

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.02.007

引用格式:张剑,周兴建,卢建川. 基于 Takagi-Sugeno-Kang 模糊集合的噪声干扰检测方法[J]. 电讯技术,2016,56(2):151-155. [ZHANG Jian, ZHOU Xingjian, LU Jianchuan. A Takagi-Sugeno-Kang fuzzy zpproach to noise jamming detection[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(2):151-155.]

基于 Takagi-Sugeno-Kang 模糊集合的噪声干扰检测方法*

张 剑**,周兴建,卢建川

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:为识别混合在接收机热噪声中的人为噪声干扰信号,提出了基于 TSK (Takagi-Sugeno-Kang)模糊集合的干扰检测方法。首先将无干扰环境下信道热噪声数据和有人为噪声干扰下的混合噪声数据组合成训练数据序列,利用训练序列对 TSK 模糊集合模型进行训练,调节模型中规则的多项式系数,使 TSK 模糊模型对接收信号中的噪声特性与干扰判决之间建立确定函数关系,实现对噪声干扰的检测。通信电台的实验验证表明:尽管接收机的自动增益控制将外部噪声干扰缩小到与本机噪声相当水平,所提方法仍能有效检测出信道中是否有人为噪声干扰存在。

关键词:干扰检测;Takagi-Sugeno-Kang 模糊集合;噪声干扰

中图分类号:TN911.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)02-0151-05

A Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Approach to Noise Jamming Detection

ZHANG Jian,ZHOU Xingjian,LU Jianchuan

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: This paper proposes a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy approach to detect if there is artificial noise mixed in the radio channel. The TSK fuzzy system needs to build a training sequence by sampling the signal with and without artificial noise separately and arranging it properly. The training sequence makes the TSK fuzzy system study the character of noise from different generating sources by adjusting the polynomial coefficients of fuzzy rules and enables it to detect the artificial noise interference. The test of the approach in a radio demonstrates that the proposed method can detect the artificial noise correctly even the automatic gain control of radio has reduced its power to the same level as that of thermal noise.

Key words: interference detection; Takagi-Sugeno-Kang fuzzy set; noise jamming

1 引 言

随着现代无线通信技术的发展,无线通信设备的应用扩展到人类活动的各个方面,发挥着越来越重要的作用。各种通信系统的增加及无线频谱带宽的扩展导致无线通信环境异常复杂,各种各样的电

子干扰给无线通信带来了严重的影响。针对不同的干扰采用相应的抗干扰方法是提高通信系统性能和频谱利用率的有效途径,而干扰检测是有效实现通信系统抗干扰能力的前提和关键。

干扰检测在军事抗干扰通信领域中有广泛的研

* 收稿日期:2015-09-18;修回日期:2016-01-04 Received date:2015-09-18;Revised date:2016-01-04
基金项目:国防重点实验室基金项目(9140C020203150C02005)
Foundation Item:The National Defense Key Laboratory Fund(9140C020203150C02005)
** 通信作者:swordisme@163.com Corresponding author:swordisme@163.com

究^[1-2],而认知无线电技术的发展进一步推动了干扰检测技术的研究^[3-11]。能量检测方法是 Urkowitz 在 20 世纪 60 年代提出的,它根据接收信号的能量或功率大小来判断信号是否存在^[3]。由于实现方法非常简单,几十年来,能量检测获得了广泛的应用^[4-7]。但能量检测法也存在明显的局限性,绝对的判决门限受噪声不确定性的影响较大,比较难确定^[5,7]。此外,在低信噪比情况下,信号淹没在噪声中,用能量检测法检测概率太低。在通信、雷达等人为设计系统中,对信号进行的调制、扫描、采样、数字编码等操作使信号的统计特性具有一定的周期性,利用这种周期性设计的检测方法叫做循环平稳特征检测法^[8-9]。由于周期平稳过程特征对未知噪声变量具有鲁棒性,这种方法在区分噪声方面优于能量检测方法,但由于循环谱把信号检测从一维平面扩展到二维平面,其计算复杂度远远大于能量检测。文献[9]提出了一种基于双门限的能量检测加循环平稳特征联合检测算法,利用双门限的能量检测法进行粗检,利用循环平稳特征进行进一步检测,可以降低系统复杂度。基于信号的协方差矩阵特性的干扰检测方法也可以有效克服能量检测方法的局限性^[11-12]。当干扰信号为人为产生的噪声干扰信号时,由于信号不具备周期平稳特性,无法使用上述提出的各种基于循环平稳特征检测方法,并且由于接收机的自动增益控制以及远近效应的影响,干扰噪声与接收机热噪声大小相当地混合在一起,绝对信号能量大小的检测也无法判决。

根据文献[13],具有内在动力机制的任何随机系统基本都可以用混沌系统来研究和特征描述。基于这种理论,本文利用状态空间重构的方法对比分析了接收机本地噪声和人为干扰噪声的特征。特征分析表明,用确定函数产生的伪随机序列作为人为干扰噪声信号存在明显的奇异吸引子,利用基于 TSK(Takagi-Sugeno-Kang)模糊集合进行模式训练与检测可以有效检测这种人为干扰信号的有无^[14]。对实际采样数据的检测验证表明检测方法准确有效,尤其适合分布式通信系统中的人为噪声干扰检测,由于远近效应的影响,有的通信节点所接收的干扰信号并不强,无法从直接的频谱扫描中发现。

2 状态空间重构下的干扰噪声特征

对于人为噪声干扰信号的时频域分析可以看

出,从时域相关性和频谱特性中是无法区分接收信号中是否存在人为噪声干扰信号。混沌理论研究表明^[13],用确定函数产生的伪随机噪声干扰序列,尽管信号特性和噪声相似,信号的产生总是源于一个确定函数,可以选择合适维度的状态空间重构信号,实现对这种人为噪声干扰信号的特征描述。对于通信接收机中频采样信号,可以用一组实数序列 $\{x_i\}$ ($i=1,2,\cdots,N$)表示。以采样间隔为最小延迟时间,该采样序列可以嵌入到 d 维的状态空间中:

$$\mathbf{X}_i = [x_i, x_{i-1}, \cdots, x_{i-d}]^T. \tag{1}$$

图 1 对接收机中单纯热噪声信号和存在人为噪声干扰的混合信号进行了时域和频域对比分析。

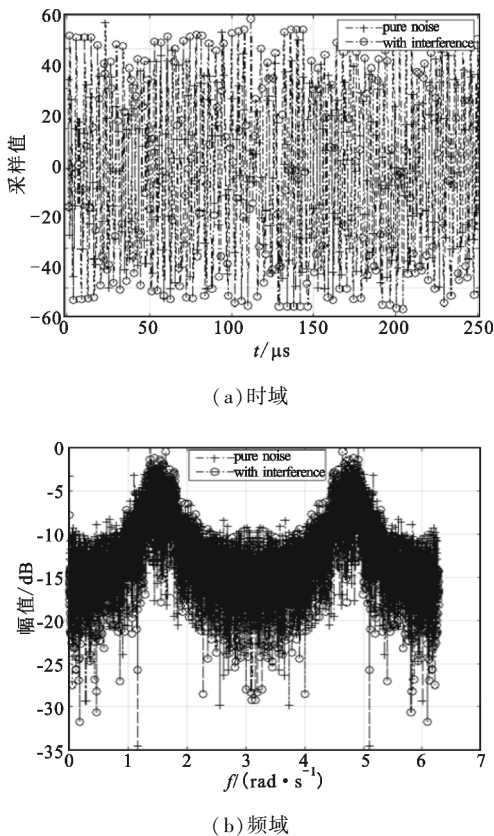
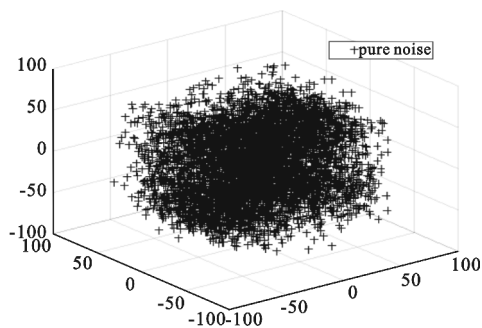
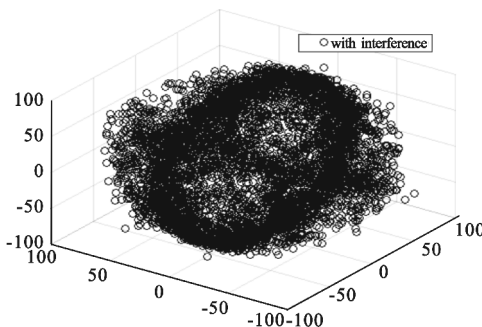


图 1 时域和频域中信号分析
Fig. 1 Signal analysis in time-frequency domain

从图 1 中可以看出,有无噪声干扰的信号在时频域中完全重叠,没有可区分的特征。因此,从时域和频域是无法判决信号中是否存在噪声干扰信号。图 2 对这两种信号采用公式(1)的方法进行状态空间重构。对不同维数的尝试比较后,当采用 9 维状态空间重构时,选取其第 1、4、9 维数据构成三维坐标,可以比较明显地实现对多维状态空间信号的采样分析。



(a) 纯热噪声三维状态空间图



(b) 干扰叠加热噪声三维状态空间图

图 2 状态空间中信号分析
Fig.2 Signal analysis in state-space

从图 2 中可以看出,单纯热噪声信号的轨迹基本扩散到整个三维空间中,其分布轨迹和密度没有明显的规律,表明这种信号的产生机制非常复杂,无法观察到主导因素的奇异吸引子。对于叠加了人为噪声干扰的混合信号,其状态空间明显存在一个形状如字母 Q 的奇异吸引子,表明混合信号中存在一个产生机制相对单一确定的信号分量。因此,是否存在人为噪声干扰可以通过观测状态空间中的奇异吸引子予以判决。状态空间信号特征可以通过神经网络、自适应滤波、模糊系统识别等方法识别处理。本文之所以选择 TSK 模糊模型处理方法是因为 TSK 模糊模型使用多项式代替了传统模糊集合模型中使用模糊术语的描述^[14],使得其不仅具有了模糊集合引入的非线性描述特性,更关键的是其计算变得非常有效,比较适合工程应用实现。

3 TSK 模糊集合模型

TSK 模糊模型实际上可以处理多维的复杂系统建模,而本系统对噪声干扰信号在状态空间上进行的特征判别只需要在 3 个维度上进行处理,并且本文的研究重点是 TSK 模糊模型的应用而非模型本身。因此,此处仅描述三维 TSK 模糊模型的结

构。典型的三维 TSK 模糊集合模型包含如下的 IF-THEN 形式的规则:

$$\begin{aligned} R^i: & \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i(\theta_1^i), x_2 \text{ is } A_2^i(\theta_2^i), x_3 \text{ is } A_3^i(\theta_3^i) \\ \text{then } h^i = & f_i(x_1, x_2, x_3; \mathbf{a}^i) = a_0^i + a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + a_3^i x_3. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, \dots, C$, C 为一个 TSK 模型规则的总数目; $A^i(\theta^i)$ 是子集 i 的隶属函数描述式; θ^i 为隶属函数的变量; $\mathbf{a}^i = (a_0^i, a_1^i, a_2^i, a_3^i)$ 是多项式的系数。整个 TSK 模糊集合模型的输出为

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^C h^i \mathbf{w}^i}{\sum_{i=1}^C \mathbf{w}^i}. \quad (3)$$

式中: h^i 是第 i 个子集的输出; $\mathbf{w}^i$ 是第 i 个隶属函数子集的势,势的计算为

$$\mathbf{w}^i = e^{-[(x-m_i)^2/\sigma_i^2]}. \quad (4)$$

此处,隶属函数选择为高斯型隶属函数^[14],其中 m_i 是高斯型隶属函数的均值, σ_i 是高斯型隶属函数的方差。一个 TSK 模型需要确定前端隶属函数的参数 θ^i 和后端多项式系数 $\mathbf{a}^i$ 。

4 基于 TSK 模糊集合的干扰检测

基于 TSK 模糊集合的干扰检测包括两部分处理。首先,TSK 模糊集合模型需要用训练数据序列对模型的参数进行反复训练,使模糊模型能正确反映训练序列中输入数据段和有无噪声干扰判决结论的对应关系,这种对应关系可以看成由这样 $\{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_k, y_k)\}$ 一系列输入输出数据对来反映,其中 $\mathbf{x}_k$ 为采样序列进行状态空间重构后的三维归一化向量, y_k 为向量 $\mathbf{x}_k$ 对应的判决结论,当 $\mathbf{x}_k$ 由无干扰的数据序列构成时, y_k 取值为 -1; 当 $\mathbf{x}_k$ 由包含人为噪声干扰的数据序列构成时, y_k 取值为 1。在 TSK 模糊集合模型的训练学习中,系统的结构和参数逐渐稳定,使模型能在输入输出关系上正确反映系统对有无人为噪声干扰的判决,则检测系统可以开始进行非训练数据下的噪声干扰检测。下面给出整个算法的实现步骤。

(1) 分别采集无干扰时接收机中频信号与有人为噪声干扰下的信号,根据式(1),构建状态空间下的向量序列 $\mathbf{x}_k$ 。

(2) 构建取值为 $[1, -1]$ 的随机序列 y_k , 且 y_k 序列中持续 N 个长度的取值相同; 构建训练序列 $(\mathbf{x}_k, y_k)$ 时, 当 N 个 y_k 值为 1 时, $\mathbf{x}_k$ 从有噪声干扰的向量序列中取连续 N 个向量值; 当 N 个 y_k 值为 -1 时, $\mathbf{x}_k$ 从无噪声干扰的向量序列中取连续 N 个向量值。

(3)初始化 TSK 模型^[14],对于每个模糊规则,其隶属函数的初始参数固定为 $\bar{m}_i = \mathbf{x}_k, \sigma_i = 1$ 。

(4)用训练序列来训练优化式(2)中的多项式系数 $\mathbf{a}^i$,使用的计算式包括式(2)~(4)及下式:

$$\mathbf{a}^i(t+1) = \mathbf{a}^i(t) + \eta [\hat{y}_k - y_k] \mathbf{x}_k \mathbf{w}^i. \tag{5}$$

式中: η 是学习因子。当系统误差足够小时,转到下一步。

(5)用式(2)~(4)来估计当前接收信道中是否存在人为干扰。

5 实验验证

为了验证算法的有效性,实验中使用了一台带宽为14 MHz的通用电台和 SMU200A 信号发生器,选择信号发生器中的高斯噪声选项产生 14 MHz 的宽带噪声干扰。实验验证中通用电台对两种通信环境条件下的信号进行分析检测,一是无噪声干扰输入下,通用电台采集仅有信道噪声及环境噪声的中频信号样本;二是从电台射频端口输入信号发生器产生的宽带噪声信号,采集干扰下的中频接收信号。由于电台自动增益控制的影响,两种通信环境下的采样数据如图 1 所示,两种状态的信号在时域和频域上基本无法区分。在 TSK 模糊集合模型的实验验证中,训练序列构建时有干扰信号、无干扰信号的持续长度 N 取值为 80,学习因子 η 取值为 0.1。TSK 模糊集合模型完成训练学习后,对未知通信环境下的输入信号判别结果如图 3 所示。

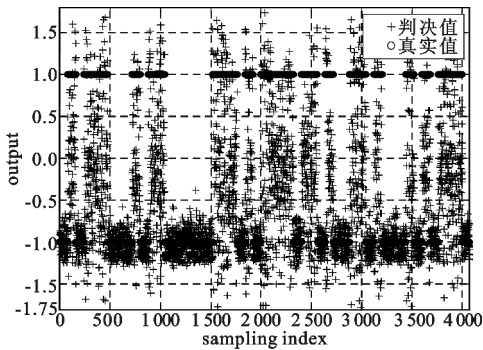


图3 TSK 系统的干扰检测实验性能

Fig.3 Test performance of noise interference detection of TSK fussy system

从图 3 可以看出,如果以 0 值为判决门限,对于每个样点进行的检测判决结果与真实值并非完全吻合,某些离散样点存在错误判决,但如果持续观察一段有干扰信号的判决,则其总体判决趋势与真实值是非常一致的。为了提高判定的准确性,对 TSK 模

糊集合系统的检测输出进行如下的积累平均处理:

$$\bar{y} = \frac{2}{K} \sum_{i=1}^K \hat{y}_i + y_s. \tag{5}$$

式中: $\bar{y}$ 为 K 个输出的积累平均值; $\hat{y}$ 为单个样点的检测输出; y_s 为检测偏移修正。实验中 K 取值为 80, y_s 取值为 1。积累平均处理后的实验测试结果如图 4 所示。

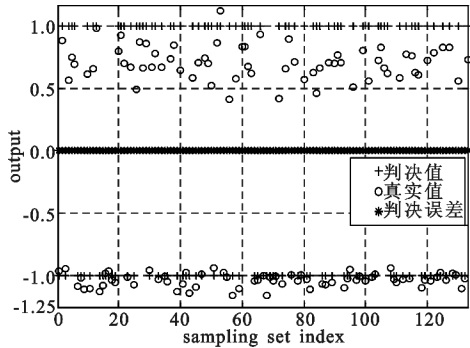


图4 积累平均后的干扰检测实验性能

Fig.4 Test performance of noise interference detection after average

从图 4 可以看出,经过积累平均和偏移修正后,以 0 为判决门限时,每次检测的判决值与真实值基本完全一致。因此,只要对信号持续观测一段时间,基于 TSK 模糊集合的干扰检测系统可以准确判决通信环境中是否存在这种特定的人为噪声干扰。

6 结 论

确定函数产生的人为伪随机噪声干扰信号本身不具备周期相关性,无法从循环统计特性上检测;并且由于远近效应和接收信道自动增益控制,接收机无法从时域和频域上判决通信环境中是否存在人为噪声干扰信号。但从混沌理论看来,这种人为噪声干扰信号由确定的函数产生,存在内在的动力产生机制。因此,其状态空间的分布与其他噪声是存在区别的。本文利用这个特性,提出了基于 TSK 模糊集合的干扰检测方法:TSK 模糊集合学习噪声状态空间的分布,判决采样信号中是否存在属于人为噪声的状态空间分布。通信电台的干扰检测实验表明:该方法对特定人为噪声干扰信号的检测准确有效。需要指出的是,当产生人为噪声的特定函数改变后,检测系统需要对新干扰进行重新学习才能再次进行干扰检测。

参考文献:

[1] BALAEI A T, DEMPSTER R G. A statistical inference

- technique for GPS interference detection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(4): 1499–1511.
- [2] JIANG L, HOU J, GUO J X. Interference detection for multi-band frequency hopping UWB communications [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Signal Processing Systems. Dalian: IEEE, 2010: 656–660.
- [3] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4): 523–531.
- [4] LIN W, ZHANG Q Y. A design of energy detector in cognitive radio [C]//Proceedings of 2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems. Guangzhou: IEEE, 2008: 213–217.
- [5] TANDRA R, SAHAIA. SNR walls for signal detection [J]. IEEE Journal of Selected Topic in Signal Processing, 2008, 2(1): 4–16.
- [6] 潘建国, 翟旭平. 基于能量检测的频谱感知方法[J]. 上海大学学报, 2009, 15(1): 54–59.
PAN Jianguo, ZHAI Xuping. Spectrum sensing in cognitive radio based on energy detection [J]. Journal of Shanghai University, 2009, 15(1): 54–59. (in Chinese)
- [7] 刘鑫, 谭学治, 徐贵森. 噪声不确定下认知无线电能量检测性能的分析[J]. 四川大学学报, 2011, 43(6): 168–172.
LIU Xin, TAN Xuezhi, XU Guisen. Performance analysis of energy detection for cognitive radio under noise uncertainty [J]. Journal of Sichuan University, 2011, 43(6): 168–172. (in Chinese)
- [8] GARDNER W A. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1991, 8(2): 14–36.
- [9] 张昊晔, 包志华, 张士兵. 基于循环谱能量的自适应频谱检测算法[J]. 通信学报, 2011, 32(11): 95–103.
ZHANG Haoye, BAO Zhihua, ZHANG Shibing. Adaptive spectrum sensing algorithm based on cyclostationary spectrum energy [J]. Journal on Communications, 2011, 32(11): 95–103. (in Chinese)
- [10] 刘小莉, 朱琦. 基于能量-循环平稳特征的联合频谱检测方法[J]. 南京邮电大学学报, 2010, 30(3): 189–192.
LIU Xiaoli, ZHU Qi. Joint spectrum sensing method based on energy and cyclostationary feature [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2010, 30(3): 189–192. (in Chinese)
- [11] ZENG Y, LIANG Y C. Spectrum-sensing algorithms for cognitive radio based on statistical covariances [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1804–1815.
- [12] ZHENG Y, ZHANG Q, WU S. Robust spectrum sensing in cognitive radio [C]//Proceedings of 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor & Mobile Radio Communications Workshops. Istanbul, Turkey: IEEE, 2010: 1–8.
- [13] 黄润生. 混沌及其应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
HUANG Runsheng. Chaotic and its application [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2000. (in Chinese)
- [14] SUGENO M, YASUKAWA T. A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling [J]. IEEE Transactions on Fuzzy System, 1993, 1(1): 7–31.

作者简介:



张 剑(1977—),男,四川眉山人,2008 年于电子科技大学获信号与信息处理专业博士学位,现为高级工程师,主要研究方向为无线通信技术及其信号处理;

ZHANG Jian was born in Meishan, Sichuan Province, in 1977. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2008. He is now a senior engineer. His research concerns signal processing and wireless communications.

Email: swordisme@163.com

周兴建(1970—),男,四川广安人,高级工程师,主要研究方向为无线通信技术;

ZHOU Xingjian was born in Guang'an, Sichuan Province, in 1970. He is now a senior engineer. His research concerns wireless communications.

卢建川(1964—),男,重庆人,1989 年于南京航空航天大学获通信与信息系统专业硕士学位,现为研究员,主要研究方向为无线通信技术。

LU Jianchuan was born in Chongqing, in 1964. He received the M. S. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1989. He is now a senior engineer of professor. His research concerns wireless communications.