

文章编号: 1672-2892(2010)05-0544-06

## 基于固有时间尺度分解的电台瞬态特征提取

宋春云<sup>1,2</sup>, 詹毅<sup>1,2</sup>, 郭霖<sup>3</sup>

(1.通信系统信息控制技术国家级重点实验室, 浙江 嘉兴 314033; 2.中国电子科技集团公司 第36研究所, 浙江 嘉兴 314033;  
3.中国科学院声学研究所 东海研究站, 上海 200032)

**摘要:** 在实际接收到的电台瞬态信号通常都表现出非平稳性或非线性, 可以通过对此类信号的瞬时参数的估计达到信号检测及电台个体识别的目的。然而, 利用传统的方法如希尔伯特变换或小波变换对这些非平稳信号进行处理时常常会遇到困难。提出一种基于固有时间尺度分解的非平稳信号瞬时参数提取及电台个体识别方法, 仿真试验结果证明了该方法的有效性。

**关键词:** 固有时间尺度分解; 瞬态特征; 非平稳信号; 电台个体识别

**中图分类号:** TN971

**文献标识码:** A

## Intrinsic time-scale decomposition based approach for radio transient character extraction

SONG Chun-yun<sup>1,2</sup>, ZHAN Yi<sup>1,2</sup>, GUO Lin<sup>3</sup>

(1.National Laboratory of Information Control Technology for Communication System, Jiaying Zhejiang 314033, China;  
2.No.36 Research Institute of CETC, Jiaying Zhejiang 314033, China;  
3.Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Practical signals such as radio transient signals turn out to be non-stationary and nonlinear time series, and estimating instantaneous parameters of such signals in time domain will benefit detecting and identifying specific emitters, such as radio stations and aerospace targets. However, conventional methods such as wavelet and Wigner-Ville distribution(WVD) methods are difficult to deal with these transient signals when the signal is not stationary. To provide more efficient approach for estimating instantaneous parameters of non-stationary and Specific Emitter Identification(SEI) with high accuracy, a method based on Intrinsic Time-scale Decomposition(ITD) for analytic signal is proposed in this paper. The simulation results are presented to demonstrate the effectiveness of this novel method.

**Key words:** Intrinsic Time-scale Decomposition; transient character; non-stationary signal; Specific Emitter Identification

20世纪60年代, 美国就提出利用移动电话对目标实施监视及跟踪, 即电台个体识别(SEI)技术。该技术主要通过提取辐射信号的个体特征, 并与个体特征库中的样本进行比对, 进而实现电台个体的识别<sup>[1]</sup>。电台个体识别技术提出以来, 已涉及认知无线电(Cognitive Radios)<sup>[2]</sup>、无线局域网管理(Wireless Network Security)<sup>[3]</sup>、电子支援(Electronic Support Measures, ESM)系统<sup>[4]</sup>等方面。傅里叶变换是分析信号能量与频率的一种经典方法, 但信号必须满足: 1) 系统必须是线性系统; 2) 信号必须是周期的或者平稳的。小波变换可以用来分析非平稳时间序列, 不过对于不同的信号, 所选用的小波基函数也有所不同, 就增加了该方法的复杂程度<sup>[5]</sup>。Wigner-Ville分布作为时频分析方法, 可同时从时域和频域对时间序列进行分析, 其主要问题是在计算过程中会产生交叉项<sup>[6]</sup>。经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)将时间序列分解成一系列本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF), 并通过对本征模态函数的分析提出信号固有特征<sup>[7]</sup>。尽管经验模态分解相对于传统方法在分析非平稳信号时具有一定的优势, 但是该方法仍存在一定的缺陷, 比如, 这种方法在显示信号的动态性方面存在缺陷, 且在信号端点处易产生飞翼现象等。最近刚刚提出的时间尺度分解克服了经验模态分解的缺点, 它把信号高效分解成基线信号及旋转信号, 并可以反映瞬时频率和幅度的精确时间信息, 且可以构成一种新的实时信号滤波器, 在复杂的无线电信号分析方面有较好的发展潜力。

收稿日期: 2010-01-15; 修回日期: 2010-03-18

### 1 电台个体识别技术

电台个体识别技术利用各无线电设备的信号所具有各不相同的“指纹”来进行识别<sup>[8]</sup>。这些“指纹”由设备硬件属性决定,主要包括电台产生的瞬态信号在时域、频域和相位等不同域上具有的特征参量,其中有幅度、频率和相位的统计参数、测量参数和数值参数。归纳起来主要有 3 个方面:时域特征、频域特征和相空间特征。

#### 1) 时域特征

在雷达个体识别过程中经常使用信号开关瞬态信息的时域特征,比如脉冲宽度、脉冲重复周期、上升沿以及下降沿等特征<sup>[3]</sup>。另外,在对无线电电台进行个体识别时瞬态时域信息也时常被作为个体特征<sup>[8]</sup>。不过利用时域特征时最大的问题是这些特征容易受到噪声和信道的影响。

#### 2) 频域特征

频域特征是电台个体技术中另一个常用的特征形式,目前主要包括:频谱特征<sup>[3]</sup>、积分双谱<sup>[9]</sup>,以及二阶循环平稳性<sup>[2]</sup>等。这些频域特征也同样容易受到噪声和干扰的影响。

#### 3) 相空间特征

分析非线性系统常用相空间法,利用相空间法分析非线性功率放大器时,可以提取不同于传统方法的非线性特征<sup>[10]</sup>。首先通过时间延迟方法对非线性时间序列的相空间进行重构,得到其相轨迹,然后利用非线性方法对相空间的特性进行分析。该方法对信噪比的要求很高。

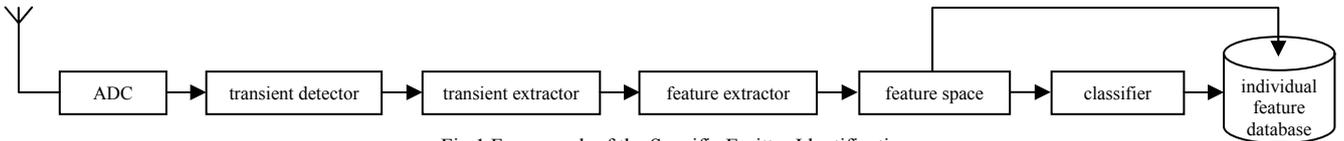


Fig.1 Framework of the Specific Emitter Identification  
图 1 电台个体识别工作流程图

基于瞬态特征的电台个体识别工作流程图如图 1 所示。包括信号接收、瞬态信号检测、瞬态信号提取、个体特征参数提取、个体特征空间构建、个体识别等几个部分。接收的电台信号经过下变频并 A/D 变换后,进行瞬态信号提取。瞬态信号提取是从接收的信号中对瞬态信号进行检测,并计算瞬态信号的起始点和结束点。从数字信号中对瞬态信号进行提取是获得指纹特征参数的必要步骤。瞬态信号提取完成后,对提取的瞬态信号进行个体特征提取。通过对信号的时域、频域、相位等提取信号特征参数,构建电台个体特征参数空间,并进行推理映射简化,获得多维特征矩阵用于个体识别。基于提取的电台个体特征参数,构建个体特征库,对选择的特征参数进行测试,得到每个电台特征参数的方差和均值,基于这些参数的方差和均值定义对应电台的轮廓信息,从而构建完成个体特征库。在已有个体特征库的基础上,电台个体识别系统能够实时检测接收的信号,并利用自适应支持向量机,通过个体识别分类器对接收的信号进行个体识别。在分类器中基于信号的电台个体特征参量和所存储的个体特征库,通过分类算法对接收信号进行个体识别。

在电台个体识别的工作流程中,提取的特征参数设备间差异最大化、设备内差异最小化,是获得最佳识别效果的关键。针对这个问题,本文提出基于固有时间尺度分解的电台个体特征处理方法。

### 2 固有时间尺度分解

假设信号  $\{X_t, t \geq 0\}$  为实信号,定义一种变换  $\mathcal{L}$  将原信号  $X_t$  分解成基线信号及旋转信号<sup>[11]</sup>:

$$X_t = \mathcal{L}X_t + (1 - \mathcal{L})X_t = L_t + H_t \tag{1}$$

式中:  $L_t = \mathcal{L}X_t$  为基线信号;  $H_t = (1 - \mathcal{L})X_t$  为旋转信号。用  $\{\tau_k, k = 1, 2, \dots\}$  表示  $X_t$  极值序列所对应的时刻,并设  $\tau_0 = 0$ 。假如在某段时间内信号保持不变且为极值,那么取该段的最后点作为极值点。为了便于表示,令  $X_k = X(\tau_k)$  和  $L_k = L(\tau_k)$ 。假设  $(0, \tau_k]$  上的  $L_t$  和  $H_t$  以及  $[0, \tau_{k+2}]$  上的  $X_t$  已知,那么可以定义  $(\tau_k, \tau_{k+1}]$  的基线信号为:

$$\mathcal{L}X_t = L_t = L_k + \left( \frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k} \right) (X_t - X_k), \quad t \in (\tau_k, \tau_{k+1}] \tag{2}$$

其中

$$L_{k+1} = \alpha \left( X_k + \left( \frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} \right) (X_{k+2} - X_k) \right) + (1 - \alpha) X_{k+1} \tag{3}$$

其中,  $0 < \alpha < 1$ , 通常取  $\alpha = 0.5$ 。

同时, 定义旋转信号:

$$\mathcal{H}X_i \equiv (1 - \mathcal{L})X_i = H_i = X_i - L_i \quad (4)$$

式中:  $H_i$  即所谓的旋转信号, 代表了输入信号中的相对高频部分, 其特性为每连续 3 个极点间存在一个单音部分;  $L_i$  即所谓的基线信号, 代表了输入信号中的低频部分, 它也是原信号减去旋转信号后的剩余部分。将输入信号分解成基线信号和旋转信号后, 可以将基线信号再进行分解, 直到得到的基线信号为单调信号为止, 如式(5)所示:

$$\begin{aligned} X_i &= \mathcal{H}X_i + LX_i = \mathcal{H}X_i + (H + L)LX_i = (H + HL + L^2)X_i = (H + HL + (H + L)L^2)X_i = \\ & (H + HL + HL^2 + L^3)X_i = \left( H \sum_{k=0}^{p-1} L^k + L^p \right) X_i \end{aligned} \quad (5)$$

利用 ITD 方法将信号分解成一系列旋转信号和残余信号, 就可以对分解出的旋转信号分量进行瞬时特征分析, 计算瞬时特征量的传统方法是建立在 Hilbert 变换基础上的。其中, 瞬时幅度根据简化的幅度计算得出; 瞬时频率由对相位作微分得出; 瞬时相位根据简化的相位计算得出, 三者的定义如下:

$$\begin{cases} A_i \equiv |R_i + ih[R_i]| \\ \theta_i \equiv \text{angle}(R_i + ih[R_i]) \\ f_i \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $h(\cdot)$  表示 Hilbert 变换。在处理实际问题时, 基于 Hilbert 变换的时频分析方法会遇到一些问题, 比如实时性、出现负频率等。为解决这些问题, ITD 方法采用 2 种方法得到瞬时相位的简化, 分别为:

$$\theta_i^1 = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{x_i}{A_1}\right), t \in [t_1, t_2) \\ \pi - \arcsin\left(\frac{x_i}{A_1}\right), t \in [t_2, t_3) \\ \pi - \arcsin\left(\frac{x_i}{A_2}\right), t \in [t_3, t_4) \\ 2\pi + \arcsin\left(\frac{x_i}{A_2}\right), t \in [t_4, t_5) \end{cases} \quad \text{或} \quad \theta_i^2 = \begin{cases} \left(\frac{x_i}{A_1}\right)\frac{\pi}{2}, t \in [t_1, t_2) \\ \left(\frac{x_i}{A_1}\right)\frac{\pi}{2} + \left(1 - \frac{x_i}{A_1}\right)\pi, t \in [t_2, t_3) \\ \left(-\frac{x_i}{A_2}\right)\frac{3\pi}{2} + \left(1 + \frac{x_i}{A_2}\right)\pi, t \in [t_3, t_4) \\ \left(-\frac{x_i}{A_2}\right)\frac{3\pi}{2} + \left(1 + \frac{x_i}{A_2}\right)2\pi, t \in [t_4, t_5) \end{cases} \quad (7)$$

这里  $A_1 > 0$  以及  $A_2 > 0$ , 另外时间点  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  的位置如图 2 所示(图中横坐标为时间轴)。

同时瞬时幅度的简化定义为:

$$A_i^1 = A_i^2 = \begin{cases} A_1, t \in [t_1, t_3) \\ -A_2, t \in [t_3, t_5) \end{cases} \quad (8)$$

根据相位微分可以得出瞬时频率, 由于采用了瞬时频率, 克服了基于傅里叶变化的频谱分析必须依赖信号周期性质才能表达频率的缺点, 能够精确表达非平稳信号的动态特性。在对电台个体进行识别过程中, 对瞬时参数的精确提取显得尤为重要, 因此可以利用 ITD 方法对电台信号的瞬时参数进行提取。

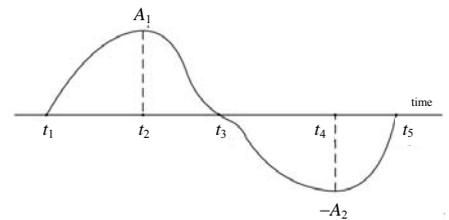


Fig.2 Illustration of the simplified algorithm  
图 2 简化算法示意图

### 3 仿真与结果分析

下面给出利用上述算法对实际采集的电台信号进行仿真分析的结果。采集信号采用近距离空间辐射的方法实现, 并采用带通采样的方式进行采集, 采样频率  $f_s = 370$  kHz。电台为同一型号, 工作于同一调频(Frequency Modulation, FM)模式, 同一中心频率  $f_c = 37$  MHz。采集的 2 台电台开机状态原始信号如图 3 所示。

首先通过贝叶斯检测算法<sup>[12]</sup>提取电台瞬态信号, 选择瞬态信号长度为 5 000 个采样点。对瞬态信号进行 ITD 分解, 对分解得到的旋转分量进行瞬时特征提取时取  $\alpha = 0.5$ ; 同时利用 Haar 小波对提取的瞬态信号进行分解。对 A, B 两电台瞬态信号分解后前 3 层分量的分析结果如图 4、图 5 所示。图中  $f$  表示归一化频率, 单位为 rad/s。

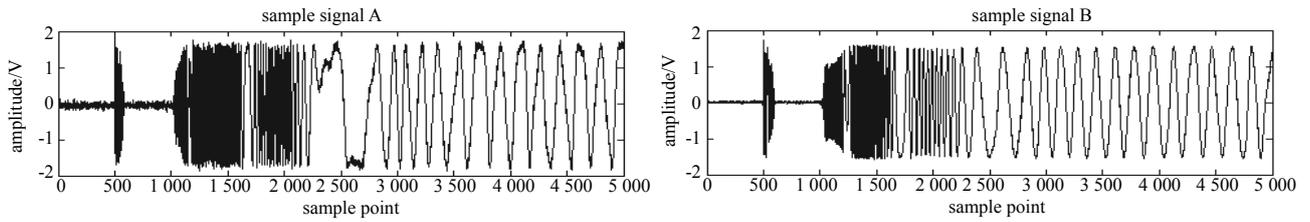


Fig.3 Signal from two transmitters  
图 3 采集的两台电台信号

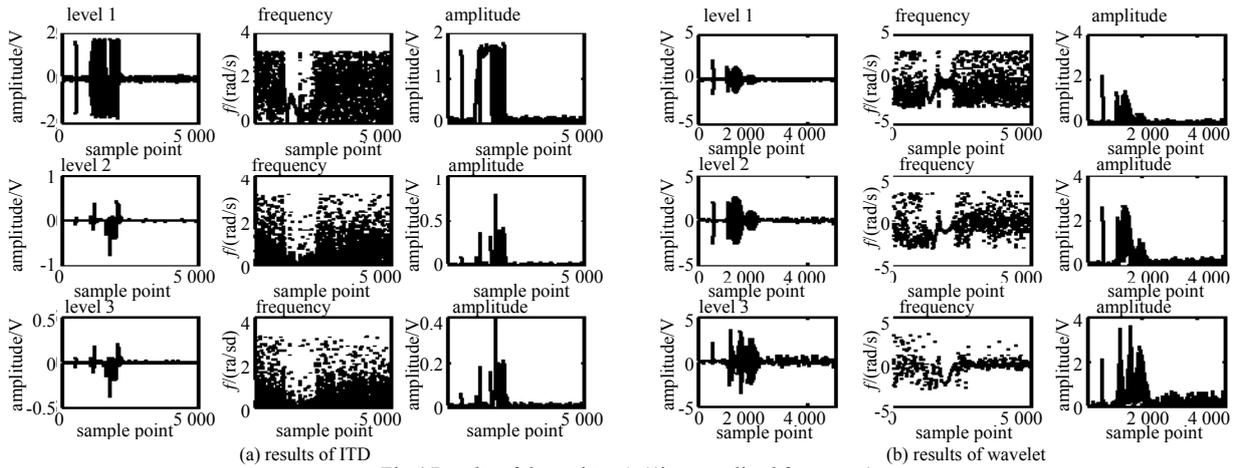


Fig.4 Results of the emitter A ( $f$  is normalized frequency)  
图 4 电台 A 的分析结果( $f$  为归一化频率)

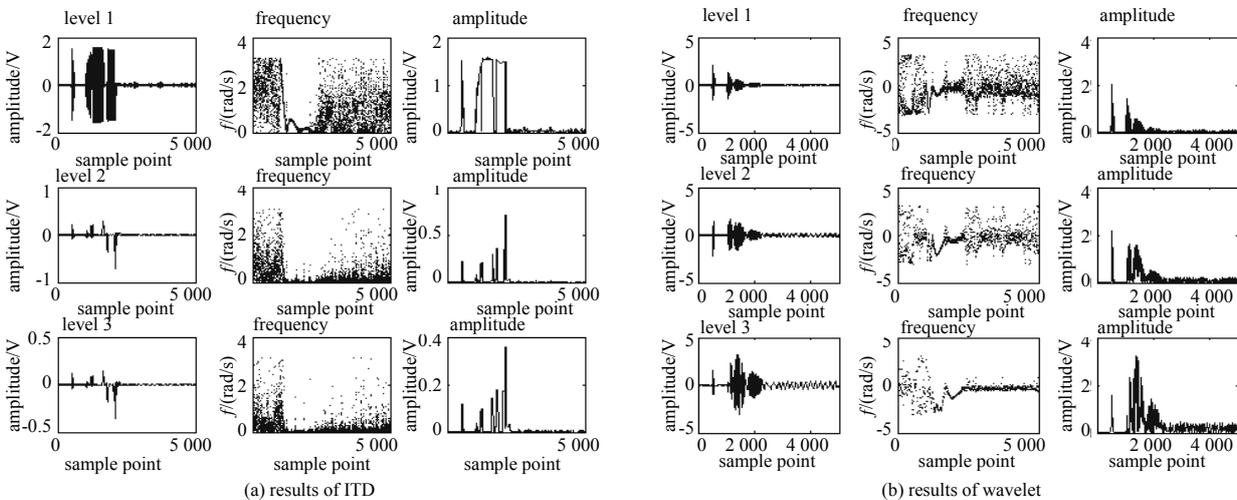


Fig.5 Results of the emitter B ( $f$  is normalized frequency)  
图 5 电台 B 的分析结果( $f$  为归一化频率)

分析图 4 和图 5 可以发现,不管是利用 ITD 方法还是小波方法,提取两电台的瞬态特征存在较大差异。另外,利用 ITD 方法分解得到的第 1 层分量包含了瞬态信号的基本特征,而利用小波分解的各阶分量均含有瞬态特征,因此利用 ITD 方法比小波方法提取的瞬态特征更加可靠,而且也后续特征分析处理提供了方便。同时由于该方法无需先验知识,因此具有更强的自适应能力,且计算复杂度也比小波方法低。

以上分析过程中,利用的信号均在接近理想的条件下采得,然而现实环境中这种信号是无法获得的。下面分析 ITD 方法在较低信噪比条件下的性能。首先对采得的电台 A 信号人为加上 10 dB 的噪声,如图 6 所示。然后同样利用 ITD 方法和小波方法对加噪后的信号进行分解并计算瞬时特征,计算结果如图 7 所示。

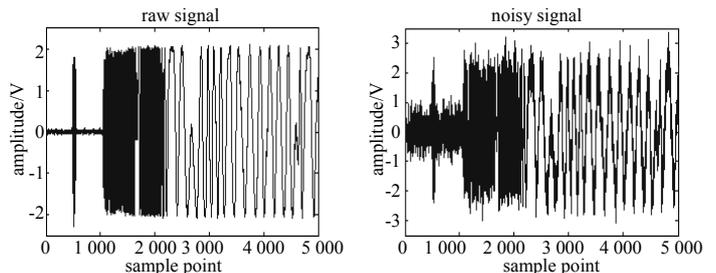


Fig.6 Signal with and without noise  
图 6 原始信号与加噪信号

比较图4和图7可以发现,利用ITD方法分析加噪后的信号时,虽然分解效果受到影响,但仍能将瞬态特征较清晰地提取出来,而小波方法的分解效果受噪声影响较大,其瞬态特征提取不佳。

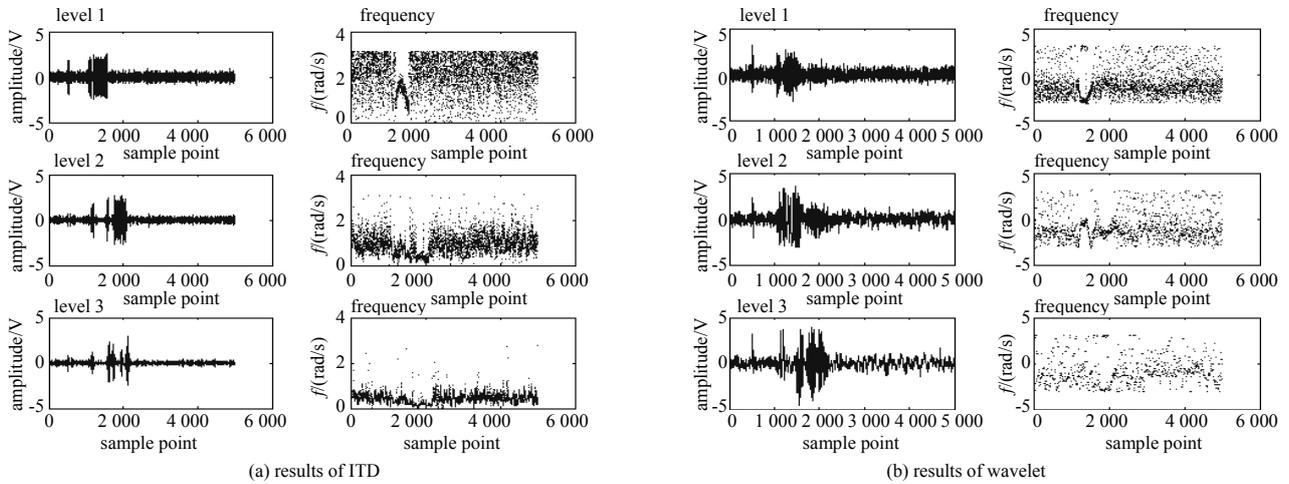


Fig.7 Results of the emitter A with noise ( $f$  is normalized frequency)

图7 电台A加噪后的分析结果( $f$ 为归一化频率)

#### 4 结论

本文采用ITD方法对电台个体识别进行了分析研究,从仿真试验结果可以看出该方法对不同电台能获得差异较大的特征参数,且该方法的分解效果优于Haar小波分解。同时该方法具有更强的自适应能力和较低的计算复杂度。在现实环境中,由于电磁环境的复杂性,接收信号会受到噪声的污染,因此在文中进一步研究了该方法在较低信噪比条件下的性能,结果显示噪声对该方法性能的影响明显小于对小波方法的影响,充分体现该方法在处理非平稳信号时的优越性。

#### 参考文献:

- [1] Kenneth I Talhot, Paul R Duley, Martin H Hyatt. Specific Emitter Identification and Verification[J]. Technology Review Journal, 2003, 11(1): 113-133.
- [2] Kyouwoong Kim, Chad M Spooner, Ihsan Akbar, et al. Specific Emitter Identification for Cognitive Radio with Application to IEEE 802.11[C]// IEEE Communications Society. IEEE Global Telecommunications Conference. Nov.30-Dec.4, 2008, New Orleans, LA, USA: [s.n.], 2008.
- [3] Remley K A, Grosvenor C A, Johnk R T, et al. Electromagnetic Signatures of WLAN Cards and Network Security[C]// IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Athens: [s.n.], 2005.
- [4] Robert Owczarek, Adam Kawalec, Janusz Dudczyk. An application of iterated function system attractor for specific radar source identification[C]// International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Wrocław, Poland: [s.n.], 2008.
- [5] Chan Y T. Wavelet basics[M]. Boston: Kluwer, 1995.
- [6] Cohen L. Time-frequency analysis[M]. NJ: Prentice-Hall, 1995.
- [7] Norden E Huang. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998, 454: 903-99.
- [8] 张旻, 王若冰, 钟子发. 通信电台个体识别中的载波稳定度特征提取技术研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(10): 2529-2533. (ZHANG Min, WANG Ruo-bing, ZHONG Zi-fa. Study on the Techniques on Extracting Carrier Frequency Stability of Individual Communication Transmitter Identification[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(10): 2529-2533.)
- [9] 蔡忠伟, 李健东. 基于双谱的通信辐射源个体识别[J]. 通信学报, 2007, 28(2): 75-79. (CAI Zhong-wei, LI Jian-dong. Study of transmitter individual identification based on bispectra[J]. Journal On Communications, 2007, 28(2): 75-79.)
- [10] Carroll T L. A nonlinear dynamics method for signal identification[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2007, 17(2): 1-7.
- [11] Mark G Frei, Ivan Osorio. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals[J]. Proceedings of the royal society-series A, 2007, 463(2078): 321-342.
- [12] Ureten O, Serinken N. Detection of radio transmitter turn-on transients[J]. Electronics Letters, 1999, 35(23): 1996-1997.

## 作者简介:



宋春云(1980-), 男, 江苏省常州市人, 博士, 工程师, 主要从事通信信号辐射源个体识别等方面研究.email:ghost0290@163.com.

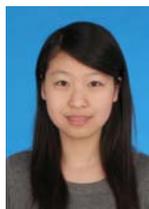
詹毅(1967-), 男, 河南省洛阳市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为通信信号处理.

郭霖(1981-), 男, 福建省福州市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水声信号处理.

(上接第 525 页)

- [6] 程水英,武传华,张剑云. 带通欠采样技术及在数字中频软件接收机中的工程应用[J]. 电路与系统学报, 2006,11(3): 22-25. (CHENG Shui-ying,WU Chuan-hua,ZHANG Jian-yun. Uniform undersampling technique of bandpass signal and its engineering application in software digital IF receiver[J]. Journal of circuits and Systems, 2006,11(3):22-25.)
- [7] 陈惠兵,杨惠. 数字下变频中抽取滤波器的仿真与实现[J]. 上海电机学院学报, 2005,8(6):8-12. (CHEN Hui-bing, YANG Hui. Simulation and Realization of Decimation Filter in Digital Down Conversion[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2005,8(6):8-12.)
- [8] 刘凯,王海,周渭,等. 一种基于 FPGA 的数字下变频器设计[J]. 电子元器件应用, 2009,11(1):63-66. (LIU Kai,WANG Hai,ZHOU Wei,et al. FPGA-based design of digital down converter[J]. Electronic Component& Device Applications, 2009,11(1):63-66.)
- [9] 戴杰.  $\Sigma$ - $\Delta$ 数模转换器中插值滤波器的研究与设计[J]. 电子元器件应用, 2008,10(6):64-67. (DAI Jie. Research and design of interpolation filter in  $\Sigma$ - $\Delta$  digital to analog converter[J]. Electronic Component& Device Applications, 2008, 10(6):64-67.)

## 作者简介:



陈媛(1985-), 女, 天津市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为星间链路、卫星导航. email:yuanjiecy@yahoo.com.cn.

常青(1962-), 男, 天津市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信、卫星导航.

于渊(1983-), 男, 天津市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为卫星导航接收机设计.