美国《工程索引》Ei收录刊源

ISSN 1006-7043
CODEN HGHPF2

哈尔滨工程大学学报

JOURNAL OF HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

ISSN 1006-7043

10

2017

Vol.38 No.10

哈尔滨工程大学学报

第38卷 第10期 (总第252期) 2017年10月

目 次

波浪能装置弹性系泊系统抗台风的设计与研究 …… 王文胜,游亚戈,盛松伟,张亚群,王振鹏(1505)

波浪-浮冰作用下冰区船舶阻力性能试验 …… 郭春雨,王帅,田太平,徐佩(1511)

波浪被动补偿装置的模型与实验 …… 刘祥勇,徐志强,谌志新(1518)

舰船腐蚀相关轴频电磁场场源建模 …… 张立琛,王英民,陶林伟(1525)

水下无线传感器网络能力分析与评估方法 …… 韦正现,宋敏,印桂生,王红滨(1531)

船用柴油机SCR催化剂性能测试分析 …… 杨智远,江国和,张旭升,魏海军,姜小鑫(1539)

流致振动发电的效率 …… 练继建,燕翔,刘昉,张军,任泉超,邢仕强(1545)

自然循环窄矩形通道内单相水对流传热特性 …… 田春平,阎昌琪,曹夏昕,王建军,田旺盛,戴斌(1554)

RV减速器摆线齿轮热分析 …… 李威,胡岳龙(1560)

基于梯度算法的电液伺服振动台加速度谐波辨识 …… 姚建均,万振帅,牛庆涛,张乐,肖晨光(1568)

考虑加筋效应的抗拔群桩变形解析解 …… 姚文娟,袁晨博,陈尚平(1573)

扁平型空间内火灾顶棚射流温度特性 …… 张宏,李玉锋,霍岩,邹高万(1580)

流场环境对柔性立管湿模态的影响 …… 陈东阳,Laith K. Abbas,王国平,芮筱亭(1587)

蒸汽水雾中电火花线切割精加工实验 …… 王彤,王俊棋,葛军,邱峰(1595)

空间通信高码率QC-LDPC码的优化构造 …… 姜斌,包建荣,唐向宏,许晓荣(1602)

改进的GNSS信号快速捕获检测算法 …… 张超逸,曾丹丹,李金海,孙金海,阎跃鹏(1609)

多领域机器翻译中的非参贝叶斯短语归纳 …… 刘宇鹏,马春光,朱晓宁,乔秀明(1616)

串联冗余自由度机构关节角位置的规划算法 …… 吴鹏,洪娟,陈广,徐博(1623)

轮-履式移动机器人履带转向运动 …… 帅立国,苏慧哲,郑丽媛,费燕琼(1630)

不同循环加载条件下镁合金AZ21腐蚀疲劳行为 …… 龙飞,程维姝,陈刚,崔云(1635)

机场道面抗冻性与冻融介质的相关性 …… 马好霞,余红发,吴雅玲,白康,曹文涛(1642)

高烈度区构造柱圈梁抗震体系砌体平房振动台 …… 周强,陈珊,孙柏涛,杨玉成(1650)

建筑遗产价值评估方法 …… 张军,王室程(1661)

期刊基本参数:CN23-1390/U * 1980 * M * A4 * 160 * zh * P * ¥20.00 * 1300 * 23 * 2017-10

Journal of Harbin Engineering University

Vol. 38 No. 10 (Sun No. 252) Oct. 2017

Contents

Study and design of a wave energy converter flex mooring system in shallow water under storms
..... *WANG Wensheng, YOU Yage, SHENG Songwei, ZHANG Yaqun, Wang Zhenpeng* (1505)

Experiment research on ice-going ship resistance performance under combined wave-ice effect
..... *GUO Chunyu, WANG Shuai, TIAN Taiping, XU Pei* (1511)

Model and experiments of wave passive compensation device
..... *LIU Xiangyong, XU Zhiqiang, SHEN Zhixin* (1518)

Modeling of ship corrosion related shaft-rate electromagnetic field
..... *ZHANG Lichen, WANG Yingmin, TAO Linwei* (1525)

Capability analysis and evaluation methods of underwater wireless sensor network
..... *WEI Zhengxian, SONG Min, YIN Guisheng, WANG Hongbin* (1531)

Application of selective reduction catalyst to marine diesel engine
..... *YANG Zhiyuan, JIANG Guohe, ZHANG Xusheng, WEI Haijun, JIANG Xiaoxin* (1539)

Power generating efficiency of flow-induced vibration
..... *LIAN Jijian, YAN Xiang, LIU Fang, ZHANG Jun, REN Quanchao, XING Shiqiang* (1545)

Convectional heat transfer characteristics of single-phase natural circulation flow in a narrow rectangular channel
..... *TIAN Chunping, YAN Changqi, CAO Xiaxin, WANG Jianjun, TIAN Wangsheng, DAI Bin* (1554)

Thermal analysis of cycloidal gear for the RV reducer
..... *LI Wei, HU Yuelong* (1560)

Acceleration harmonic identification for an electro-hydraulic servo shaking table based on gradient algorithm
..... *YAO Jianjun, WAN Zhenshuai, NIU Qingtao, ZHANG Le, XIAO Chenguang* (1568)

Analytical solutions of deformation of anti-pull group piles considering reinforcement effect
..... *YAO Wenjuan, YUAN Chenbo, CHEN Shangping* (1573)

Ceiling jet flow temperature characteristics of a flat space in case of fire
..... *ZHANG Hong, LI Yufeng, HUO Yan, ZOU Gaowan* (1580)

Influence of flow field environment on wet modal vibration of flexible riser
..... *CHEN Dongyang, LAITH K. Abbas, WANG Guoping, RUI Xiaoting* (1587)

Experiments on finishing of wire cut electrical discharge machining in steam water mist
..... *WANG Tong, WANG Junqi, GE Jun, QIU Feng* (1595)

Optimal construction of high rate QC-LDPC codes for space communications
..... *JIANG Bin, BAO Jianrong, TANG Xianghong, XU Xiaorong* (1602)

Improved algorithm for rapid detection in GNSS signal acquisition
..... *ZHANG Chaoyi, ZENG Dandan, LI Jinhai, SUN Jinhai, YAN Yuepeng* (1609)

Multi-domain bayesian non-parametric phrasal induction in machine translation
..... *LIU Yupeng, MA Chunguang, Zhu Xiaoning, Qiao Xiuming* (1616)

Joint angle position planning approach for series redundant DOF mechanisms
..... *WU Peng, HONG Juan, CHEN Guang, XU Bo* (1623)

Steering movement of caterpillar track of a track-wheel mobile robot
..... *SHUAI Liguo, SU Huizhe, ZHENG Liyuan, FEI Yanqiong* (1630)

Corrosion fatigue properties of AZ21 Mg alloy under different cyclic loading conditions
..... *LONG Fei, CHENG Weishu, CHEN Gang, CUI Yun* (1635)

Correlation analysis on the frost resistance of airfield pavement and freeze-thaw medium
..... *MA Haoxia, YU Hongfa, WU Yaling, BAI Kang, CAO Wentao* (1642)

Shaking table test of a single-story masonry structure with aseismic system of constructional column and ring beam in a high-intensity seismic region
..... *ZHOU Qiang, CHEN Shan, SUN Baitao, YANG Yucheng* (1650)

Method for evaluating the value of architectural heritage
..... *ZHANG Jun, WANG Shicheng* (1661)

Serial parameters: CN23 – 1390/U * 1980 * M * A4 * 160 * zh * P * ¥20.00 * 1300 * 23 * 2017-10

空间通信高码率 QC-LDPC 码的优化构造

姜斌[1],包建荣[1,2],唐向宏[1],许晓荣[1]
(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院,浙江 杭州 310018; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室,江苏 南京 210096)

摘 要: 为了研究高纠错性能和易实现的高码率准循环低密度奇偶校验(quasi-cyclic low-density parity-check, QC-LDPC)码,提出了基于原模图扩展的码优化构造方法:根据优化的基本原模图模板,通过扩展该图校验节点关联的复合变量节点,且增加其子矩阵的维度,构造所需码长、码率的高码率码。采用针对准循环结构基矩阵的渐进边增长(progressive edge growth, PEG)扩展和准循环-渐进环外消息度(quasi-cyclic approximated cycle extrinsic message degree, QC-ACE)优化搜索循环置换子矩阵偏移量,联合优化与改善编码码字的围长与环分布关系,来提高码字的误码率性能。仿真表明:采用该方法构造的编码具有较好的误比特率性能,且高码率码具有高频谱效率,该方法可用于设计高速空间信息传输所需的高效编码。

关键词: 准循环低密度奇偶校验码; 原模图; 渐进环外消息度; 渐进边增长; 围长; 环分布关系
DOI: 10.11990/jheu.201605074
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20170816.1445.008.html
中图分类号: TN911.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2017)10-1602-07

Optimal construction of high rate QC-LDPC codes for space communications

JIANG Bin[1], BAO Jianrong[1,2], TANG Xianghong[1], XU Xiaorong[1]
(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Electronic Science and Technology University, Hangzhou 310018, China; 2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To investigate the high-rate quasi-cyclic low-density parity-check (QC-LDPC) codes with good correcting performance and easy implementation, an optimization method for code construction was proposed on the basis of an extension of protograph. According to an optimized basic protograph template, a high-rate code was achieved by expanding compound variable nodes related to the check nodes of the protograph and enlarging the dimension of the sub-matrices of the code matrix. A joint optimization algorithm, combined with progressive edge growth (PEG) for the optimization of the extended base matrices and quasi-cyclic approximated cycle extrinsic message degree (QC-ACE) for the quasi-cyclic structure in circulant sub-matrices, was proposed to search the offsets of the circulant permutation of the codeword sub-matrices. The bit error rate performance of the code can be enhanced by improving the code properties of girth and cycle profile relationship. Simulation results indicate that the proposed codes have good bit error rate performance and high spectrum efficiency. Therefore, it can be applied to design efficient codes for space information transmissions with a high data rate.

Keywords: quasi-cyclic low-density parity-check codes; protograph; approximated cycle extrinsic message degree; progressive edge growth; girth; cycle profile relationship

目前,低密度奇偶校验(low-density parity-check, LDPC)码因译码性能接近香农限、可并行译码等优势,已成为信道编码研究热点。该码最早在1963年由Gallager提出[1],并于1982年由Tanner提出其二分图(Tanner图)表示结构[2],后于1995年由Mackay等重新发现[3]。全随机LDPC码的编码复杂度与码长成平方关系,码长过大将导致编码太复杂而难以实现。解决方案是采用兼有LDPC码低译码复杂度和Turbo码低编码复杂度的类Turbo码。该类码有:扩展的不规则重复累积码[4],累积

收稿日期: 2016-05-21. **网络出版日期:** 2017-08-16.
基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY17F010019);国家自然科学基金项目(61471152);浙江省科技计划项目(2015C31103);东南大学移动通信国家重点实验室开放研究项目(2014D02).
作者简介: 姜斌(1980-),男,高级实验师;
包建荣(1978-),男,副教授.
通信作者: 包建荣,E-mail: baojr@hdu.edu.cn.

重复累积(accumulate repeat accumulate, ARA) 码和有限域 QC-LDPC 码等[5-6]。其中,兼有准循环(quasi-cyclic, QC) 和 ARA 结构的原模图 LDPC 码[7]因性能好,编译码简单,已被国际空间数据系统咨询委员会(consultative committee for space data systems, CCSDS) 实验规范采纳[8]。此外,在信噪比较高的近空通信中,如在低空探空气球、无人机航拍等高速数据通信场合,为了提高传输效率,需采用较高码率的信道编码。而 CCSDS 标准也列举了部分 4/5 等较高码率编码[8]。目前,高码率 LDPC 码主要采用几何、代数、图论等方法构造[9]。其中,QC-LDPC 码构造可通过欧式几何优化最小重码字得到[10]。还可设计多边原模图 QC-LDPC 码消除无法避免的小环[11]、删除连通性差的短环[12],改善 QC-LDPC 码的多对角线奇偶校验结构及准循环双对角线扩展等方法获得较好译码性能 QC-LDPC 码字[13-14]。该类原模图码还可通过对 ARA 码对应原模图模板的打孔和删除,获得高性能码率灵活的率兼容码字[15]。但它们都未能综合利用编码围长及环分布特性,仍有改进余地。

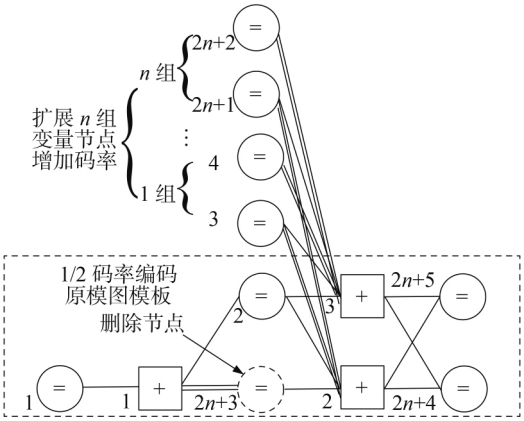
因采用迭代译码,LDPC 码的 Tanner 图存在短环导致迭代信息自反馈,影响译码性能。为此,Hu 提出了启发式逐渐增加边来减少短环的 PEG 算法,优化构造码校验矩阵[16]。此外,译码还与 Tanner 图中停止集(描述环分布) 等特点有关。即通过改进 QC-LDPC 码 Tanner 图环分布的近似环外消息度(approximated cycle extrinsic message degree, ACE) ,在无法避免环时优化其分布,而优化搜索和构造编码结构[17]。故在码构造中,还需结合准循环结构联合 ACE 与 PEG 构造算法,综合改进围长及环分布等特征参数,提高性能。另外,低复杂度高码率结构化 QC-LDPC 码也有助于其在实时高效超宽带系统迭代多用户检测等场合应用[18]。

本文提出了一种基于原模图扩展的 QC-LDPC 码优化构造方法: 在基本原模图模板基础上,扩展校验节点关联的复合节点及增加矩阵维度,构造所需码长、码率的高性能编码。同时,针对准循环结构,采用联合 PEG 和 ACE 算法优化搜索循环子矩阵偏移量,通过改善码字围长与环分布关系,获得高纠错性能的 QC-LDPC 码。

1　QC-LDPC 编码矩阵的原模图构造

QC-LDPC 编码矩阵可采用优化搜索后的基本原模图扩展构造。该码原模图构造流程及相应的模板矩阵设置如下:

1) 采用结合模拟退火及密度进化方法的理论最大译码门限启发式优化算法[5,7],设计标准的 1/2 码率原模图模板如图 1 所示。同时,通过增加扩展变量节点增加码率。图 1 所示的原模图模板可用于构造($2n+2$) /($2n+4$) 码率,即($n+1$) /($n+2$) 码率的高性能 QC-LDPC 码,且 n 取值为 0 或正整数。而且,节点($2n+3$) ~($2n+5$) 为校验节点。其中,节点($4n+3$) 为删除节点。其余节点为信息节点。校验和信息节点,分别映射为码字中的校验比特和信息比特。



注: 包含等号的圆表示变量节点,且实线圆是需传输的变量或校验比特,虚线圆是非传输删除节点; 包含加号的方框表示校验节点

图 1　编码原模图模板及其码率扩展

Fig. 1　The protograph template of the code and the rate expansion

图 1 的构造采用启发式搜索算法,利用现代分析译码门限的手段,对所搜索的原模图进行译码门限预测,可获得理论结果,方便扩展改善码性能。该原模图模板与 Tanner 图不同处为: 该图允许同一变量与校验节点连接多重边,属于多边类图[7],使其在中短码长时也能获得较好的译码性能。

2) 根据图 1 所示的码率扩展原模图模板,对其消除多重边的处理,使其转变为标准 Tanner 图结构如图 2 所示。图 2 所示的原模图模板即为图 1 原模图模板的扩展,同用于构造码率的高性能 QC-LDPC 码,且 n 取值为 0 或正整数。而且,节点($4n+5$) ~($4n+10$) 为校验节点,节点($4n+5$) 、($4n+6$) 为删除节点,其余为信息节点。同时,其构造思想是通过复制,随机扰乱,消除重复边,来构成高码率 Tanner 图结构。从而设计高码率的高性能编码。在该过程中,原模图相当于基板,作为 QC-LDPC 码基本 Tanner 图模板。对其复制多个副本,再对复制后图中各对应边对称的重排扰乱(随机交织) ,使不同副本间节点互连,从而得到任何规模 Tanner 图及对应编码矩阵。

3) 将图 2 所示的 Tanner 图转换为校验矩阵。其中,校验节点对应校验方程(矩阵行) 、变量节点对应比特节点(矩阵列) ,且校验与变量节点有

连线则矩阵元素为“1”，否则为“0”。另还需对校验方程子矩阵扩展，即分别将“0”，“1”映射为一定维数全零或单位循环子矩阵（即单位阵循环右移后的矩阵），得到所需准循环校验矩阵。该矩阵为

$$\begin{bmatrix} I & I & 0 & 0 & \cdots & I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & I & \cdots & I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & \cdots & I & 0 & I & I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & I & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & \cdots & 0 & I & 0 & 0 & I & I \\ 0 & 0 & 0 & I & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & I & I \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：矩阵“0”和“I”分别为全 0 和循环方矩阵，且循环方阵 I 为单位阵循环右移若干位后的矩阵，且所循环偏移参数，通过下一节联合 PEG 及准循环渐进环外消息度（QC-ACE）优化算法搜索得到，并获得最终编码矩阵。另外，矩阵最后 6 列对应校验比特，且倒数第 5 及第 6 列对应删除校验节点，其他列对应信息比特。同时，该矩阵扩展结构的物理实现过程，可用图 2 所示 Tanner 图在空间上的扩展来表示。即为了确保所构造编码码字的最优化，需扩展图 2 所示优化后编码原模图模板。即保持该编码基矩阵模板不变，通过复制，扰乱各不同模板间节点的连接关系（类似交织处理），但需保持连接的边在两个不同模板间节点的序号保持不变。如在原来的原模图中，变量节点 1 与校验节点 2 连接，则在新扩展结构中，需保证原模图模板 i 中的节点 1 与原模图模板 j 中的校验节点 2 连接，且 i 与 j 的取值，通过最大化环或改进环间关系等优化得到。通过该扰乱处理后，等效于原优化后原模图模板对应的分组码（或卷积码）间增加了随机交织的联接关系，除了可扩大编码码距外，还可达到增加随机度的效果，有助于改进编码性能。具体，经优化扩展后的立体 Tanner 图模型示意图如图 3 所示。另外，图 3 主要为原模图模板空间扩展示意图，具体需根据图 2 所构造的优化原模图作为第 i 层原模图的模板扩展。

图 3 中，该扩展后的立体 Tanner 图和初始优化设计的原模图码率相等，连接关系和度分布也对应不变，且充分继承了优化构造后原模图的特点。相对 Turbo 码二个卷积码中间插入一个交织器的结构，本编码构造则将交织器分散在各个原模图模板连接节点之间，具有类似的增加码距的效果。此外，该方法还能以稀疏矩阵形式表示，并用编译码都较为简单的 LDPC 编译码实现。

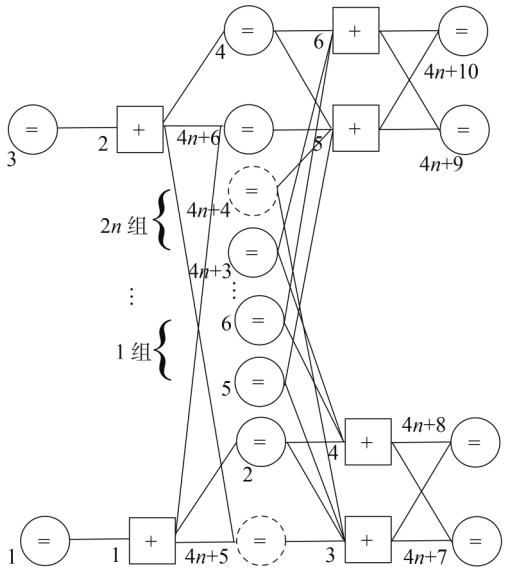
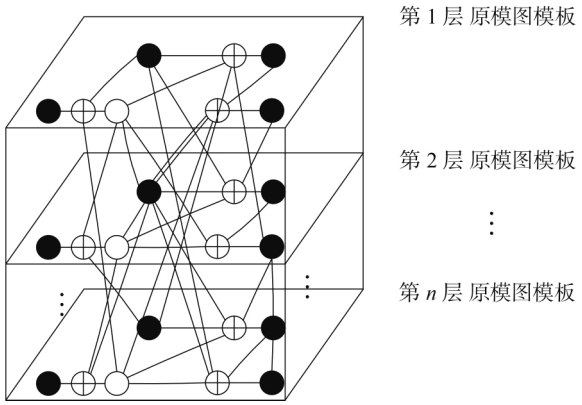


图 2　消除编码原模图重复边所得的 Tanner 图

Fig. 2　The derived Tanner graph by eliminating all repeated protograph edges



注：填充为黑色的为变量节点，填充为白色的为删除的变量节点，填充为“+”的为校验节点

图 3　原模图立体扩展的示意图

Fig. 3　The schematic diagram of the cubic expansion of the protograph

2　循环子矩阵 PEG 及 QC-ACE 优化搜索

在该码字框架设计中，为了提高编码随机性而改进性能，还需对构造的矩阵扩展和分裂。即需要对式（1）矩阵循环方子矩阵 I 扩展为更小若干子循环矩阵组合，使该矩阵中“1”分布更为随机化，以提高编码性能。如将原循环矩阵 I 分裂为 4×4 子矩阵：

$$I = \begin{bmatrix} I_1' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_2' & 0 \\ 0 & I_3' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4' \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：每个 I_i' 为扩展后循环矩阵，且在保证循环矩阵行、列重都为 1 基础上，在矩阵内扰乱，随机分

布 I_i' 位置。I_i' 在 I 矩阵中的随机分布，可采用 PEG 算法优化搜索[16]。即在式(2)所示整个校验矩阵基础上，用 PEG 算法查找最优的 I_i' 分布，而获得最佳围长参数的准循环基矩阵结构。此外，为了扩展随机性，还可增加子矩阵扩展维度，将循环方子矩阵 I 分裂为 8×8 等更高维度子矩阵结构。通过该扩展，可进一步提高码字随机性，但也增加了准循环移位个数和存储量，故需根据资源和性能折中选择。

准循环矩阵中非零循环子矩阵循环偏移量，可采用准循环近似环外消息度(QC-ACE)算法搜索。当经过的一节点路径具有最小 ACE 时，该节点有子节点。初始化过程将所有 ACE 路径设为∞，即未被访问。当一节点被访问 2 次或同时被访问时，则该节点存在环。一个环等于一节点先前最小 ACE 路径及当前到该节点 ACE 减去根及子节点 ACE 的 2 倍。当通过所有到达点顺序路径满足最小 ACE 时，由因存在环，而对译码不利。因传统围长最大化的 PEG 算法仅限于消除短环，而保留较长环。但该算法也存在只考虑环长，而不考虑环结构的局限性，致使部分较长环难以消除。即部分较长的环因存在关联的独立外界节点少而易损害迭代译码的结构，使其甚至比一些较短的环，更恶化译码性能。而部分无法避免的环(但环长也需大于等于 6)也可通过增加连接外部独立信息节点，引入独立节点较可靠外消息纠正环中错误消息传递，而消除环迭代译码的误码自反馈影响。故需采用结合 QC 特征的 QC-ACE 算法改善环关系，提高译码性能。

2.1　QC-ACE 算法术语定义及说明

1) 父、子节点：分别表示当前层及与该节点相连下一层的节点。如父节点为 w_s，则其相应子节点集为 $\mathrm{Ch}(w_s)$；

2) 节点 v_i 为 LDPC 码中变量节点；节点 μ_t 为 LDPC 码中校验节点；

3) 变量(校验)节点的度：与某变量(校验)节点相连校验(变量)节点数；

4) 每个码基本参数(d_{ACE}，η_{ACE})，表示该码最大环长 d_{ACE}，对应最小环长 ACE 值 η_{ACE}；

5) $p(\mu_t)$ 函数：根节点与任意变量或校验节点 μ_t 之间所有节点 ACE 值总和；

6) 在 LDPC 码对应自循环矩阵中，横向及纵向最大非零矩阵块数分别为 n，m；

7) d_{ACE}、η_{ACE}、i、n、m、j、d_i、k 为整数，v_i、μ_t、w_s 为标识符，p_{temp} 为实数。它们皆为算法的临时变量，“标号 redo”为算法跳转控制所用标号。另外，“for”、“if-else”、“if-elseif”等描述语句，分别为循环与条件选择功能“begin-end”描述语句，为一完整功能模块。

2.2　算法流程

```
for(i=n-1; i>=0; i--)
  begin
    for(j=0; j<=m-1; j++)
      begin
        标号 redo:
```

根据准循环子矩阵分布，在该非零子矩阵第一行随机产生变量节点 v_i，即随机选择所在行“1”的偏移量；预设所有节点为活跃节点。

计算变量节点 v_i 的 ACE，记为 $\mathrm{ACE}(v_i)$，表示为：$\mathrm{ACE}(v_i)=(d_i-2)$。其中，$d_i$ 为变量节点 v_i 的度，校验节点的 ACE 值为 0，且某个环或一条边所构成图的 ACE 为：$\sum_i(d_i-2)$，且 d_i 为环或一条边所有变量节点 v_i 的度；

```
对于所有变量和校验节点μt，设置: p(μt) ←∞;
对于变量节点 vi，设置: p(vi) ← ACE(vi);
for (k=1; k≤dACE; k++)
  begin
  对于在(k-1)层的任意活跃节点 ws;
    begin
    查找该节点邻接子集 Ch(ws);
    对于任何子节点 μt ∈ Ch(ws);
    begin
      ptemp ← p(ws) + ACE(μt);
      if ptemp + p(μt) - ACE(vi) - ACE(μt) <
      ηACE
      本次搜索失效，退出。即需重设初始化参
      数，再次搜索;
    elseif ptemp ≥ p(μt)
  在当前父节点 ws 的第 k 层内，修改子节点 μt
  为非活跃节点;
        else
          p(μt) ← ptemp;
        end;
      end;
    end;
  本次搜索成功，记录参数;
  if 对于一个长度≤2dACE的环，其 ACE 值 < ηACE
  跳转到: 标号 redo;
  end;
end.
```

另外，针对常见中短码长 QC-LDPC 码，当循环子矩阵维度较小时，可在准循环 ACE 搜索算法设置 ACE 码参数(d_{ACE}，η_{ACE})为(6,3)等，便于循环偏移量的快速优化搜索。同时，由于初始搜索参

数的随机设定，还需搜索几组码字分别验证，以消除编码停止集影响，最终确定最佳准循环偏移量的编码码字。

3 QC-LDPC 误码性能仿真与分析

以下分别仿真和分析所构造的 QC-LDPC 码，并与现有典型 LDPC 码，如 eIRA 码[4] 和 QC-LDPC 码等对比[10]。在仿真中，译码最大迭代次数为 100 次，每个误码测试点至少包含 50 个错误比特。信道为加性高斯白噪声（AWGN）信道。

3.1 随机或半随机（半结构化）eIRA 码等的比较

仿真参数如下：构造的 QC-LDPC 码码长和信息位长为（4 128，3 440），码率约为 0.833。该码字为 QC-LDPC 码（4 472，3 440），且删除 512 列码字（对应图 2 所示删除节点位置）。对照码字主要是相近码长与码率的全随机或半结构化 LDPC 码，码长和码率分别为 4 161 和 0.82[4]。最后，各编码的误码率仿真结果如图 4 所示。

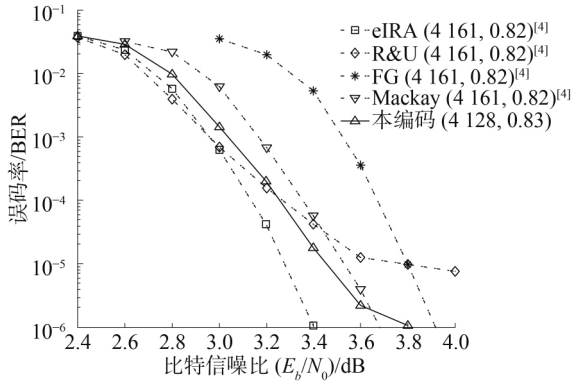


图 4 QC-LDPC 码（4 128，3 440）的误码率

Fig. 4 BER of the QC-LDPC code (4 128, 3 440)

图 4 所示的仿真表明：在类似仿真参数及误比特率 10^{-5} 下，所构造的 QC-LDPC 码性能差距最优设计的半随机半结构化 eIRA 码约 0.1 dB（但编码码率多了 0.01），优于 Mackay 码[4]、R&U 不规则码及有限几何（FG）码[4] 约 0.2、0.3 和 0.4 dB。该码在较高误比特率（$>10^{-5}$）时，相对随机 Mackay、R&U 及有限几何码，具有较好译码门限，充分体现了优化原模图模板的构造优势，且降低了码字构造难度，并提高了码字构造效率。相对优化度分布的半随机 eIRA 码，该码不具有最大随机编码矩阵自由度，故存在少量性能差距仍可接受。且其采用了全结构化准循环编码结构，使编译码信息存储及实现复杂度有较大降低，更易工程应用。另外，R&U 码受限于 R&U 结构约束，在误比特率接近 10^{-5} 时，有出现误码平底的趋势。而本方法构造的编码，采用了搜索更优 ACE 指标的循环偏移量等措施，可消除短环和改进环间关系，能有效的克服传统方法构造的 QC-LDPC 码易产生误码平底的缺陷，较好地提高了编码的综合性能。特别是在短码长编码构造中，受限于码长限制，使 LDPC 编码对应的 Tanner 图结构易出现无法避免的短环，使其围长较短。这将引起在 LDPC 迭代译码时，易出现错误码字消息的自反馈迭代，而引起误码传播现象，直接导致译码性能恶化。而本编码构造的码字，可在无法避免的复合环基础上，尽量引入外部的独立变量节点的消息传递边，而使译码消息环路出错时，及时由外界独立正确消息来予以纠正，极大减少了错误传播，而提高译码性能。

3.2 欧式几何构造 QC-LDPC 码的比较

仿真参数为：构造的 QC-LDPC 码码长和信息位长为（6 144，5 120），码率约为 0.833。该码字为 QC-LDPC 码（6 656，5 120），且删除 512 列码字（对应图 2 所示删除节点位置）。对照码字主要是相近码长与码率的欧氏几何（EG）及新欧氏几何（new EG）构造的 LDPC 码[10]，码长和码率分别为 6 138 和 0.838[10]。最后，各编码的误码率仿真结果如图 5 所示。

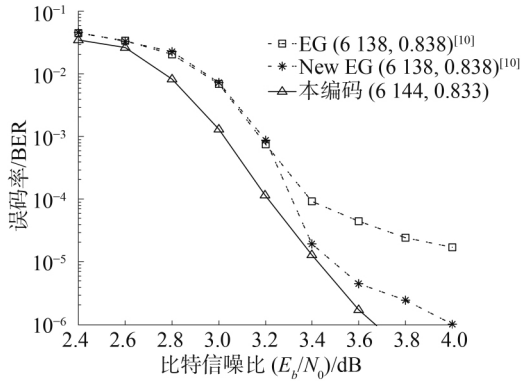


图 5 QC-LDPC 码（6 144，5 120）的误码率

Fig. 5 BER of the QC-LDPC code (6 144, 5 120)

图 5 所示的仿真表明：在类似仿真参数及误比特率 10^{-5} 下，所构造的 QC-LDPC 码性能优于 EG 码[10]、新 EG 码[10] 约 0.8 和 0.1 dB。该码具有较好译码门限，也体现了优化的原模图模板的构造优势，即原模图模板具有较低译码门限。该原模图模板对应的编码具备较低的译码门限，主要是其采用了图模型来扩展优化设计具有最优度分布的少量节点简单编码图模板。同时，利用空间分层扰乱的交织连接关系，来进一步构造长码长的编码，极大降低了编码构造算法的复杂度。该交织结构类似 Turbo 码的随机交织，使其在低信噪比下仍具有较好的译码性能。而 EG 码也受限于几何约束，使编码随机度受限，且度分布距最优分布差距大，而导致性能较差。另外，new EG 码在误比特率接近 10^{-5} 时，逐渐开始出现误码平底现象。该

现象出现的原因在于：所构造码字的码长不够长，且码率较高，导致其 Tanner 图中仍残留较多数量的环，且部分环之间还相互嵌套。即某个环部分边，仍为另外环的部分边，导致存在大量公共边的环间关系，易引起错误消息无法有效地摆脱环间传递自反馈的束缚。对于本方法所构造的编码，在信噪比较高时，经 QC-ACE 算法最大化改进了环关联的外部独立节点个数，就会减少某些复合环间嵌套关系而局部错误码字，避免错误消息自反馈传播，从而改进译码性能。因此，通过该方法搜索更优 ACE 参数来全局优化环间关系等措施改进环关系，有助于进一步提高编码性能。另外，也可通过分裂式(2)所示的原模图基矩阵 I，进一步增加其随机性，并增加环分布的自由度，进一步减小复合环嵌套关系，而改进性能。但也增加了约为分裂维度比值平方倍的计算复杂度与存储量代价，在实际应用中还需折中考虑。

3.3　CCSDS 标准高码率 AR4JA 码（R 为 2/3 及 4/5）的比较

仿真参数如下：构造的 QC-LDPC 码码长和信息位长分别为(1 536，1 024)及(1 280，1 024)，码率分别为 2/3 及 4/5。该码字为 QC-LDPC 码(2 048，1 024)及(1 536，1 024)，且分别删除 512 及 256 列码字(对应图 2 所示删除位置)。对照码字主要是 CCSDS 标准相同码长及码率的码字[8]。最后，各编码的误码率仿真结果如图 6 所示。

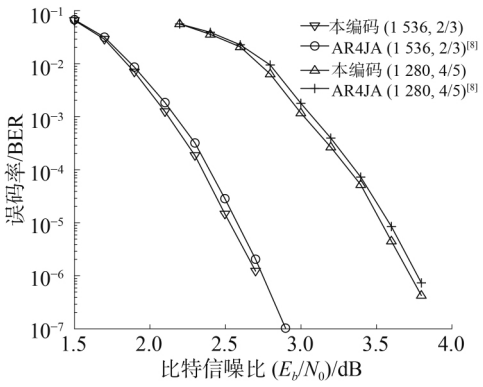


图 6　QC-LDPC 码(1 536，1 024)及(1 280，1 024)的误码率

Fig. 6　BER of the QC-LDPC code (1 536，1 024) and (1 280，1 024)

图 6 所示的仿真表明：在类似仿真参数及误比特率 10^{-6} 下，所构造的两种码率的 QC-LDPC 码性能均略优于 AR4JA 码[8]约 0.03 dB。该码具有较好译码门限，也体现了原模图模板优化扩展的构造优势，即原模图模板节点扩展后具有较低译码门限。因 AR4JA 码也采用类似原模图模板结构的编码，已在图优化构造方面得到足够优化，故本方法构造的码字相对该码的优势不大。但本构造方法在实现复杂度相似前提下，采用扩展优化校验节点等改进，获得微小性能改进，仍有较好工程实践意义。

另外，在编码复杂度方面，在相同信道码长参数 n 情况下，所提的 QC 结构编码，因具有准循环特征，而具有线性编码复杂度 $O(n)$[9]。所对照的全随机 LDPC 编码结构，则编码复杂度正比于码长的二次方，即编码复杂度为 $O(n^2)$。而在 LDPC 码长较大情况下，该随机结构的 LDPC 编码器将很难在资源有限的硬件上实现。相对而言，半结构半随机结构的 LDPC 码也具有线性编码复杂度 $O(n)$，也能在资源紧缺的硬件上有效实现[4]。但是，因为该编码结构中的半随机特点，需要花费大量存储单元用于存储半随机矩阵，从而将占用较大的存储资源，也不适合大规模码字的编码实现。而所提的 QC 结构编码能充分利用准循环结构，只需存储循环子矩阵首行矩阵元素，之后通过循环移位方式，用于实现编码矩阵二进制相乘的运算，故在循环子矩阵规模为 $p \times p$ 时，存储量将减少为随机矩阵的 $1/p$，故能大量节约存储单元使用，适合硬件实现。此外，对于采用几何构造的随机 LDPC 编码，其编码复杂度等同于全随机 LDPC 码，也具有码长二次方的编码复杂度，相对所提编码的复杂度也相对更高[10]。且其随机编码矩阵存储也将耗费更多存储单位，不适合硬件实现。其主要有理论分析意义，可在理论上分析所能达到最小编码的码距，可作为编码设计的重要参考构造方案。

4　结论

1) 通过优化的基本原模图模板，扩展了校验节点关联的复合变量节点，增加了其子矩阵维度；

2) 采用针对准循环的 PEG 及 QC-ACE 优化搜索循环置换子矩阵偏移量，改善了码字围长与环分布，可用于构造性能优异的高码率编码；

3) 仿真验证了所构造编码具有较好的误码性能，适合信噪比较高时的高速空间通信应用。

参考文献：

[1] GALLAGER R G. Low - density parity-check codes [M]. Cambridge: M. I. T. Press, 1963: 56-84.

[2] TANNER R. A recursive approach to low complexity codes [J]. IEEE transactions on information theory, 1981, 27(5): 533-547.

[3] MACKAY D J. Good error - correcting codes based on very sparse matrices [J]. IEEE transactions on information theory, 1999, 45(2): 399-431.

[4] YANG M, LI Y, RYAN W E. Design of efficiently encodable moderate - length high-rate irregular LDPC codes [J].

IEEE transactions on communications, 2004, 52: 564 – 571.

[5] ABBASFAR A, DIVSALAR D, YAO K. Accumulate repeat accumulate codes [C] //2014 IEEE Global Communications Conference. Dallas, USA, 2004.

[6] KOU Y, LIN S, FOSSORIER M P C. Low – density parity-check codes based on finite geometries: a rediscovery and new results [J]. IEEE transactions on information theory, 2001, 47(7): 2711–2736.

[7] THORPE J. Low – density parity-check (LDPC) codes constructed from protographs. Jet propulsion lab, technical report, 154C [R]. California, US: 2003.

[8] CCSDS. CCSDS 131.1-O-2, Low density parity check codes for use in near-earth and deep space applications [S]. New York, US: CCSDS Orange Book, 2007.

[9] LIN S, COSTALLO D J. 差错控制编码 [M]. 第2版. 北晏坚, 何元智, 潘亚汉, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2007: 50–86.
LIN S, COSTALLO D J. Error control coding [M]. 2nd. Beijing: China Mechanic Press, 2007: 50–86.

[10] LIU Y, ZHANG M, FAN J. Quasi – cyclic LDPC codes with high-rate and low error floor based on Euclidean geometries [J]. Journal of China University of Posts and Telecom, 2012, 19(2): 96–99.

[11] PARK H, HONG S, NO J, et al. Design of multiple – edge protographs for QC LDPC codes avoiding short inevitable cycles [J]. IEEE transactions on information theory, 2013, 59(7): 4598–4614.

[12] 龚险峰, 陶孝锋, 邱乐德. 基于原模图扩展的 QC-LDPC 构造方法 [J]. 中国空间科学技术, 2012 (2): 62–67.
GONG Xianfeng, TAO Xiaofeng, QIU Lede, Quasi-cyclic LDPC construction method based on protograph expansion [J]. Chinese space science and technology, 2012 (2): 62–67.

[13] ZHANG P, YU S, JIANG L. Efficient encoding of QC – LDPC codes with multiple-diagonal parity-check structure [J]. Electronics letters, 2014, 50(4): 320–321.

[14] 刘冬培, 刘衡竹, 张波涛. 基于准循环双对角阵的 LDPC 码编码算法 [J]. 国防科技大学学报, 2014, 36 (2): 156–160.
LIU Dongpei, LIU Hengzhu, ZHANG Botao. Study on encoding algorithms for QC LDPC codes with dual diagonal parity check matrix [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(2): 156–160.

[15] 夏国江, 孙辉先, 熊蔚明. 一族适用于空间通信的原型图 LDPC 码 [J]. 兵工学报, 2009, 30(11): 1546 – 1552.
XIA Guojiang, SUN Huixian, XIONG Weiming. A family ofprotograph – based LDPC for space communication [J]. Acta armamentarii, 2009, 30(11): 1546–1552.

[16] HU X Y, ELEFTHERIOU E, AMOLD D M. Regular and irregular progressive edge – growth tanner graphs [J]. IEEE transactions on information theory, 2005, 51(1): 386 – 398.

[17] MAHDI A, PALIOURAS V. Construction of irregular QC – LDPC codes via masking with ACE optimization [J]. IEEE communications letters, 2014, 18(2): 348–351.

[18] 杨建华, 赵旦峰, 赵春晖. LDPC 编码超宽带系统的迭代多用户检测算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009 (5): 570–573.
YANG Jianhua, ZHAO Danfeng, ZHAO Chunhui. Iterative multiuser detection for LDPC coded UWB systems [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009 (5): 570–573.

本文引用格式:

姜斌, 包建荣, 唐向宏, 等. 空间通信高码率 QC-LDPC 码的优化构造 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(10): 1602–1608.
JIANG Bin, BAO Jianrong, TANG Xianghong, et al. Optimal construction of high rate QC – LDPC codes for space communications [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(10): 1602–1608.

本期执行编辑:郑可为

《哈尔滨工程大学学报》第十四届编委会委员名单

The 14th Editorial Board of Journal of Harbin Engineering University

哈尔滨工程大学学报
Harbin Gongcheng Daxue Xuebao
(月刊,1980年创刊)
第38卷第10期(总第252期)2017年10月25日

Journal of Harbin Engineering University
(Monthly,started in 1980)
Vol.38 No.10(Sum 252) 25th Oct. 2017

主管单位:中华人民共和国工业和信息化部
主办单位:哈尔滨工程大学
编辑出版:《哈尔滨工程大学学报》编辑部
哈尔滨市南岗区南通大街145号1号楼(150001)
电话:0451-82519357, 82534001
主　　编:杨士莪
印刷单位:黑龙江龙江传媒有限责任公司
订　　阅:全国各地邮局
国内发行:哈尔滨市邮政局
国外发行:中国国际图书贸易总公司(北京399信箱)

Supervised by Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China
Sponsored by Harbin Engineering University
Edited & Published by Editorial Department of Journal of HEU
1st Building 145 Nantong Street,
Harbin 150001,China
Tel:86-451-82519357, 82534001
Editor-in-Chief YANG Shi'e
E-Mail: xuebao@hrbeu.edu.cn
Distributed by China International Book Trading Corporation
(P.O. Box 399,Beijing,China)

连续出版物号:ISSN 1006-7043 / CN 23-1390/U　邮发代号:14-111　国外发行代号:MO5279　国内定价:20.00元