

# 基于星载电子侦察与成像侦察的数据融合技术

王 壮<sup>1</sup>, 樊 昀<sup>2</sup>, 王 成<sup>1</sup>, 康少单<sup>1</sup>, 孙兆林<sup>1</sup>, 胡卫东<sup>1</sup>, 郁文贤<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073; 2. 总参第 54 研究所, 北京 100083)

**摘 要:** 该文在提出单星侦察体制下的电子侦察与成像侦察融合方案的基础上, 研究了基于不精确图匹配方法的平台配准算法和基于模糊推理与证据理论的目标融合识别算法等数据融合技术, 并构建了一个星载电子侦察与成像侦察融合仿真系统。仿真实验结果表明, 融合电子侦察信息与成像侦察信息提高了目标定位精度与目标识别准确性。

**关键词:** 星载电子侦察与成像侦察; 数据融合; 目标定位; 目标识别

**中图分类号:** TP182 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2127-04

## Data Fusion Based on Spaceborne Electronic and Imaging Reconnaissance Information

WANG Zhuang<sup>1</sup>, FAN Yun<sup>2</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, KANG Shao-dan<sup>1</sup>, SUN Zhao-lin<sup>1</sup>, HU Wei-dong<sup>1</sup>, YU Wen-xian<sup>1</sup>

(1. ATR State Key Lab, National Univ. of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. No. 54 Institute, General Staff Department of PLA, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper proposes a spaceborne electronic and imaging reconnaissance data fusion system. With the platform registration algorithm based on nonprecision map matching and the target fusion identification method based on fuzzy reasoning and evidential theory, a data fusion simulation system of spaceborne electronic and imaging reconnaissance is founded. Simulation results demonstrate that this system has superior target orientation and identification performance.

**Key words:** spaceborne electronic and imaging reconnaissance; data fusion; target orientation; target identification

## 1 引言

多种天基信息获取手段的综合利用, 可以有效地提高传感器的使用效率, 提高对监视区域的时间、空间覆盖率, 增强战场战略和战术监视能力。天基信息融合已成为未来有效获取制太空信息权的重要手段<sup>[1]</sup>。在众多天基信息获取手段中, 航天电子侦察通过侦测目标的电磁辐射来获取敌方军事能力、意图、组成和部署, 成像侦察利用可见光、红外、合成孔径雷达、激光、多光谱获取目标二维或三维像。电磁辐射特征和成像特征从不同角度共同刻画了目标在全电磁谱段的不同属性, 两者之间存在着多个层次的互补性。将两者有机结合起来, 不仅可以发挥各自的特点, 而且在提高目标定位精度和识别准确度方面具有极大的优势。

本文结合电子侦察和成像侦察的各自特点, 提出了单星侦察体制下的电子侦察与成像侦察融合方案; 并对方案中的关键技术进行了研究, 给出了基于不精确图匹配方法的平台配准算法、基于模糊推理的目标识别算法和基于证据理论的目标融合识别算法; 最后根据上述研究成果, 构建了一个星载电子侦察与成像侦察融合仿真系统, 给出了仿真试验结果。

## 2 基于单星侦察体制的电子侦察与成像侦察融合系统

就航天侦察而言, 电子侦察获取的目标定位精度一般在公里~几十公里级, 瞬时监视范围一般在数百~数千平方公里; 而成像侦察的图像分辨率一般在米级, 定位精度一般在百米量级, 瞬时成像一般在几十公里的量级。因此在数据配准、融合后可以显著提高定位精度。此外, 电子侦察刻画的是目标配属的辐射源特征, 与分辨率无关, 侦察数据经过处理, 获得辐射源参数后, 在有关情报的支持下, 可以较为准确地判定辐射源类型及型号; 而成像侦察的目标识别能力直接与分辨率有关, 在较低图像分辨率情况下, 只能判定目标粗的类别归属; 但提供成像侦察和电子侦察的融合处理, 则可以进一步判定目标的类型及型号。综合上述分析, 我们提出了一种基于单星侦察体制的电子侦察与成像侦察融合系统(如图 1 所示)。

由于是单星侦察体制, 电子侦察与成像侦察两种不同类型的传感器共一个平台, 加之电子侦察监视区域广、发现目标早, 因此将首先由脉冲分选/辐射源定位模块完成侦察脉冲列的分选及辐射源定位, 然后根据其提供的辐射源位置及误差

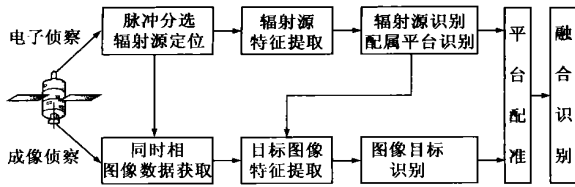


图1 基于单星侦察体制的电子侦察与成像侦察融合系统组成框图

信息以及侦收时间,引导成像传感器提取给定时间段和地理位置范围内的目标图像.该方式可以保证两种数据是同时相的,数据的时效性好.对已分选好的脉冲列,由辐射源特征提取模块提取辐射源特征,并结合历史雷达侦察情报和雷达数据库,识别判断辐射源类型;进一步结合配属平台数据库,识别雷达配属平台,给出相应的置信度.对经引导成像后的图像提取目标区域,并利用辐射源识别的初步结果,提取目标成像特征.该方式有利于提高图像识别的效率.图像目标识别模块利用领域知识库,结合成像几何/辐射以及编队特征,判断目标类别,并给出相应的置信度.

由于电子侦察和成像侦察使用的是完全不同的传感器类型,而且两者的定位精度相差1~2个数量级,因此很难直接进行数据关联.经过分析,本系统选择在目标平台级完成两种侦察手段的融合.首先通过构造目标集合各组成部分的相对位置关系图来完成目标平台时空关系的配准,给出了基于不精确图匹配方法的平台配准算法;其次选择决策层完成目标融合识别,给出了基于模糊推理的目标识别算法和基于证据理论的目标融合识别算法.

### 3 电子侦察与成像侦察数据融合技术

#### 3.1 基于不精确图匹配方法的平台配准算法<sup>[2]</sup>

根据电子侦察和成像侦察定位结果,可以分别得到目标空间位置关系图  $G$  和  $g$ .这里采用一维匹配矢量来描述  $G$  与  $g$  之间的顶点对应关系,即  $M_{vec} = (m_1, m_2, \dots, m_{N_g})$ ,其中  $m_i \in \{g_1, g_2, \dots, g_{N_g}\} \cup \{Null\}, \forall i, 1 \leq i \leq N_g, g_i$  对应于关系图  $g$  中的第  $i$  个顶点,  $\{Null\}$  表示该顶点失配.为了保证匹配不出现“一对多”或“多对一”的情况,  $M_{vec}$  要满足如下限制条件:

$$\forall j, \sum_{i=1}^{N_g} (g_j - m_i) = 1, \quad j \in [1..N_g] \quad (1)$$

其中  $\delta(x)$  是单位冲击响应函数.定义解向量  $M_{vec}$  的邻域如下:

**定义** 若  $S$  是匹配的解向量集合,定义解的邻域结构为映射:  $N: S \rightarrow 2^S$ .其涵义为对于每个解向量  $M_i \in S$ ,存在一个解向量集合  $S_i \subset S$ ,如果满足  $M_j \in S_i \iff M_j \in S_j$ ,称  $S_i$  为解  $M_i$  的邻域.

**定义** 解向量的  $n$  阶交换邻域.解向量中的  $n$  个分量彼此交换取值,特别当  $n=0$  时,某一分量寻找保持在可行解范围内的其它可能取值,替换当前值.

采用一阶和零阶邻域.在实验中,若选取的典型区域的上限为  $n_{max}$ ,不考虑0阶邻域,则邻域内解向量的个数至多为

$(n_{max} - 1)!$ ,基本包含全部可行解.为减小邻域的尺寸,缩小搜索范围,采用最小冲突法搜索:寻找最坏解分量,并以它作为一个交换元,构造邻域,在邻域内寻找最佳解分量,重复该过程,直到解分量不再变化为止.

记当前解向量为  $M_c = \{m_1, m_2, \dots, m_{N_g}\}$ ,定义解分量  $m_i$  的匹配度  $IC(m_i, M_c)$  为:

$$IC(m_i, M_c) = (1 - a) \prod_{j=1}^{N_g} C_{G_j m_j} + a C_{G_i m_i} \quad (2)$$

最坏解分量定义为  $IC(m_i, M_c)$  值最小时的解分量.

#### 3.2 基于模糊推理的目标识别算法

**3.2.1 基于模糊集理论的目标特征不确定性模型** 在模糊集理论框架下,构造目标特征模式的不确定性模型等效于建立恰当的隶属函数.隶属函数必须能够客观反映不同目标特征模式之间的不确定划分以及各类特征模式本身的不确定性情况.根据特征参数的变量类型(离散型、连续模拟型)建立不同的隶属函数.对射频调制方式、重频调制方式、脉冲变化方式等数字离散型参数来说,其隶属函数可采用枚举型定义,例如雷达的射频调制方式共有  $n$  种调制方式,某型号雷达采用其中的第  $i$  种 ( $i \in [1, n]$ ) 射频调制方式,则相应隶属函数定义如下:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x = i \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

而对于载频、重频、脉宽、平台的长、宽尺寸等这类连续模拟型参数来说,建立隶属函数时,需要考虑两个因素<sup>[3]</sup>:传感器工作时的干扰情况;目标本身的性能(比如辐射源载频的线性漂移)以及模板库的完备程度(军事保密的需要以及辐射源信号环境的复杂).若考虑第一种因素,一般选取正态型函数作为传感器测量值的隶属函数;考虑目标本身的性能以及模板库完备程度等因素,特征参数是在一定区间内均匀变化的,因此选取修正的正态函数作为模板库中特征参数值的隶属函数如式(4):

$$\mu_1(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{x-a}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1}\right)^2\right], & x = a \\ 1, & a < x < b \\ \exp\left[-\left(\frac{x-b}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1}\right)^2\right], & x = b \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\sigma_1$  表示  $\mu_1(x)$  的展度,  $[a, b]$  表示数据库中该特征参数值的主值区间.

在确定特征隶属函数形式后,要进行模糊匹配.基于电子侦察和成像侦察的单传感器目标识别实际上就是要将观测特征模糊数矢量归入到一个与它最相似的特征模板模糊数矢量所属的目标类别中去.我们采用格贴近度作为刻画两个模糊集之间相似性的测度<sup>[4]</sup>.此外,由于特征矢量中不同特征在目标识别中所起作用不同,因此不同特征具有不同的权重,可采用线性加权的方法对各特征的相似性测度进行加权综合.

**3.2.2 电子侦察识别结果的层次转换** 电子侦察的识别结果是目标平台上所装备的辐射源类型,而成像侦察的识别结果是目标平台类型.两种侦察手段的识别结果处于不同的层

次,这就需要在融合识别前将电子侦察识别结果转化为平台类型.

令  $R = \{ R_i \mid i \in [1, N] \}$ ,  $P = \{ P_j \mid j \in [1, M] \}$  分别表示模板库中辐射源集合和平台集合,则电子侦察的识别结果可表示为  $L = \{ (R_1, d_1), \dots, (R_i, d_i), \dots, (R_N, d_N) \}$ , 其中  $d_i$  表示目标属于  $R_i$  型辐射源的相似度. 根据已知的平台和辐射源装备关系,可知  $R_i$  型辐射源可能配属平台集合为  $u_i$  ( $u_i \subset P$ ), 则由电子侦察识别结果中的  $(R_i, d_i)$ , 可以推出一个平台型号识别集合  $T_i = \{ (P_1, s_{i1}), (P_2, s_{i2}), \dots, (P_M, s_{iM}) \}$ , 其中  $s_{ij}$  表示  $R_i$  型辐射源可能配属的平台相似性测度:

$$s_{ij} = \begin{cases} d_i & , P_j \in u_i \\ 0 & , \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

这等价于当前有  $N$  个传感器对该辐射源所属的平台进行探测,得到  $N$  组识别结果  $T_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ). 对于这种以模糊集形式表示的目标识别结果,可以用可能性分布表征描述<sup>[5]</sup>:

设  $K$  是在  $P$  上取值的变量,给定命题范式“ $K$  是  $u_i$ ”,由于  $u_i$  是论域  $P$  上的一个非模糊集,而判决者又不能肯定  $K$  的真实值一定在  $u_i$  中,因此事实“ $K$  是  $u_i$ ”是不确定的. 带有相似性测度  $s_{ij}$  的事实“ $K$  是  $u_i$ ”表示  $K$  取  $u_i$  之外的可能性是  $1 - s_{ij}$ ,从而导出一个与  $u_i$  对应的可能性分布  $i_j$ ,由可能性理论得赋值方程

$$i_j = \begin{cases} 1 & , P_j \in u_i \\ 1 - s_{ij} & , P_j \notin u_i \end{cases} \quad (6)$$

即得到目标识别结果的可能性分布

$$T_i = \frac{i_j}{P_j} \quad (7)$$

选取合适的模糊综合函数,对上述等价的  $N$  个传感器的可能性分布进行综合处理,即可将电子侦察的辐射源识别结果转化为平台类型识别结果  $T = \{ (P_1, S_1), (P_2, S_2), \dots, (P_M, S_M) \}$ .

### 3.3 基于证据理论的目标融合识别算法

**3.3.1 基于电子侦察和成像侦察识别结果的证据模型** 目标融合识别是将关于目标属性的多信源数据进行有机合成,产生比系统中任一单一信源更有效、更精确的属性估计和判决,其目的在于消减系统感知中的各种不确定性,摆脱单个信源的局限性<sup>[6,7]</sup>. 因此有效地描述各种不确定性是成功实现目标融合识别的前提条件. 对于应用证据理论而言,就是如何把有关目标身份的信息转化成用一个用基本概率分配函数形式表示的证据模型. 对于本系统而言,也就是如何在融合前将电子侦察和成像侦察的单传感器识别结果转化为目标特性-目标类型的基本概率分配函数.

我们通过对信任函数的相容性关系 (Compatibility relation)<sup>[8]</sup>解释的扩展,得到辨识空间  $P$  (即平台集合) 上的基于模糊模型的局部证据模型<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} m_i(\bar{P}_i) = 1 - S_i \\ m_i(P) = S_i \end{cases} \quad (8)$$

这样就可以把所有的可能性测度  $S_i$  都转化成一系列的局部证据模型  $m_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ). 由于  $P$  中的各个假设  $P_j$  是互不相交的,而可能性测度  $S_i$  来自对不同的假设  $P_i$  下数据分

布的计算结果,而构造不同假设  $P_i$  下的数据分布时所取的样本集是不同的,因此我们可以说  $S_i$  是不相关的,或者说由  $S_i$  获得的一系列证据  $m_i$  之间是互相独立的,所以可以使用 Dempster 规则对这些局部证据模型进行合成,得到一个全局证据模型  $m$ :

$$m = \bigoplus_{i=1}^M m_i \quad (9)$$

**3.3.2 基于均衡信度分配准则的冲突证据组方法<sup>[9]</sup>** 由于电子侦察与成像侦察在性能上的差异,使得在目标较多的情况下,容易导致平台配准产生错误,加之干扰与欺骗信息的广泛存在,即使是属于相同目标的证据也会蕴含着不确定的、甚至是相互冲突的信息. 如何对这些证据进行有效组合,开发兼有稳健性和准确性的融合算法是当前目标融合识别理论研究中的一重要课题<sup>[10]</sup>. 作为一种不确定性推理方法, D-S 证据理论用 Dempster 组合规则将各个独立的信源提供的证据进行组合,以获得对目标身份的一致性描述或解释. 但是在合成高度冲突的证据时,组合结果往往有悖常理. 为了克服这一缺陷,我们提出了基于均衡信度分配准则的冲突证据组方法,即:

$$\forall C \subseteq \Omega, m(C) = m_0(C) + m^c(C) \quad (10)$$

其中  $m_0 = \frac{m_1(A_i) m_2(B_j)}{A_i \cap B_j = C}$  表示证据  $m_1$  和  $m_2$  共同对焦元  $C$  的支持大小;

若  $C \cap B = \emptyset$ , 则  $m^c(C) = \frac{m_1(C) m_2(B)}{m_0(C) + m_0(B) + m_0(C \cap B)} (1 - R)$ ;

若  $C = A \cap B$  且  $A \cap B = \emptyset$ , 则  $m^c(C) = \frac{m_1(A) m_2(B)}{\left[ \frac{m_0(C)}{m_0(A) + m_0(B) + m_0(C)} (1 - R) + R \right]}$ ;

$R = \frac{|m_1(A) - m_2(A)|}{2}$  表示证据  $m_1$  和  $m_2$  的总体冲突程度.

当  $R = 1$  时,即证据间剧烈冲突,冲突大部分分配给涉及冲突的焦元的并集;当  $R = 0$  时,即证据间冲突较弱,根据冲突证据对涉及冲突的焦元及其并集的支持程度进行冲突分配.

## 4 星载电子侦察与成像侦察融合仿真系统

基于上述方案及数据融合技术,我们开发了一个融合仿真系统,仿真利用星载电子侦察设备与光学成像系统获取海上编队目标的位置、电磁参数、目标平台几何特征等信息,并通过对各种信息进行融合以提高目标定位精度,获得目标平台属性等信息. 图 2 和图 3 分别是对由六个不同型号舰船目标组成的海上编队进行仿真实验得到的识别和定位结果. 由图 2 可以看出融合前由于只利用了图像信息,目标识别存在模糊情况,目标 2~5 的平台类型不能确定;经过融合识别,由于利用了电子侦察获得的目标电磁辐射特征,消除了模糊现象,提高了识别准确度. 由图 3 可以看出融合前电子侦察系统定位精度  $< 20\text{km}$ , 融合后由于成像侦察系统的高精度定位,使整个定位系统的定位精度得到较大提高,定位误差达到几十米级.

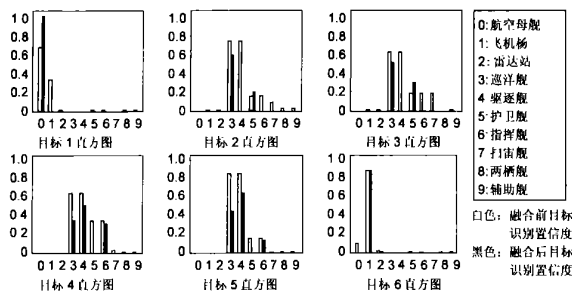


图 2 融合前后目标识别置信度比较  
(纵坐标 - 置信度, 横坐标 - 目标类型)

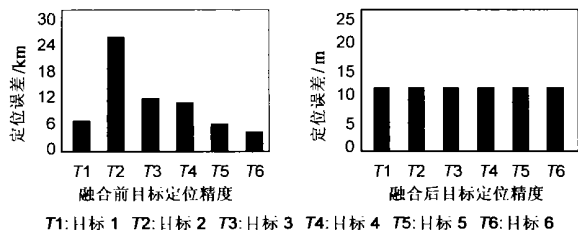


图 3 融合前后目标定位精度比较

### 5 结论

本文结合电子侦察和成像侦察的各自特点,提出了单星侦察体制下的电子侦察与成像侦察融合方案.该方案利用互补信息,有效地克服了电子侦察系统定位精度较低,成像侦察系统瞬时覆盖范围小、目标成像受客观条件制约的缺点,充分发挥了电子侦察系统侦察范围广、目标识别准确性高,成像侦察系统定位精度高的优点.通过给出基于不精确图匹配方法的平台配准算法、基于模糊推理的目标识别算法和基于证据理论的目标融合识别算法,解决了方案实现中的关键问题,并成功地构建了一个融合仿真系统.仿真实验结果表明,星载电子侦察与成像侦察融合系统提高了目标定位精度与识别准确度,具有较大的实际应用价值.

### 参考文献:

[ 1 ] 袁俊. 美国的国家战略预警系统[Z]. 中国航天, 2001. 11.

[ 2 ] 樊昀. 基于内容图像检索的一些关键技术研究[D]. 湖南长沙: 国防科技大学研究生院, 1998.

[ 3 ] 张启忠, 等. 用于物体分类的多传感器集成与信息融合系统[J]. 模式识别与人工智能, 1998, 11(2): 113 - 117.

[ 4 ] 吴孟达, 等. 模糊集理论及其应用[M]. 湖南长沙: 国防科技大学出版社, 1998.

[ 5 ] 王国宏, 等. 基于可能性理论的雷达识别方法[J]. 电子对抗, 1995, 4: 34 - 40.

[ 6 ] Coombs K, Freel D, et al. Using dempster-shafer methods for object classification in the theater ballistic missile environment[A]. SPIE vol. 3719, Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Applications [C]. Bellingham, UK; Belur V. Dasarathy, 1999. 103 - 113.

[ 7 ] Llinas J, Waltz E. Multisensor Data Fusion [M]. Boston, MA: Artech House, 1990.

[ 8 ] Lingras P, Wong S K M. Two perspectives of the Dempster-Shafer theory of belief functions[J]. Int. J. Man-Machine Studies, 1990, 33: 467 - 487.

[ 9 ] 王壮. C<sup>4</sup>ISR 系统目标综合识别理论与技术研究[D]. 湖南长沙: 国防科技大学研究生院, 2001.

[ 10 ] 董志鹏, 刘兴, 等. 综合电子信息系统 - 现代战争的擎天柱[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

### 作者简介:



王 壮 男, 1973 年 9 月生于陕西省西安市, 博士, 现为国防科技大学 ATR 国家重点实验室副教授, 1996 年毕业于国防科技大学电子工程学院, 于 2001 年获国防科技大学信息与通信工程专业博士学位, 主要研究方向: C<sup>4</sup>ISR 系统、目标识别与数据融合.

樊 昀 男, 1976 年 1 月生于江西省鹰潭市, 博士, 现为总参第 54 研究所工程师, 1996 年毕业于国防科技大学电子工程学院, 于 2001 年获国防科技大学信号与信息处理专业博士学位, 主要研究方向: 电子对抗、图像理解与目标识别.