2013年12月

文章编号: 2095-4980(2013)06-0911-06

基于形态学处理的突发信号宽带检测算法

贾宏雷,江桦,王权

(信息工程大学 信息系统工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要:在非协作通信中,确定突发信号的中心频率和起止时刻,是突发信号检测的主要任务。本文对突发信号的宽带时频图进行形态学滤波以及骨架提取,利用处理后的时频图信息进行信号的时间占有度统计,并以此确定突发信号中心频率;采用基于 Goertzel 算法的 Power-Law 检测器来实现突发信号的捕获;根据信噪比的粗估计采取合适的起止时刻检测方式,完成突发信号的 检测。仿真结果表明,算法能够较好地确定突发信号的中心频率,提高起止时刻的检测性能。

关键词:突发信号处理;形态学;骨架化;时间占有度;起止时刻检测

中图分类号:TN915.6 文献标识码:A doi: 10.11805/TKYDA201306.0911

A broadband detection algorithm of burst signal based on morphology processing

JIA Hong-lei, JIANG Hua, WANG Quan

(School of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: Confirming the center frequency and begin-end time is the primary task of burst signal detection in non-cooperative communication. The correlation algorithms of burst signal detection are discussed. The morphology filtering and skeletonization algorithm is adopted to preprocess the broadband time-frequency image of burst signals and suppress noise and interference. The occupied time rates of signals are computed and the center frequency of burst signals are obtained. The Power-Law detector based on Goertzel algorithm is employed and the detection of burst signal is realized. Appropriate method is taken to estimate the begin-end time of burst signal according to the coarse estimation of signal to noise ratio. Simulation results indicate that the algorithm is more effective to extract the center frequency of burst signal and can enhance the performance of begin-end time extraction.

Key words: burst signal processing; morphology; skeletonization; occupied time rate; begin-end time detection

突发通信作为低截获概率通信的重要方式之一,在军事通信中占有重要地位。伴随着通信新技术和新体制的 推广使用,电磁环境日益复杂,给突发信号的检测带来更大挑战。非合作方必须具备检测重要突发信号的能力以 满足通信情报获取及电子战支援等需求。

近年来,国内外许多专家学者对短时突发信号的检测方法做了深入研究,提出了各种解决方案。文献[1]研究了基于高阶矩的短时突发信号检测的性能。文献[2]分别从时域、频域两个角度,对各种突发信号检测算法做 了详细的分析比较。鉴于突发检测中对于信号及噪声的先验知识较少,Nuttall 提出了一种鲁棒性较好的非参数 瞬态信号检测器——基于离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的 Power-Law 检测器⁽³⁾,但在对突发 起止时刻的准确度要求较高、突发间隔较小的场合性能表现欠佳。文献[4]提出了双滑动窗口算法,方案设计简 单,较好地实现突发信号起始时刻的检测,但对于终止时刻的检测效果不明显。

本文提出了一种基于形态学处理的突发信号宽带检测算法,并通过仿真验证算法的可行性。改进的算法首先 对信号时频图进行处理,利用形态学中的图像处理技术,消除影响检测的噪声干扰,并利用骨架提取、时间占有 度统计,在宽带范围内检测突发信号的存在性、突发频点等参数,再利用较为成熟的窄带检测方法对疑似的突发 频率点进行检测,最后结合信噪比的粗估计选取合适的起止时刻检测方法,完成突发信号的检测。算法通过形态 学处理以及宽窄带处理相结合的方式,在提高信号检测概率的同时降低了运算量,保证了突发检测的实时性。

1 突发信号的宽带检测算法

本文提出的突发信号宽带检测算法,其处理流程如图 1 所示。算法分为宽带处理和窄带处理 2 部分。首先,将信号宽带范围内的时频图视为图像,运用形态学处理方法对信号时频域特征进行提取,并对时间占有度进行统计分析,初步判断是否含有突发信号以及突发信号的中心频率;然后,对疑似突发信号的频率进行窄带处理检测,结合 Goertzel 算法和 Power-Law 检测器捕获突发信号;最后,采用适合的检测算法对突发信号的起始时刻进行检测。



Fig.1 Flow chart of burst signal processing 图 1 突发信号处理流程

1.1 突发信号中心频率的确定

在时频图中,各类信号表现形式各异,如图2所示。和其他 信号相比,突发信号表现为长度较短的间断能量矩形。由于信号 时频图中包含各信号的能量维持时间和中心频率位置等信息,所 以在突发信号检测的过程中,对时频图信息的有效分析与特征提 取不仅可以判断突发信号的存在性,也可以提取出突发信号的参 数信息,是当前进行突发信号检测的主要参考手段。

结合突发信号在时频图中所表现出来的固有特征,本文采取 基于形态学处理的时间占用度统计方法,用于确定突发信号的中 心频率。算法流程如图 3 所示。





图 3 突发信号中心频率估测流程图

具体检测过程如下:

 对时频图进行二值化处理:在对突发信号的检测过程中,原始的时频图中含有的信号能量信息对信号存 在性的检测意义不大,并且在利用时频图信息统计信号和时间占用度时会增加运算量,因此将信号谱估计后,对 其时频图进行二值化处理,可以提高算法检测效率。

二值化方法可分为全局阈值法和局部阈值法。采用局部阈值法可以得到较为精确的二值化图像,适应各类电磁环境的噪声干扰。Bernsen 算法^[5]是一种经典的局部阈值法,考虑以坐标点(*x*, *y*)为中心,长宽均为(2*d*+1)的区域内,算法的局部门限值可由式(1)得出:

$$m(x,y) = \frac{1}{2} \left(\max_{-d < n < d, -d < l < d} \left\{ X \left(x + n, y + l \right) \right\} + \min_{-d < n < d, -d < l < d} \left\{ X \left(x + n, y + l \right) \right\} \right)$$
(1)

2) 对二值化后的时频图进行形态学处理:对时频图进行二值化处理,可以消除大部分背景噪声,保留被检测信号信息,降低后期检测过程的运算量,但二值化后的时频图中仍将存在部分强雾态噪声点以及对目标信号检测无用的扫频、脉冲等干扰,需要进一步处理。

形态学开运算是非扩张的^[6],小于结构元素的部分会被"开掉",因此开运算可以光滑时频图中目标信号的 轮廓,消除信号的尖峰、毛刺;闭运算是扩张的,小于结构元素的部分会被膨胀填充,因此可用于消除时频图中 细长的鸿沟,连接轮廓线中的断裂,填补较小的缝隙。在对二值化后的时频图进行形态学处理的过程中,一般采 用先开运算后闭运算的方法,消除结构元素较小的雾态噪声、扫频、脉冲干扰,增强信号的时频特征。 3) 运用形态学骨架化算法确定突发信号的中心频率:运用形态学骨架化运算抽取时频图骨架,可以减小后期统计处理的计算量,并且抽取的骨架点与目标图像上至少有 2 点间的距离相同,骨架的中轴性得到有效保证^[7]。在时频图中,理想条件下信号图像表现为长矩形,骨架线的位置大部分是信号累积能量在频率轴上的中心线,平行于时间轴,如图 4 中虚线部分所示。

对时频图进行形态学骨架化抽取后,依据处理后的时频图信息进行 信号时间占用度统计。如果某宽带范围内包含突发信号,则观察该频段



Fig.4 Definition of the image's skeleton 图 4 骨架的定义

中各频点的信号时间占用度,突发信号所处的频点在时间占用度函数中的取值与其他常见信号具有明显差异,一般低于定频信号频率点,高于跳频信号频率点。通过时间占有度的统计函数,可以得到该频段中各信号的中心频率,并从中提取出突发信号的中心频率。

1.2 突发信号的捕获

在确定突发信号可能出现的频率点后,需要在指定的频率点采用窄带处理方法捕获突发信号,即利用软件无 线电手段,在确定突发信号出现的同时,对其进行采集,以便进行突发起止时刻检测等后续处理。Power-Law 检 测器^[8]是鲁棒性能较好的非参数瞬态信号检测器,并且无需信号先验知识,因而实用性较强。其表达式可表示为:

$$\sum_{k=1}^{N} X_{k}^{\nu} \begin{cases} > \mu & \text{signals exist} \\ \leq \mu & \text{signals not exist} \end{cases}$$
(2)

式中: X_k 是接收信号序列 x(n)的 DFT 结果的第k个值; μ 是检测门限; ν 是一个非负实数。Nuttal 认为短时信号检测问题^[9]可当作是在 N 点 DFT 数据中任意 M 点的检测问题。鉴于对少量频点功率谱的统计结果可以利用 Goertzel 算法快速得到,本文用 Goertzel 算法代替 DFT 变换,并结合 Power-Law 检测器来实现对突发信号的快速捕获。

2 突发信号的起止时刻检测

当捕获到突发信号后,需要在被截获的窄带数据中进 行突发信号的起止时刻检测,将有用信号段与空闲的噪声 段分离开,然后进行信号的采集存储、调制识别、参数估 计和解调等处理。常见突发信号起止时刻检测算法主要从 时间域和频率域两个方面考虑。时域检测算法的运算量 小,但灵敏度较低,适用于信噪比较高的情况;频域检测 算法运算量较大,但灵敏度较高,适用于信噪比较低的情况。综合突发信号时域与频域检测方法的优缺点,本文依



据信噪比的粗估计来选择合适的检测方法,以确定突发信号的起止时刻。

1) 高信噪比情况下的突发信号检测

在高信噪比情况下,时域检测算法的检测效率可以得到保证,而且运算速度快,满足实时性要求,最常用的 是滑动窗法以及双滑动窗法^[10]。双滑动窗法判决变量的取值只与信噪比有关,与信道增益无关,在一定程度上 解决了判决变量门限设置的难题,但是算法对信号终止时刻的检测效果较差,使得检测概率降低。参照文献[11], 本文对双滑动窗法做进一步改进,其实现框图如图 5 所示。

算法利用双滑动窗口算法在峰值时刻检测效率较高的优点,对检测函数取倒数,对终止时刻的检测同样采用 峰值判决的方法,从而提高整体的检测效率。同时,利用平方特性,可以使峰值检测更为明显。

2) 低信噪比情况下的突发信号检测

在低信噪比情况下,频域检测方法检测灵敏度较高,检测概率可以得到保证,常见的频域检测算法主要有循 环谱法、谱熵法等。谱熵法^[12]是一种基于 STFT 幅度谱熵值的检测算法,它利用信号各频率分量之间具有相关性, 而噪声具有随机性的特点进行突发信号存在性检测。

谱熵法中同样通过设定判决门限进行起止时刻的检测,但是低信噪比情况下,判决门限的设定较为困难,是 影响谱熵法检测概率的主要原因。结合双滑动窗法中利用2个相对静止的连续滑动窗的能量比值函数来确定突发 信号起止时刻的策略,本文提出基于谱熵法的改进算法,即对谱熵法的检测函数再进行双滑动窗法检测,利用2 个滑动窗口的能量比值函数来判断突发信号的起止时刻。改进的算法解决了判决门限设置的难题,并具备频域检测的高灵敏度,在较低信噪比情况下,可以达到良好的检测效果。



Fig.6 Simulation of obtaining the center frequency of burst signals 图 6 突发信号中心频率估测仿真图

3 仿真和分析

实验 1 采用形态学处理方法估测某个频段内可能存在突发信号的频率点。仿真条件:仿真信道环境的带宽为 2 M,宽带内含有 2 个突发信号,调制方式均采用最小移频键控 (Minimum Shift Keying, MSK),中心频率分别为 0.62 MHz,1.54 MHz,信噪比为 10 dB。宽带范围内混杂着定频、扫频、跳频、垂直脉冲等信号的干扰。

图 6 展示了利用形态学方法提取突发信号中心频率的整体过程。 在图 7 中可以验证结论,若宽带范围内存在突发信号,则突发信号的

频点在时间占有度上明显低于其他定频频率点,高于跳频频率点。通过此特性可以判断突发信号的存在性,并且 每个极值点所对应的频率点为信号的中心频率,以此确定突发信号的中心频率。

实验2 不同信噪比条件下, 对突发信号起 止时刻的常见检测算法进行分析。仿真条件: 突发信号调制方式为正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), 持续时间 0.15 s, 采样率为 20 kHz, 符号速率为 1 600 Baud; 改 进的双滑动窗口算法中, 2 个相对静止的滑动 窗长均为 128 个采样点,步进为 8 个采样点; 谱熵法和改进的谱熵法在对模拟信号进行短 时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)时的滑动窗长均为 128 个采样点,步进 为 8 个采样点,其中改进算法的 2 个滑动窗均 为 128 个采样点,步进为 8 个采样点。在信噪 比分别为 3 dB,10 dB 的条件下,对比改进的双 滑动窗法、谱熵法和改进的谱熵法 3 种算法对 突发信号起止时刻的检测效果。

12 1 (amplitude amplitude -1.(1.0 1.5 2.0 2.5 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 0 3.0 t/s(a) wave graph of simulated signals (b) an improved dual sliding window algorithm in time domain, R_{SN} 2.600 1.03 2.55 1.02 plitude 2.500 Ĕ1.00 B 2.450 0.98 2.400 2.375L 0.9 0''0.5 1.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.02.5 3.0 1.5 t/s t/s(c) spectral entropy algorithm (d) an improved spectral entropy algorithm Fig.8 Detection functions by the three algorithms in low noise ratio 图 8 低信噪比时 3 种算法的检测函数

图 8 和图 9 分别给出了信噪比为 3 dB 和 10 dB 时, 3 种算法的检测效果对比,从图中可看出:在较低信噪比时,改进的谱熵法更利于突发信号的检测,其他 2 种算法效果较差;而在高信噪比条件下,3 种算法均能较好



地检测到突发信号的起始和终止时刻。

将改进后的双滑动窗算法、谱熵法和改进的谱 熵法对突发信号的检测概率进行对比。突发信号及 各个仿真参数均与上述相同, 信噪比从 0 dB~15 dB 变化, 步进为 1 dB, 在每个信噪比条件下, 做 500 次蒙特卡洛实验, 仿真实验统计结果见图 10。

仿真结果表明,改进后的谱熵法性能均优于其他2种算法,尤其是在信噪比小于7dB情况下,检测概率明显高于其他算法;在信噪比大于7dB时3种算法的检测性能均能够满足实际需求。

4 结论

本文首先利用 Bernsen 局部阈值法对信号时频 图进行二值化处理,利用形态学算法中的开运算、 闭运算对突发信号的时频图进行滤波处理,在保证 原始信号特征的同时,降低了运算量;然后利用形 态学骨架算法抽取处理后的时频图骨架,并基于骨 架化后的时频图信息,对信号的时间占用度进行统 计,确定突发信号中心频率,并通过基于 Goertzel 算法的 Power-Law 检测器来实现对突发信号的捕 获;最后,对改进的双滑动窗法、谱熵法和改进的 谱熵法这3种对突发信号起止时刻的检测算法进行 分析。仿真实验一验证了利用形态学方法来确定突 发信号中心频率的可行性;实验二在不同信噪比情 况下,对仿真信号采用改进的双滑动窗法、谱熵法 和改进的谱熵法进行检测,并统计检测概率。统计 结果表明,在信噪比低于 7 dB 时采用改进的谱熵



图 10 渐进信噪比时 3 种算法的检测概率

法的鲁棒性相对更好,抗噪声干扰性强,但计算量稍大; 信噪比高于 7 dB 时采用改进的双滑动窗口算法,计算量小,检测概率能够满足实际需求。

参考文献:

- Stefannia Colonnese, Gaetano Sxarano. Transient signal detection using higher order moments[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999,47(2):515-520.
- [2] 吴晓东,路友荣,黄渊凌,等. TDMA 突发信号的检测[J]. 电信技术研究, 2005,1(2):28-34. (WU Xiaodong,LU Yourong, HUANG Yuanling, et al. Detection of the TDMA burst signal[J]. Research on Telecommunication Technology, 2005, 1(2):28-34.)
- [3] Nuttall A H. Near-optimum detection of random signals of unknown location, structure, extent, and strength[C]// Proc. of OCEANS'95. MTS/IEEE. 'Challenges of Our Changing Global Environment' Conference. San Diego, CA, USA:[s.n.], 1995: 1659-1664.
- [4] CHEN HSIAI-WA, SIM HAK-KEONG. Orthogonal decision feed back detector for asynchronous multiuser CDMA systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001,8(42):1961-1972.
- [5] 庄军,李弼程,陈刚. 一种有效的文本图像二值化方法[J]. 微计算机信息, 2005,21(8):56-58. (ZHANG Jun,LI Bicheng, CHEN Gang. An Effedtive Binarization Algorithm for Document Image[J]. Micro Computer Information, 2005,21(8):56-58.)
- [6] 王权,江桦,陈含欣. 基于形态滤波的短波信号检测算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(6):733-738. (WANG Quan,JIANG Hua,CHEN Hanxin. An HF signal detection algorithm based on morphological filtering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(6):733-738.)
- [7] Coeurjolly D, Montanvert A. Optimal Separable Algorithms to Compute the Reverse Euclidean Distance Transformation and Discrete Medial Axis in Arbitrary Dimension[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007,29(3):437-449.

- [8] Wang Zhen, Willett P. Improved power-law detection of transients[C]// International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Salt Lake City:[s.n.], 2001:3181-3184.
- [9] WANG Zhen, Willett P. All-purpose and plug-in power-law detectors for transient signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001,49(11):2454-2466.
- [10] Enserink S,Cochran D. On detection of cyclostationary signals[C]// IEEE lnt. Conf. on Acoustics' Speech, and Signal Processing (ICASSP'95). Detroit, Michigan, USA:[s.n.], 1995:1-4.
- [11] 王权. 短波宽带信号监测系统关键技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011. (WANG Quan. Research on the key technology of wideband signal monitoring system[D]. Zhenzhou:Information Engineering University, 2011.)
- [12] 隋丹,葛临东. 突发信号盲存在性检测的两种算法[J]. 信号处理, 2008,24(5):863-866. (SUI Dan,GE Lindong. TWO Blind Presence Detection Algorithms for Burst Signals[J]. Signal Processing, 2008,24(5):863-866.)

作者简介:



贾宏雷(1985-),男,吉林市人,在读硕士 研究生,助理工程师,主要研究方向为通信信 号截获与分析.email:jia_hong_lei@126.com. **江** 桦(1956-),男,江苏省南通市人,教授,博士生导师,研究方向为通信信号处理、电磁频 谱监测.

王 权(1986--),男,石家庄市人,在读硕士 研究生,主要研究方向为通信信号处理.

(上接第910页)

作者简介:



汪子嘉(1985-),男,重庆市垫江县人,在 读硕士研究生,研究方向为基于无线传感网的 无源定位技术.email:zijiawang1020@yahoo.cn. **于宏毅**(1963-),男,内蒙古自治区呼和浩特市人,博士,教授,博士生导师,研究方向为通信信号处理、无线通信技术、自组织网络、无线传感器网络.

胡赟鹏(1978-),男,南昌市人,博士,讲师,研究方向为通信信号处理、无线通信技术.