

【引用格式】赵燕锋, 杨逍宇, 童峰, 等. 宽码率 Polar 码浅海水声通信实验研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5 (5): 419-424.

宽码率 Polar 码浅海水声通信实验研究

赵燕锋^{1, 2}, 杨逍宇^{1, 2}, 童峰^{1, 2, *}, 程恩^{1, 3}

- (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;
3. 厦门大学 信息学院, 福建 厦门 361002)

摘要 浅海水声信道的随机时-空-频特性给数据的可靠传输带来了重大挑战, 低复杂度和理论上证明能到达香农限的极化码 (Polar code) 可以增强水声通信系统的鲁棒性。水下传输的图像、语音、文本、海洋监测数据和遥控指令具有不等重要性的特点, 宽码率 Polar 码能够适应不同水声信道和不等重要性的信息传输。目前 Polar 码在水声通信中的实验研究多为仿真分析, 设计了宽码率 Polar 码在厦门港海域海试验证, 在不同信噪比的实录环境噪声下进行分析。海试结果表明: 在良好的信道条件下, 宽码率 Polar 码的性能优异, 0.25 码率的 BPSK 和 QPSK 在实录环境噪声信噪比为-1 和 4 时实现零误码, 其低复杂度信道编译码机制和宽码率与水声信道相匹配, 可有效提高水声数据传输的可靠性和有效性, 为基于 Polar 码的稳健可靠水声通信系统提供海试实验验证。

关键词 浅海水声通信; Polar 码; 宽码率; 海试

中图分类号 P733.24

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)05-0419-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.05.005

Experimental Study on Shallow Sea Acoustic Communication with Multi-rate Polar Code

ZHAO Yanfeng^{1, 2}, YANG Xiaoyu^{1, 2}, TONG Feng^{1, 2, *}, CHENG En^{1, 3}

- (1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361002, China;
2. School of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361002, China;
3. School of Informatics, Xiamen University, Xiamen 361002, China)

Abstract Shallow sea acoustic channels present random time-space-frequency characteristics, which brings great challenges to reliable data transmission. With low complexity and being theoretically proven that can reach the Shannon limit, polar codes can enhance the robust of underwater acoustic communication systems. Image, voice, text, ocean monitoring data and remote control commands are transmitted underwater with characteristic of unequal importance. The multi-rate polar codes can adapt to different underwater acoustic channels and information transmissions of unequal importance. At present, the application studies on polar codes in underwater acoustic communication are mostly simulation analysis. In this paper, a number of multi-rate polar codes are designed for the sea trial in Xiamen Port, as well as analysis under recorded ambient noise with different signal-to-noise ratios. The sea trail results show that under good channel conditions, the performance of the polar codes are excellent, with

收稿日期: 2022-06-30

作者简介: 赵燕锋 (1995-), 男, 博士生, 主要从事信道编译码技术、水声通信研究。

*通信作者: 童峰 (1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事水声通信与网络、声探测与感知、智能语音处理研究。

基金项目: 国家重点研发计划项目“面向海洋环境监测的信道感知水声传感网络”(2018YFE0110000); 国家自然科学基金“水声传感网络接入理论与关键技术研究”(61871336)。

BPSK and QPSK with a bit rate of 0.25 achieving zero bit errors when the SNR of the recorded ambient noise is -1 and 4. The multi-rate polar codes with low-complexity channel encoding and decoding mechanism can match the underwater acoustic channel and effectively improve the reliability and effectiveness of underwater acoustic data transmission, and the robust and reliable underwater acoustic communication system based on polar codes is verified by sea trials.

Key words shallow sea acoustic communication; polar code; multi-rate; sea trial

0 引言

水声通信在海洋环境监测、水下航行器的控制、打捞作业、数据传输工作环境中扮演重要角色^[1]。声波被认为是水下数据传输的最佳载体,浅海水声信道普遍存在多途干扰严重、多普勒频移、噪声干扰大、声传播损耗、可用带宽极为有限等^[2],给数据的高速率、稳定传输带来了负面影响。

信道编码技术以增加冗余比特对发送的信息比特进行约束,传输过程中受到浅海环境动态变化的干扰时,引入的冗余比特在接收端提供纠错检错的能力,以保证在复杂多变的水下信道环境下提高数据传输的鲁棒性。水下传输的数据包括图像、语音、文本、数据、海洋监测参数、遥控指令等信息,该类数据源具有不等重要性信息比特的特点。对于密级高、海洋监测参数、精确的遥控指令等,根据传输时的数据特点,可采用差错控制能力强的低码率;高码率可用于传输图像以及不重要的信息。所以,依靠低复杂度、高稳健的编译码技术,设计宽码率族供通信系统选择,可以有效适配不同水声信道和用户传输数据的需求。

2009年,由ARIKAN提出的Polar码是基于信道极化现象的线性分组码,在二进制离散无记忆信道上理论证明能达到香农限的新型编码技术,不同于传统的编码技术,Polar码的构造依赖于具体的信道环境。因此,最为关键的是对极化后的子信道进行度量,确定信息比特和校验比特的位置,编译码的配合是Polar码达到香农限的条件之一。同时,他提出了逐次消除(Successive Cancellation, SC)译码方法^[3]。但SC存在误码传递和译码时延问题,很多研究人员在此基础上提出了一些改进算法,如:逐次消除列表(Successive Cancellation List, SCL)算法通过增加译码宽度 L ,扩展了译

码路径,译码时选取最佳度量值的 L 作为译码码字;TAL和VARDY提出循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)对SCL译码算法 L 路径进行选择,其改善单一的SCL算法的纠错能力,译码性能趋近于最大似然(Maximum Likelihood, ML)译码算法^[4]。

此外,现阶段信道极化方法主要是针对二进制离散无记忆(Binary-input Discrete Memoryless Channel, B-DMC)信道展开的,且依赖于信道参数和码长,不适用于实际动态变化信道。为了解决此问题,华为提出了一种独立于信道特性的极化权重PW(Polarization Weight, PW)子信道可靠性评估方法,使得极化码被5G通信中的控制信息传输所采用^[5]。

中科院声学所研究了极化码在不同的水声,如信道模型、信道参数、码长、码率下的性能。仿真结果表明:码率为 $1/2$ 的极化码在水声时变信道中的误码率可达 $10^{-4} \sim 10^{-5}$,优于LDPC和Turbo码。并改进了PW方法使信道极化结果更稳定,在千岛湖实测信道中验证了所提方法的有效性以及信源信道联合译码在提升水声通信系统的性能方面的研究工作^[6-8]。西安电子科技大学,哈尔滨工程大学的研究者等对Polar在不同水声信道下极化码的构造和性能做了仿真研究,发现水声通信中的综合性能表现良好,具有很强的竞争力,可适配于水声通信系统^[9-11]。FALK等举办了“水下短消息最佳编码方法”的竞赛,分析发现同等参数下的Polar码性在短码传输上性能优于其他编码技术,复杂度低,在较高信噪比下仍未观察到“差错平台”效应^[12]。文献[13]-[15]仿真比较了不同编码方法在水声信道中的性能,证明了Polar码与LDPC和Turbo码等相比,可以用更低的编、译码复杂度和低错误平层实现可靠通信。所以,极化码在水声通

信系统中的应用研究具有现实意义。

综上所述, 研究者对于 Polar 码的水声通信实验研究大部分基于仿真分析。水声信道复杂多变, 难以对其进行有效的建模分析, 仿真的结果难以匹配实际应用。水声信道时-空-频变特性和传输数据的不等保护特性需要宽码率族来适应。鉴于此, 本文设计了宽码率 Polar 码, 在浅海厦门港海域进行海试, 在实录环境噪声不同信噪比下做了分析, 为基于 Polar 码的稳健可靠水声通信系统提供了实验验证。

1 Polar 码和水声信道

1.1 Polar 码编译码

Polar 码通过信道极化的方式, 以信道合并和分裂将信道分为 2 类。通过对给定信道 W 进行 $N=2^n$ 的独立复制, 当 $N \rightarrow \infty$ 时, 信道 W 的容量趋于 0 或 1, 信道极化过程如图 1 所示, 左侧为 N 次复用的信道, 右侧为极化后根据信道容量排序的信道。

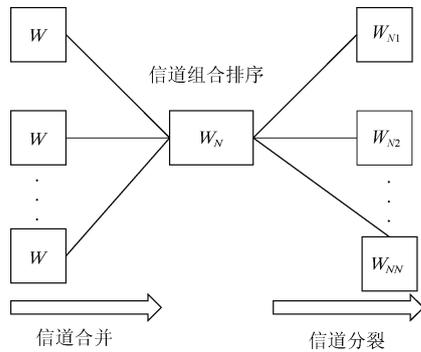


图 1 信道极化过程

Fig. 1 Schematic diagram of channel polarization

图 2 为在 BEC 信道中, Polar 码码长为 1 024, 信道擦除概率为 $P=0.5$ 时, 极化后子信道的信道容量。由图可知, 索引值较小的子信道在极化后, 信道容量趋于 0, 反之, 趋于 1。编码时选择信道容量为高的比特信道传输信息比特, 信道容量低的传输已知冻结比特。其中, K 为信息比特位, $N-K$ 为冻结比特位, 码率为 K/N 。同时, 译码时只对传输信息比特的信道进行译码, 以此来降低编译码复杂度。

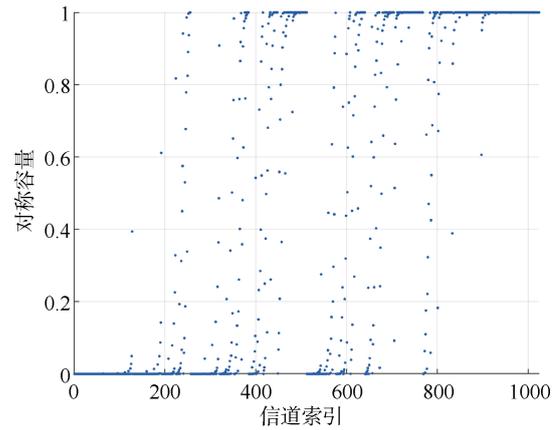


图 2 BEC 信道下的信道极化现象

Fig. 2 Channel polarization under BEC channel

对于信道编码过程, 假设传输的比特序列为

$$u_1^N = (u_1, u_2, \dots, u_N) \quad (1)$$

则编码后的码字 C 为

$$C(c_1, c_2, \dots, c_N) = u_A \mathbf{G}_N(A) \oplus u_{A^c} \mathbf{G}_N(A^c) \quad (2)$$

式中: 集合 A 为信息比特对应的下标组成; A^c 为冻结比特对应的信道下标组成; \mathbf{G}_N 是生成矩阵。

$$\mathbf{G}_N = \mathbf{B}_N \mathbf{F}^{\otimes n} \quad (3)$$

式中: $n = \log_2 N$; \mathbf{B}_N 为比特反转矩阵; $\mathbf{F}^{\otimes n}$ 为 n 次克罗内积的 ARIKAN 标准极化内核矩阵^[3]。

ARIKAN 提出了适用于 Polar 码的具有译码过程简单、复杂度为 ($O(N \log N)$) 的串行消除译码 (Successive Cancellation, SC)。假设 u_1^N 为编码后传输的比特, 经过极化后的信道 W_N 输出的转移概率为 $W_N(y_1^N / u_1^N)$, SC 的译码关键在于根据已知 (y_1^N, u_{A^c}), 得到 u_1^N 的准确估计值 \tilde{u}_1^N 。其串行消除的思想在于其由 N 个判决元素组成, 并依次激活。如果 i 属于冻结比特时, 判决单元将其译为已知的冻结比特, 然后发给之后的判决单元; 否则需要用转移概率的似然比进行判决, 似然比的计算方式为式 (4), 判决方式为式 (5)。

$$LR_N^{(i)}(y_1^N, \tilde{u}_1^{i-1}) = \frac{W_N^{(i)}(y_1^N, u_1^{i-1} / 0)}{W_N^{(i)}(y_1^N, u_1^{i-1} / 1)} \quad (4)$$

$$\tilde{u}_i = \begin{cases} 1 & LR_N^{(i)}(y_1^N, \tilde{u}_1^{i-1}) \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

为了能够直观、简单的译码，SC 可以将其译码过程用译码树的方式表示^[9]。由于 SC 译码时逐比特连续译码，当其中的某一比特出现错误时，会导致错误不断地传递，使得译码过程愈加恶劣。为此，研究者提出了 SCL 译码算法，其为了增强译码的可靠性，每次译码时保留度量值最大的 L 个路径，通过选择最佳的路径来避免错误判决导致的错误传递。 L 的选择是 SCL 译码算法的关键，其复杂度为 $O(LN \log N)$ ，当 $L=1$ 时，其退化为 SC 算法，当 L 增加时其译码性能也增加，同时也增加了译码复杂度。鉴于此，研究人员提出了利用 CRC 对 SCL 译码算法进行辅助选择路径，译码时，首先对译码序列进行校验，由于 CRC 漏检概率低、校验过程简单，使得基于 CRC-SCL 的算法效率和性能大大提升^[16]。此外，极化信道的可靠性评估方法是 Polar 码编译码过程最为关键的一步，典型的方法有：巴氏参数法、高斯近似法、蒙特卡洛法等^[17]。但是此类方法主要针对二进制离散无记忆 (Binary-INPUT Discrete Memoryless Channel, B-DMC) 信道展开的，且依赖于信道参数和码长，

不适用于实际动态变化信道。为了解决此问题，华为提出了一种独立于信道特性的极化权重 PW (Polarization Weight, PW) 子信道可靠性评估方法，使极化码被 5G 通信中的控制信息传输所采用^[5]，因此，本文采用 CRC-SCL 译码和 PW 法信道评估方法。

1.2 水声信道和通信系统

水声信道受浅海海洋环境的影响，在不同海域的信道表征方式无统一模型。研究者提出了多种数学模型，其中较为典型的是多径传播模型。水声通信的脉冲响应表示为

$$h(\tau) = \sum_{p=0}^P A(t)_p \delta(t - (\tau_p - at)) \quad (6)$$

式中： P 个多径有独立的幅值 A_p 、时延 τ_p 和 a 多普勒频移因子为信道的特征值。因此，信号在信道传输过程中受多径时延、多普勒的影响，导致接收端难以恢复发送的比特信息，需要编译码、均衡等方法来对抗信道的以上特性。本文采用宽码率 Polar 码建立水声通信系统如图 3 所示。

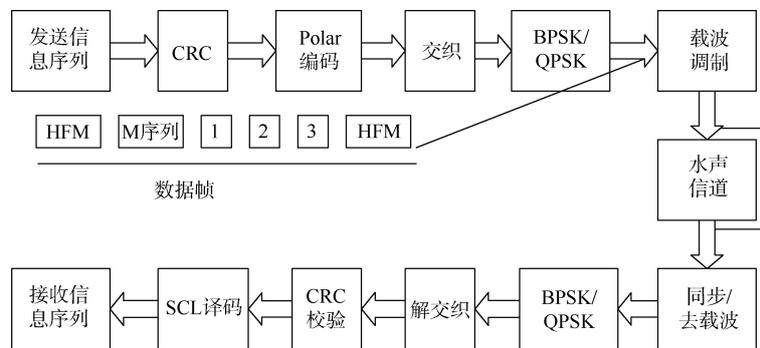


图 3 水声通信系统

Fig. 3 Diagram of underwater acoustic communication system

2 海试实验及结果分析

本文所验证的宽码率 Polar 码浅海水声通信系统在福建省厦门市厦门港进行了海试实验。图 4 为厦门港地图，平均水深 12 m，发射和接收端换能器入水深度为 5 m，两端相距 1 km。

水声通信系统采样率为 96 K，信号中心频率为 15.5 kHz，带宽 5 kHz，采用 BPSK/QPSK 调制，波特率为 1 548 sym/s，Polar 码码率为 0.25、0.375、

0.5、0.75 和 0.875。BPSK/QPSK 调制方式对应的有效通信速率分别为 387 bit/s、581 bit/s、774 bit/s、1 161 bit/s、1 355 bit/s 和 774 bit/s、1 162 bit/s、1 548 bit/s、2 322 bit/s、2 710 bit/s。

可见，与常规编码方式相比，宽码率 Polar 码可提供较大的码率范围以适应不同应用类型。

BPSK 调制方式的一帧数据信道估计如图 5 所示，实验过程中厦门港海域信道平稳，多径分量较



图 4 厦门港地图

Fig. 4 Map of Xiamen Port

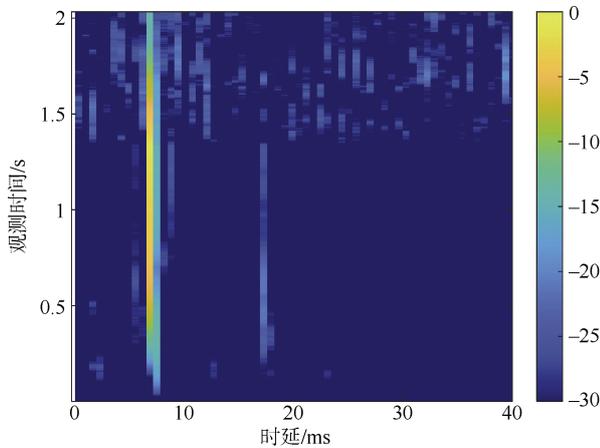


图 5 BPSK 信道估计

Fig. 5 BPSK channel estimation

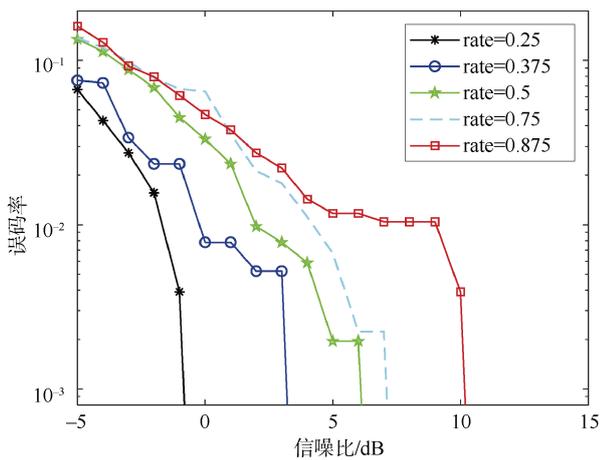


图 6 实录环境噪声下的宽码率 Polar 译码性能

Fig. 6 Performance of multi-rate Polar codes under recorded ambient noise

少, Polar 码高低码率在试验中体现了很好的译码性能, 多数码率每帧数据都能实现零误码率; 原始

误码率为非零时, 不同码率的 Polar 都能够有增益。为了测试宽码率 Polar 码在不同信噪比下的性能, 在零误码的基础上添加不同信噪比的实录环境噪声, 宽码率下的 Polar 码译码性能如图 6 所示。0.25 码率在信噪比为-1 的情况下实现零误码, 而 0.875 码率在信噪比为 10 时实现零无码率, 宽码率能够在信噪比为-1~10 之间实现零误码, 可以有效地适应不同信噪比下的水声信道。

同理, 对 QPSK 调制信号进行了海试验证, 其中一帧信号的信道估计如图 7 所示, QPSK 通信系统工作时, 多径分量较少, 信道通信条件较好。宽码率 Polar 码在实录环境噪声下译码性能如图 8 所示。

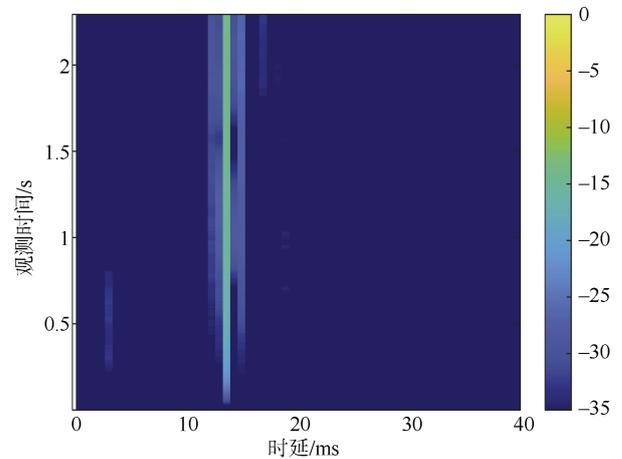


图 7 QPSK 信道估计

Fig. 7 QPSK channel estimation

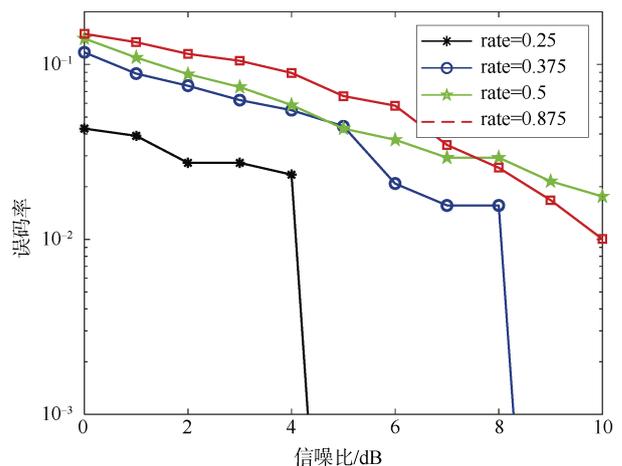


图 8 实录环境噪声下的宽码率 Polar 译码性能

Fig. 8 Performance of multi-rate Polar codes under recorded ambient noise

注: QPSK 0.75 码率的 Polar 码接收信号出现断裂, 无法解调。

0.25 码率在信噪比为 4 时可实现零误码, 0.875 码率在 8~10 dB 的误码率优于 0.5, 说明 Polar 码的译码性能受信道条件影响大, 在较高信噪比下性能相当, 低码率在有效低信噪比条件下的水声信道能实现较好的性能。

3 结束语

本文对宽码率 Polar 码浅海水声通信中的应用性能进行了海试验证。实验过程中, 厦门港海域通信信道条件良好, 不同码率的 Polar 在水声信道中的表现较好, 大部分数据在经过 Polar 编码后能实现零误码传输。同时在不同信噪比的实录环境噪声下宽码率能够实现零误码, 说明宽码率 Polar 码应用于水声通信系统是可行的, 同时有一定的增益, 在未来的实际应用中值得我们期待。接下来, 我们将在更加恶劣的浅海环境下测试宽码率的性能, 并结合不同的调制方式、均衡等技术对抗多径、多普勒等, 为不等重要性的数据传输和不同环境的水声信道提供最佳的码率选择, 实现数据的稳定传输。

参考文献

- [1] 赵云江, 乔钢, 刘淞佐, 等. 带内全双工水声通信技术研究现状与展望[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4 (3): 195-205.
- [2] 许克平, 许天增, 许茹, 等. 基于水声的水下无线通信研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2001 (2): 311-319.
- [3] ARIKAN E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55 (7): 3051-3073.
- [4] TAL I, VARDY A. List decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61 (5): 2213-2226.
- [5] HE G, BELFIORE J C, LAND I, et al. Beta-expansion: a theoretical framework for fast and recursive construction of polar codes[C]// GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE, 2017.
- [6] 翟玉爽, 冯海泓, 李记龙. 极化码在 OFDM 水声通信中的应用研究[J]. 声学技术, 2021, 40 (1): 29-38.
- [7] 杨斌斌, 鄢社锋. 基对称扩展信道极化算法及其在 OFDM 水声通信系统中的应用[J]. 信号处理, 2021, 37 (7): 1133-1141.
- [8] 胡承昊, 台玉朋, 汪俊, 等. 基于 Polar 码的水声通信信源信道联合译码方法[J]. 应用声学, 2022, 41 (1): 60-69.
- [9] 张泽栋. 极化码在水声通信中的应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [10] 杜红卿. 基于 Polar 码的 OFDM 水声通信系统的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [11] 马圣敏. 水声通信中极化码的编解码技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [12] FALK M, BAUCH G, NISSEN I. On channel codes for short underwater messages[J]. Information, 2020, 11 (2): 58.
- [13] ZHAI Y S, LI J L, FENG H H. Research on polar coding application for underwater acoustic OFDM communication system[C]// 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications(ICC). Chengdu: IEEE, 2020.
- [14] AHMED M S, SHAH N S M. A comparative study on channel coding scheme for underwater acoustic communication[J]. 2021.
- [15] XING L J, LI Z, ZHANG Z D, et al. Research on the application of polar codes in underwater acoustic communication[C]// 2021 7th International Conference on Computer and Communications(ICC). Chengdu: IEEE, 2021.
- [16] NIU K, CHEN K. CRC-aided decoding of polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16 (10): 1668-1671.
- [17] TAL I, VARDY A. How to construct polar codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59 (10): 6562-6582.

(责任编辑: 肖楚楚)