

基于校验矩阵优化扩展的码率兼容 LDPC 码设计

陈紫强^{1,2}, 欧阳缮^{1,2}, 李民政², 臧 岚², 肖海林²

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 桂林电子科技大学认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了提高低密度校验(low density parity check, LDPC)码的打孔性能,提出一种基于校验矩阵优化扩展的码率兼容 LDPC 码设计方法。从码率兼容码的度分布约束关系出发,提出母码的度分布优化算法。在此基础上,结合打孔变量点的译码恢复规则,构造适合打孔的 LDPC 码校验矩阵。采用贪婪搜索算法逐级最大化不同类型的打孔变量点数目,提高码率兼容系列子码的误码性能。仿真结果表明,与编码高效的码率兼容 LDPC 码相比,所提方法生成的码率兼容子码误码性能有较大改善,特别是当码率大于 0.8 时,编码增益提高约 0.7~0.8 dB。

关键词: 低密度校验码; 码率兼容; 优化设计; 打孔

中图分类号: TN 911. 22

文献标志码: A

DOI:10. 3969/j. issn. 1001-506X. 2013. 09. 26

Optimized extension of the parity-check matrix for rate-compatible LDPC codes

CHEN Zi-qiang^{1,2}, OUYANG Shan^{1,2}, LI Min-zheng², ZANG Lan², XIAO Hai-lin²

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Key Laboratory of Cognitive Radio & Information Processing, Ministry of Education, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to improve the puncturing performance of low density parity check (LDPC) codes, a method to optimize the extension of the parity-checking matrix for rate-compatible LDPC codes is proposed. Considering the rate compatible constraint, an algorithm is presented to optimize the degree distribution of the LDPC codes. Based on the recovery rules of punctured nodes, a new structure of the parity-check matrix is devised to facilitate puncturing. A greedy search algorithm is adopted to stepwisely maximize the number of different types of punctured variable nodes, which results in good puncturing performance. The experiment results show that the proposed method is superior to the efficiently-encodable rate-compatible LDPC (E^2RC -LDPC) codes over wide range of rates. When the rate is greater than 0.8, the proposed method can obtain about 0.7-0.8 dB gain over the E^2RC -LDPC codes.

Keywords: low density parity check (LDPC) code; rate compatible; optimized design; puncturing

0 引言

在无线通信应用中,信道状态信息随时间不断变化,为最大化无线信道吞吐率,需要根据信道状态采用灵活的码率。在码率兼容(rate-compatible, RC)码中,高码率码是低码率码的一部分,可采用同一校验矩阵实现不同码率子码的编/译码,RC 码的硬件实现复杂度低^[1]。因此,RC 码成为时变信道中优选差错控制技术。

由于 LDPC 码在多种信道条件下都表现出优异的纠错

性能,近年来,RC-LDPC 码的设计成为国内外研究热点^[2-3]。主要方法有打孔策略优化和校验矩阵结构优化。在打孔策略优化方面,文献[4]提出了非规则 LDPC 码的优化打孔方法,产生了一组逼近信道容量的 RC-LDPC 子码,该方法仅适用于无限长码。文献[5]根据打孔变量点错误恢复概率与存活校验点数目关系,提出适合中短 LDPC 码的实用打孔优化方法,性能优于随机打孔方法。受打孔规则的约束,该方法很难获得较高码率子码。针对该问题,文献[6]放宽了打孔规则,提出一步优化打孔算法,只需相同

收稿日期:2012-05-28; 修回日期:2013-07-15; 网络优先出版日期:2013-09-10。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20130910.1710.001.html>

基金项目:国家自然科学基金(60972084,61162007,61102115,61261018,61261032);广西自然科学基金项目(2013GXNSFFA019004);广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 2011 年度主任基金项目(11106,11104);广西研究生教育创新计划(2011105950810M18)资助课题

k 值的 k 步可恢复 (k -step recoverable, k -SR) 变量点不与其他一校验点相邻。该方法获得了更多打孔变量点,且高码率子码的误码性能有较大改善,不过低码率子码性能略有损失。在以上方法中,由于母码的校验矩阵的结构没有结合 RC 特点,生成 LDPC 码不适合打孔,很难同时提高打孔变量点数量和系列子码的误码性能^[7]。在校验矩阵结构优化方面,文献[8-9]提出一种编码高效的 LDPC (efficiently-encodable rate-compatible LDPC, E² RC-LDPC) 码构造方法。该方法的编码复杂度低,并且可以获得高码率子码,且系列子码的误码性能优于文献[5]中方法。然而,E² RC-LDPC 码也存在如下问题:(1)校验矩阵中非系统部分采用了固定结构,母码度分布不满足优化条件,渐进性能损失较大;(2)所有打孔变量点度等于 2,造成了母码及部分子码的误码性能损失。

针对 E² RC-LDPC 码存在的问题,提出一种基于校验矩阵扩展优化的 RC LDPC (the optimized extension of the parity-check matrix for RC LDPC, OEPMRC-LDPC) 码设计方法。根据 RC 码的度分布束条件,优化母码度分布,提高母码的渐进性能。结合打孔变量点译码恢复规则,构造母码校验矩阵,采用贪婪搜索算法逐级最大化 k 值较小的 k -SR 节点的数量,提高 RC 系列子码的误码性能。仿真结果表明,OEPMRC-LDPC 码的性能优于 E² RC-LDPC 码,特别是当子码的码率较高时,可以获得更大的编码增益。

1 OEPMRC-LDPC 码的母码度分布优化

在 RC 系列子码中,高码率子码的性能损失比低码率子码大得多,为了改善高码率子码的性能,须确保最简子码(最高码率子码)的渐进性能。另一方面,RC 系列子码的误码性能与母码的度分布密切相关。为了获得良好的打孔性能,需要优化母码的渐进性能。鉴于此,下面先推导 RC 系列子码的度分布约束条件。在此基础上,进一步提出 OEPMRC-LDPC 码的母码度分布优化算法。

令 $\omega_2 = (\omega_1, \omega_c)$, ω_1 表示最简子码, ω_2 表示母码。 ω_1 和 ω_2 分别对应最佳和最差信道条件。定义 $\lambda_i^k(\rho_i^k)$ 为与 ω_k 二部图中度等于 $i(j)$ 变量(校验)点相连的边占总边的比例。 $a_i^k(b_i^k)$ 为 ω_k 二部图中度等于 $i(j)$ 变量(校验)节点占总变量(校验)节点数的比例。用 $d_V^k(d_C^k)$ 表示 ω_k 最大变量(校验)节点度, R_k 表示 ω_k 的码率。 OEPMRC-LDPC 码的母码校验矩阵 H 结构如图 1 所示。

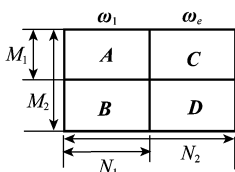


图 1 OEPMRC-LDPC 码的母码校验矩阵 H

图 1 中, $H = [H_1 | H_2]$, $H_1 = [A, B]^T$, $H_2 = [C, D]^T$, H 对应母码校验矩阵,维数等于 $M_2 \times N_2$, A 对应最简子码校

验矩阵,维数等于 $M_1 \times N_1$ 。根据图 1 结构特点, ω_1 和 ω_2 的变量点度分布满足

$$\sum_{i=1}^{d_V^k} a_i^2 N_2 \geq \sum_{i=1}^{d_V^k} a_i^1 N_1 \tag{1}$$

式中, $N_1/N_2 = R_2/R_1$; $l = 3, 4, \dots, d_V^l$ 。变量点度分布与边分布的关系为^[10]

$$a_i^k = (\lambda_i^k/i) / \sum_{i=2}^{d_V^k} (\lambda_i^k/i) \tag{2}$$

式(1)可转化为

$$\frac{\sum_{i=1}^{d_V^k} \lambda_i^2/i}{\sum_{i=2}^{d_V^k} \lambda_i^2/i} \geq \frac{R_2}{R_1} \sum_{i=1}^{d_V^k} a_i^1 \tag{3}$$

令 $\beta(l) = R_2/R_1 \cdot \sum_{i=1}^{d_V^k} a_i^1$, 式(3)可表示为

$$\sum_{i=1}^{d_V^k} \frac{\lambda_i^2}{i} (1 - \beta(l)) \geq \beta(l) \sum_{i=2}^{l-1} \frac{\lambda_i^2}{i} \tag{4}$$

由于 $R_2 < R_1$ 和 $\sum_{i=1}^{d_V^k} a_i^1 \leq 1$, 可知 $\beta(l) < 1$ 。式(4)可变为

$$\sum_{i=1}^{d_V^k} \frac{\lambda_i^2}{i} \geq \frac{\beta(l)}{(1 - \beta(l))} \sum_{i=2}^{l-1} \frac{\lambda_i^2}{i} \tag{5}$$

ω_1 和 ω_2 的校验点度分布满足

$$b_i^2 M_2 \geq b_i^1 M_1, i = 2, 3, \dots, d_C^1 \tag{6}$$

即

$$b_i^2 \geq \frac{M_1}{M_2} b_i^1 = \frac{(1 - R_1) N_1}{(1 - R_2) N_2} b_i^1 \tag{7}$$

令 $T = [(1 - R_1) N_1] / [(1 - R_2) N_2]$, 则校验点边分布约束关系为

$$\frac{\rho_i^2}{i} \geq T b_i^1 \sum_{i=2}^{d_C^1} \frac{\rho_i^1}{i}, i = 2, 3, \dots, d_C^1 \tag{8}$$

给定 R_k 及 $\lambda^1(\rho^1)$, 结合式(5)和式(8)的约束关系,优化 OEPMRC-LDPC 码的度分布,使母码噪声门限 σ^* 最大。 OEPMRC-LDPC 码的母码度分布优化可归纳为

$$\begin{aligned} & \max \sigma^* \\ & \text{s. t. } \sum_{i=1}^{d_V^k} \frac{\lambda_i^2}{i} \geq \frac{\beta(l)}{(1 - \beta(l))} \sum_{i=2}^{l-1} \frac{\lambda_i^2}{i}, \forall l = 3, 4, \dots, d_V^l \\ & \frac{\rho_i^2}{i} \geq T b_i^1 \sum_{i=2}^{d_C^1} \frac{\rho_i^1}{i}, \forall i = 2, 3, \dots, d_C^1 \\ & \sum_{i=2}^{d_V^k} \lambda_i^2 f_i^2(\rho) < p \\ & \sum_{i=2}^{d_V^k} \lambda_i^2 = 1 \end{aligned} \tag{9}$$

式中,第 1(第 2)个约束为最简子码与母码变量(校验)点的度分布码率兼容条件,第 3 个约束保证迭代译码器收敛^[10]。采用差分进化算法可以求解式(9),算法流程参考

文献[11]。

母码度分布优化算法可以提升母码的渐进性能,然而,要提高有限长 OEPMRC-LDPC 码中系列子码的误码性能,还需要根据 $\lambda^1(\rho^1)$ 和 $\lambda^2(\rho^2)$ 优化母码校验矩阵结构^[12]。

2 OEPMRC-LDPC 码的校验矩阵优化

定义 V_k 为 k -SR 节点的集合, $\gamma(k)$ 为集合元素数量,包含 V_k 列向量的子矩阵为 k -SR 矩阵,大小为 $M_2 \times \gamma(k)$ 维,其中, $1 \leq k \leq d$ 。将 H 表示为 $H = [H_1 | H_2]$, H_1 和 H_2 分别表示 OEPMRC-LDPC 码校验矩阵中系统与非系统部分子矩阵。在构造 RC-LDPC 码的校验矩阵过程中, H_2 的构造最为关键^[8]。根据 k -SR 节点恢复规则,本文设计 H_2 结构如图 2 所示。

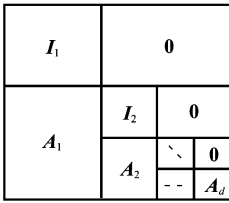


图 2 非系统部分子矩阵 H_2 结构

图 2 中, H_2 由零矩阵、单位矩阵循环移位矩阵 I_i 和随机构造矩阵 A_i 构成。 I_i 保证每个 i -SR 节点至少包含一个存活校验点。在第 i 次迭代译码恢复时, i -SR 节点译码消息不依赖 $i+1 \leq k \leq d$ 的 k -SR 节点^[12], 因此, I_i 右边应放置零矩阵。为不破坏 i -SR 节点恢复树结构, A_i 应为无环结构, 译码时 i -SR 节点之间不相互传递消息^[13]。

在 RC-LDPC 码校验矩阵结构优化过程中,一方面希望打孔节点尽可能多以适应较好的信道条件,另一方面要求系列 RC 子码具有较好的误码性能。为了提高系列子码的误码性能,本文采用贪婪搜索算法最大化 k 值较小的 k -SR 节点数量。贪婪算法是一种次优算法,广泛应用于 LDPC 码的校验矩阵构造^[14-15]。结合码率兼容码的特点和渐进添边(progressive edge-growth, PEG)算法,以 A_k 内部无环和 H_2 的 girth 最大为贪婪搜索策略,依次最大化 1-SR, 2-SR, ..., d -SR 节点数量,算法流程如下:

初始化:设置 $\gamma(k)$ 初始值,使 $\sum_k \gamma(k) = M_2$; 采用 PEG 算法构造 $A_k (1 \leq k \leq d)$, 使 A_k 无环,同时 H_2 的 girth 尽可能大; 令 success=1。

while success==1

 success=0;

 for $k=1$ to d

$H_{new} = H_2, \gamma(k) = \gamma(k) + 1, I_k$ 增加 1 行和 1 列, A_k 增加 1 列和减少 1 行, I_{k+1} 减少 1 行和 1 列, A_{k+1} 减少 1 列但行数保持不变, H_2 中其他子矩阵大小保持不变。

 采用 PEG 构造 H_2 中 A_k 和 A_{k+1} , 保证 A_k, A_{k+1} 无环, 同时 H_2 的 girth 尽可能大。

 if A_k or A_{k+1} 构造不成功

 令 $H_2 = H_{new}$, continue;

 else success=1 end.

 end// for

if success==0, 令 $H_2 = H_{new}$ break; end

end// while

在初始化时,如果 H_2 初始化不成功,则调整 $\gamma(k)$ 初始值后重新初始化。为了最大化 k 值较小的 $\gamma(k)$, 采用双重循环进行搜索。其中 for 为内循环,通过贪婪搜索依次最大化 $\gamma(1), \gamma(2), \dots, \gamma(d)$ 值。在贪婪搜索过程中,减小 $\gamma(i+1)$, 增加 $\gamma(i)$, 其他打孔变量点数目保持不变,依次最大化 $\gamma(k) (1 \leq k \leq d)$ 。由于单次循环很难获得 $\gamma(1), \gamma(2), \dots, \gamma(d)$ 的优化值,需要采用 while 作为外循环,反复调整 $\gamma(1), \gamma(2), \dots, \gamma(d)$ 的大小。当 success 为 0 时,内循环构造失败,通过 H_{new} 恢复 H_2 , 程序结束。

在 RC-LDPC 码中, k 值较大的 k -SR 节点消息依赖 k 值较小的 k -SR 节点,因此,打孔变量点消息恢复概率随 k 增加递减。为了提高所有打孔变量点的恢复性能,应使 k 值较小的 k -SR 节点包含的存活校验点尽可能多,因此,在构造 H_2 校验矩阵时,将列重较大的变量点放置在 H_2 左边,列重从左至右递减。通过贪婪搜索算法构造 H_2 后,再采用 PEG 算法构造 H 中 H_1 子阵。

3 仿真结果与分析

3.1 收敛门限结果分析

本节分析了 OEPMRC-LDPC 码母码渐进性能,并与 E^2 RC-LDPC 码^[8] 进行对比。下面设计了 2 组 OEPMRC-LDPC 码,称为码 A 和码 B, (R_1, R_2) 表示最简子码和母码码率, \bar{d}_{c1} 和 \bar{d}_{c2} 表示最简子码和母码的平均校验点度。

为了与 E^2 RC-LDPC 码公平比较,码 A 和码 B 的码率 (R_1, R_2) 与文献[8]相同。码 A 码率为 $(R_1, R_2) = (0.9, 0.5)$, 最简子码的变量点度分布为 $\lambda(x) = 0.155 3x + 0.603 2x^3 + 0.241 5x^5, \bar{d}_{c1} = 36.133 7$, 母码的变量点度分布为 $\lambda(x) = 0.137 3x + 0.304 2x^2 + 0.078 3x^4 + 0.233 3x^{17} + 0.246 9x^{19}, \bar{d}_{c2} = 9.477 9$ 。码 B 码率为 $(R_1, R_2) = (0.85, 0.4)$, 最简子码变量点度分布为 $\lambda(x) = 0.163 2x + 0.653 2x^3 + 0.183 6x^4, \bar{d}_{c1} = 23.672 6$, 母码变量点度分布为 $\lambda(x) = 0.153 4x + 0.326 7x^2 + 0.078 6x^5 + 0.347 1x^{18} + 0.094 2x^{19}, \bar{d}_{c2} = 7.518 4$ 。为了方便描述,分别称码率为 $(0.9, 0.5)$ 和 $(0.85, 0.4)$ 的 E^2 RC-LDPC 码为码 C 和码 D。

采用文献[10]方法得到码 A 和码 B 的收敛门限分别为 0.554 1 dB 和 -0.847 6 dB, 码 C 和码 D 的收敛门限分别为 0.708 2 dB 和 -0.550 3 dB。码 A 和码 B 收敛门限较码 C 和码 D 分别低 0.154 1 dB 和 0.297 3 dB。OEPMRC-LDPC 码比 E^2 RC-LDPC 码更逼近香农限。可解释为: E^2 RC-LDPC 码要求所有打孔节点度等于 2, 而 OEPMRC-LDPC 码没有该约束,母码度分布满足优化条件,因此具有更好的渐进性能。

3.2 误码性能分析

图 3 和图 4 分别给出了加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 信道下 OEPMRC-LDPC 码与 E^2 RC-LDPC 码的误码性能曲线,横轴表示目的端接收消息的平均信噪比,纵轴表示误比特率。仿真时,采用二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 调制,和积译码算法,最大译码迭代次数为 100。

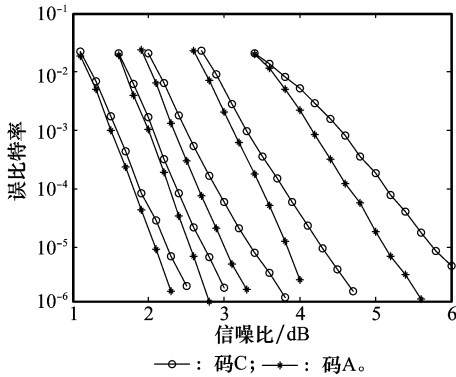


图 3 码 A 和码 C 产生 RC 子码误码性能比较(从左至右码率分别为 0.5,0.6,0.7,0.8,0.9)

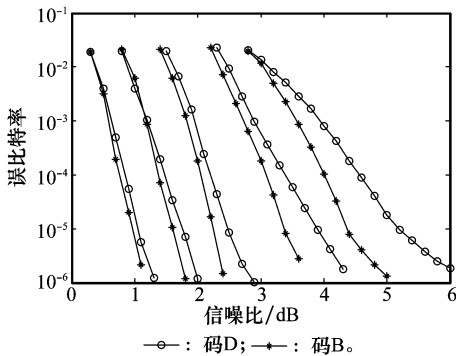


图 4 码 B 和码 D 产生 RC 子码误码性能比较(从左至右码率分别为 0.4,0.5,0.6,0.7,0.85)

在图 3 和图 4 中,码 A 和码 B 表示 OEPMRC-LDPC 码,码 C 和码 D 表示 E^2 RC-LDPC 码。码 A 和码 C 的码长 1 200 bit,码率等于(0.9,0.5)。码 B 和码 D 的码长 2 000 bit,码率等于(0.85,0.4)。图 3 和图 4 可以看出,OEPMRC-LDPC 码母码的误码性能略优于 E^2 RC-LDPC 码。随着码率增加,OEPMRC-LDPC 码子码的误码性能明显优于 E^2 RC-LDPC 码。当子码码率 $R=0.9$,误码率为 10^{-5} 时,码 A 较码 C 获得约 0.7 dB 增益。当子码率 $R=0.85$,误码率为 10^{-5} 时,码 B 较码 D 获得约 0.8 dB 增益。可解释为:① E^2 RC-LDPC 码中所有打孔变量点的度等于 2,此时,母码的度分布不满足优化条件。而 OEPMRC-LDPC 码母码的度分布满足约束优化条件,收敛性能优于 E^2 RC-LDPC 码,从而获得了更好的误码性能;② 虽然 OEPMRC-LDPC 码和 E^2 RC-LDPC 码校验矩阵中非系统部分均具有下三角结构,但 E^2 RC-LDPC 码采用固定结构,OEPMRC-LDPC 码采用基于贪婪搜索的随机

结构。OEPMRC-LDPC 码校验矩阵的自由度明显高于 E^2 RC-LDPC 码。为了进一步解释图 3 和图 4 仿真结果,表 1 给出了 OEPMRC-LDPC 码与 E^2 RC-LDPC 码打孔变量点的分布情况。

表 1 k -SR 节点分布

类型	1-SR	2-SR	3-SR	4-SR
码 A	312	178	43	0
码 C	300	150	75	8
码 B	657	329	73	0
码 D	600	300	150	9

表 1 中,码 A 和码 B 表示 OEPMRC-LDPC 码,码 C 和码 D 表示 E^2 RC-LDPC 码。当 $k \leq 2$ 时,码 A 和码 B 打孔变量点数量分别多于码 C 和码 D。当 $k=3$ 时,码 A 和码 B 打孔节点的数量分别少于码 C 和码 D,且码 A 和码 B 不存在 $k \geq 4$ 的 k -SR 节点。因此,与 E^2 RC-LDPC 码相比,OEPMRC-LDPC 码可以产生更多 k 值较小的 k -SR 节点,这也解释了 OEPMRC-LDPC 码具有更好的打孔性能。

4 结束语

为了提高 LDPC 码的链路自适应性能,本文提出了一种基于校验矩阵扩展优化的 RC-LDPC 码设计方法。结合码率兼容条件,优化 OEPMRC-LDPC 码母码的渐进性能。根据打孔变量点恢复树结构,设计母码校验矩阵中非系统部分。采用贪婪搜索算法优化 k -SR 节点数目,提高了 RC 系列子码的误码性能。仿真结果表明 OEPMRC-LDPC 码的性能优于 E^2 RC-LDPC 码。

参考文献:

- [1] Zhang K, Huang X M, Wang Z F. A high-throughput LDPC decoder architecture with rate compatibility[J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 2011,58(4): 839 - 847.
- [2] Zhou L, Bai B M, Xu M. Design of nonbinary rate-compatible LDPC codes utilizing bit-wise shortening method[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010,14(10):963 - 965.
- [3] Saeedi H, Pishro-Nik H, Banihashemi A H. Successive maximization for systematic design of universally capacity approaching rate-compatible sequences of LDPC code ensembles over binary-input output-symmetric memoryless channels[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2011,59(7): 1807 - 1819.
- [4] Ha J, Kim J, Mclaughlin S W. Rate-compatible puncturing of low-density parity-check codes[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004, 50(11):2824 - 2836.
- [5] Ha J, Kim J, Klinc D, et al. Rate-compatible punctured low-density parity-check codes with short block lengths[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(2): 728 - 738.
- [6] Vellambi B N, Fekri F. Finite-length rate-compatible LDPC codes: a novel puncturing scheme[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2009,57(2):297 - 301.
- [7] Benmayor D, Mathiopoulos P, Constantinou P. Rate-compatible IRA codes using quadratic congruential extension sequences and punc-

- turing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(5): 441 - 443.
- [8] Kim J, Ramamoorthy A, Mclaughlin S W. The design of efficiently-encodable rate-compatible LDPC codes[J]. *IEEE Trans. on Communication*, 2009, 57(2): 368 - 375.
- [9] Shi C Z, Ramamoorthy A. Design and analysis of E²RC codes[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(6): 889 - 898.
- [10] Ardakani M, Kschischang F R. A more accurate one-dimensional analysis and design of irregular LDPC codes[J]. *IEEE Trans. on Communication*, 2004, 52(12): 2106 - 2114.
- [11] Chen Z Q, Ouyang S, Xiao H L. Cooperative LDPC codes design for decode-and-forward half-duplex relay channels[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11): 2610 - 2615. (陈紫强, 欧阳缮, 肖海林. 解码前传半双工中继信道下协作 LDPC 码设计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2610 - 2615.)
- [12] Choi S, Yoon S, Sung W, et al. A good puncturing scheme for rate compatible low-density parity-check codes[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2009, 11(5): 455 - 463.
- [13] Zhou L, Bai B M, Xu M. Design of nonbinary rate-compatible LDPC codes utilizing bit-wise shortening method[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(10): 963 - 965.
- [14] Chen Z Q, Ouyang S, Xiao H L. PJCMET-LDPC codes design in multi-access relay channels[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 1018 - 1023. (陈紫强, 欧阳缮, 肖海林. 多址访问中继信道下多边 LDPC 码校验节点联合编码设计[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 1018 - 1023.)
- [15] Psota E, Pérez L C. Iterative construction of regular LDPC codes from independent tree-based minimum distance bounds[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(3): 334 - 336.

作者简介:

陈紫强(1973 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为信道编码、协作通信。

E-mail: chenziqiang177@yahoo.com.cn

欧阳缮(1960 -), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为自适应信号处理、通信信号处理及神经网络。

E-mail: hmoysh@guet.edu.cn

李民政(1972 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无线通信中的协同分集理论与技术。

E-mail: minzhengli@guet.edu.cn

臧 岚(1988 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为信道编码。

E-mail: yolandalan@126.com

肖海林(1975 -), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为通信信号处理、MIMO 通信。

E-mail: hailinxiao@guet.edu.cn