

短时突发信号特征提取与识别技术研究

王之凝

重庆邮电大学 重庆 400000

摘要: 本文首先对短时突发信号的时频特性以及非平稳统计特征进行总结, 随后介绍了基于时频分析法、小波变换法、希尔伯特-黄变换法、稀疏表示法和高阶累积量的方法来提取有效特征, 最后讨论了支持向量机法、集成学习法以及深度神经网络法各自的优势和不足之处。针对低信噪比环境下鲁棒特征设计、自适应时频分辨率选择、计算量大和实时性差的问题和小样本问题提出了一些解决方案, 并对未来的研究趋势进行了预测。希望本文能够给短时突发信号的研究起到一定的借鉴作用。

关键词: 短时突发信号; 特征提取; 时频分析; 模式识别; 非平稳信号处理

引言

短时突发信号广泛应用于跳频通信、认知无线电和雷达系统, 具有持续时间短(毫秒/微秒级)、出现随机、易被噪声淹没等特点。传统基于平稳性假设的信号处理方法难以有效检测与分类此类信号, 导致检测率低、误差大。特征提取与识别旨在从少量数据中挖掘具判别性的本质特征, 对非合作通信侦察、频谱管理及雷达目标识别至关重要。近年来, 时频分析、稀疏表示和深度学习为该领域带来新机遇, 但仍面临低信噪比下鲁棒性差、多尺度特征融合不合理及难以实时处理等挑战。

1 短时突发信号的特性分析

1.1 时域与频域特性

短时突发信号在时域上是具有较窄持续时间瞬态波形, 时间跨度远远小于观察窗口大小, 占空比较小, 在频域上该类信号的能量集中在一定频带上, 但由于时间截断的原因造成频谱旁瓣泄漏以及展宽, 可以用窗形包络(例如矩形、升余弦或者高斯型)、载波频率以及调制相位来表示。当信号持续时间很短的情况下, 其傅里叶变换主瓣宽度约为持续时间倒数, 因此会造成频率分辨率较低的问题, 其非平稳性体现在瞬时幅度、瞬时频率以及高阶谱矩都是随着时间变化而变化, 比如线性调频信号的瞬时频率呈线性变化, 相位编码信号存在相位突变点, 而且由于放大器建立时间和滤波器冲击响应等因素导致的起止瞬态畸变也会使得包络前后沿出现一个逐渐上升和下降的过程从而增加新的瞬态特性。

1.2 随机性与不确定性

短时突发信号具有随机性: 其出现时刻符合泊松分布或者更为复杂的规律; 其持续时间也是随机变化; 其调制参数(载频、码率、调制方式等)有可能每一段都不相同; 其所处噪声环境是非高斯色噪声或者脉冲噪声

等。由于这些随机性的影响使得传统的基于二阶统计量的方法(例如自相关、功率谱密度等)得到的结果方差较大, 不易得到较为可靠的结论^[1]。不确定性原理限制了时频局部化的程度: 一个信号的时间宽度与其频率宽度之积有一个下限值(约为 $1/(4\pi)$)。对于短时突发信号而言, 精确的时间分辨率必然带来较低的频率分辨率, 而较高的频率分辨率又会导致较差的时间分辨率。所以特征提取就是如何找到一种最佳的变换域, 在这个变换域下信号的能量尽可能地集中在一小部分区域, 从而实现对噪声以及干扰的有效抑制。

1.3 常见信号模型

依据应用场合, 短时突发信号可以分为四种类型: ①瞬态脉冲信号(比如雷达回波尖峰、闪电电磁脉冲等): 其波形为指数衰减振荡。②突发调制信号(ASK、FSK、PSK、QAM等): 其载波参数在整个突发期间内是固定的或者以某种规则进行跳变。③线性/非线性调频信号: 其瞬时频率是线性和二次型的变化, 在雷达、声纳上使用较多。④跳频信号: 其载频是按伪随机的方式进行跳变, 在每一个频点上只存在一小段突发。这几种情况都具有一个共同特点, 即有用信号只是整个观察到的数据的一小部分时间, 甚至有的时候信噪比可以达到 $-\infty$ dB, 这就需要所采用的方法有天然的稀疏表示能力和一定的抗噪能力。

2 特征提取方法

2.1 基于时频分析的特征

时频分析是短时突发信号特征提取的主要手段。短时傅里叶变换利用滑动窗函数得到信号的时间-频率的能量分布, 该谱图可以直接作为特征矩阵。但是窗函数的选择实际上是时频分辨率之间的权衡: 小窗提高时间分辨而降低频率分辨。为了解决这个问题, Wigner-Ville

分布具有非常好的时频聚集性,但是它含有大量的交叉项——对于多个成分的突发信号,这些交叉项会造成虚假的峰。平滑伪Wigner-Ville分布使用独立的时间窗和频率窗平滑来消除交叉项,但是会牺牲一定的分辨能力。而Cohen类时频分布都是一些核函数加权模糊函数的形式。设计适合突发信号的核函数例如自适应径向高斯核可以很好地抑制交叉项同时保持自项聚集性。这类分布产生的二维时频图像可以直接作为特征进入分类器,但是由于维度过高,需要进行降维处理。

2.2 小波变换与多分辨率分析

小波变换用伸缩和平移母小波得到一组基函数,在尺度-时间平面描述信号。针对短时突发信号,离散小波变换可以将信号分解成一系列不同尺度下细节以及近似信号。瞬态部分位于较小尺度(高频)细节系数内,而背景噪声一般存在于较大范围。通过对这些重要系数施加阈值进行挑选然后对其进行分析——例如,统计每个尺度系数能量、峰度、过零率以及小波熵。小波包分解不仅对细节进行分解,而且还将它们进一步细分,形成一棵完全二叉树,可以得到更加丰富的频段信息。对于跳频或者线性调频突发信号,最优基选择方法(如根据最小熵原则确定最佳基)可以自适应地找到适合该类信号时频原子^[2]。而多小波变换则是使用多种不同的母小波来表示一个信号,从而提高方向选择性。另外,小波脊线提取也可以准确估计瞬时频率,特别是对于调频突发信号:把小波变换系数绝对值最大值连接起来就是一条脊线,它表示瞬时频率变化情况。

2.3 希尔伯特-黄变换与经验模态分解

经验模态分解是纯数据驱动的自适应分解技术,将非平稳信号分解为多个本征模态函数之和。对于短时突发信号,经验模态分解根据信号局部极值点的时间尺度从高频到低频逐步剥除外层。突发成分一般位于前几个本征模态函数内,噪声以及趋势项则分散在后续分量或者残差部分。可以利用本征模态函数瞬时振幅以及瞬时频率(通过希尔伯特变换得到)作为特征,得到希尔伯特谱。集合经验模态分解加入白噪声以解决模态混叠问题从而提高对于低信噪比突发信号分解鲁棒性。完整的集合经验模态分解进一步减小重构误差。但是由于经验模态分解及其衍生算法本身并不具备良好理论依据,因此当处理非常短时期信号(采样点数目小于100)时分解结果具有较大不确定性。为了解决这个问题,提出了局部均值分解以及固有时间尺度分解两种新的思路,它们计算更为简单。

2.4 稀疏表示与压缩感知特征

短时突发信号在合适的冗余字典(如Gabor、Chirplet或小波字典)下具有稀疏表示,仅需少量原子线性组合即可逼近。通过匹配追踪等算法可获得其稀疏系数,其中非零系数的位置与幅值构成有效判别特征,例如Chirplet字典中的调频斜率可区分线性与非线性调频信号。根据压缩感知理论,若信号在某变换域稀疏,则可用远低于奈奎斯特率的观测值恢复。而短时突发信号本身具有时域稀疏性,因此可通过随机观测矩阵进行压缩采样,直接从低维观测向量中提取“压缩特征”(如各阶矩、协方差矩阵奇异值或观测与字典的相关系数),无需重构原始信号。该方法显著降低采样与存储开销,适用于资源受限的实时场景。

2.5 高阶统计量与循环平稳特征

高阶统计量对高斯噪声不敏感,能有效地获取到短时突发信号瞬态非线性相位耦合的信息,三阶累积量(双谱)傅里叶变换可消除高斯有色噪声影响。突发信号双谱特征量(例如双谱切片熵、双谱对角线上最大值所在位置等)适合区分相移键控以及正交幅度调制类信号。当突发信号存在周期性变化情况(例如跳频信号载波频率变化周期、脉冲雷达重复周期等),采用循环平稳方法可以得到相应循环频率信息,在循环频率与信号自身周期相同处出现谱线。而对于短时突发信号,由于其观测样本较少,循环谱估计精度较低,但是可以通过循环平稳检测器检测出明显特征峰,另外谱相关密度函数幅值以及相位变化也可以作为判据使用。

3 识别技术

3.1 经典机器学习方法

完成特征提取后,识别的主要任务是设计或者训练一个从特征空间到类别的映射关系。由于支持向量机利用核技术可以在高维特征空间中找到最大间隔的分隔超平面而适用于少量短时突发信号识别,在此我们常用径向基核或者多项式核,但需要考虑特征归一化及核参数选择(例如网格搜索法)。而对于多类别的问题,可以使用一对多或者一对一的方法结合多个二元的支持向量机^[3]。集成学习就是通过集成多个基本分类器提高模型的鲁棒性。随机森林在每个决策树节点上随机挑选一些特征来进行划分,可以有效应对高维时频特征并且不容易发生过拟合现象;而梯度提升树(如极端梯度提升、轻量梯度提升机)是一步一步地拟合误差,对于特征之间的非线性关系具有较好的建模能力但是也容易把噪声也一起拟合进去。如果特征数量过多(比如时频图中的每一个像素都是一个特征),则要先做主成分分析或者线性判别分析降低维度。

3.2 深度学习识别模型

深度卷积神经网络(CNN)可直接从时频图或小波尺度图中学习层次化特征:卷积层捕获局部时频结构(如瞬时频率纹理、能量脊线),池化层增强平移不变性,全连接层输出类别概率。针对短时突发信号,其时频轴具明确物理意义,采用可分离卷积(先时间后频率)可减少参数量并提升可解释性。循环神经网络(RNN)及其变体(如LSTM、GRU)适用于建模滑动窗口提取的时序特征(如瞬时频率或小波能量序列);双向LSTM还能结合上下文信息,同步预测信号起止点与类别。但RNN在极短序列(< 10 点)下表现不佳,此时一维CNN更优。近年,Transformer的自注意力机制虽能建模远距离依赖(如跳频规律),但因突发信号序列通常较短,其优势有限且计算开销大^[4]。因此,轻量级模型(如MobileNet、ShuffleNet)或基于知识蒸馏的压缩模型更适合嵌入式设备的实时检测需求。

3.3 小样本与迁移学习

在非协作通信中,由于难以获得大量的标注短时突发信号样本,因此容易造成深度模型过拟合现象,小样本学习方法有:度量学习(孪生网络、原型网络)是根据查询样本与支持集中各个类别的原型的距离来进行分类;模型无关元学习是在多个突发信号识别任务中学习初始参数,只需要少量梯度更新就可以适应新的类别;迁移学习是从源域(例如高信噪比仿真实验室数据或者来自不同频段公开数据集等)学习到一个特征表示然后将其应用到目标任务上来,只对最顶层几层进行微调以匹配目标域中的短时突发事件;域自适应技术(如对抗域自适应、最大均值差异约束等)可以降低源域与目标

域间的差距,在目标域信噪比较差或者受到干扰的情况下非常有效。

4 结语

短时突发信号的特征提取以及识别是信号处理的一个热点问题。本文对几种常用的方法进行总结:时频分析给出能量分布图像,小波变换与多分辨率分析可以实现自适应时频划分,希尔伯特-黄变换适合于非平稳信号,稀疏表示与压缩感知减少采样需求,高阶统计量能够抵抗高斯噪声的影响。而在识别上,传统的机器学习算法对于小样本具有较好的鲁棒性,而基于深度学习的方法由于其能够自动学习特征而取得突破,在小样本以及迁移学习上也表现出良好的性能。但是目前仍然存在一些亟待解决的问题如低信噪比下的鲁棒性、自适应时频分辨率、实时性以及小样本问题等。今后需研究结合物理先验信息的深度模型、轻量级在线结构以及无监督或自监督学习等。由于认知无线电、物联网安全和电子对抗等领域的发展需要,因此这一领域将会朝着更高精度、更强鲁棒性和更低延时的方向发展。

参考文献

- [1]钟胜远.短时突发通信信号盲检测与识别技术研究[D].厦门理工学院,2023.DOI:10.27866/d.cnki.gxly.2023.000405.
- [2]刘攀,罗松,李森,等.基于高并发处理技术对时敏信号的捕获研究和实现[J].中国无线电,2022,(11):69-72.
- [3]万嘉骏,岳春生,孙红胜,等.一种面向短时突发信号的高精度同步方案设计[J].电子科技,2022,35(5):66-73.
- [4]刘永桦,王鹏毅,王西夺.一种低信噪比突发信号载波跟踪技术研究[J].河北工业科技,2021,38(1):12-19.