

采用多通道信道均衡的调频水声语音通信

王小阳^{a, b}, 章宇栋^{a, b}, 童峰^{a, b}

(厦门大学 a. 海洋与地球学院; b. 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 与数字语音通信体制相比, 调频语音通信技术具有易于实现、抗干扰能力强等优点。在低信噪比、严重多径干扰条件下调频语音通信性能受到较大影响。针对蛙人、潜器上行语音通信需求, 采用在正交解调的调频语音通信系统中引入多通道均衡处理抑制码间干扰和信道衰落的影响, 同时基于客观语音质量评估方法进行调频水声语音通信质量评估。海试结果验证了该方案的有效性。

关键词: 水声语音通信; 调频; 正交解调; 信道均衡

本文引用格式: 王小阳, 章宇栋, 童峰. 采用多通道信道均衡的调频水声语音通信 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(1): 168-172.

Citation format: WANG Xiaoyang, ZHANG Yudong, TONG Feng. Frequency Modulation Underwater Acoustic Voice Communication Technology with Multi-Channel Channel Equalization [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering 2019, 40(1): 168-172.

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)01-0168-05

Frequency Modulation Underwater Acoustic Voice Communication Technology with Multi-Channel Channel Equalization

WANG Xiaoyang^{a, b}, ZHANG Yudong^{a, b}, TONG Feng^{a, b}

(a. College of Ocean & Earth Sciences; b. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Compared with the digital voice communication system, Frequency Modulation (FM) voice communication technology has the advantages of easy realization and strong anti-interference ability. But in low signal-to-noise ratio and severe multipath interference condition, FM voice communication performance is greatly affected. For the needs of voice communications on the frogmen and the submarine, a multi-channel equalization process was introduced in the FM voice communication system using orthogonal demodulation to suppress the effects of inter-symbol interference and channel fading. At the same time, we use the perceptual speech quality assessment (PESQ) method to evaluate the quality of FM voice communication. The sea trial results verify the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: underwater acoustic voice communication; FM; orthogonal demodulation; channel equalization

随着海洋开发、水下施工、科考、搜救、海洋观光、国防安全等各类海洋活动的快速发展, 水声语音通信技术研究日益重视。海洋环境的高背景噪声、低载波速率、极为有限的带宽以及传输条件的时-空-频变特性, 海洋水声信道特别是

浅海水声信道被认为是迄今为止最困难的无线通信信道之一。

传统的单边带水声语音通信技术^[1-2]功率利用率低, 且受海洋环境影响很大, 在信道不稳定的情况下, 存在着语音

收稿日期: 2018-09-02; 修回日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11574258)

作者简介: 王小阳(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事水声通信研究, E-mail: 306848814@qq.com。

通讯作者: 童峰(1973—), 男, 教授, 主要从事水声遥测遥控研究, E-mail: ftong@xmu.edu.cn。

模糊不清和传输可靠性很差等不可克服的问题^[3]。近年来各种数字调制方式不断被应用于水下语音通信技术的研究^[4]。中科院的郭中源等^[5]采用BPSK或QPSK的相位调制方式结合信道编码设计了一套水下语音通信系统,在信道良好的情况下能满足通信需求,但系统整体较为复杂,灵活性低;厦门大学的周跃海等^[6]采用多通道时间反转和时频差分OFDM相结合,能克服一定的频移效应,但对相位噪声的敏感性容易破坏子载波的正交性。

与数字调制体制相比,调频调制保留着传统模拟调制的易于实现的特性,且因其具有较强的抗干扰能力被广泛应用于水声语音通信,厦门大学的吴燕艺等^[7]在调频语音通信中采用非线性解调方案,并且引入时间反转聚焦能量,提高系统对于多径效应的适应性。但是,相位调制或OFDM等数字语音通信体制在低信噪比条件下解调效果不佳,特别是在蛙人、小型潜器与母船的上行语音通信中,由于发射功率限制接收信噪比往往较低,接收端语音信号质量较差,往往不能满足使用需求。

调频语音通信的正交解调法在较低信噪比条件下具有较好的鲁棒性^[8],特别是接收端可充分利用人耳听觉特性抑制噪声干扰,但其在较为复杂的多径信道中解调语音质量明显下降、可懂度差。信道均衡器通常作为数字通信系统的一环被广泛应用于传统相干数字通信体制^[9],但其在属于模拟调制的调频通信中的应用并不多见。本文在调频水声语音通信中引入信道均衡技术构成模拟-数字混合体制,并进一步基于母船接收阵构成多通道均衡实现调频语音通信中多径效应抑制,适用于改善蛙人、各类载人潜器至母船之间上行水声通信的接收语音的质量。

与数字通信中通常将误码率作为性能评价指标不同,水声语音通信性能更多体现在语音质量的评价上。考虑到国际上使用较多的平均意见分(MOS)主观平均方法,虽符合人对语音质量的感知,但过程较为繁琐、耗费时间长且受主观影响大^[10],本文采用ITU-T标准中的感知语音质量评价(perceptual evaluation of speech quality, PESQ)进行调频水声语音通信的性能评估,该方法属于客观评价,将语音的响度、频率等物理特性和人类心理上的感知特性结合起来,用客观数学模型来模拟主观感觉的评价,具有快速实现、可靠性高等优点^[11]。

信道均衡技术是无线通信领域广泛应用的成熟技术,但大多应用与数字通信系统中,模拟调频水声通信则是水声语音通信的常用技术,本文综合考虑到上述两种技术的特点,将多通道信道均衡引入模拟调频水声通信系统,以期通过模拟-数字混合解调的方式改善水声语音通信性能。

1 算法介绍

FM调制是将调制信号频谱作非线性变换,因此它被称为非线性调制。又由于已调信号反映出载波矢量角度上的变化,所以也被称为角度调制^[12]。在调频调制过程中,调频信号由于非线性调制造成了其频谱结构中具有新的边频成

分且在有效调制带宽两侧成对称分布。这一特性使得调频信号具有较强的抗干扰能力,可以抵抗信道中的干扰。同时在调制过程中,由于电子元器件的非线性或电路带宽过窄,会产生某种程度的附加调幅,在信道传输中也会受到同样的影响产生寄生调幅,在一定程度上影响调频系统的性能。针对幅度衰落的特点,在接收端采用正交解调,它对信道引入的幅度衰落具有良好的抑制效果^[13]。

常用的调频信号解调方法包括非线性解调和正交解调,其中非线性解调是直接非线性模拟解调电路对接收到的调制信号进行解调,适于硬件实现。非线性解调器通常由限幅器、带通滤波器、包络检波电路和抽样判决器组成^[14]。厦门大学李剑汶^[15]的研究表明,低信噪比条件下非线性解调效果不佳。水声信道引入的幅度衰落可通过正交及低通滤波处理进行抑制。正交解调原理框图如图1。

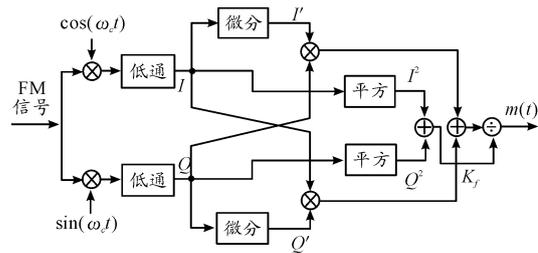


图1 正交解调原理框图

信道均衡器的核心思想是基于特定的准则,采用递推迭代的方式使自适应滤波器逐步趋向最佳的维纳解,从而实现对码间干扰的抑制,同时具有较低的运算复杂度^[17],多通道均衡器则可进一步利用空间增益提高均衡性能。多通道均衡主要由权系数可调的横向滤波器和自适应算法组成,将每个通道分别滤波后的叠加信号作为输出信号^[18],具体流程如图2。接收端对各路信号进行前置滤波、放大处理并解调得到输出序列为 $x_k(n)$,其中 k 为通道数。

基于多通道LMS算法的均衡器迭代公式如下:

$$y(n) = \sum_{k=1}^m x_k(n)^T w_k(n) \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu e(n) x_k(n) \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $x_k(n)$ 为时刻第 k 个通道的输入信号;为通道总数;上角标表示矩阵的转置运算;为所有通道滤波后叠加得到的输出信号; $d(n)$ 为期望输出信号; $e(n)$ 是期望输出信号 $d(n)$ 和输出信号 $y(n)$ 之间的误差信号估计;而LMS算法则是利用梯度下降法,以 $e(n)$ 为判决误差,分别更新每个通道滤波器的抽头系数 $w_k(n)$,使滤波器收敛至稳态。在很多实际应用中,在某些多径时延严重的信道条件下,多通道均衡通过利用接收阵来提高信号增益。此外,均衡技术能够有效跟踪信道特性,达到改善码间干扰的目的。本文将自适应均衡器应用于模拟调频水声通信系统,算法处理过程和数字通信是一样的,只是换为消除模拟形式的码间干扰。针对低信噪比下调频体制性能的限制性,采用正交解调结合多通道均衡处理以改善系统性能,本文方案流程如图3所示,发射

端部分主要包括语音信号输入和信号调制两部分,接收端部分主要包括解调电路和信号处理两部分。

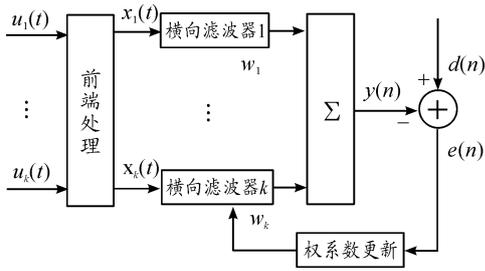


图2 多通道均衡框图

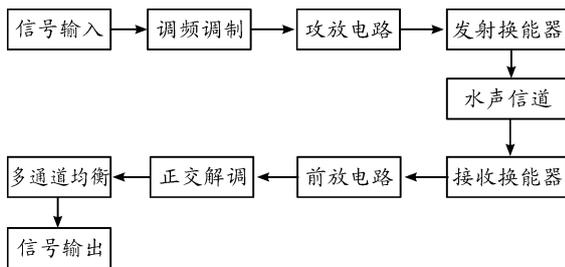


图3 调频水声语音通信系统流程

2 实验设置

为了验证本文多通道均衡水声语音通信系统的性能,在厦门五缘湾海域进行了海洋试验,海域为半封闭结构,平均水深约为 10 m,发射换能器放置深度为 1.5 m,接收阵列 3 个换能器放置深度分别为 1 m、4.5 m、6 m,发射换能器和接收阵列之间的水平距离 1 km。系统的发射端由核心板产生发射信号,经由功率放大器进行幅度调整,再通过发射换能器传出,接收阵列包括前置处理板和接收换能器,分别将每个通道接收信号存储下来,最后经多通道均衡器处理得到最终输出。

原始语音采样率为 4 kHz,其中,采用语音内容“厦门大学”作为训练语音通过频率调制产生训练信号,时长 1.71 s;传输语音内容为“正在进行语音测试”,时间长度为 3.58 s。原始语音波形如图 4 所示。

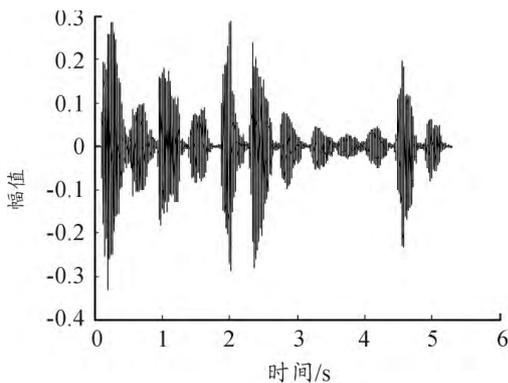


图4 原始语音波形图

调制信号帧:同步+保护间隔+调频训练信号+保护间隔+调频语音+空白间隔,总长度为 8S。训练信号由调频语音前段组成,长度为 132 ms;同步为 22~28 kHz 频率范围的线性调频信号,长度为 125 ms,调频语音 5 132 ms。保护间隔为 1 000 ms。频率调制参数如表 1 所示。

接收端 3 个通道收到的信号送入 PC 端,经过前置放大、带通滤波、A/D 转换、正交解调、3 通道 LMS 自适应均衡,得到解调语音,系统信号调制参数如表 1 所示。试验中,LMS 自适应滤波器阶数为 105,步长因子 \$\mu\$ 值设置为 0.01。为了更好地评估本文方法性能,同时采用非线性解调方法进行实验语音解调并进行性能比较。

表1 调制参数设置

参数列表	调制带宽/kHz	载波频率/kHz	调频指数	调频灵敏度
数值	22~28	25	1	$2 \times \pi \times 3\ 000$

3 实验结果与讨论

图 5 为试验中 3 个通道的信道响应图,由图 5 可以看出,3 个通道均存在明显的多径分量,同时可看出,信道多径结构存在明显的不同。

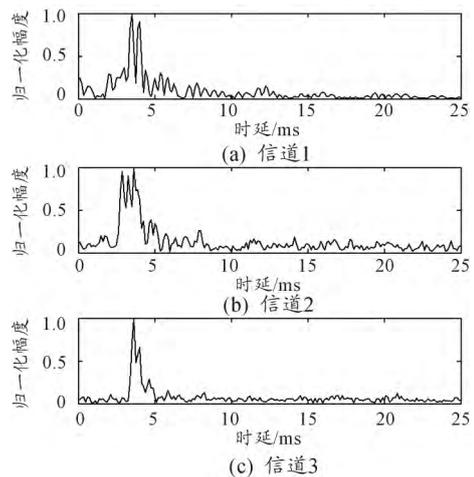


图5 试验水声信道冲激响

水声调频语音通信结果如图 6 所示,图 6(a)(b) 分别为原始语音波形和时频图,图 6(c)(d) 分别为正交解调后的波形图和时频图,图 6(e)(f) 则分别为非线性解调后的波形图和时频图,图 6(g)(h) 则分别为正交解调结合多通道均衡后的波形图和时频图,图 6(i)(j) 则分别为非线性解调结合多通道均衡后的波形图和时频图。从结果可以看出,在时域波形上,经过均衡处理后语音信号码间干扰减小了,多通道均衡算法可以有效地改善信号经过信道后产生的幅度衰落现象,最终得到的语音信号更接近原始语音信号。在频域上,在多通道 LMS 均衡处理后的频谱更加接近原始语音信号的频谱。

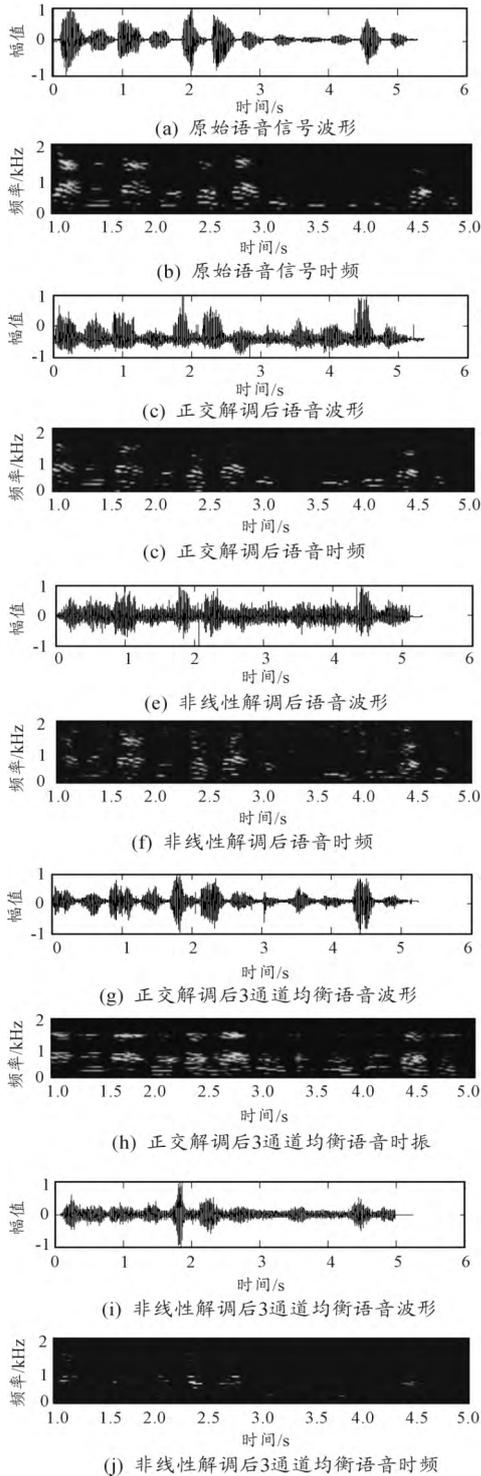


图6 原始语音及解调语音波形、时频图

实验接收信号原始信噪比为 6.2 dB ,同时 ,为了验证本文方案在更低信噪比下的处理效果 ,通过叠加实录背景噪声将接收信号信噪比降低 3.2 dB 其解调和均衡后的波形如图 7 所示。可以看出 ,正交解调本身能克服一定的低信噪比影响 ,结合多通道 LMS 均衡算法能将该影响进一步降低;而非线性解调由于在较低信噪比下解调语音质量较差 ,信道均衡后无明显改善 ,并且通过 PESQ 评估在低信噪比下的性能。低信噪比下原始语音及解调语音波形、时频图如图 7 所示。

PESQ 结果 ($\mu=0.01$) 如表 2 所示。

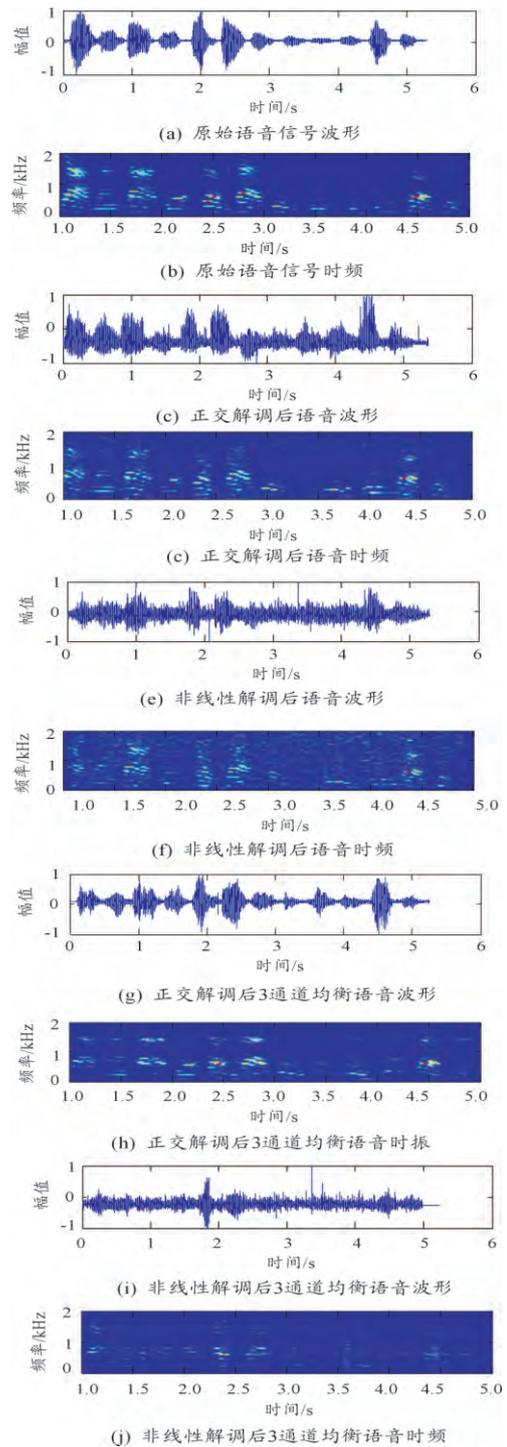


图7 低信噪比下原始语音及解调语音波形、时频图

表2 PESQ 结果 ($\mu=0.01$)

方法	正交解调	非线性解调	正交解调 + 均衡	非线性解调 + 均衡
SNR = 6.2 dB	0.91	0.88	1.60	1.34
SNR = 3.2 dB	0.89	0.70	1.56	0.98

从表 2 可知,在 6.2 dB 的原始接收信噪比下:正交解调后的语音信号得分为 0.91,结合多通道均衡后语音得分提高到 1.60;非线性解调语音信号得分 0.88,结合多通道均衡后的语音信号得分为 1.34。而在信噪比降低 3dB 后:正交解调语音的 PESQ 得分为 0.89,结合多通道均衡后语音得分进一步提高为 1.56;与之相比,非线性解调语音得分为 0.70,结合多通道均衡后语音得分反而降低到 0.98。由此表明:多通道均衡在调频解调语音质量较好时能有效改善语音质量,但如果解调语音音质较差则均衡效果不佳。

因此,从 PESQ 评分的角度看,非线性解调方法虽然能克服严重多径的影响,但是由于本文实验信道条件下信噪比均比较低,正交解调取得了更好的解调性能,而正交解调结合多通道均衡的方法对低信噪比条件下调频语音有更好的处理效果,非线性解调结合多通道均衡则改善效果不佳。数字调制方式如 OFDM 系统在此信噪比下误码率明显增加,系统无法正常工作^[19],由此可见调频模拟调制在较低信噪比条件下具有较好效果。

为了评估 LMS 信道均衡算法中步长因子 μ 的取值对性能的影响,设置不同 μ 值时多通道信道均衡处理获得解调语音的 PESQ 结果如表 3 所示,从表 3 可以看出:当 μ 值为 0.01、0.03 及 0.1 时,PESQ 评分变化幅度很小,说明本文方案性能在 μ 参数的典型取值范围内具有较好的稳健性。

表 3 不同步长参数的 PESQ 结果

步长因子	0.01	0.03	0.1
SNR = 6.2 dB	0.91	0.88	1.60
SNR = 3.2 dB	0.89	0.70	1.56

4 结论

本文针对蛙人、潜器上行语音通信具体应用背景,分别采用正交解调、非线性解调并结合多通道均衡进行水声调频语音通信的量化性能评估、比较。海上试验结果表明:正交解调结合信道均衡在较低信噪比、明显多径条件下具有较好的语音通信性能,可有效改善语音通信质量。

参考文献:

- [1] STOJANOVIC M. Underwater acoustic communications [C] //Electro/95 International. Professional Program Proceedings. IEEE, 1995: 435 - 440.
- [2] KILFOYLE D B, BAGGER A B. The state of art in under-

water acoustic telemetry [J]. IEEE. Journal of Oceanic. Eng 2005 25(1): 4 - 27.

- [3] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] WOODWARD B, SARI H. Digital underwater acoustic voice communication [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996 21(2): 181 - 192.
- [5] 郭中源, 陈岩, 贾宁. 水下数字语音通信系统的研究与实现 [J]. 声学学报, 2008, 33(5): 1 - 3.
- [6] 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(4): 283 - 290.
- [7] 吴燕芝, 李剑汶. 采用时间反转的调频水声语音通信方法 [J]. 厦门大学学报, 2016, 55(4): 570 - 574.
- [8] 卜文强. 基于 TMS320C67X 的水声语音通信系统研究与实现 [D]. 厦门: 厦门大学, 2015.
- [9] 耿妍, 张瑞金. 自适应滤波算法综述 [J]. 信息与电子工程, 2008, 6(4): 315 - 320.
- [10] ITU-T Rec. P. 861. Objective Quality Measurement of telephone-band Speech Coders [S]. Geneva: ITU, 1998.
- [11] 赵斐, 徐勇, 成立新. PESQ 及其应用 [J]. 通信与计算机, 2003(3): 28 - 30.
- [12] 吴伯修, 沈连丰. 调频技术理论及新进展 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1988: 7 - 8.
- [13] 曾堃. 多径信道下的调频水声语音通信技术研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2015.
- [14] 陈启兴. 通信原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [15] 李剑汶, 王小阳. 浅海信道调频水声语音通信方法比较 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 127 - 131.
- [16] 黄绍. 基于 PESQ 估测模型的水声语音通信系统研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [17] AZUBOGU A C O, NWALOZIE G C, IDIGO VE. Simulation evaluation of least mean square (LMS) adaptive beamforming algorithm for smart antennas [J]. The IUP Journal of Telecommunications, 2012, 4(1): 27 - 39.
- [18] STOJANOVIC M, CATIPOVIC J, PROAKIS J G. Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(3): 1621 - 1631.
- [19] 李晶, 侯思祖. OFDM 误码率性能分析与研究 [J]. 微计算机信息, 2006(7): 261 - 264.

(责任编辑 杨继森)