

王登亮, 余志勇, 宋小杉, 等. 分布式无线电频谱监测多源信息融合处理技术[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(5): 67-74.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240509

分布式无线电频谱监测多源信息融合处理技术

王登亮¹, 余志勇², 宋小杉³, 胡安翼¹, 张发祥¹, 甄卫民¹

(1 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107; 2 火箭军工程大学, 西安 710000;

3 西安大衡天成信息科技有限公司, 西安 710000)

摘要: 随着电子、信息技术的快速发展, 系统的规模和复杂性与日俱增, 对多源信息融合处理的要求也越来越高, 本文针对分布式无线电监测领域中所涉及的3种多源信息融合问题, 分别给出了融合流程、融合方法和效果分析。其中, 频谱数据采用单点时频域融合和多点时频空能四域融合方法, 解决频谱结构化存取和场强推算问题; 设备特征数据采用并行融合方法, 解决多类设备对同一目标测量和定位结果的融合问题; 侦察信息采用D-S证据理论融合方法, 解决系统内部每类设备侦察信息的融合, 以及与外部系统侦察信息的融合问题。通过仿真实验表明, 采用以上3种融合方法可解决上述多源信息融合问题。

关键词: 多源信息融合; 分布式无线电监测; 频谱结构化; D-S证据理论

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)05-0067-08

Multi-source information fusion processing technology for distributed radio spectrum monitoring

WANG Dengliang¹, YU Zhiyong², SONG Xiaoshan³, HU Anyi¹, ZHANG Faxiang¹, ZHEN Weimin¹

(1 China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, Shandong, China;

2 Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710000, China;

3 Xi'an Daheng Tiancheng IT Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: With the rapid development of electronics and information technology, the scale and complexity of the systems have been increasing. Consequently, there is a growing demand for multi-source information fusion processing. This paper focuses on three types of multi-source information fusion problems in the field of distributed radio monitoring, which provides fusion processes, fusion methods, and performance analysis for each problem. For spectrum data, the paper employs single-point time-frequency domain fusion and multi-point time-frequency spatial energy four-domain fusion methods. These methods address the issues of structured access to spectrum data and field strength estimation. For device feature data, a parallel fusion method is used to address the fusion of measurement and localization results for multiple types of devices targeting the same object. Regarding reconnaissance information, the D-S evidence theory fusion method is utilized to address the fusion of reconnaissance information from different types of devices within the system, as well as the fusion with reconnaissance information from external systems. Simulation experiments demonstrate that the three fusion methods mentioned above can effectively address the aforementioned multi-source information fusion problems.

Key words: multi-source information fusion; distributed radio monitoring; spectrum structure; D-S evidence theory

0 引言

多源信息融合, 又称多源数据融合, 也可以称为传感器信息融合或多传感器信息融合, 是一个对从单个和多个信息源获取的数据和信息进行关联、相关和综合, 以获得精确的位置和身份估计, 以及对态势和威胁重要程度进行全方面评估的信息处理过

程^[1-2]。虽然信息融合起源于军事领域, 但目前对其研究却并不局限于此, 已扩展到各个领域, 如目标识别、地质科学应用、医学应用、智能交通、遥感系统等^[3]。虽然信息融合技术应用非常广泛, 但目前仍然缺乏系统的关于信息融合技术理论基础, 针对同类信息处理的融合算法占多数, 这些算法还不能完善地支持对不同类别信息模型构建和融合^[4-5]。

作者简介: 王登亮(1975-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 复杂电磁环境监测与评估。

收稿日期: 2023-07-10

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

本文结合无线电频谱监测中普遍存在的信息融合需求,系统探讨并给出了分布式无线电频谱监测中每种信息融合的融合步骤、融合方法和效果分析,对无线电监测系统设计和实现具有很好的参考价值。

1 分布式无线电频谱监测及多源信息融合层级划分

分布式无线电频谱监测是指在一定区域内部署一定数量的监测设备,对监测区域内的电磁信号进行测量、监听、测向、定位和识别,为用户提供侦察监视、辅助决策等支持^[6]。分布式无线电频谱监测系统主要由外场监测设备和中心软件构成,监测设备网格化部署在监测区域内或周边,对场区电磁信号进行频谱采集和参数测量,由中心软件进行电磁信号的方位测量、交汇定位、时差定位(Time Difference of Arrival, TDOA)、目标识别和态势显示,同时结合地理信息平台,为用户提供一个集电磁环境态势、监测力量态势和辐射源态势的二三维可视化系统^[7]。

在分布式无线电频谱监测中主要存在以下3方面多源信息融合需求。第一方面,不同监测点位采集的不同频率范围、不同采样步进的频谱需进行融合,形成区域电磁场强分布数据;第二方面,同类多个监测设备对同一辐射源的特征识别结果、定位结果进行融合,形成该辐射源的特征向量,并基于特征库进行辐射源身份识别;第三方面,不同类型监测设备对同一辐射源识别结果进行融合,形成对该辐射源最终的识别结果。根据以上3方面融合的目标和特性的不同,本文对无线电频谱监测系统内信息融合划分为3个层级,分别为数据级、特征级和决策级,层级根据融合目标的不同,也可定义为频谱数据级融合、设备特征级融合和侦察信息决策级融合。下面拟对这3级信息融合展开研究论述。

2 频谱数据级融合

2.1 融合对象

数据级融合对象是频谱监测数据,数据来源为外场电磁监测终端,包括网格化监测设备、短波监测测向设备、超短波监测测向设备等,融合数据内容包括时标、点位位置、频率和电平值等。

2.2 融合流程

数据级融合属于最初始层的融合。该类融合首先对各监测设备的原始频谱数据进行数据关联,并

进行时间配准、频率适配,确保待融合的监测频谱数据在时域、频域都已对准,然后对关联后的数据直接进行融合处理,形成频谱矩阵体结构,基于频谱结构数据进行环境态势推算,得到区域电磁场强分布情况^[8]。

频谱数据级融合详细融合步骤如下:

- (1)接收外场监测设备实时上传的频谱数据;
- (2)对频谱数据进行时间对准。理想情况下,各监测设备之间时间同步精度可以达到毫秒级,实际应用中同步精度差一些;
- (3)对频谱数据进行频率适配,使得每一帧频谱数据对应的频点相等,有利于频谱数据的相互计算和数据融合;
- (4)获取设备的部署位置信息,计算多个设备组成的区域的中心位置,按照距离中心位置由近到远将频谱数据进行排列,有利于基于张量分解算法进行同频分离和初步识别计算;
- (5)将时域、频域对准,以及空域规则排列的频谱数据组成逻辑矩阵体,进行频谱结构化存储;
- (6)根据监测区域范围,提取区域内的频谱矩阵体,进行区域电磁态势推算,形成区域电磁场强分布态势。

融合输出结果主要包括监测点位处的频谱结构化数据、即时间、频率、位置、场强和整个场区场强分布态势数据。

2.3 融合方法

每个监测设备仅可获得其所在点位的电磁环境监测数据,各监测网点数据汇集到一起形成对一定区域的电磁环境的客观描述,需要考虑频谱监测数据的时/空/频/能四域的融合。在典型系统应用中,频谱监测数据的时/空/频/能四域的融合主要通过时/空/频/能四域的融合。在典型系统应用中,频谱监测数据的时/空/频/能四域的融合主要通过时/空/频/能四域的融合。融合流程主要由单站点数据时频能域融合、多站点数据四域融合、数据检索和场强分布推算和显示四部分构成,频谱监测数据时/空/频/能四域融合整体流程如图1所示。

2.3.1 单站点数据时频能域融合

对于某一地理位置一段时间内的电磁频谱监测数据,可以采取类似瀑布图的方式来融合描述,通过这种方式既可以直接观察电磁频谱的瞬时情况,也可以直观感知电磁频谱随时间变化趋势。二维电磁频谱数据,即单个电磁频谱监测台站或者传感器连续监测得到的数据经离散化后,由频率、时间以及所对应的幅度值(即能量)依次排列而成,形成一种频

率、时间、能量三个域的关联和融合。在时序数据库内,是以二维频谱数据矩阵的形式表示和存储。电磁频谱数据排列形式可表示为:

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & \cdots & w_{mp} \end{pmatrix} \quad (1)$$

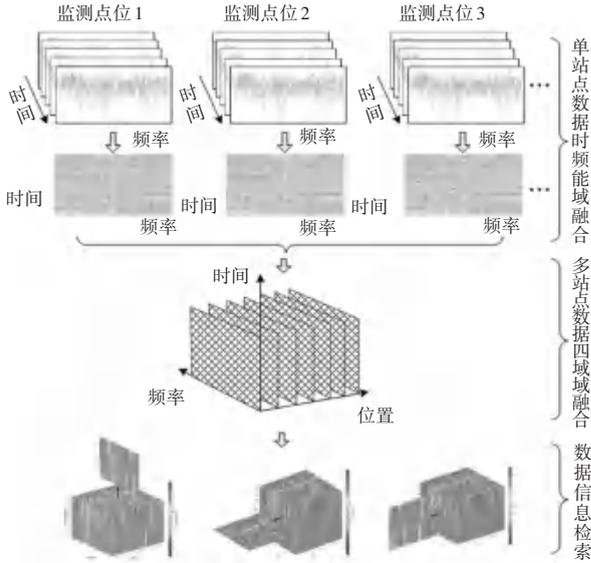


图1 频谱监测数据的时/空/频/能四域融合流程

Fig. 1 Four-domain fusion process of time, space, frequency, and energy information for spectrum monitoring data

将式(1)这种频谱二维结构化数据表示方式称为频谱矩阵,该种融合方式进一步地阐释了电磁频谱数据的组织逻辑和关系,有利于利用矩阵运算对其进行进一步处理。另外,对某监测点位电磁环境来说,频谱矩阵将电磁环境的时间、频率和能量三个维度的信息进行了紧密的关联和融合,用数据矩阵的形式描述了这种关联关系。

2.3.2 多站点数据四域融合

多个监测点位获得的电磁频谱数据进行位置维的融合,就可以获得多个频谱矩阵。如果将某一点位周围距离相近点的频谱矩阵按照远近规律排列起来,就能够将二维的频谱矩阵扩展为三维矩阵形式。这种三维电磁频谱数据是由多个电磁频谱监测台站监测所得,由于包含了位置信息,因而具备了时间维、空间维、频率维和能量域四维特征,本质上是一种四维结构化数据,极易以一种在三维上推广的矩阵进行理论抽象和表示。由严格按顺序监测产生的电磁频谱数据应该可以表示为一系列频谱矩阵排列而成的“矩阵体”,如图2所示。

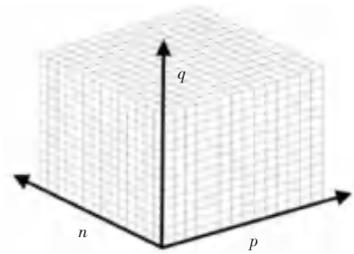


图2 频谱监测数据矩阵体

Fig. 2 Spectral monitoring data matrix body

频谱监测数据融合主要通过频谱数据的结构化表示和存储来实现,频谱矩阵和频谱矩体将传统的矩阵形式扩展了一个新维度,用来标识频谱监测数据的位置维,从而实现了将频谱数据的时间、频谱、空间、能量四个维度关联起来,形成符合频谱监测数据的结构化组织体系;其次,针对频谱矩阵体进一步定义了数学运算,从而方便地对海量监测数据进行信息挖掘^[10]。某实测频谱监测数据矩体的可视化如图3所示。

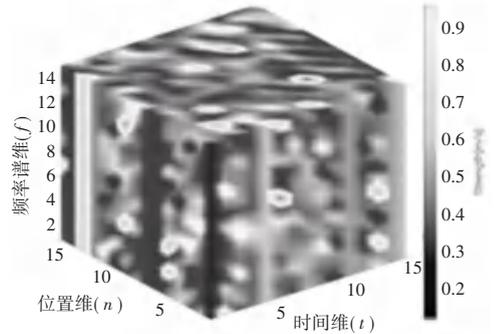


图3 某实测频谱监测数据矩体

Fig. 3 Matrix body of a certain measured spectral monitoring data

2.3.3 数据检索

频谱数据经过上述结构化存储后,数据检索的效率有显著提升,图4(a)~(c)为频谱矩阵切片在时间、位置、频率三个维度对设备频谱监测数据检索的示意图。

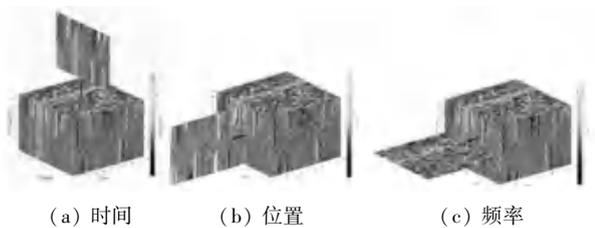


图4 某时刻某地点某频点频谱矩体检索示意图

Fig. 4 Illustration of retrieval for spectral matrix body at a certain moment, location, and frequency point

2.3.4 场强分布推算与显示

本文场强分布采用维诺图显示方法,维诺图方法是基于监测设备采集的监测数据进行计算。首先将监测区域剖分为以监测设备为中心的若干个多边形区域,根据监测设备提供的场强数据为每个剖分区域赋值,形成若干个具有电磁场强的小区域,然后对这些小区域以各自中心为顶点进行双三次插值,形成具有云图效果的电磁场强分布态势图^[11]。该方法与辐射源的分布信息是否齐备无关,但受监测站点数量和布设位置的影响较大,当监测设备均匀布满监测区域并且呈蜂窝网络分布时,场强分布图最为准确,反之,则准确度会降低。

以4个网格化监测设备采集的原始场强为例,推算出来的场强分布维诺图如图5所示。图5中,基于4个监测设备采集的电磁场强数据进行差值推算的结果,在未知辐射源分布情况下,维诺图显示方式最为合适。同时可以看出,监测区域的监测设备数量再多一些、分布再均匀一些,计算出来的电磁场强分布图会更加准确,更能反映实际的情况。



图5 场强分布推算维诺图

Fig. 5 Voronoi diagram for field strength distribution estimation

频谱数据级融合的优点是信息损失量最少,能够保留相对较多的原始观测信息,融合结果的精确度较高,有利于对目标做出正确的判决;缺陷是数据量较大,对通信带宽和节点性能的要求较高。

3 设备数据特征级融合

3.1 融合对象

特征级融合对象是信号位置信息、信号特征信息,数据来源为外场监测设备,包括网格化监测设备、超短波监测测向设备等,融合数据内容包括辐射源的名称、频率、功率、带宽、调制方式、位置等信息。

3.2 融合流程

特征级融合属于中间层次的融合,主要应用在信号调制域识别结果与定位结果之间的融合。对信号定位需要多台设备协同进行,采用交汇定位/时差定位得到信号源位置,同时对信号数据进行分析,得

到信号的国际电联(Internationale Telecommunication Union, ITU)特征参数,然后对定位结果和ITU特征参数进行融合,得到信号复合特征向量,最后基于信号复合特征向量进行信号源识别^[12-13]。以网格化监测设备、超短波监测测向设备为例,描述特征级融合的融合流程,网格化监测设备、超短波监测测向设备特征级融合流程如图6所示。

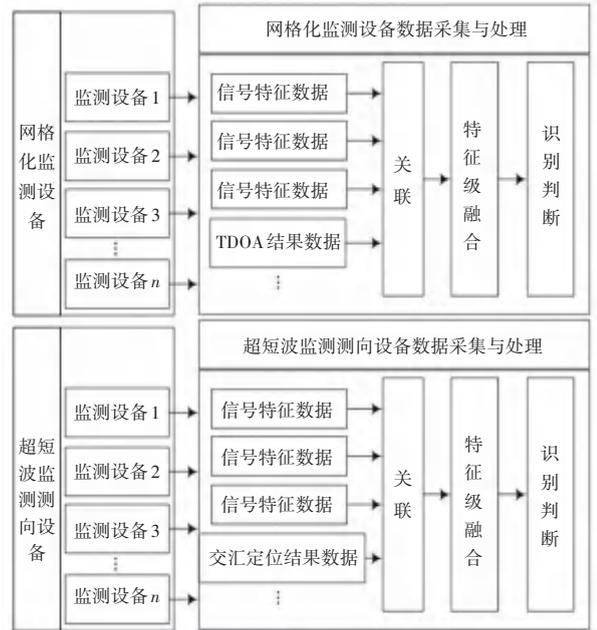


图6 特征级融合流程

Fig. 6 Feature-level fusion process

3.2.1 网格化监测设备融合流程

网格化监测设备特征级融合步骤如下:

- (1) 获取各监测设备上传的信号特征数据、IQ数据;
- (2) 基于IQ数据进行TDOA定位,得到信号位置信息;
- (3) 对多个设备提供的信号特征数据、位置数据进行关联和融合,得到信号的特征向量;
- (4) 基于特征向量和目标特征库对信号进行身份识别,利用数据级融合后生成的场区场强分布图,辅助寻找信号目标,得到信号的识别结果^[14]。

3.2.2 超短波监测测向设备融合流程

超短波监测测向设备特征级融合步骤如下:

- (1) 获取各监测设备上传的信号特征数据、测向数据;
- (2) 基于测向数据进行交汇定位,得到信号位置信息;
- (3) 对多个设备提供的信号特征数据、位置数据进行关联和融合,得到信号的特征向量;

(4)基于特征向量和目标特征库对信号进行身份识别,利用数据级融合后生成的场区场强分布图,辅助寻找信号目标,得到信号的识别结果。

3.3 融合输出

每一类监测设备多个辐射源融合结果信息,即推理定位位置、特征参数。

3.4 融合方法

3.4.1 并行融合策略算法

设样本模式空间 Ω 的2个特征空间是 A 和 B 。对于 $\Gamma \in \Omega$ 的任意样本,特征量可以表示为 $\alpha \in A$ 和 $\beta \in B$ 。并行特征融合方法将 α 和 β 两个向量融合成一个 γ 向量:

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (2)$$

其中, i 是虚数单位。 α 和 β 向量维数不一致时,低维特征向量需要补0,2个特征向量才能并行融合^[15]。

例如: $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, $\beta = (\beta_1, \beta_2)$, 2个向量融合前,须将 β 变为: $\beta = (\beta_1, \beta_2, 0)$ 。

然后融合,融合结果为:

$$\gamma = (\alpha_1 + i\beta_1, \alpha_2 + i\beta_2, \alpha_3 + i*0)$$

定义一个在 Ω 上的并行融合特征空间:

$$C = (\alpha + i\beta | \alpha \in A, \beta \in B) \quad (3)$$

式(3)表示一个 n 维的复向量空间,其中 $n = \max(\dim A, \dim B)$,在这个空间里,内积定义为:

$$(X, Y) = X^H Y \quad (4)$$

其中, $X, Y \in C$,“H”表示共轭转置。

在以上的内积空间中,可以引入下列范数:

$$\|Z\| = \sqrt{Z^H Z} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\alpha_j^2 + \beta_j^2)} \quad (5)$$

其中, $Z = (\alpha_1 + i\beta_1, \alpha_2 + i\beta_2, \dots, \alpha_n + i\beta_n)$ 相应地,复向量 Z_1 和 Z_2 之间的距离定义为:

$$\|Z_1 - Z_2\| = \sqrt{(Z_1 - Z_2)^H (Z_1 - Z_2)} \quad (6)$$

3.4.2 融合方法实现

信号分析数据的特征级数据融合采用并行融合方法。对同类型多个监测设备的信号分析数据依次进行并行融合,方法如下:

设 α, β, γ 为3个特征向量,针对融合步骤、这里给出研究阐述如下。

(1) α, β 融合。相应的数学公式为:

$$M = (k_\alpha \alpha_1 + ik_\beta \beta_1, k_\alpha \alpha_2 + ik_\beta \beta_2, \dots, k_\alpha \alpha_n + ik_\beta \beta_n) \quad (7)$$

其中, k_α, k_β 分别表示特征向量 α, β 的权重值。 M' 是第一次融合的结果向量,推理得到:

$$M' = \left(\frac{\hat{e} \sqrt{(k_\alpha \alpha_1 + ik_\beta \beta_1)(k_\alpha \alpha_1 - ik_\beta \beta_1)}}{\hat{e} \sqrt{(k_\alpha \alpha_2 + ik_\beta \beta_2)(k_\alpha \alpha_2 - ik_\beta \beta_2)}}, \dots, \frac{\hat{e} \sqrt{(k_\alpha \alpha_n + ik_\beta \beta_n)(k_\alpha \alpha_n - ik_\beta \beta_n)}}{\hat{e} \sqrt{(k_\alpha \alpha_n + ik_\beta \beta_n)(k_\alpha \alpha_n - ik_\beta \beta_n)}} \right) \quad (8)$$

(2) α, β, γ 融合。相应的数学公式为:

$$Z = (M'_1 + ik_\gamma \gamma_1, M'_2 + ik_\gamma \gamma_2, \dots, M'_n + ik_\gamma \gamma_n) \quad (9)$$

其中, k_γ 表示特征向量 γ 的权重值。 Z' 表示 α, β, γ 融合的结果向量,进一步得到:

$$Z' = \left(\frac{\hat{e} \sqrt{(M'_1 + ik_\gamma \gamma_1)(M'_1 - ik_\gamma \gamma_1)}}{\hat{e} \sqrt{(M'_2 + ik_\gamma \gamma_2)(M'_2 - ik_\gamma \gamma_2)}}, \dots, \frac{\hat{e} \sqrt{(M'_n + ik_\gamma \gamma_n)(M'_n - ik_\gamma \gamma_n)}}{\hat{e} \sqrt{(M'_n + ik_\gamma \gamma_n)(M'_n - ik_\gamma \gamma_n)}} \right) \quad (10)$$

式(10)中,信号参数测量数据中包含的信号特征主要有信号频率、信号带宽、信号电平、信号调制方式、信号调制度、码速率等,组成了一个特征向量,并行融合即是对这些特征值进行,将多个特征向量融合为一个特征向量^[16]。

融合时需对多个特征向量加入权重值。可根据当前设备工作状态、设备距离信号的远近、以及监测设备对本帧信号分析数据可靠程度(置信度)进行权重赋值。

下面以3个网格化监测设备同时对102.6 MHz的调频广播电台的信号测量为例说明特征级融合过程。3个监测设备编号分别是01、02、和03,分别对信号频率(MHz)、信号带宽(kHz)、信号电平(dBm)、信号调制方式、信号调制度(%)、码速率(kbps)六个参数进行了测量,并给出了各自的测量置信度。利用并行融合算法将3个监测设备给出的信号参数进行了特征级融合计算结果见表1。

表1 特征级融合实测数据结果表

Table 1 Experimental data results of feature-level fusion

设备编号	信号频率/MHz	信号带宽/kHz	信号电平/dBm	调制方式	调制度/%	码速率/kbps	置信度/%
01	102.4	73	-80	FM	80	40.0	70
02	102.9	100	-88	AM	60	28.0	60
03	102.7	60	-72	FM	70	30.0	80
融合后	102.6	75	-79	FM	70	32.7	

基于监测设备 01 提供的信号参数,进行信号源识别结果为广播电台/通信电台;基于监测设备 02 提供的信号参数,进行信号源识别结果为通信电台;基于监测设备 03 提供的信号参数,进行信号源识别结果为广播电台/通信电台。基于融合后的信号参数进行信号源识别结果为广播电台。可见,特征信息融合后提高了参数测量和信号源识别的准确性。

特征级融合属于中间层次的融合,主要应用在信号调制域识别结果与定位结果之间的融合,采用并行的融合方法,形成辐射源特征向量,为身份识别提供支持。

4 侦察信息决策级融合

4.1 融合对象

决策级融合对象是系统级侦察结果信息,数据来源为每一类设备提供的侦察信息和外系统侦察信息,融合数据内容包括辐射源的特征、位置、身份等信息。

4.2 融合流程

决策级融合是一种面向应用需求的融合,属于最高层的融合。不同类型的监测设备/侦察设备对同一辐射源目标的定位和识别结果会存在差异,决策级融合能够对这些差异的结果进行融合,形成辐射源目标最可信的身份和位置。在决策级融合前,各类监测设备在本地进行特征融合和识别判断,生成各类监测设备观测目标的本地决策。系统利用一定的融合算法对各类监测设备本地决策进行最终的融合处理,得到目标最终的身份和位置情报信息^[17-18]。决策级融合流程如图 7 所示。图 7 中的关联处理是为了确保各节点的本地决策都是对同一个待测目标的初步判断。

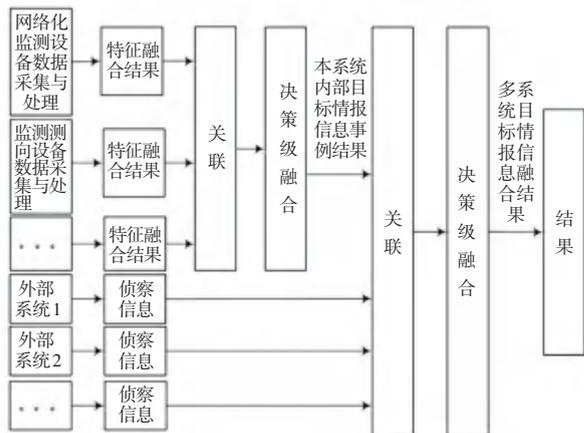


图 7 决策级融合流程

Fig. 7 Decision-level fusion process

决策级融合流程具体如下。

首先,对 2 类监测设备的特征级融合结果进行辐射源识别,形成本地决策数据;

然后,对 2 类监测设备本地决策数据进行决策级融合,形成本系统内部决策级融合结果;

最后,系统将本系统决策级融合结果与外部系统提供的决策结果数据进一步融合,形成多系统决策级融合结果。

4.3 融合输出

(1) 本系统内部目标情报信息融合结果,即定位、特征参数、身份;

(2) 多系统目标情报信息融合结果,即定位、特征参数、身份。

4.4 融合方法

信号情报数据的决策级融合采用 D-S 证据理论融合方法。证据理论可以根据不同证人提供的概率,给出每种假设的综合概率,起到不同数据源数据融合的作用。在证据处理模型中,任何一个命题都可能包含了多个假设,而非仅仅单个假设。同时,每个命题都被赋予了一个 0~1 之间的某个数值来表征该命题为真的信任程度、即信任度。信任度的大小可以通过对观测信息(一般称为证据)的分析得到,在使用证据理论解决数据融合问题前,需要先将所获得的证据在信任框架下进行表示^[19]。

4.4.1 基本概念

(1) 识别框架。识别框架是一个集合,其元素包含要识别目标的所有可能的身份属性。例如,5 种类型的监测设备对同一个辐射源的识别结果包括以下几个结果{通信电台,无线宽带基站,对讲机},那么这个场景中识别框架就是{通信电台,无线宽带基站,对讲机, Φ },用 Θ 表示,集合中 Φ 表示空。

(2) mass 函数。mass 函数称为命题 A 的基本信任度或 mass 值,表示证据支持命题 A 为真的信任程度。推得的公式见式(11):

$$m(\Phi) = 0, \quad \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \quad (11)$$

其中, m 表示 mass 函数; Φ 表示空; Θ 表示识别框架; A 表示识别框架集中的元素。

(3) 证据的组合。对于 $\forall A \subseteq \Theta, \Theta$ 上的 2 个 mass 函数 m_1 和 m_2 的 D-S 证据合成规则为:

$$m_1 \oplus m_2(A) = \frac{1}{k} \sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C) \quad (12)$$

对于假设 A,合成的 mass 函数就是所有相交为 A 的假设进行 mass 函数乘积的和,再除以归一化系

数 $k^{[20]}$ 。 k 的计算方法如下:

$$k = \sum_{B \cap C \neq \emptyset} m_1(B) m_2(C) = 1 - \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C) \quad (13)$$

4.4.2 信号情报数据决策级融合的实施步骤

综合前述研究可知,对信号情报数据决策级融合步骤将做全面阐述如下:

- (1)接收不同类型的监测设备对某一辐射源的本地决策数据(融合前的信号情报数据);
- (2)按照情报数据中信号的位置信息,对这些信号情报数据聚类。将位置相近的信号看作是同一个信号;
- (3)对同一个信号的多帧信号情报数据进行融合。首先,根据给定的所有情报数据中的辐射源身份信息,确定融合的认可框架。例如,一共有5种类型的设备提供了对同一信号的情报数据。5帧数据中辐射源身份共有3个,分别为 $Emitter1$ 、 $Emitter2$ 、 $Emitter3$,那么识别框架为: $\{Emitter1, Emitter2, Emitter3, null, \Phi\}$;
- (4)为识别框架中的每一个元素分配 $mass$ 函

数。该 $mass$ 函数由信号情报数据中包含的识别置信度与该类型设备对识别框架中每个元素识别可靠性综合计算给出;

- (5)计算归一化系数 k ;
- (6)对识别框架中每一个元素的 $mass$ 函数进行融合计算,得到融合后的 $mass$ 函数;
- (7)找出 $mass$ 函数值最大的焦元以及对应的信号情报数据,并以该信号情报数据为最终的融合结果。

下面以3类监测设备对102.6 MHz的调频广播电台的信号侦察和决策级融合为例,说明其决策级融合的过程和效果。3类监测设备分别是网格化监测设备(WGH)、超短波监测测向设备(CDB)和搭载式监测测向设备(DZS),分别给出发射频率(MHz)、发射带宽(kHz)、发射功率(dBm)、调制方式、辐射源经度($^{\circ}$)、纬度($^{\circ}$)、辐射源类型、名称、归属方等9个辐射源参数,并给出了各自的测量置信度。利用D-S融合算法将3类监测设备给出的辐射源参数进行了决策级融合计算,给出了融合结果,见表2。

表2 决策级融合结果表

Table 2 Experimental data results of decision-level fusion

设备类型	发射频率/MHz	发射带宽/KHz	发射功率/dBm	调制方式	辐射源经度/ $^{\circ}$	辐射源纬度/ $^{\circ}$	辐射源类型	辐射源名称	归属方	置信度/%
WGH	102.6	75	50	FM	108.941 839	34.196 396	通信	广播电台	民用	86
CDB	103.9	60	46	FM	108.827 578	34.172 075	通信	通信电台	蓝方	78
DZS	102.7	80	53	FM	108.946 861	34.205 868	通信	广播电台	民用	80
融合后	102.6	75	50	FM	108.941 839	34.196 396	通信	广播电台	民用	

网格化监测设备提供的辐射源参数中辐射源识别结果为广播电台,定位坐标为:(108.941 839, 34.196 396);超短波监测测向设备提供的辐射源参数中辐射源识别结果为蓝军通信电台,定位坐标为:(108.827 578, 34.172 075);搭载式监测测向设备提供的辐射源参数中信号源识别结果为广播电台,定位坐标为:(108.946 861, 34.205 868)。融合后的辐射源参数中信号源识别结果为广播电台,位置坐标为:(108.941 839, 34.196 396),融合后的结果最接近实际情况。

决策级融合是针对具体决策问题的融合技术,采用D-S证据理论方法,对多个子系统提供的辐射源情报结果进行融合,形成信任度更高、更准确的辐射源情报信息。利用决策级融合一般都可以直接得到当前问题的决策结果,因而融合算法的性能会直

接影响到最终的决策水平,同时为提高决策结果的准确度,需细化系统置信度赋值规则,提高置信度的一致性和有效性。

5 结束语

本文针对分布式无线电频谱监测领域中涉及到的3种信息融合问题,提出和论证了3种融合方法,其中频谱数据级采用单点时频域融合和多点时频空能四域融合方法;设备特征级采用并行融合方法;侦察信息决策级采用D-S证据理论融合方法。通过Matlab仿真和实验验证,3种融合方法能够解决无线电频谱监测中普遍存在的上述多源信息融合问题,同时,融合方法都存在误差,在实际应用中还需结合各自系统的特点和要求,优化和改进融合方法,提高融合结果的准确度。

参考文献

- [1] 赵宗贵,许阳. 信息融合动态与发展趋势[J]. 指挥信息系统与技术,2014,5(6):1-10.
- [2] 边福音. 基于证据理论的信息融合方法研究[D]. 沈阳:东北大学,2016.
- [3] 刘涛. 信息融合算法及其应用研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.
- [4] 繆显涵. 多源信息融合多目标跟踪技术研究与设计[D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [5] 唐琳. 多传感器信息融合的层级关系研究[J]. 赤峰学院学报,2014,30(10):21-23.
- [6] 赵知劲,郑仕链,孔宪正. 认知无线电中频谱感知技术[J]. 现代雷达,2008,30(5):65-69.
- [7] 余琪琦,王中豪,张福来,等. 分级分布式无人机协作频谱感知方法[J]. 电讯技术,2023,63(11):1750-1756.
- [8] 姬生云,黄付庆,冯小哲,等. 区域频谱资源数据融合方法[J]. 电波科学学报,2013,28(4):782-786.
- [9] 游鸿,马红光. 一种频谱监测数据结构化表示方法:中国,ZL2018101814147[P]. 2021-07-13.
- [10] 游鸿,马红光. 一种多台站频谱监测数据压缩处理方法:中国,ZL2018101814151[P]. 2020-02-07.
- [11] 陈雪瑞. “点线面”分布式传感信息融合方法研究[D]. 北京:北京邮电大学,2021.
- [12] 李洋,赵鸣,徐梦瑶,等. 多源信息融合技术综述[J]. 智能计算机与应用,2019,9(5):186-189.
- [13] 刘慧玮. 基于置信度的多特征目标自适应跟踪算法[D]. 西安:西安电子科技大学,2013.
- [14] 赵文静,李贺,金明录. 基于特征值的频谱感知融合方法[J]. 通信学报,2019,40(11):51-64.
- [15] 付炳阳,曹铁勇,郑云飞,等. 基于多级特征融合的伪装目标分割[J]. 计算机工程与应用,2022,58(18):268-276.
- [16] 白云鹏. 面向水下目标识别的特征级信息融合方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [17] 许琪. 多传感器信息融合算法研究及其应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [18] 韩德强,杨艺,韩崇昭. DS 证据理论研究进展与相关问题探讨[J]. 控制与决策,2014,29(1):1-11.
- [19] 马晓剑,李梦娜,王金凤. 基于 D-S 可信度加权模型的高密度脉冲噪声识别算法[J]. 传感技术学报,2022,35(6):769-777.
- [20] 宋留勇,刘靖旭,徐晏琪. 基于动态识别框架 D-S 的多源冲突决策信息融合模型[J]. 信息工程大学学报,2015,16(4):399-404.