

基于节点子集和 k 阶信息截断的 多元 LDPC 译码算法

孙友明^{1,2,4}, 陈海强^{3,4}, 黎相成^{1,3,4}, 万海斌^{3,4}, 覃团发^{3,4}

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640; 2. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004;

3. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004;

4. 广西多媒体通信与网络技术重点实验室培育基地/广西高校多媒体通信与信息处理重点实验室, 广西南宁 530004)

摘 要: 本文提出一种低复杂度的多元 LDPC 译码算法, 从以下两个方面降低复杂度: (1) 提出一种节点截断策略, 构造处理/非处理校验节点子集, 使得一部分足够可靠的校验节点不进行信息更新, 从而减少运算量; (2) 针对处理校验节点子集, 本文进而提出一种 k 阶信息截断准则, 对 Trellis 图上的边和状态进行划分. 在迭代递归过程中, 只有“活”的状态/边才参与运算, 可进一步降低校验节点的计算量. 仿真表明, 本文算法的译码性能与现有的几种 EMS 改进算法非常接近; 在译码复杂度方面, 不管对高阶域还是低阶域的多元 LDPC 码, 本文算法的复杂度都是最小的.

关键词: 多元 LDPC 码; Trellis; 节点子集; 信息截断

中图分类号: TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)08-1925-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.08.017

Decoding Algorithm for Non-Binary LDPC Codes Based on Node-Subset and k -Order Message Truncation

SUN You-ming^{1,2,4}, CHEN Hai-qiang^{3,4}, LI Xiang-cheng^{1,3,4}, WAN Hai-bin^{3,4}, QIN Tuan-fa^{3,4}

(1. School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 3. School of Computer,

Electronics and Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Multimedia

Communication and Network Technology, Guangxi University Cultivating Base, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: This paper presents a low complexity non-binary LDPC decoding algorithm, whose complexity can be reduced in the following two ways. First, a new truncation scheme is presented to define the processing/non-processing check node subsets. The check nodes with relatively high reliability are not required to be processed, which can reduce the complexity. Second, for the check nodes in the processing subset, we further present a k -order message truncation for the states and branches of the check node Trellis. In the decoding iterations, only those “live” states/branches are involved in the message updating process, which can further reduce the computational loads at check nodes. Simulation results show that the presented algorithm performs very closely to several existing improved EMS decoding algorithms, but it has the lowest complexity when decoding the non-binary LDPC codes constructed both in low/high order fields.

Key words: non-binary LDPC codes; trellis; node subset; message-truncation

1 引言

多元 LDPC 码具有比二元 LDPC 码更优越的译码性能, 但直接使用 QSPA (Q-ary Sum-Product Algorithm) 算法^[1]进行译码的复杂度非常高. 为了降低其译码复

杂度, 2007 年, Declercq 等人提出了扩展最小和译码 (EMS, Extended Min-Sum) 算法^[2], 该算法可有效减少检验节点运算量. 随后, 该研究小组对 EMS 算法进行了改进^[3,4].

2012 年, Ma 等人基于 Trellis 图对 EMS 算法进行了

重现(称 M -EMS),同时提出两种改进算法,即 T -EMS 算法和 D -EMS 算法^[5],能有效地降低译码复杂度.在文献[5]中,作者设计了一种 D 截断准则,通过信息向量中的最大分量来构建截断门限,可归类为单阶信息截断准则.2013年,Zhao 等人提出了一种 μ 截断准则^[6],得到的算法称为 μ -EMS 算法. μ 截断准则利用了信息向量中的全部分量来构建截断门限,可看作是满阶信息截断,对于高阶域的 LDPC 码,可获得比单阶信息截断准则更高效的截断效果,复杂度更低.除了信息截断策略,构造节点非处理子集也是另外一种降低译码复杂度的技术手段.相关工作包括文献[7]的改进信息传递译码算法和文献[8]的比例逻辑译码算法等.

基于上述工作,本文提出一种低复杂度的多元 LDPC 译码算法,从以下两个方面降低译码复杂度:首先,根据节点截断准则对校验节点进行划分,得到处理和非处理校验节点子集.其次,针对处理节点子集,进一步提出了一种基于 Trellis 图的 k 阶信息截断准则,利用信息向量中的部分分量来构建截断门限,以此对参与运算的信息向量进行截断.在迭代过程中,只有“活”的状态/边才参与运算,可有效降低计算复杂度.仿真表明,相比于满阶截断和单阶截断的多元 LDPC 译码算法,本文算法在译码性能相当的前提下,具有更低的译码复杂度.此外,本文算法不管对低阶域还是高阶域的多元 LDPC 码都能有效译码.

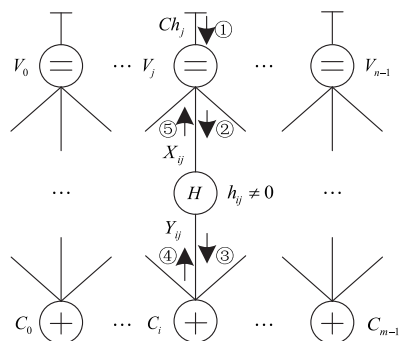


图1 多元LDPC码的Normal图

2 多元 LDPC 码的 Normal 图

有限域 F_q (其中 $q=2^t$ 是有限域的阶数, t 是域元素符号对应的二进制比特位数)上的多元 LDPC 码 $\zeta_q[n, k]$ 由其稀疏校验矩阵 $\mathbf{H} = [h_{ij}]_{m \times n}$ ($h_{ij} \in F_q$) 的零空间所定义,如果 $\mathbf{H} \cdot \bar{\mathbf{v}}^T = \bar{\mathbf{0}}$,则向量 $\bar{\mathbf{v}} = (v_0, v_1, \dots, v_{n-1}) \in F_q^n$ 构成一个合法码字.定义两个下标集, \mathbf{H} 第 i 行非零列集合 $N_i = \{j: 0 \leq j \leq n-1, h_{ij} \neq 0\}$, \mathbf{H} 第 j 列非零行集合 $M_j = \{i: 0 \leq i \leq m-1, h_{ij} \neq 0\}$.

给定一个校验矩阵 \mathbf{H} ,则它可以用如图 1 所示的 Normal 图^[9]来进行描述. Normal 图中的边代表随机变

量,节点代表某种约束,其中 Ch_j 是与信道相连的随机变量.它有三种类型的节点: \ominus 是变量节点 (V 节点),与 \mathbf{H} 中的列对应; \oplus 是校验节点 (C 节点)与 \mathbf{H} 中的行对应;当 $h_{ij} \neq 0$ 时,引入中间节点 ($\textcircled{1}$ 节点).

3 算法描述

考虑信息序列 $\bar{\mathbf{u}} = (u_0, u_1, \dots, u_{k-1}) \in F_q^k$, $\bar{\mathbf{u}}$ 经编码后,得到码字 $\bar{\mathbf{v}} = (v_0, v_1, \dots, v_{n-1}) \in F_q^n$.其中,有限域符号 v_j 可以用一个长度为 t 的二进制向量表示,即 $v_j = (v_j^{(0)}, v_j^{(1)}, \dots, v_j^{(t-1)}) \in F_2^t$.经调制后得到 $\bar{\mathbf{x}} = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$,其中 $x_j = (x_j^{(0)}, x_j^{(1)}, \dots, x_j^{(t-1)})$, $x_j^{(i)} = 1 - 2v_j^{(i)}$ (BPSK), $0 \leq i \leq t-1$.接收向量 $\bar{\mathbf{y}} = (y_0, y_1, \dots, y_{n-1})$, $y_j = (y_j^{(0)}, y_j^{(1)}, \dots, y_j^{(t-1)})$,其中, $y_j^{(i)} = x_j^{(i)} + w_j^{(i)}$, $w_j^{(i)} \sim N(0, \sigma^2)$, $0 \leq i \leq t-1$.

3.1 信息预处理

考虑 Normal 图上的两个通用节点 A 和 B ,其边对应离散随机变量 Z ,其概率质量函数用 $P_Z(z)$ 表示.通过线性变换,可以得到对数域上的信息度量 $L_Z(z) = [a_0 \log P_Z(z) + a_1]$, $z \in F_q$,其中 a_0, a_1 为常数,操作符 $[x]$ 返回一个离 x 最近的整数^[5].此外,用 $L_Z^{(A \rightarrow B)}(z)$ 表示从节点 A 传输到节点 B 的信息.

利用上述变换,我们可以将变量节点 V_j 的信息可靠度变成如下形式

$$R_{V_j}(z) = \frac{1}{t} \sum_{i=0}^{t-1} (y_j^{(i)} (1 - 2z^{(i)})), z \in F_q \quad (1)$$

其中, $z^{(i)}$ 是 z 的二进制向量中第 i 个比特位. $R_{V_j}(z)$ 量化后,得到整数信息可靠度 $L_{V_j}^{(-V_j)}(z)$,即来自信道的初始信息.本文采用与文献[5]相同的量化函数,如下:

$$L_{V_j}^{(-V_j)}(z) = \begin{cases} -(2^b - 1), & R_{V_j}(z)/\Delta \leq -(2^b - 1) \\ [R_{V_j}(z)/\Delta], & |R_{V_j}(z)/\Delta| < +(2^b - 1) \\ +(2^b - 1), & R_{V_j}(z)/\Delta \geq +(2^b - 1) \end{cases} \quad z \in F_q \quad (2)$$

其中, b 是量化比特数, Δ 是量化间隔.在量化过程中, $2^b \Delta$ 值应足够大,以确保原始接收信息更多地被包含进来.在此前提下,综合考虑系统的性能、复杂度和存储单元等因素来确定参数 b 和 Δ .

3.2 检验节点子集截断准则

设 $\{\hat{v}_j^{(l)} \mid \hat{v}_j^{(l)} \in F_q, j \in N_i\}$ 为第 l 次迭代与检验节点 i 相邻的变量节点判决码元集合,这些码元参与第 i 个校验和的计算

$$s_i^{(l)} = \sum_{j \in N_i} h_{ij} \cdot \hat{v}_j^{(l)} \quad (3)$$

在迭代的过程中,如果该检验不成功,则表明 $\{\hat{v}_j^{(l)} \mid j \in N_i\}$ 中一定存在着错误的码元符号,则下一次迭代时该校验节点需要进行更新.当检验成功时,存在两种

情况:

(1) $\{\hat{v}_j^{(l)} \mid j \in N_i\}$ 中所有的码元符号都正确;

(2) 存在至少两个以上的错误码元符号,正好使得校验和 $s_i^{(l)} = 0$. 对于前者,既然相应的码元符号已全部正确,所以在下一次迭代时,该检验节点可以不进行任何处理. 对于第二种情况,由于存在错误码元,该校验节点在下次迭代时需要更新.

然而,在实际译码中,当事件 $s_i^{(l)} = 0$ 发生时,并不清楚是情况 1 还是情况 2 发生. 基于此,本文给出一种基于码元可靠度的截断准则,对满足校验条件($s_i^{(l)} = 0$)的校验节点进行划分,构造出一个校验节点子集. 该子集的校验节点具有一个共性,即与其相邻的变量节点的可靠度足够大(对应判决码元的正确概率很高). 这时,我们能够以很高的概率判定是情况 1 发生. 因此,凡是进入该子集的校验节点都不进行信息处理,从而降低检验节点的计算量.

令 $f_j^{(l)}$ 表示第 l 次迭代时第 j 个变量节点的标记,如该变量节点的可靠度超过某个门限值 T_c ,则标记为 0;反之,标记为 1,即

$$f_j^{(l)} = \begin{cases} 0, & \max\{R_{V_j^{(l)}}(z)\} > T_c \\ 1, & \max\{R_{V_j^{(l)}}(z)\} \leq T_c, z \in F_q \end{cases} \quad (4)$$

其中, $0 \leq j \leq n-1$, 门限值 T_c 可用仿真的方法确定. 假设 F 为所有校验节点的集合,令 $F^{(l)} \subset F$ 为第 l 次迭代时需要处理的校验节点子集,其划分准则可定义如下

$$F^{(l)} \triangleq \{C_i \mid s_i^{(l)} \neq 0\} \cup \{C_i \mid (\sum_{j \in N_i} f_j^{(l)} \geq 2 \mid s_i^{(l)} = 0)\} \quad (5)$$

其中, $0 \leq i \leq m-1$. 由上式定义可见,该子集由两类校验节点组成:(1)所有校验不成功的;(2)校验成功,但参与该校验的变量节点中,至少有两个以上的可靠度值小于门限值 T_c (与情况 2 相对应,即有很大概率发生至少两个以上的错误码元). 令第 l 次迭代时不需要处理的校验节点子集为 $\bar{F}^{(l)}$,很明显,子集 $\bar{F}^{(l)}$ 就是子集 $F^{(l)}$ 对全集 F 的补集,即

$$\bar{F}^{(l)} = F - F^{(l)} \quad (6)$$

在译码过程中,选择合适的门限值,可使得在性能损失不明显情况下,有更多不需处理的校验节点进入子集 $\bar{F}^{(l)}$,从而降低计算复杂度.

3.3 k 阶信息截断准则

对于进入子集 $F^{(l)}$ 的校验节点,本文将给出一个基于 k 阶的信息截断准则,可有效降低 Trellis 图上参与运算的状态/边的个数. 目前,基于 Trellis 图进行信息截断主要存在两种准则,即单阶截断准则^[5]和满阶截断准则^[6].

实际上, Trellis 图上参与运算的向量中,只有可靠

度靠前的有限个元素对当前码元判决起主要作用,其它小可靠度元素判决为当前码元的概率非常小,当它们参与到门限截断计算时,甚至会起到负面作用.

令 $L_Z(z) = [L_Z^1(z), L_Z^2(z), \dots, L_Z^q(z)]$, $z \in F_q$ 表示一个按降序排列的信息可靠度向量. 给定一个整数 $1 \leq k \leq q$, 本文的 k 阶信息截断准则定义如下

$$F_k = \left\{ z \in F_q \mid L_Z(z) \geq T_k, T_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k L_Z^i(z) - a_k \right\} \quad (7)$$

其中, $L_Z^i(z)$ 为信息可靠度向量中第 i 个值, a_k 是一个待定的补偿常数. a_k 和门限值 T_c 都会影响一次迭代的复杂度,本文主要通过仿真的方法,在性能损失不明显情况下,以复杂度比率为优化目标进行选择. 此外,截断门限 T_k 由向量中前 k 个最大分量值的算术平均值确定,可看作是有限阶的信息截断. 根据该准则,有限域上 q 个元素被划分为集合 $F_q - F_k$ 和 F_k . 与文献[5]类似,向量 $L_Z(z)$ 还需要进一步处理,得到其对应的截断信息 $\bar{L}_Z(z)$, 即

$$\bar{L}_Z(z) = \begin{cases} L_Z(z) - L_0, & \text{当 } z \in F_k \\ -\infty, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $L_0 = \min_{z \in F_k} L_Z(z)$ 是集合 F_k 中的最小值. 经截断处理后, Trellis 上某个状态的可靠度值不等于 $-\infty$, 称为“活”状态;可靠度不等于 $-\infty$ 且与“活”状态相连的边,称为“活”边. 在迭代递归计算中,只有那些“活”的状态/边才参与运算,因此计算复杂度将从 $O(q^2)$ 降低到 $O(|F_k|^2)$.

值得指出的是,当阶数 $k=1$ 时,本文的截断准则类似于文献[5]中的单阶截断;当 $k=q$ 时,类似于文献[6]中的满阶截断. 因此,本文提出的截断准则具有更好的普适性,可根据 LDPC 码的构造域选取不同的截断阶数 k . 此外,在论文的仿真实验中发现,一般在 $k \leq 3$ 时即可获得很好的截断效果(在性能损失不明显前提下, $|F_k|$ 足够小). 在这种情况下,截断过程也避免了对 $L_Z(z)$ 的排序操作.

3.4 算法实现

本文基于 Normal 图对译码算法进行描述,主要包括变量节点、校验节点和 H 节点之间进行信息传递和处理等步骤.

(1) 变量节点的信息处理

对 $0 \leq j \leq n-1$, 在第 l 次迭代时,变量节点 V_j 接收从其相邻的中间节点 H_{ij} 传来的信息 $L_{X_i}^{(H_{ij} \rightarrow V_j)}(x)$, 按照下面规则进行更新

$$L_{V_j}(x) = L_{V_j}^{(\leftarrow V_j)}(x) + \sum_{i \in M_j} L_{X_i}^{(H_{ij} \rightarrow V_j)}(x), x \in F_q \quad (9)$$

其中, $L_{X_i}^{(H_{ij} \rightarrow V_j)}(x)$ 初始化为 0. 对变量节点 V_j 进行硬判决

$$\hat{v}_j^{(l)} = \arg \max_{x \in F_q} L_{V_j}(x) \quad (10)$$

从变量节点 V_j 传递到中间节点 H_j 的外信息 $L_{X_j}^{(V_j \rightarrow H_j)}(x)$ 计算如下

$$L_{X_j}^{(V_j \rightarrow H_j)}(x) = L_{V_j}(x) - L_{X_j}^{(H_j \rightarrow V_j)}(x), x \in F_q \quad (11)$$

(2) 校验节点的信息处理

对 $0 \leq i \leq m-1$, 在第 l 次迭代时, 首先基于本文提出的检验节点截断准则构造子集 $F^{(l)}$ 和 $\bar{F}^{(l)}$. 其中, 对进入 $\bar{F}^{(l)}$ 的校验节点不做任何处理; 对于进入 $F^{(l)}$ 的校验节点, 将基于式(7)和(8)所定义的 k 阶准则进行信息截断处理, 将 Trellis 上的状态和边进行划分. 更新时, 我们按照文献[5]的递归算法对校验节点 C_i 传递到中间 H_j 节点的外信息 $L_{Y_j}^{(C_i \rightarrow H_j)}$ 进行计算, 其中涉及到的修正系数 ξ 可通过仿真得到.

(3) H 节点处理

中间节点 H_j 传递到校验节点 C_i 的信息 $L_{Y_j}^{(H_j \rightarrow C_i)}$ 按照下面规则进行置换

$$L_{Y_j}^{(H_j \rightarrow C_i)}(y) = L_{X_j}^{(V_j \rightarrow H_j)}(h_{ij}^{-1}y), y \in F_q \quad (12)$$

中间节点 H_j 传递到变量节点 V_j 的信息 $L_{X_j}^{(H_j \rightarrow V_j)}(x)$ 按照下面规则进行置换

$$L_{X_j}^{(H_j \rightarrow V_j)}(x) = L_{Y_j}^{(C_i \rightarrow H_j)}(h_{ij}x), x \in F_q \quad (13)$$

各节点边上传递的信息如图 1 中的 ① ~ ⑤ 所示. 基于上述的信息处理步骤, 本文算法可描述如下.

算法 1 基于校验节点子集和 k 阶信息截断的多元 LDPC 译码算法

输入: 接收值 \bar{y} , 量化参数 b, Δ , 最大迭代次数 I_{\max} , 截断门限 T_c , 阶数 k , 常数 a_k 和修正系数 ξ ;

初始化: 根据式(1)和(2), 计算初始信道信息 $L_{V_j}^{(\rightarrow V_j)}(z)$; 设置循环迭代次数变量 $l=0$;

译码迭代: 当 $l < I_{\max}$ 时, 执行以下步骤:

步骤 1: 对 $0 \leq j \leq n-1$, 根据式(10)执行硬判决得到 $\hat{b}_j^{(l)}$;

步骤 2: 根据式(3)计算 $\bar{s}^{(l)}$, 如果 $\bar{s}^{(l)} = (s_0^{(l)}, s_1^{(l)}, \dots, s_{m-1}^{(l)}) = \bar{\mathbf{0}}$, 退出迭代;

步骤 3: H 节点根据式(12)进行信息置换, 得到 $L_{Y_j}^{(H_j \rightarrow C_i)}(y)$;

步骤 4: 根据式(5)构造检验节点子集 $F^{(l)}$, 对 $C_i \in F^{(l)}$, 根据式(7)和(8)进行信息截断, 计算外信息 $L_{Y_j}^{(C_i \rightarrow H_j)}$;

步骤 5: H 节点根据式(13)进行信息置换, 得到 $L_{X_j}^{(H_j \rightarrow V_j)}(x)$;

步骤 6: 对 $0 \leq j \leq n-1$, 根据式(9)更新变量点信息 $L_{V_j}(x)$;

步骤 7: 令 l 步进一个单位;

输出: 迭代过程结束, 输出译码结果 \bar{v} .

4 复杂度和译码性能分析

4.1 复杂度比率

在译码迭代过程中, 子集 $\bar{F}^{(l)}$ 中的校验节点不需要信息更新, 对进入子集 $F^{(l)}$ 的检验节点, 只有 Trellis 图的“活”的状态/边才参与运算. 由于子集 $\bar{F}^{(l)}$ 的阶和 Trellis 图上的“活”状态/边的个数都会随着迭代发生变化. 同时, 算法采用不同的策略也会影响到译码收敛速

度. 因此, 本文算法的复杂度是动态的, 需要从统计平均意义上对算法复杂度进行分析. 我们采用与文献[5,6]中类似的复杂度比率的方法来对本文算法的复杂度进行分析.

在具体分析时, 考虑到“活”边始终和“活”状态相连, 因此我们只需要统计“活”边个数. 令 E_{Alg} 表示给定算法平均每帧“活”边个数, E_{QSPA} 表示 QSPA 算法平均每帧“活”边个数, 则复杂度比率 ρ 可定义为

$$\rho = \frac{E_{\text{Alg}}}{E_{\text{QSPA}}} \quad (14)$$

4.2 译码性能

为了方便和本算法进行对比, 本文同时给出了 QSPA 算法以及文献[5,6]中几种 EMS 改进算法的性能和复杂度. 译码算法使用的参数含义如下: 对 M -EMS 算法, 选取信息向量前面最大值的个数为 M ; 对于 T -EMS 算法, 其状态/边的截断参数分别用 T_s 和 T_b 表示; 对于 D -EMS 算法, 其状态/边的截断参数分别用 D_s 和 D_b 表示; 对 μ -EMS 算法, 补偿常数用 c 表示, 所涉及到的修正系数都用 ξ 表示. 实验 1 和实验 2 中各算法的量化参数 $\Delta = 1/64$, $b = 8$, 最大迭代次数设为 50 次.

实验 1 考虑用有限域方法构造的 F_{16} 上的 (225, 173) 准循环多元 LDPC 码^[10]. 本文算法的信息修正系数 $\xi = 0.6$, 门限常数 $T_c = 70$, 阶数 $k = 2$, 补偿常数 $a_k = 20$.

图 2 给出了各种算法的 BER/FER 译码性能. 从图可以看出, 本文算法的译码性能与 QSPA 算法以及其它几种 EMS 改进算法^[5,6] 非常接近. 各种译码算法的平均译码复杂度如图 3 所示. 由图可见, 本文算法的译码复杂度明显小于 QSPA 算法; 而与其它几种 EMS 改进算法对比, 其译码复杂度也是最低的. 注意到, 本例的多元 LDPC 码构造在较低阶的有限域 F_{16} 上, 在这种场景下, 基于满阶截断准则 (μ -EMS) 的译码复杂度高于单阶

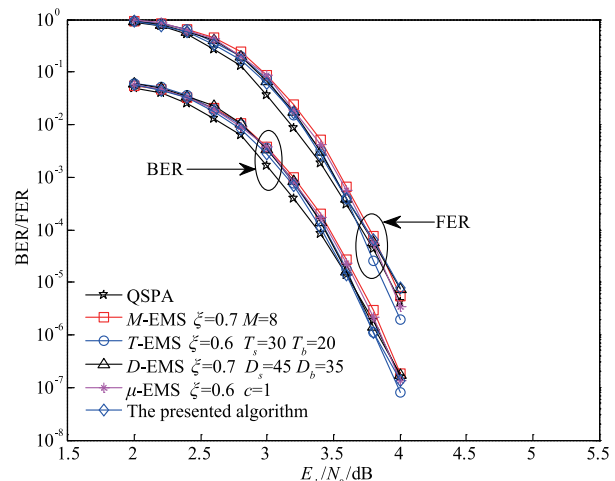


图2 F_{16} 上(225,173)准循环多元LDPC码的译码性能

(D -EMS) 和本文算法使用的 k 阶截断准则.

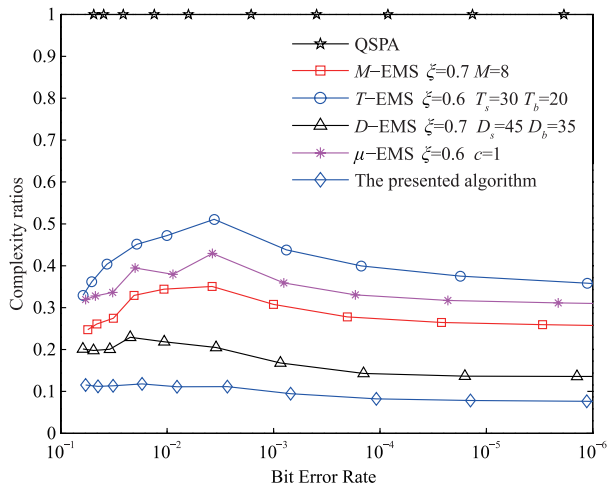


图3 F_{16} 上(225,173)准循环多元LDPC码的译码复杂度

实验 2 考虑基于 PEG 方法构造的 F_{256} 上的 (106, 53) 多元 LDPC 码^[11]. 本文算法的信息修正系数 $\xi = 0.9$, 门限常数 $T_c = 100$, 参数 $k = 3$, 补偿常数 $a_k = 40$.

图 4 和图 5 分别给出了各种算法的 BER/FER 译码性能和平均译码复杂度. 类似地, 本文算法的译码性能与 QSPA 算法以及其它几种 EMS 改进算法^[5,6] 相当; 而在复杂度方面, 本文算法仍然是最低的. 此外, 与实验 1 不一样, 这里使用了构造在较高阶有限域 F_{256} 上的多元 LDPC 码.

需要指出的是, 以上仿真采用了 BPSK 调制. 实际上, 本文算法也可以扩展到其它调制方式, 如 MPSK, MQAM 等, 其实验结论是相类似的.

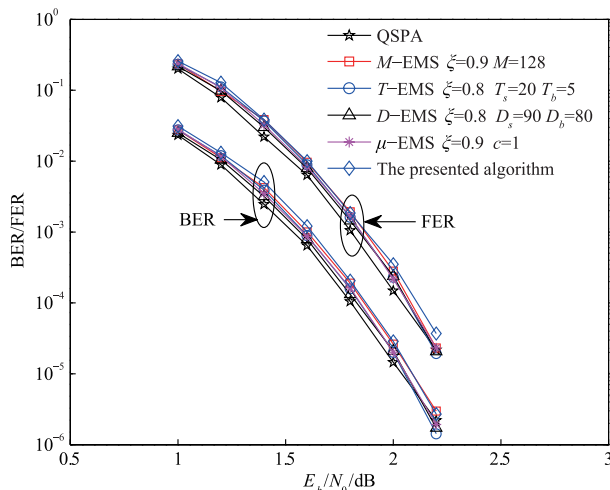


图4 F_{256} 上(106,53)多元LDPC码的译码性能

5 结束语

多元 LDPC 码的译码复杂度主要产生在校验节点, 本文基于节点子集和 k 阶信息截断两种策略, 提出一种

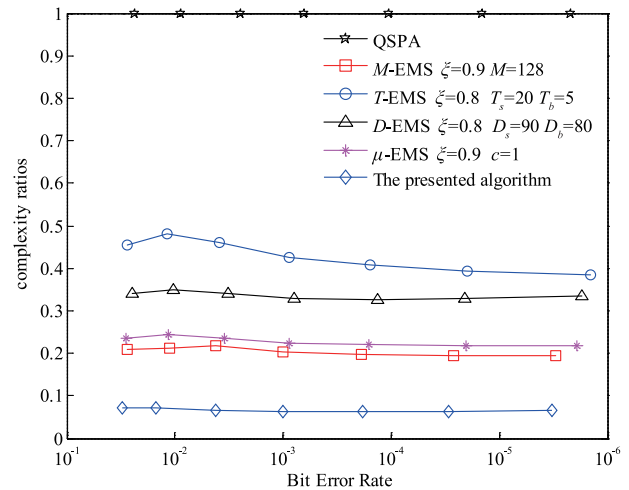


图5 F_{256} 上(106,53)多元LDPC码的译码复杂度

能有效降低校验节点运算操作的译码算法. 实验结果显示, 在译码性能方面, 本文算法与现有的几种 EMS 译码算法非常接近. 在译码复杂度方面, 不管对高阶域还是低阶域的多元 LDPC 码, 本文算法的复杂度比率都是最小的. 此外, 针对构造在其它有限域阶上的多元 LDPC 码, 我们只需改变 k 值, 即可方便地在复杂度和性能之间进行有效折中.

参考文献

- [1] Davey M C, MacKay D. Low-density parity check codes over GF (q) [J]. IEEE Communications Letters, 1998, 2 (6): 165 - 167.
- [2] Declercq D, Fossorier M. Decoding algorithms for nonbinary LDPC codes over GF (q) [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55 (4): 633 - 643.
- [3] Li E, Declercq D, Gunnam K. Trellis-based extended min-sum algorithm for non-binary LDPC codes and its hardware structure [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61 (7): 2600 - 2611.
- [4] Lacruz J, Garcia-Herrero F, Valls J, Declercq D. One minimum only trellis decoder for non-binary low-density parity-check codes [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2015, 62 (1): 177 - 184.
- [5] Ma X, Zhang K, Chen H, Bai B. Low complexity X-EMS algorithms for nonbinary LDPC codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60 (1): 9 - 13.
- [6] Zhao S, Lu Z, Ma X, Bai B. A variant of the EMS decoding algorithm for nonbinary LDPC codes [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17 (8): 1640 - 1643.
- [7] Han G, Guan Y, Huang X. Check node reliability-based scheduling for BP decoding of non-binary LDPC codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61 (3): 877 - 885.

- [8] Sun Y, Chen H, Li X, Luo L, Qin T. Reliability-based iterative proportionality-logic decoding of LDPC codes with adaptive decision[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2015, 17(3): 213 – 220.
- [9] Forney Jr G D. Codes on graphs: normal realizations[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 520 – 548.
- [10] Zeng L, Lan L, Tai Y, Song S, Lin S, Abdel-Ghaffar K. Constructions of nonbinary quasi-cyclic LDPC codes: A finite field approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2008, 56(4): 545 – 554.
- [11] Hu X, Eleftheriou E, Arnold D. Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(1): 386 – 398.

作者简介



孙友明 男, 1975 年出生于湖南隆回, 华南理工大学博士研究生, 广西大学物理科学与工程技术学院讲师, 主要研究方向为编译码理论等。
E-mail: ymsun@gxu.edu.cn



覃团发(通信作者) 男, 1966 年出生于广西宾阳, 广西大学计算机与电子信息学院副院长、教授、博士生导师, 主要研究方向为多媒体通信、无线传感器网络等。
E-mail: tfqin@gxu.edu.cn