基于分形加权维数的PUE攻击用户检测方法

田红园 姚引娣 郑文秀 王宏伟
(西安邮电大学 西安 710061)

摘 要 针对主用户仿冒(PUE)攻击用户非法占用主用户信道而导致认知用户的可用频谱资源降低的问题,以辐射源的指纹特征为基础,定义分形加权维数,刻画通信信号码元包络的脉内起伏特征,提出了一种新的基于辐射源特征提取的PUE攻击检测方法。理论分析和实验结果表明,提出的检测方法能够有效地区分主用户和PUE攻击用户,并在信息安全领域发挥重要作用。

关键词 PUE攻击用户,辐射源特征提取,分形维数
中图法分类号 TN911.72 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.9.029

Method of PUE Attack User Detection by Weighted Fractal Dimension

TIAN Hong-yuan YAO Yin-di ZHENG Wen-xiu WANG Hong-wei
(Xi'an University of Posts and Telecomunications, Xi'an 710061, China)

Abstract PUE attack users illegally occupy the primary user's channel, resulting to the decrease of cognitive user's available spectrum resources. Based on the fingerprint characteristics of the radiation source, this paper defined the fractal dimension weighted, and depicted the intrapulse fluctuation characteristics of the communication signal envelope. We proposed a new method of PUE attack detection by the feature extraction of radiation source. Theoretical analysis and experimental results show that this method can effectively distinguish between the main users and PUE attacks users, and it will play a great role in the field of information security.

Keywords PUE attack users, Radiation source feature extraction, Fractal dimension

随着认知无线电技术的不断扩展,安全问题日益受到重视。在认知无线电网络中,除了存在传统的无线电网络安全威胁外,还新生了一种安全隐患:主用户仿冒(PUE)攻击[1]。这种攻击用户会模仿主用户的调制信息占用频谱资源,造成频谱感知过程受到严重干扰,并显著地减少合法感知用户的可用信道资源。现有的PUE攻击检测方法主要有能量检测法、循环平稳过程特征检测法和匹配滤波法[2],其重点检测授权频段是否被占用,而不对该频段的用户身份作识别。这种过于简单的识别模型不能准确地识别主用户与攻击用户,不能完全满足移动认知网络的感知和抗干扰要求。因为PUE攻击者能够采用类似主用户的调制参数模仿主用户信号的波形并发送,使得感知范围内的所有认知用户均误以为是主用户在通信,迫使认知用户退出授权信道,从而给攻击者提供了占用此信道的机会。

目前常用的几种不同的PUE攻击用户检测方法有:(1)基于TV授权系统的PUE攻击的防御技术,通过估计信号功率大小和发射机位置判断检测到的信号是否来自主用户。其缺陷是实现困难,需要预先设定无线传感网络。(2)对接收到的数据进行Hash计算[3],并与预先分配的Hash进行比较,如果匹配成功,则证明是主用户。由于FCC的NPRM03-322要求认知用户频谱的机会试用不应该对现有系统做任何更改,因此这种方法不适用于认知用户检测主用户。(3)高效的SVDD算法[4],利用认知无线电网络中的合法用户数据训练单类分类器,将待测样本输入训练后的分类器即可实现PUE攻击检测,但该方法的虚警概率较高。

上述几种常用的检测方法都存在一些缺陷,故本文从辐射源识别的角度分析。虽然PUE攻击用户模仿主用户信号的调制信息甚至扩频信息,但PUE信号和主用户信号毕竟不是从同一个辐射源发射出来的,所以其信号波形也不会完全相同。辐射源信息会隐藏调制在发射信号波形中,即为寄生调制。这种寄生调制是由辐射源的电子器件造成的,可作为辐射源的指纹特征[5-7]。因此,采用辐射源识别的方法可以区分主用户信号和PUE攻击用户信号。

本文提出一种新的复合型加权分形维数的方法识别主用户和PUE攻击用户。辐射源的各种指纹特征中,数字码元包络特征是比较稳定和易于提取的,符合认知网络中快速检测PUE攻击用户的要求。不同辐射源提取的包络信号虽然相似,但却具有不同的寄生调制信息。本文对包络信号的脉内信号进行提取,研究其波形的分形盒维数和信息维数特征,定义了复合型加权分形维数来作为识别主用户和攻击用户的指示

到稿日期:2014-09-03 返修日期:2014-11-21 本文受国家自然科学青年基金项目:面向认知Ad hoc网络多信道路由的信任管理研究(61301091),陕西省教育厅项目(14JK1668)资助。

田红园(1989—),女,硕士生,主要研究方向为现代信号处理及应用,E-mail:396384231@qq.com;姚引娣(1978—),女,硕士,讲师,主要研究方向为嵌入式系统;郑文秀(1979—),女,博士,副教授,主要研究方向为信息检测;王宏伟 男,博士,讲师,主要研究方向为信号处理。

参数。本文第2节是基于MATLAB的仿真实验，通过包络信号的分形特征来区别不同的信号，进而区分不同的辐射源用户。

1 问题分析和算法描述

不同的通信辐射源个体因其内部电子元件的差异，即使采用相同的调制方式和调制参数，其发射出来的信号也会存在个体差异，这种差异在信号的包络信息中比较明显。信号的包络信息包含脉内信息和上升沿、下降沿信息[8]。由于上升沿、下降沿的信息不易提取且易受其他调制信息的影响，因此本文主要研究不同个体用户的数字码元的脉内指纹特征，对脉内波形进行分形运算来辨别主用户和PUE攻击用户。下面将介绍如何提取这种无意调制特性和区分个体用户的具体算法。

1.1 辐射源指纹信息预处理方法

下面介绍对包络脉内信息的提取方法，其预处理方法模块如图1所示。

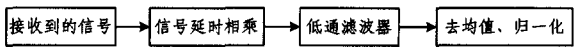


图1 预处理框图

假设接收信号的载波信息未知，本文采用信号延时相乘[8]后经过低通滤波器的方法来提取包络信息。以BPSK调制信号为例，设接收机接收到的信号为 $x(t)$，其表达式为：

$$x(t)=A\cdot\cos(\omega_c t+\varphi_n) \tag{1}$$

式中，

$$\varphi_n=\begin{cases}0, & \text{发送 0 时}\\ \pi, & \text{发送 1 时}\end{cases} \tag{2}$$

然后对 $x(t)$ 延时相乘[9]提取包络信息，延时相乘后的信号表示为：

$$x'(t)=x(x)\cdot x(t+\tau) \tag{3}$$

其展开式为：

$$x'=A^2\cdot\{\cos[2(\omega_c t+\varphi_n)+\omega_c\tau]+\cos(\omega_c\tau)\} \tag{4}$$

式中，τ 为码元延迟时间。

经过低通滤波器滤除高频分量，得到基带包络信号 $xl(t)$，其表达式为：

$$xl(t)=A^2\cdot\cos(\omega_c t) \tag{5}$$

为了提取包络的脉内信息，先对信号进行去均值并归一化，然后提取脉内信号，去均值公式为：

$$xm(t')=xl(t')-\frac{1}{\tau\cdot M}\cdot\sum_{i=t_1}^{t_\tau\cdot M}xl(t') \tag{6}$$

其中，$t'=t_1,t_2,t_3,\cdots,t_{\tau\cdot M},\tau$ 为码元延迟时间，M 为码元。

计算 $xm(t')$ 的方差 σ^2，因此功率归一化后的信号为：

$$g(t)=\frac{xm(t')}{\sigma} \tag{7}$$

1.2 分形维数定义

分形维数能定量描述信号波形的复杂度和不规则度，其中盒维数反映了信号波形的几何尺寸大小，信息维数反映了信号波形的分布情况。因此，本文选用盒维数和信息维数作为信号波形复杂度和不规则度的分形特征参数。

定义1(盒维数) 设 A 是一个紧集，是非负实数，若存在 $D_b=\lim\limits_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln N(A,\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)}$，则称 D_b 是集合 A 的分形维数，这种维数称为盒维数[10-12]。

辐射源信号的盒维数计算方法为：先对辐射源信号进行预处理，预处理后的信号序列为 $\{g(i),i=1,2,\cdots,N\}$，其中 N 为预处理后的一个码元信号序列的长度。根据定义，采用如下方法计算盒维数，将信号序列 $g(i)$ 置于单位正方形内，横坐标的最小间隔为 $q=1/N$，令 $d(i)=|g(i)-g(i+1)|$，则：

$$N(q)=N+\frac{[\sum_{i=1}^{N-1}d(i)]}{q} \tag{8}$$

盒维数计算公式为：

$$D_b=-\frac{\ln N(q)}{\ln q} \tag{9}$$

定义2(信息维数) 设 X 是 R^n 的集合，$\{A(i),i=1,2,\cdots,N\}$ 是 X 的一个有限 δ-覆盖，令 P_i 表示集合 X 的元素落在集合 A_i 的概率，并且

$$P_i=\frac{N(X)_i}{N(X\cap A_i)},i=1,2,\cdots,N \tag{10}$$

其中，$N(X)_i$ 与 $N(X\cap A_i)$ 分别表示元素的个数[10-12]。

令信息熵为

$$g_i=-\sum_{i=1}^{N}P_i\log P_i \tag{11}$$

如果信息熵满足关系 $S_i(\delta)\sim\log\delta^D$，则 X 的信息维数定义为：

$$D_i=-\lim_{\delta\to 0}\frac{g_i(\delta)}{\ln\delta} \tag{12}$$

辐射源信号信息维数的计算方法如下：先对信号进行预处理，预处理后的一个码元信号为 $\{g(i),i=1,2,\cdots,N\}$，N 为一个码元序列长度，根据上述定义计算其信息维数为：

$$D_i=\sum_{i=1}^{N-1}P_i\ln(1/P_i) \tag{13}$$

1.3 复合型加权分形维数

盒维数反映的是信号波形的尺寸大小，信息维数表征的是信号波形的分布情况，两者不能同时反映尺寸和分布情况，因此可以寻求一种新的方法将波形的尺寸大小和分布疏密都反映出来，以准确地区分波形的微小差异，进而区分不同的个体用户。

通过上述分形盒维数和信息维数的介绍，可以知道盒维数和信息维数表征的是信号波形的不同特征。本节将信息维数作为一种权值加权到盒维数上，以表征信号波形的尺寸大小和分布疏密两种特征。由于本文是对每个码元脉内信号进行盒维数和信息维数的计算，采用复合型加权分形维数将每个码元盒维数与信息维数相乘后的值作为确定分形特征的参数，来识别不同的辐射源用户。

定义加权维数如下：

$$D_m=D_{b_m}\cdot D_{i_m},m=1,2,\cdots,N \tag{14}$$

其具体表达式为：

$$D_m=\frac{\ln N}{\ln q}\cdot\sum_{i=1}^{N-1}P_i\ln P_i\cdot(\ln d_i-\ln q),m=1,2,\cdots,N \tag{15}$$

其中，N 为码元个数，$d_i=|g(i)-g(i+1)|$。

由于本文是对多个码元的脉内特征进行分析，因此同一个体用户发射信号的不同码元脉内信息有相似分形特征，其不同码元的脉内分形加权维数会在比较小的范围内变化；而不同辐射源的信号的脉内分形加权维数会有比较大的差异。由于 D_m 是不同码元的分形加权维数，本文选用 D_m 的均值和方差作为区分主用户和PUE攻击用户的特征参数，其均值公式和方差公式分别为：

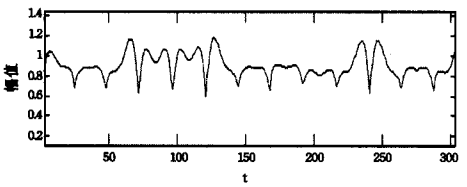
$$D=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}D_m \tag{16}$$

$$S^2=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}(D_m-D)^2 \tag{17}$$

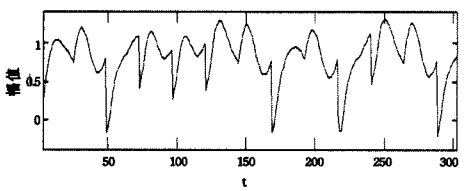
2 实验结果与分析

本文结合 MATLAB 仿真实验，对理论算法进行分析验证。仿真实验也分为预处理和加权分形维数计算两个部分。

预处理信号为载波频率 $f_c=2000$Hz、码元速率 $f_b=300$Hz、采样速率 $f_s=5*(f_c+f_b)$的 BPSK 信号，噪声为高斯色噪声，信噪比为信号带内信噪比。将原始信号经过 FIR 滤波器后的信号作为主用户信号；将原始信号经过于 IIR 滤波器后的信号作为 PUE 攻击信号。分别对主用户信号和 PUE 攻击用户信号进行相同的预处理过程，得到各自的包络脉内信号，其中预处理过程包括信号的延时相乘、低通滤波器和去均值并归一化过程。图 2 示出信噪比为 50dB 时，主用户和 PUE 攻击用户预处理后的信号包络波形。



(a)主用户预处理后的信号波形



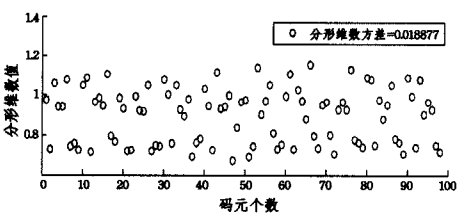
(b)PUE 攻击用户预处理后的信号波形

横轴时间单位为 s

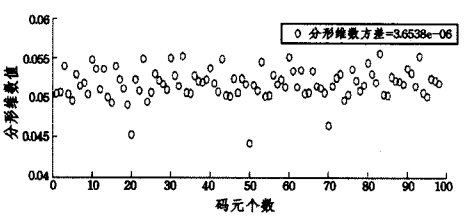
图 2 主用户与攻击用户预处理后的信号波形

2.1 原理仿真

由图 2 可见，主用户和 PUE 攻击用户预处理后的波形图虽然相似，但却具有一些细微的差异。在本文的分形加权维数中将看到这些波动差异的区别。按照式(14)和式(15)进行计算，得出信噪比为 50dB 时，主用户和 PUE 攻击用户的加权分形维数图，如图 3 所示。



(a)主用户加权分形维数



(b)PUE 攻击用户加权分形维数

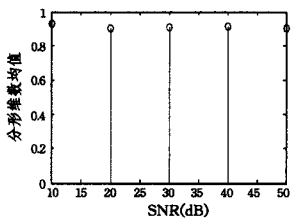
图 3 主用户与攻击用户的加权分形维数

从图 3 中容易看出两个辐射源在信噪比为 50dB 时的加权分形维数的差异：主用户不同码元的维数在 0.6～1.2 之间，维数方差为 0.018877；PUE 攻击用户不同码元的维数在 0.04～0.06 之间，维数方差为 3.6538×10^{-6}。

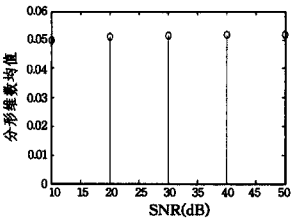
2.2 性能仿真

2.2.1 不同信噪比的性能分析

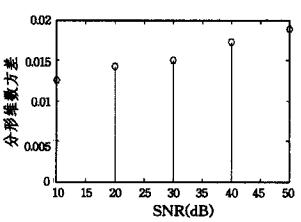
如上面实验，在 50dB 信噪比时，不同用户的分形加权维数具有明显区别，但该分形加权维数在不同信噪比下是否具有稳定性需要做进一步研究。图 4 分别为主用户和 PUE 攻击用户在不同信噪比下的分形维数均值和方差的对比图。



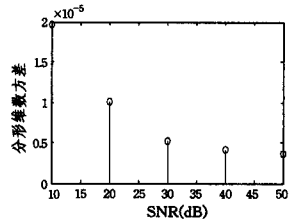
(a)主用户不同信噪比均值



(b)PUE 攻击用户不同信噪比均值



(c)主用户不同信噪比方差



(d)PUE 攻击用户不同信噪比方差

图 4 主用户与攻击用户不同信噪比的加权分形维数

从图 4 可以看到，同一个用户的分形加权维数在不同信噪比下具有稳定性，主用户的加权分形维数均值稳定在0.85～0.95 之间，方差稳定在 0.01～0.02 之间；PUE 攻击用户的加权分形维数均值稳定在 0.045～0.055 之间，方差稳定在 0～2×20^{-6}之间。仿真实验充分说明了本文提出的基于分形加权维数的 PUE 攻击检测方法的有效性。

2.2.2 同类算法的性能分析

与本文方法类似的一种电台指纹特征识别方法利用小波变换和聚类分析对电台开机或通信模式切换时产生的瞬态信号进行分析，其识别结果如图 5 所示[13]。

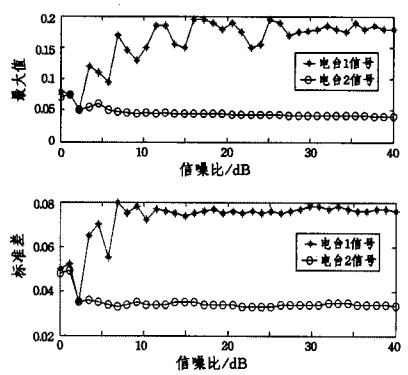


图 5 利用小波及聚类分析不同电台信号

该方法能够有效地区分 10dB 以上的电台信号，但是在低信噪比的情况下区分两个电台信号比较困难。而本文提出的分形维数算法在低信噪比和高信噪比的情况下都能很好地区分两个不同用户信号，并且具有稳定性。

结束语 本文结合辐射源个体的自身差异特性提出了一

(下转第 190 页)

Wang Shan, Wang Hui-ju, Qin Xiong-pai, et al. Architecting Big Data: Challenges, Studies and Forecasts[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(10): 1741-1752

[17] Karun K A, Chitharanjan K. Locality Sensitive Hashing based Incremental Clustering for Creating Affinity Groups in Hadoop-HDFS-An Infrastructure Extension[C]// 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies(ICCPCT'2013). 2013

[18] Abouzeid A, Bajda-Pawlikowski K, Abadi D J, et al. HadoopDB: An architec-tural hybrid of MapReduce and DBMS technologies for analytical workloads[C]// Proceedings of the 35th International Conference on Very Large Data Bases(VLDB'09). Lyon, France, 2009: 733-743

[19] Fusco E G, Pelc A. Distributed tree comparison with nodes of limited memory[J]. Networks, 2012, 60(4): 235-244

[20] Dehne F, Kong Q, Rau-Chaplin A. A distributed tree data structure for real time OLAP on cloud architectures[C]// 2013 IEEE International Conference on Big Data. 2013: 499-505

[21] Taylor R C. An overview of the Hadoop/MapReduce/HBase framework and its current applications in bioinformatics[C]// Proceeding of the 11th Annual Bioinformatics Open Source Conference(BOSC). 2010

[22] Sun Jian-ling, Jin Qiang. Scalable RDF store based on HBase and MapReduce[C]// 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE). 2010: 633-636

[23] Nishimura S, Das S, Agrawal D, et al. MD-HBase: A Scalable Multi-dimensional Data Infrastructure for Location Aware Services[C]// 2011 12th IEEE International Conference on Mobile Data Management(MDM). 2011: 7-16

(上接第 153 页)

种新的基于分形加权维数的方法来识别主用户信号和 PUE 攻击用户信号。由于用户的指纹特征通常隐藏在包络信息中，因此文中通过对接收到的用户信号进行脉内包络信号的提取，进而研究其分形特征，给出了切实可行的识别方案。

实验环节通过 MATLAB 对理论算法进行验证，证实了主用户和 PUE 攻击用户的辐射源指纹特征寄生调制在包络信息中，并且复合型加权分形维数对用户的指纹特征的识别具有可靠性。因此，本文对 PUE 攻击检测问题的研究将为未来认知网络提供更好的安全保障，具有深远的研究意义，是认知网络安全的重要内容。

参 考 文 献

[1] 肖天梅. 认知无线电 PUE 攻击下次用户性能分析[J]. 通信技术, 2013, 46(4): 22-27
Xiao Tian-mei. the performance analysis of Secondary user by Cognitive radio PUE attack [J]. Communications Technology, 2013, 46(4): 22-27

[2] 逄德明, 胡罡, 徐明. 基于能量指纹匹配的无线认知网络仿冒主用户攻击检测[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 28-33
Pang De-ming, Hu Gang, Xu Ming. The Cognitive wireless network counterfeit primary user attack detection of the energy fingerprints matching[J]. Computer Science, 2011, 38(3): 28-33

[3] 薛楠, 周贤伟, 辛晓瑜, 等. 一种解决认知无线电网络模仿主用户攻击问题的方案[J]. 计算机科学, 2009, 36(8): 45-48
Xue Nan, Zhou Xian-wei, Xin Xiao-yu, et al. A solution of cognitive radio network imitating the primary user attack[J]. Computer Science, 2009, 36(8): 45-48

[4] 赵陆文, 缪志敏, 周志杰. 基于 SVDD 的认知无线电网络仿冒主用户检测技术[J]. 信号处理, 2010, 26(7): 974-979
Zhao Lu-wen, Miao Zhi-min, Zhou Zhi-jie. The cognitive radio network counterfeit primary user detection technology based on SVDD [J]. The Signal Processing, 2010, 26(7): 974-979

[5] 任黎丽. 辐射源指纹识别与细微特征提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012
Ren Li-li. The study of Radiation source fingerprint identification and microscopic feature extraction method [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012

[6] 徐书华. 基于信号指纹的通信辐射源个体识别技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007
Xu Shu-hua. The study of Communication emitter individual identification technology based on the signal fingerprint [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007

[7] 余志斌. 基于脉内特征的雷达辐射源信号识别研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010
Yu Zhi-bin. The Study of radar emitter signal recognition based on the Intra-pulse characteristics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010

[8] 林震鹊, 姜秋喜, 黄建冲. 雷达脉冲信号上升/下降沿测量影响因素[J]. 四川兵工学报, 2010(1): 117-120
Lin Zhen-que, Jiang Qiu-xi, Huang Jian-chong. The measurement factors of the radar pulse signal increase/decrease edge [J]. Journal of Sichuan Armaments Factories, 2010(1): 117-120

[9] 郑文秀. MSK 信号的参数估计[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(2): 23-27
Zheng Wen-xiu. MSK signal parameter estimation[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 23-27

[10] 张葛祥. 雷达辐射源信号智能识别方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005
Zhang Ge-xiang. The study of Radar emitter signal intelligent identification method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005

[11] 唐智灵. 通信辐射源非线性个体识别方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013
Kang Zhi-ling. The study of Nonlinear individual identification method about communication source[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2013

[12] 周斌. 信号细微特征提取及识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
Zhou Bin. The Study of signal fine feature extraction and recognition technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011

[13] 王超, 刘涛, 杜利平. 一种新的认知无线电主用户信号识别方法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(6): 1119-1123
Wang Chao, Liu Tao, Du Li-ping. A new method for cognitive radio users signal recognition[J]. Waves Science Journals, 2009, 24(6): 1119-1123