

# 电力线噪声信道下基于小波包变换的 OFDM 信号检测

陈宜文<sup>1</sup> 许斌<sup>2</sup> 郝建华<sup>2</sup> 张子博<sup>1</sup>

(1. 装备学院研究生管理大队 北京 101416; 2. 装备学院光电装备系 北京 101416)

**摘要:** 电力线通信中面临低信噪比下信号检测的问题。文中将电力线通信最常见的调制信号—OFDM 信号作为检测对象,分析了小波包变换的良好时频分析特性,根据 OFDM 信号与其他单载波信号具有不同的小波包分解特性,引入利用 MATLAB 平台对该模型进行仿真,仿真结果表明该检测方法可以在低信噪比情况下实现 OFDM 信号的检测,体现了小波包变换应用于电力线通信信号检测中的优越性。

**关键词:** 电力线通信; OFDM 信号检测; 小波包变换; MATLAB

**中图分类号:** TN914.51 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

## OFDM signal detection based on wavelet packet transformation in power line noise channel

Chen Yiwen<sup>1</sup> Xu Bin<sup>2</sup> Hao Jianhua<sup>2</sup> Zhang Zibo<sup>1</sup>

(1. Academy of Equipment Graduate Management Unit, Beijing 101416, China; 2. Academy of Equipment Photoelectric Equipment Department, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of signal detection in low signal-to-noise ratio in power line communication, the paper takes the most common modulation signal in power line communication—OFDM signal as detection object, and analyzes the favorable time-frequency analysis characteristics of wavelet packet transform. In the power line noise channel, according to the different wavelet packet decomposition characteristics of OFDM signal with the other single carrier signal, a detection method of OFDM signal based on wavelet packet transform is proposed by taking maximum value of wavelet packet decomposition coefficient norm two as detection characteristic quantity. The simulation results got by MATLAB show that this detection method can detect the OFDM signal in low signal-to-noise ratio, and reflect advantages of the wavelet packet transform applying to the power line communication.

**Keywords:** power line communication; OFDM signal detection; wavelet packet transform; MATLAB

### 1 引言

在电力线通信环境中,调制方式复杂多样,正交频分复用(OFDM)技术具有良好的抗多径效应和抗干扰能力,是电力线通信最为常用的调制技术之一。目前的大多数文献是在高斯白噪声信道下或者瑞利信道下进行 OFDM 信号的检测。由于电力线通信环境恶劣,噪声组成比较复杂,导致检测信号的信噪比较低。如果在电力线噪声信道下实现对 OFDM 信号的检测,则需要适应电力线通信的低信噪比环境。

小波分析是一种时频分析方法,它结合时域和频域来表征信号的特点;同时,它还是一种多尺度的分析方法,能

够调整时间分辨率和频率分辨率。其中,小波包分解同时对信号的低频部分和高频部分进行分解,并且能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配。

根据中心极限定律,OFDM 信号的高频分量和低频分量差别不大,导致其多尺度小波包分解系数变化不大,这一点与其它单载波信号存在较大区别<sup>[4]</sup>。本文基于小波包变换的良好性能,针对 OFDM 信号的这一特点,实现了电力线噪声信道中较低信噪比条件下 OFDM 信号的检测。

## 2 小波包变换与 OFDM 信号的小波包变换特性分析

小波包分解是比小波分解更为精细的分解方法,与小波分解不同的是,它同时对信号的低频部分和 高频部分进行分解,并且能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配<sup>[5]</sup>。

下面以一个三层的小波包分解为例进行分析:

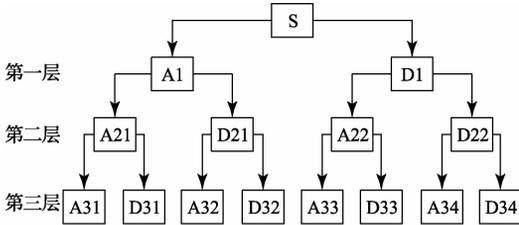


图 1 三层小波包分解原理图

图 1 中, A 代表低频部分, D 代表高频部分, 分解具有以下关系:

$$S = A_{31} + D_{31} + A_{32} + D_{32} + A_{33} + D_{33} + A_{34} + D_{34}$$

由分解图可知, 高频的频率分辨率和低频的频率分辨率是相同的。小波包分解弥补了小波分解随着频率的升高频率分辨率逐渐降低的不足, 实现了分辨率更高的多层次分解。

小波包分解的尺度函数  $\phi(t)$  和小波函数  $\psi(t)$  满足以下关系: 令  $\psi_0(t) = \phi(t)$ ,  $\psi_1(t) = \psi(t)$ , 则

$$\begin{cases} \psi_{2l}(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} h(n) \psi_l(2t - n) \\ \psi_{2l+1}(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} g(n) \psi_l(2t - n) \end{cases} \quad (1)$$

函数  $\{\psi_n\}$  称为关于尺度函数  $\varphi(t)$  的小波包。小波包分解算法如下:

$$\begin{cases} d_j^{2n}(k) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} h_{l-2k} d_{j+1}^n(l) \\ d_j^{2n+1}(k) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} g_{l-2k} d_{j+1}^n(l) \end{cases} \quad (2)$$

信号的重构可由逆向推导得到, 小波包重构公式为:

$$d_{j+1}^n(k) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} h_{k-2l} d_j^{2n}(l) + \sum_{l \in \mathbb{Z}} g_{k-2l} d_j^{2n+1}(l) \quad (3)$$

与传统的小波分解相比, 小波包变换可以对高频部分提供冗余小、疏漏少且更精细的分解, 适用于含中频、高频信息的信号, 能进行更好的时频局部化分析。根据中心极限定律, OFDM 信号的高频分量和低频分量差别不大, 导致其多尺度小波包分解系数变化不大, 这一点与其它单载波信号存在较大区别<sup>[7]</sup>。因此, 本文提出基于小波包变换的 OFDM 信号检测方法。

## 3 基于小波包变换的 OFDM 信号检测模型

利用小波包变换方法检测 OFDM 信号, 需要提取一个检测特征量, 使 OFDM 信号区别于其他单载波信号以及电

力线噪声。文献[1]中提出, 将 OFDM 信号进行两次小波变换后得到的包络是毫无规律的随机结果; 文献[2]中, 取第一层高频分量和第二层高频分量的瞬时幅度, 设定其瞬时幅度的方差与均值四次方之比为特征量, 通过这两个特征值实现 OFDM 信号的检测识别。

本算法选取小波包分解各节点重构信号的二范数为特征值, 即:

$$\|d_m\|_2 = \sum_n d_{m,n}^2 \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

设定小波包分解层数为 5, 则分解产生 32 个重构子信号, 以子信号序号为横轴, 以各重构子信号所对应的分解系数的二范数  $\|d_m\|_2$  即不同分解层数下的特征值大小为纵轴, 各节点重构信号的特征值连接生成特征曲线, 加入电力线噪声的五类信号的小波包分解特征曲线如图 2 所示。

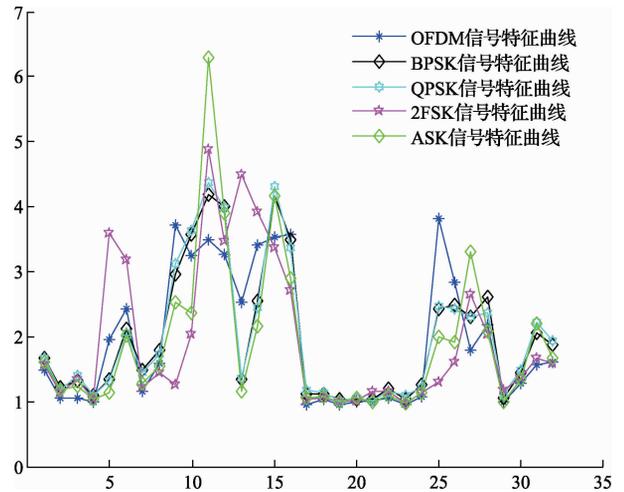


图 2 五类信号小波包分解特征曲线

由图 2 可知, 特征曲线在一定程度上显示了 OFDM 信号在频带范围内高频分量和低频分量相差不大的特点, 但是从特征曲线无法直观地体现 OFDM 信号的特点, 进而无法实现 OFDM 信号的检测。所以, 应当在各重构子信号所对应的特征值  $x_m$  的基础上, 构建一个检测特征量, 并通过该特征量判定待检测信号是否为 OFDM 信号。

由上一节对 OFDM 信号小波包分解的特性分析可知, OFDM 信号的特性曲线的起伏范围不大, 且趋势比较平缓。根据这一特点, 在各节点重构子信号的特征值  $\|d_m\|_2$  的基础上, 设定检测特征量为小波系数二范数的最大值

$$S_2 = \text{Max}(\|d_m\|_2) \quad (5)$$

该检测特征量代表信号各频段分量的小波系数的二范数最大值。因此, 从理论上来说, 当各类信号的功率、频带等条件相同时, OFDM 信号的检测特征量 2 是各类信号中最小的。

将噪声设定为文献[3]中构建的电力线噪声, 为了保证实验结果更加客观可信, 将五类特征信号设定为相同带宽和相同的载波频率, 信号实验参数如表 1 所示。

表 1 各类信号实验参数

信号	实验参数
OFDM 信号	子载波数 $N=64$ ; 循环前缀: $CP=8$ ; 子载波调制方式: QPSK 调制; 符号映射进制 $M=4$ ; 采样率 $f_s=50\text{MHz}$ ; 过采样率 $n_{\text{map}}=5$ ; 带宽 $B=8\text{dB}$ ; 载波频率: $f_c=10\text{MHz}$ ;
BPSK 信号	采样率 $f_s=50\text{MHz}$ ; 过采样率: $n_{\text{map}}=12$ ; 数据率 $f_b=f_s/n_{\text{map}}=4.166$ ; 带宽 $B=2 * f_b=8.33\text{dB}$ ; 载波频率: $f_c=10\text{MHz}$ ;
QPSK 信号	采样率 $f_s=50\text{MHz}$ ; 过采样率: $n_{\text{map}}=6$ ; 数据率 $f_b=f_s/n_{\text{map}}=8.33$ ; 带宽 $B=2 * f_b=8.33\text{dB}$ ; 载波频率: $f_c=10\text{MHz}$ ;
ASK 信号	采样率 $f_s=50\text{MHz}$ ; 过采样率 $n_{\text{map}}=12$ ; 数据率 $f_b=f_s/n_{\text{map}}=4.166$ ; 带宽 $B=2 * f_b=8.33\text{dB}$ ; 载波频率: $f_c=10\text{MHz}$ ;
2FSK 信号	采样率 $f_s=50\text{MHz}$ ; 过采样率: $n_{\text{map}}=19$ ; 数据率 $f_b=f_s/n_{\text{map}}=2.632$ ; 带宽 $B=f_2 - f_1 + 2 * f_b=8.26\text{dB}$ ; 载波频率: $f_1=7\text{MHz}$ ; $f_2=10\text{MHz}$ ;

信噪比的遍历范围设定为  $[-10; 2; 10]$  dB, 图 3 显示了 OFDM 信号、BPSK 信号、QPSK 信号、ASK 信号以及 FSK 信号的检测特征量的值随信噪比的变化曲线:

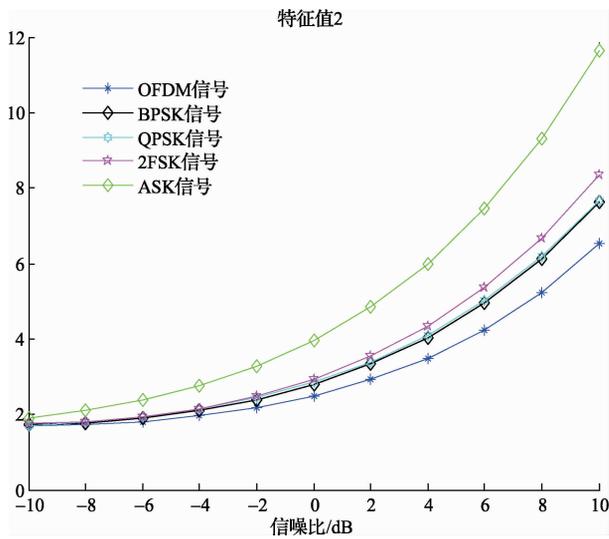


图 3 五类信号检测特征量随信噪比的变化曲线

从图 3 中可知, 当信噪比大于  $-6$  dB 时, OFDM 信号的检测特征量曲线与其他四类信号分离, 并一直保持为五类信号中最小的, 呈现出一定的特征。比较可知, 该检测特征量适合作为检测 OFDM 信号的检测特征量。

本算法的目的是在电力线噪声信道下, 对 OFDM 信号进行检测, 设待检测信号为  $S(t)$ , 设定二元假设检验如下:

$H_0$ :  $S(t)$  为 OFDM 信号;

$H_1$ :  $S(t)$  为单载波调制信号 {BPSK 信号/QPSK 信号/2FSK 信号/ASK 信号}。

基于小波包变换的检测模型流程图如图 4 所示。

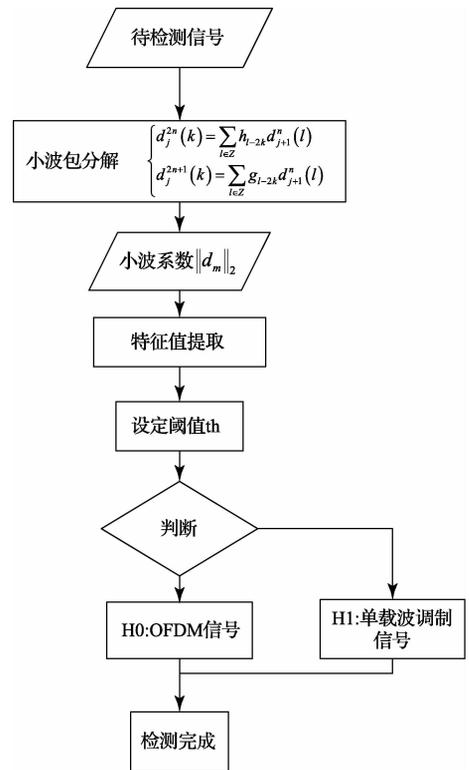


图 4 基于小波包变换的检测模型流程图

## 4 算法仿真与性能分析

在电力线噪声信道下, 通过 MATLAB 平台仿真实证基于小波变换的信号检测算法, 主要包括以下几个方面: 不同判决阈值对检测成功率的影响; 检测正确率随信噪比的变化; 选择不同小波包分解层数或不同小波函数时, 检测成功率随信噪比的变化等。

### 4.1 仿真 1: 判决阈值对算法检测性能的影响分析

在仿真试验中, 根据各类信号的检测特征量 2, 选择判决阈值的遍历范围为  $[1.5; 0.1; 4.5]$ , 对应每个阈值条件进行 1000 次 Monte Carlo 实验, 信噪比分别取  $-5\text{dB}$ 、 $0\text{dB}$

和 5dB,统计得到每个信噪比下检测成功率随着判决阈值的变化曲线如图 5 所示:

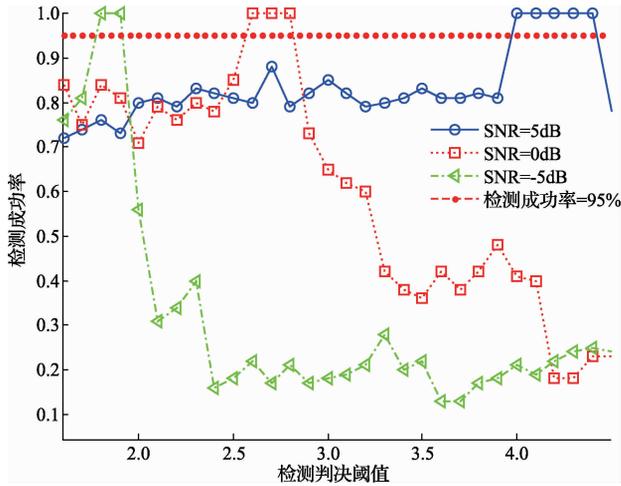


图 5 不同信噪比下检测成功率随着判决阈值的变化曲线

由图 5 可知,在信噪比 SNR=5 时,最佳判决阈值范围是[4.0,4.4];在信噪比 SNR=0 时,最佳判决阈值范围是[2.6,2.8];在信噪比 SNR=-5 时,最佳判决阈值范围是[1.15,1.2]。随着信噪比的减小,最佳判决阈值范围也逐渐减小,并且在-5 dB、0 dB 和 5 dB 的信噪比下,算法的最佳判决阈值范围并无交集。根据三个最佳判决阈值范围分别设定判决阈值为 4.2、2.7 和 1.2。

设定信噪比的遍历范围为[-10 : 1 : 10]dB,对应每个信噪比进行 1000 次 Monte Carlo 实验,得到阈值分别为 4.2、2.7 和 1.2 时,检测成功率随信噪比的变化曲线,如图 6 所示。

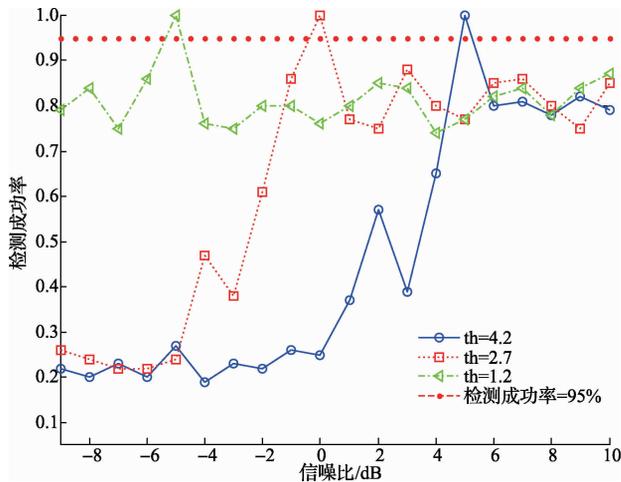


图 6 不同固定阈值的检测成功率变化曲线

由图 6 可知,若采用某一固定阈值,那么只能在某一特定信噪比下检测成功率较高,当判决阈值为 1.2 时,只在信噪比为-5 dB 时检测成功率大于 95%;当判决阈值为 2.7 时,只在信噪比为 0 dB 时检测成功率大于 95%;当判决阈值为 4.2 时,只在信噪比为 5 dB 时检测成功率大于 95%;因此采用固定阈

值的方法不能达到较好的检测效果,应该选择一种可以根据信噪比的变化而变化的自适应阈值。

从理论分析以及图可知,OFDM 信号的检测特征量 2 是五种信号中最小的,所以设定阈值为:  $th = \frac{S_{ofdm} + \min(S_s)}{2}$ ; 被检测信号的特征量小于阈值,则判定为 OFDM 信号,大于阈值,则判定为单载波信号。

同样设定信噪比的遍历范围为[-10 : 1 : 10] dB,在每个对应的信噪比下分别进行 1000 次 Monte Carlo 模拟实验,得到检测成功率随信噪比的变化关系如图 7 所示。

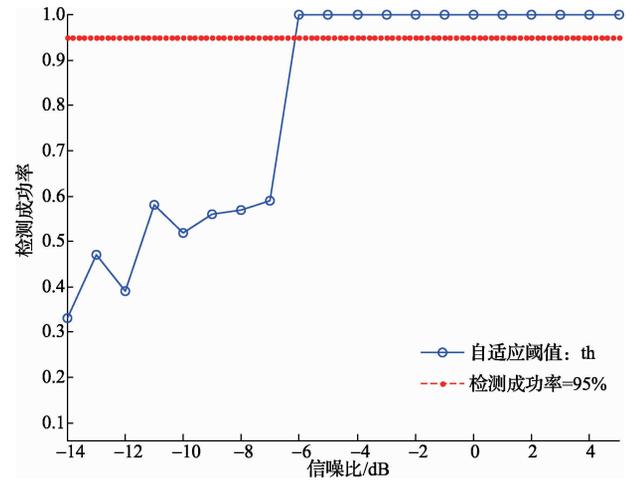


图 7 自适应阈值的检测成功率变化曲线

由图 7 可知,当信噪比小于-6 dB 时,随着信噪比增大,检测成功率有上升趋势,但没有呈现特定的线性变化规律,这是因为信噪比小到一定程度后,OFDM 信号受电力线噪声影响,其特征值不再是五类信号中最小的,因此检测成功率急剧下降;当信噪比大于-6 dB 时,可以保证 95% 以上的检测成功率,说明该自适应阈值选择是可行的,本算法可以在信噪比大于-6 dB 时保证 95% 以上的检测成功率。

#### 4.2 仿真 2:小波包分解层数对算法检测性能的影响分析

仿真参数方面,小波函数为 sym4 小波,设小波包分解

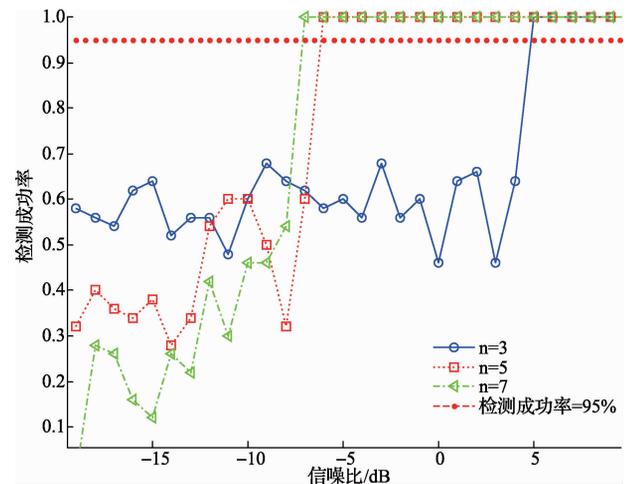


图 8 不同小波包分解层数的检测成功率变化曲线

层数为  $n$ , 则小波包分解产生的子信号数量是  $2^n$  个, 考虑到运算的数据量, 小波包分解层数分别选择为 3, 5, 7 来进行比较。信噪比遍历范围为  $[-10 : 1 : 10]$  dB, 对应每个信噪比进行 1000 次 Monte Carlo 实验, 统计得到检测成功率随信噪比的变化曲线如图 8 所示:

由图 8 可知: 在其他条件都一致的前提下, 针对同一目标信号, 当小波包分解层数为 3 时, 检测成功率大于 95% 的信噪比区间为  $[5, +\infty)$  dB; 当小波包分解层数为 5 时, 检测成功率大于 95% 的信噪比区间为  $[-6, +\infty)$  dB; 当小波包分解层数为 7 时, 检测成功率大于 95% 的信噪比区间为  $[-7, +\infty)$  dB; 这说明小波包分解层数越大, 检测成功率大于 95% 的最低信噪比越小, 检测效果越好。但是, 小波包分解层数越大, 运算量越大, 检测所需时间也越长, 因此, 增大小波包分解层数即用检测时间来换取检测性能的提高。

#### 4.3 仿真 3: 不同小波函数对算法检测性能的影响分析

本实验研究采用不同的小波函数进行小波包分解对算法性能产生的影响, 仿真参数设定为小波包分解层数  $n=5$ , 小波函数分别采用 sym2 函数、sym4 函数、db3 函数和 Haar 函数, 信噪比遍历范围为  $[-10 : 1 : 10]$  dB, 对应每个信噪比进行 1000 次 Monte Carlo 实验, 统计得到采用不同小波函数时检测成功率随信噪比的变化曲线如图 9 所示。

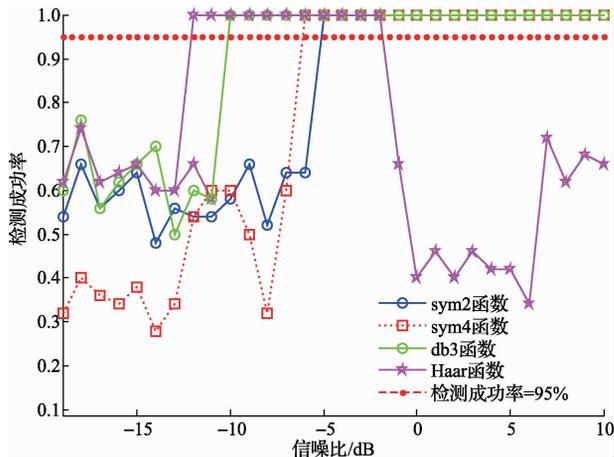


图 9 不同小波函数的检测成功率变化曲线

从图 9 中可以看到, Haar 函数在低信噪比条件下的检测性能最好, 检测成功率高于 95% 的最低信噪比为  $-12$  dB, 但是其检测成功率在高信噪比条件下收到限制, 当信噪比高于  $-2$  dB 时, 检测成功率急剧下降; sym2 函数、sym4 函数和 db3 函数检测成功率高于 95% 的信噪比区间分别为  $[-5, +\infty)$  dB、 $[-6, +\infty)$  dB 和  $[-10, +\infty)$  dB。通过比较可知, 在 sym2 函数、sym4 函数、db3 函数和 Haar 函数中, 采用 db3 函数的检测性能相对最好。

本节在电力线噪声信道下, 验证了算法的检测性能, 采用了一种自适应阈值, 可以在较低的信噪比条件下, 从 OFDM 信号、BPSK 信号、QPSK 信号、ASK 信号以及 FSK 信号中区分并检测出 OFDM 信号, 并研究了选择不同的阈

值, 不同的小波包分解层数以及不同的小波函数对检测效果的影响。实验证明, 本算法可以在电力线噪声信道下实现 OFDM 信号的检测。

## 5 结 论

本文在电力线噪声信道下的 OFDM 信号检测问题, 提出了一种基于小波包变换的信号检测方法。由仿真结果可知, 该算法可以在较低信噪比下, 从 OFDM 信号、BPSK 信号、QPSK 信号、2FSK 信号以及 ASK 信号中检测出 OFDM 信号, 且正确识别率高于 95%。这种算法对于电力线噪声信道下的 OFDM 信号识别具有良好的理论和实用价值。

与此同时, 该算法也有一定的局限性。首先, 算法对目标调制信号有一定的局限性, 只能从上述五类信号中检测出 OFDM 信号, 当目标信号中出现 QAM 信号时, 检测性能将大大降低; 第二, 电力线噪声中各类噪声的功率分配对该算法的性能影响较大, 当有色背景噪声和工频异步噪声所占功率比率较大时, 算法的检测性能也将受到较大影响。

## 参考文献

- [1] 张晶晶. 基于小波变换的 OFDM 信号识别技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2009(1): 20-29.
- [2] 赖宇超. 基于高阶统计量和小波变换的 OFDM 信号盲检测[D]. 西安电子科技大学, 2013(1): 27-34.
- [3] 陈宜文, 许斌, 郝建华, 等. 基于 OFDM 技术的电力线通信系统建模与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2015(2): 21-26.
- [4] 任立群. 基于高阶累积量和小波的 OFDM 信号检测研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2009(3): 33-36.
- [5] 王兰勋, 闫姗姗. 基于小波分解的 OFDM 与单载波信号识别[J]. 电视技术, 2013, 37(1): 133-136.
- [6] 王勇. 基于 OFDM 的电力线通信中的部分关键技术研究[D]. 电子科技大学, 2007(4): 24-32.
- [7] 赵建华, 李智, 马一森. 电力线信道模型下 OFDM 通信系统的 Simulink 仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2011(9): 41-43.
- [8] 马宁, 陈莉, 王晓军杰. 小波变换在弱信号检测中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009(3): 257-258.
- [9] 张荣标, 胡海燕, 冯学友. 基于小波熵的微弱信号检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 34-37.
- [10] 苏志金, 徐建华, 韩民. 基于小波变换的 MPSK 短信号符号率估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013(2): 140-144.
- [11] 徐湛. 基于稀疏小波变换的超宽带低信噪比信号检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 825-830.

## 作者简介

陈宜文, 硕士研究生, 研究方向为电力线通信系统, 电力线通信信号检测。

E-mail: ipad910913@163.com