

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.011

一种可快速编码的 QC-LDPC 码构造新方法^{*}

刘原华^{**}, 张美玲

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

摘 要:为解决 LDPC 码的编码复杂度问题,使其更易于硬件实现,提出了一种可快速编码的准循环 LDPC 码构造方法。该方法以基于循环置换矩阵的准循环 LDPC 码为基础,通过适当的打孔和行置换操作,使构造码的校验矩阵具有准双对角线结构,可利用校验矩阵直接进行快速编码,有效降低了 LDPC 码的编码复杂度。仿真结果表明,与 IEEE 802.16e 中的 LDPC 码相比,新方法构造的 LDPC 码在低编码复杂度的基础上获得了更好的纠错性能。

关键词:低密度奇偶校验码;准循环;循环置换矩阵;快速编码

中图分类号:TN911.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)01-0055-05

A New Design Method for Quasi-cyclic LDPC Codes with Fast Encoding Ability

LIU Yuan-hua, ZHANG Mei-ling

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: A new design of quasi-cyclic (QC) LDPC codes with easier hardware implementation is proposed to lower the encoding complexity. Based on the QC-LDPC codes with circulant permutation matrices, the masking method and line permutations are utilized to make the parity-check matrix have the quasi-dual-diagonal structure, and the fast encoding algorithm directly from the parity-check matrix can reduce the encoding complexity effectively. Simulation results show that compared with the QC-LDPC codes from the IEEE 802.16e standard, the constructed codes have better performance while maintaining the low encoding complexity.

Key words: low-density parity-check codes; quasi-cyclic; circulant permutation matrix; fast encoding

1 引 言

低密度奇偶校验码(LDPC 码)具有逼近 Shannon 限的纠错性能,近年来成为编码领域的研究热点,目前已广泛应用于深空通信、光纤通信和卫星数字视频广播等领域。根据构造方法的不同,可将 LDPC 码分为两大类:随机 LDPC 码和结构化 LDPC 码。随机 LDPC 码的编码复杂度与码长的平方成正比,且

校验矩阵的硬件存储也较为复杂,这已成为 LDPC 码实用化的一个瓶颈。为了实用的目的,需要设计性能优良、校验矩阵具有一定结构特性的 LDPC 码。基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码^[1-2]是一种结构化 LDPC 码,已经得到编码领域学者的研究和关注。

基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码的校验矩阵由循环置换矩阵构成,通过恰当地选择循环置换矩阵可以避免相应 Tanner 图中的短环。文献[3]和[4]

^{*} 收稿日期:2012-06-05;修回日期:2012-08-16 Received date:2012-06-05;Revised date:2012-08-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001131,61201194,61172071);陕西省教育厅专项科研计划项目(11JK1007);西安邮电大学青年教师基金项目(0001286)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61001131,61201194,61172071);The Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (11JK1007);The Program for Young Teachers in Xi'an University of Posts and Telecommunications (No.0001286)
^{**} 通讯作者: yuanhliu@163.com **Corresponding author:** yuanhliu@163.com

分别利用欧氏几何和有限域的特性构造出了不包含 4 环的性能优异的 QC-LDPC 码。值得注意的是,该类码的设计不仅需要避免短环,还需要考虑校验矩阵的行相关问题。文献[5]在提出了一种 QC-LDPC 码构造方法的同时分析了校验矩阵的行相关问题。一般设计的 QC-LDPC 码并不能保证校验矩阵的满秩,即存在行相关问题,而校验矩阵的行相关问题将会导致构造生成矩阵非常困难[6]。为解决行相关问题,IEEE 802.16e 标准中采用具有特殊结构的 QC-LDPC 码,其校验矩阵的右半部分具有准双对角线结构,满足非奇异性,即满秩,并且可直接利用校验矩阵进行编码,具有很低的编码复杂度。然而,IEEE 802.16e 标准中的 LDPC 码校验矩阵右半部分双对角线上的子矩阵均是单位阵,限制得较为严格,使很多好码被排除在外。综合考虑以上两方面,本文利用已有的基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码,通过打孔和行置换,获得了一大类性能优异且可实现快速编码的 QC-LDPC 码。与 IEEE 802.16e 标准中的 LDPC 码相比,本文构造出的 QC-LDPC 码具有相同的编码复杂度,且具有更优的纠错性能。

2 基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码

基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码的校验矩阵 H 由循环置换矩阵和零矩阵组成:

$$H = \begin{bmatrix} I_{a_{11}} & I_{a_{12}} & \cdots & I_{a_{1\rho}} \\ I_{a_{21}} & I_{a_{22}} & \cdots & I_{a_{2\rho}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{a_{\gamma 1}} & I_{a_{\gamma 2}} & \cdots & I_{a_{\gamma\rho}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $a_{ij} \in \{-1, 0, 1, 2, \cdots, n-1\}$, $I_{a_{ij}}$ 为一个 $n \times n$ 的循环置换矩阵,可由单位阵 I 每行向右循环移位 a_{ij} 位得到, I_{-1} 表示全零矩阵。 H 的零空间即为码长为 $N = n\rho$ 的 QC-LDPC 码。每个循环置换矩阵均可由其维数 n 和循环移位次数 a_{ij} 唯一确定,因此 H 所需的存储空间非常小。矩阵 H 的基矩阵 H_b 定义为如下 $\gamma \times \rho$ 矩阵:

$$H_b = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1\rho} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2\rho} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{\gamma 1} & a_{\gamma 2} & \cdots & a_{\gamma\rho} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将 H_b 中的 a_{ij} 用 $n \times n$ 的循环置换矩阵 $I_{a_{ij}}$ 代替,即可得到矩阵 H ,称为矩阵扩展。

Tanner 等在文献[1]中构造的 LDPC 码就是一种

基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码,对任意素数 p ,选取域 $GF(p)$ 中的非零元素 a 和 b , a 和 b 的阶分别为 k 和 j , Tanner 构造的 QC-LDPC 码的基矩阵如式 (3),校验矩阵可由基矩阵扩展得到,即将基矩阵中的每一元素用对应的 $p \times p$ 的循环置换矩阵代替。

$$H_b = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 & \cdots & a^{k-1} \\ b & ab & a^2b & \cdots & a^{k-1}b \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b^{j-1} & ab^{j-1} & a^2b^{j-1} & \cdots & a^{k-1}b^{j-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 可快速编码的 QC-LDPC 码设计

IEEE 802.16e 标准中的 QC-LDPC 码是一种基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码,校验矩阵可由其基矩阵扩展得到,且校验矩阵的右半部分具有准双对角线结构,保证了校验矩阵的满秩,同时可直接利用校验矩阵进行编码。然而,IEEE 802.16e 标准中 QC-LDPC 码的校验矩阵右半部分双对角线上的子矩阵均是单位阵,要求比较严格,很多好码被排除在外。事实上,可以证明,若校验矩阵的右半部分具有准双对角线结构,则只要保证双对角线上同一块列的子矩阵相同,即可使校验矩阵满秩,并可直接利用校验矩阵进行低复杂度的迭代编码。由此,提出了一种具有如此结构的校验矩阵的设计方法,从而获得可实现低编码复杂度的 QC-LDPC 码。下面进行详细说明。

将具有上述结构的校验矩阵分成两部分:

$$H = [H_1 \ H_2] \quad (4)$$

其中, H_1 的维数为 $m \times k$ ($m = pm_b, k = pk_b$), H_2 的维数为 $m \times m$,且 H_2 具有式(5)形式,其中 I_x 在 H_2 的第 r 块行,可以证明 H_2 满秩。

$$H_2 = \begin{bmatrix} I_{a_1} & I_{a_2} & & & \\ I_{-1} & I_{a_2} & I_{a_3} & & \\ \vdots & & I_{a_3} & I_{a_4} & I_{-1} \\ I_{-1} & & & I_{a_4} & \ddots \\ I_x & & & \ddots & \ddots \\ I_{-1} & & & & \ddots & I_{a_{m-2}} \\ \vdots & & I_{-1} & & & I_{a_{m-2}} & I_{a_{m-1}} \\ I_{-1} & & & & & & I_{a_{m-1}} & I_{a_m} \\ I_{a_1} & & & & & & & I_{a_m} \end{bmatrix} \quad (5)$$

定理 1 具有式(5)形式的矩阵是满秩的。

证明:以块为单位,从下往上将分块矩阵 H_2 的各块行与其后的所有块行进行模 2 加得到一个新的块行,该变换实际上是对矩阵 H_2 做初等行变换:

$$\mathbf{H}_2^1 = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_x & \mathbf{I}_{-1} & & & \\ \mathbf{I}_x + \mathbf{I}_{a_1} & \mathbf{I}_{a_2} & \mathbf{I}_{-1} & & \\ \vdots & & \mathbf{I}_{a_3} & \ddots & \\ \mathbf{I}_x + \mathbf{I}_{a_1} & & & \ddots & \ddots \\ \mathbf{I}_{a_1} & & & & \ddots & \mathbf{I}_{-1} \\ \vdots & & \mathbf{I}_{-1} & & \mathbf{I}_{a_{m-1}} & \mathbf{I}_{-1} \\ \mathbf{I}_{a_1} & & & & & \mathbf{I}_{a_m} \end{bmatrix} \quad (6)$$

以块为单位,将 $\mathbf{H}_2^1$ 第 1 块行向左循环移位 x 步,第 i ($2 \leq i \leq m$) 块行向左循环移位 a_i 步,可得

$$\mathbf{H}_2^2 = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 & \mathbf{I}_{-1} & & & \\ \mathbf{I}_{x-a_2} + \mathbf{I}_{a_1-a_2} & \mathbf{I}_0 & \mathbf{I}_{-1} & & \mathbf{I}_{-1} \\ \vdots & & \mathbf{I}_0 & \ddots & \\ \mathbf{I}_{x-a_r} + \mathbf{I}_{a_1-a_r} & & & \ddots & \ddots \\ \mathbf{I}_{a_1-a_{r+1}} & & & & \ddots & \mathbf{I}_{-1} \\ \vdots & & \mathbf{I}_{-1} & & \mathbf{I}_0 & \mathbf{I}_{-1} \\ \mathbf{I}_{a_1-a_m} & & & & & \mathbf{I}_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由此可以看出, $\mathbf{H}_2^2$ 是一个下三角矩阵,即满秩矩阵,证毕。

许多文献^[1-4]提出了基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码的构造方法,构造出的校验矩阵是非满秩的,致使由校验矩阵构造生成矩阵非常困难。为降低 LDPC 码的编码实现复杂度,本文提出了一种新的可实现快速编码的 QC-LDPC 码构造方法,该方法在原始校验矩阵的基础上利用打孔和行置换操作,使校验矩阵的右半部分具有式(5)的形式,从而保证所构造的校验矩阵满秩,可直接利用校验矩阵进行低复杂度编码。图 1 给出了新构造方法的实现流程图。

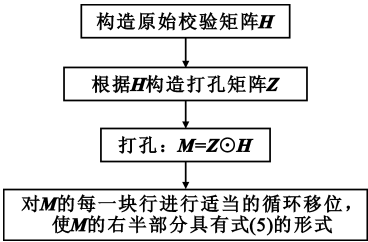


图 1 新构造方法的流程图
Fig.1 Flowchart of the new design method

以 $\mathbf{M}$ 为校验矩阵,其零空间即为可快速编码的 QC-LDPC 码。其中第一步中,可利用已有的各种基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码构造方法来获得原始矩阵 $\mathbf{H}$ 。

第二步中打孔矩阵 $\mathbf{Z}$ 的构造方法如下:若矩阵 $\mathbf{H}$ 为子矩阵组成的 $\gamma \times \rho$ 的矩阵阵列,则打孔矩阵

$\mathbf{Z} = [z_{ij}]$ 为 $\text{GF}(2)$ 上的 $\gamma \times \rho$ 矩阵,将 $\mathbf{Z}$ 分成两部分 $\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_1 \mathbf{Z}_2]$,其中 $\mathbf{Z}_2$ 为具有式(8)的形式的 $\gamma \times \gamma$ 矩阵,第一列中间的 1 在第 r 行, $\mathbf{Z}_1$ 为全 1 矩阵。

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & & & \\ 0 & 1 & 1 & & \\ \vdots & & 1 & 1 & 0 \\ 0 & & & 1 & \ddots \\ 1 & & & \ddots & \ddots \\ 0 & & & & \ddots & 1 \\ \vdots & & 0 & & & 1 & 1 \\ 0 & & & & & 1 & 1 \\ 1 & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

第三步中的打孔过程可以看作是一种特殊的矩阵乘法运算,矩阵阵列 $\mathbf{H}$ 的打孔定义为 $\text{GF}(2)$ 上的打孔矩阵 $\mathbf{Z}$ 与 $\mathbf{H}$ 的乘积:

$$\mathbf{M} = \mathbf{Z} \odot \mathbf{H} = \begin{bmatrix} z_{11}\mathbf{H}_{11} & z_{12}\mathbf{H}_{12} & \cdots & z_{1\rho}\mathbf{H}_{1\rho} \\ z_{21}\mathbf{H}_{21} & z_{22}\mathbf{H}_{22} & \cdots & z_{2\rho}\mathbf{H}_{2\rho} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{\gamma 1}\mathbf{H}_{\gamma 1} & z_{\gamma 2}\mathbf{H}_{\gamma 2} & \cdots & z_{\gamma\rho}\mathbf{H}_{\gamma\rho} \end{bmatrix} \quad (9)$$

若 $z_{ij} = 1$,则 $z_{ij}\mathbf{H}_{ij} = \mathbf{H}_{ij}$;若 $z_{ij} = 0$,则 $z_{ij}\mathbf{H}_{ij} = 0$ 为零矩阵。可以看出,如果 $\mathbf{Z}$ 中含有 0 元素,则打孔后的矩阵 $\mathbf{M}$ 更稀疏;如果 $\mathbf{H}$ 不包含四环,则 $\mathbf{M}$ 也不包含四环。

下面给出如何对 $\mathbf{M}$ 进行循环移位使其右半部分具有式(5)的形式。记矩阵 $\mathbf{M} = [\mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2]$ 的右半部分 $\mathbf{M}_2$ 第 i 行 j 列的子矩阵为 $\mathbf{M}_2(i, j)$,以块为单位,将 $\mathbf{M}$ 的第 i 块行向左循环移位 $S(i)$ 位,其中 $S(1) = 0, S(i) = \mathbf{M}_2(i, i) - \mathbf{M}_2(i-1, i) + S(i-1), 2 \leq i \leq \gamma$,同时令 $\mathbf{M}_2(\gamma, 1) = \mathbf{M}_2(1, 1)$,则可使 $\mathbf{M}_2$ 具有式(5)的形式,即可保证矩阵 $\mathbf{M}$ 满秩,并可直接利用 $\mathbf{M}$ 进行迭代编码。由于 $\mathbf{M}$ 的子矩阵为循环置换矩阵,这样的循环移位仅相当于对 $\mathbf{M}$ 做行置换,将循环移位前后的 $\mathbf{M}$ 作为校验矩阵所获得的 QC-LDPC 码的纠错性能完全相同。

下面给出如何直接利用 $\mathbf{M}$ 进行简单快速编码。对于系统码,码字向量可表示为 $\mathbf{c} = [\mathbf{s} \mathbf{p}]$,其中 $\mathbf{s} = [s_1 s_2 \cdots s_{k_b}]$ 为信息向量, $\mathbf{p} = [p_1 p_2 \cdots p_{m_b}]$ 为校验向量,且 s_i 和 p_i 的长度均为 p 。由 $\mathbf{M} \cdot \mathbf{c}^T = \mathbf{0}$ 可得 $\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{s}^T = \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{p}^T$ 。记 $\mathbf{M}_{b1}$ 为 $\mathbf{M}_1$ 的基矩阵,第 i 行第 j 列的元素为 $\mathbf{M}_{b1}(i, j)$,则

$$\begin{bmatrix} I_{a_1} & I_{a_2} & & & \\ I_{-1} & I_{a_2} & I_{a_3} & & \\ \vdots & & I_{a_3} & I_{a_4} & I_{-1} \\ I_{-1} & & & I_{a_4} & \ddots \\ I_x & & & \ddots & \ddots \\ I_{-1} & & & & I_{a_{m-2}} \\ \vdots & I_{-1} & & & I_{a_{m-2}} & I_{a_{m-1}} \\ I_{-1} & & & & I_{a_{m-1}} & I_{a_m} \\ I_{a_1} & & & & & I_{a_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{m_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{M_{b1}(1,1)} & I_{M_{b1}(1,2)} & \cdots & I_{M_{b1}(1,k_b)} \\ I_{M_{b1}(2,1)} & I_{M_{b1}(2,2)} & \cdots & I_{M_{b1}(2,k_b)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{M_{b1}(m_b,1)} & I_{M_{b1}(m_b,2)} & \cdots & I_{M_{b1}(m_b,k_b)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{k_b} \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式展开可得含 m_b 个等式的方程组,各式相加可得

$$p_1 = I_x^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{m_b} \sum_{j=1}^{k_b} I_{M_{b1}(i,j)} \cdot s_j \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)中的每个等式可得

$$p_i = I_{a_i}^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{k_b} I_{M_{b1}(i-1,j)} \cdot s_j + I_{a_{i-1}} \cdot p_{i-1}, \quad i = 2, 3, \cdots, r, r+2, r+3, \cdots, m \quad (12)$$

$$p_{r+1} = I_{a_{r+1}}^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{k_b} I_{M_{b1}(r,j)} \cdot s_j + I_{a_r} \cdot p_r + I_x \cdot p_{1b} \quad (13)$$

式(11)~(13)为计算 p_i 的迭代公式,从而得到校验向量 p 。下面考虑编码复杂度,矩阵 I_a 为循环置换矩阵,每行每列仅有一个 1,因此式(11)~(13)

的主要计算量在于 $\sum_{i=1}^{m_b} \sum_{j=1}^{k_b} I_{M_{b1}(i,j)} \cdot s_j$,由此可知,求校验向量的计算量与 802.16e 标准中求校验向量的计算量相同。

4 仿真结果

本节采用 BPSK 调制下的加性高斯白噪声信道 (AWGN),仿真比较新方法构造的 QC-LDPC 码和 IEEE 802.16e 标准中的 QC-LDPC 码在置信传播 (BP)译码算法下的纠错性能,BP 算法的最大迭代次数均设为 50 次。

图 2 显示了 1/2 码率的新方法构造码与 IEEE 802.16e 中的码的 BER 性能。新构造方法的第一步选用文献[1]中的构造方法,码(696,348)的构造参数如下: $p = 29, a = 2, b = 3, a$ 和 b 的阶均为 28,由

此可构造出子矩阵组成的 28×28 的矩阵阵列,选前 12 行 24 列子矩阵作为码(696,348)的原始矩阵 H 。码(2328,1164)的构造参数如下: $p = 97, a = 2, b = 3, a$ 和 b 的阶均为 48,由此可构造出 48×48 的矩阵阵列,选前 12 行 24 列子矩阵作为码(2328,1164)的原始矩阵 H 。为增强可比性,打孔矩阵 Z 的构造如下:将 1/2 码率的 IEEE 802.16e 码的基矩阵中的 -1 用 0 代替,非 -1 用 1 代替得到的矩阵为打孔矩阵 Z 。打孔后得到具有准双对角线结构的满秩矩阵 M 。然后以块为单位,将 M 的第 i 块行向左循环移 $S(i)$ 位,最后令 $M_2(\gamma, 1) = M_2(1, 1)$ 。 M 的零空间即为构造的 QC-LDPC 码。

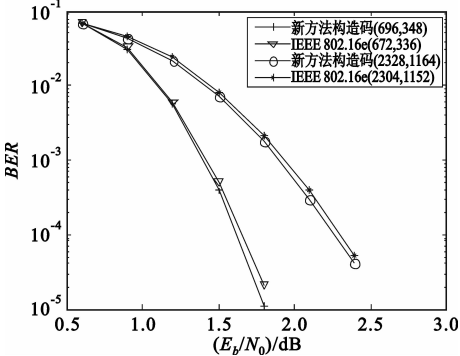


图 2 新方法构造码与 IEEE 802.16e 码的 BER 性能
Fig.2 Performance of the new codes and the codes in IEEE 802.16e

由仿真结果可以看出,新方法构造的码 BER 性能略优于 IEEE 802.16e 中的码。由上一小节中编码实现的分析可知,新方法构造的码与 IEEE 802.16e 中的码具有相同的编码复杂度,即新方法构造的码在保证低编码复杂度的基础上获得了更优的纠错性能。同时需要指出的是,IEEE 802.16e 标准中的码结构限制得较为严格,使很多好码被排除在外,新方法可以在任意已有的基于循环置换矩阵的构造方法基础上进行打孔和行置换操作,从而可以构造出一大类性能优异的可实现快速编码的 QC-LDPC 码。

5 结束语

本文研究了基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码构造方法,发现已有的大部分设计方法构造的 QC-LDPC 码存在校验矩阵的行相关问题,导致编码复杂度较高。由此,提出了一种新的可快速编码的 QC-LDPC 码构造方法,在已有的各种基于循环置换矩阵的 QC-LDPC 码构造方法基础上,通过打孔和行置换,使校验矩阵具有准双对角线结构,可以利用校验矩阵直接进行简单快速的编码,在保证优异性能的

同时,降低了 LDPC 码的硬件实现复杂度。同时给出了简单快速编码的具体实现方法,并分析比较了编码实现复杂度。仿真结果表明,与 IEEE 802.16e 标准中的 LDPC 码相比,新方法构造出的 QC-LDPC 码在保证低编码复杂度的基础上获得了更优的纠错性能。

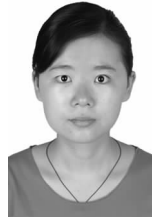
参考文献:

- [1] Tanner R M, Sridhara D, Sridharan A, et al. LDPC block and convolutional codes based on circulant matrices[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 2966 – 2984.
- [2] Fossorier M P C. Quasi-cyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(8): 1788 – 1793.
- [3] Liu Yuanhua, Niu Xinliang, Wang Xinmei, et al. Design of quasi-cyclic LDPC codes based on Euclidean geometries[J]. Journal of Electronics (China), 2010, 27(3): 340 – 344.
- [4] Zhang L, Lin S, Abdel-Ghaffar K, et al. Quasi-cyclic LDPC codes on cyclic subgroups of finite fields[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(9): 2330 – 2336.
- [5] Liu K, Huang Q, Lin S, et al. Quasi-cyclic LDPC codes: Construction and rank analysis of their parity-check matrices[C]// Proceedings of 2012 Information Theory and Applications Work-

shop(ITA). San Diego, CA: IEEE, 2012: 227 – 233.

- [6] Zhao Ying, Xiao Yang. The necessary and sufficient condition of a class of quasi-cyclic LDPC codes without girth four[J]. IEICE Transactions on Communications, 2009, 92(1): 306 – 309.

作者简介:



刘原华(1983—),女,江苏徐州人,分别于 2005 年和 2010 年获西安电子科技大学学士和工学博士学位,现为西安邮电大学讲师,主要从事信道编码、通信调制方面的研究;

LIU Yuan-hua was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1983. She received the B. S. degree and the Ph. D. degree from Xidian University in 2005 and 2010, respectively. She is now a lecturer at Xi'an University of Posts and Telecommunications. Her research concerns channel coding and communication modulation technology.

Email: yuanhliu@163.com

张美玲(1982—),女,广东梅州人,2010 年于西安电子科技大学获工学博士学位,现为西安邮电大学讲师,主要从事信息安全方面的研究。

ZHANG Mei-ling was born in Meizhou, Guangdong Province, in 1982. She received the Ph. D. degree from Xidian University in 2010. She is now a lecturer at Xi'an University of Posts and Telecommunications. Her research concerns information security.