

9-23-2022

## Relative-Residual-Based Dynamic Schedule for Decoding of LDPC Codes

Fatang Chen

*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China,, 2080963980@qq.com*

Hebin Li

*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China,, 1511090958@qq.com*

Zhihao Zhang

*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

Zhiqiang Mei

*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Relative-Residual-Based Dynamic Schedule for Decoding of LDPC Codes

### Abstract

**Abstract:** In order to solve the problems of the oscillation phenomenon and greedy characteristics in the dynamic scheduling decoding algorithm for low-density parity-check (LDPC) codes, the relative-residual-based dynamic schedule (RRB-BP) algorithm is proposed based on variable-to-check residual belief propagation (VC-RBP) algorithm. *The variable nodes are grouped, then the relative residual value of the message passed by the variable nodes to the check node is taken as a reference, and the node with the largest relative residual value is updated in priority to accelerate the decoding convergence speed. For variable nodes oscillating in the decoding process, the posterior LLR (log likelihood ratio) message values before and after updating are processed with weighted average to improve the reliability of oscillating nodes. In the process of algorithm iteration, the relative residual value of messages transmitted from variable node to check node is attenuated to alleviate the greedy characteristic of decoding algorithm.* The simulation results show that compared with the VC-RBP algorithm, the decoding performance gain of the proposed algorithm is 0.3~0.4 dB when the bit error rate is  $10^{-5}$ , and the convergence speed is faster.

### Keywords

LDPC(low-density parity-check) code, dynamic scheduling, oscillation phenomenon, greedy characteristics, relative-residual

### Recommended Citation

Fatang Chen, Hebin Li, Zhihao Zhang, Zhiqiang Mei. Relative-Residual-Based Dynamic Schedule for Decoding of LDPC Codes[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 1968-1975.

# 基于相对残差的 LDPC 码动态调度译码算法

陈发堂, 李贺宾\*, 张志豪, 梅志强

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

**摘要:** 针对低密度奇偶校验码的动态调度译码算法中存在的震荡现象和贪婪特性问题, 在基于变量节点消息残差置信传播算法的基础上, 提出一种基于相对残差调度的置信传播算法。对变量节点进行分组, 以变量节点向校验节点传递消息的相对残差值作为参考, 优先更新相对残差值最大的节点, 加快译码收敛速度。对于译码过程中震荡的变量节点, 对其更新前后的后验 LLR(log likelihood ratio) 消息值做加权平均处理, 提高震荡节点的可靠度。在算法迭代的过程中对变量节点向校验节点传递消息的相对残差值作衰减处理, 缓解译码算法的贪婪特性。仿真结果表明: 与 VC-RBP 算法相比, 在误比特率为  $10^{-5}$  时所提算法译码性能可以获得 0.3~0.4 dB 的增益, 同时拥有更快的收敛速度。

**关键词:** 低密度奇偶校验码; 动态调度; 震荡现象; 贪婪特性; 相对残差

中图分类号: TP911.22; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2022) 09-1968-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0385

## Relative-Residual-Based Dynamic Schedule for Decoding of LDPC Codes

Chen Fatang, Li Hebin\*, Zhang Zhihao, Mei Zhiqiang

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of the oscillation phenomenon and greedy characteristics in the dynamic scheduling decoding algorithm for low-density parity-check (LDPC) codes, the relative-residual-based dynamic schedule (RRB-BP) algorithm is proposed based on variable-to-check residual belief propagation (VC-RBP) algorithm. The variable nodes are grouped, then the relative residual value of the message passed by the variable nodes to the check node is taken as a reference, and the node with the largest relative residual value is updated in priority to accelerate the decoding convergence speed. For variable nodes oscillating in the decoding process, the posterior LLR (log likelihood ratio) message values before and after updating are processed with weighted average to improve the reliability of oscillating nodes. In the process of algorithm iteration, the relative residual value of messages transmitted from variable node to check node is attenuated to alleviate the greedy characteristic of decoding algorithm. The simulation results show that compared with the VC-RBP algorithm, the decoding performance gain of the proposed algorithm is 0.3~0.4 dB when the bit error rate is  $10^{-5}$ , and the convergence speed is faster.

**Keywords:** LDPC(low-density parity-check) code; dynamic scheduling; oscillation phenomenon; greedy characteristics; relative-residual

## 引言

低密度奇偶校验 (low-density parity-check,

LDPC)码是一种纠错性能优异的线性分组码<sup>[1]</sup>, 具有译码复杂度低、可并行实现、使用灵活、误码平

收稿日期: 2021-04-30

修回日期: 2021-08-16

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX03001021-004)

第一作者: 陈发堂(1965-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为移动通信物理层算法仿真及软件开发。E-mail: 2080963980@qq.com

通讯作者: 李贺宾(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为主要研究方向 5G 系统 LDPC 码的译码算法及 DSP 实现。E-mail: 1511090958@qq.com

层低等优点, 已经被多种通信标准采用<sup>[2-3]</sup>。

1995 年, MacKay 和 Neal 提出将 LDPC 码与置信传播(belief propagation, BP)的迭代译码相结合<sup>[4]</sup>, 发现 LDPC 码具有逼近 Shannon 限的高性能。BP 译码算法中, 将所有校验节点消息和变量节点消息并行传播, 称为泛洪或并行(flooding)调度<sup>[5]</sup>。为了加快译码算法的收敛速度, 文献[6]提出残差置信传播(residual belief propagation, RBP)动态调度译码算法, 优先更新残差最大的节点信息, 大大提高了译码算法的收敛性能。文献[7]提出基于变量节点消息残差的置信传播(variable-to-check residual belief propagation, VC-RBP)算法, 该算法根据变量节点消息残差值确定优先更新的节点, 虽然提高了译码性能, 但没有考虑动态调度译码算法中存在的贪婪特性问题和震荡现象, 译码性能有待进一步提高。文献[8]在 VC-RBP 算法的基础上提出基于可靠性的分层置信传播(reliability-based-layered belief propagation, RBL-BP)算法, 以从信道获取的对数似然比信息的绝对值进行分层动态调度译码, 相比 VC-RBP 算法拥有更低的复杂度和更好的译码性能。文献[9]提出基于可靠性度量的残差置信传播(reliability metric-based residual belief propagation, RM-RBP)算法, 通过提出的可靠性度量标准筛选出优先更新的节点, 虽然提高了译码性能, 但也增加了复杂度。

针对以上问题, 在 VC-RBP 算法的基础上提出了基于相对残差调度的置信传播(relative-residual-based belief propagation, RRB-BP)算法。该算法首先根据变量节点后验 LLR 消息的可靠度对变量节点进行分组, 再选择相对残差值最大的节点优先更新。对于震荡的变量节点, 将其更新前后的变量节点消息值做加权平均处理, 提高该变量节点的可靠度。在译码迭代的过程中, 对变量节点消息的相对残差值做衰减处理, 降低算法的贪婪特性。

## 1 BP 算法和 VC-RBP 算法

长度为  $N$  的正则 LDPC 码, 对应的  $M \times N$  校验

矩阵  $A=[A_{mn}]$  中每一列中元素“1”的数量固定为  $j$ , 每一行中元素“1”的数量固定为  $k$ , 其中  $M=N-k$ , 这样的 LDPC 码可以使用  $(N, j, k)$  表示。图 1 为  $(10, 2, 4)$  LDPC 码对应的 Tanner 图<sup>[10]</sup>, 在 LDPC 码的 Tanner 图中,  $v_n$  代表第一类元素, 对应于编码符号的  $N$  个变量节点;  $c_m$  代表第二类元素, 对应于校验矩阵  $A$  中的  $M$  个校验节点;  $M(n)=\{m:A_{mn}=1\}$  表示与第  $n$  个变量节点  $v_n$  相连的校验节点的集合;  $N(m)=\{n:A_{mn}=1\}$  表示与第  $m$  个校验节点  $c_m$  相连的变量节点的集合;  $M(n)\setminus m$  表示除校验节点  $v_n$  外与变量节点  $c_m$  相连的校验节点的集合;  $M(m)\setminus n$  表示除变量节点  $v_n$  外与校验节点  $c_m$  相连的变量节点的集合;  $L_{m \rightarrow n}$  表示校验节点  $c_m$  传递给变量节点  $v_n$  的 C2V(check-to-variable)消息;  $Z_{n \rightarrow m}$  表示变量节点  $v_n$  传递给校验节点  $c_m$  的 V2C(variable-to-check)消息。

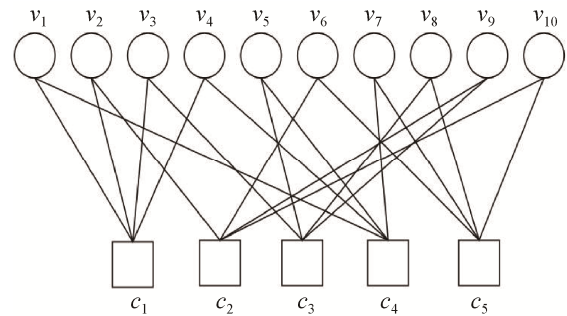


图 1  $(10,2,4)$  LDPC 码对应的 Tanner 图  
Fig. 1 Tanner graph of  $(10,2,4)$  LDPC codes

码字  $c=\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  为传输之前的码字, 经过  $t_n=2c_n-1$  编码后, 得到编码后的序列  $t=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。通过加性高斯白噪声(additive white gaussian noise, AWGN)信道后, 接收到的序列为  $r=\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ , 其中  $r_n=t_n+n_n$ ,  $n_n$  为均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声。

### 1.1 BP 算法

BP 算法是一种迭代算法, 通过对变量节点和校验节点之间传递的信息进行迭代处理, 不断提高译码的可靠度。译码过程可以总结为以下过程:

#### (1) 初始化

设置译码过程的最大迭代次数  $I_{\max}$ , 变量节点

消息的初始值初始化为从信道接收到的概率似然比消息  $l_n$ ，校验节点的消息全部初始化为 0。其中  $l_n$  为

$$l_n = \frac{2}{\sigma^2} r_n \quad (1)$$

(2) 迭代过程

步骤 1: 校验节点更新(C2V)

$$L_{m \rightarrow n}(x_n) = \left( \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sgn}(Z_{n' \rightarrow m}(x_{n'})) \right) \cdot 2 \operatorname{artanh} \left( \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \tanh \left( \frac{|Z_{n' \rightarrow m}(x_{n'})|}{2} \right) \right) \quad (2)$$

步骤 2: 变量节点更新(V2C)

$$Z_{n \rightarrow m}(x_n) = l_n + \sum_{m' \in M(n) \setminus m} L_{m' \rightarrow n}(x_n) \quad (3)$$

步骤 3: 硬判决

计算每个变量节点的判决信息:

$$Z(x_n) = l_n + \sum_{m \in M(n)} L_{m \rightarrow n}(x_n) \quad (4)$$

判决规则:

$$\hat{x}_n = \begin{cases} 0, & Z(x_n) \geq 0 \\ 1, & Z(x_n) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

(3) 终止条件

如果  $A\hat{x}^T = 0$  或者达到最大迭代次数，则译码算法终止并输出译码结果；否则继续从步骤 1 开始迭代。

## 1.2 VC-RBP 算法

BP 算法中，Tanner 图中的每个节点只有接收完所有与其相邻的节点传递的消息后才能生成新的消息。在动态调度译码算法中，节点消息是根据它们的译码的贡献度来决定更新顺序的，节点从其相邻的任何一个节点接收到消息后就能生成新的消息，并且具有最大贡献度的节点消息被优先传播，最新更新的外部消息可以被充分利用，拥有更好的收敛性能。VC-RBP 算法是一种优先更新 V2C 消息残差值最大节点消息的动态调度(informed dynamic scheduling, IDS)算法，V2C 消息残差是当前要传播的  $Z_{n \rightarrow m}^{\text{new}}$  消息值与上次传播的  $Z_{m \rightarrow n}^{\text{old}}$  消息值差的绝对值:

$$r(Z_{n \rightarrow m}) = \left\| Z_{n \rightarrow m}^{\text{new}} - Z_{n \rightarrow m}^{\text{old}} \right\| \quad (6)$$

VC-RBP 算法在初始化的过程中首先将所有 C2V 消息初始化为  $L_{m \rightarrow n} = 0 (m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N)$ ，然后将所有的 V2C 消息初始化为从信道接收到的概率似然比消息  $Z_{n \rightarrow m} = l_n (m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N)$ 。首先根据式(3)可以计算出 V2C 消息  $Z_{n \rightarrow m}^{\text{new}}$ ，再根据式(6)可以计算得到残差集合  $R$ 。动态调度的过程中: ①从集合  $R$  中选择残差最大的 V2C 消息即  $Z_{n \rightarrow m}^{\text{max}}$  并且将  $r(Z_{n \rightarrow m}^{\text{max}})$  置为 0; ②更新校验节点  $c_m^{\text{max}}$  和变量节点  $v_a \in N(c_m^{\text{max}}) \setminus v_n^{\text{max}}$  的 C2V 消息，然后更新变量节点  $v_a$  和校验节点  $c_b \in N(v_a) \setminus c_m^{\text{max}}$  的 V2C 消息并计算残差  $r(Z_{a \rightarrow b})$  和更新残差集合  $R$ ; ③残差集合  $R$  中再次选择残差最大的 V2C 消息用于下一次更新，直至达到算法终止条件。

## 2 RRB-BP 算法

VC-RBP 算法是一种优先更新 V2C 消息残差值最大节点消息的动态调度算法，虽然加快了算法的译码速度，提高了译码性能，但 VC-RBP 算法存在严重的贪婪特性问题，造成计算资源的浪费，并且在译码的过程中，没有对震荡节点做有效的处理。本论文在 VC-RBP 算法的基础上提出 RRB-BP 算法，分别通过相对残差处理、优先级处理、震荡节点处理和贪婪特性处理提高译码算法的译码性能。

### 2.1 相对残差处理

动态调度译码算法的中心思想是在 BP 算法的基础上有序的更新节点信息，BP 算法的特点如下:

(1) 在 BP 译码算法中，部分变量节点经过几次迭代后就会收敛。

(2) 如果在迭代过程中节点信息更新前后数值基本保持不变，说明该节点信息已经收敛。

(3) 如果在迭代过程中节点信息更新前后数值变化很大，说明该节点未收敛。

动态调度译码算法通过设置可靠性指标筛选

出稳定性最差的节点优先更新, 提高译码算法的收敛特性, 因此使用不同的可靠性指标对算法的译码性能影响很大。在 VC-RBP 算法中使用 V2C 消息更新前后的残差作为指标, 优先更新 V2C 消息残差值最大的节点信息。为了进一步提高指标的可靠性, RRB-BP 算法使用 V2C 消息相对残差作为可靠性指标, V2C 消息相对残差定义为

$$r(Z_{n \rightarrow m}) = \left\| \frac{Z_{n \rightarrow m}^{\text{new}} - Z_{n \rightarrow m}^{\text{old}}}{Z_{n \rightarrow m}^{\text{old}}} \right\| \quad (7)$$

## 2.2 优先级处理

在 RRB-BP 算法中, 按照 V2C 消息相对残差值的大小进行优先级排序, 优先更新 V2C 消息相对残差值最大的节点信息。但是仅仅依靠相对残差值的大小进行优先级排序是不全面的, 还需更加准确的对 V2C 消息进行优先级排序, 使稳定性最差 V2C 消息拥有最高的优先级。将变量节点分为 3 种类型, 集合  $N_1$  中的变量节点满足  $|m_i^{\text{new}}| \geq |m_i^{\text{old}}|$  且  $m_i^{\text{new}}$  和  $m_i^{\text{old}}$  符号不同; 集合  $N_2$  中的变量节点满足  $|m_i^{\text{new}}| < |m_i^{\text{old}}|$  且  $m_i^{\text{new}}$  和  $m_i^{\text{old}}$  符号不同; 集合  $M$  中的变量节点满足  $m_i^{\text{new}}$  和  $m_i^{\text{old}}$  符号相同。其中  $m_i^{\text{new}}$  为变量节点更新后的后验 LLR 消息,  $m_i^{\text{old}}$  为变量节点更新前的后验 LLR 消息。最后按照以下规则进行优先级排序:

(1) 如果变量节点集合  $N_1$  不为空集, 优先更新  $N_1$  中 V2C 消息相对残差值最大的节点消息。

(2) 如果变量节点集合  $N_1$  为空集,  $N_2$  不为空集, 则优先更新  $N_2$  中 V2C 消息相对残差值最大的节点消息。

(3) 如果变量节点集合  $N_1$  和  $N_2$  都为空集, 则优先更新  $M$  中 V2C 消息相对残差值最大的节点消息。

## 2.3 震荡节点处理

在译码算法迭代的过程中, 节点消息值在更新前后发生大幅度变化的现象称为震荡现象<sup>[11]</sup>。由式(3)变量节点更新和式(4)变量节点判决消息可以推出:

$$Z(x_n) = \left( \sum_{m \in M(n)} Z_{n \rightarrow m}(x_n) - l_n \right) / (d_v - 1) \quad (8)$$

式中:  $d_v$  为变量节点的度。

由式(8)可以译码判决消息与变量节点消息存在直接关系, 当变量节点的消息值出现震荡时, 会直接影响到最终的译码结果。图 2 所示为码长为 1056 bit、码率为 0.5、信噪比为 1.2 dB、最大迭代次数是 50 的 QC-LDPC 码在译码过程中震荡节点消息所占比值。从图 2 中可以明显看出译码成功与译码失败时, 震荡节点所占比值明显不同, 当译码成功时震荡节点所占比值随着迭代次数的增加而减小, 译码失败时情况与之相反。因此, 需要对译码过程中出现的震荡节点进行额外处理。

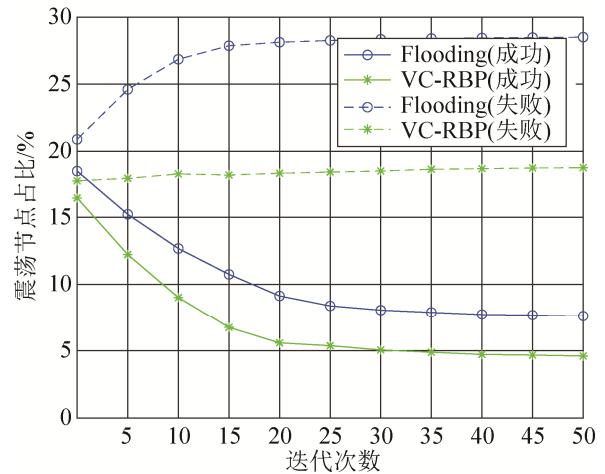


图 2 译码成功与译码失败震荡节点占比  
Fig. 2 Proportion of oscillating nodes for successful decoding and failed decoding

震荡现象会影响译码算法的译码性能, 只是简单的优先更新这类震荡节点的消息, 并不能完全消除震荡现象对译码算法产生的影响, 因此需要对震荡节点消息进行额外的处理。虽然震荡节点的消息更新前后发生了很大的变化, 但是更新前后的 2 个消息值必定有一个是向正确消息收敛的, 由此可以提出以下处理方式:

$$Z_{n \rightarrow m}(x_n) = \frac{Z_{n \rightarrow m}^{\text{new}}(x_n) + Z_{n \rightarrow m}^{\text{old}}(x_n)}{2} \quad (9)$$

式中:  $Z_{n \rightarrow m}^{\text{new}}(x_n)$  为第  $n$  个变量节点更新后的 V2C 消息;  $Z_{n \rightarrow m}^{\text{old}}(x_n)$  为第  $n$  个变量节点更新前的 V2C

消息。当变量节点消息震荡时，没有办法确定哪个消息是正确的，使用 2 个消息的均值  $Z_{n \rightarrow m}(x_n)$  可以降低节点更新前后消息变化的幅度，随着译码算法的不断迭代，最终会向正确消息收敛。图 3 为震荡处理前后震荡节点占比情况。从图 3 可以看出，本文提出的震荡处理方式可以明显降低译码过程中震荡节点的数目。

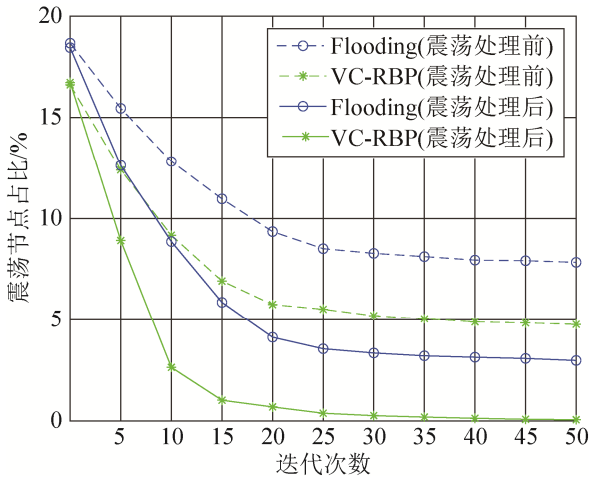


图3 震荡处理前后震荡节点占比

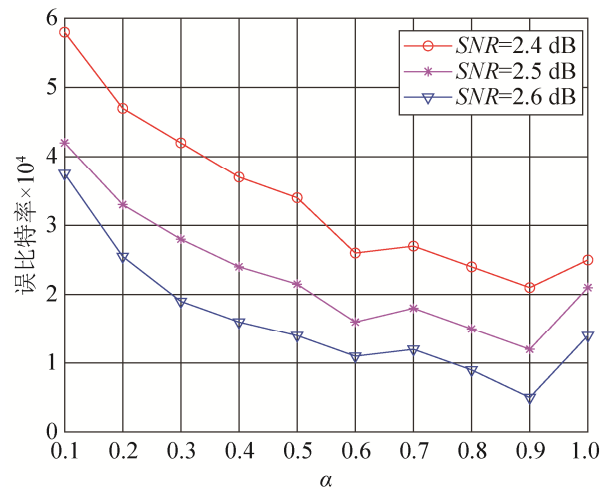
Fig. 3 Percentage of oscillating nodes before and after oscillating processing

## 2.4 贪婪性处理

当接收到的码字有错误时，使用动态调度算法进行译码，会导致 Tanner 图中小部分边和节点的消息被重复更新，而其它节点没有或很少有机会将它们的信息贡献出来，这种特性被称为贪婪特性。为了缓解动态调度译码算法的贪婪特性，在迭代的过程中，随着 V2C 消息被优先更新次数的增加，其所对应的相对残差值逐渐衰减。将变量  $n_{n \rightarrow m}$  作为计数变量记录 V2C 消息优先更新的次数，该计数变量在迭代前被初始化为 0，消息  $Z_{n \rightarrow m}$  每被选择一次，对应的  $n_{n \rightarrow m} = n_{n \rightarrow m} + 1$ 。随着  $n_{n \rightarrow m}$  的增大，V2C 消息相对残差值衰减的越大，意味着已经被优先选择多次的 V2C 消息将不会再次选中用于优先更新，Tanner 图中小部分边和节点消耗大量译码资源的贪婪问题将得到缓解。V2C 消息  $Z_{n \rightarrow m}$  的相对剩余残差为

$$R'(Z_{n \rightarrow m}) = \alpha^{n_{n \rightarrow m}} \left\| \frac{Z_{n \rightarrow m}^{\text{new}} - Z_{n \rightarrow m}^{\text{old}}}{Z_{n \rightarrow m}^{\text{old}}} \right\| \quad (10)$$

式中： $\alpha$  为调节因子，取值范围为  $0 < \alpha < 1$ 。所提出的衰减机制应该有效控制相对残差，防止译码资源被小部分 Tanner 图中的边和节点过度占用以减缓 VC-RBP 算法的贪婪性，确保实现更好的误码性能。但是所提出的衰减机制也需要保留译码算法的部分自主贪婪性，确保在最初几次迭代期间的收敛速度不会明显降低。如果  $\alpha$  的值过小接近于 0，V2C 消息的相对残差值将被过度衰减；如果  $\alpha$  的值过大接近于 1，所提出的衰减机制将失去意义。因此， $\alpha$  是对 RRB-BP 算法译码性能有重要影响的关键参数，通过 Monte-Carlo 仿真筛选出最优的  $\alpha$  值。对于码长为 1056 bit、码率为 0.5、最大迭代次数为 50 的 QC-LDPC<sup>[2]</sup> 码，在信噪比 SNR 为 2.4~2.6 dB 的情况下，不同  $\alpha$  值条件下的误码性能如图 4 所示。从仿真结果可以看出当  $\alpha=0.9$  时，RRB-BP 算法误码性能最好。

图4 不同  $\alpha$  值条件下误码性能比较Fig. 4 BER performance comparison of different  $\alpha$ 

在 RRB-BP 算法中，当 C2V 消息更新次数达到 Tanner 图中边的总数  $E$  时，即为完成一次迭代。在每次更新的开始，根据设置的优先级顺序筛选出最不可靠的 V2C 消息  $Z_{n \rightarrow m}^{\text{max}}$  并且将  $R'(Z_{n \rightarrow m}^{\text{max}})$  置为 0，然后更新校验节点  $c_m^{\text{max}}$  和变量节点  $v_a \in N(c_m^{\text{max}}) \setminus v_n^{\text{max}}$  的 C2V 消息，最后更新变量节点  $v_a$

和校验节点  $c_b \in N(v_a) \setminus c_m^{\max}$  的 V2C 消息并计算相对残差值  $R'(Z_{a \rightarrow b})$  和更新相对残差集合。在更新完节点消息后判断变量节点  $v_n$  是否需要震荡处理, 而且在迭代的过程中使用计数变量  $e$  记录译码过程中 C2V 消息更新的次数,  $e$  的值在开始时被初始化为 0, 在迭代的过程中有 C2V 消息更新, 计数变量  $e=e+1$ 。当  $e$  的值等于  $E$  时, 就意味着一次迭代完成。  $e$  的值和  $n_{m \rightarrow n}(m=1,2,\dots,M, n=1,2,\dots,N)$  的值都被重置为 0, 用于记录迭代次数的变量  $i=i+1$ 。

RRB-BP 算法流程如下:

- 1:初始化所有  $L_{m \rightarrow n}=0, Z_{n \rightarrow m}=I_n$  and  $I_{\max}$
- 2:设置  $\{n_{m \rightarrow n}=0, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N\}, e=0$
- 3:for  $m=1:M$
- 4:   for  $v_a \in N(c_m)$
- 5:     使用式(3)计算  $Z_{a \rightarrow m}(x_a)$
- 6:   end for
- 7:end for
- 8:for  $n=1:N$
- 9:   使用式(4)计算  $Z(x_n)$
- 10:end for
- 11:寻找优先级最高的  $Z_{n \rightarrow m}$
- 12:  $n_{n \rightarrow m}=n_{n \rightarrow m}+1$  and  $R'(Z_{n \rightarrow m})=0$
- 13:for  $v_b \in N(c_m) \setminus v_n$
- 14:   使用式(2)计算  $L_{m \rightarrow b}$  and  $e=e+1$
- 15:   for  $c_b \in N(v_a) \setminus c_m$
- 16:     使用式(3)计算  $Z_{a \rightarrow b}$
- 17:     判断是否需要震荡处理
- 18:     使用式(10)计算  $R'(Z_{a \rightarrow b})$
- 19:   end for
- 20:end for
- 21:使用式(4)计算  $Z(x_n)$
- 22:if  $e=E$
- 23:重置  $n_{m \rightarrow n}, e=0, i=i+1$
- 24:end if
- 25:if  $A\hat{x}^T \neq \mathbf{0}$  or  $i \neq I_{\max}$
- 26:   跳转至 11
- 27:end if

### 3 仿真结果与比较

#### 3.1 RRB-BP 算法性能仿真

本次仿真过程使用 5G NR 标准中的 QC-LDPC 码, 并在 MATLAB 平台通过模拟加性高斯白噪声信道, 使用二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK) 调制方式进行传输。通过大量的仿真对所提出的 RRB-BP 算法性能进行评估, 并将它与 Flooding、VC-RBP、RBL-BP、RM-RBP 译码算法的性能进行比较分析。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters	
参数	取值
码长/bit	1 056
码率	0.5
最大迭代次数	50
调节因子 $\alpha$	0.9

图 5 为 Flooding、VC-RBP、RBL-BP、RM-RBP、RRB-BP 五种不同译码算法的误码性能比较, 图 6 为在信噪比为 2.6 dB 情况下五种译码算法在不同迭代次数下误码性能比较。

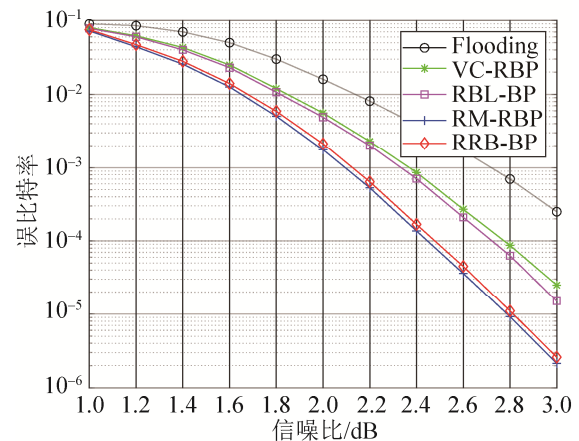


图 5 不同算法的误比特率

Fig. 5 BER of different algorithms

从图 5, 6 可以看出, Flooding 算法的译码性能和收敛性能最差, 而 RM-RBP 算法拥有更好的误码性能和收敛性能, 所提出的 RRB-BP 算法与其



性能非常接近,相比于同种类型的 RBL-BP 算法和 VC-RBP 算法性能有很大的提升,表明提出的动态调度策略很好的缓解 VC-RBP 算法存在的贪婪特性和震荡现象。在误比特率为  $10^{-5}$  时,RRB-BP 算法与 VC-RBP 算法相比可以获得 0.3~0.4 dB 的增益。由于 RRB-BP 算法削弱了震荡现象对译码算法的影响,且通过提出的衰减机制在迭代的过程中对 V2C 消息相对残差值进行衰减,有效地缓解了算法的贪婪特性,从而提高 RRB-BP 算法的译码性能。

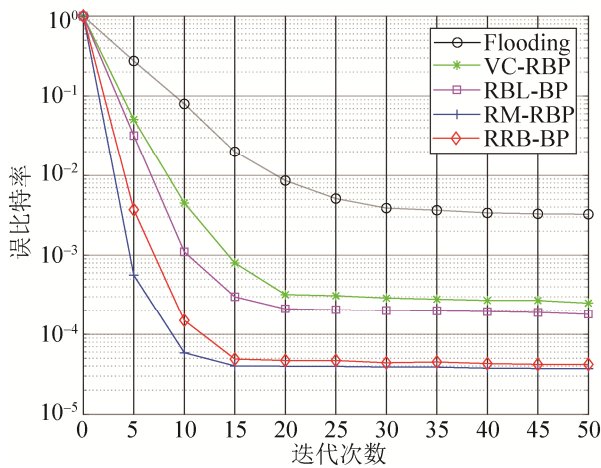


图6 不同迭代次数下误比特率  
Fig. 6 BER of different iteration times

### 3.2 复杂度分析

图7为五种译码算法在不同信噪比下的平均最大迭代次数,表2为五种译码算法在一次迭代中的计算复杂度,包括C2V消息更新的次数,V2C消息更新的次数,残差计算所需的运算次数以及实值比较所需运算的次数。其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整操作, $M$ 为校验节点的个数, $N$ 为变量节点的个数, $E$ 为Tanner图中边的总数, $\bar{d}_c$ 和 $\bar{d}_v$ 分别表示每个校验节点和每个变量节点平均的度。

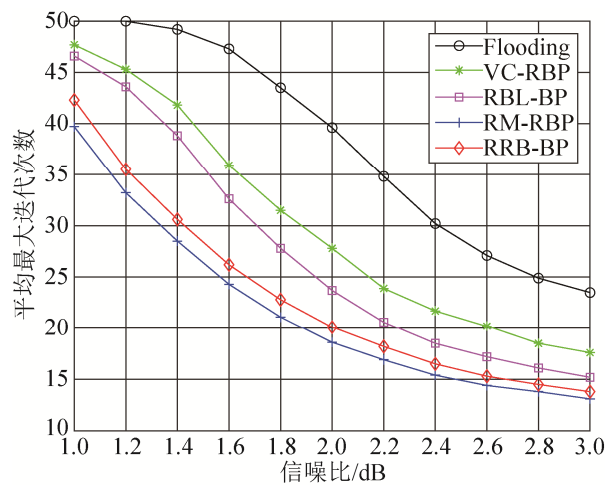


图7 不同算法的平均最大迭代次数  
Fig. 7 Average maximum number of iterations of different algorithms

表2 计算复杂度比较

Table 2 Computational complexity comparison

算法	C2V 更新	V2C 更新	残差计算	实值比较
Flooding	$E$	$E$	0	0
VC-RBP	$E$	$\lceil E / (\bar{d}_c - 1) \rceil (\bar{d}_c - 1)(\bar{d}_v - 1)$	0	$M(E - 1)$
RBL-BP	$E$	$\leq \lceil E / (\bar{d}_c - 1) \rceil (\bar{d}_c - 1)(\bar{d}_v - 1)$	0	$N$
RM-RBP	$E \cdot \bar{d}_c$	$E$	$E \cdot \bar{d}_c$	$E(\bar{d}_c - 1)$
RRB-BP	$E \cdot \bar{d}_c$	$E$	0	$N(N - 1)$

从图7和表2可以看出,Flooding算法译码复杂度最低,但译码性能最差。RM-RBP算法在拥有最优的译码性能的同时也拥有最大的译码复杂度,而所提出的RRB-BP算法相较于RM-RBP算法拥有更低的复杂度并且译码性能接近于RM-RBP算法。虽然VC-RBP算法和RBL-RB算法与RM-RBP算法相比在每次迭代中拥有更低的复杂度,但

RRB-BP算法的平均最大迭代次数显著降低。总体上来说,RRB-BP算法在以更低的复杂度下,拥有更好的译码性能。

## 4 结论

为了提高VC-RBP算法的译码性能,在VC-RBP算法的基础上提出了一种基于相对残差

的动态调度译码算法。首先根据可靠度对变量节点进行分组, 然后筛选出与优先级最高的 V2C 消息相关联的节点优先更新, 并且对于震荡的变量节点做加权均值处理来削弱震荡, 在迭代的过程中, 利用衰减机制处理 V2C 消息相对残差值, 来缓解译码算法的贪婪特性。仿真结果表明, 在增加了少量计算量的情况下, 与 VC-RBP 算法相比, RRB-BP 算法能够削弱变量节点震荡现象和减缓动态调度译码算法的贪婪特性, 进而有效地提高算法的误码性能和收敛性能。仿真结果表明所提算法有效且优于已有算法, 但所提算法增加了译码过程中计算复杂度, 下一步将对所提出的衰减机制和震荡节点处理方法进行进一步优化。

### 参考文献:

- [1] Medova L R, Rybin P S, Sidorenko I E. On the Performance Slope of Short LDPC Codes[C]// 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Brno, Czech Republic: IEEE, 2020: 67-72.
- [2] Wu H, Wang H. A High Throughput Implementation of QC-LDPC Codes for 5G NR[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2019, 7: 185373-185384.
- [3] Nguyen D T, Park Y. Performance Improvement of Optical Satellite Communications by Interleaved IEEE 802.11 LDPC[C]// 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Prague, Czech Republic: IEEE, 2018: 575-579.
- [4] David J C. Near Shannon Limit Performance of Low Density Parity Check Codes[J]. Electronics Letters (S1350-911X), 1996, 32(18): 1645-1646.
- [5] Nimara S. Reliability Assessment of Flooded Min-Sum LDPC Decoders Based on Sub-Threshold Processing Units[C]// 2019 22nd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD). Kallithea, Chalkidiki: IEEE, 2019: 620-623.
- [6] Vila Casado A I, Griot M, Wesel R D. Informed Dynamic Scheduling for Belief-Propagation Decoding of LDPC Codes[C]// 2007 IEEE International Conference on Communications. Glasgow: IEEE, 2007: 932-937.
- [7] Kim J H, Nam M Y, Song H Y. Variable-to-Check Residual Belief Propagation for LDPC Codes[J]. Electronics Letters (S1350-911X), 2009, 45(2): 117-118.
- [8] Sun R, Hou X, Sun J. Reliability-Based-Layered Belief Propagation for Iterative Decoding of LDPC Codes[C]// 2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Vail, CO, USA: IEEE, 2018: 1156-1160.
- [9] Liu X, Zi L, Yang D. Improved Decoding Algorithms of LDPC Codes Based on Reliability Metrics of Variable Nodes[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2019, 7: 35769-35778.
- [10] Gholami M, Nassaj A. LDPC Codes Based on Mobius Transformations[J]. IET Communications (S1751-8628), 2019, 13(11): 1615-1624.
- [11] Liu X, Yang G, Chen X. Variable-Node-Based Belief-Propagation Decoding with Message Pre-Processing for NAND Flash Memory[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2019, 7: 58638-58653.