

文章编号: 1001-893X(2011)06-0162-07

辐射源个体特征提取技术综述*

周 斌¹, 王秀敏², 果 然¹, 李绍滨¹, 毛兴鹏¹

(1. 哈尔滨工业大学 通信与电子对抗研究所, 山东 威海 264209; 2. 大连理工大学 城市学院, 辽宁 大连 116600)

摘 要: 特征提取是辐射源个体识别技术的关键, 也是实际应用中必须解决的首要问题。从接收信号的暂态和稳态两个方面对现有的个体特征提取技术进行了综述, 指出各种特征提取技术的适用范围及关键问题。同时结合个体识别接收设备需要, 对所提取的特征参量在工程应用中的测量条件及局限性进行了归纳分析与对比。最后, 指出了目前辐射源个体特征提取技术存在的问题, 以及个体识别技术未来研究方向。

关键词: 个体识别; 信号特征; 细微特征; 特征提取

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.06.036

An Overview of Individual Feature Extraction Techniques

ZHOU Bin¹, WANG Xiu-min², GUO Ran¹, LI Shao-bin¹, MAO Xing-peng¹

(1. Institute of Communication and Electronic Warfare, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China;
2. City Institute, Dalian University of Technology, Dalian 116600, China)

Abstract: Feature extraction is the key to emitter individual identification technology, but also the primary issue that should be solved in practical applications. From both transient aspect and steady-state aspect of the received signal, the existing techniques of transmitter individual feature extraction are reviewed, the application scope and key issues of different extraction techniques are summarized. Also, in combination with requirements of the individual identification receiver, both the measuring conditions and limitations of the extracted feature parameters in engineering application are analysed and compared. Finally, the problems of existing extraction techniques are presented, as well as certain future research directions of individual identification technology.

Key words: individual identification; signal feature; fine feature; feature extraction

1 引 言

通信系统中, 信号上承载的信息通常是人们关心的内容, 而表现在信号上的发射机个体的硬件信息往往未受到足够重视。然而, 在军事侦察等很多领域中, 如果能够从截获的信号中分析出其发射机硬件信息, 再结合实际工作环境, 就可以推测出更多有意义的信息。比如在无线通信网络中, 存在严重的非法用户接入现象, 如果能够从每个用户发射信

号中分析出其终端的硬件信息, 再配合传统的密钥系统, 就能够对接入的设备进行更进一步的身份识别和认证, 从而使通信网络安全性得到大幅提高。因此人们开始分析和研究发射机的个体差异, 通过对接收信号进行特征测量, 将辐射源唯一电磁特征与辐射源个体关联起来^[1], 这就是辐射源个体(指纹)识别技术。该技术在军事、无线网络安全、通信资源管理、机器人人工智能以及设备故障诊断等诸多领域都有着十分广阔的应用前景, 越来越受到国际

* 收稿日期: 2011-01-30; 修回日期: 2011-04-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB310606)

Foundation Item: The National Program on Key Basic Research Project (973 Program)(2007CB310606)

上许多研究机构的重视。

辐射源个体识别的本质是模式识别的问题,对采集到的信号进行特征提取,完成特征选择及融合之后送入分类器,根据一定的先验信息完成识别任务。可供提取的信号特征主要分为暂态特征和稳态特征两种。选择哪些特征进行提取,如何最有效、最可靠的提取这些特性是目前业内研究的重点内容。本文结合国内外的研究现状,分别从暂态和稳态两方面总结了目前可用的信号特征和提取方法,分析了细微特征在工程应用中的可行性以及辐射源个体识别设备的设计要素,指出了目前辐射源个体识别工作中存在的问题以及未来可能的研究方向。

2 信号暂态特征分析

辐射源设备由许多基本功能器件有机组合而成。在加工生产过程中,由于工艺缺陷和差异会造成器件特性及技术指标的离散性,同时辐射源在组装、调试过程中也存在偶然因素造成的个体差异^[2],这就使每个辐射源都有其独特的“指纹”,这种“指纹”信息当辐射源工作在过渡状态时更易于体现在信号上。习惯上,将过渡状态,如开机、模式切换、码字变换、供电激励变化等过程中产生的信号称作暂态信号,其中包含的能反映辐射源个体特征的信息(“指纹”信息)称为暂态特征。

在众多过渡状态中,除了开机状态具有普遍性之外,其余均只在特定类型的辐射源工作中才会出现;同时,开机时的暂态信号是辐射源内部各个器件的冲激响应,没有任何调制信息,因而从中提取的暂态特征最能体现不同个体的差异,成为了辐射源个体识别中广受青睐的研究对象。

一般而言,利用开机暂态信号进行辐射源个体识别由两步完成:首先是暂态信号起始点的检测,即从信道噪声中分离出暂态信号;之后是暂态信号的细微特征提取,即从暂态信号中提取辐射源的指纹信息。

2.1 暂态信号起始点检测

文献[3]中指出利用无线发射机的暂态信号特征可以进行设备辨识,这是国外首次对辐射源暂态信号的研究。文献[4]指出暂态信号持续时间很短,一般在数微秒到数百毫秒之间,因而对暂态信号起始点的检测是否高效精确将关系到识别系统性能的优劣。很多研究工作在这个方面展开,目前主要有

门限法^[5]、基本贝叶斯(Bayesian)法、贝叶斯跃变检测(Bayesian Step Change Detection, BSCD)法^[6]、贝叶斯缓变检测(Bayesian Ramp Change Detection, BRCD)法^[7]和相位特性暂态检测(Transient Detection using Phase Characteristic, TDPC)等方法来检测暂态信号起始点。

门限法是利用“分形维数”来表征信道噪声与暂态信号的不规则度,并基于两者的分形维数彼此不同这一事实来检测起始点,计算简单快速且应用广泛。该方法存在两点局限:首先为实现高精度的检测通常需要较高的信噪比;第二需要预先设定门限。基本 Bayesian 法以信道噪声和暂态信号两部分均为高斯分布为假设建模,并进一步假定在起始点处两者均值和方差均产生突变。BSCD 法针对基本 Bayesian 法对于一些只有方差变化或者均值变化远远落后于方差变化的暂态信号检测性能较差而提出改进,将方差的变化转变为均值的变化。上述两种方法在处理功率平缓增长的暂态信号时检测性能下降,BRCD 法针对此问题进行进一步的改进,利用瞬时幅度进行建模。这三种方法最后均利用贝叶斯理论求取最大后验概率密度峰值来标识暂态信号起始点,应用范围广且不需要预先设置门限,但计算复杂度较高。TDPC 法是基于相位斜率在暂态起始点处开始线性变化这一条件,采用滑动窗技术创建相位方差的分形轨迹,将其与预设门限进行对比来实现对暂态起始点的标识。TDPC 法与门限法及贝叶斯类方法的区别在于其利用受噪声和干扰影响较小的相位来检测起始点,鲁棒性好,但存在门限设定的问题。

2.2 暂态信号特征提取

暂态信号终止点是利用实验的方法来获得,结合 2.1 节中得到的起始点就可以完成暂态信号分离。暂态特征的提取主要利用分形、小波分析、时频分析等理论工具,从非平稳暂态信号中提取辐射源系统的指纹信息。

(1)分形理论

一个时间序列的分形成分可以通过分形维数来表征^[8,9],对于平稳时间序列,其分形维数具有单值性,而非平稳时间序列的分形维数则是一个随时间变化的函数,通常称为分形轨迹,代表辐射源的指纹信息。实验结果表明,不同辐射源个体的分形轨迹彼此互异,表现出不同的聚类中心,具有良好的识别效果。分形维数可以用文献[5, 10]给出的方法计算。

(2)小波分析

小波能够对信号进行多尺度或多分辨率分析,在时域和频域都能够达到较高的分辨率,因此在提取辐射源暂态特征时应用较多^[3,11,12]。即使对于差别很小的辐射源,小波分析也能够通过增加分解层次使个体差异得以体现,但会同时带来计算量以及特征空间维数的增加,而且可能存在冗余特征信息。因此,在利用小波来分析暂态特征时,通常需要增加搜寻最优特征子集的特征选择操作。

(3)时频分析

时频分析能够从二维联合域来精确描述非平稳的暂态信号,应用较多的包括线性时频分析(如短时 Fourier 变换)和非线性的时频分析(如 Wigner - Ville 分布(WVD)与 Choi - Williams 分布(CWD)等)。利用 Cohen 类的时频分析方法构造最佳核函数,能够将暂态信号的非平稳信息充分展现在时频面上,使得辐射源个体时频表示的差异最大化^[13]。时频分析方法存在时频域分辨率相矛盾和交叉项干扰的问题,并且在分析信号之前,需要准确核函数或基函数的类型,否则就会影响分析精度。

除上述方法外,高阶谱分析^[14]、频谱模板法^[15]在提取暂态特征中也有一定的应用。总之,由于暂态特征的机理和表现单一,能够较容易地选择合适的理论对其进行分析,因此在军事、无线网络安全、通信资源管理、机器人人工智能以及设备故障诊断等诸多领域都有着十分广阔应用前景。值得注意的是,由于暂态信号持续时间比较短,包含的辐射源个体信息有限,因而对信号捕捉设备硬件要求较高。

3 信号稳态特征分析

3.1 稳态特征的产生机理

辐射源在稳定工作时,发射信号中不仅存在为有效可靠传递信息而人为添加的调幅、调频以及编码等有意调制特征,同时还有辐射源本身对信号的无意调制特征。因为相对于理想辐射源,实际辐射源中存在 3 个问题:内部频率源不稳定性、内部诸多器件的非线性特性、器件加工过程的工艺缺陷造成器件特性和技术指标的离散性。这些从根本上决定了处于稳定工作状态下的不同辐射源,即使是相同批次、相同型号、相同工作方式,都会在发送信号上存在不同程度的差异,主要表现为“器件的非线性特性、频率源不稳定性等所产生的谐波频率、互调频

率、交叉调制、寄生调制等杂散输出差异”以及“频率源的不稳定性在信号载频、码元速率上体现的差异”^[16]。目前,对稳态特征的提取主要从杂散输出、频率稳定度、信号包络、码元速率以及调制参数等方面进行研究。

3.2 稳态信号特征提取

3.2.1 杂散输出

不同的辐射源个体,其内部器件的非线性特性、内部噪声以及本振频率的不纯,经过内部各级物理器件的不同影响,会不可避免地产生如谐波频率、互调频率及一些交叉调制、寄生调制等杂散成分,这些杂散成分会以多种形式伴随着有用信号发送出去。一般利用包络高阶特征、高阶谱分析、分形维数及时频分析等手段来研究信号杂散输出留在有用信号上的印记,提取辐射源指纹。

(1)包络高阶特征

不同辐射源个体的杂散输出不同,反映在信号包络上就是包络高阶特征不同,主要指 R 值特征^[17]和 J 值特征^[18]的波动。不同辐射源的 R 值与 J 值变化有所不同,两者均不需要任何的先验信息且计算非常简单。R 值特征对加性噪声比较敏感,而 J 值特征对加性高斯噪声具有很好的抑制作用,但需要对噪声功率进行精确估计。

(2)高阶谱分析

高阶谱方法可以抑制高斯噪声的干扰,保留了信号的幅度和相位信息,并且与时间无关。在分析辐射源杂散输出中,高阶谱中以双谱应用最为广泛,但是直接应用双谱需要计算复杂的二维匹配模板,为降低复杂度且适应在线分类识别应用的需要,可以通过引入积分双谱将二维变换为一维来计算,具体包括径向积分双谱^[19]、轴向积分双谱^[20]、周向积分双谱^[21]、选择双谱^[22]及矩形积分双谱^[23]等。

(3)分形维数

分形维数能够对杂散调制在信号上的影响进行有效的刻画,利用分形理论中的盒维数能够反映分形集的集合尺度情况,描述分形信号的复杂度和不规则度;信息维数则反映分形集在区域空间上的分布疏密,两者都是信号分选识别的有效特征。

(4)时频分析

在对杂散输出进行特征提取时同样可以采用时频分析的方法,利用短时傅里叶变换、WVD 及 CWD 等工具从二维联合域来精确描述辐射源稳态下的差异。文献[24]还提出了基于经验模态分解(Empiri-

cal Mode Decomposition, EMD)的 HHT 时频分析方法。作为一种后验性的、自适应时频分析方法,对分析辐射源杂散输出在频域上的细微表现是十分有利的。

3.2.2 频率稳定度

文献[25]中指出:对于不同的辐射源,即使是同批次同型号的个体,由于采用不同的晶体振荡器,相对频率偏差和绝对频率偏差都是不同的,因此,可以对稳态信号的频率信息进行分析来提取辐射源指纹信息。频率稳定度主要指频率的均值和方差特征,理论上只要对频率做足够长时间的统计测量,就可得到不同辐射源频率稳定度的微小差异,进而实现区分辐射源个体的目的。对于信号频率的估计有很多种方法,如周期图法、最大似然法、子空间分析法、短时 Fourier 变换法、时变滤波器法、线性回归法、ARMA 法、过零法、Pisarenko 谐波分解法、Music 法、Esprit 法、Kay 法、Prony 法等。一般而言,辐射源个体的频率稳定度很高,同型号同批次的个体之间的差别会非常小,加之信号传输时的多普勒效应、噪声干扰以及接收机本身频率稳定度的影响,频率估计算法很难达到精度和效率的统一,使得精确测量辐射源频率稳定度的难度很大。因此,文献[26]将频率波动信息转换到伪调制的包络来研究,从而巧妙地避免了直接计算频率稳定度难以满足识别精度的问题,但这种方法本身对噪声敏感,信噪比要求很高。

3.2.3 信号包络

信号包络在辐射源个体识别中是重要的特征提取对象,尤其在雷达辐射源识别中应用更多。雷达辐射源中的脉冲调制器是关键部件,由于实际器件中的分布电容、引线电感等产生的无意调制使得脉冲信号产生了独特的包络。文献[27]将包络的上升时间、下降时间及包络顶降作为识别依据;文献[28]中从脉冲上升沿方面进行分析,提出一种利用上升沿进行基于多脉冲乃至单脉冲的雷达个体识别方法。其主要原因是脉冲包络参数中最不易受多径效应影响的是脉冲包络的上升沿,而脉冲宽度与脉冲包络的下降沿受多径效应影响最大。在现代雷达系统中存在更加复杂的电磁环境以及更精细的信号波形,依据传统的“脉冲描述字”参量很难识别辐射源个体,以解调后的脉冲包络作为识别依据,可以得到比传统参数更高的识别率。

3.2.4 码元速率

数字通信中,码元速率的精确值可以作为辐射源个体的一种指纹。同频率稳定度一样,只要进行

较长时间测量,提取精确的码元特征是可能的。常用的码元速率估计方法有:延迟相乘法、高阶谱法、周期相关法以及基于小波变换的方法,这些方法均是在变换域内检测瞬时跳变点来估计码元速率,不同的方法应用的条件和环境不同。其中延迟相乘法假设发射机成形滤波器为理想的矩形滤波器,与实际情况不符,应用范围有限;高阶谱法是对延迟相乘法输出结构的讨论,难以确定最佳延迟参量。周期相关法假设信号是周期平稳的,这与实际不符并且计算的复杂度高。小波变换法能够较好地检测信号跳变位置,不需要做大量统计,估计的精度也很高,但是适用范围有限。

3.2.5 调制参数

通信信号和雷达信号都是经过调制的,在相同的调制方式下,不同的辐射源即使型号相同,由于采用器件和电路参数的差异以及物理器件的分散性,导致调制参数必然随个体的不同而存在偏差。只要参数估计的精度足够高,理论上可以区分不同辐射源个体。对 AM 信号的调幅指数的估计主要采用基于瞬时幅度的统计方法,获得幅度最大值和最小值的估计值^[29];也有从频域上来统计调幅指数的方法^[30]。FM 信号的调频指数可以利用信号频率估计的诸多算法首先求得 FM 信号的瞬时频率,然后同样基于统计特性来计算。两者的提取难度都很大,受随机调制信息影响严重,通常需要已知或者准确估计出调制方式。此外,还可以辐射源内部的自激振荡器和放大器为出发点建立辐射源模型来分析稳态特征。

总之,辐射源个体稳态特征涵盖的内容相当广泛,但是相对于暂态特征提取,稳态特征的表现形式多样且更加的微小,因而提取难度比较大,仍然需要更深入的研究工作。

4 细微特征提取的工程应用

诸多的细微特征提取方法在实际的辐射源识别中需满足以下准则才具备工程应用的可行性。

- (1)普遍性:该特征应该普遍存在于辐射源个体中,而不是仅仅存在于一部分个体中;
- (2)唯一性:该特征虽然普遍存在,但对于不同的辐射源个体,其值应彼此相异,能够唯一标识设备个体;
- (3)可检测性:该特征能够从有限的接收信号

中,利用当前技术手段实现成功检测;
(4)稳定性:该特征应与时间或环境条件无关,即不会随其变化而发生改变,或至少在一个相当长的时间内变化极小。

表 1 给出了常用特征参量的测量条件及其局限性。鉴于细微特征提取的特点,所有方法都要求有足够高的采样频率。有些方法适合实时测量,有些方法实时性相对较差。

表 1 信号特征的测量条件及局限性
Table 1 Measurement conditions and limitations of signal features

特征参量	测量要求	局限性
开机暂态	需要精确的检测暂态起始点	要求较高输入信噪比; 辐射源更换某些部件后,稳定性变差; 唯一性不是总能够满足 ^[31] 。
杂散输出	高精度的检测技术; 多目标下应首先完成目标信号分离; 排除接收机本身的杂散输出。	辐射源更换某些部件后,稳定性变差; 要求很高输入信噪比。
频率 稳定度	准确修正多普勒频移的影响; 高精度的测频技术; 需要更高频率稳定性性能的接收机; 多目标下应首先完成目标信号分离。	若辐射源的频率稳定度很高,可检测性得不到满足; 辐射源工作频率改变后,稳定性变差; 对特定目标识别时才有意义; 测量的实时性较差。
信号包络	消除多径效应的影响; 需要精确测量接收机本身包络起伏特性; 多目标下应首先完成目标信号分离。	要求很高输入信噪比; 多径下,包络下降沿不满足可检测性; 测量实时性较差; 信道特性改变后,稳定性变差。
码元速率	高性能的检测技术; 多目标下应首先完成目标信号分离。	应用在数字通信辐射源识别中,普遍性较差; 测量的实时性较差; 多径效应导致稳定性差。
调制参数	高精度的检测技术; 多目标下应首先完成目标信号分离。	辐射源改变调制方式后,稳定性变差; 测量的实时性较差。

为了提取信号细微特征来完成辐射源个体识别,接收设备一般以“高保真信号采集+指纹特征精细分析+专家识别系统”为框架来设计实现^[32]。首先高保真信号采集是保证正确提取信号细微特征,进行个体识别的基础,应尽最大可能地减少接收机给信号带来损伤。设计中要保证接收机带宽足够且保持较好的线性,还要采用频率稳定度更高的晶振,并将全部振荡器和时钟的相位锁定在一个共同的参考信号上。模数转换器的数据位数要尽量大,确保有足够的动态范围来提取辐射源识别特征参数。除此之外,要选用温度稳定性和电源稳定性等级高的器件,并保证整个设备的均匀散热性能。指纹特征精细分析需要对采集到的数据做精细的测量和提取,传统的信号处理技术不能保留信号的细节特征,需要采用分析精度更高的现代信号处理新技术,利用充足的处理资源完成大量的数据运算,将不同的硬、软件运算单元进行合理配置,充分发挥各自的处理优势。专家识别系统是在完成目标指纹精细分析的基础上,应用神经网络、聚类分析及模糊理论等模

式识别方法来实现对目标信号的分类和识别。其关键之一就是解决算法的速度和识别正确率的矛盾,并且能够通过样本的训练和学习,适应更多的目标对象的识别,尤其是对未知目标的识别^[33]。

5 存在问题及研究方向

世界上发达国家对于辐射源个体技术研究较早,国内则处于刚刚起步的阶段,更多的实际条件下的识别工作仍然需要进一步的研究和验证。目前辐射源个体识别技术存在的主要局限在于,由于辐射源内部众多元器件或模块共同作用在发射信号上,很难用数学方法对辐射源内部所有的器件差异在信号上的影响建立模型,使得所选择的细微特征只是利用了指纹机理中的现象,而非机理的本质,因而使得特征提取的方法很容易随有意调制及调制信息的改变而改变,独立性较差,因而选取的细微特征应用范围有限。

因此,辐射源个体识别技术的未来研究工作,首先要探究更深层次的、本质性的机理和根源,以辐射

源内部不同硬件电路作为出发点,研究电路的电特性和系统特性,建立具有普遍意义的、反映发射机物理本质的辐射源系统模型,更有效、更可靠地完成个体识别任务;其次,在算法研究方面,随着微电子工艺技术的不断发展,辐射源个体间的差异性不断减少,对特征提取和分类算法的性能提出挑战,需要研究更高精度和更高效率的算法;再次,硬件实现方面,信号采集设备中AD变换器的位数以及采样速率对满足普遍性、唯一性和稳定性原则的信号特征是否具有可检测性的问题有待进一步研究,同时接收机本身的其它性能对辐射源细微特征的影响需要进行定量分析;最后,关于辐射源个体识别的大量研究工作中一般都会从识别成功率大小来对识别结果的可靠性进行比较,但未见文献对识别容量方面的工作进行研究,这在将来的实际应用中将是必不可少的部分。

此外,多特征参量的联合检测将是提高个体识别系统可靠性和识别率的关键因素。就目前的技术条件,单独一种特征参量的测量很难同时满足普遍性、唯一性、可检测性和稳定性,而将多个特征参量结合起来进行联合检测则是一个简单易行的解决方案。

6 总 结

本文结合国内外在辐射源个体识别方向所做的研究工作,对目前辐射源特征提取的方法进行了总结分类,对工程应用可行性进行了分析,并为辐射源个体识别设备的设计提出了框架结构和要求。最后,结合个体识别中存在的局限性和问题,指出了未来可能的研究方向。

辐射源个体识别本身就是信号处理和模式识别领域中富有挑战性的问题,具有很大的开放性。随着信号处理新方法和新技术的不断涌现,在科研工作者的不断努力下,相信辐射源个体识别技术一定能够成功应用到很多领域中。

参考文献:

- [1] Langley L E. Specific emitter identification(SEI) and classical parameter fusion technology[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2003, 33(1): 377 - 381.
- [2] 南建设. 信号细微特征分析技术研究[J]. 电讯技术, 2007, 47(2): 68 - 71.
NAN Jian - she. On Fine Signature Analysis Technique[J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47 (2): 68 - 71. (in Chinese)
- [3] Choe H C, Poole C E, Yu A M, et al. Novel identification of intercepted signals from unknown radio transmitters [C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Orlando: SPIE, 1995: 504 - 517.
- [4] Shinbara W, Ojima N, Chino R, et al. Transient variation in the transmitter frequency of a mobile FM transmitter when its press - to - talk switch is operated[J]. Review of the Radio Research Laboratory, 1971, 17(90): 281 - 286.
- [5] Shaw D, Kinsner W. Multifractal Modeling of Radio Transmitter Transients for Classification [C]//Proceedings of the 1997 IEEE WESCANEX Conference on Communications, Power and Computing. Winnipeg: IEEE, 1997: 306 - 312.
- [6] Ureten O, Serinken N. Detection of radio transmitter turn - on transients[J]. Electronic Letters, 1999, 35(23): 1996 - 1997.
- [7] Ureten O, Serinken N. Bayesian detection of Wi - Fi transmitter RF fingerprinting[J]. Electronics Letters, 2005, 41 (6): 373 - 374.
- [8] Chen J, Kinsner W. Multifractal analysis of transients in power systems[C]//Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Nova Scotia: IEEE, 2000: 307 - 311.
- [9] Sun L, Kinsner W, Serinken N. Characterization and feature extraction of transient signals using multifractal measures[C]//Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Edmonton: IEEE, 1999: 781 - 785.
- [10] Grieder W, Kinsner W. Speech Segmentation By Variance Fractal Dimension [C]//Proceedings of the 1994 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Halifax: IEEE, 1994: 481 - 485.
- [11] Hippenstiel R D, Payal Y. Wavelet Based Transmitter Identification [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Signal Processing and its Applications. Gold Coast: IEEE, 1996: 740 - 743.
- [12] Toonstra J, Kinsner W. Transient Analysis and Genetic Algorithms for Classification [C]//Proceedings of the 1995 IEEE WESCANEX Communications, Power, and Computing Conference. Winnipeg: IEEE, 1995: 432 - 437.
- [13] Gillespie B W, Atlas L E. Optimizing time - frequency kernels for classification[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(3): 485 - 496.
- [14] 蔡忠伟, 李建东. 基于双谱的通信辐射源个体识别[J]. 通信学报, 2006, 28(2): 75 - 79.
CAI Zhong - wei, LI Jian - dong. Study of transmitter individual identification based on bispectra[J]. Journal of Communications, 2006, 28(2): 75 - 79. (in Chinese)
- [15] Sugiyama T, Shibuki M, Iwasaki K, et al. Transmitter Identification - Experimental Techniques and Results [J]. Journal of Communications Research Laboratory, 2002, 49 (1): 137 - 153.
- [16] 黄玉春. 基于极致学习机的通信信号辐射源个体识别技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
HUANG Yu - chun. Study on Extreme Learning Machine Based Communication Signal Transmitter Recognition Technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] Chan Y T, Gadbois L G, Yansouni P. Identification of the modulation type of a signal [C]// Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Tampa: IEEE, 1985: 838 - 841.
- [18] 蔡权伟. 多分量信号的信号分量分离技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.

- CAI Quan - wei. Research on Separation of Signal Components of Multicomponent Signal[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [19] Chandran V, Elgar S L. Pattern Recognition using Invariants Defined from Higher Order Spectra to One - dimensional Inputs[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(1): 205 - 212.
- [20] Tugnait J K. Detection of non - Gaussian Signals using Integrated Ployspectrum[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(11): 3137 - 3149.
- [21] Liao X J, Bao Z. Circularly Integrated Bispectra: Novel Shift Invariant Features for High Resolution Radar Target Recognition[J]. Electronics Letters, 1998, 34(19): 1879 - 1880.
- [22] Zhang X D, Shi Y, Bao Z. A New Feature Vector Using Selected Bispectra for Signal Classification With Application in Radar Target Recognition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(9): 1875 - 1885.
- [23] 徐书华, 黄本雄, 徐丽娜. 基于 SIB/PCA 的通信辐射源个体识别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 14 - 17.
XU Shu - hua, HUANG Ben - xiong, XU Li - na. Identification of individual radio transmitters using SIB/PCA[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(7): 14 - 17. (in Chinese)
- [24] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non - stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series, 1998, 454: 903 - 995.
- [25] 王伦文, 钟子发. 2FSK 信号“指纹”特征的研究[J]. 电讯技术, 2003, 43(3): 45 - 48.
WANG Lun - wen, ZHONG Zi - fa. Study on Fingerprint Characters of 2FSK Signal[J]. Telecommunication Engineering, 2003, 43(3): 45 - 48. (in Chinese)
- [26] 张旻, 钟子发, 王若冰. 通信电台个体识别技术研究[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2125 - 2129.
ZHANG min, ZHONG Zi - fa, WANG Ruo - bing. Research on the Technique of individual communication transmitter identification[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2125 - 2129. (in Chinese)
- [27] 张国柱, 黄可生, 姜文利, 等. 基于信号包络的辐射源细微特征提取方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6): 795 - 797.
ZHANG Guo - zhu, HUANG Ke - sheng, JIANG Wen - li, et al. Emitter feature extract met hod based on signal envelope [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(6): 795 - 797. (in Chinese)
- [28] 秦长海, 薛景. 基于脉冲上升沿的雷达个体识别方法[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(6): 27 - 30.
QIN Chang - hai, XUE Jing. A Method for Specific Emitter Identification of Radar Based on the rising edge of pulse[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(6): 27 - 30. (in Chinese)
- [29] Tong L, Xu G, Kailath T. Blind identification and equalization based on second - order statistics: A time domain approach [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1994, 40(2): 340 - 349.
- [30] Tong L, Xu G, Hassibi B, et al. Blind identification and equalization based on second - order statistics: A frequency domain approach [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(1): 329 - 334.
- [31] Ellis K, Serinken N. Characteristics of Radio Transmitter Fingerprints[J]. Radio Science, 2001, 36(4): 585 - 597.
- [32] 许海龙, 周水楼. 雷达辐射源个体识别设备的框架研究[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(6): 9 - 11.
XU Hai - long, ZHOU Shui - lou. Model discussion on specific radar emitter identification system design[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(6): 9 - 11. (in Chinese)
- [33] 许海龙, 王隼, 周水楼. 雷达辐射源指纹识别设备的设计与实现[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(5): 43 - 45.
XU Hai - long, WANG Jun, ZHOU Shui - lou. Design and realization of specific radar emitter fingerprint identification equipment[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008, 24(5): 43 - 45. (in Chinese)

作者简介:

周 斌(1987—), 男, 河南周口人, 2009 年于哈尔滨工业大学获学士学位, 现为哈尔滨工业大学硕士研究生, 主要研究方向为信号处理技术;

ZHOU Bin was born in Zhoukou, Henan Province, in 1987. He received the B. S. degree from Harbin Institute of Technology (HIT) in 2009 and now is a graduate student of HIT. His research direction is signal processing technology.

Email: zhoubin3796@126.com

王秀敏(1971—), 女, 辽宁铁岭人, 2003 年于东北师范大学获硕士学位, 现为大连理工大学城市学院讲师, 主要研究方向为信号处理技术;

WANG Xiu - min was born in Tieling, Liaoning Province, in 1971. She received the M.S. degree from Northeast Normal University in 2003. She is now a lecturer of Dalian University of Technology. Her research direction is signal processing technology.

果 然(1984—), 男, 辽宁大连人, 分别于 2007 年和 2009 年获哈尔滨工业大学学士学位和硕士学位, 现为博士研究生, 主要研究方向为超分辨率阵列信号处理;

GUO Ran was born in Dalian, Liaoning Province, in 1984. He received the B.S. degree and the M.S. degree from Harbin Institute of Technology in 2007 and 2009, respectively. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns high resolution array signal processing.

李绍滨(1948—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 1982 年于哈尔滨工业大学获硕士学位, 现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要从事通信与信息系统方面的研究;

LI Shao - bin was born in Harbin, Heilongjing Province, in 1948. He received the M.S. degree from Harbin Institute of Technology in 1982. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research direction is communication and information systems.

毛兴鹏(1972—), 男, 辽宁盘锦人, 2004 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为先进信号处理技术、电子侦查与电子对抗。

MAO Xing - peng was born in Panjin, Liaoning Province, in 1972. He received the Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2004. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research interests include advanced signal processing technology, electronic surveillance and electronic warfare.