

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.07.002

引用格式:洪冰清,刘聪聪,陈海强,等.利用域间映射的多元 QC-LDPC 码构造[J].电讯技术,2016,56(7):724-728. [HONG Bingqing, LIU Congcong, CHEN Haiqiang, et al. Construction of Q-ary QC-LDPC codes with Galois filed mapping[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(7):724-728.]

利用域间映射的多元 QC-LDPC 码构造*

洪冰清¹,刘聪聪²,陈海强^{**1,3,4},覃新贤^{1,3,4}

(1. 广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004; 2. 中国空间技术研究院 西安分院, 西安 710100;
3. 广西高校多媒体通信与信息处理重点实验室(广西大学), 南宁 530004;
4. 广西多媒体通信与网络技术重点实验室培育基地(广西大学), 南宁 530004)

摘 要:通过定义有限域间的映射关系,提出了一种低复杂度的多元准循环奇偶校验码(QC-LDPC)的构造方法。利用这种方法可将较高阶数有限域的校验矩阵映射到指定的较低有限域上,且能保持原矩阵的结构性与稀疏特性。所构造的多元 LDPC 码不仅具有较低的译码复杂度且具有准循环特性,在硬件上也易于用移位寄存器实现。在高斯白噪声(AWGN)信道下的仿真结果表明,所构造的多元 QC-LDPC 码具有良好的编译码性能。当误码率为 10^{-6} 时,码率为 0.765 的 QC-LDPC 码在目标域 GF(8) 上能获得 0.2 dB 的性能增益。

关键词:多元 LDPC 码;准循环;有限域映射;低译码复杂度

中图分类号:TN911.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)07-0724-05

Construction of Q-ary QC-LDPC Codes with Galois Filed Mapping

HONG Bingqing¹, LIU Congcong², CHEN Haiqiang^{1,3,4}, QIN Xinxian^{1,3,4}

(1. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning, 530004, China;
2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China; 3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Multimedia Communications and Information Processing, Nanning 530004, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology (Cultivating Base), Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: An approach to construct Q-ary quasi-cyclic (QC) low density parity check (LDPC) codes with low decoding complexity is presented by defining a mapping relationship over Galois field. With this method, the parity check matrix over a higher order Galois field can be mapped to a designated Galois field, which can keep its structural property and density degree. Codes constructed by this method have low decoding complexity and quasi-cyclic characteristic, which can be easily implemented by shift registers. Simulation results show that the constructed codes have good performance over additive white Gaussian noise (AWGN) channel. Compared with the original codes, QC-LDPC codes with rate 0.765 at targeted field GF(8) can achieve a performance gain about 0.2 dB around 10^{-6} bit error rate (BER).

Key words: Q-ary LDPC codes; quasi-cyclic; Galois field mapping; low decoding complexity

1 引 言

低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LD-PC)码是 Gallager 于 1962 年提出的一种具有接近香农限的优秀编码方案^[1]。Mackey 和 Davey^[2]在

* 收稿日期:2016-01-22;修回日期:2016-04-19 Received date:2016-01-22;Revised date:2016-04-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102090,61362010);广西自然科学基金资助项目(2012GXNSFAA053217,2014GXNSFBA118276)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 61102090,61362010); The Natural Science Foundation of Guangxi (2012GXNSFAA053217,2014GXNSFBA118276)

** 通信作者:haiqiang@gxu.edu.cn Corresponding author:haiqiang@gxu.edu.cn

1998 年首次提出了多元的编码方法,并给出了相应的译码算法。与二进制 LDPC 码相比,多元 LDPC 码具有更好的编译码性能,且具有更高的抗突发错误能力。同时准循环结构的 LDPC 码具有更低的实现复杂度,且具有与随机构造多元 LDPC 码相似的性能,因此吸引了广泛的研究。

目前结构化的多元 LDPC 码的构造方法主要是基于代数、几何理论,包括有限域加群、循环子群以及有限几何循环类等结构化构造方法。文献[3]研究了准循环矩阵中环的形成条件;文献[4]对校验矩阵中的非零元素进行分析,构造了一类校验矩阵满秩的准循环多元环码;文献[5-8]基于有限几何和有限域构造了一系列最小距离很大且误码平台极低的多元准循环 LDPC 码;文献[9]基于完美差分集构造一种大围长多元准循环 LDPC 环码;文献[10-11]提出基于欧氏几何空间平行束构造规则与非规则 LDPC 码的方法并取得了良好的性能;文献[12]利用遗传算法提出一种计算机搜索的大围长 QC-LDPC 码构造方法,且取得了一定的净编码增益;文献[13]基于完美差分集的思想提出一种列重为 2 的循环置换矩阵构造方法,并取得了很好的性能。

以上几种准循环 LDPC 码的构造方法都能取得良好编译码性能,但校验矩阵的结构并不是很灵活,特别是在构造码率较高的 LDPC 码时,需要基于较高阶数的有限域。同时,多元 LDPC 码的译码算法与其阶数密切相关,阶数越高,其译码的复杂度就越高。文献[14]基于激光通信的应用背景提出了一种基于有限域立体扩展的多元 LDPC 码构造方法,文献[15]提出了通过滑动窗口构造指定有限域上的校验矩阵的方法,提高了编码构造灵活性。本文在此基础上提出一种基于有限域映射构造低译码复杂度的多元准循环 LDPC 码的方法,所得到的多元 LDPC 码不仅具有较低的译码复杂度,同时也具有较好的编译码性能。

2 多元准循环 LDPC 码

设 $m \times n$ 维多元 LDPC 码的校验矩阵

$$\boldsymbol{H}_q = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_{0,0} & \boldsymbol{H}_{0,1} & \cdots & \boldsymbol{H}_{0,n-1} \\ \boldsymbol{H}_{1,0} & \boldsymbol{H}_{1,1} & \cdots & \boldsymbol{H}_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{H}_{m-1,0} & \boldsymbol{H}_{m-1,1} & \cdots & \boldsymbol{H}_{m-1,n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{H}_{i,j}$ 为 $\text{GF}(q)$ 上 $k \times k$ 的子矩阵, $0 \leq i < m, 0 \leq j <$

n 。则 $\text{GF}(q)$ 上的多元 LDPC 码即为校验矩阵 $\boldsymbol{H}_q$ 的解空间向量。如果 $\boldsymbol{H}_q$ 满足任何两行或者两列之间相同位置的非零元素个数不超过 1,即 $\boldsymbol{H}_q$ 对应的 Tanner 图不含四环,则称校验矩阵 $\boldsymbol{H}_q$ 满足行列 (Row-Column, RC) 约束条件。

设 $\boldsymbol{c} = (c_0, c_1, \cdots, c_{n-1})$ 为任意 LDPC 码向量, $\boldsymbol{v}_j$ 为 k 元向量。对任意 $0 < l < m$,将码字 $\boldsymbol{c}$ 的每一部分循环右移 l 位 $\boldsymbol{c}^{(l)} = (c_0^{(l)}, c_1^{(l)}, \cdots, c_{k-1}^{(l)})$,若 $\boldsymbol{c}^{(l)}$ 仍为校验矩阵 $\boldsymbol{H}_q$ 所定义的 LDPC 码,则称这类码为准循环多元 LDPC 码^[16]。

3 基于有限域映射的多元准循环 LDPC 码构造方法

设 α 是有限域 $\text{GF}(q_1)$ 上的一个本原元, α 的幂形式 $\alpha^{-\infty} = 0, \alpha^0 = 1, \alpha, \cdots, \alpha^{q_1-2}$ 构成 $\text{GF}(q_1)$ 上的所有元素,同时 $\alpha^{q_1-1} = 1$ 。基于 $\text{GF}(q_1)$ 构造 $m \times n$ 的基矩阵 $\boldsymbol{W}$:

$$\boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{0,0} & \boldsymbol{w}_{0,1} & \cdots & \boldsymbol{w}_{0,n-1} \\ \boldsymbol{w}_{1,0} & \boldsymbol{w}_{1,1} & \cdots & \boldsymbol{w}_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{w}_{m-1,0} & \boldsymbol{w}_{m-1,1} & \cdots & \boldsymbol{w}_{m-1,n-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\boldsymbol{W}$ 满足以下结构性质:

- (1) 对 $0 \leq i \leq m$ 和 $0 \leq k, l < q-1$ 且 $k \neq l, \alpha^k w_i$ 和 $\alpha^l w_i$ 至少有 $n-1$ 处不同,也即 $\alpha^k w_i$ 和 $\alpha^l w_i$ 在 $\text{GF}(q_1)$ 上最多有一个相同的符号;
- (2) 对 $0 \leq i, j < m, i \neq j$ 且 $0 \leq k, l < q-1, \alpha^k w_i$ 和 $\alpha^l w_j$ 至少有 $n-1$ 处不同。

特性 1 表明 $\boldsymbol{W}$ 的每一行最多有一个 $\text{GF}(q_1)$ 上的零元素,特性 2 表明 $\boldsymbol{W}$ 中的任意两行都有 $n-1$ 处不同。特性 1 和 2 表明了 $\boldsymbol{W}$ 的行之之间的约束关系,也被称为行约束条件 1 和 2。

将 $\boldsymbol{W}$ 中的非零元素置换为 $\text{GF}(q_1)$ 上 $(q_1-1) \times (q_1-1)$ 的 α 乘循环置换矩阵,可得 $\text{GF}(q_1)$ 上满足 RC 约束条件的准循环校验矩阵 $\boldsymbol{H}$:

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{0,0} & \boldsymbol{A}_{0,1} & \cdots & \boldsymbol{A}_{0,n-1} \\ \boldsymbol{A}_{1,0} & \boldsymbol{A}_{1,1} & \cdots & \boldsymbol{A}_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{A}_{m-1,0} & \boldsymbol{A}_{m-1,1} & \cdots & \boldsymbol{A}_{m-1,n-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵 $\boldsymbol{H}$ 中的每个子矩阵 $\boldsymbol{A}_{i,j}$ 为具有如下形式的乘 α 循环置换矩阵:

$$\mathbf{A}_{i,j} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha^2 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha^k & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha^0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \circ \quad (4)$$

设 β 为 $\text{GF}(q_2)$ ($q_2 < q_1$) 的一个本原元, 下面定义一种有限域 $\text{GF}(q_1)$ 到 $\text{GF}(q_2)$ 的映射关系。

定义 1: 设 α, β 分别为 $\text{GF}(q_1)$ 和 $\text{GF}(q_2)$ 的一个本原元, 集合 $A = \{\alpha^0, \alpha^1, \dots, \alpha^{q_1-2}\}$ 和集合 $B = \{\beta^0, \beta^1, \dots, \beta^{q_2-2}\}$ 为有限域 $\text{GF}(q_1)$ 和 $\text{GF}(q_2)$ 上的所有非零元素的集合, 定义集合 A 到集合 B 的一种映射 $f: \mathbf{A}_{i,j} \rightarrow \mathbf{B}_{i,j} \Leftrightarrow \{f: \alpha^k \rightarrow \beta^{k \bmod (q_2-1)}\}, 0 \leq k < q_1-1$ 。

通过所定义的有限域映射关系可将基于 $\text{GF}(q_1)$ 的循环置换矩阵 $\mathbf{A}_{i,j}$ 映射到基于 $\text{GF}(q_2)$ 的置换矩阵 $\mathbf{B}_{i,j}$:

$$\mathbf{B}_{i,j} = \begin{bmatrix} 0 & \beta & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta^2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \beta^{i \bmod (q_2-1)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \beta^0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \quad (5)$$

置换矩阵 $\mathbf{B}_{i,j}$ 中的所有非零元素均在映射域 $\text{GF}(q_2)$ 上。可知 $\mathbf{B}_{i,j}$ 具有以下结构性: $\mathbf{B}_{i,j}$ 中每行每列有且只有一个非零元素; $\mathbf{B}_{i,j}$ 的每一行均为其上一行的右循环移位并乘以 β , 第一行为其最后一行的右循环移位并乘以 β , 即 $\mathbf{B}_{i,j}$ 为 $\text{GF}(q_2)$ 上的 $(q_1-1) \times (q_1-1)$ 维乘 β 循环置换矩阵。将 $\mathbf{H}$ 中的所有子矩阵 $\mathbf{A}_{i,j}$ 通过映射变换置换为乘 β 循环置换矩阵 $\mathbf{B}_{i,j}$ 可得 $\text{GF}(q_2)$ 上满足 RC 约束准则的准循环校验矩阵 $\mathbf{H}_f$:

$$\mathbf{H}_f = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{0,0} & \mathbf{B}_{0,1} & \cdots & \mathbf{B}_{0,n-1} \\ \mathbf{B}_{1,0} & \mathbf{B}_{1,1} & \cdots & \mathbf{B}_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{B}_{m-1,0} & \mathbf{B}_{m-1,1} & \cdots & \mathbf{B}_{m-1,n-1} \end{bmatrix} \circ \quad (6)$$

引理 1: 将准循环校验矩阵 $\mathbf{H}$ 通过有限域映射得到的校验矩阵 $\mathbf{H}_f$ 所定义的 LDPC 码为多元准循环 LDPC 码。

证明: 令旋转矩阵 $\mathbf{R}_{T,T}^{(l)}$ 为单位矩阵 $\mathbf{I}$ 的 l 次右循环移位, $\mathbf{R}_{QT,T}$ 为有如下形式的 $QT \times QT$ 方阵^[17]:

$$\mathbf{R}_{QT,T}(i,j) = \begin{cases} \mathbf{R}_{T,T}(\bar{i}, \bar{j}), & \lfloor i/T \rfloor T \leq j < \lfloor i/T \rfloor T + T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \circ \quad (7)$$

式中: $0 \leq i, j < QT, \bar{i} = i \bmod T, \bar{j} = j \bmod T$, 即 $\mathbf{R}_{QT,T}$ 为准循环单位矩阵。矩阵 $\mathbf{G}$ 为校验矩阵 $\mathbf{H}_f$ 的 $K \times N$ 维生成矩阵, 则 $\mathbf{G} \cdot \mathbf{H}^T = 0$ 。

设 $\mathbf{v} = \mathbf{u}\mathbf{G}$ 为校验矩阵 $\mathbf{H}_f$ 定义的任一码字, $\mathbf{v}\mathbf{H}_f^T = 0$ 。 $\mathbf{v}^{(l)}$ 为 $\mathbf{v}$ 的 l 次循环右移, $0 \leq l < q_1-1$ 。令 $\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(l)}$ 表示 $\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}$ 的每个子矩阵循环右移 $l-1$ 次, $\mathbf{v}^{(l)}$ 可表示为 $\mathbf{v}^{(l)} = \mathbf{v}\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(l)}$, 则有

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^{(l)}\mathbf{H}_f^T &= \mathbf{v}\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(l)}\mathbf{H}_f^T = \\ &= \mathbf{u}\mathbf{G}\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(l)}\mathbf{H}_f^T = \\ &= \mathbf{u}\mathbf{G}(\mathbf{H}_f\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(-l)})^T \circ \end{aligned} \quad (8)$$

由矩阵 $\mathbf{H}_f$ 各子矩阵的循环特性可知

$$\mathbf{H}_f\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(-l)} = \mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(l)}\mathbf{H}_f, \quad (9)$$

则式(8)有

$$\mathbf{v}^{(l)}\mathbf{H}_f^T = \mathbf{u}\mathbf{G}(\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(l)}\mathbf{H}_f)^T = \mathbf{u}\mathbf{G}\mathbf{H}_f^T\mathbf{R}_{m(q_1-1), q_1-1}^{(-l)} = 0, \quad (10)$$

即 $\mathbf{v}^{(l)}$ 也为校验矩阵 $\mathbf{H}_f$ 所定义的码字。所以校验矩阵 $\mathbf{H}_f$ 所定义的 LDPC 码为多元准循环 LDPC 码。命题得证。

对任意整数对 $(\gamma, \rho), 1 \leq \gamma \leq m, 1 \leq \rho \leq n$, 令 $\mathbf{H}_f(\gamma, \rho)$ 是 $\mathbf{H}_f$ 的 $\gamma \times \rho$ 维子矩阵, 则矩阵 $\mathbf{H}_f(\gamma, \rho)$ 为 $\text{GF}(q_2)$ 上的 $\gamma(q_1-1) \times \rho(q_1-1)$ 维矩阵。基于 $\text{GF}(q_2)$ 的矩阵 $\mathbf{H}_f(\gamma, \rho)$ 的解空间定义了 q_2 进制的准循环 LDPC 码 $\mathbf{C}_{qc,f}$, 其码长为 $\rho(q_1-1)$, 码率至少为 $(\rho-\gamma)/\rho$ 。如果矩阵 $\mathbf{H}_f(\gamma, \rho)$ 有固定的列重和行重 γ 和 ρ , 则 $\mathbf{C}_{qc,f}$ 是 (γ, ρ) 规则 QC-LDPC 码, 其最小距离为 $\gamma+1$; 否则, $\mathbf{C}_{qc,f}$ 为非规则 QC-LDPC 码。

4 复杂度和仿真分析

与文献[15]类似, 本文的多元 LDPC 码通过选择参数, 可在不同的小域上完成构造。假设原域的阶为 q_0 , 则 QSPA 的译码复杂度为 $O(q_0^2)$; 用本文构造方法, 将多元 LDPC 码投影到阶为 q_1 的域上, 则对应的复杂度变成 $O(q_1^2)$ 。注意, 本文的投影域一般小于原域, 即 $q_0 \geq q_1$, 因此译码复杂度得到了降低。

本文仿真环境如下: 信道为高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道, 调制方式为 BPSK 调制, 译码最大迭代次数均为 50, 使用 QSPA 译码算法。为了进一步分析不同有限域映射对多元 LDPC 码性能的影响, 本节构造了基于不同有限域阶上的多元 LDPC 码, 并对其译码性能进行了分析。

例 1: 设 $q_1 = 32, q_2 = 4, 8, 16$ 。基于 $\text{GF}(q_1)$ 构造基矩阵 $\mathbf{W}$, 并将 $\mathbf{W}$ 中的非零元素置换为乘 α 循环置

换矩阵,取 $\gamma=4, \rho=8$ 构造基于 GF(32) 的 LDPC 码 C_0 ,码长 $n=248$,码率 $R=0.552$ 。通过文中定义的映射关系构造基于 GF(4)、GF(8)、GF(16) 的多元 LDPC 码 C_1, C_2, C_3 。4 种多元 LDPC 码的仿真性能曲线如图 1 和图 2 所示。

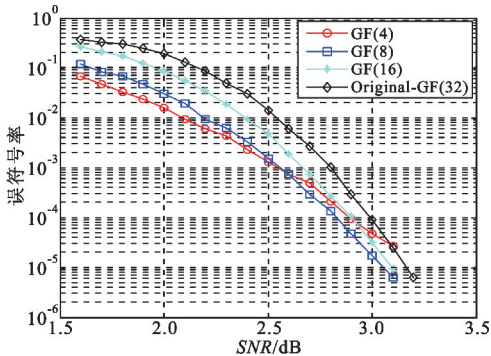


图 1 (248,137) LDPC 码在各有限域上的误符号率
Fig. 1 Symbol error performance of (248,137) LDPC code over different finite fields

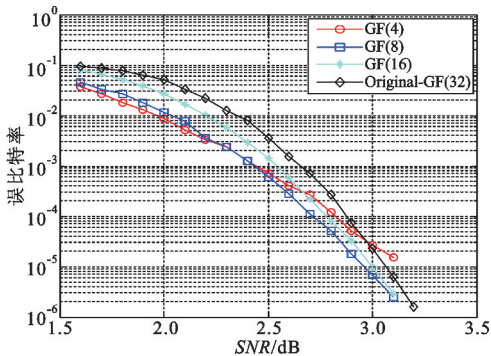


图 2 (248,137) LDPC 码在各有限域上的误比特率
Fig. 2 Bit error performance of (248,137) LDPC code over different finite fields

分析可知,在低信噪比时,通过文中提出的算法得到的具有低译码复杂度的 LDPC 码的性能均优于原有的 LDPC 码。随着信噪比的增加,4 元 LDPC 码的瀑布区表现不够明显,在低误码率时性能不如 GF(32) LDPC 码,但基于 GF(8) 与 GF(16) 的 LDPC 码均具有较好的误码性能。在误符号率为 10^{-5} 时,8 元 LDPC 码相比于原 LDPC 码约有 0.15 dB 的性能增益。

例 2:为分析算法对不同码率多元 LDPC 码的影响,设 $q_1=64, q_2=4, 8, 16$ 。取 $\gamma=4, \rho=16$ 构造基于 GF(64) 的 LDPC 码 C_0 ,码长 $n=1\,008$,码率 $R=0.765$ 。通过有限域映射关系构造基于 GF(4)、GF(8)、GF(16) 的 LDPC 码 C_1, C_2, C_3 ,其仿真性能如图 3 和图 4 所示。

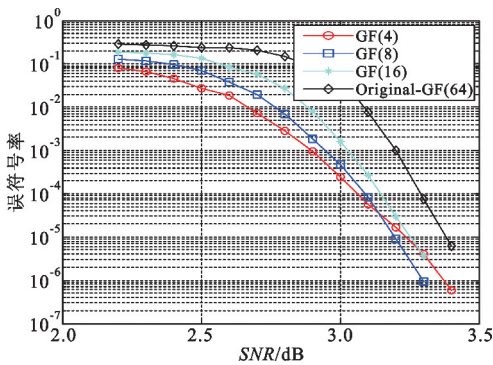


图 3 (1 008,771) LDPC 码在各有限域上的误符号率
Fig. 3 Symbol error performance of (1 008,771) LDPC code over different finite fields

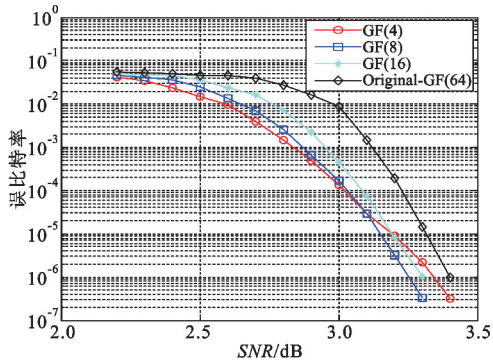


图 4 (1 008,771) LDPC 码在各有限域上的误比特率
Fig. 4 Bit error performance of (1 008,771) LDPC code over different finite fields

由图可知,在此码率下,8 元 LDPC 码的性能最好,具有较好的编译码性能和较低的误码平层;4 元 LDPC 码的瀑布区性能有所提升;经过映射变换的 3 种 LDPC 码的编译码性能均优于原 LDPC 码,且在低信噪比时性能提升较为明显;当误符号率为 10^{-5} 或误比特率为 10^{-6} 时均约有 0.2 dB 的性能增益,并且经过映射变换的多元 LDPC 码具有更低的译码复杂度。相比于例 1 的仿真结果可知,利用本文的方法构造出的高码率多元 LDPC 码表现更优秀。

5 结束语

本文提出了一种以降低多元 LDPC 译码复杂度为目的 LDPC 码构造方法,利用有限域映射关系,将高阶有限域元素投影到指定的目标域上来构造多元 LDPC 码,能有效降低多元 LDPC 码的译码复杂度。与目前已有的构造方法相比,本文提出的方法能够方便地将 LDPC 码从大域映射到指定的小域,但在结构上依旧满足准循环特性,可用简单的移位寄存器实现,节约硬件资源,因此具有一定的实用价值。仿真结果表明,本文所构造的多元 LDPC 码在中低

信噪比范围内具有更好的译码性能,当映射目标域的阶数大于 4 时,基本观察不到错误平层(在误比特率约为 10^{-6} 时)。下一步可在有限域的映射关系以及硬件实现架构等方面展开进一步的研究。

参考文献:

- [1] GALLAGER R G. Low-density parity-check codes[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(2): 21-28.
- [2] DAVEY M C, MACKAY D. Low-density parity check codes over $GF(q)$ [J]. IEEE Communications Letters, 1998, 2(6): 165-167.
- [3] MYUNG S, YANG K, KIM J. Quasicyclic LDPC codes for fast encoding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(8): 2894-2901.
- [4] PENG R H, CHEN R R. Design of non-binary quasi-cyclic LDPC cycle codes[C]//Proceedings of 2007 IEEE Information Theory Workshop. California: IEEE, 2007: 13-18.
- [5] LIN S, SONG S M, LAN L. Algebraic constructions of non-binary quasi-cyclic LDPC codes [C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems. Guilin: IEEE, 2006: 1303-1308.
- [6] ZHOU B, KANG J Y, HUANG Q, et al. High performance non-binary quasi-cyclic LDPC codes on Euclidean geometries[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(5): 1298-1311.
- [7] ZENG L Q, LAN L, TAI Y Y, et al. Construction of non-binary cyclic, quasi and regular LDPC codes: a finite geometry approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(3): 378-387.
- [8] SONG S M, ZHOU B, LIN S, et al. A unified approach to the construction of binary and non-binary quasi-cyclic LDPC codes based on finite fields[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(1): 84-93.
- [9] CHEN C, BAI B M. Construction of non-binary quasi-cyclic LDPC cycle codes based on singer perfect difference sets [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(2): 181-183.
- [10] JIANG X, LEE M H. Large girth non-binary LDPC codes based on finite fields and Euclidean geometries[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(6): 521-524.
- [11] JIANG X, LEE M H. Design of irregular quasi-cyclic LDPC codes based on euclidean geometries [C]//Proceedings of 2009 IEEE Fourth International Workshop on Signal Design and its Applications in Communications. Fukuoka, Japan: IEEE, 2009: 141-144.
- [12] 郑丹玲, 穆攀, 田凯, 等. 利用遗传算法构造 QC-LDPC 码[J]. 电讯技术, 2015, 55(4): 355-359.
ZHENG Danling, MU Pan, TIAN Kai, et al. Construction of QC-LDPC codes with genetic algorithm[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(4): 355-359. (in Chinese)
- [13] ZHANG L J, LI B, LUNG C L. Construction of Type-II QC

-LDPC codes based on perfect cyclic difference set[J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(1): 146-151.

- [14] 黄胜, 田凯, 何丽, 等. 光通信中一种准循环非二进制 LDPC 码的新颖构造方法[J]. 光电子·激光, 2014, 25(1): 56-60.
HUANG Sheng, TIAN Kai, HE Li, et al. A novel construction method of quasi-cyclic non-binary LDPC codes in optical communication[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(1): 56-60. (in Chinese)
- [15] CHEN H Q, LIU Y Y, QIN T F, et al. Construction of structured q-ary LDPC codes over small fields using sliding-window method[J]. Journal of Communications and Networks, 2014, 16(5): 479-484.
- [16] TANNER R, SRIDHARA D. LDPC block and convolutional codes based on circulant matrices[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 2966-2984.
- [17] ARABACI M, DJORDJEVIC B. High-rate nonbinary regular quasi cyclic LDPC codes for optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(23): 5261-5267.

作者简介:



洪冰清(1990—),女,河南永城人,现为广西大学硕士研究生,主要研究方向为卫星导航基带信号处理算法、编码理论;

HONG Bingqing was born in Yongcheng, Henan Province, in 1990. She is now a graduate student. Her research concerns baseband signal processing algorithm of satellite navigation and

coding theory.

Email: hongbingqing20@163.com

刘聪聪(1991—),男,河南开封人,硕士研究生;

LIU Congcong was born in Kaifeng, Henan Province, in 1991. He is now a graduate student.

Email: lcc1202@126.com

陈海强(1976—),男,广西苍梧人,2011 年于中山大学获博士学位,现为广西大学教授、硕士生导师,主要研究方向为编码理论和中继系统等;

CHEN Haiqiang was born in Cangwu, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region, in 1976. He received the Ph. D. degree from Sun Yat-sen University in 2011. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns coding theory and relay system.

Email: haiqiang@gxu.edu.cn

覃新贤(1963—),男,广西柳州人,教授、硕士生导师,主要研究方向为卫星导航基带信号处理算法、无线通信系统。

QIN Xinxian was born in Liuzhou, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region, in 1963. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns baseband signal processing algorithm of satellite navigation and wireless communications.

Email: xinxianqin@163.com