

引用格式: 梁艳. 改进的物理层控制信道极化码译码算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(2): 47-51. [LIANG Y. The improved polar decoder method of physical downlink control channel[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(2): 47-51.]

改进的物理层控制信道极化码译码算法研究

梁 艳

(上海建桥学院 机电学院, 上海 201306)

摘 要: 为了提高物理层下行控制信道(Physical Downlink control channel PDCCH)极化码译码的吞吐率,降低复杂度,减少第五代无线通信终端的设计面积,本文提出了一种适用于半导体芯片设计的极化码译码算法。鉴于 PDCCH 携带的控制信息需要盲解的特性,本文采用分布式循环冗余校验辅助串行抵消表的方法研究了 PDCCH 的 Polar 译码过程。通过路径排序和分布式 CRC 校验比特早停功能,对路径进行优化选择,简化了 Polar 译码的复杂度;提出并行模块组的改进译码方法减小了芯片设计面积。仿真结果表明该方法不仅降低了复杂度,而且保证了译码性能。

关键词: 物理层下行控制信道;极化码;分布式循环冗余校验辅助串行抵消表;路径度量;早停

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)02-0047-05

The improved polar decoder method of physical downlink control channel

LIANG Yan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Jian Qiao University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To enhance the throughput of Physical Downlink control channel (PDCCH) Polar decoded and to reduce the complexity of the 5th wireless communication terminal equipment, this paper proposes a Polar decoder algorithm suitable for semiconductor chip design. In view of the characteristics of PDCCH, the decoding of PDCCH Polar is studied by using the method of CRC-Aided successive cancellation method. Polar decoding complexity was simplified by optimizing the path selection through path sorting and distributed CRC early stop function. And the throughput is enhanced by using the method of paralleled processing for chip design. Simulation results show that this method not only reduces the complexity, but also guarantees the decoding performance.

Key words: physical downlink control channel; polar code; Distributed cyclic redundancy check aided successive cancellation list; path metric; early terminate

1 引言

Polar 码是 Arikan 在 2009 年发明的^[1],由于它优良的编译码算法处理能力和高可靠性,被选为第五代无线通信技术中控制信道的编码方案^[2]。

Polar 码虽然在理论上可以达到香农容量^[3],但是在有限码长时需要通过串行抵消算法(Successive Cancellation)等译码算法改善译码性能^[4-8]。Lin

Bin 等人提出的分布式循环冗余校验辅助串行抵消表(DCRC-Aided SCL)可以提前识别并终止失败的译码,进一步提升了性能^[9-12]。由于 5G 中下行控制信道(Physical data control channel, PDCCH)携带的控制信息需要盲解,因此分布式循环冗余校验辅助串行抵消表方法适用于 PDCCH 信道的这种特性。

2 PDCCH Polar 译码流程

译码步骤如下：

- (1)对数似然比(LLR)计算；
- (2)路径度量(Path metric)；
- (3)通过 CRC 校验选取最好的 L 条译码路径；
- (4)得到译码比特。

Polar 译码流程如图 1 所示：

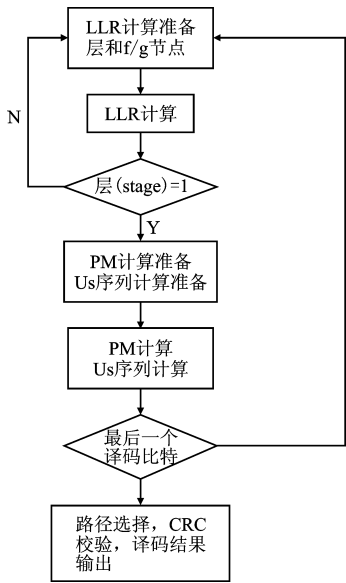


图 1 Polar 译码流程图

2.1 LLR 计算

这里以码长 $N = 8$ 时进行 SC 译码算法进行说明。在 LLR 计算中,最基本的计算单元也是蝶形运算,它包括两种节点, f 节点和 g 节点。

f 节点:

$$f(a,b) = \text{sign}(a)\text{sign}(b) \cdot \min(|a|, |b|) \tag{1}$$

g 节点:

$$g(a,b) = (-1)^a \cdot a + b \tag{2}$$

u 是比特序列。

蝶形运算的示意图如图 2 所示：

SC 译码需要按照一定规则和步骤来计算 LLR,步骤如图 3 到图 10。

2.2 路径度量

在译码算法中,需要假定一些 $U(n)$ 比特序列,每个 $U(n)$ 比特序列被称为一条路径,每条路径需要进行路径度量(path metric, PM). 只有最好的路径才能生存下来。

计算步骤:

- (1) 获取比特属性。

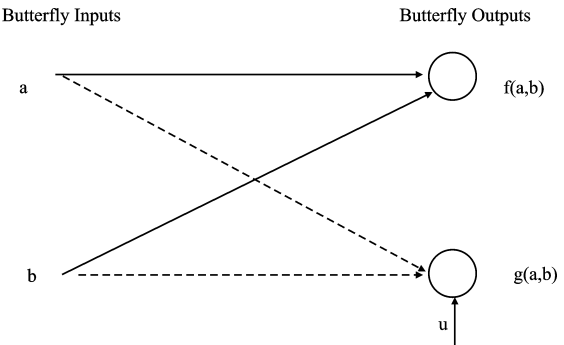


图 2 SC Polar 译码算法中的蝶形运算

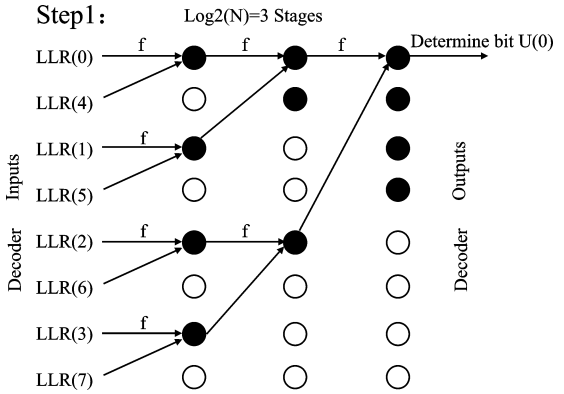


图 3 $N=8$ 的 SC Polar 译码算法

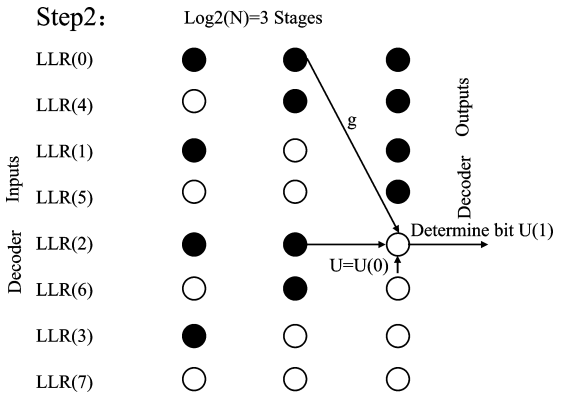


图 4 $N=8$ 的 SC Polar 译码算法

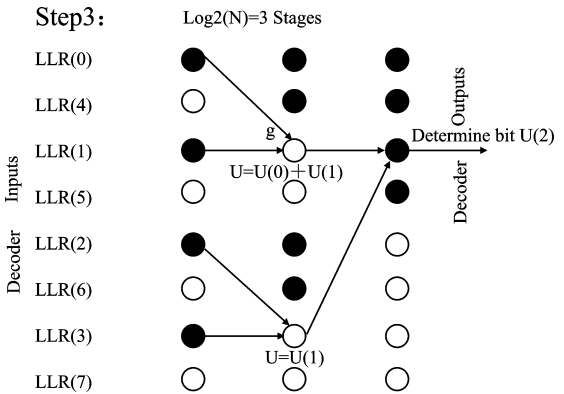


图 5 $N=8$ 的 SC Polar 译码算法

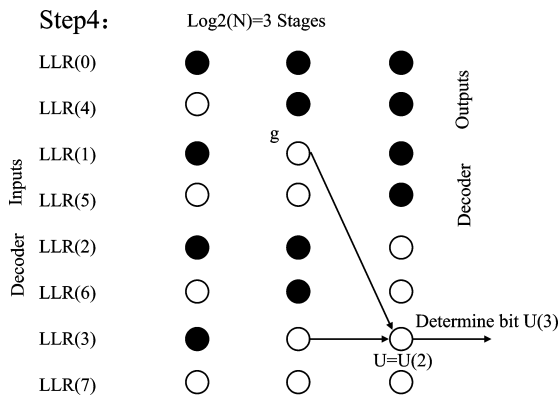


图 6 $N=8$ 的 SC Polar 译码算法

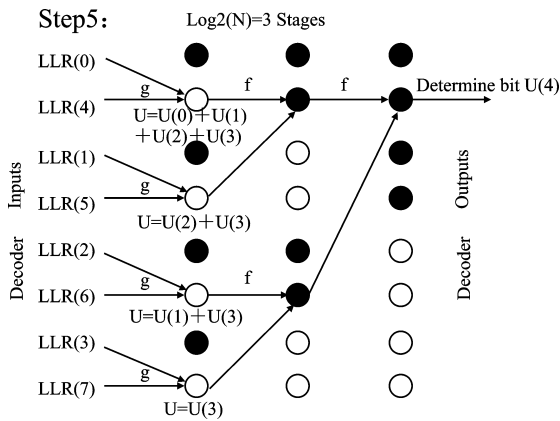


图 7 $N=8$ 的 SC Polar 译码算法

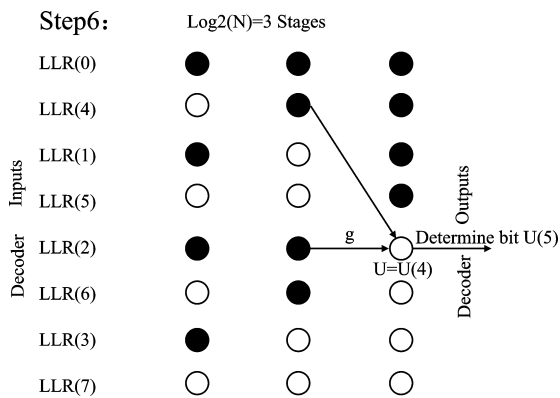


图 8 $N=8$ 的 SC Polar 译码算法

(2) PM 计算.

冻结比特, PM 计算, U 序列对应位置 0.

信息比特, 计算 0 和 1 分支:

① $\text{path_num} < L$, 0 和 1 分支的 PM , U 序列都保存;

② $\text{path_num} > L$, 所有路径 PM 按升序排序, PM , U 序列对应保存.

f node-1 分支

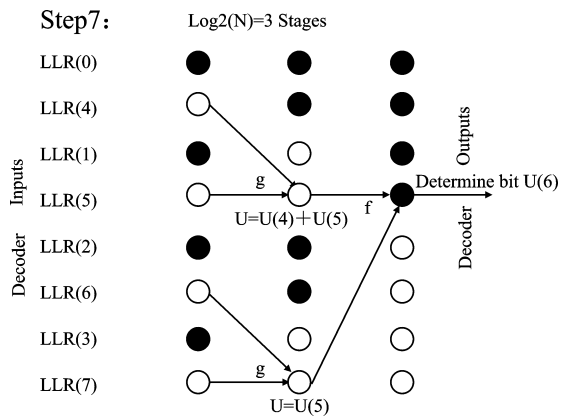


图 9 $N=8$ 的 SC Polar 译码算法

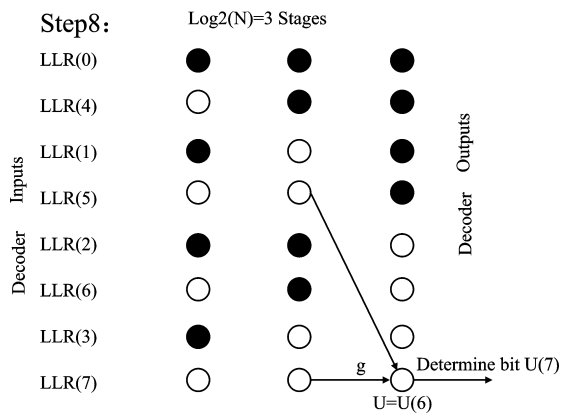


图 10 $N=8$ 的 SC Polar 译码算法

$$PM = \begin{cases} PM & \text{if } f(a,b) \leq 0 \\ PM + |f(a,b)| & \text{if } f(a,b) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

f node-0 分支

$$PM = \begin{cases} PM & \text{if } f(a,b) > 0 \\ PM + |f(a,b)| & \text{if } f(a,b) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

计算过程如下图 11 所示,

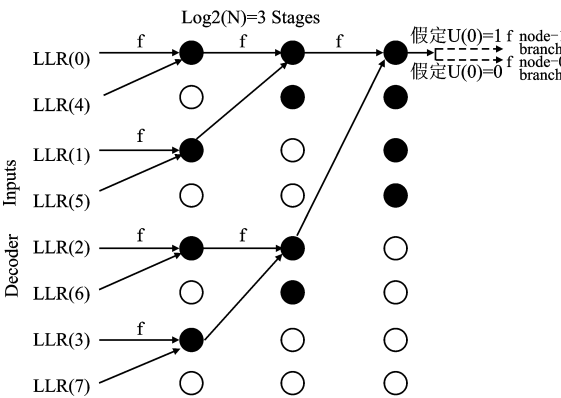


图 11 SC Polar 译码算法中的路径度量

2.3 CRC 辅助判决

排序后的 L 条路径可以用附加的 CRC 校验比特来优化选择最好的路径。

(1) 根据 PM 值的大小,从小到大排列好,选择前面的 L 条。

(2) 对每一条被选的路径进行 CRC 校验。

由于码块在编码时需要用对应的无线网络临时标识(Radio Network Tempory Identity, RNTI)加扰,所以先要把 CRC 比特进行解 RNTI 处理, CRC 比特解 RNTI 后再与信息比特一起进行校验。如果 CRC 校验译码通过,保留此路径;如果 CRC 校验译码错误,删除此路径。

(3) 如果没有一条路径能通过 CRC 校验,那么选择 PM 值最小的那一条路径。

在 5G 中引入了分布式 CRC,包含了 24bitCRC 校验比特和正常的信息比特^[2]。另外,这些校验比特和前面的信息比特有关。所以在译码时可以利用这些 CRC 校验比特进行早停(Earlyly terminate, ET)处理,降低 PDCCH 译码的复杂度。处理流程示意图如图 12 所示:

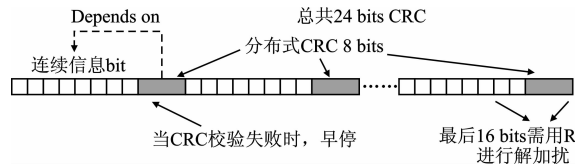


图 12 Polar 译码中的分布式 CRC 和早停

ET 主要包括确定检验向量(checkVec)以及更新分支 CRC 校验寄存器(dcrc_reg)。

checkVec 就是确定比特是信息比特还是 CRC 比特,以此生成矩阵 P ,用于译码端做 CRC 校验。该变量用于更新 f node-1 和 f node-0 的 L 条路径 24 比特 CRC 值。

更新分支 CRC 校验寄存器,是将 f node-1 和 f node-0 的 L 条 24bitCRC 值存入 dcrc_reg。确认当前的比特能否被校验通过,如果当前比特已经 CRC fail,则标记该路径为早停,停止译码。否则继续译码。

3 并行模块组的方法

PDCCH 的 Polar 码序列长度可以是 128/256/512,主要由 PDCCH 信道基本组成单元(Control Channel Element, CCE)的聚合度决定。为了达到低延时低成本的目的,对于 N bit 的 Polar 译码,总共包括 $n = \log_2(N)$ 层,被分为两个模块组,如下图

13 所示:

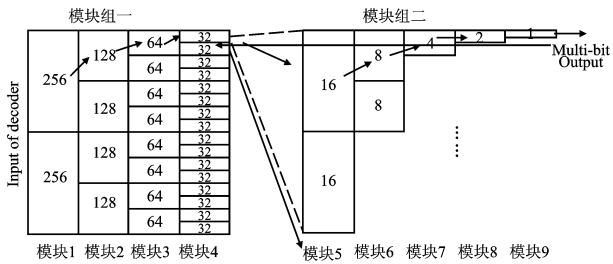


图 13 Polar 译码的两个模块组

模块一组,包括模块 1 到 4,模块 4 会把实时的 LLR 存储下来,作为模块组二的输入。为了提高吞吐率,模块组间采用并行处理机制。PDCCH 译码不能只用一个模块一组和模块二组就译码完,需要不断重复的进行,所以流水化处理就非常必要。模块组一的流水处理如图 13 中红色箭头所示,模块组二的流水处理见绿色箭头所示。

对于 PM 排序,把 PM 分裂的 f node-1 和 f node-0 路径作为输入,得到翻倍的 PM 值输入排序器中,要选择出最小的 L 条 PM ,通常的排序方法效率比较低,大量的 L 会导致 PM 选择成为瓶颈。为了减少延时,这里把排序分为两步,抽取模块和排序模块。抽取模块是将没有排序的路径选择出最小的 L 条来。排序模块仅仅是做排序,这样排序模块可以并行处理,加速为下一个抽取模块提供输入。如图 14 所示:

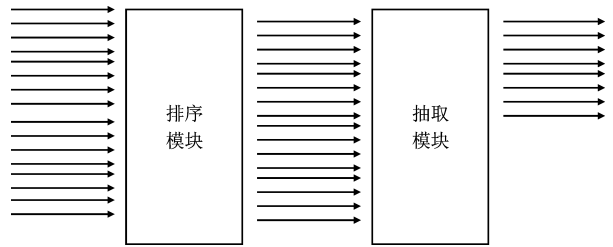


图 14 PM 的抽取模块和排序模块

4 算法仿真性能评估

以 PDCCH 聚合度为 4 ($N=512$) 的 Polar 码长,DCI payload size 是 164 进行仿真。仿真信道是 AWGN 环境。

由图 15 可以看到 SNR 在 3 db 下盲解 PDCCH,码率为 0.5 时 PDCCH 误码率接近 0.1,而码率为 0.25 的 PDCCH 误码率大约为 0.002。在弱场环境,SNR=0 时,码率为 0.25 的 PDCCH 误码率大约为 0.5。所以可以看该译码算法性能还是很好的。

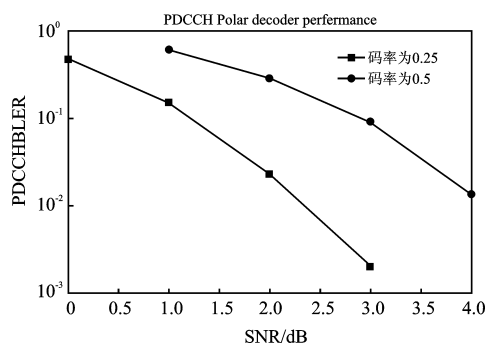


图 15 PDCCH Polar 译码性能

另外,实际中大部分场景都是比较好的场景, SNR 大于 5 db 以上,所以本文的译码算法已经能满足终端设备大多数情况盲解 PDCCH 的需求。

对于 LLR 计算中采用并行模块运算,如果最大 8 个模块组并行,序列长度 $N=512$,译码耗时并行将比串行耗时缩短 3 倍以上。

5 结束语

本文首先介绍了基于 DCRC-CA SCL 算法进行 PDCCH Polar 译码的方法,包括 LLR 的蝶形运算,路径度量,CRC 辅助校验判决。算法中针对 PDCCH Polar 码的特点,提出 LLR 并行模块处理、路径排序并行模块处理和分布式 CRC 早停功能,减少了内存面积,简化了 PDCCH Polar 译码的复杂度。最后算法以聚合度为 4 的 PDCCH 进行盲解仿真,结果表明该算法在 AWGN 信道下能达到满足要求的误码率,而且算法运算量小,算法整个过程图示清晰,便于理解,为用户终端的 ASIC 实现提供了设计思路。

参考文献:

- [1] ARIKAN E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073. DOI: 10.1109/TIT.2009.2021379.
- [2] 3GPP. Technical Specification 38.212 V15.0.0. Multiplexing and channel coding[S]. France: 3GPP Organizational Partners, 2018.
- [3] FORNEY G D. Codes on graphs: normal realizations [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 520-548. DOI: 10.1109/18.910573.

- [4] TAL I, VARDY A. List decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(5): 2213-2226. DOI: 10.1109/TIT.2015.2410251.
- [5] CHEN K, NIU K, LIN J R. Improved successive cancellation decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3100-3107. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.070213.120789.
- [6] CHEN K, NIU K, LIN J R. List successive cancellation decoding of polar codes[J]. Electronics Letters, 2012, 48(9): 500-501. DOI: 10.1049/el.2011.3334.
- [7] ANDERSSON M, SCHAEFER R F, OECHTERING T J, et al. Polar coding for bidirectional broadcast channels with common and confidential messages[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 1901-1908. DOI: 10.1109/JSAC.2013.130921.
- [8] GOELA N, KORADA S B, GASTPAR M. On LP decoding of polar codes [C]//Proceedings of 2010 IEEE Information Theory Workshop. Dublin, Ireland: IEEE, 2010: 1-5. DOI: 10.1109/CIG.2010.5592698.
- [9] LI B, SHEN H, TSE D. An adaptive successive cancellation list decoder for polar codes with cyclic redundancy check [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 2044-2047. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.111612.121898.
- [10] ABBAS S M, FAN Y Z, CHEN J, et al. High-throughput and energy-efficient belief propagation polar code decoder [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2017, 25(3): 1098-1111. DOI: 10.1109/TVLSI.2016.2620998.
- [11] YUAN B, PARHI K K. Low-latency successive-cancellation list decoders for polar codes with multibit decision[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2015, 23(10): 2268-2280. DOI: 10.1109/TVLSI.2014.2359793.
- [12] ZHANG C, YUAN B, PARHI K K. Reduced-latency SC polar decoder architectures [C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications. Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2012: 3471-3475. DOI: 10.1109/ICC.2012.6364209.

作者简介:

梁艳女,(1982-),硕士,讲师。研究方向为电子信息。
E-mail:liangyan-2005@163.com.