

doi:10.19665/j.issn1001-2400.2020.06.013

LDPC 卷积码在水声通信系统中的可靠性研究

蔡子浩, 穆丽伟, 占利, 刘 强

(华南师范大学 物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为保证信号在水声信道上实现高可靠性传输, 将低密度奇偶校验卷积码用于水声信道, 研究其对信息可靠性的改进程度。采用结合了多径模型的梯度模型来模拟水声信道, 依据滤波器组多载波技术抑制码间串扰和偏移正交幅度调制能够抑制相邻载波干扰的特性, 搭建 FBMC/OQAM 水声信道通信系统。采用低密度奇偶校验卷积码作为信道编码方案, 实现了多媒体音频和图像信号在水声信道上的无损传输。又进一步搭建了跳频水声通信仿真系统, 将 RC-LDPC 卷积码用于该跳频水声通信系统, 研究其译码性能。仿真结果表明, 低密度奇偶校验卷积码在水声信道上有良好的误码率性能, 实现了低误码率的信号传输, 能有效地克服多径效应, 提高信道利用率。因而, 低密度奇偶校验卷积码可选作水声通信的信道编码方案。

关键词: 水声信道; 频率调制; 低密度奇偶校验卷积码

中图分类号: TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2020)06-0084-07

Research on the reliability of LDPC convolutional codes in the underwater acoustic communication system

CAI Zihao, MU Liwei, ZHAN Li, LIU Qiang

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University,
Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to ensure the high reliability of signal transmission in the underwater acoustic channel, LDPC convolutional codes are used to study the improvement of the information reliability in the underwater acoustic channel in this paper. The gradient model combined with the multipath model is adopted to simulate the underwater acoustic channel, and the FBMC/OQAM underwater acoustic channel communication system is built according to the characteristics that FBMC can suppress inter symbol interference and OQAM can suppress adjacent carrier interference. The LDPC convolutional code is adopted as the channel encoding scheme for realizing the lossless transmission of multimedia audio and image signals in the underwater acoustic channel. The RC-LDPC convolutional code is also used to study the decoding performance of the FH underwater acoustic communication system. Simulation results show that LDPC convolutional codes have a good bit error rate (BER) performance in the underwater acoustic channel, achieve a low BER signal transmission, and can effectively overcome the multipath effect and improve channel utilization. Thus, the LDPC convolutional code can be selected as the channel coding scheme for underwater acoustic communication.

Key Words: underwater acoustic channel; frequency modulation; LDPC convolutional code

水声通信技术最早应用于军事领域。早在 1945 年, 为了实现潜艇之间的通信, 美国水声实验室研发了

收稿日期: 2020-06-26

网络出版时间: 2020-09-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (61401164)

作者简介: 蔡子浩 (1997—), 男, 华南师范大学本科生, E-mail: caizihao@m.scnu.edu.cn

通信作者: 穆丽伟 (1980—), 女, 副教授, E-mail: liweimu@m.scnu.edu.cn

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20200922.1551.002.html>

水下电话。这是世界上第一个投入实际应用的水声通信系统^[1]。随着“数字海洋”向“智能海洋”的发展,水声通信受到了广泛关注。与传统的电磁波通信不同,水声通信采用声波传输信息,具有传播速度低、高误码率等特点^[2],故而加快信息传输速率和增强信息传输可靠性是当今水下通信的研究目标。信道编码技术是克服数据传输时的强干扰和强衰落,降低误码率,提高传输可靠性的强有力方法。因此,在设计水声通信系统时要采用信道编码技术。

1963年,GALLAGER^[3]在他的博士论文中论述了低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check, LDPC)。大约40年后,LDPC卷积码由FELSTROM等首次提出^[4],并且LDPC卷积码与相对应的LDPC分组码相比,译码性能接近香农极限,实现简单,几乎适用于所有的信道^[5]。由于LDPC卷积码兼具LDPC分组码和卷积码的优点,近年来对有关LDPC卷积码的研究也越来越多^[6-8]。文献[9]将码率兼容低密度奇偶校验(Rate Compatible-Low Density Parity Check, RC-LDPC)卷积码用于水声信道,进而研究其在水声信道中的译码性能。RC-LDPC卷积码由RC-LDPC码获得,具有一定的结构性,其编译码算法具有代数特性,便于系统实现。

为研究声音和图像在水声信道中经RC-LDPC卷积码编码后的可靠性,笔者首先搭建了滤波器组多载波技术/偏移正交幅度调制(Filter Bank-based Multi Carrier/Offset Quadrature Amplitude Modulation, FBMC/OQAM)浅海水声通信系统。FBMC^[10]是多载波技术的一种,其特殊类型正交频分复用技术OQAM^[11]是4G技术的主要调制解调方式,具有对各子信道进行低复杂度均衡的优点,通常通过保持子载波之间的正交性将信道带宽划分为多个重叠频带。然而,正交频分复用技术会产生大量旁瓣,导致出现严重的码间串扰。FBMC则利用特定的滤波器组使旁瓣导致的码间串扰对信号的影响减小。虽然FBMC相较于正交频分复用技术在实现中更为复杂,但FBMC技术增强了频谱利用率,减少了相邻载波干扰,同时系统中采用的OQAM^[12]技术也能够抑制相邻载波干扰。考虑到水声信道的复杂噪声特性^[2],也建立了跳频水声信道通信模型,并仿真了RC-LDPC卷积码在该系统中的译码性能。

1 RC-LDPC 卷积码构造算法回顾

首先回顾RC-LDPC卷积码^[9]构造算法。已知LDPC卷积码的校验矩阵为

$$\mathbf{H}_{\text{conv}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0(0) & & & & \\ \mathbf{H}_1(1) & \mathbf{H}_0(1) & & & \\ \mathbf{H}_2(2) & \mathbf{H}_1(2) & \mathbf{H}_0(2) & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ \mathbf{H}_{m_s}(m_s) & \mathbf{H}_{m_s-1}(m_s) & \mathbf{H}_{m_s-2}(m_s) & & \mathbf{H}_0(m_s) \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \end{bmatrix}, \quad (1)$$

LDPC分组码的校验矩阵 \mathbf{H}_b 为

$$\mathbf{H}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_b^{(1,1)} & \mathbf{H}_b^{(1,2)} & \cdots & \mathbf{H}_b^{(1,m_s+1)} \\ \mathbf{H}_b^{(2,1)} & \mathbf{H}_b^{(2,2)} & \cdots & \mathbf{H}_b^{(2,m_s+1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{H}_b^{(m_s+1,1)} & \mathbf{H}_b^{(m_s+1,2)} & \cdots & \mathbf{H}_b^{(m_s+1,m_s+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0(0) & \mathbf{H}_{m_s}(0) & \cdots & \mathbf{H}_1(0) \\ \mathbf{H}_1(1) & \mathbf{H}_0(1) & \cdots & \mathbf{H}_2(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{H}_{m_s}(m_s) & \mathbf{H}_{m_s-1}(m_s) & \cdots & \mathbf{H}_0(m_s) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

LDPC卷积码的校验矩阵 \mathbf{H}_{conv} 中元素 $\mathbf{H}_i(t)$, $i=0,1,\dots,m_s$, $t=0,1,\dots,m_s$,是一个 $(c-b) \times c$ 子矩阵,LDPC卷积码的码率 $R=b/c$ 。如式(2)所示转换关系,将大小为 $(m_s+1)(c-b) \times (m_s+1)c$ 的分组码矩阵 \mathbf{H}_b 划分为大小均为 $(c-b) \times c$ 子矩阵 $\mathbf{H}_b^{(i,j)}$ ($i=1,2,\dots,m_s+1$, $j=1,2,\dots,m_s+1$),并将 $\mathbf{H}_b^{(i,j)}$ 与 \mathbf{H}_{conv} 中的每个子矩阵 $\mathbf{H}_i(t)$ 对应,即可由 \mathbf{H}_b 获得 \mathbf{H}_{conv} ^[9]。由RC-LDPC分组码获得RC-LDPC卷积码的构造方案可按照此矩阵转换关系获得,具体构造方法在下文详述。

首先由RC-LDPC分组码的基矩阵 \mathbf{H}_b 构造RC-LDPC卷积码的基矩阵 \mathbf{H}_{conv} 。码率 $R=b/c$,LDPC分组码的校验矩阵为 \mathbf{H}_s 。如图1(a)所示, \mathbf{H}_s 的大小为 $(m_s+1)(c-b) \times (m_s+1)c$,其最右边 $(m_s+1)(c-b)$ 列具有下三角结构,这部分对应校验位,左边剩余 $(m_s+1)b$ 列是信息位。然后,对 \mathbf{H}_s 进行列重排,按顺序将图1(a)中每 $c-b$ 位校验

位 H_{sp_i} 列置换至每 b 位信息位 H_{ss_i} 后,从而得到 H_b ,如图 1(b) 所示。依据式(1) 和式(2) 的变换关系,即可生成对应的 RC-LDPC 卷积码的基矩阵 H_{conv} 。同样地,由 RC-LDPC 分组码的扩展矩阵 H_b^{k+1} 可获得 RC-LDPC 卷积码的扩展矩阵 H_{conv}^{k+1} ,即 RC-LDPC 卷积码的扩展矩阵也可由 RC-LDPC 分组码的扩展矩阵获得。

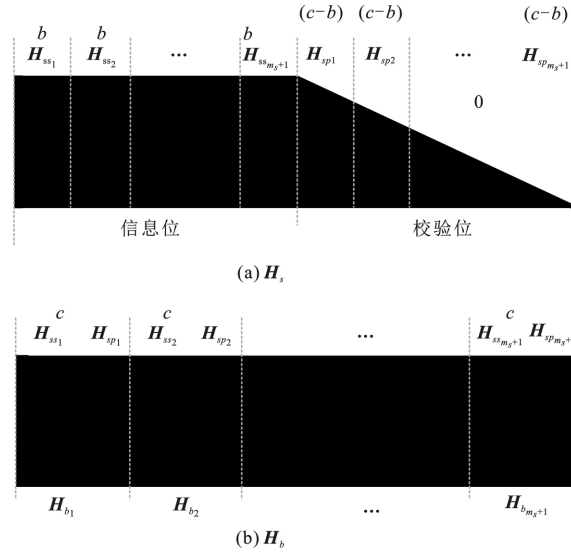


图 1 由矩阵 H_s 列置换获得 H_b

以下介绍获得 RC-LDPC 分组码扩展矩阵 H_b^{k+1} 的方法。首先,构造矩阵

$$H_s^{k+1} = \begin{bmatrix} H_b & \mathbf{0} \\ H_{E_s}^k & H_{E_2}^k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,矩阵 $H_{E_s}^k = [H_{E_{s_1}}^k, H_{E_{s_2}}^k, \dots, H_{E_{s_{m_s+1}}}^k]$, 每个子矩阵 $H_{E_{s_i}}^k = [H_{E_1}^{k,i}, \mathbf{0}]$, $H_{E_1}^{k,i}$ 中零矩阵的大小为 $k(m_s + 1) \times (c - k - 1)$, 而 $H_{E_{s_i}}^k$ 中矩阵 $H_{E_1}^{k,i}$ 是由 $H_{E_1}^k$ 的第 $[i, (m_s + 1) + 1, \dots, k(m_s + 1) + i]$ 列元素组成的矩阵, 即

$$H_{E_1}^k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{I}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_1 & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{I}_1 \end{bmatrix}_{k \times (k+1)} \circ \quad (4)$$

$H_{E_1}^k$ 中的矩阵 \mathbf{I}_1 是一个右循环一位的单位矩阵, 其大小为 $(m_s + 1) \times (m_s + 1)$ 。 $H_{E_1}^k$ 中零矩阵的大小同样为 $(m_s + 1) \times (m_s + 1)$ 。 $H_{E_s}^k$ 可以使得对应 LDPC 卷积码校验矩阵 H_{conv} 中所有的子矩阵 H_{m_s} 保持非零, 以使所构造的 LDPC 卷积码具有最大的编码约束长度。

H_s^{k+1} 中矩阵

$$H_{E_2}^k = \begin{bmatrix} H_{\text{ext}} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & H_{\text{ext}} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{I} & H_{\text{ext}} \end{bmatrix}_{k \times k}, \quad (5)$$

其中 \mathbf{I} 是大小为 $(m_s + 1) \times (m_s + 1)$ 的单位矩阵, 矩阵 H_{ext} 与文献[13] 中 h_{ext} 的构造方法一致。 $H_{E_2}^k$ 可保证 H_{conv}^{k+1} 中所有子矩阵 $H_0(t)$ 都是满秩并能进行系统编码。

最后, 对 H_s^{k+1} 按文献[9] 中算法 1 进行列置换, 可获得扩展矩阵 H_b^{k+1} 。

再依据式(1) 和式(2) 的变换关系, 即可生成对应的 RC-LDPC 卷积码的扩展矩阵 H_{conv}^{k+1} 。

2 水声信道数学模型

在浅海水声通信中, 由于复杂的海洋环境, 各个水域的通信条件不尽相同, 信号在水声信道传输的过程中会受到海洋环境噪声、多径效应和多普勒效应的影响, 因此不同水域的信道模型也不一样。研究者们提出

<http://journal.xidian.edu.cn/xdxb>

了很多种数学模型,该文介绍较为典型的多径传播模型,以 i 径为例。

i 径水声信道的冲激响应 $H(f)$ 为

$$H(f) = \sum_{i=1}^{N_i} \alpha_i \exp(j2\pi f(t - t_i)), \quad (6)$$

其中, α_i 为平均幅值, t_i 为时延,该两项为信道的特征值; f 为载波频率。平均幅值为

$$\alpha_i = \frac{(2^{\frac{r_i}{2}})^{-1}}{(l_i^k \cdot [a(f)]^{l_i})^{1/2}}, \quad (7)$$

其中, r_i 是第 i 径的反射系数, l_i 是第 i 径的传播长度, k 是扩展损失吸收系数。在实际仿真中,可认为 $k = 1.5$ 。 $a(f)$ 是吸收系数,可由 Thorp 模型给出:

$$10 \lg a(f) = \frac{0.11 f^2}{1 + f^2} + \frac{44 f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003. \quad (8)$$

该文所使用的数学模型是结合多径传播模型以及厦门五缘湾的实测数据计算得到的^[14],最终输入仿真系统的水声信道传输函数:

$$H(z) = 1 + 0.6429 z^{-317} + 0.4301 z^{-600} + 0.3155 z^{-950} + 0.2842 z^{-2317}. \quad (9)$$

3 水声信道下系统性能探究

3.1 FBMC/OQAM 浅海水声通信系统及仿真结果

依据文献[15]建立了基于 FBMC/OQAM 的水声通信仿真系统,如图 2 所示。图像信号与语音信号分别经过 LDPC 卷积码编码后再经 OCPN (Object-Composition Petri Net) 模块加入同步信息,然后进行 OQAM 调制,再经过 IFFT(快速傅里叶反变换)、FBMC 的多相滤波器组(Poly Phase Network, PPN)和并串转换进入水声信道。通过水声信道后的信号进入接收端,经过与发送端对称的多相滤波器组、FFT(快速傅里叶变换)以及 OQAM 解调模块等处理,最后用 LDPC 卷积码译码算法对接收到的序列进行译码。

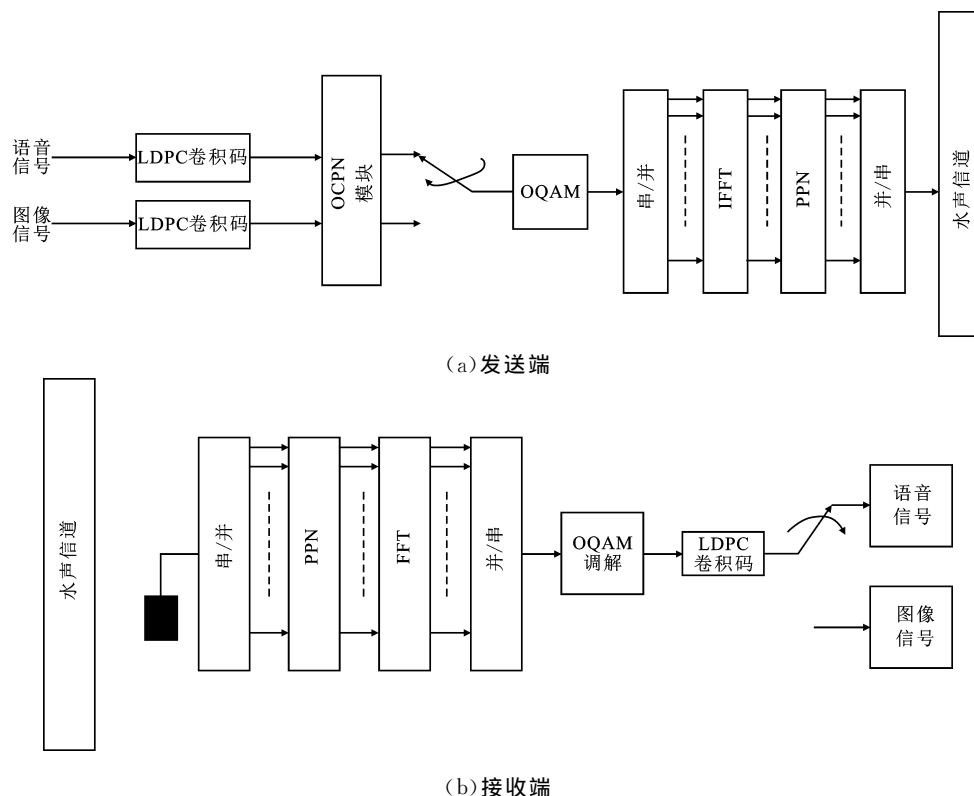


图2 基于 FBMC/OQAM 的仿真水声通信系统框图

图3 是用于传输的原始图像。图4 是用于传输的语音信号。在传输前对图像进行了灰度转化处理,对

语音信号进行了模-数转换处理,以便于系统仿真。采用(912,456,152)LDPC 卷积码^[16]作为信道码,码速率为 $1/2$,其中 912 为码字长度,456 为信息位长度,152 为记忆长度。使用前文所述 FBMC 技术,其中快速傅里叶变换位数为 1 024。同时,海洋噪声为加性高斯白噪声。解调信号经过水声信道后先经过 FBMC 多相滤波器组进行快速傅里叶变换,再进行 OQAM 解调。解调方式为对数似然比方式,以便于后续的 LDPC 卷积码译码^[9]。



图 3 用于传输的原始图像

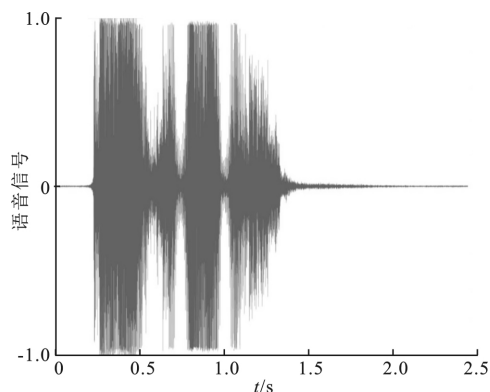


图 4 用于传输的语音信号

图 5 与图 6 分别展示了当信噪比为 -6 dB, -2.5 dB 时的仿真结果。从仿真结果可见,当信噪比为 -2.5 dB 时,经过该系统接收到的图像与发送端发送的灰度图像基本一致,接收到的语音信号波形的包络也与发送端发送的语音信号相差无几,即可认为实现无损传输。因此,基于 FBMC/OQAM 的多媒体信息水声通信系统可以获得很好的性能,能有效地克服多径效应带来的频率选择性衰落以及码间串扰,同时能降低传输所需的能量开销。

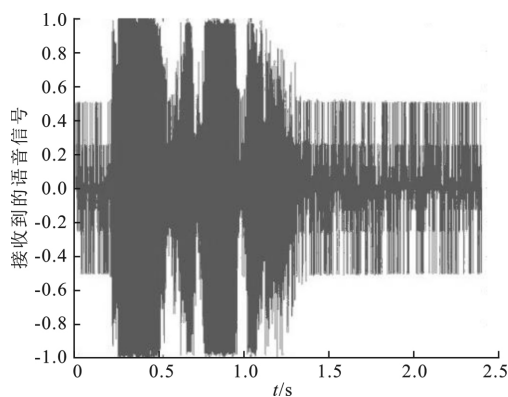


图 5 当信噪比为 -6 dB 时接收到的图像信号和语音信号仿真结果

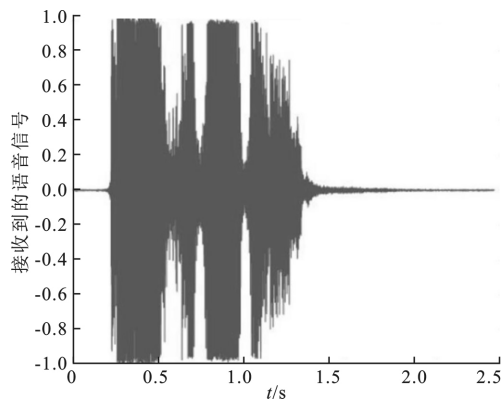


图 6 当信噪比为 -2.5 dB 时接收到的图像信号和语音信号仿真结果

3.2 跳频水声通信系统及仿真结果

为了克服复杂的浅海水声信道,建立了一个基于跳频和二进制频移键控调制的水声通信系统,如图7所示。信息序列经过RC-LDPC卷积码编码后进行2FSK(二进制频移键控)调制,然后进行跳频调制。调制后的序列经过水声信道被接收器接收,然后进行二进制频移键控解调以及解跳,最后利用流线型迭代译码算法^[9]对接收到的序列进行译码。

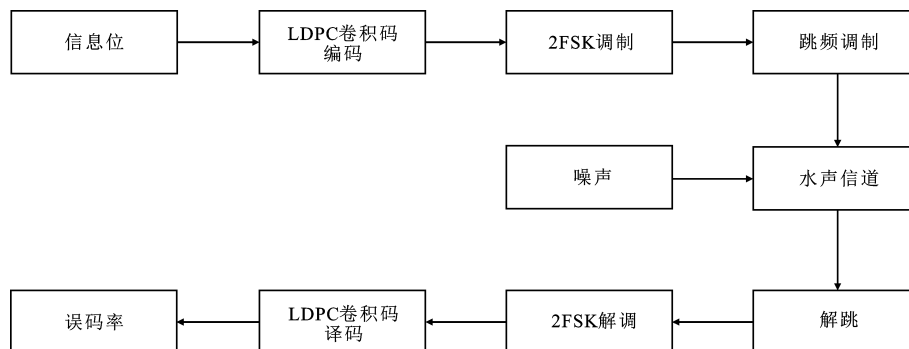


图7 LDPC 卷积码跳频水声通信系统框图

该系统使用的水声信道模型如式(9)所示。用加性高斯白噪声作为海洋噪声,信息通过水声信道传输和加噪,整个过程可以表示为

$$y = Hx + n, \quad (10)$$

其中, H 代表信道模型, x 代表要传输到水声信道的信息, n 是加性高斯白噪声。

仿真用LDPC卷积码的记忆长度 $m_s = 127$,对应 $R_1 = 8/14$,LDPC分组码基码为(1 792,168)。

RC-LDPC卷积码跳频水声通信系统的仿真结果如图8所示。可见,LDPC卷积编码技术结合二进制频移键控和跳频调制技术可以获得很好的误码率性能。另外,仿真结果显示,在码率范围从 $R=8/14$ 到 $R=8/19$,各LDPC卷积码都能够实现低误码率性能,同时展现出瀑布型下降趋势和高可靠传输性能,同时给实际应用提供了参考,可以根据实际的环境选择合适的功率。采用RC-LDPC卷积码,在码率较宽范围内使得误码率性能低于 10^{-5} ,获得了很好的性能,能够保证信号在水声信道上传输的可靠性,因此以该LDPC卷积码作为水声通信系统的编码方案是适合的。

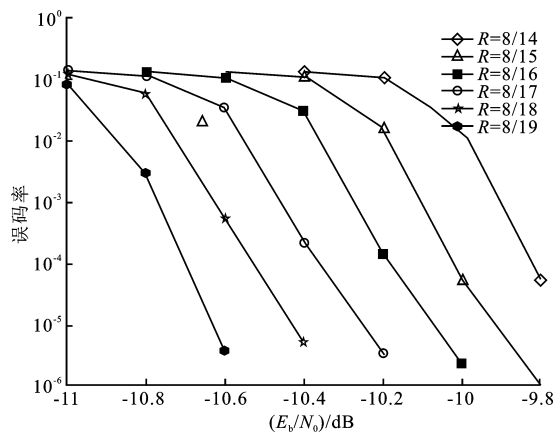


图8 码率兼容 LDPC 卷积码在浅海水声信道上的性能分析

4 总 结

该研究将LDPC卷积码用于水声信道中,验证其在水声通信系统中的可靠性能。首先,仿真验证了语音和图像信号经LDPC卷积码编码后在水声信道的传输性能;随后,搭建了基于调频的水声通信系统模型,仿真RC-LDPC卷积码在系统上的性能。误码率和图像声音的仿真结果表明,LDPC卷积码可提升水声信道中信息传输的可靠性,具有实用价值。

参考文献:

- [1] SAEED N, CELIK A, AL-NAFFOURIT Y, et al. Underwater Optical Wireless Communications, Networking, and Localization: A Survey[J]. Ad Hoc Networks, 2019, 94: 101935.
- [2] ZHANG Y, WANG A. Underwater Acoustic Channels Characterization for Underwater Cognitive Acoustic Networks [C]//Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City.

Piscataway: IEEE, 2018: 223-226.

- [3] GALLAGER R G. Low-Density Parity-Check Codes[D]. Cambridge: MIT Press, 1963.
- [4] FELSTROM A J, ZIGANGIROV K S. Time-varying Periodic Convolutional Codes with Low-Density Parity-Check Matrix[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(6): 2181-2191.
- [5] KUDEKAR S, RICHARDSON T J, URBANKE R L. Threshold Saturation via Spatial Coupling: Why Convolutional LDPC Ensembles Perform So Well over the BEC[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(2): 803-834.
- [6] TANNER R M, SRIDHARA D, SRIDHARAN A, et al. LDPC Block and Convolutional Codes Based on Circulant Matrices[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 2966-2984.
- [7] LENTMAIER M, SRIDHARAN A, COSTELLOJR D J, et al. Iterative Decoding Threshold Analysis for LDPC Convolutional Codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(10): 5274-5289.
- [8] BATTAGLIONI M, TASDIGHI A, BALDI M, et al. Compact QC-LDPC Block and SC-LDPC Convolutional Codes for Low-Latency Communications[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE, 2018: 8580758.
- [9] MU L, HAN G, LIU Z. Construction of Rate-compatible (RC) Low-density Parity-check (LDPC) Convolutional Codes Based on RC-LDPC Block Codes[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2016, 21(6): 679-683.
- [10] NISSEL R, SCHWARZ S, RUPP M. Filter Bank Multicarrier Modulation Schemes for Future Mobile Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(8): 1768-1782.
- [11] FARHANG-BOROUJENY B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(3): 92-112.
- [12] PEREZ-NEIRE A I, CAUS M, ZAKARIA R, et al. MIMO Signal Processing in Offset-QAM Based Filter Bank Multicarrier Systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(21): 5733-5762.
- [13] YAZDANI M R, BANIHASHEMI A H. On Construction of Rate-compatible Low-density Parity-check Codes[J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(3): 159-161.
- [14] 林梅英, 许肖梅, 陈友淦, 等. 码率兼容 QC-LDPC 码在水声通信中的应用[J]. 声学技术, 2014, 33(5): 460-463.
LIN Meiyang, XU Xiaomei, CHEN Yougan, et al. The Application of QC-LDPC Code in Underwater Acoustic Communication[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(5): 460-463.
- [15] LIN C F, HUNG Y T, LU H W, et al. FBMC/LDPC-Based Underwater Transceiver Architecture for Voice and Image Transmission[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018, 26(3): 327-334.
- [16] MU L W, LIU X C, LIANG C L. Improved Construction of LDPC Convolutional Codes with Semi-random Parity-check Matrices [J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(2): 1-10.

(编辑: 郭 华)