

浅海水声信道中 QC-LDPC 码性能研究^①

陈友淦^{②*} 许肖梅^{③*} 冯 玮^{*} 张 兰^{*}

(* 厦门大学信息科学与技术学院 厦门 361005)

(** 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)

摘 要 针对大起伏、强多途、窄带宽的浅海水声信道需采用码长短、性能好、易于实时处理的信道纠错码技术才能提高水声通信系统可靠性的问题,提出了准循环低密度奇偶校验(QC-LDPC)码作为浅海水声信道的信道纠错编码方案。建立了 QC-LDPC 码在水声信道中的仿真模型,采用 BP 译码算法,在典型 3 径浅海水声信道中就码率、围长等参数对误码率的影响进行了仿真,比较了其在不同海洋信道条件下的性能,在厦门港浅海域典型水声信道模型下,仿真研究了 QC-LDPC 码的性能。结果表明编码复杂度较低的 QC-LDPC 码,性能接近于复杂度高、随机构造的(3,6)-LDPC 码,在水声通信中具有良好的应用前景。

关键词 准循环低密度奇偶校验(QC-LDPC)码,准循环,浅海水声信道,水声通信

0 引 言

浅海水声信道是水声通信收发机地理位置、通信距离、水深、海洋环境等参数的复杂函数,其环境噪声高、载波频率低、带宽资源少、传输时延长,是至今实现难度最大的无线通信信道之一。为提高水声数据传输系统的可靠性,有必要采用信道纠错码技术。目前,国内外的学者就 RS 码、卷积码、级联码、Turbo 码等技术在水声信道中的应用进行了较为深入的研究,美国康涅狄格大学及中国西北工业大学、厦门大学等则将低密度奇偶校验(low density parity check, LDPC)码引入水声通信中,并且取得了一些初步的研究成果^[1-5]。LDPC 码在与基于置信迭代(belief propagation, BP)的译码算法相结合的条件下具有逼近香农限的性能,LDPC 码的重新发现是继 Turbo 码后在纠错编码领域的又一重大进展^[6]。但是由于 LDPC 码逼近香农限的性能是在较长的码长情况下才能得到体现^[4,6],这将会给硬件实现带来相当大的复杂度,而且,时-空-频变的水声信道要求

尽可能用较短的码长,LDPC 码的优秀性能难以在水声信道的现实应用中发挥作用。因此,探索如何构造和改进适合于水声信道同时便于硬件电路实现的 LDPC 码,具有重要理论和实际应用意义。准循环低密度奇偶校验(quasi-cyclic LDPC, QC-LDPC)码具有码长短、性能好、易于实现的优点,为 LDPC 码在水声信道中的应用带来了希望。对于一般 LDPC 码,由于稀疏校验矩阵转换为生成矩阵后不能保证它的稀疏性,因此算法复杂度为 $O(N^2)$,而 QC-LDPC 码的算法复杂度可降为 $O(N)$, N 为码长^[7]。QC-LDPC 码使用了准循环子矩阵来构造奇偶校验矩阵 H ,使得 QC-LDPC 码结合了一般 LDPC 码随机性的特点,又具有准循环结构的特性,在保证 LDPC 码性能不变的前提下,大大简化了编码和译码电路,成为 LDPC 码走向应用的一种重要手段,是目前 LDPC 码研究中的热点^[7-9]。目前在国内外文献中, QC-LDPC 码在水声信道中的研究较为少见。本文将围绕典型的 3 径水声信道仿真研究码率、围长等参数对 QC-LDPC 码性能的影响,并结合厦门海域浅海水声信道模型研究其性能。

① 863 计划(2006AA09Z108), 国家自然科学基金(40776022), 高等学校博士学科点专项科研基金(20090121110001)和中央高校基本科研业务费专项基金(201112G020)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:水声通信技术,信道编码;E-mail: yougan.chen@foxmail.com

③ 通讯作者,E-mail: xmxu@xmu.edu.cn

(收稿日期:2010-04-19)

1 浅海水声信道模型及描述

浅海水声信道多途时变模型可表示为^[5]

$$y(n) = \sum_{i=1}^L a_i(n)x(n - n_i) + w(n) \quad (1)$$

其中, $x(n)$ 、 $y(n)$ 分别为发送接收符号序列, $w(n)$ 为高斯噪声序列, $a_i(n)$ 为第 i 途衰落因子序列, n_i 为第 i 途延迟符号周期数。根据式(1), 仿真中所用信道模型可用图 1 表示。

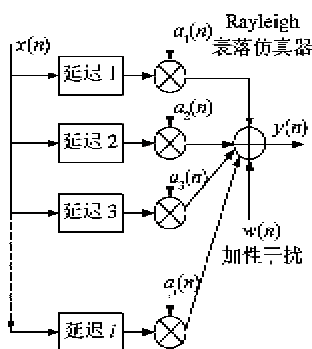


图1 水声信道离散模型

在仿真中, 可根据式(1)先将发送信号经过水声信道多途和衰落干扰, 再叠加上高斯白噪声, 于是问题转化为研究水声信道多途和衰落模型。

在信道相干时间长度内, 水声信道的多途和衰落模型可简化为一个确定性的线性时不变滤波器或确定性的时-空滤波器, 其传输函数的形式如下:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{行重6} \\ \\ \\ \text{列重3} \end{matrix} \quad (a)$$

$$H(z) = \sum_{i=1}^L \alpha_i \times z^{\lfloor -\tau_i/T \rfloor} \quad (2)$$

其中, L 为途数, α_i 和 τ_i 分别为各途幅值和时延, T 为采样周期, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为取整运算符号。

本文仿真研究 QC-LDPC 过程中, 假设信道相干时间长度内多途和衰落是稳定的, 即传输函数是不随时间变化的, 采用典型的 3 条声线仿真方法构造的一个水声信道传输函数如下^[10]:

$$H(z) = 1 - 0.67z^{-15} + 0.55z^{-19} \quad (3)$$

2 QC-LDPC 码描述^[11-13]

2.1 稀疏校验矩阵的构造

LDPC 码是一种用稀疏校验矩阵定义的线性分组码, 校验矩阵 H 中的元素值均为二进制数, 且每行及每列元素中 1 的个数远小于码长, 故称之为低密度奇偶校验码。若其 H 矩阵中具有相同的行重和列重, 则称为规则 LDPC 码; 反之, 则称为非规则 LDPC 码。 H 矩阵可以非常方便的用 Tanner 图进行描述。假定校验矩阵 H 如图 2(a) 所示, 图 2(b) 是与之对应的 Tanner 图, H 矩阵中的每一列用变量点 $n_i (i = 1, 2, \dots)$ 表示, 每一行用校验点 $m_i (i = 1, 2, \dots)$ 表示, Tanner 图中的边对应了矩阵中“1”的位置, 每个节点所连接的边数称为这个节点的度, Tanner 图完全表征了校验矩阵中比特变量与校验方程之间的关系。

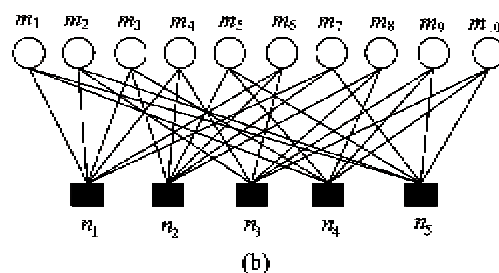


图2 校验矩阵与 Tanner 图的关系

引入 Tanner 图及其相关概念, 为分析 LDPC 码的结构、构造性能优良的校验矩阵的研究提供了很多直观的方法。

2.2 QC-LDPC 码构造

QC-LDPC 码是一类非常特殊的高度结构化的 LDPC 码, 它的校验矩阵以单位阵的循环移位阵(在此简称移位阵)和零方阵为子阵。以 I 表示大小为 $q \times q$ 的单位矩阵的 1 次循环移位阵,

$$I = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

则 I^i 表示单位阵的 i 次循环移位阵, $0 \leq i < q$ 。在此, I^0 表示零方阵, 假定 $jq \times kq$ 的矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} I^{a_{11}} & I^{a_{12}} & \dots & I^{a_{1k}} \\ I^{a_{21}} & I^{a_{22}} & \dots & I^{a_{2k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I^{a_{q1}} & I^{a_{q2}} & \dots & I^{a_{qk}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $a_{il} \in \{0, 1, \dots, q-1, \infty\}$, $1 \leq i < j, 1 \leq l < k$, 则以 H 为校验矩阵的码字 C 具有准循环特性。即 $\forall c = (c_0, c_1, \dots, c_{kq-1}) \in C$, 满足

$$(c_0 I^j, c_1 I^j, \dots, c_{kq-1} I^j) \in C, 0 \leq i < q \quad (6)$$

那么,称 C 为 QC-LDPC 码。当 H 满秩时,无论码长 $N = kq$ 为多少,其码率均为 $R = (kq - jq)/kq = 1 - j/k$ 。在校验矩阵 H 中,每个移位阵第一行“1”元素位置确定后,其它“1”元素位置就相应确定了。因此,QC-LDPC 码校验矩阵所需存储单元仅占随机 LDPC 码的 $1/q$ 。本文选择基于文献[13]构造的围长为 8 的 QC-LDPC 码为对象进行研究。该码的码率为 0.5,校验矩阵 H 的列重为 $j = 3$,行重为 $k = 6$,单位阵参数选择 $q = 170$,即每个子矩阵 $I^{a_{ij}}$ 的大小为 170×170 。

2.3 QC-LDPC 码译码

对 QC-LDPC 码的译码算法大都直接采用普通 LDPC 码译码算法,只是在实现结构的布置上利用 QC-LDPC 码自身的特性进行了优化^[8]。本文采用一种 Tanner 图上的 BP 译码算法,具体可参见文献[8,11,12],此处不再赘述。

3 仿真实验及讨论

3.1 随机构造的 LDPC 码和 QC-LDPC 码性能比较

为研究 QC-LDPC 码在水声信道中的性能,首先比较研究 QC-LDPC 码与随机码构造的 LDPC 码在水声信道中的性能差异。随机构造的 LDPC 码采用普通的(3,6)-LDPC 码,根据我们之前的工作^[3,7],码长选用 1024bit,译码算法采用 BP 译码算法,5 次迭代,基本能满足水声通信的要求。QC-LDPC 码码长 1020bit,BP 译码算法,5 次迭代。图 3 为随机构造的(3,6)-LDPC 码与 QC-LDPC 码在典型 3 径水声信道中进行仿真的性能结果。

由图 3 可见,经过 QC-LDPC 编码后可使误码率(BER)降低 2 个数量级以上,QC-LDPC 码性能逼近于随机构造的(3,6)-LDPC 码的性能,但相对随机构造的(3,6)-LDPC 码,QC-LDPC 码只需用反馈位移寄存器连接就可实现,因此在水声信道中具有很好的应用前景。此外,注意到在信噪比(SNR)低于 1dB 时,编码后的性能反而不如未编码的性能,这

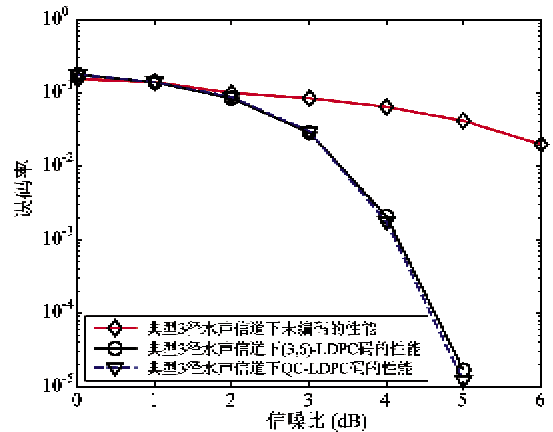


图 3 水声信道中随机构造的(3,6)-LDPC 码和 QC-LDPC 码性能比较

表明纠错码技术必须在系统的原始误码不高于 10^{-1} 时应用,否则不但得不到编码增益反而会产生误码扩散。若采用其它译码算法,QC-LDPC 码的纠错性能则可进一步改善,因为对于 QC-LDPC 码而言,BP 译码算法并不是最优的译码算法^[9],为便于比较,本文对两种编码方式统一采用 BP 译码算法。

3.2 QC-LDPC 码码率变化的影响

由于浅海水声信道带宽窄、时变快,希望尽可能采用较短的码长,而信道编码本身是以增加冗余度为代价以期获得编码增益,为此,研究如何选取合适的码率以平衡这两者的矛盾具有重要意义。

图 4 给出了码长 1020,译码迭代次数为 5,码率分别为 1/2、2/3 时,QC-LDPC 码在水声信道中误码性能的变化。由图 4 可见,在典型 3 径水声信道中,信噪比较高时,QC-LDPC 码随码率的降低,误码性能曲线更加陡峭,误码率下降得更快,表明码率越低性能越好。但是,信噪比较低时,码率越高性能越

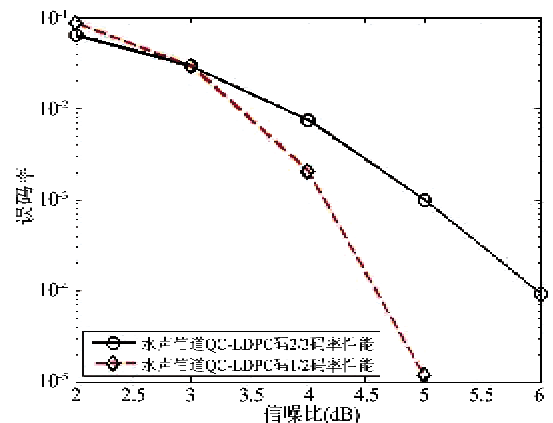


图 4 典型 3 径水声信道下不同码率 QC-LDPC 码的性能

好,如在信噪比小于 3dB 时,1/2 码率的性能稍逊于 2/3 码率的性能。一般地,按照水声通信 10^{-4} 误码率要求,1/2 码率比 2/3 码率可节约 1dB 左右的开销。

3.3 QC-LDPC 码围长变化的影响

若 LDPC 码对应的 Tanner 图不存在环时,BP 译码算法可逼近最大似然译码算法;若图中有环,特别是有长为 4 环时,LDPC 码的译码性能会受到影响,这是由于经过 2 次迭代后,网络中传递的概率信息就会发生相关,使得译码无法收敛或收敛速度变慢。

在浅海水声信道的实际应用中,由于 LDPC 码长度有限,故 Tanner 图中短环的出现不可避免。因此,在水声信道中,对于 QC-LDPC 码围长的设计显得非常重要,图 5 为 1020 码长、5 次译码迭代条件下,最小环为 12、最小环为 8 和最小环为 6 的 QC-LDPC 码,在典型 3 径水声信道中误码性能的变化。由图 5 可见,在信噪比小于 4dB 时,最小环为 12、8 和 6 的 QC-LDPC 码性能几乎相同;当信噪比大于 4dB 时,随着最小环数目的增加,误码性能有所改善,但是改善不大,误码率都能降到 10^{-4} 以下。因此,在极其恶劣的水声信道中,若需要的信噪比较高,则在设计 QC-LDPC 码时应选用最小环较大的码型。而就一般的海况条件而已,最小环为 8 的 QC-LDPC 码基本满足水声通信要求。

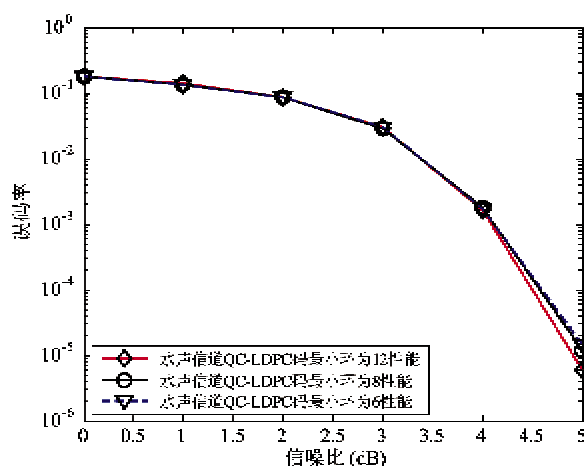


图 5 典型 3 径水声信道下不同围长 QC-LDPC 码的性能

3.4 不同海洋水声信道的影响

在假设通信带宽为 5kHz,采样频率为 10kHz 的条件下,文献[14]给出了几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为

$$H(z) = 1 + 0.599971z^{-20} \quad (7)$$

正声速梯度信道为

$$H(z) = 0.734189 + z^{-13} - 0.406511z^{-14} - 0.295130z^{-55} \quad (8)$$

负声速梯度信道为

$$H(z) = 1 + 0.263112z^{-7} + 0.151214z^{-39} + 0.391599z^{-67} \quad (9)$$

图 6 给出了 5 次译码迭代、1020bit 码长、1/2 码率、围长为 8 的 QC-LDPC 码在上述几种典型海洋水声信道中的性能比较。由图 6 可见,三种水声信道下,误码曲线都是在信噪比超过门限值后才迅速下降,否则随着信噪比的增加,误码性能并不能得到有效的改善,因此如何找到这个门限值显得尤为关键。三种水声信道比较而言,QC-LDPC 码在负声速梯度的信道中性能表现最优,声速为常数的均匀介质信道次之,正声速梯度信道最差。可见,QC-LDPC 码在负声速梯度海洋水声信道环境中的抗干扰效果最好。

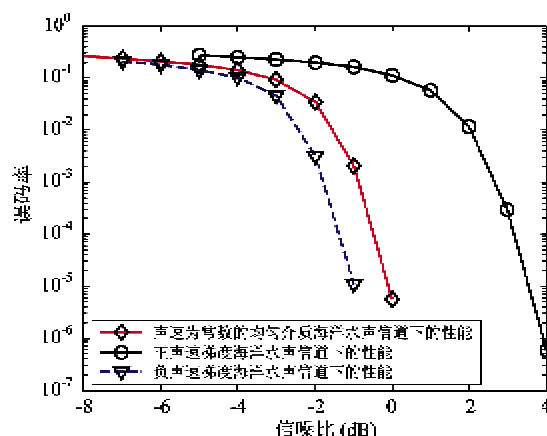


图 6 不同海洋水声信道下 QC-LDPC 码的性能

4 厦门港海域仿真及讨论

4.1 厦门港海域浅海水声信道仿真

课题组进行的实验海区为厦门港海域,平均水深约 20m。厦门港浅海水声信道,由于港口船只作业频繁、岸边城市生活噪声干扰严重,信道环境极为恶劣。利用 BELLHOP 射线模型^[15],根据厦门港海域实验海区的实际信道条件^[16]进行信道建模,得到的信道多径时延分布如图 7 所示。

根据我们之前的实验工作^[16],给出一种厦门港海域水声信道的传输函数如下:

$$H(z) = 0.931088 + 0.644871z^{-26} - z^{-64} - 0.822240z^{-65} - 0.502349z^{-87} \quad (10)$$

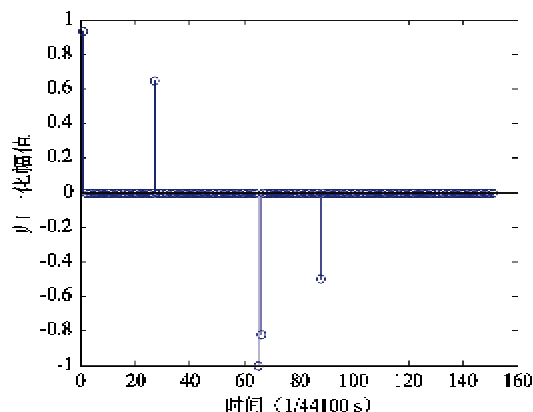


图 7 厦门港浅海水声信道多径时延分布

图 8 为与之对应的水声信道传输函数的零极点分布情况。由图 8 可见, 仿真得到的厦门港海域浅海水声信道传输函数的零极点均在单位圆内, 满足 $H(z)$ 是最小相位的条件, 可用反卷积法求出发射信号^[14]。因此, 得到的该厦门港海域水声信道传输函数模型合理、可行, 可用于仿真计算。

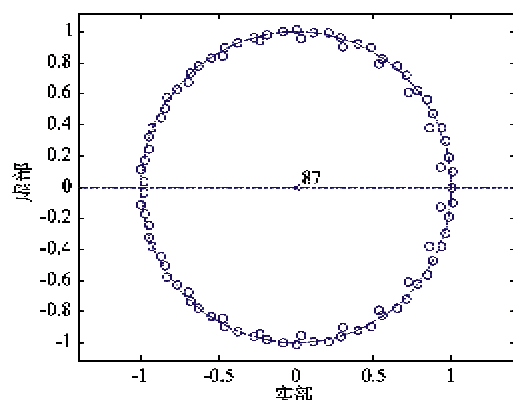


图 8 厦门港浅海水声信道传输函数的零极点分布情况

4.2 厦门港海域 QC-LDPC 码性能仿真

图 9 为 QC-LDPC 码在厦门港海域中浅海水声信道的仿真结果。仿真中, 为有效克服厦门港海域严重的干扰噪声, QC-LDPC 码的 BP 译码迭代次数增加到 100, 围长为 8, 其余参数不变。由图 9 可见, 在信噪比小于 11dB 时, QC-LDPC 码在厦门港浅海水声信道中的误码率变化不大; 在信噪比大于 11dB 以后, 其误码率下降得比较快, 能有效地纠错。但是由于实际信道环境条件比较差, 要达到较低的误码率, 所需消耗的信噪比较高, 达到 13dB 以上。

通过图 9 也可以容易看出, 本次仿真所采用的最小环长度为 8 的 QC-LDPC 码的短环对译码性能仍存在影响, 该码在信噪比为 14 ~ 15dB 左右、误比

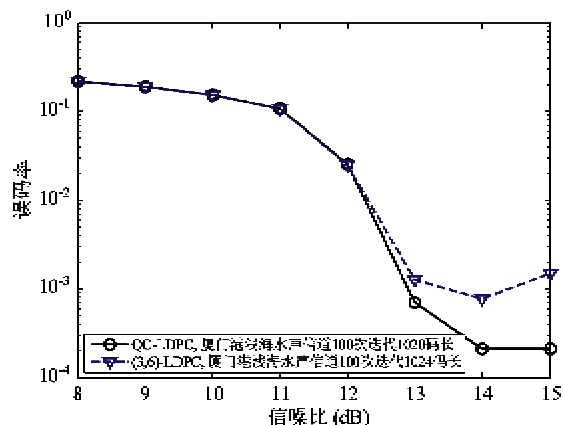


图 9 厦门港浅海水声信道下 QC-LDPC 码 100 次迭代的性能

特率不到 10^{-4} 时, 就开始出现误码平台。而随机构造的 (3,6)-LDPC 码更是在信噪比为 13dB 时便开始出现误码平台。可见, QC-LDPC 码能在更低的误码率时才出现误码平台。

5 结论

本文针对长时延、强多途、窄带宽的浅海水声信道, 采用 QC-LDPC 码作为信道编码的方法, 通过建立 QC-LDPC 码在水声信道中的仿真模型, 采用 BP 译码算法, 在典型 3 径水声信道中进行了仿真研究。仿真结果表明: 在典型 3 径水声信道下, 1/2 码率、最小环为 8 的中短码长 QC-LDPC 码能使通信误码率降到 10^{-4} , 基本满足水声通信性能要求; QC-LDPC 码在负声速梯度的信道中性能表现最优, 声速为常数的均匀介质信道次之, 正声速梯度信道最差; 在厦门港海域的浅海水声信道环境中, 需要消耗较高的信噪比才能取得较好的性能, 与随机构造的 LDPC 码相比, QC-LDPC 码在更低的码率才出现误码平台现象。

综上, QC-LDPC 码在水声信道中具有相当强的纠错能力, 性能接近随机构造的 LDPC 码, 又因其硬件实现极其简单, 只需用反馈移位寄存器连接就可实现, 因此, 在水声通信中具有有良好的应用前景。

参考文献

- [1] Huang J, Zhou S, Willett P. Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26 (9): 1684-1696
- [2] Han W, Huang J G, Jiang M. Performance analysis of underwater digital speech communication system based on

- LDPC codes. In: Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Xi'an, China, 2009. 567-570
- [3] 陈友淦, 许肖梅. LDPC 码在浅海水声通信中的应用研究. 通信技术, 2009, 42(4): 41-45
- [4] 张洁. LDPC-COFDM 系统在水声通信中的应用研究: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学信息科学与技术学院, 2007. 54-64
- [5] Chen Y G, Xu X M, Zhang L. Performance analysis of LDPC codes over underwater acoustic channel. In: Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, China, 2009. 1-4
- [6] Chung S Y. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit. *IEEE Communications letters*, 2001, 5(2): 58-60
- [7] 敬龙江, 林竞力, 朱维乐. 一种高码率低复杂度准循环 LDPC 码设计研究. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1385-1389
- [8] 黄炜. 准循环 LDPC 码的构造及编解码方法研究: [硕士学位论文]. 上海: 复旦大学信息科学与工程学院, 2008. 7-10
- [9] 刘晓健, 吴晓富, 赵春明. 准循环 LDPC 码的两种典型快速译码算法研究. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 79-82
- [10] 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. 现代电子技术, 2007, 242(3): 18-19
- [11] Richardson T, Urbanke R. The capacity of low-density parity check codes under message-passing decoding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 47(2): 599 - 618
- [12] 钟竞东, 梁钊. 准循环 LDPC 码的构造及其性能仿真. 计算机工程与应用, 2006(21): 61-63
- [13] Malema G, Liebelt M. Quasi-cyclic LDPC codes of column-weight two using a search algorithm. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007. doi: 10.1155/2007/45768
- [14] 艾宇慧, 惠俊英, 高静. 水声信道相关均衡器仿真研究. 声学学报, 1999, 24(6): 589-597
- [15] 覃柳怀. 基于 BELLHOP 射线模型的浅海水声信道传播模型研究: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学海洋系, 2005
- [16] 童峰, 许肖梅, 方世良. 一种单频水声信号多径时延估计算法. 声学学报, 2008, 33(1): 62-68

Performance analysis of QC-LDPC codes over shallow water acoustic channels

Chen Yougan^{***}, Xu Xiaome^{***}, Feng Wei^{***}, Zhang Lan^{**}

(* School of Information Science and Technology of Xiamen University, Xiamen 361005)

(** Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology (Xiamen University), Ministry of Education, P. R. C, Xiamen 361005)

Abstract

Considering that a shallow water acoustic (SWA) channel is characterized by rapid time-dispersive fading, multipath and narrow bandwidth, which has to use the error correcting code technique with short code length, good performance and easy implementation to improve the reliability of its communication system, the quasi-cyclic low density parity check (QC-LDPC) coding as an error correction coding scheme was applied to SWA channels. A system simulation model including QC-LDPC codes for the SWA channels was built. With the decoding algorithm of belief propagation (BP), the performance of the system was simulated over a typical three-multipath SWA channel under different code rates and girths. The performance comparison of QC-LDPC codes in different SWA channels was presented. A channel model was established according to the characteristic of the SWA channel environment in Xiamen harbor. The model was used to simulate the performance of QC-LDPC codes. The simulation results show that simple QC-LDPC codes can achieve almost the same performance of the random (3, 6)-LDPC codes, which proves the effectiveness and the good application prospects of QC-LDPC codes in SWA communication.

Key words: quasi-cyclic low density parity check (QC-LDPC) codes, quasi-cyclic, shallow water acoustic channel, underwater acoustic communications