

码率兼容 QC-LDPC 码在水声通信中的应用

林梅英^{1,2}, 许肖梅^{1,2}, 陈友淦^{1,2}, 张 兰²

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 福建厦门 361102; 2. 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 361005)

摘要: 针对水声信道复杂多变、强多途和大起伏干扰等特点, 提出采用码率兼容 QC-LDPC 码的自适应信道编码技术, 以提高水声数据传输的可靠性和水声信道的信道吞吐率。建立了码率兼容 QC-LDPC 码在水声信道中的仿真模型, 构造码率为 1/2、2/3 ... 5/6 等一系列 QC-LDPC 码, 在三种典型的水声信道中对其性能进行仿真。结果表明所设计的码率兼容 QC-LDPC 码在三种不同信道下可行有效, 能较大地提高水声通信系统的性能。由于信道时延越长、信噪比越低, 满足通信指标的码率就越低; 并给出码率兼容 QC-LDPC 码在浅海水声信道中不同信噪比下满足通信性能指标的编码码率的查找表。码率兼容 QC-LDPC 码提高了水声通信的信道利用率, 具有灵活的编译码性能, 在水声自适应通信中具有很好的应用前景。

关键词: 自适应信道编码; 码率兼容 QC-LDPC 码; 水声通信

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-05-0460-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.05.014

Applications of rate-compatible QC-LDPC codes in underwater acoustic communication

LIN Mei-ying^{1,2}, XU Xiao-mei^{1,2}, CHEN You-gan^{1,2}, ZHANG Lan²

(1. School of Ocean and Earth of Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China; 2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: The underwater acoustic (UWA) channel is characterized as a complex variable, strong multipath and fluctuation interference channel. Adaptive channel coding techniques which use rate-compatible QC-LDPC (RC QC-LDPC) codes are proposed to enhance the reliability of UWA data transmission and channel throughput. A system simulation model including RC QC-LDPC codes for the UWA channels is built. With constructing a series code-rates (such as 1/2, 2/3, ..., 5/6) of QC-LDPC codes, the performance of the system is simulated over three different kinds of UWA channels. The simulation results show that the designed RC QC-LDPC codes are feasible and effective, can dramatically improve the performance of UWA communication system, have good applicability in UWA channels. In the case that the worse the channel, due to longer channel delay and lower signal-to-noise ratio, the lower the code-rate is taken to meet system communication indicators. The lookup table (LUT) of the rate compatible QC-LDPC codes, which meet the communication indicators of the shallow water acoustic communication system under different signal-to-noise ratios, is given. The RC QC-LDPC codes with flexible encoding and decoding performances can improve the utilization of UWA communication channel and have good application prospects.

Key words: adaptive channel coding; rate-compatible QC-LDPC code; underwater acoustic communication

0 引言

水声信道是一种极其复杂的随机时-空-频变信道, 表现为强多途、大起伏、窄带宽及高噪声干扰背景。高传输速率、低误码率水声通信技术是目前水声通信(Underwater Acoustic Communication, UWA)研究的重点^[1]。要达到低误码率的水声通信

性能, 必须采用信道编码技术, 并要求尽可能采用较短码长的码。

卷积码、RS 码、低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码、Turbo 码等编码方案, 已在水声通信中广泛使用。LDPC 码在这几种码中性能最接近香农限, 且译码算法复杂度较低^[2]。而水声信道要求尽可能用较短码长、易于实时处理的编码技术来提高通信系统的可靠性, 准循环低密度奇偶校验(Quasi-Cyclic Low Density Parity Check, QC-LDPC)码在短码时纠错能力比 LDPC 码强, 复杂性更低, 是目前水声信道编码领域研究的热点^[3]。文献[3]研究了 QC-LDPC 编解码技术, 码率为 1/2,

收稿日期: 2013-12-10; 修回日期: 2014-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(41176032、41376040)资助项目。

作者简介: 林梅英(1988—), 女, 福建漳州人, 硕士研究生, 研究方向为水声通信信道编码。

通讯作者: 许肖梅, E-mail: xmxu@xmu.edu.cn

构建的 LDPC-OFDM 水声通信系统, 在某港浅海域取得了不错的效果。

但水声信道快速时-频-幅变化的特征, 要求信道编码的码率甚至帧长能够自适应地根据信道环境变化实时做出相应编码调整, 因而研究码率兼容编码就显得尤为重要。目前码率兼容码在水声信道中的应用还较少, 文献 [4] 在自动重传请求 (Automatic Repeat-reQuest, ARQ) 浅海水声系统中采用信息位不变, 扩展校验位的编码方法构造码率兼容 LDPC (Rate-Compatible LDPC, RC-LDPC) 码。由于 QC-LDPC 码的特定结构, 本文采用另一种简单的扩展方法: 固定校验位, 改变信息位的位数^[5], 以构建码率为 1/2、2/3... 5/6 等一系列的码率兼容 QC-LDPC 码 (RC QC-LDPC), 并在声速为常数的均匀介质水声信道、负声速梯度水声信道及 5 径浅海水声 (Shallow Water Acoustic, SWA) 信道中研究其性能特点, 为水声通信系统参数的选择提供参考。

1 系统的仿真模型

水声自适应信道编码系统模型如图 1 所示。仿真中, 发射端发射信息序列, 经由某一码率的 RC QC-LDPC 编码器及 BPSK 调制后, 进入水声信道模型中传输。接收方首先进行 BPSK 解调, 然后进行该码率 RC QC-LDPC 译码, 最后对比信源和信宿计算误码率, 由误码率的高低来调整码率选择。

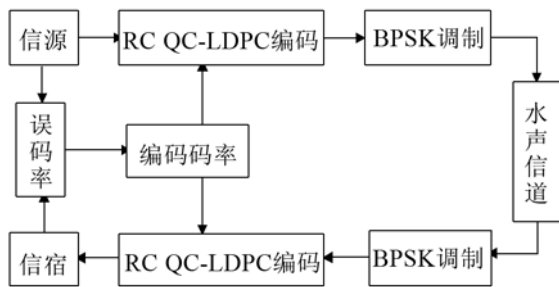


图 1 水声自适应信道编码通信原理图

Fig.1 Block diagram of the adaptive coding system for the frequency hopping communication in underwater acoustic channel

2 水声信道模型

实际水声信道的传输函数是时-频-空变的, 不同海域的信道状况会有很大不同。但在相干时间范围内, 可认为其转移函数不随时间变化。本文将针对声速为常数的等温层、负声速梯度信道模型和典型 5 径浅海水声信道模型进行 RC QC-LDPC 码性能的仿真研究。

N_p 径浅海水声信道一般可以平均幅值 α_p 和时延 t_p 为特征值, 平均幅值 α_p 可由式(1)给出^[6]:

$$\alpha_p = \frac{\Gamma_p}{\sqrt{l_p^k [a(f)]^p}} \tag{1}$$

其中: $\Gamma_p = (1/\sqrt{2})^{r_p}$ 是海底和海面的全反射损失; r_p 是第 p 径的反射次数; l_p 是第 p 径的传播长度; 实际传播中扩展损失吸收系数 $k=1.5$; f 是载波频率, 吸收系数 $a(f)$ (单位: dB/km) 由 Thorp's formula 给出^[6]:

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

而第 p 途径的延时 $t_p = l_p / c$, $c=1500$ m/s 是水下声速。所以, N_p 径 SWA 信道的冲击响应为

$$H(f) = \sum_{p=1}^{N_p} \frac{(1/\sqrt{2})^{r_p}}{\sqrt{l_p^k [a(f)]^p}} e^{-j2\pi f(t_p - t_1)} \tag{3}$$

本文根据该信道建模方法结合海域实测参数进行实际水声信道的建模工作。在假设通信带宽为 5 kHz, 采样频率为 10 kHz 的条件下, 艾宇慧^[7] 给出了以下两种典型海洋水声信道的传输函数, 即:

声速为常数的均匀介质信道 (Invariable Sound Velocity Gradient, ISVG) 传输函数为

$$H(z) = 1 + 0.599971z^{-20} \tag{4}$$

负声速梯度信道 (Negative Sound Velocity Gradient, NSVG) 传输函数为

$$H(z) = 1 + 0.263112z^{-7} + 0.151214z^{-39} + 0.391599z^{-67} \tag{5}$$

而典型 5 径浅海水声信道则采用文献 [6] 中典型的准静止衰落信道模型进行建模。考虑一个距离为 3 km、水深为 75 m 的信道模型, 假设发射端和接收端接近海底, 仿真建立 5 径浅海水声信道模型。表 1 给出了信道每径相对时延和幅度的计算结果。调制方式为 BPSK, 符号周期 $T=2.5$ ms。

表 1 浅海水声信道仿真模型
Table 1 The profile of shallow water acoustic channel for simulations

参数	1st Path	2nd Path	3rd Path	4th Path	5th Path
幅度	0.1873	0.1322	0.0657	0.0325	0.0160
相对时延/ms	0	2.5	10	22.4	39.6

3 RC QC-LDPC 码

首先构造出一个低码率的 QC-LDPC 码的校验矩阵 (H 矩阵)。为了便于编码, 该矩阵的校验部分采用双对角结构, 信息部分采用稀疏矩阵, 通过增

加部分信息位实现码率由低到高的变化。利用该方法构造的多码率兼容的 QC-LDPC 码，编码时只需要增加部分信息位的计算即可，编码简单且易于多码率复用。而译码时以码率最低的一个码字所占的资源为主，只是需要改变部分参数就可以实现多码率兼容的 QC-LDPC 码的译码^[5]。该方法扩展校验矩阵的结构如图 2 所示。

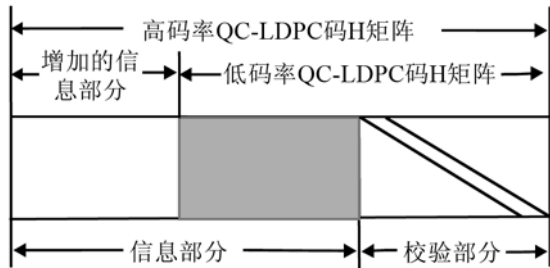


图 2 扩展信息位方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of extended information bits

对于该类型码率兼容 QC-LDPC 码，本文中设计的码字参数如表 2 所示。

表 2 信息位扩展 RC QC-LDPC 码

Table 2 RC QC-LDPC codes with information bit expansion

码长	码率	H 行块数	H 列块数	子矩阵大小
(1038,519)	1/2	3	6	173×173
(1557,1038)	2/3	3	9	173×173
(2076,1557)	3/4	3	12	173×173
(2595,2076)	4/5	3	15	173×173
(3114,2595)	5/6	3	18	173×173

4 仿真分析

仿真实验中设计一组 RC QC-LDPC 码：母码码率为 1/2，由扩展信息位生成码率分别为 1/2、2/3、3/4、4/5、5/6 等 5 种码率的 RC QC-LDPC 码系列，具体码长及信息位长度见表 2；译码采用 BP 方法，迭代次数为 20 次；仿真采用 Matlab 平台，仿真每次发送 20 帧数据。为研究水声通信系统中 RC QC-LDPC 码在不同信道特征下不同码率性能，分别在声速为常数的 ISVG 信道、NSVG 信道、典型 5 径浅海水声信道中仿真研究了 RC QC-LDPC 码的性能。假定水声通信的性能指标为误码率(BER)低于 10⁻⁴。仿真结果如图 3、4、5 所示。

由图 3、4 可以看出，RC QC-LDPC 码能显著提高水声通信系统性能，且码率越低性能越好，所需要的信噪比也越低。由图 3、4 也可发现，RC QC-LDPC 码在 ISVG 中的性能比在 NSVG 差一些，其原因是文献[7]作者在进行水声信道仿真时，接收水听器的布放位置靠近海底，从理论上可知，在负

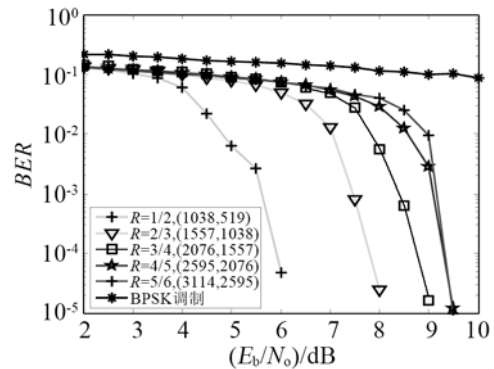


图 3 RC QC-LDPC 编码在 ISVG 水声信道中的 BER 曲线
Fig.3 The BER performance of RC QC-LDPC over ISVG channel

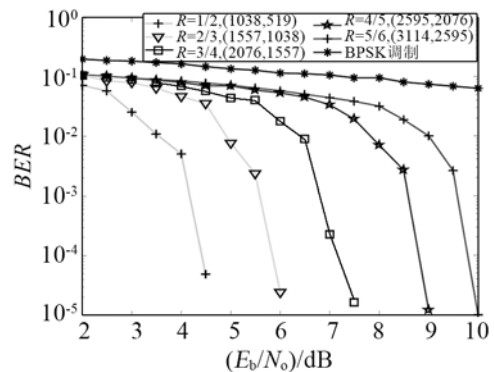


图 4 RC QC-LDPC 编码在 NSVG 水声信道中的 BER 曲线
Fig.4 The BER performance of RC QC-LDPC over NSVG channel

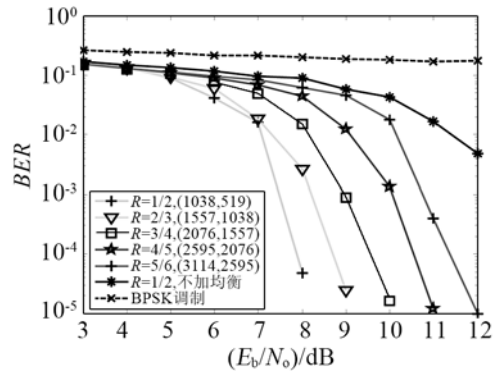


图 5 RC QC-LDPC 编码在典型 5 径浅海水声信道中的 BER 曲线
Fig.5 The BER performance of RC QC-LDPC over SWA channel

声速梯度下，声线往声速变小的方向即海底方向走，偏下方，导致通信性能比较好。

5 径浅海信道的仿真见图 5。同时，由于浅海典型 5 径信道传播时延大，多途干扰强，必须在信道译码前加入均衡，才能保证可靠的水声通信性能(可由图 5 中*形曲线看出)。本文自适应判决反馈均衡器采用 RLS 算法，其收敛速度快、适于跟踪快速变化信道^[8]。

RLS 算法迭代公式如下^[8]：

$$e(n)=d(n)-y(n)$$

$$y(n)=\omega^H(n-1)x(n)$$

$$\mathbf{K}(n) = \frac{\mathbf{R}(n-1)\mathbf{x}(n)}{\lambda + \mathbf{x}^H(n)\mathbf{R}(n-1)\mathbf{x}(n)}$$

$$\boldsymbol{\omega}(n) = \boldsymbol{\omega}(n-1) + \mathbf{K}(n)\mathbf{e}(n)$$

$$\mathbf{R}(n) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{R}(n-1) - \mathbf{K}(n)\mathbf{x}^H(n)\mathbf{R}(n-1)]$$

其中： $\mathbf{d}(n)$ 为 M 阶自适应滤波器的期望输出； $\mathbf{x}(n)$ 为 n 时刻的输入向量； $\boldsymbol{\omega}(n)$ 为此刻滤波器权系数向量； $\mathbf{e}(n)$ 为此刻的误差； $\mathbf{K}(n)$ 是增益矢量； $\mathbf{R}(n)$ 是误差相关矩阵。仿真中 RLS 的参数设置为 $\lambda=0.9999$ ，初始值 $\mathbf{R}(n)=0.05 \times \mathbf{eye}(M, M)$ ($\mathbf{eye}(n)$ 是产生一个 $n \times n$ 大小的单位矩阵)， M 是均衡器阶数，设置训练长度为 512 bit，抽头系数的个数为 45。

由图 5 可知，所设计的 RC QC-LDPC 码通过均衡消除多途带来的码间干扰后，在浅海水声信道中也是可行的。同样，在信噪比较高的水声环境中可选择码率较高的 QC-LDPC 码以避免编码造成冗余数据。水声信道时延越长、径数越多，满足水声通信指标所需要的编码码率就越低。本文所设计的 RC QC-LDPC 码在水声信道中具有很好的适用性，该编码方案是可行有效的。

为进一步明了 RC QC-LDPC 码在浅海水声通信中的参数选择问题，本文建立了不同信噪比下满足通信性能指标的编码码率的查找表(Look-Up Table, LUT)，以供实际通信中编码码率的选择。假设系统性能的要求为误码率低于 10^{-4} ，表 3 给出了在典型 5 径水声信道中由不同接收端信噪比 (E_b/N_0) 表征的不同水声信道的查找表。当满足性能指标时，标记为“1”；反之，标记为“0”。在使用该表时，如在典型 5 径浅海水声信道中，当估计到接收端的 $E_b/N_0=9$ dB，为了达到检测门限的要求，可选择的码率为 1/2 和 2/3，最高码率为 1/2(其他码率不能满足性能指标)。因此相对其它码率的备选方案，在本次通信传输中，系统将集中选择 1/2 码率和 2/3 码率这两种码，直到获得更新的 E_b/N_0 估计结果。以此类推其他 E_b/N_0 下的情况。在其他水声信道中也是通过这样的方法确定码率。

表 3 浅海水声信道中 RC QC-LDPC 码性能查找表

Table 3 The performance LUT of RC QC-LDPC codes in shallow water acoustic channel

$(E_b/N_0)/\text{dB}$	$BER \leq 10^{-4}$					
	5/6	4/5	3/4	2/3	1/2	未加均衡
12	1	1	1	1	1	0
11	0	1	1	1	1	0
10	0	0	1	1	1	0
9	0	0	0	1	1	0
8	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0

需要注意的是，在浅海水声信道，RC QC-LDPC 码的性能是指有经过 RLS 信道均衡之后的结果，选择不同的均衡算法，结果会有差异。

5 结论

为保证水声数据可靠传输，提高幅-时-频-空域动态变化范围大的水声信道的信道带宽、信噪比等综合利用效率，本文构建 RC QC-LDPC 码的水声通信系统。结合水声信道特点，研究了 RC QC-LDPC 码在三种不同水声信道(ISVG、NSVG、SWA)中不同码率的性能。

仿真结果表明，RC QC-LDPC 码能有效降低水声通信的误码率，提高水声通信系统的性能；且码率越低性能越好，所需要的信噪比也越低。所设计的 RC QC-LDPC 码结构简单、便于实现，编译码灵活，提高了水声信道的信道利用率，是水声自适应通信中一种不错的选择。

参 考 文 献

- [1] Stojanovic M. Retrofocusing techniques for high rate acoustic communications[J]. Acoustical Society of America, 2005, 117(3): 1173-1185.
- [2] Chung S Y, Forney G D, Richardson T J, et al. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit[J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(2): 58-60.
- [3] 白栋旸. LDPC 码及其在浅海 OFDM 水声通信系统中的应用研究和 DSP 实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2011.
BAI Liyang. The research and DSP implementation of LDPC codes in OFDM underwater acoustic communication system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2011.
- [4] CHEN Y, XU X, ZHANG L, et al. Design and Application of dynamic coding in shallow water acoustic communications[C]// OCEANS, 2012-Yeosu. IEEE, 2012: 1-6.
- [5] 李宗臣. 码率兼容 QC-LDPC 码的设计和实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
LI Zongcheng. Design and implementation of rate-compatible QC-LDPC codes[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [6] Vajapeyam M, Vedantam S, Mitra U, et al. Distributed space-time cooperative schemes for underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(4): 489-501.
- [7] 艾宇慧, 高静. 水声信道相关均衡器仿真研究[J]. 声学学报, 1999, 24(6): 589-597.
AI Yuhui, GAO Jing. A simulation study on correlation equalization of underwater acoustic channels[J]. Acta Acustica, 1999, 24(6): 589-597.
- [8] 陈海兰, 胡晓毅, 许茹, 等. LMS 算法和 RLS 算法在水声信道通信系统中应用的比较[J]. 无线通信, 2007, 242(3): 18-19.
CHEN Hailan, HU Xiaoyi, XU Ru, et al. Comparison of LMS algorithm and RLS algorithm using in the underwater acoustic communication system[J]. Modern Electronics Technique, 2007, 242(3), 18-19.