

[引用格式] 李斌, 郑思远, 曹秀岭, 等. 一种 AUV 移动 OFDM 水声通信系统设计[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(5): 612-617.

一种 AUV 移动 OFDM 水声通信系统设计

李斌^{1,2}, 郑思远^{1,2}, 曹秀岭^{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, 福建 厦门, 361002; 2. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门, 361002)

摘要: 针对水声信道多径效应和多普勒频偏对移动正交频分复用(OFDM)水声通信产生的严重载波间干扰(ICI)和码间干扰(ISI), 采用时频差分编码方案, 互相关函数方法进行多普勒估计, 变采样率重采样进行多普勒补偿, 设计并实现了一种面向自主式水下航行器(AUV)的、易于工程实现的低复杂度移动 OFDM 水声通信系统。该系统能够有效避免残余多普勒补偿的问题, 同时对多径信道表现出一定程度的稳健性。海试结果表明, 该系统可在浅海信道复杂多径和一定多普勒影响的条件下正常工作, 实现了移动 OFDM 水声通信。

关键词: 自主式水下航行器; 移动通信; 正交频分复用; 时频差分; 多普勒估计

中图分类号: U674.941; TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2018)06-0612-06

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2018.06.016

Design on Mobile OFDM Underwater Acoustic Communication System for an AUV

LI Bin^{1,2}, ZHENG Si-yuan^{1,2}, CAO Xiu-ling^{1,2}, TONG Feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of Minister of Education, Xiamen University, Xiamen 361002, China; 2. College of Ocean & Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361002, China)

Abstract: For the serious effects of inter-carrier interference(ICI) and inter-symbol interference(ISI) caused by the multipath and Doppler shift on mobile orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) underwater acoustic communication in underwater acoustic channel, the time-frequency differential coding, cross-correlation function and resample with variable sampling rate are adopted to resist the Doppler effect. Subsequently, a low-complexity mobile OFDM underwater acoustic communication system, which is easily implementable in engineering, is designed for an autonomous undersea vehicle(AUV). The communication system can avoid the residual Doppler compensation effectively, and it shows a certain degree of robustness to multipath channel. Sea trial results show that the system can work normally under shallow sea channel with complex multipath and certain Doppler effect, and realize mobile OFDM underwater acoustic communication.

Keywords: autonomous undersea vehicle(AUV); mobile communication; orthogonal frequency division multiplexing(OFDM); time-frequency differential; Doppler estimation

0 引言

随着海洋资源开发利用的深入, 自主式水

下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)作为探查和利用海洋的重要载体, 因其安全性、灵活性及功耗低等优点, 被广泛应用于海底地

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2018-12-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(11574258).

作者简介: 李斌(1990-), 男, 在读博士, 主要研究方向为水声通信与水声信号处理.

形地貌勘探、海洋资源勘测、海底管网铺设与维护、水声网络动态通信中继及水下情报搜集等领域^[1-3]。水声通信技术在掌握 AUV 在水下的活动情况以及将 AUV 携带的各种传感器数据实时上传给水面控制母船中扮演着至关重要的角色, 然而由于 AUV 实时移动的特性, 导致其所对应的水声信道具有高动态的多径和多普勒双重扩展特征, 严重影响了 AUV 和母船之间的实时信息交互。

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)具有较高的数据传输效率、频谱利用率以及较强的抗多径能力, 能够有效抵抗码间干扰(inter-symbol interference, ISI), 近年来成为 AUV 水声通信的研究热点^[4-5]。然而, 与传统的单载波通信系统相比, OFDM 通信系统对多普勒频偏和相位噪声更加敏感, 且 AUV 在水下的姿态倾角实时变化, 航速受流的影响起伏不定^[6], 产生的多普勒偏移和相位噪声会严重破坏 OFDM 子载波的正交性, 使其在水声通信中的应用受到信道时变性和多普勒频偏的限制^[7-8]。因此, 想要达到稳定的通信性能, 必须要对水声信道中广泛存在的多径和多普勒进行实时跟踪和补偿。科研工作者对此采取了一系列的措施: 王巍等^[9]利用频域变采样的方法实现了多普勒的快速补偿, 并结合编码反馈校验技术对系统的多普勒变化进行实时跟踪测量。冯成旭等^[10]改进了基于冗余循环前缀 OFDM 频域均衡算法, 引入多级缓冲和判决反馈机制, 实现了对水声信道中多径效应的有效抑制。普湛清等^[11]提出基于时频联合搜索的多普勒跟踪与快速补偿算法, 实现了对无人水下航行器平台时变多普勒的实时跟踪与快速补偿。然而由于水声信道的强时变及多普勒频移特性, 信道的精准估计往往十分困难, 上述信道估计与均衡算法性能可能受到参数设置、信噪比及算法收敛性等因素的严重影响。

差分编码因其强抗干扰能力、复杂度低及信道适应性好等优点被广泛用于水声通信中。在单载波系统中, 差分编码通常在时域上进行, 而对于多载波的 OFDM 系统而言, 差分编码既可在时域上进行, 也可在频域上进行。Hass 等^[12]的研究表明, 在多径效应严重的信道中, 时域差分编码效果更优; 在多普勒频移严重的信道中, 频域

差分编码效果更为显著。而在实际水声信道中, 多径效应和多普勒频偏往往同时存在, 即存在非一致性的多普勒, 因此考虑在时域及频域上进行双重差分调制解调, 即时频差分 OFDM 方案^[13], 该方案系统复杂度低, 适合于硬件设计实现, 因此成为研究的热点^[14-16]。时频差分编码系统的载波利用率仅为 50%, 这会导致系统传输效率下降。但相较传统的抗多径及多普勒算法而言, 在满足数据传输速率的前提下, 时频差分编码方案仍不失为一个较好的选择。

文中针对移动 OFDM 水声通信中多普勒估计和补偿问题, 设计并实现了一种面向 AUV 的、易于工程实现的低负载移动 OFDM 水声通信系统, 该系统采用时频差分编码方案, 互相关函数方法进行多普勒估计, 并利用变采样率重采样进行多普勒补偿。海试结果表明, 该系统可在浅海信道复杂多径和一定多普勒影响的条件下正常工作, 实现移动 OFDM 水声通信。

1 系统原理介绍

1.1 时频差分 OFDM

时频差分算法利用相邻符号及相邻子载波之间的相位差或幅值差进行检测, 通过时域和频域上的差分计算即可有效抑制信道变化的影响。此外, OFDM 调制技术能够有效对抗多径效应的影响, 且较单载波系统而言具有较高的频带利用率, 故文中采用时频差分 OFDM 水声通信方案, 设计并实现了一种面向 AUV 的移动水声通信系统, 系统实现框图如图 1 所示。

图 1 中, 系统的实现流程如下: 1) 信源端输

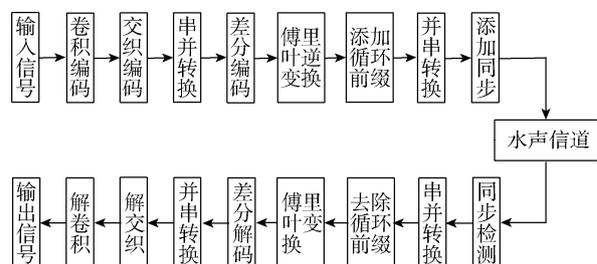


图 1 时频差分 OFDM 水声通信系统实现框图

Fig. 1 Block diagram of time-frequency differential orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) underwater acoustic communication system

入信号, 将输入信号转成二进制数据格式, 并进行信道编码, 其中包括卷积编码和等差交织编码; 2) 通过串并转换将编码后的串行数据转换为低比特并行数据流, 然后利用四相相对相移键控(differential quadrature reference phase shift keying, DQPSK)方式进行时频差分编码, 将时域信号转换成频域信号; 3) 对差分编码后的信号进行傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)运算, 将频域信号还原成时域信号并添加循环前缀; 4) 对通过并串转换后的数据进行添加同步帧操作, 同步帧采用对多普勒频偏不敏感的线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号; 5) 将添加同步后的信号经数模转换、功率放大后发射至水声信道中, 经信道传输后, 在接收端对接收信号进行同步检测, 然后进行与发射端相反的解调过程, 最终得到输出信号数据。

假设在 OFDM 系统中, 第 i 个 OFDM 符号第 n 个子载波上差分调制前的数据信息

$$D_{i,n} = e^{j\varphi_{i,n}} \quad (1)$$

其中, $\varphi_{i,n} \in \{0, 2\pi\}$ 为相位信息, $n = 0, 2, \dots, 2N - 1$ 。

差分调制后的数据信息

$$S_{i,n} = e^{j\Delta\varphi_{i,n}} \quad (2)$$

则第 $n+1$ 个子载波可表示为

$$S_{i,n+1} = e^{j\Delta\varphi_{i,n+1}} = e^{-j\Delta\varphi_{i,n}} \quad (3)$$

故经过差分调制后相邻 OFDM 符号上相同位置子载波相位存在以下关系

$$\Delta\varphi_{i,n} = \varphi_{i,n} + \Delta\varphi_{i-1,n} \quad (4)$$

而同一个 OFDM 符号上相邻子载波相位则存在以下关系

$$\Delta\varphi_{i,n+1} = -(\varphi_{i,n} + \Delta\varphi_{i-1,n}) \quad (5)$$

假设接收端接收到的第 i 个 OFDM 符号第 n 个子载波的数据信息为

$$R_{i,n} = A_{i,n} H_{i,n} e^{j(\Delta\varphi_{i,n} + \theta_{i,n})} + n_{i,n} \quad (6)$$

第 i 个 OFDM 符号第 $n+1$ 个子载波表示为

$$R_{i,n+1} = A_{i,n+1} H_{i,n+1} e^{j(\Delta\varphi_{i,n+1} + \theta_{i,n+1})} + n_{i,n+1} \quad (7)$$

式(6)和式(7)中: $A_{i,n}$ 和 $A_{i,n+1}$ 为幅值因子; $H_{i,n}$ 和 $H_{i,n+1}$ 为信道冲激响应; θ 为相位偏移; $n_{i,n}$ 和 $n_{i,n+1}$ 为白噪声。

分别提取第 n 个子载波中第 i 个和与之相邻的前一个 OFDM 符号的相位信息, 由式(4)和式(6)

经差分解调, 可得

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_{i,n} &= \psi_{i,n} - \psi_{i-1,n} = \\ &(\Delta\varphi_{i,n} + \theta_{i,n}) - (\Delta\varphi_{i-1,n} + \theta_{i-1,n}) = \quad (8) \\ &\varphi_{i,n} + (\theta_{i,n} - \theta_{i-1,n}) \end{aligned}$$

分别提取第 $n+1$ 个子载波中第 i 个和与之相邻的前一个 OFDM 符号的相位信息, 由式(5)和式(7)差分解调, 可得

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_{i,n+1} &= \psi_{i-1,n+1} - \psi_{i,n+1} = \\ &(\Delta\varphi_{i-1,n+1} + \theta_{i-1,n+1}) - (\Delta\varphi_{i,n+1} + \theta_{i,n+1}) = \quad (9) \\ &\varphi_{i,n} + (\theta_{i-1,n+1} - \theta_{i,n+1}) \end{aligned}$$

利用第 $n+1$ 个子载波得到的相位信息对第 n 个子载波的相位信息进行修正, 可得

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_{i,n}^* &= \frac{\hat{\varphi}_{i,n} + \hat{\varphi}_{i,n+1}}{2} = \\ &\frac{\theta_{i,n} - \theta_{i-1,n} + \theta_{i-1,n+1} - \theta_{i,n+1}}{2} + \varphi_{i,n} = \quad (10) \\ &\varphi_{i,n} + \Delta\theta \end{aligned}$$

式中, $\Delta\theta$ 与水声信道的特性相关。当信道中仅存在多径效应或仅存在多普勒效应时, 均有 $\Delta\theta = 0$, 此时 $\hat{\varphi}_{i,n}^* = \varphi_{i,n}$, 利用时频差分编码均可有效恢复初始相位信息, 达到解调目的。

然而在实际的水声信道中, 多径效应往往伴随着多普勒频偏, 即在信道中存在非一致性多普勒, 此时各子载波的频偏是非一致的。但当相邻 OFDM 符号的同一子载波或同一 OFDM 符号相邻子载波间的相位偏移差别不大时, 即 $\Delta\theta$ 仍在 DQPSK 检测阈内变化时, 仍可实现初始相位恢复。但当 $\Delta\theta$ 超出检测阈范围时, 时频差分检测方案对于多普勒频偏的抑制不再起作用, 故文中采用互相关函数^[17-18]方法对信道中存在的多普勒进行估计, 并利用变采样率重采样完成多普勒补偿过程。

1.2 多普勒估计与补偿

OFDM 系统利用多载波调制方式, 对频率的偏移十分敏感。多普勒频偏不仅会破坏各子载波间的正交性, 还会导致信号伸缩, 各子载波输出幅值减少, 从而引起强烈的 ISI。尤其对于面向 AUV 的移动水声通信场景, 若想获得稳健的通信性能, 多普勒的估计和补偿至关重要。

文中采用互相关函数方法对水声信道中存在的多普勒进行估计。将本地多普勒估计信号人为

添加不同的多普勒频偏, 分别与接收到的多普勒估计信号做相关运算, 找出相关性最强位置对应

的多普勒频偏, 即为估计的多普勒频偏值, 算法的实现框图如图 2 所示。

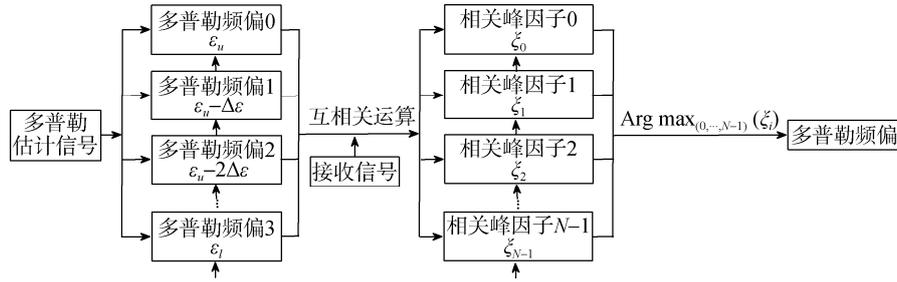


图 2 互相关多普勒估计算法实现框图

Fig. 2 Block diagram of cross-correlation algorithm for Doppler estimation

假设 x_t 和 y_t 分别为时域上的发射信号和接收信号, 则互相关函数可表示为

$$\xi(\varepsilon) = |x_t \otimes (y_t \cdot e^{-j2\pi\varepsilon(0,1,\dots,L_r-1)/f_s})| \quad (11)$$

式中: ε 为人为设置的多普勒频偏; L_r 为 y_t 的长度; f_s 为采样率; \otimes 定义为相关运算。则由互相关函数估计的多普勒可表示为

$$d = \arg \max_{\varepsilon \in (\varepsilon_l, \varepsilon_u)} [\xi(\varepsilon)] \quad (12)$$

式中: $(\varepsilon_l, \varepsilon_u)$ 为人为设置的多普勒频偏范围。

在利用互相关函数方法估计得到多普勒频偏后, 常规的多普勒补偿方案是利用插值或抽取的方式^[19-20]对接收信号进行重采样, 再对接收数据进行残余多普勒补偿, 此时各子载波的残余多普勒可近似为载波频偏(carrier frequency offset, CFO)。文中直接利用变采样率重采样的方式进行多普勒补偿, 从而避免了传统 OFDM 还需进行 CFO 补偿的问题。

2 海试试验验证

2.1 试验参数设置

为验证文中提出的面向 AUV 的移动水声通信系统在移动场景下的通信性能, 于 2018 年 1 月 18 日在厦门港附近海域进行了试验。试验海域平均水深约 10 m, 发射换能器固定在船 A 上, 船 A 锚定, 接收换能器固定在船 B 上, 船 B 以 3 kn 的速度驶向船 A, 用于模拟 AUV 移动场景。发射换能器与接收换能器布放深度均为 3 m, 试验开始前两船相距约 1.1 km。海试试验的参数如表 1 所示, 试验海域环境如图 3(a)所示, 试验时天气晴朗, 风速较大, 海流较为湍急, 声速梯度曲线如

表 1 海试试验参数设置
Table 1 Parameters setting of sea trial

项目	参数
FFT 点数	4096
采样率/Hz	75 000
子载波间隔/Hz	18.3
换能器带宽/Hz	5000
信号中心频率/Hz	15.5
子载波数	268
导频数	134
调制方式	DQPSK
OFDM 符号周期/ms	54.6
循环前缀长度/ms	13.65
OFDM 数据帧长度/ms	2048
LFM 信号长度/ms	22.67
导频信号长度/ms	136.6
原始通信速率/kbps	3.93
有效通信速率/kbps	1.96

图 3(b)所示, 在 2.5~3.5 m 间形成微弱正梯度。

2.2 试验结果与分析

图 4 给出了试验海域的信道时变冲激响应, 由图中可以看出, 信道中存在显著的多径扩展和时变特性, 且由于收发平台的相对运动产生了明显的多普勒频偏。此时, 相邻 OFDM 符号的同一子载波或同一 OFDM 符号相邻子载波间的相位偏移起伏较大, 超出了 DQPSK 的检测阈, 此时解调的误码率显著增加, 仅采用时频差分编码方案已无法有效解决由收发平台较大尺度移动引起的多普勒问题。

文中采用互相关函数方法对水声信道中存在的多普勒进行估计, 在较为复杂的多径效应和较

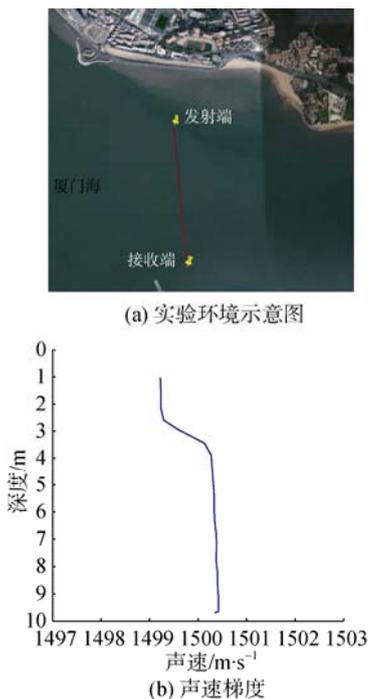


图 3 试验环境和声速梯度曲线
 Fig. 3 Sea trial environment and sound speed profile curve

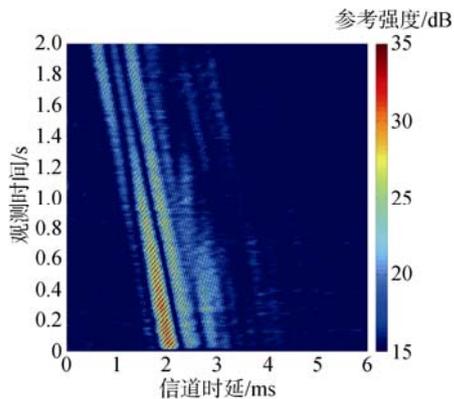


图 4 试验信道时变冲激响应云图
 Fig. 4 Contour of channel's time-varying impulse response in sea trial

大尺度相对运动的背景条件下实现了多普勒估计和补偿。图 5(a)给出了多普勒频偏的估计结果,根据估计结果对接收信号进行变采样率重采样补偿后,解调得到的误码率结果如图 5(b)所示。由图 5(b)可以看出,仅利用时频差分编码方案在较大尺度移动背景下系统解调的原始误码率均很高,大约在 0.5 左右,属于解调失败。但经过频偏补偿后,解调误码率降低了 2 个数量级至 10^{-3} , 11 帧信号中的第 2, 3, 7, 9 和 10 帧信号信道编码能够完全纠正错误解码,误码率降至 0, 系统的通

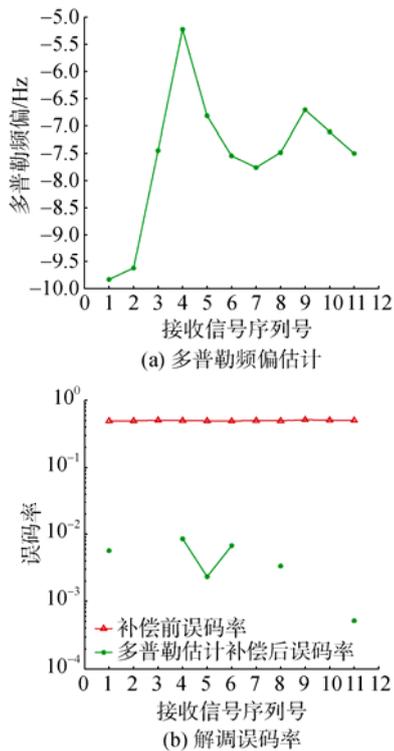


图 5 多普勒频偏估计及解调误码率
 Fig. 5 Estimation of Doppler shift and bit error rate (BER) of demodulation

信性能得到显著改善。

3 结束语

文中针对移动 OFDM 水声通信中多普勒估计和补偿问题,设计并实现了一种面向 AUV 的低复杂度移动 OFDM 水声通信系统,该系统采用时频差分编码方案、互相关函数方法进行多普勒估计,并利用变采样率重采样进行多普勒补偿,有效避免了传统 OFDM 还需补偿 CFO 的问题,具有实现简单、复杂度低等优点。海试试验结果表明,该系统可在浅海信道复杂多径和一定多普勒影响的条件下正常工作,实现了 1.1 km 通信距离、 10^{-3} 误码率的移动 OFDM 水声通信。

参考文献:

[1] Alaaeldien M E A, 段文洋. 自主水下航行器发展概述 [J]. 船舶力学, 2016, 20(6): 768-787.
 Alaaeldien M E A, Duan Wen-yang. Overview on the Development of Autonomous Underwater Vehicles(AUVs) [J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(6): 768-787.
 [2] Paull L, Saeedi S, Seto M, et al. AUV Navigation and

- Localization: A Review[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1): 131-149.
- [3] Blidberg D R. The Development of Autonomous Underwater Vehicles(AUV); A Brief Summary[J]. IEEE Icr, 2001, 17(5): 209-212.
- [4] Bereketli A, Tumcakir M, Yazgi I, et al. Connectivity Analysis of an AUV Network with OFDM Based Communications[C]//2017 IEEE Underwater Technology. Busan: IEEE, 2017.
- [5] Yang Z, Huang J, Han J, et al. System on High-Speed Underwater Acoustic Communication with Multi-carrier [C]//2008 9th International Conference on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2008.
- [6] Lionel L, Bruno J. Robust Nonlinear Path-Following Control of an AUV[J]. Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(2): 89-102.
- [7] Pollet T, Van Bladel M, Moeneclaey M. BER Sensitivity of OFDM Systems to Carrier Frequency Offset and Wiener Phase Noise[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(234): 191-193.
- [8] Zhang Y, Liu H. MIMO-OFDM Systems in the Presence of Phase Noise and Doubly Selective Fading[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 2277- 2285.
- [9] 王巍, 尹艳玲, 刘淞佐, 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 Yan-ling, Liu Song-zuo, et al. Doppler Compensation of Using Frequency Domain Resampling in Underwater Acoustic Mobile OFDM Communication[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(1): 54-58.
- [10] 冯成旭, 许江湖, 罗亚松. 消除冗余循环前缀的水声信道 OFDM 频域均衡算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(4): 482-487.
Feng Cheng-xu, Xu Jiang-hu, Luo Ya-song. Frequency-domain Equalization Algorithm to Eliminate Redundant Circular Prefix for OFDM Underwater Acoustic Communications[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(4): 482-487.
- [11] 普湛清, 王巍, 张扬帆, 等. UUV 平台 OFDM 水声通信时变多普勒跟踪与补偿算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1634-1644.
Pu Zhan-qing, Wang Wei, Zhang Yang-fan, et al. Time-variant Doppler Tracking and Compensation in Underwater Acoustic OFDM Communication for UUV Platform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1634-1644.
- [12] Haas E, Kaiser S. Two-dimensional Differential Demodulation for OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(4): 580-586.
- [13] Haas E, Kaiser S. Analysis of Two-dimensional Differential Demodulation for OFDM[C]//Global Telecommunications Conference. San Francisco: IEEE, 2000.
- [14] Gong M, Ji Y, Han H, et al. Two-dimensional Differential Demodulation for 64-DAPSK Modulated OFDM Signals [C]//2010 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas: IEEE, 2010.
- [15] Gong M, Han H, Zhang C, et al. A Low Complexity Two dimensional Differential Demodulation for OFDM Systems[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(11): 893-900.
- [16] 周跃海, 江伟华, 陈磊, 等. 采用时反和时频差分 OFDM 的水声语音通信方法[J]. 应用声学, 2015, 34(4): 283-290.
Zhou Yue-hai, Jiang Wei-hua, Chen Lei, et al. Underwater Acoustic Speech Communication Using Time Reversal and Time-frequency Differential OFDM Methods[J]. Applied Acoustics, 2015, 34(4): 283-290.
- [17] Song A, Badiy M, Mcdonald V K, et al. Time Reversal Receivers for High Data Rate Acoustic Multiple-Input-Multiple-Output Communication[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 36(4): 525-538.
- [18] Yao T, Zhao W, Zhang Q, et al. Estimation of Doppler-Shift Based on Correlation-Peak Waveform[C]//International Conference on Communications, Circuits and Systems. Kokura: IEEE, 2007: 99-102.
- [19] 张翔. 水声通信中多普勒频移补偿的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1172-1174.
Zhang Xiang. Simulation Research on Doppler Compensation for Underwater Acoustic Communications[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1172-1174.
- [20] Sharif B S, Neasham J, Hinton O R, et al. Doppler Compensation for Underwater Acoustic Communications[C]//Oceans'99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings. Seattle: IEEE, 1999.

(责任编辑: 陈 曦)