光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024051701

基于 Golomb Ruler 的 QC-LDPC 码构造方法

袁建国*，刘雯漪，宋万闯，伏博文

（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘　要： 针对准循环低密度奇偶校验(QC-LDPC)码中短环结构会影响其纠错性能的问题，基于 Golomb Ruler 提出了一种新颖的围长为 8 的 QC-LDPC 码构造方法。该方法先根据码长码率的需求，从 Golomb Ruler 中选择部分元素构造一个集合，结合指数矩阵中元素所在位置的四六环特性，通过搜索算法，依次找出符合无四六环条件的元素得到另一个集合，然后构造相应的指数矩阵，最后得到其奇偶校验矩阵。仿真结果表明：在误码率为 10^{-6} 时，所构造的 GR-QC-LDPC 码与同码率码长的其他 4 种 QC-LDPC 码的码型相比，其净编码增益均有一定的提高，且无明显错误平层现象。

关键词： 准循环低密度奇偶校验码；Golomb Ruler；围长约束；净编码增益

中图分类号： TN919　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0676－06

Construction Method of QC-LDPC Codes Based on Golomb Ruler

YUAN Jianguo, LIU Wenyi, SONG Wanchuang, FU Bowen

(School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: A novel construction method with grith-8 quasi-cyclic low-density parity-check (QC-LDPC) codes based on the Golomb ruler is proposed to solve the issue of short-cycle structures affecting error-correction performance. First, a set is constructed by selecting some elements from the Golomb ruler based on the code-length and code-rate requirements. Subsequently, by combining the girth-4 and girth-6 properties of the elemental locations in the exponential matrix, another set is obtained using the search algorithm to search for elements that satisfy the conditions of no girth-4 and no girth-6. Subsequently, the corresponding exponential matrix is constructed. Finally, a parity-check matrix is obtained. Simulation results show that the net coding gain of the GR-QC-LDPC code constructed using the proposed method is greater than those yielded by four other QC-LDPC codes with the same code-rate and code-length at a bit error rate of 10^{-6}; moreover, its error floor is insignificant.

Key words: quasi-cyclic low-density parity-check codes; Golomb Ruler; girth constraint; net coding gain

0　引言

低密度奇偶校验(LDPC)码是一类典型的线性分组纠错码[1]，因其接近 Shannon 限、编译码复杂度较低，常常被应用于光通信、卫星通信、信息存储、第五代移动通信等领域[2-3]。当构造过程中使用循环排列时，生成的码称为准循环(QC)LDPC 码[4]，其奇偶校验矩阵(PCM)具有准循环结构。而短环较少的 QC-LDPC 码通常具有更优异的性能[5]，因此设计具有大围长的 QC-LDPC 码具有重要的研究

收稿日期：2024－05－17.

基金项目：国家自然科学基金项目(U21A20447，61971079).

* **通信作者：**袁建国

意义。

LDPC 码的构造方法可分为两大类[6]：随机构造法和代数构造法。随机构造方法是基于计算机搜索去构造，所构造出的校验矩阵通常是不规则的，编译码复杂度较高，不利于硬件实现[7]，因此在实际应用中并不广泛。而采用代数构造方法可构造出一种具备大围长性质的 QC-LDPC 码，其校验矩阵具有准循环特性，编译码时所消耗的存储空间和时间都较少，有利于硬件实现[6-7]。文献[8]提出一种基于素数 $p=t^2+1$ 和乘法表的代数构造方法，但其循环置换矩阵（CPM）的维数大小 T 受到素数 P 的限制，构造出的码字码长也与素数 P 相关，这使得构造长码长的 QC-LDPC 码较为困难。文献[9]首先使用外部信息传输分析获得原模图 LDPC 码的阈值，再使用分层搜索算法消除校验矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的子矩阵对应子图中的无叶基本陷阱集（LETS），虽然其改进的算法能够搜索出对应的 LETS，但识别与筛选 Tanner 图中 LETS 父结构的过程复杂，构造出的码字未完全消除校验矩阵 Tanner 图中的六环。

针对 QC-LDPC 码中短环结构的存在会影响其纠错性能的问题，本文基于 Golomb Ruler 的特殊性质，首先确定 CPM 的维数大小，再结合一种与四六环位置相关的搜索算法，可以构造出一种围长至少为 8 的 QC-LDPC 码。该构造方法计算复杂度较低、易于硬件实现、纠错性能良好且无明显错误平层现象，构造出的码字具有码长码率可灵活调整、码长只与 CPM 的维数相关的优点。

1 QC-LDPC 码的构造

1.1 校验矩阵

QC-LDPC 码的性能和编译码复杂度取决于奇偶校验矩阵 $\boldsymbol{H}$，而奇偶校验矩阵 $\boldsymbol{H}$ 是通过分组矩阵构造而成，可用循环置换矩阵和全零矩阵（$\boldsymbol{ZM}$）表示。QC-LDPC 码的奇偶校验矩阵 $\boldsymbol{H}$ 可表示为：

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{b(1,1)} & \boldsymbol{I}_{b(1,2)} & \cdots & \boldsymbol{I}_{b(1,L)}\\ \boldsymbol{I}_{b(2,1)} & \boldsymbol{I}_{b(2,2)} & \cdots & \boldsymbol{I}_{b(2,L)}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{I}_{b(J,1)} & \boldsymbol{I}_{b(J,2)} & \cdots & \boldsymbol{I}_{b(J,L)}\end{bmatrix}_{PJ\times PL} \tag{1}$$

其对应的指数矩阵 $\boldsymbol{E}$ 可表示为：

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}b(1,1) & b(1,2) & \cdots & b(1,L)\\ b(2,1) & b(2,2) & \cdots & b(2,L)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ b(J,1) & b(J,2) & \cdots & b(J,L)\end{bmatrix}_{J\times L} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{I}_{b(m,n)}$ 表示维数大小为 P 的循环置换矩阵或全零矩阵，$b(m,n)$ 表示循环置换矩阵的移位系数，其中，$1\leqslant m\leqslant J$，$1\leqslant n\leqslant L$，$-1\leqslant b_{(m,n)}<P$。若 $b(m,n)=0$，则 $\boldsymbol{I}_{b(m,n)}$ 为单位矩阵，若 $b(m,n)=-1$，则 $\boldsymbol{I}_{b(m,n)}$ 为全零矩阵，其他情况则表示为 $\boldsymbol{I}_{b(m,n)}$ 向右循环移位 $b(m,n)$ 次的单位矩阵。

QC-LDPC 码由其奇偶校验矩阵 $\boldsymbol{H}$ 唯一确定，因此设计 QC-LDPC 码可以等同于设计校验矩阵，而奇偶校验矩阵中的环与指数矩阵中的移位因子有关，是影响码字性能的关键因素。因此，设计指数矩阵时若能消除部分短环，QC-LDPC 性能将会更加优异。

1.2 围长约束

在 LDPC 码的 Tanner 图中，从一个节点出发经过集合中每个节点且只遍历一次，最后回到自身，这样的一些边组成的回路称为环，环的长度取决于该环中边的个数，其中周长最小的环称为 LDPC 码的围长[10]。Tanner 图中的环会对译码结果造成干扰，导致码字纠错性能降低，因此在构造校验矩阵时应尽量避免四六环的存在。

定理 1 给出了矩阵中存在环长为 $2k$ 的充要条件，指数矩阵中的元素用 $b(m,n)$ 表示。

定理 1[4] 在 QC-LDPC 码中，存在环长为 $2k$ 的充分必要条件为：

$$\sum_{i=0}^{k-1}(b(m_i,n_i)-b(m_i,n_{i+1}))\equiv 0(\mathrm{mod}P) \tag{3}$$

式中，$0\leqslant i\leqslant k-1$，$m_i\neq m_{i+1}$，$n_i\neq n_{i+1}$，$n_0=n_k$。

由定理 1 可知 QC-LDPC 码中存在环长为 $2k$ 的条件，因此在构造指数矩阵时，应考虑每个元素所在位置的特点，再结合搜索算法，避免可能出现的四六环。

2 Golomb Ruler

Golomb Ruler 是一类具有特殊性质的整数序列，可应用于工程和通信等不同领域，具有重要的研究意义，其定义为：存在一组非负整数 $\{g_1,g_2,\cdots,g_n\}$，其中，$\{g_1<g_2<\cdots<g_n\}$，如果 $i<j$，且每对 g_i-g_j 的差值都不相同，则被称为 Golomb Ruler。该序列包含的元素称为标记，元素数量称为阶数，两个元素之间的最大距离称为长度。通常该序列会规定位于首位的标记 $g_1=0$，此时序列长度为所有标记中的最大值。如果不存在一个阶数相同，但长度更短的序列，则称当前序列为最优

Golomb Ruler，当阶数为一个固定值 n 时，最优 Golomb Ruler 的长度应尽可能小。

定理 2[7]：如需生成一个新的 Golomb Ruler 序列，只需将最后一个标记 g_n 变为 g'_n，而 g'_n 的大小应满足式(4)。

$$g'_n > 2g_{n-1} \tag{4}$$

式中，g_{n-1} 和 g'_n 都为正整数。

3　基于 Golomb Ruler 构造 QC-LDPC 码

3.1　构造方法

首先构造一个维数为 $3\times L$ 的指数矩阵 $\boldsymbol{E}$，本文中指数矩阵的第一行和第二行元素都基于 Golomb Ruler 的特殊性质得出，第三行元素则由所设计的搜索算法得出，具体构造步骤如下：

步骤一：根据目标码长和指数矩阵的列数，确定循环置换矩阵的维数大小，即扩展因子 p。

步骤二：选择一个阶为 L 的 Golomb Ruler 构造集合 $a=\{a_0,a_1,\cdots,a_{L-1}\}$，其中 $a_0<a_1<\cdots<a_{L-1}$。根据构造需求，考虑是否将 a_{L-1} 替换成一个正整数 a_k，a_k 需满足定理 2。

步骤三：构造出集合 $b=\{b_0,b_1,\cdots,b_{L-1}\}$，其中，$b_0<b_1<\cdots<b_{L-1}$，当 $j=i$ 时，$b_j=na_i$，n 为一个大于 1 的正整数。

步骤四：集合 a 中的元素依次构成指数矩阵的第一行，集合 b 中的元素依次构成指数矩阵的第二行，根据环长定理与 Golomb Ruler 的特性，当 $p>\max|e_{1,j}-e_{1,s}+e_{2,s}-e_{2,j}|$ 时，可证得第一行与第二行间不存在四环。

证明：假设第一行与第二行间存在四环，则由式(3)可以推导出下式：

$$e_{1,j}-e_{1,s}+e_{2,s}-e_{2,j}\equiv 0(\mathrm{mod}p) \tag{5}$$

指数矩阵中第二行元素又分别对应为第一行元素的 n 倍，因此式(5)又可以表示为：

$$e_{1,j}-e_{1,s}+ne_{1,s}-ne_{1,j}\equiv 0(\mathrm{mod}p) \tag{6}$$

简化式(6)可得

$$(n-1)(e_{1,s}-e_{1,j})\equiv 0(\mathrm{mod}p) \tag{7}$$

由 Golomb Ruler 的特殊性质可知，$g_0\geqslant 0$ 且 $g_0<g_1<\cdots<g_n$，n 为一个大于 1 的正整数，可推导出式(8)。

$$(n-1)(e_{1,s}-e_{1-j})\neq 0 \tag{8}$$

结合步骤三中的 $p>\max|e_{1,j}-e_{1,s}+e_{2,s}-e_{2,j}|$，可证明式(3)不成立，即指数矩阵第一行与第二行间不存在四环。

步骤五：结合环长定理与四六环特性，设计一种搜索算法，得到一个集合 $c=\{c_0,c_1,\cdots,c_n\}$，集合内所有元素均为非负整数，且 $n=L-1$。将集合 c 中的元素作为矩阵第三行的元素，使得指数矩阵中不存在四六环。具体步骤由 3.2 节给出。

步骤六：指数矩阵中的 0 元素用大小为 $p\times p$ 的单位矩阵替换，非 0 元素为循环置换矩阵的移位系数，即将大小为 $p\times p$ 的单位矩阵向右循环移位对应位数，扩展后得到大小为 $3p\times Lp$ 的奇偶校验矩阵 $\boldsymbol{H}$。

通过上述 6 个步骤，可构造出一类列重为 3，围长为 8 的 QC-LDPC 码。通过改变 L 的大小，可以使码率灵活可变；通过改变 p 的大小，可以构造出不同码长的 QC-LDPC 码。

3.2　避免四、六环的搜索算法

为避免影响 LDPC 码性能的四六环出现，本文设计了一种搜索算法，能够构造出大量不同的 QC-LDPC 码，且构造出的 QC-LDPC 码围长为 8，该算法流程如下：

步骤一：已知 p 的大小，将 c_1 设置为任意一个非负整数，为降低计算复杂度，可先将 c_2 的搜索范围预设为一个合适的区间，如[0,20]。如图 2 为六环结构图，图中箭头所指的点为定理 1 的计算起点 $b(m_0,n_0)$，也为当前待求的元素 c_2，在预设区间范围内生成一个随机数，若能使式(3)不成立，则将该数赋值给 c_2。由图 2 可知，c_1 与 c_2 可能构成的六环形式为(d)和(f)，(d)类型的六环需使等式 $e_{2,1}-e_{1,1}+e_{1,j}-e_{0,j}+e_{0,0}-e_{2,0}\equiv 0(\mathrm{mod}p)$ 不成立，其中 $3\leqslant j\leqslant 6$。(f)类型的六环需使等式 $e_{2,1}-e_{0,1}+e_{0,j}-e_{1,j}+e_{1,0}-e_{2,0}\equiv 0(\mathrm{mod}p)$ 不成立，其中 $3\leqslant j\leqslant 6$。

步骤二：以此类推，先从预设区间内生成一个随机数并赋值给 c_n，以 c_n 为起点，结合所在位置的六环特点进行搜索，分别检查是否会与 $c_0,c_1,\cdots,c_{n-1}$ 构成六环，若不存在六环，则 c_n 的值被确定。

步骤三：由步骤一和步骤二可以得到集合 $c=\{c_0,c_1,\cdots,c_n\}$，将其作为指数矩阵的第三行，检查整个矩阵是否满足四环存在条件，若不满足则构造完成，否则重新进行搜索。

通过分析构造方法可知，指数矩阵的第一行与第二行之间不可能存在四环，而搜索算法显然避免

了整个指数矩阵中四环和六环的产生，因此，该构造方法可构造出一类列重为3，码率为 $(L-3)/L$，围长为8的QC-LDPC码。

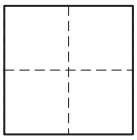


图1 四环结构图

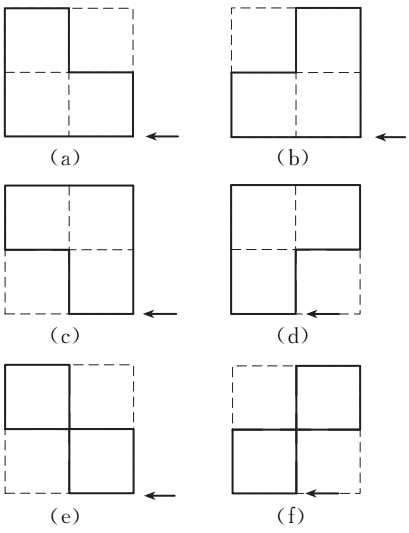


图2 六环结构图

4 性能分析

4.1 仿真结果分析

为验证所构造的GR-QC-LDPC码的纠错性能，采用MATLAB软件进行仿真，二进制相移键控(BPSK)进行调制，仿真环境为加性高斯白噪声(AWGN)信道，译码算法为置信传播(BP)算法，译码迭代次数为50次。

考虑构造一类行重 $J=6$，列重 $L=3$ 的QC-LDPC码。将阶为6的Golomb Ruler作为集合 a，$a=\{0,1,4,10,12,17\}$。选择 $n=2$，构造出集合 b，$b=\{0,2,8,20,24,34\}$。当 $p=200$ 时，使用本文提出的搜索算法，可构造出一个指数矩阵，结构如式(9)所示。

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 4 & 10 & 12 & 17\\ 0 & 2 & 8 & 20 & 24 & 34\\ 0 & 16 & 33 & 77 & 154 & 121\end{bmatrix} \tag{9}$$

将指数矩阵扩展后可构造出一个码长为1 200的QC-LDPC码，记为GR-QC-LDPC(1 200,600)码。将所构造的GR-QC-LDPC(1 200,600)码与文献[8]基于素数 t^2+1，采用乘法表方法构造的围长为8的规则MT-QC-LDPC(1 200,600)码、文献[9]基于原模图构造的消除无叶基本陷阱集的非规则LETS-QC-LDPC(1 200,600)码和文献[12]基于不相交差集(Disjoint Difference Sets,DDS)构造的规则DDS-QC-LDPC(1 200,600)码在相同的仿真环境下进行仿真对比分析，其结果如图3所示。

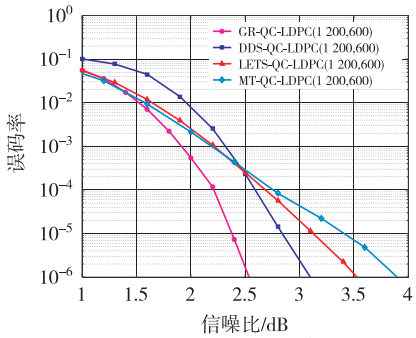


图3 GR-QC-LDPC(1 200,600)码与其他码的纠错性能仿真图

当码率为0.5时，不同QC-LDPC码的误码率(BER)与信噪比(SNR)之间的仿真对比图如图3所示。由图3可知，当BER为 10^{-6} 时，本文所构造的GR-QC-LDPC(1 200,600)码相较于DDS-QC-LDPC(1 200,600)码、LETS-QC-LDPC(1 200,600)码、MT-QC-LDPC(1 200,600)码的NCG分别提升了约0.56,0.99和1.36 dB。

就码率而言，码率越小，纠错性能越优异，但冗余度也随之变高。为进一步说明本文构造方法的灵活性，综合考虑纠错性能和冗余度两个因素，构造一个码率为0.67，码长为5 400的规则QC-LDPC码，记为GR-QC-LDPC(5 400,3 600)码，其指数矩阵的结构如式(10)所示。此时集合 $a=\{0,1,5,12,25,27,35,41,44\}$，选择 $n=2$，集合 $b=\{0,2,10,24,50,54,70,82,88\}$。

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 5 & 12 & 25 & 27 & 35 & 41 & 44\\ 0 & 2 & 10 & 24 & 50 & 54 & 70 & 82 & 88\\ 0 & 60 & 125 & 201 & 262 & 350 & 391 & 461 & 535\end{bmatrix} \tag{10}$$

将所构造的GR-QC-LDPC(5 400,3 600)码与文献[12]构造的规则DDS-QC-LDPC(5 400,3 600)码、文献[9]构造的非规则LETS-QC-LDPC(5 400,3 600)码和文献[11]基于Stanley序列构造的规则SS-QC-LDPC(5 400,3 600)码在相同的仿真环境下进行仿真对比分析，当码率为0.67时，不同QC-LDPC码的BER与SNR之间仿真曲线对比图如图

4 所示。由图 4 可知，当 BER 为 10^{-6} 时，本文构造的码长为 5 400 的 GR-QC-LDPC(5 400，3 600)码与 DDS-QC-LDPC(5 400，3 600)码、LETS-QC-LDPC(5 400，3 600)码、SS-QC-LDPC(5 400，3 600)码相比，其 NCG 分别提升了约 0.21，0.46 和 0.59 dB。

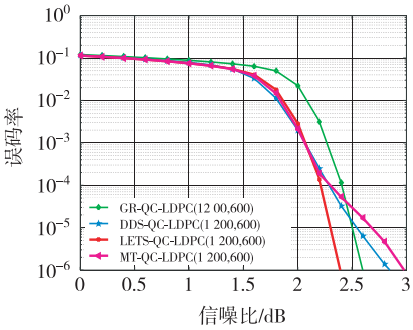


图 4　GR-QC-LDPC(5 400，3 600)码与其他码的纠错性能仿真对比图

4.2　复杂度分析

编码运算复杂度可以反映运算量和码长的变化关系，在码长和码率都相同的条件下，本文构造的 QC-LDPC 码与其他对比文献构造的码字均是基于生成矩阵编码的，因而计算复杂度相同，但在校验矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的构造方法上各不相同，故将从该角度进行分析对比。首先构造了一个指数矩阵 $\boldsymbol{E}$，其中第一行和第二行均由 Golomb Ruler 中的元素构成，而第三行则是由一种搜索算法得来，计算复杂度为 $O(ijQ)$，其中，i 为指数矩阵的行数，j 为指数矩阵的列数，Q 为循环置换矩阵的维数。文献[8]中，指数矩阵的第一行与第一列由方阵中对应位置的元素对素数 P 取余得来，剩下的元素则为对应于第一行和第一列中的元素相乘取余得来，计算复杂度为 $O(ij)$，该构造方法计算复杂度低，但 P 只能为几个特定的素数，使得码长受到限制。文献[9]中，首先使用外部信息传输分析获得原模图 LDPC 码的阈值，再用分层搜索算法消除校验矩阵的子矩阵对应的子图中的 LETS，计算复杂度为 $O(JL)$，其中，J 为校验矩阵的行数，L 为校验矩阵的列数，该构造方法虽然消除了 LETS，但未能消除六环，并且计算复杂度高于本文提出的码字。文献[12]利用不相交差分集(DDS)的特殊性质，通过简单的加法运算获得指数矩阵 $\boldsymbol{E}$，其计算复杂度为 $O(j^4)$，复杂度随指数矩阵的列数增加而增加，同时，本文构造出的码字纠错性能更为优异。文献[11]在构造校验矩阵时，通过在给定范围内搜索满足无四六环条件的元素，得到一个集合，计算复杂度为 $O(Q)$。虽然其计算复杂度较低，但所构造的码字出现了明显错误平层现象，而本文构造出的码字纠错性能更为优异，当 BER 为 10^{-6} 时，尚未出现错误平层现象。

5　结语

基于 Golomb Ruler 的特殊性质，结合搜索算法提出一种 QC-LDPC 码的新颖构造方法，该构造方法所构造的奇偶校验矩阵 Tanner 图中不存在四六环，且码长只与循环置换矩阵维数 P 相关，降低了码长受序列限制的程度，更容易构造出码长较短的码字。仿真结果表明，在相同条件下，相较于同码率、同码长的其他码字，本文所构造的 GR-QC-LDPC(1 200，600)码和 GR-QC-LDPC(5 400，3 600)码的 NCG 在一定程度上均有提升，纠错性能较好且无明显错误平层现象。

参考文献：

[1] Sarıduman A，Pusane A E，Taşkın Z C. On the construction of regular QC-LDPC codes with low error floor[J]. IEEE Commun. Lett.，2020，24(1)：25-28.

[2] Lu T，He X，Kang P，et al. Parity-check matrix partitioning for efficient layered decoding of QC-LDPC codes[J]. IEEE Trans. Commun.，2023，71(6)：3207-3220.

[3] 陈发堂，王永航，张翰卿. 多归一化因子的 LDPC 译码算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版)，2022，34(1)：59-64.
Chen Fatang，Wang Yonghang，Zhang Hanqing. LDPC decoding algorithm with multiple normalization factors[J]. J. of Chongqing University of Posts and Telecommunications：Natural Science Edition，2022，34(1)：59-64.

[4] Amirzade F，Sadeghi M R，Panario D. QC-LDPC codes with large column weight and free of small size ETSs[J]. IEEE Commun. Lett.，2022，26(3)：500-504.

[5] Majdzade M，Gholami M. On the class of high-rate QC-LDPC codes with girth 8 from sequences satisfied in GCD condition[J]. IEEE Commun. Lett.，2020，24(7)：1391-1394.

[6] Tasdighi A，Boutillon E. Integer ring sieve for constructing compact QC-LDPC codes with girths 8，10，and 12[J]. IEEE Trans. Inf. Theory，2022，68(1)：35-46.

[7] Kim D，Kim I，Cho H，et al. Performance analysis of QC-LDPC codes constructed by using Golomb rulers[C]// Asia Pacific Conf. on Communications (APCC)，2023：301-302.

[8] Kim I，Kojima T，Song H-Y. Some short-length girth-8 QC-LDPC codes from primes of the form t^2+1[J]. IEEE Commun. Lett.，2022，26(6)：1211-1215.

[9] Karimi B，Banihashemi A H. Construction of irregular protograph-based QC-LDPC codes with low error floor[J]. IEEE Trans. Commun.，2021，69(1)：3-18.

[10] 袁建国，王宏森，张希瑞，等. 基于围长约束与EMD的低错误平层LDPC码构造方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版)，2021，33(1)：67-72.

Yuan Jianguo，Wang Hongsen，Zhang Xirui，et al. Construction method of LDPC codes based on girth constraint and EMD with the low error floor[J]. J. of Chongqing University of Posts and Telecommunications：Natural Science Edition，2021，33(1)：67-72.

[11] 袁建国，蒯家松，张帅康. 基于Stanley序列的QC-LDPC码新颖构造方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版)，2023，35(3)：427-433.

Yuan Jianguo，Kuai Jiasong，Zhang Shuaikang. Novel construction method on QC-LDPC codes based on the Stanley sequence[J]. J. of Chongqing University of Posts and Telecommunications：Natural Science Edition，2023，35(3)：427-433.

[12] Zhang G，Ni M，Hu Y，et al. Quasi-cyclic LDPC codes with girth at least eight based on disjoint difference sets[J]. IEEE Commun. Lett.，2023，27(1)：55-59.

作者简介：

袁建国(1968—)，男，重庆市人，博士，教授，研究方向为通信系统中极化码与LDPC码的编译码技术。