

基于可靠性调度的 LDPC 码比特翻转译码算法

张 旋 李晓强 燕 莎
(西安理工大学 西安 710082)

摘 要 低密度校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码的迭代译码算法中,变量节点与校验节点之间的消息传递采用泛洪调度策略,文中提出了一种基于可靠性调度策略的比特翻转译码算法,根据信道初始软信息将变量节点分为可靠节点与不可靠节点,在迭代译码过程中阻止不可靠节点的消息传递。仿真结果表明,与现有的比特翻转译码算法相比,在加性高斯白噪声信道下,所提算法以较低的复杂度代价获得了误码率性能的有效提升。
关键词 低密度奇偶校验码,比特翻转译码,泛洪调度
中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Reliability-based Scheduling for Bit-flipping Decoding Algorithm of LDPC Codes
ZHANG Xuan LI Xiao-qiang YAN Sha
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710082, China)

Abstract In the iterative decoding algorithm of LDPC codes, flood scheduling strategy is adopted for message passing between variable nodes and check nodes. This paper proposes a bit-flipping decoding algorithm based on reliability scheduling. According to the soft information, the variable nodes are divided into reliable nodes and unreliable nodes, and prevent the transmission of unreliable nodes during iterative decoding. Simulation results show that the proposed algorithm achieves better BER performance than the bit-flipping decoding algorithm with lower complexity cost over the additive white Gaussian noise channel.
Keywords Low-density parity-check codes, Bit-flipping decoding, Flood scheduling

1 引言

低密度校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码是一种能逼近香农限的渐进好码^[1],由于其校验矩阵稀疏、结构灵活、译码复杂度低,在深空通信和无线通信等领域已被广泛应用^[2-4],它良好的应用前景使其已经成为信道编码领域研究的热点之一。

LDPC 码的译码算法主要包括:1)基于软判决的迭代译码是以置信传播(Belief Propagation, BP)译码算法为基础,该类算法在译码过程中传送消息的概率消息^[5]。BP 译码算法可以使 LDPC 码的性能得以逼近香农限,但是在译码过程中涉及较多实数运算,译码复杂度较高,其实用性受到制约。2)硬判决译码算法,该算法在译码过程中传送的消息是 0 或 1 的比特值,通过统计每个变量节点相关联校验方程的失败个数来决定翻转的比特,并进行译码。硬判决译码算法只涉及逻辑运算,简单快速且易于硬件实现,但是纠错性能相对不足。

本文通过调整消息调度策略改善比特翻转译码算法的译码性能,提出了一种基于可靠性调度的比特翻转(Reliability-

based Schedule for Bit-Flipping, RBSBF)译码算法,在没有增加算法复杂性的前提下,根据变量节点的可靠性改变了消息的调度方法,进而提高了算法的译码性能。

2 LDPC 码比特翻转译码算法

2.1 基本定义

二元 LDPC 码 (n, k) ,码长为 n ,校验位为 $n-k$, H 为 $m \times n$ 校验矩阵,将 H 中第 j 行中所有“1”的位置表示为 $A(j) = \{i; h_{ij} = 1\}$,即参与第 j 个校验方程计算的所有变量节点的位置,第 i 列中所有“1”的位置表示为 $B(i) = \{j; h_{ij} = 1\}$,即校验第 i 个变量节点的所有校验节点。码字序列 $c = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$,经过 BPSK 调制之后可以得到 $u = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$, $u_i = 1 - 2c_i$, u 经过加性高斯白噪声信道之后得到接收码字序列 $y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$, $y_i = (1 - 2c_i) + v_i$,其中 v_i 是均值为 0,功率谱密度为 $N_0/2$ (即方差 $\sigma^2 = N_0/2$)的高斯白噪声。根据硬判决规则, $z_i = (1 - \text{sgn}(y_i))/2$,可以得到输出序列 $z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\}$ 。伴随式表示为 $s = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_m\} = Hz^T$,译码算法本质可以理解为寻找满足伴随式 $s=0$ 的估计码字序列。

本文受国家自然科学基金(61271004)资助。

张 旋(1980—),男,硕士,讲师,主要研究方向为差错控制编码技术、大数据系统中数据的可靠性技术,E-mail:zhangyic2014@163.com(通信作者);李晓强(1980—),男,硕士生,主要研究方向为差错控制编码技术、大数据系统中数据的可靠性技术;燕 莎(1975—),女,硕士,副教授,主要研究方向为计算机网络与差错控制编码技术、大数据系统中数据的可靠性技术。

2.2 LDPC 码比特翻转译码算法

比特翻转译码算法是基于 LDPC 码的硬判决译码算法，它具有译码时间复杂度低、比软判决译码速度快的优点。BF 译码算法每轮迭代需要计算校验节点的校验和 s_m ，之后分别统计每个变量节点对应的校验方程不满足约束条件的数量（见算法 1）。翻转比特的依据是翻转所有不满足校验方程数量多的比特，翻转函数值通过式(1)计算，每轮迭代只翻转 E_n 最大的比特。

$$E_n = \sum_{m \in B(n)} (2s_m - 1)$$

(1)

算法 1 比特翻转译码算法

输入:接收序列 y

输出:译码输出结果 z

```
1. procedure Decode  $y$ 
2. for  $n=1:N$  do //硬判决
3.  $z_n = \begin{cases} 1, & y_n > 0 \\ 0, & y_n \leq 0 \end{cases}$ 
4. end for
5.  $I=0$ 
6. repeat
7. for  $m=1:M$  do //计算校验和
8.  $s_m = \sum_{n \in A(m)} z_n h_{mn}$ 
9. end for
10. if  $S=0$  or  $I=I_{\max}$  then
11. Finished//译码结束
12. else
13. for  $n=1:N$  do //计算翻转函数
14.  $E_n = \sum_{m \in B(n)} (1-2s_m)$ 
15. end for
16. for  $n=\operatorname{argmax}_{n \in [1,N]} E_n$  do
17.  $z_n = (z_n + 1) \bmod 2$ 
18. end for
19.  $I=I+1$  //增加迭代次数
20. end if
21. until Finished
22. end procedure
```

3 可靠性调度的比特翻转译码算法

在 LDPC 码软判决迭代译码过程中通常采用泛洪的消息调度策略,即所有变量在节点将来自信道的信道初始 y 消息和校验节点的可靠度信息一次性全部传递给与其相邻的校验节点;校验节点收到消息并更新处理之后,无选择的一次性传递给与其相邻的变量节点,即泛洪策略。

基于可靠性调度的比特翻转译码算法是一种采用可靠性调度策略的比特翻转译码硬判决算法,根据信道初始软信息 y ,将变量节点划分为可靠性节点和不可靠节点,然后以特定顺序选择性传递消息。算法基本思想如下:

(1)根据可靠性阈值 α ,将变量节点划分为可靠变量节点与不可靠变量节点,可靠性阈值 $\alpha=\beta\sigma$,其中 β 为可靠度阈值参数。

(2)算法在第一次调度之前需要区分变量节点是否可靠,

只有可靠的变量节点才能参与校验方程计算,以有效阻止不可靠消息的传递,从而在第一次迭代中纠正大量错误。

RBSBF 译码算法的具体步骤如算法 2 所示。首先将变量节点的初始信道软信息幅度 $|y_i|$ 与可靠度阈值 $\alpha=\beta\sigma$ (σ 为方差)进行比较,判定变量节点是否可靠。如果 $|y_i| \geq \alpha$,则变量节点 i 可靠;否则,变量节点 i 不可靠。相比于 BF 译码算法,RBSBF 译码算法可以有效阻止不可靠消息的传递,从而避免比特误翻转。

算法 2 基于变量节点可靠性调度的比特翻转算法

```
1. procedure Decode( $z$ )
2.  $I=0$ 
3. for  $n=1:N$  do //判断可靠或不可靠节点
4. if  $|y_n| \geq \beta\sigma$  then
5.  $r_n=1$ 
6. end if
7. end for
8. repeat
9. if  $I=0$  then
10. for  $m=1:M$  do
11. for  $n \in A(m)$  do
12. if  $r_n=1$  then
13.  $s_m += z_n h_{mn}$ 
14. end if
15. end for
16. end for
17. else
18. for  $m=1:M$  do
19.  $s_m = \sum_{n \in A(m)} z_n h_{mn}$ 
20. end for
21. end if
22. if  $S=0$  or  $I=I_{\max}$  then
23. Finished //译码结束
24. else
25. for  $n=1:N$  do
26.  $E_n = \sum_{m \in B(n)} s_m$  //校验和
27. end for
28. for  $n=\operatorname{argmax}_{n \in [1,N]} E_n$  do
29.  $z_n = (z_n + 1) \bmod 2$  //翻转比特
30. end for
31.  $I=I+1$ 
32. end if
33. until Finished
34. end procedure
```

4 仿真实验及分析

为了对比 RBSBF 译码算法和 BF 译码算法的译码性能,选取码率为 0.5 的规则 PEG-LDPC 码(1008,504) C_1 和规则 PEG-LDPC 码(504,252) C_2 进行性能仿真^[6],可靠度阈值参数 β 取 0.4,迭代次数为 100,每个不同信噪比下译 100 000 帧码字,收集错误数据。

在 AWGN 信道下对 C_1 和 C_2 进行性能仿真,图 1 中的两

条曲线分别代表 BF 译码算法和 RBSBF 译码算法的比特错误率(Bit Error Rate,BER)。与 BF 译码算法相比,RBSBF 译码算法的译码性能有了一定的提升。当 BER 为 10^{-5} 时,与 BF 译码算法相比,执行 RBSBF 译码算法的 C_1 和 C_2 分别获得 0.5 dB 和 0.7 dB 的增益,同时译码算法的复杂性并未增加。这是因为根据变量节点的可靠性改变了消息的调度方式,抑制了不可靠消息的传递,进而使 RBSBF 译码算法的译码性能更加有效。

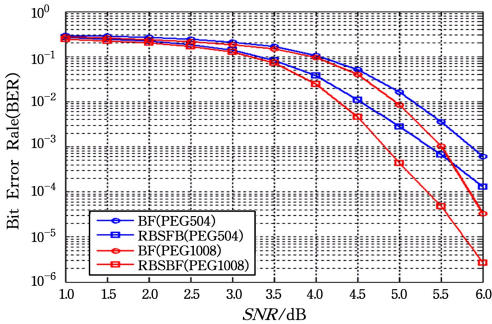


图 1 BF 和 RBSBF 译码算法的译码性能

结束语 在深入分析 BF 译码算法泛洪调度策略的基础上,提出了一种基于可靠性调度的比特翻转译码算法,根据初始信道软信息将变量节点分为可靠节点与不可靠节点,在迭代译码过程中阻止不可靠节点的消息传递。仿真结果表明,与现有的比特翻转译码算法相比,在加性高斯白噪声信道下,

本文算法以较低的复杂度代价获得了误码率性能的有效提升。

参 考 文 献

[1] GER R G. Low-Density Parity-Check Codes[D]. Cambridge, Massachusetts:Massachusetts Institute of Technology,1963.

[2] LIVA G,PAOLINI E,COLA T D,et al. Codes on High-order Fields for the CCSDS next Generation Uplink[C]// Proceeding of 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC). Baiona, Spain; IEEE Press,2012:44-48.

[3] ZHANG J,YANG Y,GAO Z,et al. Performance Analysis of LDPC Codes for Wireless Optical Communication Systems in Different Seawater Environments[C]// Proceeding of 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Hangzhou, China;IEEE,2018:575-579.

[4] MORELLO A,MIGNONE V. DVB-S2: The Second Generation Standard for Satellite Broad-Band Services[J]. Proceedings of the IEEE,2006,94(1):210-227.

[5] KOU Y,LIN S,FOSSORIER M P C. Low-density parity-check codes based on finite geometries;a rediscovery and new results [J]. IEEE Transactions on Information Theory,2001,47(7):2711-2736.

[6] DAVID J C. Encyclopedia of sparse graph codes [EB/OL]. <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/codes/data.html>.

[7] LI Y,PAN D. OpenFlowbased load balancing for fat-tree networks with multipath support[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). New York: IEEE Press,2013:1-5.

[8] PANG J,XU G,FU X. SDN-based data center networking with collaboration of multipath TCP and segment routing[J]. IEEE Access,2017,5:9764-9773.

[9] VEISLLARI R,STOL N,BJORNSTAD S,et al. Scalability analysis of SDN-controlled optical ring MAN with hybrid traffic [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). New York: IEEE Press,2014:3283-3288.

[10] CZIVA R,JOUEËT S,STAPLETON D,et al. SDN-based virtual machine management for cloud data centers [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management,2016,13(2):212-225.

[11] ZHANG P,CHEN X,GE Y,et al. A parallel processing and synthesis structure for improving access security and efficiency in SDN environment[J]. Chinese Journal of Electronics,2016,25(5):817-823.

[12] WANG Y C,YOU S Y. An efficient route management framework for load balance and overhead reduction in SDN-based data center networks [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management,2018,15(4):1422-1434.

[13] POLVERINI M,CIANFRANI A,LISTANTI M. The power of SDN to improve the estimation of the ISP traffic matrix through the flow spread concept[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2016,34(6):1904-1913.

[14] AKHTAR A M,WANG X,HANZO L. Synergistic spectrum sharing in 5G HetNets;a harmonized SDN-enabled approach [J]. IEEE Communications Magazine,2016,54(1):40-47.

[15] WANG T,LIU F,XU H. An efficient online algorithm for dynamic SDN controller assignment in data center networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2017,25(5):2788-2801.

[16] ZHANG H,GUO X. SDN-based load balancing strategy for server cluster[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems. New York: IEEE Press,2016:662-667.