

基于小波脊线的 OFDM 与单载波信号识别

张传忠 段田东 刘世刚 徐文艳
(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 正交频分复用 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 与单载波信号广泛应用于短波通信领域。针对低信噪比和多径环境下 OFDM 与单载波信号识别效率低的问题, 本文提出了基于小波脊线的信号识别算法。本文推导了常用信号对应的小波脊线幅度和脊点位置, 并分析了小波脊线幅度和脊点形态。通过理论推导和仿真测试证明了 OFDM 与单载波信号对应小波脊线具有不同特征, 对小波脊线差分、中值滤波、并利用其熵作为特征值能够有效的进行 OFDM 信号与单载波信号的识别。仿真结果证明该算法对输入信号点数要求低, 在低信噪比和短波中等信道下识别效果具有稳健性和有效性。

关键词: OFDM; 单载波信号; 小波脊线; 瞬时特征; 信号特征提取; 信号识别
中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)07-1100-06

Recognition of OFDM and Single Carrier Digital Signals Based on Wavelet Ridge

ZHANG Chuan-zhong DUAN Tian-dong LIU Shi-gang XU Wen-yan
(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and single carrier digital signals are widely used in High Frequency (HF) communication. Aim at OFDM signals and single carrier digital signals have a low recognition efficiency in lower signal-to-noise ratio (SNR) and multi-path environment in HF communication, a new algorithm based on wavelet ridge is proposed. According to the wavelet ridge amplitude and wavelet ridge patterns characters can reflect instantaneous different characters of different signals types, derivation is provided of the normal used signals' wavelet ridges characters in mathematical formula also. Corresponding to the difference between OFDM signals and single carrier digital signals in wavelet ridge amplitude and wavelet ridge patterns, differential coefficient, median filter are used in this paper, and then calculate entropy of the wavelet ridges after differential coefficient and median filter as a feature value, finally achieved to recognize of OFDM signals and single carrier digital signals. Computer simulation shows that the algorithm is not sensitive to the input signal points and this algorithm is both feasible and effective in low SNR environment.

Key words: OFDM; Single carrier digital signals; Wavelet ridge; Instantaneous characters; Signal feature extraction; Signal identification

1 引言

正交频分复用 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 信号由于具有抗频率选择性衰落和抗窄带干扰、频带利用率高的特性, 因而广泛应用于短波军民通信领域, 随着短波通信环境恶化, 如何在多径和低信噪比环境下正确识别 OFDM 和单载波信号成为一个突出的问题。

文献[1]根据信号的四阶累计量 C_{40} 和 C_{42} 作为特征

值对 OFDM 与单载波信号进行识别, 在信噪比为 0dB 的多径环境下也具有较好的识别效果; 文献[2]根据 OFDM 信号具有高斯分布这一性质, 通过对接收信号的经验分布函数 (EDF) 的计算, 进行 OFDM 与单载波信号的识别, 在高信噪比条件下算法计算量小, 表现出优良的识别性能, 但是随着信噪比的降低, 即使只有加性高斯白噪声的影响, 导致单载波信号统计上也具有渐近高斯性, 识别效率迅速恶化。基于高阶累计量和经验分布的信号识别方法, 其实是根据理想状况下 OFDM 信号具有渐近高

斯性这一特点,而单载波信号在多径环境下其实也具有渐近高斯性的特点,因此基于高阶累计量的算法在多径环境下具有很大的局限性。

由于小波变换具有高频区时域分辨率高和低频区频域分辨率高的特点,更适合于信号时频特征的提取,特别是小波脊线在相同条件下具有分析精度高的优势,在信号瞬时特征提取方面受到了重视^[3]。针对以上原因,本文提出了基于小波脊线的 OFDM 与单载波信号识别算法,并推导了常用信号小波脊线形态,根据 OFDM 与单载波信号小波脊线表现出的不同瞬时特征,通过对信号小波脊线差分、中值滤波、最后利用其熵作为特征值,实现了 OFDM 与单载波信号的识别。

2 小波脊原理

小波脊线指小波变换后模值极大值对应的尺度函数曲线。小波变换具有良好的突变点检测性能,特别是小波脊线还具有分析精度高的优势,通过提取小波脊线可以获得信号的调制规律,因此常用于信号瞬时特征提取^[4]。

设被分析信号可以表示为:

$$S(t) = A(t) \cos[\phi(t)] \quad (1)$$

另设 $\psi(t) = g(t) \exp[j\phi(t)]$ 为解析小波函数,窗函数 $g(t)$ 对应的傅立叶变换为 $G(\omega)$,其带宽为 $\Delta\omega$,则 $S(t)$ 对应的连续小波变换为:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

根据文献[5]式(2)可以表示为:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} A(b) \exp[i\phi(b)] \{ G(a[\xi - \phi'(b)]) + \varepsilon(b, \xi) \} \quad (3)$$

其中, $\varepsilon(b, \xi)$ 为校正项,当 $\phi'(t) \geq \Delta\omega/a$ 时可以忽略不计。在小波支集内有 $|G(0)| \geq |G(\omega)|$, 因此结合式(3)可知当 $\xi(b) = \phi'(b)$ 时 $|W(a, b)|$ 最大,此时 $(b, \xi(b))$ 即为小波脊点, $|W(a, b)|$ 为小波脊点幅度, $\xi(b)$ 为脊点位置。在小波脊线上对应的脊点幅度为:

$$W(a, b) \approx \frac{\sqrt{a}}{2} A(b) G(0) \exp[i\phi(b)] \quad (4)$$

对应的脊点位置为:

$$\xi(b) = \phi'(b) \quad (5)$$

对式(3)和(4)分析可知,信号的特性可以通过小波脊线反映出来,小波脊点的幅度反映出信号包络的变化,脊点所在位置对应信号瞬时频率。

3 信号小波脊线特征

常用的单载波信号有:PSK、FSK、QAM 三种信号,单载波信号时域表达式可以表示为式[1]的形式:

$$S_{sc}(t) = \sum_m A_m \cos \phi(t) u(t - mT_s) \quad (6)$$

其中, A_m 对应 QAM 第 m 个符号幅度值,相位为 $\phi(t) = \omega_c + \phi_m$; FSK 信号幅度不变 $A_m = a$,而载频不同 $\phi(t) = \omega_c + \omega_m t$; PSK 信号振幅恒定 $A_m = a$,第 m 个符号相位 $\phi(t) = \omega_c + \phi_m$; $u(t - mT_s)$ 为单载波信号成型滤波函数; T_s 为码元宽度。

利用上述公式,针对不同单载波信号的一个码元周期内小波脊线幅度和脊点所在位置做以下分析:

$$\begin{aligned} \text{FSK: } |W_{FSK}(a, b)| &\approx \left| \frac{\sqrt{a}}{2} AG(0) \exp[i\omega_n t] \right| = \frac{\sqrt{a}}{2} AG(0) \\ \xi(b) &= \phi'(b) = \omega_n \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{PSK: } |W_{PSK}(a, b)| &\approx \left| \frac{\sqrt{a}}{2} AG(0) \exp[i\phi_m] \right| = \frac{\sqrt{a}}{2} AG(0) \\ \xi(b) &= \phi'(b) = \varphi_m [\delta(b - (m-1)T_s) - \delta(b - mT_s)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{QAM: } |W_{PSK}(a, b)| &\approx \left| \frac{\sqrt{a}}{2} A_m G(0) \exp[i\phi_m] \right| = \frac{\sqrt{a}}{2} A_m G(0) \\ \xi(b) &= \phi'(b) = \varphi_m [\delta(b - (m-1)T_s) - \delta(b - mT_s)] \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(7)、(8)、(9)对 FSK、PSK、QAM 信号的小波脊线特征做以下分析:FSK 信号不同的码元符号,对应不同的载波频率,因而小波脊线位置不同,其小波脊线呈现出阶梯状,阶梯的个数对应 FSK 调制的阶数;尽管码元不同,FSK 类信号的振幅相同,因此 FSK 信号小波脊点幅度无起伏变化,在码元变化处会出现不同幅度的脉冲。PSK 信号在不同码元内,载频和振幅都相同,小波脊线位置和脊线幅度都相同,由于在码元跳变处相位不一,导致在跳变时刻信号瞬时频率不同,对应不同的小波脊线位置,因此 PSK 信号对应的小波脊线呈现出同一水平线上几个幅度不同的脉冲,不同幅度脉冲个数对应 PSK 的调制阶数。QAM 信号在码元跳变时刻,载频相同,小波脊线呈现在同一水平线上,同时由于信号振幅和相位不一,导致小波脊线幅度和码元跳变点的瞬时频率不同,因此 QAM 信号的小波脊线位置呈现出在同一水平线上间隔不等、幅度不同的脉冲,不同幅度脉冲个数对应其调制阶数;QAM 信号幅度不同,因此其小波脊线幅度呈现出阶梯状,阶梯个数对应其调制阶数。

OFDM 信号的表达式一般可表示为:

$$S_{OFDM}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} d_m \text{rect} \left(t - \frac{T}{2} \right) \exp \left[j2\pi \left(f_0 + \frac{m}{T} \right) t \right] \right\} \quad (10)$$

$-T_c \leq t \leq T$

其中, $d_m (m=0,1,\dots,M-1)$ 是分配给每个子信道的数据符号, 近似服从随机分布, f_0 是第零个子载波的载波频率, 各个子载波间的频率间隔为 $1/T$, rect 为矩形窗, T_c 为保护间隔。

OFDM 信号由若干子载波叠加而成, 并且各个子载波上码元信息互不相关, 由中心极限定理知, 随着子载波个数的增多, OFDM 信号包络 $A(b)$ 在时域服从渐进高斯分布, 且子载波数目越多, 高斯性越强, 并与各子载波调制方式无关。根据式(4)得 OFDM 小波脊线幅度为:

$$|W_{OFDM}(a, b)| \approx \frac{\sqrt{a}}{2} G(0) A(b) \quad (11)$$

由式(10)得, OFDM 信号对应瞬时相位为:

$$\phi(b) = - \frac{\sum_{m=0}^{M-1} d_m \cos \left[\left(2\pi f_0 + \frac{m}{T} \right) t \right]}{\sum_{m=0}^{M-1} d_m \sin \left[\left(2\pi f_0 + \frac{m}{T} \right) t \right]} \quad (12)$$

对式(12)做以下分析: 分子分母由各个随机变量叠加而成且互不相关, 根据中心极限定理, 分子分母同样服从渐进高斯分布, 且随着子载波数目的增大, 其高斯性越强。根据式(11)、(12)由于 $A(b)$ 服从渐进高斯分布, 且

$|W_{OFDM}(a, b)|$ 的系数 $\frac{\sqrt{a}}{2} G(0)$ 为一常数, 因此 $|W_{OFDM}(a, b)|$ 也服从渐进高斯分布; 小波脊线位置 $\xi(b)$ 即为瞬时频率, 是对应瞬时相位的导数, 因此 OFDM 信号的小波脊线位置也具有随机分布的特性。具体表现为在同一符号周期内小波脊线与小波脊线幅度仍然是无序的, OFDM 信号的小波脊线在码元变化处并无明显的突变点, 其小波脊线幅度和小波脊线位置即使在同一码元符号周期内也不是常数值, 而是无规律近似随机结果。

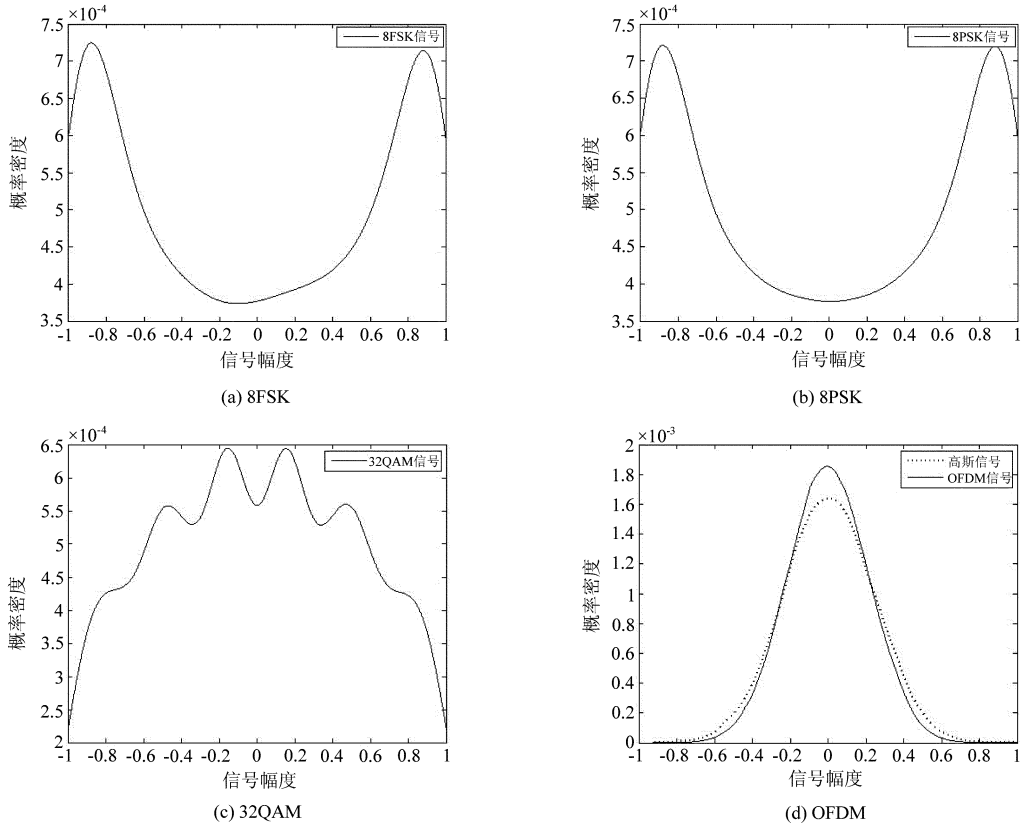


图 1 OFDM 与单载波信号概率分布

Fig. 1 Probability Distribution of OFDM and Single Carrier Digital Signal

由图 1 可知 OFDM 信号基本上服从高斯分布, 并且通过仿真得出 OFDM 信号随着子载波个数的增加, 趋近于高斯分布的性质越强, 而单载波信号不具有这种性质。通过

以上分析可知单载波信号与 OFDM 信号小波脊线有很大差别, 可以根据单载波信号有序性和 OFDM 信号随机性进行信号识别, 各类信号对应的小波脊线如图 2 所示:

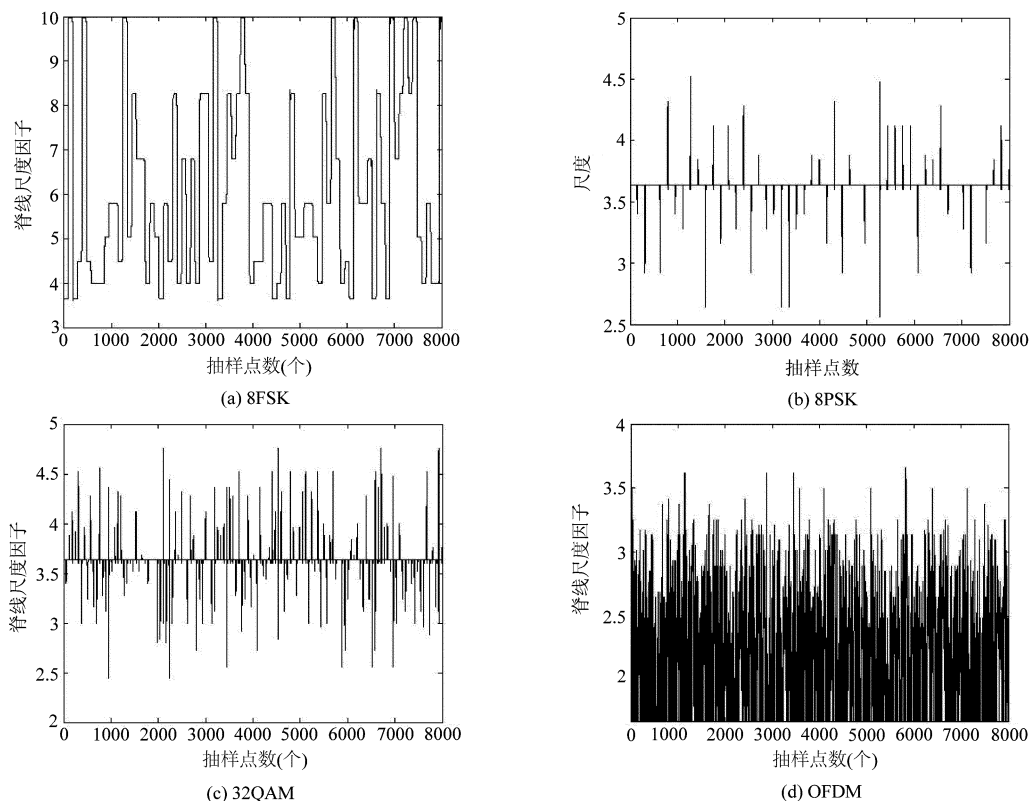


图2 OFDM 与单载波小波脊线

Fig. 2 Wavelet Ridge of OFDM and Single Carrier Digital Signal

由图2可以知 OFDM 和单载波信号在小波脊线上的差别,单载波信号的小波脊线能够反映出信号各个码元的变化规律,在码元变化处会产生突变,而 OFDM 信号由于各个子载波相互叠加和正交,利用小波脊线不能反映出其码元变化的规律,即使在短时间内小波脊线变化也是很大的。因此可以根据单载波信号小波脊线变化的规律性和 OFDM 信号小波脊线变化的不确定性进行识别。

4 识别算法

由公式(2)和相位稳定性原理可知,小波脊线可以通过 $W(a, b)$ 的模值极大值或者相位驻点提取,因此小波脊线的提取算法可以分为两类:最小相位法^[6]和模值极大值两种法,并由此衍生出很多改进算法^[7-10]。最小相位法计算量小,但是抗噪声性能差;模值极大值法抗噪声性能好,由于需要遍历所有的小波尺度函数造成较大的运算量,在信号点数较少时表现出优良的特性。模值极大值法具体实现步骤为:

1) 对信号进行 Hilbert 变换和恒包络处理,以减少噪声对信号的影响。

2) 根据式 $a_r(b) = \frac{\varphi'(0)}{\varphi'(t)}$ 对信号频率范围进行粗略估计^[11],以确定小波尺度因子 $(a_1, a_2, \dots, a_N)$ 。

3) 以 N 个小波尺度因子分别对信号进行连续 morl 小波变换,得到一个 $N \times \text{siglen}$ 二维的小波变换矩

阵,其中, N 为小波尺度因子个数, siglen 为信号长度。

4) 对 $n \times \text{siglen}$ 二维小波变换结果求模,搜索每一列最大值对应的小波尺度因子,各列最大值对应的小波尺度因子曲线即为小波脊线。

根据单载波信号小波脊线的有序性和 OFDM 信号小波脊线的随机性,由于信息熵能够表征变量的随机性,因此本文利用熵作为特征值进行识别。设 $X(n)$ 为小波脊线差分和中值滤波后第 n 个幅度值,其对应的概率密度函数为:

$$p_n = \frac{|X(n)|}{\sum_{n=1}^N |X(n)|}, \quad n=1, \dots, N \quad (13)$$

其熵可以表示为:

$$H(X) = -\sum_{n=1}^N p_n \log(p_n) \quad (14)$$

当观测数据分量的概率相等时,其不确定性最大,此时熵为最大值;当观测数据之间具有较强的相关性,其不确定性较小,此时熵值也较小。由以上理论分析和图2可知,单载波信号小波脊线能够反映出前后码元变化的规律,差分后各幅度之间相关性较强,因此其熵值也较小;而 OFDM 信号的小波脊线即使在短时间内变化也是很大的,因此其熵值较大。根据信号小波脊线差分后幅度值的熵作为识别的特征,将熵值与给定的门限比较,如果小于该门限则认为是单载波信号,反之则

认为是 OFDM 信号,而门限值可以设定为 OFDM 信号的最小熵值 $\min(H_{OFDM}(X))$ 与单载波信号最大熵值 $\max(H_{SC}(X))$ 的平均即:

$$th = \frac{\min(H_{OFDM}(X)) + \max(H_{SC}(X))}{2} \tag{15}$$

因此根据以上分析,构建如下 OFDM 与单载波信号识别流程,对信号进行 Hilbert 变换等预处理以减小噪声的影响,使用 morl 小波进行小波脊线提取并抑制噪声^[9],根据小波脊线特点,对信号小波脊线差分、中值滤波以去除脉冲噪声,根据 OFDM 信号小波脊线随机性和单载波信号小波脊线具有较强的相关性,利用其对应熵作为特征值进行 OFDM 和单载波信号的识别。

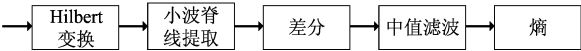


图 3 OFDM 与单载波信号识别流程图

Fig.3 Recognition Flow Diagram of OFDM and Single Carrier Digital Signal

5 算法仿真

按照图 3 所示的系统由 Matlab 建立仿真模型,信号类型集合为 {FSK、PSK、QAM、OFDM} 四大类信号,OFDM 信号子载波个数为 64、采用 QPSK 调制,每个子载波码元速率为 44Bd,PSK、QAM 码元速率为 1200Bd,FSK 码元速率为 125Bd;信号源由 Matlab 仿真产生,采样频率为 12000Hz,信号点数为 8000 个点;短波信道模

型采用 Watterson 模型,选取 CCIR 典型信道中的好信道,即多普勒扩展为 0.1Hz、多径时延为 0.5ms。每个信噪比下做 1000 次 Monte-carlo 实验,取其熵的均值与判决门限进行比较,熵值随信噪比变换情况如图 4 所示。

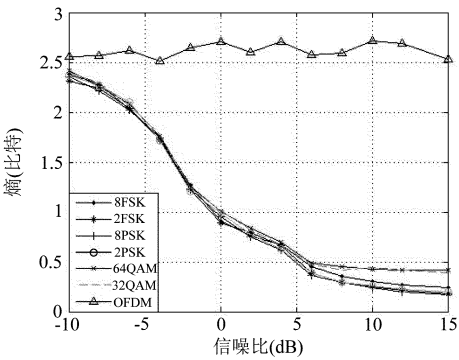


图 4 单载波和 OFDM 信号熵值随信噪比变化曲线

Fig.4 SNR-Change Curve of OFDM and Single Carrier Digital Signal' Entropy

由图 4 仿真结果可知在同一信噪比下 OFDM 信号熵明显高于单载波信号的熵,这是因为 OFDM 信号小波脊线的无序性和近似随机的结果,因此其熵值较大且受多径和噪声干扰较小;而单载波信号由于多径和噪声干扰,打乱了码元变换时刻的突变特性,因此其熵受多径和噪声干扰特别大。由图 4 可进一步可知,单载波信号的熵值随着调制阶数的增多而变大。

表 1 不同信噪比下识别准确率

Tab.1 Accurate Recognition Rate as SNR Changes

信号类型 \ 信噪比	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14
8FSK	0.674	0.875	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2FSK	0.712	0.901	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8PSK	0.683	0.879	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2PSK	0.708	0.897	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
64QAM	0.667	0.853	0.991	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32QAM	0.670	0.861	0.997	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 1 为不同信噪比下单载波信号与 OFDM 信号识别准确率,以公式(11)作为判决门限,由图可知在-4dB 的短波中等信道下仍然具有较好的识别效果。仿真结果证明了基于小波脊线的识别算法在低信噪比下可以实现单载波信号和 OFDM 信号的正确识别。

图 5 为信噪比在 5dB 时信号点数不同对识别率的影响,信号点数范围为 (400,2800),每间隔 200 点递增。由图可知信号识别准确率随信号采样点数的增多而提高,在采样点数为 1200 点时识别率达到 100%。

图 6 为本文算法和文献[1]、[2]所提出的算法在不同信噪比下 OFDM 信号的识别准确率比较,由图 6 可以看出本文所提出的算法在低信噪比下具有更优的识别效果。

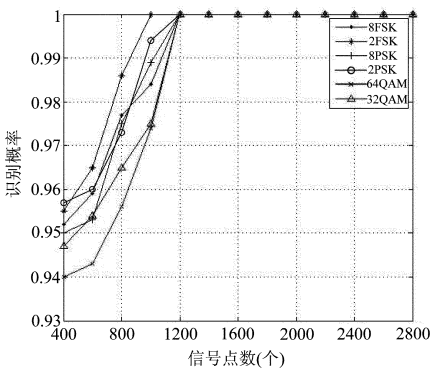


图 5 不同信号长度识别准确率

Fig.5 Accurate Recognition Rate as the length of Signal Changes

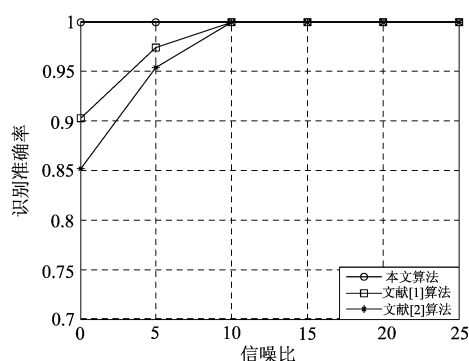


图6 不同算法 OFDM 信号识别率比较

Fig. 6 Accurate Recognition Rate between Different Algorithms

6 结论

本文提出了一种基于小波脊线的 OFDM 与单载波信号识别算法,并且对各类信号的小波脊线幅度和小波脊点位置表示方法做了推导。根据信号瞬时特征的差异,通过提取信号的小波脊线,并对小波脊线差分、中值滤波、最后以熵值作为特征实现了在短波中等信道低信噪比下单载波信号与 OFDM 信号的识别。理论分析与仿真结果都证明了该算法在低信噪比和短波信道环境下具有较好的识别效果,但是通过幅值最大法提取小波脊线时存在运算量大的缺点,与基于四阶累积量、EDF 识别算法相比,基于小波脊线的识别算法运算速度慢。

参考文献

- [1] 吕挺岑,李兵兵,董刚.一种多径信道下的 OFDM 信号盲识别算法[J].现代电子技术,2007,30(11):13-16.
Lv Tingcen, Li Bingbing, Dong Gang. Blind Identification of OFDM Signal in Multi-path Channel [J]. Modern Electronics Technique, 2007, 30(11): 13-16. (in Chinese)
- [2] Hong Li, Yeheskel Bar-Ness, Ali Abdi, Oren S. Somekh, and Wei Su. OFDM Modulation Classification and Parameters Extraction [C] // International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2006, 1-6.
- [3] Nalan Ö, F Acar S. Determination of Wavelet Ridges of Nonstationary Signals by Singular Value Decomposition [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2005, 25(8): 480-485.
- [4] 朱洪俊,王忠,秦树人.小波变换对瞬态信号特征信息的精确提取[J].机械工程学报,2005,41(12):196-199.
Zhu H J. Wang Z. Qin S R. Accurate extraction for the characteristic information of transient signal with wavelet transforms [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2005, 41(12): 196-199. (in Chinese)

- [5] Stephane Mallat 著.杨力华,戴道清,黄文良,湛秋辉译.信号处理的小波引导[M].第二版.北京:机械工业出版社.2002.70-80.
Stephane Mallat A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. Second Edition. Bei Jing: China Machine Press. 2002. 70-80. (in Chinese)
- [6] 王兵,羿旭明.一种提取小波脊线的迭代算法[J].数学杂志,2005,25(3):295-298.
Wang B, Yi X M. An Iterative Algorithm of Extracting Wavelet-ridge-curve [J]. Journal of Mathematics, 2005, 25(3): 295-298. (in Chinese)
- [7] 余志斌,陈春霞,全炜东.一种新的 Morlet 小波及其在雷达信号特征提取中的应用研究[J].电路与系统学报,2010,15(1):129-134.
Yu Z B, Chen C X, Quan W D. A New Morlet Wavelet and Its Application in Radar Signal Feature Extraction [J]. Journal of Circuits and Systems, 2010, 15(1): 129: 134. (in Chinese)
- [8] 秦毅,秦树人,毛永芳.基于小波脊线的解调方法及其在旋转机械故障诊断中的应用[J].机械工程学报,2009,45(2):231-237,242.
Qin Y, Qin S R, Mao Y F. Demodulation Approach Based on Wavelet Ridge and Its Application in Fault Diagnosis of Rotating Machinery [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 231-237, 242. (in Chinese)
- [9] 任春辉,魏平,肖先赐.改进 morlet 小波在信号特征提取中的应用[J].电波科学学报,2003,18(6):633-637.
Ren C H, Wei P, Xiao X C. Application of a Modified Morlet Wavelet in Feature Extraction [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(6): 633-637. (in Chinese)
- [10] 王海,范文晶,许建华,张超.小波脊线法在暂态信号检测中的应用[J].系统工程与电子技术,2010,32(1):5-8.
Wang H, Fan W J, Xu J H, Zhang C. Application of Wavelet-ridge Method to Detect Transient Signals [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1): 5-8. (in Chinese)
- [11] Nalan Özkurt, F. Acar Savaci. Determination of Wavelet Ridges of Nonstationary Signals by Singular Value Decomposition [J]. IEEE Trans On Circuits and Systems II: Express Briefs, 2005, 52(8): 480-485.

作者简介

张传忠(1983-),男,河南商丘人,信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为信号分析与识别。

E-mail: zhang1032133@163.com

段田东(1965-),男,江西湖口人,信息工程大学副教授、硕士生导师,研究方向为通信信号处理、信号与信息处理、信号分析与识别。

刘世刚(1972-),男,河南开封人,信息工程大学讲师、博士,主要研究方向为信号与信息处理、信号分析与识别。

徐文艳(1983-),女,安徽界首人,信息工程大学助教、硕士,主要研究方向为信号分析与识别。