

◇ 研究报告 ◇

基于循环前缀相关性的水声 OFDM 信号调制识别*

江伟华^{1,2} 陈东升^{1,2} 吴燕艺^{1,2} 童峰^{1,2†}

(1 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)

(2 厦门大学海洋与地球学院 厦门 361005)

摘要 为解决非合作通信系统中水声 OFDM 信号的类型识别,本文研究水声 OFDM 通信信号与常见单载波水声数字通信信号 (MPSK, MFSK) 之间的调制识别问题。考虑到水声信道复杂传播特性对循环前缀相关性的影响,本文通过截取信号前后片段并迭代搜索双相关峰进行无需先验知识的水声 OFDM 通信信号特征参数提取,在此基础上设计了一种基于模糊系统的水声 OFDM 通信信号识别器。对不同信道条件下海上实录信号数据的识别实验结果表明了本文方法的有效性。

关键词 水声 OFDM 通信信号,相关性,调制识别,模糊系统

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2016)01-0042-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.01.007

Modulation recognition of underwater acoustic OFDM signals based on the correlation property of the cyclic prefix

JIANG Weihua^{1,2} CHEN Dongsheng^{1,2} WU Yanyi^{1,2} TONG Feng^{1,2}

(1 Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology MOE, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(2 College of Ocean & Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract In order to identify the type of underwater acoustic OFDM signal in non-cooperative communication system, in this paper, the method to discriminate the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) from common single-carrier digital underwater acoustic communication signals (e.g. MPSK, MFSK) over underwater acoustic channels has been investigated. Considering the correlation characteristics of the cyclic prefix (CP) at the presence of the doubly selective underwater acoustic channels, an iterative dual-peak searching strategy is proposed to extract the CP correlation peak feature without prior knowledge, as the input vector of a fuzzy recognition system for modulation recognition of OFDM signals. The experimental results of modulation classification obtained with field signals at three different underwater acoustic channels show that the proposed method has good performance.

Key words OFDM underwater acoustic communication signal, Correlation, Modulation recognition, Fuzzy systems

2015-04-21 收稿; 2015-10-03 定稿

*国家自然科学基金项目 (11274259, 11574258), 福建省自然科学基金项目 (2015J01172)

作者简介: 江伟华 (1991-), 男, 福建龙海人, 硕士研究生, 研究方向: 水声信号处理。

† 通讯作者 E-mail: ftong@xmu.edu.cn

1 引言

OFDM(Orthogonal frequency division multiplexing)是一种在无线通信中已得到广泛应用的多载波调制技术,具有频谱效率高、抗码间干扰能力强等优点,近几年来OFDM系统在水声通信中受到越来越广泛的研究和应用。如厦门大学陈楷等^[1]在DSP平台上设计了基于DSSS(直接序列扩频)和OFDM的双模水声通信系统;中科院声学所蔡惠智等^[2]设计了采用QAM、MPSK、QPSK等多种调制方式的OFDM水声通信系统;哈尔滨工程大学王巍等研究了移动条件下的OFDM实时通信系统^[3];以及商用的水声通信产品如Aquasent公司的AMN-OFDM系列水声modem^[4]。因此,在海洋监测、海洋权益维护等领域对水声OFDM通信信号调制类型的识别研究也变得非常重要。而目前的水声通信信号调制研究工作主要集中在MFSK, MPSK等常见单载波数字通信体制的识别上^[5-6],较少涉及到水声OFDM通信信号类型识别。

水声信道多径干扰强烈、时间稳定性差,具有典型的时-空-频域非平稳特性,对水声OFDM通信信号的识别带来很大困难。因此,无线信道中OFDM通信信号的经典调制识别方法^[7-11]无法直接应用在水声信道中。如,考虑到不含噪声的OFDM多载波调制信号在任意时刻服从正态分布,Walter^[7]采用高阶统计量作为识别特征较早提出了理想高斯信道下的多载波与单载波的分类算法,但在水声时变信道情况下识别性能会急剧恶化。Wang等^[8]利用矩和功率估计联合进行识别,这种算法对时变瑞利信道下的信号虽然有很高的正确识别率,但此算法受信道径数影响较大,对复杂信道的适应能力差,且算法复杂度高,计算量较大。

循环前缀是OFDM信号中的显著特征,其自相关系数有不为零的属性。根据此特征,邓思玉等^[12]提出一种基于信号能量归一化自相关的识别算法。通过对接收信号的自相关计算,OFDM信号在延迟为零或有用信号长度时出现峰值,单载频信号只在延迟为零时出现峰值,作为特征对两者进行调制识别。而OFDM信号在延迟为有用信号长度处的峰值与循环前缀的长度有关,循环前缀越短,相关性也就越差,峰值也就越小。但是,考虑到时-空-频域非平稳的水声通信信道中,特别是获取的OFDM信

号信噪比低(部分噪声幅度可能会超过峰值)或信道时变明显时,循环前缀的相关特性也将变得微弱、不稳定,给水声OFDM通信信号调制识别带来很大的影响。

对于循环前缀的相关峰搜索,一方面,采用过短的相关长度会导致相关峰弱,而在过长的相关长度下水声信道时变特性同样将造成相关性下降^[13]。针对这一问题,本文采取迭代搜索方法进行信号相关长度的优化,即:截取信号帧前端和末端一定长度的信号片段分别与完整信号帧进行相关分析,通过逐次改变截取的信号片段长度进行双相关峰迭代搜索,提取OFDM信号循环前缀特征参数。在水声信道复杂的传输条件下,本文采用迭代搜索可截取合适长度的信号片段进行相关峰检测、提取循环前缀特征参数,从而提高识别性能。

水声信道下多普勒频移、相位畸变、噪声等恶劣条件同样对识别器的设计提出了更高的要求,在大多数情况下,采用简单的门限检测或经典的人工神经网络^[14]等识别器仍然很难达到满意的识别性能。模糊系统由于能够用精确数学模型描述人类主观的认知从而模拟人类处理问题的过程,已被广泛应用于模式识别、自动控制、信号处理等领域。付晓霞等^[15]提出了一种提取信号的特征并与模糊系统结合的调制信号的识别方法,通过计算机仿真实验证明了该方法的可行性。模糊系统已广泛应用于水声信号识别分类中^[16],获得较好的识别效果。

本文针对水声信道条件下OFDM通信信号的调制识别问题,采用截取信号前后片段同时搜索双相关峰进行循环前缀相关特征参数的迭代提取,并设计模糊识别系统对OFDM信号与单载波信号(MPSK, MFSK)进行调制方式识别。由于在水声OFDM通信信号中CP-OFDM信号的应用较为普遍,本文主要考虑对CP-OFDM信号的识别。在不需任何先验知识的条件下对海上实录信号的调制识别实验结果表明了本文方法的有效性。

2 算法描述

2.1 信号模型

OFDM信号将串行高速数据流变换成为若干路并行低速数据流,每路低速数据被调制在彼此正交的子载波上,然后所有子载波叠加在一起构成发送信号。OFDM信号的复基带信号可表示为^[17-19]

$$S_{\text{OFDM}}(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{K-1} c_{k,l} \exp[j2\pi k \Delta f_K (t - lT)] \times g(t - lT), \quad (1)$$

单载波信号的复基带信号可表示为

$$S(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} c_l g(t - lT), \quad (2)$$

式(1)~式(2)中: K 是子载波数; $g(t)$ 是成形脉冲; Δf_K 是相邻子载波的频率间隔; T 是符号周期; c_l 表示单载波信号第 l 个符号周期内传输的符号; $c_{k,l}$ 表示 OFDM 信号第 l 个符号周期内第 k 个子载波的符号; 数据符号 $\{c_l\}$ 、 $\{c_{k,l}\}$ 均是独立同分布的随机变量, 其均值为零, 方差为 δ_c^2 , 可见 OFDM 信号只有在同一符号, 同一子载波下的数据才具有相关性。对于 OFDM 信号, $T = T_{cp} + T_u$, 其中 T_{cp} 表示循环前缀长度, $T_u = 1/\Delta f_K$ 为有用符号周期。

2.2 OFDM 信号循环前缀的相关性分析

OFDM 信号的循环前缀是设计用来减小多径对 OFDM 信号的影响, 由于循环前缀是 OFDM 符号中部分有用信号的直接复制, 因此循环前缀和有用信号具有相关性; 同时, 由于单载波信号的传输符号独立同分布, 只有延迟为零时才具有相关性。因此, 根据此特征可进行 OFDM 信号调制识别。

假设接收到完整的水声通信信号帧 $x(t)$, 长度为 L 。本文通过截取完整信号帧前端一定长度的信号片段 $x_{\text{front}}(t)$, 以及信号帧末端一定长度的信号片段 $x_{\text{end}}(t)$, 并分别与 $x(t)$ 作相关处理。在实际水声通信系统中, 考虑到 OFDM 信号插入过长的循环前缀将导致降低通信效率降低, 而过短的循环前缀抑制多径效果差, 因此大多数水声 OFDM 通信系统的循环前缀长度取值在一个适中的范围内^[20]。故本文中设置循环前缀的长度范围为 $10 \sim 40$ ms, 本文方法设计截取的信号片段长度为 $10 \text{ ms} \leq L_x \leq 40 \text{ ms}$ 。截取的信号片段为

$$x_{\text{front}}(t) = x(1 : L_x), \quad (3)$$

$$x_{\text{end}}(t) = x(\text{end} - L_x + 1 : \text{end}). \quad (4)$$

计算接收信号和前后端信号片段的相关性:

$$R_{x_{\text{front}}}(t, m) = E[x(t) \cdot x_{\text{front}}^*(t + m)], \quad (5)$$

$$R_{x_{\text{end}}}(t, m) = E[x(t) \cdot x_{\text{end}}^*(t + m)], \quad (6)$$

式(5)~式(6)中 E 表示求期望, m 表示时延, $*$ 表示取共轭。在理想情况下, 若信号为 OFDM, 由于

OFDM 符号末端信号与截取的信号片段存在相关性, $R_{x_{\text{front}}}(t, m)$ 和 $R_{x_{\text{end}}}(t, m)$ 分别有两个相关峰, 两个相关峰之间的间隔即为 OFDM 符号长度和循环前缀之间的差值; 而单载波信号则只存在有一个相关峰。根据以上分析, 可以利用检测到的两个相关峰间隔来进行单载波信号与多载波信号之间的调制识别。

3 OFDM 信号循环前缀特征参数提取

对于 OFDM 水声通信信号, 水声信道随机、复杂时-频扩展特性引入的信号畸变是影响水声通信信号调制识别性能的重要影响因素, 采用传统的信号自相关处理方法^[12]时, 过短的相关长度下相关峰不够突出, 而过长的相关长度下信道时变特性同样造成相关性下降^[13], 往往无法正确提取循环前缀的特征参数。

针对以上问题, 本文分别从信号帧前端和末尾截取出的信号片段与信号帧进行相关处理, 并通过逐次改变截取信号片段的长度进行双相关峰迭代搜索, 从而提高循环前缀相关特征的检测性能, 抑制水声信道条件下循环前缀短、相关性差, 以及特征非平稳造成的检测困难。

正确、有效的确定非合作通信信号中 OFDM 信号帧的首端和尾端是识别中非常重要的一步。信号的端点检测技术可以从一段信号中准确的确定其起始点和终止点。有效的端点检测技术能在识别系统中减少数据的排除噪声段的干扰, 提高识别率。本文通过传统的基于短时能量和短时过零率的双门限端点检测算法^[21]检测 OFDM 信号帧的首端和尾端。本文方法实现循环前缀特征参数迭代提取的框图如图 1 所示。

具体的特征参数提取的步骤为

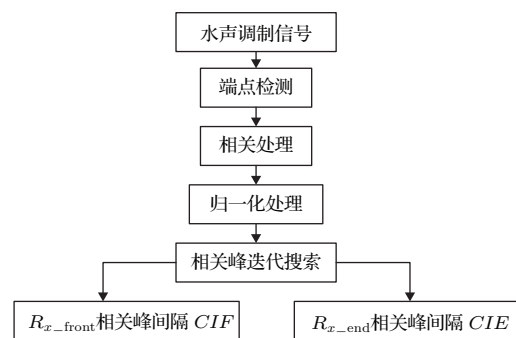


图1 特征参数迭代提取

Fig. 1 Iterative extraction of characteristic parameters

(1) 定义截取的信号片段的初始长度 $L_x = \lambda$, 初始长度迭代步长 $\text{step} = \lambda$, 门限值 th1 。

(2) 端点检测。通过端点检测技术确定完整的OFDM信号帧。

(3) 相关处理。从信号帧的起始端和末尾截取出长度为 L_x 的信号片段, 分别根据式(5), 式(6)进行相关处理, 相关结果为 $R_{x_front}(t, m)$, $R_{x_end}(t, m)$ 。

(4) 对相关结果进行归一化处理。

(5) 相关峰迭代搜索。设定门限值 th1 截取出大于门限值的峰值, 将小于该门限值的相关值归零, 并对相关峰进行平滑处理。

(6) $R_{x_front}(t, m)$ 相关峰间隔 CIF 提取。搜索 $R_{x_front}(t, m)$ 在信号起始端(即时延 $m = 0$ 处)存在的自相关峰, 并以自相关峰位置为中心在设定的OFDM符号长度范围(即时延 $20 \text{ ms} < m < 80 \text{ ms}$)内进行互相关峰搜索, 若检测到互相关峰后记录互相关峰与自相关峰的间隔为 CIF 参数并输出。若 CIF 参数提取失败, 则以迭代步长 step 更改 L_x 值重新截取信号片段, 跳至步骤(3)继续进行双相关峰迭代搜索。

(7) $R_{x_end}(t, m)$ 相关峰间隔 CIE 参数提取。类似步骤(6)进行双相关峰的搜索: 即先搜索 $R_{x_end}(t, m)$ 在信号末端(时延 $m = L - L_x + 1$ 处)的自相关峰, 如果存在该峰值则在对应OFDM符号长度范围内进行互相关峰搜索, 记录互相关峰与自相关峰间隔为 CIE 参数。若 CIE 参数提取失败, 则以迭代步长 step 更改 L_x 值重新截取信号片段, 跳至步骤(3)继续进行双相关峰迭代搜索。

(8) 特征参数集的构成。把步骤(5), 步骤(6)返回的相关峰间隔 CIF, CIE 值作为调制识别的特征参数集。

对某浅海水声信道获取的水声OFDM通信信号, 分别采用本文双相关峰迭代搜索方法以及信号能量归一化自相关方法^[12]进行循环前缀特征提取, 图2(a)为信号能量归一化自相关方法检测结果, 其中相关计算采用接收到的一帧信号长度为 52.25 ms ; 图2(b), 2(c), 2(d)为本文方法截取的不同长度的前端信号片段与完整信号帧相关的结果图, 其中图2(b)中截取的信号片段长度 $L_x = 10 \text{ ms}$, 图2(c)中 $L_x = 5 \text{ ms}$, 图2(d)中 $L_x = 30 \text{ ms}$ 。

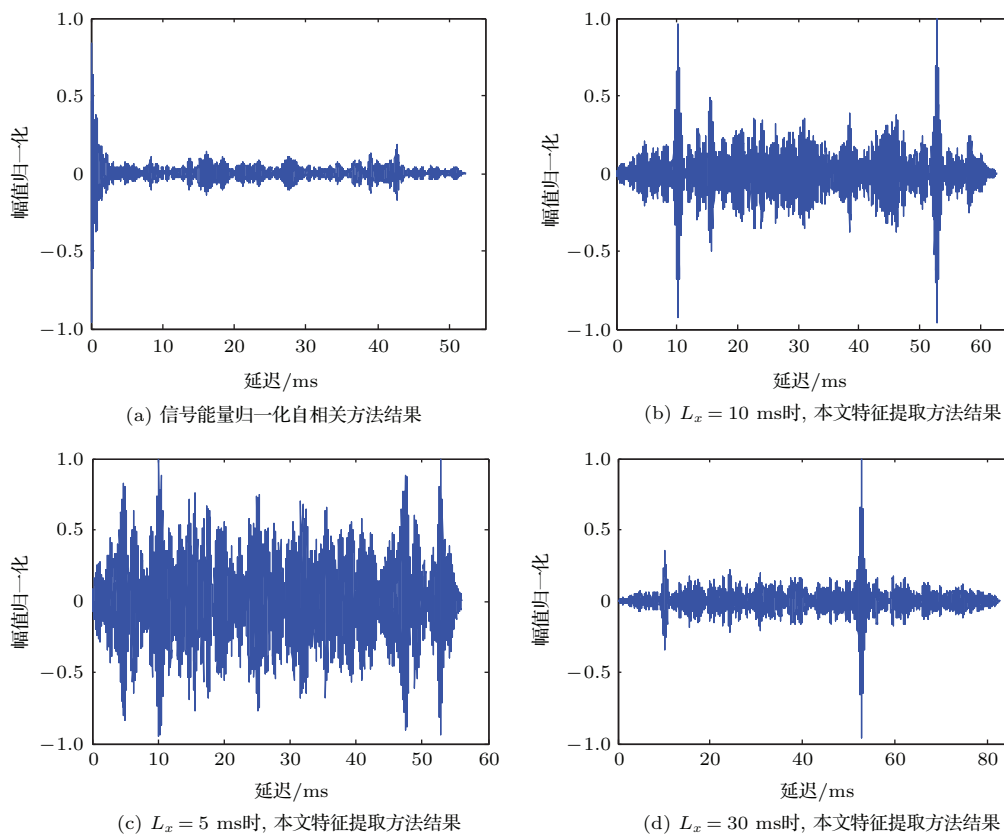


图2 循环前缀特征提取方法分析

Fig. 2 The analysis of the cyclic prefix feature extraction method

从图2(a)中可以看出,对OFDM信号进行自相关处理后可在零时延处获得明显的自相关峰值,但由于水声信道中时变、多径以及非高斯背景噪声的影响,体现循环前缀特点的互相关峰变得极其微弱,检测困难。信号能量归一化自相关方法通过对整帧的信号进行自相关的处理,来获取相关峰。当信号帧的长度较短时,自相关长度变短,而只有当循环前缀和有用信号之间的长度比值发生了变化,才有可能改善两峰的对比。图2(b)中,本文方法在 $L_x = 10\text{ ms}$ 时获得的相关结果存在两个明显的相关峰,对比图2(b),2(c),2(d)可看出,在水声信道条件下采用过大或者过小的 L_x 值,双相关峰检测性能均下降,而本文特征提取方法采用迭代搜索可在合适的 L_x 值下进行双相关峰检测提取循环前缀特征参数,从而提高双相关峰检测性能。同时,由于本文采用的是自相关进行相关峰搜索,其信道匹配效果优于拷贝相关^[22],因而对不同的水声信道多径结构具有较好的适应性。

4 基于模糊系统的OFDM信号调制识别方法

模式识别系统可充分利用人在长期观察、实践中积累的知识、经验,通过采用定性、模糊的语言规则的形式对这些知识、经验进行描述形成推理逻辑,将检测过程输出量与设定值相比较,经过逻辑推理得到检测结果,从而提高识别性能。本文模糊识别器根据2.2小节提取的特征 CIF, CIE 参数进行水声OFDM通信信号自动识别。模糊识别器的实现框图如图3所示。

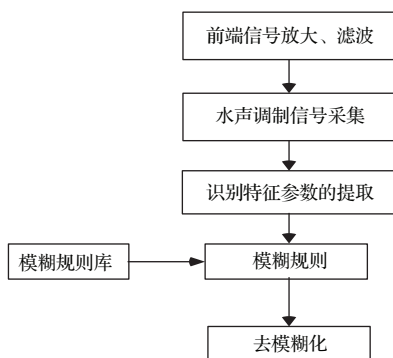
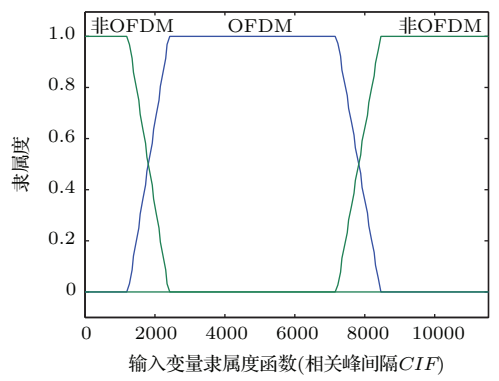


图3 模糊系统示意图

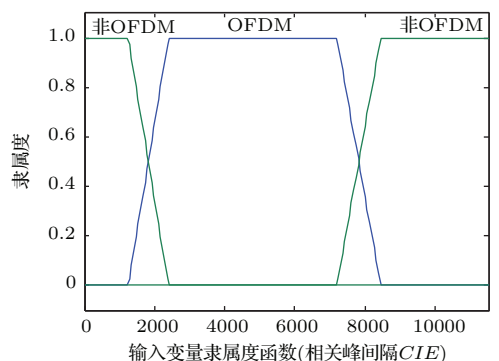
Fig. 3 Flow chart of fuzzy system

(1) 首先从采集到的水声信号中提取出调制识别的特征参数,该特征信息反映了水声信号是OFDM信号的可能程度。

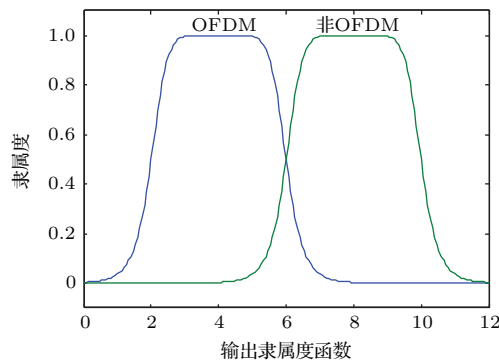
(2) 利用Matlab模糊系统工具箱建立对应的模糊系统的输入隶属度函数,如图4(a),4(b)所示,两个输入变量之间为or的关系,进行特征信息精确参数到相应模糊集的转化;以及对应的输出隶属度函数,如图4(c)所示。



(a) 输入变量隶属度函数CIF



(b) 输入变量隶属度函数CIE



(c) 输出隶属度函数

图4 模糊系统隶属度函数

Fig. 4 The membership function of fuzzy system

(3) 建立模糊规则

若 CIF 小, CIE 小,则OFDM可能性小;
 若 CIF 中, CIE 小,则OFDM可能性大;
 若 CIF 大, CIE 小,则OFDM可能性小;
 若 CIF 小, CIE 中,则OFDM可能性大;

若 CIF 大, CIE 中, 则 OFDM 可能性大;
 若 CIF 中, CIE 中, 则 OFDM 可能性大;

.....

(4) 用重心法对输出隶属度曲线进行解模糊, 根据解模糊结果进行是否 OFDM 调制类型的模糊提取。

5 实验与分析

5.1 调制识别实验设置

为验证本文水声调制识别方案的有效性, 采用 3 个不同海域水声信道(本文中分别以信道 1、信道 2、信道 3 表示) 获取的水声通信实验信号数据进行 OFDM 调制识别实验。表 1 给出了 3 个不同水域实验信道的具体参数, 图 5 给出了 3 个信道的冲激响应, 从图 5 中可以看出两个实验信道具有不同类型的水声信道特性, 信道 1、信道 3 具有较为明显的多径, 信道 2 多径较为微弱。表 1 中同时给出了表征信道时变的多普勒频偏参数, 可以看出实验信道均带有一定的多普勒效应, 其中信道 1 多普勒为 2.0 Hz, 稍高于其他 2 个实验信道。

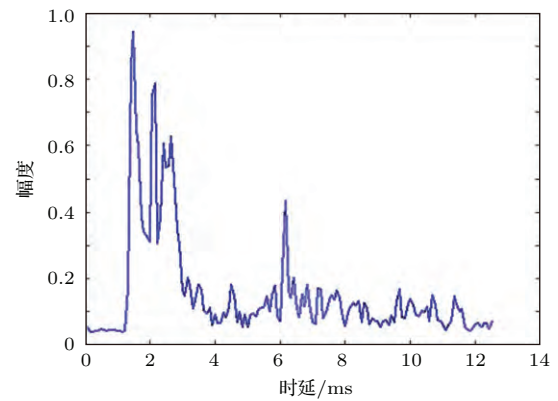
表 1 实验信道参数

Table 1 The parameters of three channels

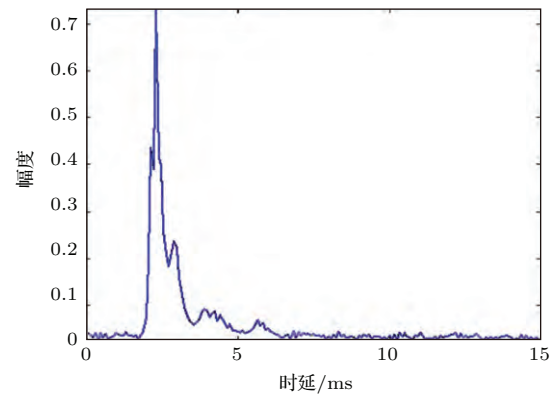
信道	信道参数			
	水深 (m)	距离 (m)	接收信号 信噪比 (dB)	多普勒 (Hz)
信道 1	10	1000	10	2.0
信道 2	18	4000	7	1.3
信道 3	15	500	25	1.0

从 3 个不同信道获取的 858 个水声通信实验信号具有以下 3 类调制类型: OFDM、MFSK、MPSK。其中: OFDM 信号 406 个, MFSK, MPSK(包括 2FSK, 4FSK, 8FSK, BPSK, QPSK) 信号 452 个。信号样本的采样率 96 kHz, 16 bit 量化。表 2 中给出了水声通信信号数据样本中各种调制信号的调制参数。

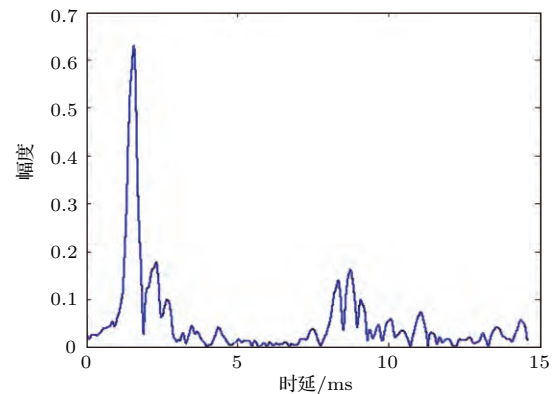
海上实验接收信号后经前置放大、带通滤波预处理后通过模拟数字采集卡转换为数字信号送入计算机中进行离线处理。通过对采集到的水声通信信号进行基于循环前缀相关特征参数提取, 提取的相关峰特征参数 CIF , CIE 构成特征向量输入



(a) 实验信道1



(b) 实验信道2



(c) 实验信道3

图 5 实验信道冲激响应

Fig. 5 The impulse responses of the experimental channels

模糊识别器, 进行 OFDM 水声通信信号调制识别实验。

5.2 实验结果与分析

表 3 给出了在 3 个不同信道条件下 OFDM 水声调制信号识别率。从表 3 可看出, 总体上 3 个不同海域信道的水声 OFDM 通信信号识别率都在 91% 以上, 误判率低于 5%。同时, 在大致相同的原始

信噪比下,强多径的信道1和弱多径的信道2相比OFDM信号识别率低2.04%,而误判率高2.2%;另一方面,虽然信道3的信号信噪比明显高于信道2,但由于信道3多径明显,因此信道3和信道1的OFDM信号识别率区别不大。体现出水声信道多径严重程度以及接收信号信噪比对OFDM调制识别性能的影响。

进一步挑选原始信噪比较高的信道1、信道3信号样本叠加海上实录噪声进行不同信噪比下的识别性能分析。图6给出了在不同信噪比情况下实验信道1和信道3的OFDM信号识别结果。从图6中可看出,随着信噪比的下降识别率虽呈下降趋势,但在较高信噪比条件下识别率的下降趋势较缓,特别是在信噪比大于7 dB时OFDM信号识别率仍

达到了85%以上,表明本文方法具有较好的噪声容忍性。

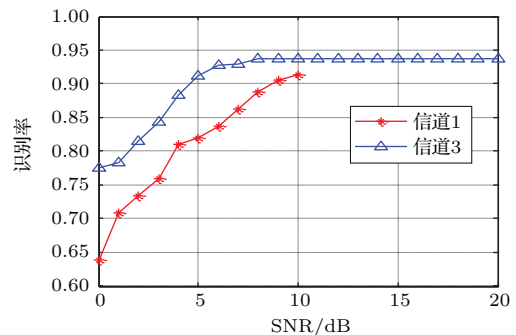


图6 不同信噪比条件下的水声OFDM信号识别性能曲线

Fig.6 Recognition performance of OFDM signal under different SNR

表2 水声通信信号调制参数

Table 2 Modulation parameters of experimental signals

调制类别	调制信息			
	FFT 点数	循环前缀长度 (ms)	载波频率 (kHz)	符号速率 (bps)
OFDM	4096	10.67	NA	NA
非 OFDM (MFSK)	NA	NA	15.5	187.5
			16	93.75
非 OFDM (MPSK)	NA	NA	15	3200
			16	1600

表3 不同信道条件下水声OFDM信号识别率(%)

Table 3 The recognition rate of underwater acoustic modulation signal under different channel type (%)

调制方式	信道 1		信道 2		信道 3	
	OFDM	非 OFDM (MFSK, MPSK)	OFDM	非 OFDM (MFSK, MPSK)	OFDM	非 OFDM (MFSK, MPSK)
OFDM	91.27	4.45	93.31	2.25	93.66	1.72
非 OFDM (MFSK, MPSK)	8.73	95.55	6.69	97.75	6.34	98.28

6 结论

针对非合作水声OFDM通信信号调制识别,本文提出了一种基于模糊系统的水声OFDM通信信号调制识别方法,该方法基于循环前缀相关性特征通过迭代搜索双相关峰提取特征参数构成模糊输入集,利用模糊分类器对水声OFDM通信调制信号进行调制识别测试。实验结果初步表明本文方法

的识别率较高并且对不同水声信道具有较好的稳健性。

参 考 文 献

[1] 陈楷,周胜勇,童峰.一种基于DSP的双模水声通信系统[J].厦门大学学报:自然科学版,2012,51(1):37-40.
CHEN Kai, ZHOU Shengyong, TONG Feng. A dual mode

- underwater communication system based on DSP[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2012, 51(1): 37–40.
- [2] 蔡惠智, 刘云涛, 蔡慧, 等. 水声通信及其研究进展[J]. 物理, 2006, 35(12): 4–27.
CAI Huizhi, LIU Yuntao, CAI hui, et al. Research improvement of underwater acoustic communication[J]. Physics, 2006, 35(12): 4–27.
- [3] 王巍, 尹艳玲, 刘沁佐, 等. 基于频域变采样的 OFDM 水声移动通信多普勒补偿算法[J]. 声学技术, 2013, 32(1): 54–58.
WANG Wei, YIN Yanling, LIU Songzuo, et al. Doppler compensation of using frequency domain re-sampling in underwater acoustic mobile OFDM communication[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(1): 54–58.
- [4] Chesapeake bay interpretive buoy system. New modem provides more-reliable data from bottom sensor at gooses reef [EB/OL]. [2015-02-17]. <http://buoybay.noaa.gov/news/new-modem-provides-more-reliable-data-bottom-sensor-gooses-reef>.
- [5] WU Z, YANG T C, LIU Z, et al. Modulation detection of underwater acoustic communication signals through cyclostationary analysis[C]//Military Communications Conference, 2012-MILCOM 2012. IEEE, 2012: 1–6.
- [6] 杨柳, 赵晓群, 徐静云. 水声信号的调制方式识别[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(2): 156–162.
YANG Liu, ZHAO Xiaoqun, XU Jingyun. Recognition of underwater acoustic signal modulation[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(2): 156–162.
- [7] WALTER A. Detection of multicarrier modulations using 4th-order cumulants[C]//IEEE MILCOM 1999: 432–436.
- [8] WANG B, GE L. A novel algorithm for identification of OFDM signal [C]// IEEE WCNC. 2005: 261–264.
- [9] DOBRE O A, PUNCHIHEWA A, RAJAN S, et al. On the cyclostationarity of OFDM and single carrier linearly digitally modulated signals in time dispersive channels with applications to modulation recognition[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, 2008.
- [10] 曹鹏, 彭华, 董延坤, 等. 一种基于循环前缀的 OFDM 盲检测及参数估计算法[J]. 信息工程大学学报, 2010, 11(2): 196–200, 227.
CAO Peng, PENG Hua, DONG Yankun, et al. Blind detection and parameter estimation algorithm for OFDM signals based on cyclic prefix[J]. Journal of Information Engineering University, 2010, 11(2): 196–200, 227.
- [11] 张路平, 王建新, 马宁. 多径信道下 OFDM 信号和单载波信号的盲识别[J]. 宇航学报, 2012, 33(9): 1289–1294.
ZHANG Luping, WANG Jianxin, MA Ning. Blind recognition of OFDM signal and single-carrier signals in multipath channel[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(9): 1289–1294.
- [12] 邓思玉, 巴斌, 吴瑛, 等. 基于循环前缀相关性的 OFDM 调制识别算法[J]. 信息工程大学学报, 2012, 13(4): 448–453, 459.
DENG Siyu, BA Bin, WU Ying, et al. Modulation recognition of OFDM based on the correlation property of the cyclic prefix[J]. Journal of Information Engineering University, 2012, 13(4): 448–453, 459.
- [13] FREITAG L, STOJANOVIC M, SINGH S M, et al. Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread-spectrum acoustic communication[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 586–593.
- [14] AZZOUZ E E, NANDI A K. Automatic analogue modulation recognition-II[J]. Journal of the Franklin Institute, 1997, 334(12): 275–305.
- [15] 付晓霞, 阔永红. 基于模糊系统的调制信号自动识别方法[J]. 电子技术应用, 2006, 32(12): 121–123.
FU Xiaoxia, KUO Yonghong. Automatic modulation classification based on fuzzy system[J]. Application of Electronic Technique, 2006, 32(12): 121–123.
- [16] 童峰, 陆佳人, 方世良. 水声目标识别中一种轴频提取方法[J]. 声学学报, 2004, 29(5): 398–402.
TONG Feng, LU Jiren, FANG Shiliang. A method to estimate the propeller shaft rate in underwater acoustic vessel classification[J]. Acta Acustica, 2004, 29(5): 398–402.
- [17] PUNCHIHEWA A, DOBRE O A, RAJAN S, et al. Cyclostationarity based algorithm for blind recognition of OFDM and single carrier linear digital modulations[C]//Proc. The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: IEEE Press, 2007: 1–5.
- [18] PUNCHIHEWA A, ZHANG Q, DOBRE O A, et al. On the cyclostationarity of OFDM and single carrier linearly digitally modulated signals in time dispersive channels: theoretical developments and application[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(8): 2588–2599.
- [19] 蒋清平, 杨士中, 张天骐. OFDM 信号循环自相关分析及参数估计[J]. 华中科技大学学报, 2010, 38(2): 118–121.
JIANG Qingping, YANG Shizhong, ZHANG Tianqi. Cyclic autocorrelation analysis and parameter estimation of OFDM signals[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2010, 38(2): 118–121.
- [20] 王明华. 高速水声通信中 OFDM 的关键技术与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [21] 路青起, 白燕燕. 基于双门限两级判决的语音端点检测方法[J]. 电子科技, 2012, 25(1): 13–19.
LU Qingqi, BAI Yanyan. A speech endpoint detection algorithm based on dual-threshold two sentences[J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(1): 13–19.
- [22] 陆铭慧, 张碧星, 汪承灏. 时间反转法在水下通信中的应用[J]. 声学学报, 2005, 30(4): 349–354.
LU Minghui, ZHANG Bixing, WANG Chenghao. Application of time reversal in underwater communication[J]. Acta Acustica, 2005, 30(4): 349–354.