、可见光和无线电频谱)用于无源和有源传感器如雷达、ESM接收机、红外(IR)摄像机、激光雷达和光--电子传感器(TV)。监视空间范围从战略应用的几百立方英里，如国家海岸线防空，到一个单个战术飞机防卫的几英尺半径。一个有密切关系的非军事应用是民用机场识别到来的飞机。

战场情报主要针对可能的陆地目标(移动目标、射击目标或辐射体)的探测和识别，以推断敌方的能力、战术和战略意图。电磁辐射是主要的可观测现象，包括从敌人的发动机中发射的红外(IR)线、无线通信、定向无线电波、雷达发射的射频(RF)、重要区域的可视照片和ESM(电子支援测量)接收机等。战场情报力图获得敌方的战斗序列(包含敌方准确识别信息、位置的数据库、敌人的平台、发射机的特征，以及部队单位等)，并且确定战斗序列的含义和企图，即敌方态势和威胁估计。战场情报所关心的区域从10到几百平方英里。现代武器的出现需要把所监视的战术区域扩展以与新式武器新增加的作用范围相适应。

战略预警和防御的任务有两方面：(1)探测最坏情况下即将临近的战略行动迹象，(2)探测和跟踪弹道导弹和弹头。该任务的困难

在于要特殊强调大规模战略防御的开始。需要有一个使用卫星和飞机的全球传感器系统。主要的可观测现象是电磁辐射（如实际可见的发射设施的确认、来自火箭烟缕、再装入弹头的加热和红外发射等）、核辐射等等。战略迹象探测和预警包含对敌人军事行动的观测，如通信、部队散布、警觉状态，以及直到非军事的政治活动。显然，对于这个问题的数据融合需要很复杂的观测、数据组合和借助于剧本、模型的推理等等。

融合的非军事应用则着手解决各种各样的问题，例如包括法律执行中的应用如毒品禁止、遥感、医疗诊断、复杂设备的自动控制与监视、以及机器人技术等。

法律执行应用类似于军事情报和监视。例如，禁毒可能包括侦察边境地区，以识别和定位毒品装运船只。传感数据包括类似于军事应用中使用的传感器。一个有专门训练的狗作为一个特殊生物传感器可以用于嗅出所出现的毒品。随着毒品犯变得愈益狡猾，数据融合所需的传感器作用范围及所需要进行的处理也变得愈益扩展。法律执行应用与军事还有另一个共同点，即罪犯所使用的反探测以减少传感器的信息量。毒品交易中的巨大利润导致罪犯力图采用尖端技术以逃避探测。

遥感应用包含对地面的监视，以识别和监视地貌、气象模式、矿产资源、环境条件和威胁情况（如原油泄露、辐射泄露等）。此外还可以监视数据的整个频谱。专用传感器如合成孔径雷达。在无源传感器监视可见光和和红外频谱时也容许进行有源（主动）监视。遥感的具体例子是NASA（美国国家航空航天管理局）所使用的用于监视地面情况的地球资源卫星和考察行星和太阳系的宇宙探测器和哈勃（Hubble）宇宙望远镜。这些例子中的每一个都包含一组协调使用的传感器，以对物理现象和事件进行定位，识别和解释。

此外还开发了用于监视和控制复杂设备和制造过程的融合系统。一些实际的系统如核电站和现代飞机都需要进行超出人类操作员的

能力的监视。对于保证系统连续地正常运行来说，半自动监视也是需要的。对来自多传感器的数据进行监视以估计系统的安全情况(health)。还开发了许多用于进行复杂设备自动故障诊断的数据融合系统。推断范围从简单的设备功能监视(如输入数据--温度、压力、速度在容许的范围内?)到复杂的推断(如一个即将发生融化的物质有什么迹象)都包含许多可能的观测值和迹象。

数据融合另外一些例子是医疗诊断所使用的技术。对于诊断共性的疾病来说,在基本的水准上,医生可以使用接触(触摸病人的皮肤,检查关节的运动),看(观察病人的气色,耳朵功能障碍的迹象),和声响(听呼吸的声音),以及病人自述症状。更复杂的问题可能包含获得多传感器数据(如X射线图象、核磁共振化学和生物试验、超声波)和其它数据,以确定病人的状况。一般地,的一个或多个医生使用这些数据来诊断病人状况。最近,仿效医生的推断处理而开发专家系统计算机程序的试验工作已经完成。众所周知的例子中包含MYCIN程序,是在斯坦福开发的用来诊断血液疾病,还有INTERNIST是开发的一个帮助医生诊断主要内科疾病的专家系统。[9]

融合应用的最后一个例子是机器人应用的多传感器数据的综合问题。工业机器人[10]使用模式识别和推理技术以识别三维对象,确定它们的方位,并引导机器人的附件去处理这些对象。Luo和Lin在[11]中回顾了。机器人多传感器融合问题。在Carnegie Mellon大学所进行的其它试验正导致开发运动的机器人,能够避开障碍物并按照通常的指挥行动。

这些例子并没有详细讨论数据融合技术可以应用的问题范围,然而它们却指出了数据融合问题可能类型的广度。

数据融合问题与具体应用的明显形式有什么不同?数据融合应用可以通过评估下述问题和论点表征出来:

1. 数据融合系统进行的具体推理是什么?是重要事件的定位、识别或表征吗?这些推理直接与输入数据(如输入数据超出了先

验门限)有关吗? 是否要寻找更复杂的模式或推理?

2. 潜在的可观测的是什么数据? 观测的有效物理现象是什么? 一如电磁、核、化学、生物、磁、声音等

3. 什么是传感环境? 干扰、噪声、或有源对抗措施是否会降低传感器的观测效果? 观测者能够任意控制传感环境吗?

4. 什么样的传感器是有效的或可用的? 传感器类型、传感器数量、数据质量、传感器对不利的传感环境的敏感度的意义是什么? 数据融合系统所使用的主动(有源)、被动(无源)、可控或可操纵传感器的概念是什么?

5. 什么是观测数据类型及其关联等级?

6. 最后, 什么是推理过程的时间系统? (即事件的物理出现、有关数据的观测以及推理所需要的时间之间的时间分划是什么—毫秒、秒、分、小时、天?)

这些论点的类型表征数据融合应用的情况, 在随后的讨论中, 我们将看到这些论点对数据融合技术的选择和使用的影响, 以及对融合系统的实现所起的重要作用。

1.3 传感器和传感器数据

一个传感器数据融合系统的输入包含三类基本分量: (1) 传感器观测的数据, (2) 人类操作者或用户输入的数据或命令, (3) 来自预设数据库的先验数据。本节对传感器、传感器数据、以及传感环境作一个简短的介绍。

Waltz[7] 提供了对能量频谱和相关联的传感器系统(它对每个能量范围都是有用的)的一个概观。对传感器的一般讨论是

Hovanessian[12]提供的。摘自Waltz的表1.2表示已经研制出的传感器的可探测特征的范围, 从声音现象到核和非核粒子发射。该表列出了可探测特征, 对应的频谱范围和相关联的传感器系统。

传感器使用有源或无源探测方法能够遍及整个能量频谱。有源传感器采用感生一个可探测现象的方式, 把能量发射到被观测的目

表1.2 对数据融合有用的传感频谱

可探测的特征	频谱范围	传感器系统
声音频率	1Hz→10KHz	声音检测器 有源/无源声纳、地震仪
电磁	1Hz→1MHz (LF) 10MHz→100MHz (VF/VHF/UHF) 1→10GHz 10→50GHz (SHF/EHF). 30→300GHzMMW)	地磁仪、无源ESM接收机 雷达(单稳、多稳) • 监视系统 • 燃烧控制 • 毫米雷达、辐射仪
红外(IR) 波长 可见光 紫外线(UV)	300→1A 0.7→0.4A 0.4→3×10 ⁻⁴ A	红外线辐射仪 • 在搜索跟踪中扫描 • 焦点平面排列 多频谱阵列 激光雷达 EO传感器(TV) UV光谱仪
核粒子	3×10 ² →3×10 ⁻⁴ A	X光检测仪 伽玛射线检测仪
非核粒子		质量(Mass)光谱仪

取自Waltz[7]