

基于谱线特征的 OFDM 与 FBMC 多载波波形识别

邵凯^{1,2}, 李慧^{1,2}, 周娟红^{1,2}

(1.重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065;

2.重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 针对正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和基于滤波器组的多载波(Filter Bank-based Multicarrier, FBMC)的调制识别进行研究。首先分析 OFDM/FBMC 子载波的二次方谱;接着通过建模得到各信号所对应的二次方谱表达式,得到各谱线的强度及位置;最后设置特征参数,在高斯噪声下完成 OFDM/FBMC 的调制识别。仿真结果表明,在较低信噪比下信号识别率仍较高。

关键词: 调制信号识别;FBMC;OFDM;二次方谱

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201053

中文引用格式: 邵凯, 李慧, 周娟红. 基于谱线特征的 OFDM 与 FBMC 多载波波形识别[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 67-70, 76.

英文引用格式: Shao Kai, Li Hui, Zhou Juanhong. Multi-carrier waveform recognition of OFDM and FBMC based on spectral features[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 67-70, 76.

Multi-carrier waveform recognition of OFDM and FBMC based on spectral features

Shao Kai^{1,2}, Li Hui^{1,2}, Zhou Juanhong^{1,2}

(1.School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2.Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper focuses on the modulation recognition of orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) and filter bank-based multicarrier(FBMC). Firstly, the quadratic spectrum of subcarrier signals is analyzed for OFDM and FBMC. Then, the corresponding quadratic spectrum expression is gotten through modeling, and the intensity and position of each spectrum are gotten. Finally, setting the characteristic parameters, the modulation identification of OFDM/FBMC is accomplished under Gaussian noise. The simulation results show that the signal recognition rate is still higher at a lower SNR.

Key words: modulation signal recognition; filter bank-based multicarrier(FBMC); orthogonal frequency division multiplexing(OFDM); quadratic spectrum

0 引言

在移动通信系统的不断演进过程中,针对第六代移动通信系统(The 6th Generation Mobile Communication System, 6G)的探索已逐步进行^[1],且 6G 对多种多样的应用及各种服务提出了更高的需求^[2]。因此其物理层调制波形需要满足各种各样的情况^[3]。文献[4]和文献[5]中提出不同的场景需要灵活适配不同参数波形来传输。

5G 及未来的通信也不断针对新波形进行相应的探索^[6]。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)使用正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)信号,是 5G 的波形之一^[7]。为了满足对异步传输的需求,需要考虑 OFDM 中所存在的同步和正交^[8]问题。Gabor 理论中具有很多限制条件,但都由于

OFDM 的正交性而不能摆脱这些限制,而非正交无线通信技术却能够很好地解决所出现的这些问题^[9]。随后基于滤波器组的多载波(Filter Bank-based Multicarrier, FBMC)被提出,其所用的偏移正交调幅技术(Offset Quadrature Amplitude Modulation, OQAM)有效解决了现有正交技术中所存在的问题^[10-11]。FBMC 由于其存在不易实现及不易结合现有技术等缺点,没有被过多地考虑^[12-13]。

目前,在信号调制识别领域已经做了大量的研究^[14-17],且在多种方面取得了较好的识别效果。文献[18]中的特征参数考虑使用高次方傅里叶谱;文献[19]提出基于谱线特征的卫星通信调制识别技术;文献[20]根据信号功率谱旁瓣衰减所呈现的特点进行识别,但其在低 SNR 下的效果不好。

本文首先简要介绍了 OFDM、FBMC 信号的信号模型,并推导了 OFDM、FBMC 信号的二次方谱线;然后在高斯噪声下进行了 OFDM 及 FBMC 信号的调制识别分析;最后对 OFDM 与 FBMC 信号的谱线出现的位置与强度及调制识别进行了仿真分析。

1 OFDM/FBMC 信号模型

理想的连续时间 OFDM 基带信号为:

$$s(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{K-1} c_{k,l} e^{j2\pi k \Delta f (t-lT_s)} g(t-lT_s) \quad (1)$$

式中, K 表示子载波的个数, Δf_k 表示频率间隔, T_s 表示符号的周期, $g(t)$ 常使用矩形脉冲成型的函数。

理想连续时间的 FBMC 基带信号表示为:

$$s(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{K-1} \{ [c_{k,l}^{\text{Re}} g(t-lT_s) + j c_{k,l}^{\text{Im}} g(t-T_s/2-lT_s)] \times e^{j(2\pi/T_s + \pi/2)k} \} \quad (2)$$

式中, $c_{k,l} \in \{c_n\}_{n=1}^N$, I 相 $a_n = \text{Re}(c_n)$, Q 相 $b_n = \text{Im}(c_n)$, 点 $\{(a_n, b_n)\}$ 可表示为矩形星座中的点。

假设每个子信道相互独立,数据符号满足均值为 0 且独立同分布,即 $E[c_{k,l}^{\text{Re}} c_{k',l'}^{\text{Im}}] = 0$, $E[c_{k,l}^{\text{Re}} c_{k',l'}^{\text{Re}}] = E[c_{k,l}^{\text{Im}} c_{k',l'}^{\text{Im}}] = \sigma_c^2 \delta(k-k')(l-l')$, σ_c^2 表示方差。

$s(t)$ 表示 OQAM 中 K 个统计独立子信道之和^[21], 表示为:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{K-1} s_k(t) = \sum_{k=0}^{K-1} x_k(t) \cdot e^{j(2\pi/T_s + \pi/2)k} \quad (3)$$

$$x_k(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \{ c_l^{\text{Re}} p(t-lT_s) + j c_l^{\text{Im}} p(t-T_s/2-lT_s) \} \quad (4)$$

其中, $k=0, 1, \dots, K-1$; $x_k(t)$ 表示子载波上调制信号 OQAM。

2 谱线特征分析

2.1 子载波星座调制信号的二次方谱分析

本文中的 OFDM 系统以 QAM 信号调制为例。QAM 信号的基带信号可以表示为:

$$x_{\text{QAM}}(t) = \sum_n (a_n + j b_n) g(t-nT) \quad (5)$$

式中, $E[a_n] = E[b_n] = 0$, $E[a_n a_m] = \sigma_c^2 \delta(n-m)$, $E[b_n b_m] = \sigma_c^2 \delta(n-m)$, $E[a_n b_n] = 0$, 因此其二次方形式的统计期望可表示为:

$$u(t) = E \left\{ \begin{aligned} & \sum_n [a_n g(t-nT) + j b_n g(t-nT)] \times \\ & \sum_{n'} [a_{n'} g(t-n'T) + j b_{n'} g(t-n'T)] \end{aligned} \right\} \\ = \sum_n E[a_n^2 - b_n^2] g^2(t-nT) \quad (6)$$

由式(6)可以看出, QAM 信号所对应的二次方谱不存在离散的谱线特征。

对于 FBMC 系统其子载波调制采用 OQAM 调制, 其基带信号表达式为:

$$x(t)_{\text{OQAM}} = \sum_n [a_n g(t-nT) + j b_n g(t-nT-T/2)] \quad (7)$$

式中, T 表示序列的周期。其二次方形式的统计期望可表示为:

$$u(t) = E \left\{ \begin{aligned} & \sum_n [a_n g(t-nT) + j b_n g(t-nT-T/2)] \times \\ & \sum_{n'} [a_{n'} g(t-n'T) + j b_{n'} g(t-n'T-T/2)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由于 $E[a_n] = E[b_n] = 0$, $E[a_n a_m] = \sigma_c^2 \delta(n-m)$, $E[b_n b_m] = \sigma_c^2 \delta(n-m)$, $E[a_n b_n] = 0$, 因此可以得到式(9), 如下所示:

$$u(t) = \sigma_c^2 [g^2(t-nT) - g^2(t-nT-T/2)] \quad (9)$$

从式(9)可以看出 $u_x(t)$ 是周期函数, 且其二次方谱可表示为:

$$U_x(f) = \text{FT}\{[E[x_k^2(t)]]\} = (\sigma_c^2/2T) \cdot \sum_n [A(f) - A(f) e^{-j\pi n T}] \times \delta(f-n/T) \quad (10)$$

其中, $A(f) = G(f) * G(f)$, 其频域区间表示为 $[-\frac{1+a}{2T}, \frac{1+a}{2T}]$, 滚降系数 α 满足 $0 < \alpha < 0.5$ 。因此 $A(f)$ 中的频域区

间可表示为: $[-\frac{1+a}{T}, \frac{1+a}{T}]$, 由此可知 n 的取值为集合 $\{\pm 1\}$ 中的一个, 由式(10)可得:

$$U_x(f) = \begin{cases} \frac{\sigma_c^2}{T} \cdot A(f) & f = \pm 1/T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

即从式(11)中可以看出, OQAM 信号在 $f = \pm 1/T$ 处出现谱线, 且信号的幅度可表示为 $\frac{\sigma_c^2}{T} \cdot A(\pm 1/T)$ 。

2.2 FBMC/OFDM 信号的谱线特征分析

FBMC 复基带信号 $s(t)$ 的二次方谱与傅里叶变换的性质相结合可以得到:

$$R_s(t, \tau) = \sum_{k=0}^{K-1} R_{s_k}(t, 0) = \sum_{k=0}^{K-1} R_{s_k}(t, 0) \cdot e^{j(2\pi/T_s + \pi/2)k} \quad (12)$$

$$U(f) = \sum_{k=0}^{K-1} U_{s_k}(f) = \sum_{k=0}^{K-1} e^{j(\pi/2)k} U_{s_k}(f-k/T_s) \quad (13)$$

由式(12)与式(13)可以得到 FBMC 信号的二次方谱, 表示为:

$$U(f)_{\text{FBMC}} = \begin{cases} \frac{\sigma_c^2}{T} \sum_{k=0}^{K-1} e^{j(\pi/2)k} A(f) & f = k/T_s \pm 1/T_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

由此可以得出, FBMC 的二次方谱在 $f = k/T_s \pm 1/T_c$ 处是离散的, 其中, 式(14)中 $e^{j(\pi/2)k} \in \{\pm 1, \pm j\}$, 因此可以看出离散谱线的个数会随着 k 的增加而增加。

而对于 QAM 信号而言, 由式(6)可以得到, 其信号的

二次方谱是不存在离散谱线的。但由于 OFDM 的时变自相关函数是由所有子载波的时变自相关函数所组成的，由此可以得到式(15)：

$$R_s(t, 0) = \sum_{k=0}^{K-1} R_{s_k}(t, 0) \cdot e^{j2\pi k \Delta f t} = 0 \quad (15)$$

即可以得出，OFDM 信号的二次方谱不存在离散谱线。

3 调制识别方法

由文献[22]可得，离散谱线表示为：

$$U'(f) = \frac{U(f)}{\sum_{n=1}^w |c(n)| U(f+n)} \quad (16)$$

其中， w 为求加权平均值的数据长度， $w \ll L$ ； $c(n)$ 为加权系数，满足式(17)：

$$c(n) = \begin{cases} \frac{1}{w}, & 1 \leq n \leq w \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

经过预处理后得到新的二次方谱 $U'(f)$ ，新的二次方谱不仅保留了原有谱线的特征，同时对信号频谱进行了平滑处理，因此可以更好地突出谱线分量。

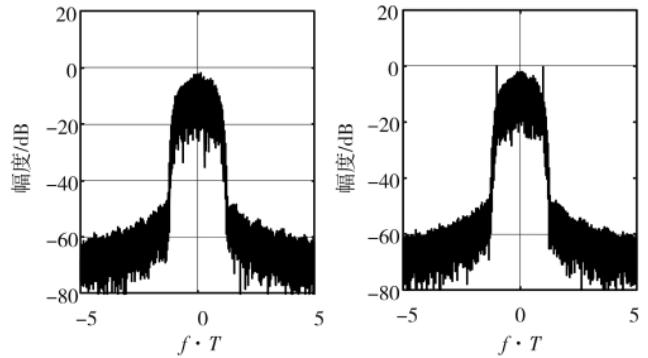
4 仿真分析

为了验证上述理论分析的正确性，本文完成了以下仿真工作：(1)对多载波调制信号和其子载波的调制信号的二次方谱进行了仿真分析；(2)对经过二次方谱处理及预处理后的子载波数分别为 1、2、4 的 FBMC 信号的二次方谱进行了仿真分析；(3)对在 Gaussian 噪声下不同信噪比条件下 OFDM/FBMC 调制方式的正确识别率进行了仿真分析。仿真参数如表 1 所示。

图 1(a)、(b)分别表示 QAM 信号和 OQAM 信号的二次方谱，从中可以看出没有产生离散谱线。图 2(a)中没

表 1 OFDM/FBMC 调制信号的仿真参数

OFDM/FBMC	参数
符号速率 R_s /kHz	2
采样速率 f_s /kHz	32
子载波数 N	16
均方根升余弦(滚降系数)	0.25
子载波调制方式	QAM(QPSK)/OQAM
噪声	高斯白噪声



(a)QAM 二次方谱 (b)OQAM 二次方谱

图 1 QAM 和 OQAM 的二次方谱

有离散谱线，其与理论相吻合。在图 2(b)中，当 k 的值为 1 时，可看作常规 OQAM；在图 2(c)中，当 k 的值为 2 时，其二次方谱出现 4 个谱峰；图 2(d)中，当 k 的值为 4 时，其二次方谱出现 8 个谱峰。即仿真验证了上述理论分析的准确性。

图 3 中(a)、(b)分别为有噪声和抑制噪声后的 FBMC 信号的二次方谱。

图 4 为 Gaussian 噪声下不同信噪比下 OFDM/FBMC 信号识别率。用谱线提取正确率 P_r 来衡量信号识别正确率，

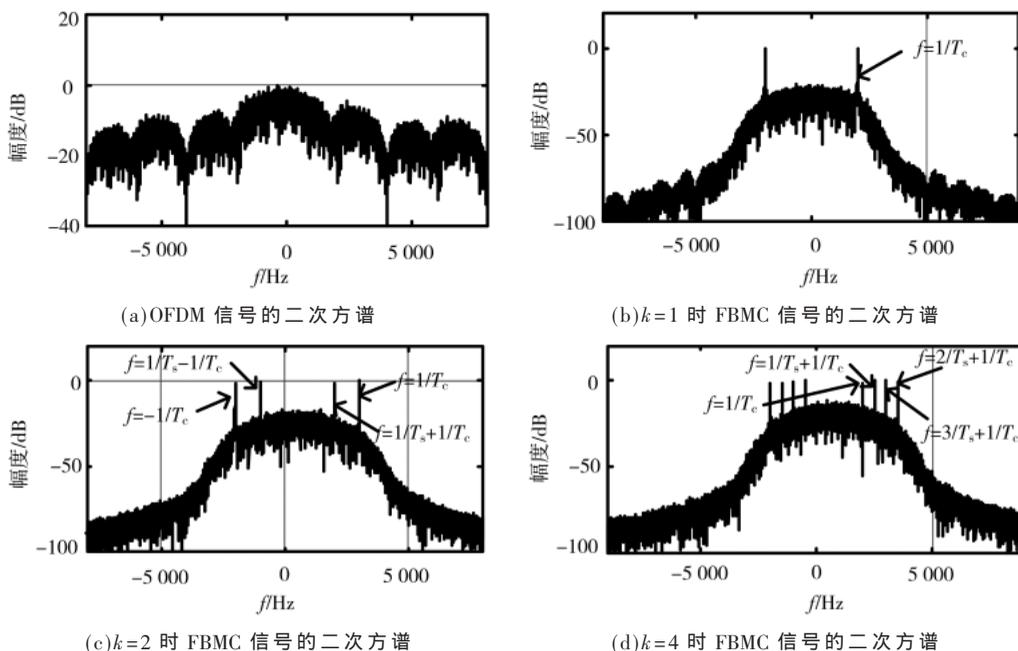


图 2 OFDM 信号的二次方谱图和 $k=1, 2, 4$ 时的 FBMC 信号的二次方谱图

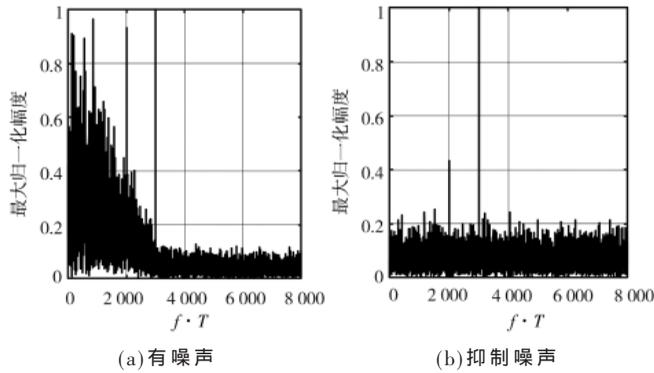


图3 有噪声与抑制噪声后的FBMC信号的二次方谱

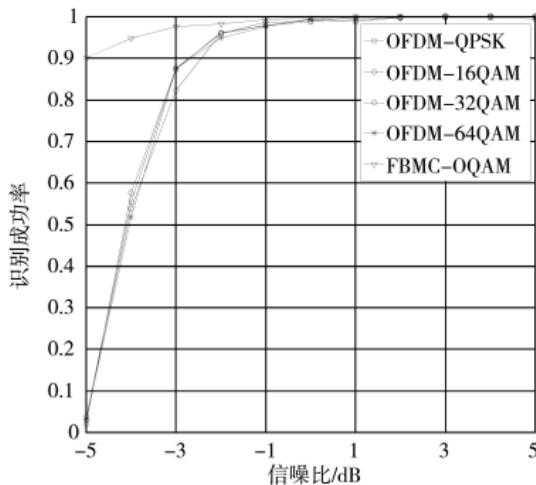


图4 高斯噪声下不同信噪比下OFDM/FBMC信号识别率

表示为：

$$P_r = \frac{\text{正确提取谱线次数}}{\text{蒙特卡洛仿真实验次数}} \quad (18)$$

根据图4可以得到，在信噪比等于0 dB时，其信号识别成功率大都高于99%。因此可以得出，所提方案可有效地完成对OFDM信号与FBMC信号的调制识别分类。

5 结论

本文首先根据各种二次方谱线特征对多载波信号进行相应的建模，接着推导出OFDM/FBMC信号的二次方谱表达式，最后在高斯噪声下对OFDM/FBMC进行调制识别。仿真结果表明，所提方案可以很好地对OFDM/FBMC进行调制识别，为未来通信对物理层波形的使用及分配提供了便利。

参考文献

[1] NAWAZ S J, SHARMA S K, WYNE S, et al. Quantum machine learning for 6G communication networks: state-of-the-art and vision for the future[J]. IEEE Access, 2019, 7: 46317-46350.
 [2] ZHANG Z Q, YUE X. 6G Wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular

Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.
 [3] GUAN P, WU D, TIAN T J, et al. 5G Field Trials: OFDM-based waveforms and mixed numerologies[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1234-1243.
 [4] SEXTON C, BODINIER Q, FARHANG A, et al. Enabling asynchronous machine-type D2D communication using multiple waveforms in 5G[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 1307-1322.
 [5] LIM Y G, JUNG T, KIM K S, et al. Waveform multiplexing for new radio: numerology management and 3D evaluation[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(5): 86-94.
 [6] YAZAR A, ONAT F A, ARSLAN H. New generation waveform approaches for 5G and beyond[C]. 2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU). Zonguldak: IEEE, 2016: 961-964.
 [7] AGONI A E, DLODLO M, OHIZE H O. Capacity analysis of FBMC over OFDM in cognitive radio systems[C]. 2017 Global Wireless Summit (GWS). Cape Town: IEEE, 2017: 52-56.
 [8] MAHAMA S, HARBI Y J, BURR A G, et al. Iterative interference cancellation in FBMC-QAM systems[C]. 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Marrakesh, Morocco: IEEE, 2019: 1-5.
 [9] 陈亮, 余少华. 6G移动通信关键技术趋势初探(特邀)[J]. 光通信研究, 2019, 4(5): 1-4.
 [10] RACHINI A S, JABER M M. Performance of FBMC in 5G mobile communications over different modulation techniques[C]. 2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). Istanbul, Turkey: IEEE, 2019: 1-6.
 [11] IMT-2020 (5G)推进组. 新型多载波专题组技术报告[R]. 2015: 3-20.
 [12] SHAHZADI A, MOUSAVI M R, OROUJI A A. Hyperbolic FRFT-FBMC for 5G signals[J]. IEEE Communications, 2019, 13(8): 988-995.
 [13] BEHROUZ F B. Filter bank multicarrier modulation: a waveform candidate for 5G and beyond[J]. Advances in Electrical Engineering, 2014(6): 1-25.
 [14] ZHU D M, MATHEWS V J, DETIENNE D H. A likelihood-based algorithm for blind identification of QAM and PSK signals[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 3417-3430.
 [15] YIN Z D. Research of communication signal modulation scheme recognition based on one-class SVM Bayesian algorithm[C]. WiCom'09. 5th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, 2009.
 [16] ALI A, FAN Y Y. Automatic modulation classification using

(下转第76页)

- [4] 胡爱军, 马万里, 唐贵基. 基于集成经验模态分解和峭度准则的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 106-111.
- [5] XIAO Y, FEI D, DING E. Rolling bearing fault diagnosis using modified LFDA and EMD with sensitive feature selection[J]. IEEE Access, 2017, PP(99): 1-1.
- [6] AZERGUI M, ABENAOU A, BOUZAHIR H. A Teager-Kaiser energy operator and wavelet packet transform for bearing fault detection[J]. Smart Science, 2018, 6(3): 1-7.
- [7] CHENG J, PENG Y, YU Y, et al. Adaptive sparsest narrow-band decomposition method and its applications to rolling element bearing fault diagnosis[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 85: 947-962.
- [8] XIONG Q, XU Y, PENG Y, et al. Low-speed rolling bearing fault diagnosis based on EMD denoising and parameter estimate with alpha stable distribution[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2017, 31(4): 1587-1601.
- [9] YANG Y, Yu Dejie, CHENG J. A roller bearing fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN[J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 294(1): 269-277.
- [10] JIANG F, ZHU Z, LI W. An improved VMD with empirical mode decomposition and its application in incipient fault detection of rolling bearing[J]. IEEE Access, 2018(99): 1.
- [11] HYVÄRINEN A, KARHUNEN J, OJA E. Independent component analysis[M]. John Wiley & Sons, 2004: 234-235.
- [12] HYVÄRINEN A, OJA E. Independent component analysis: algorithms and applications[J]. Neural Networks, 2000, 13(4): 411-430.
- [13] AÏSSA I, KARIM A M, DANIEL L G. Blind signal separation and equalization with controlled delay for MIMO convolutive systems[J]. Signal Process, 2010, 90: 2655-2666.
- [14] DAVIES M E, JAMES C J. Source separation using single channel ICA[J]. Signal Processing, 2007, 87: 1819-1832.
- [15] HYVÄRINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 626-634.
- [16] CARDOSO J F, SOULOUMIAC A. Blind beamforming for non-Gaussian signals[J]. Radar & Signal Processing IEE Proceedings, 1993, 140(6): 362-370.

(收稿日期: 2020-10-19)

作者简介:

冯平兴(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 盲信号处理、故障信号检测。

张洪波(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 信号传输与检测、新一代通信系统。



扫码下载电子文档

(上接第 70 页)

- principle composition analysis based features selection[C]. 2017 Computing Conference, London: IEEE, 2017: 294-296.
- [17] WANG L X, GUO S T, JIA C J. Recognition of digital modulation signals based on wavelet amplitude difference[C]. 2016 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science(ICSESS), Beijing: IEEE, 2016: 627-630.
- [18] REICHERT J. Automatic classification of communication signals using higher order statistics[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, San Francisco: IEEE, 1992: 221-224.
- [19] 范海波, 杨志俊, 曹志刚. 卫星通信用调制方式的自动识别[J]. 通信学报, 2004, 25(1): 140-149.
- [20] LIU G H, XU M T. Research on a modulation recognition method for the FBMC-OQAM signals in 5G mobile communication system[C]. 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA), Wuhan: IEEE, 2018: 2544-2547.
- [21] 李剑强, 崔伟亮, 江桦, 等. OQAM/OFDM 信号二阶循环平稳性分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1076-1081.
- [22] 刘双平, 闻翔, 金梁. 一种抑制符号速率估计背景色噪声的非线性滤波算法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 95-99.

(收稿日期: 2020-10-30)

作者简介:

邵凯(1977-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 多址接入、多载波传输。

李慧(1994-), 通信作者, 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 多址接入, E-mail: 1287170320@qq.com。

周娟红(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 多址接入。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所