

5G NR 信道编码研究

Research on 5G NR Channel Coding

徐俊^{1,2}, 彭佛才², 许进² (1. 东南大学, 江苏南京 211189; 2. 中兴通讯股份有限公司, 广东深圳 518000)
Xu Jun^{1,2}, Peng Focai², Xu Jin² (1. Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. ZTE Corporation, Shenzhen 518000, China)

摘要:

信道编码是 5G 的关键技术之一, 描述了 5G 新空口(NR——New Radio Access)的低密度奇偶校验码(LDPC——Low Density Parity Check Codes)和极化码(Polar Codes)的关键技术; 通过仿真, 比较了 5G NR 的信道编码方案与 4G LTE 信道编码方案的性能。另外, 还比较了这 2 代信道编码技术的复杂度和吞吐量。

Abstract:

Channel coding is one of the key technologies in 5G NR. The key technologies of LDPC and Polar Codes are described. Performance between 5G NR channel coding schemes and those of 4G has been compared by simulations. Furthermore, complexity and throughput of these two schemes have been compared.

Keywords:

4G; 5G; NR; LDPC Codes; Polar Codes

关键词:

4G; 5G; NR; 低密度校验码; 极化码
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.03.004
中图分类号: TN929.5
文献标识码: A
文章编号: 1007-3043(2019)03-0016-06

引用格式: 徐俊, 彭佛才, 许进. 5G NR 信道编码研究[J]. 邮电设计技术, 2019(3): 16-21.

0 引言

研究表明到 2020 年, 人们对大容量、低延时、高可靠、高速度、高连接数、高效能通信的需求将显著增加, 应用场景也不止有广域覆盖, 还有密集热点、机器间通信、车联网、大型露天集会、地铁等。现有 4G 已经无能为力, 必须发展 5G。5G 的这些应用大致可以归为三大场景: 增强的移动宽带(eMBB)、低时延高可靠(URLLC)、海量物联网(mMTC)。2018 年 6 月 11 日至 14 日, 在 3GPP RAN#80 全会上, 基于独立运营的 5G 新无线电接入技术(NR)标准获得通过, 这标志着 5G

NR 可以部署和运营。

信道编码是物理层的最基本的技术, 将对 5G 系统的各项性能指标起着直接和间接的作用, 所以 5G 系统对信道编码提出很高的要求。高峰值速率要求数据信道的译码器在高码率时能达到下行 20 Gbit/s 和上行 10 Gbit/s。由于系统对用户面和控制面的延迟要求很高, 信道编码的译码器一次译码的延迟一般在几 μs 到十几 μs , 同时要求译码器具有合理的芯片面积和功耗。根据系统对可靠性的要求, 对于 eMBB, 信道编码需要在 $\text{BLER}=10^{-4}$ 没有错误平层(error floor), 对于 URLLC, 信道编码在 $\text{BLER}=10^{-5}$ 的时候没有错误平层。为了获得更好的系统效能, 数据信道的信道编码本身需要支持非常灵活码率(如 0.2~0.95)、非常灵活码长(如 40~8 448 bit)以及递增冗余混合请求重传。

在 5G 新空口标准制定过程中, 具有标签影响力

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA01Z271); 国家科技重大专项(2009ZX03003-011-04)

收稿日期: 2019-02-21

的、争论最激烈的、创新性最强的、理论难度最大的、贡献大的课题就是信道编码课题,相对保守的3GPP标准组织在数据信道中放弃使用了20年的Turbo码而选择了低密度奇偶校验LDPC码,在控制信道中放弃使用了几十年的卷积码而选择了全新的极化Polar码,2种信道编码的使用是革命性的改变。

1 5G 信道编码的关键技术

1.1 低密度奇偶校验码(LDPC Coding)

LDPC最早于1963年由Robert Gallager在其博士论文中提出。上世纪90年代以来,受到Turbo码的启发,学术界和工业界对LDPC码掀起研究热潮。在2005年,基于单位阵的循环移位矩阵的准循环LDPC码,又称为结构化LDPC码,首次在WiMAX标准中得到应用,中兴建议的2个高码率矩阵被标准采纳。在2006年,以中兴为代表很多公司建议在4G LTE中使用QC LDPC码代替Turbo码,但是在100 Mbit/s峰值速率条件下LDPC码的相对优势并不明显。之后,类似于WiMAX LDPC结构的QC LDPC方案被IEEE802.11n和IEEE802.11ad采纳。经过多年的研究和发展,凭借其显著的性能和复杂度优势,LDPC码在2016年10月最终被3GPP标准采纳,成为5G NR标准的数据信道编码方案。图1给出了5G数据信道的LDPC码的信道编码链。

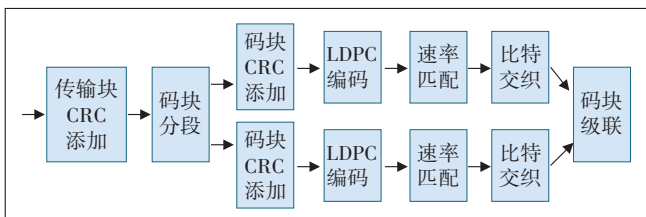


图1 5G数据信道的LDPC码的信道编码链

1.1.1 准循环LDPC

LDPC码是根据奇偶校验矩阵来定义的一种线性分组码,其满足校验关系 $H \times c^T = 0$,其中, H 是奇偶校验矩阵,是一个稀疏矩阵, c 是系统码的LDPC码字,奇偶校验矩阵主要用于编码。LDPC码还可以用Tanner图(又称二分图)来描述,1个奇偶校验矩阵可以唯一对应1个二分图,它主要用于译码。对于准循环LDPC码(又称为结构化LDPC码),其奇偶校验矩阵可以由多个子矩阵构成,每个子矩阵都是全零方阵或单位阵的循环移位矩阵。进一步,准循环LDPC码的每个奇偶校验矩阵可以由1个基础校验矩阵(又称为移位系数

矩阵)和1个标准置换矩阵来定义。其中,标准置换矩阵 P 是一个 $z \times z$ 的矩阵,准确描述如下所示。

$$Hb = \begin{bmatrix} h_{11}^b & h_{12}^b & h_{13}^b & \cdots & h_{1n_b}^b \\ h_{21}^b & h_{22}^b & h_{23}^b & \cdots & h_{2n_b}^b \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{m_1}^b & h_{m_2}^b & h_{m_3}^b & \cdots & h_{m_1 n_b}^b \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} P^{h_{00}^b} & P^{h_{01}^b} & P^{h_{02}^b} & \cdots & P^{h_{0n_b}^b} \\ P^{h_{10}^b} & P^{h_{11}^b} & P^{h_{12}^b} & \cdots & P^{h_{1n_b}^b} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P^{h_{m_0}^b} & P^{h_{m_1}^b} & P^{h_{m_2}^b} & \cdots & P^{h_{m_1 n_b}^b} \end{bmatrix} = P^{hb}$$

$$P^{h_{ij}^b} = \begin{cases} 0_{z \times z} & h_{ij}^b = \text{NULL} \\ (P)^{h_{ij}^b} & \text{otherwise} \end{cases}$$

1.1.2 基本校验矩阵的基本图(BG——Base graph)

基本图又称为原模图、模板矩阵、原始基础矩阵等,由“0”和“1”2种元素构成,元素“0”表示零矩阵,元素“1”表示单位阵的循环移位矩阵,但是不区分具体的移位值。基本图是设计QC-LDPC奇偶校验矩阵的中间过程产物。通常先设计一个BG就能利用性能估计工具分析出大致的性能,然后再针对BG中的元素“1”,设计具体的移位值,从而得到基础校验矩阵。实际进行编译码的时候只需要使用基础校验矩阵即可,不需要用到BG。表1给出了5G NR LDPC码的基本图的主要特征,中兴是最先提出紧凑compact的矩阵框架、BG2基本图设计、前2列大列重、Kernel矩阵大行重、raptor like结构的。

图2给出了一个BG1的基础校验矩阵的例子,它对应BG1的前16行和前38列的部分矩阵,这个矩阵可以理解为kernel矩阵的扩展矩阵,这个扩展矩阵在kernel矩阵的基础上增加12行和12列,改变增加的行数和列数可以获得灵活的码率。

1.1.3 5G NR LDPC码的提升值、移位系数矩阵、速率匹配和交织器

表2给出了基本图设计以外的5G NR LDPC关键技术。在已知基本图的基础上,LDPC码的奇偶校验矩阵还依赖于提升值和单位阵循环移位矩阵的移位

表1 5G NR LDPC码的基本图的关键特征

5G NR LDPC码的基本图的关键特征	关键特征详细描述
紧凑 compact 的矩阵	基础矩阵具有紧凑 compact 的矩阵结构 ($K_b \leq 24$ 且 $Z_{max} \leq 384$), 找到性能和复杂度的最佳结合点
2个基本图 BG1 和 BG2	小TBS或者低码率时使用BG2, 大TBS且高码率时使用BG1, BG1大小为 46×68 , BG2大小为 42×52
前2列有大列重特点, 支持打孔这2个系统列	前2列的列重明显大于其他列的列重, 无论首传还是重传都不发送对应这2列的系统比特
Kernel 矩阵有大行重的特点	Kernel 矩阵的行重接近于系统列数目, 如BG1和BG2的前4行的行重量分别等于 $kb-3$ 或 $kb-2$
Kernel 矩阵的校验位部分具有 WiMAX Like 结构	Kernel 矩阵的校验部分类似于 IEEE802.16e 和 IEEE802.11 协议中矩阵的校验部分
矩阵的一部分具有一定的正交特性	对于BG1, 从第5行开始的中间的16行为准正交的设计, 最后26行遵守严格的行正交设计。对于BG2, 最后22行是正交设计, 没有为准正交设计
具有 Raptor like 结构, 支持可变码率和 IR-HARQ, 从 $kb+5$ 列到最后一列, 矩阵的列重量都是1	当码率高于 kernel 矩阵的码率时候, 需要使用 kernel 矩阵来编译码; 当码率低于 kernel 矩阵的码率时候, 需要比 kernel 矩阵更大的扩展矩阵来编译码, 码率越低扩展矩阵越大, 码率越高扩展矩阵越小

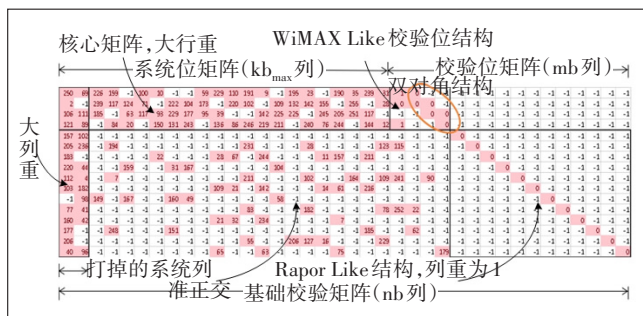


图2 BG1的基础校验矩阵的举例

表2 5G NR LDPC码的其他关键特征

5G NR LDPC码基础校验矩阵的关键特征	关键特征详细描述
并行友好地提升值设计, 支持灵活的码长	提升值具有 $a \times 2$ 的形式, a 是一个有8个值的奇数集合, 具有并行度友好的特点, 可以使用 Banyan+QSN 的混合循环移位网络
基础校验矩阵的移位系数设计	为了保证码长性能的渐进特性, 同一个BG1(或者BG2)支持8个基础校验矩阵(移位系数矩阵), 每个提升值参数 a 对应一个移位系数矩阵
速率匹配	支持循环缓存速率匹配CBRM, 冗余版本RV定义的起点是提升值的倍数, RV3是自解码(self-decodable)RV, RV0, RV1和RV2支持近似均匀分布
比特交织器	比特交织器将一个 HARQ 数据包的高位比特映射到星座图的高可靠性比特位置上, 将其低位比特映射到星座图的低可靠性比特上

值, 所以提升值设计和移位系数矩阵设计也非常重要。为了支持灵活的码长和并行友好的路由网络, 提

出了并行友好的提升值设计; 对于基础矩阵的移位系数设计, 多家公司针对BG1和BG2分别设计了8个不同的移位系数矩阵, 其中中兴针对BG1和BG2分别提供了一个移位系数矩阵; 在基本图的基础上, 速率匹配算法保证了LDPC码可以支持灵活的码率和递增冗余 HARQ, 中兴是自解码冗余版本和其他冗余版本的提出者; 比特交织器是一种比特优先映射的方法, 将一个编码块的高位映射到星座图的高可靠性比特上, 这个交织不仅可以提升高阶调制的首传性能, 而且提升了高阶调制的重传性能, 中兴也是这种比特优先映射提出者。

1.2 极化码 (Polar Coding)

极化码是一种新近提出的线性分组码。它于2009年由Erdal Arıkan教授提出。极化码是针对二元对称信道BSC的严格构造码, 可以达到BSC的信道容量。极化码的基本思想是利用信道的两极分化现象, 把承载较多信息的比特放在“理想信道”中传输, 而把已知比特(“冻结比特”)放在“非理想信道”中。信道极化是一种普遍存在的现象, 不仅在BSC信道, 而且在AWGN信道也广泛存在。它随着码长的增长而变得更为明显。极化码在性能指标上有较强的竞争力, 这使它在2016年11月最终也进入要求严格的5G-NR标准中。中兴提出的速率匹配方案和码块分段方案被5G NR标准采纳。图3分别给出了5G Polar码的下行和上行信道编码链。

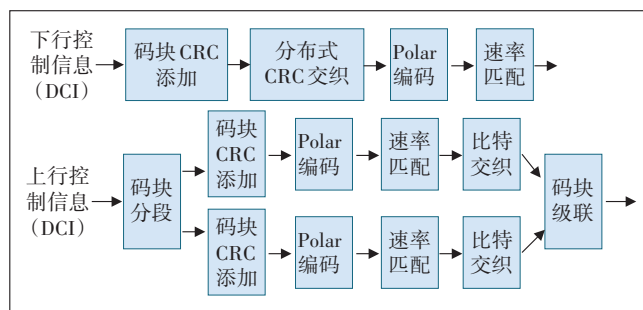


图3 5G的控制信息的Polar码的信道编码链

1.2.1 Polar 码编码

Polar 码也是一种线性分组码。如图4所示, 5G Polar 码编码过程可以表示为 $x_0^{N-1} = u_0^{N-1} G_N$, 其中, u_0^{N-1} 和 x_0^{N-1} 分别为 Polar 码编码的输入和输出, $G_N = (G_2)^{\otimes n}$ 为极化码生成矩阵, N 为2的幂级数。 G_N 是 G_2 的 n 次 Kronecker 积, $G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, $n = \log_2 N$ 。

1.2.2 Polar 码序列

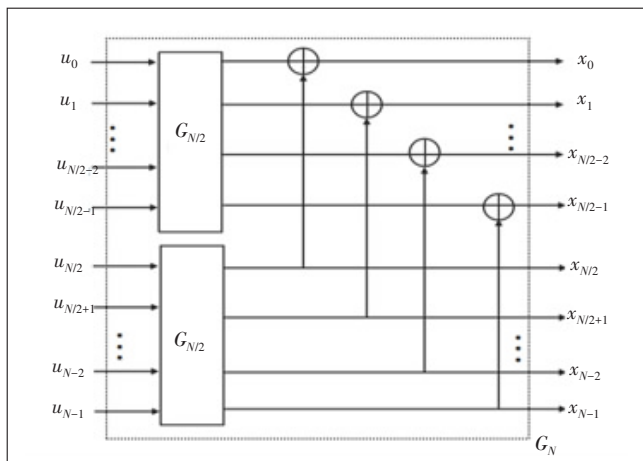


图4 5G Polar 码编码

当母码长度逼近无穷大时, Polar 码中子信道的可靠度出现极化现象: 部分子信道的信道容量趋近于 0, 而其余部分子信道的信道容量趋近于 1。对于有限母码长度的 Polar 码, 信道容量极化现象也存在, 如图 5 所示。

由于 Polar 码的极化性, 在编码过程中需根据子信道的可靠性将信息比特置于可靠性高的位置, 而将可靠性低的位置放置已知比特。已有的 Polar 码构造方法包括巴氏参数法、密度演进法、高斯近似方法等, 由于计算复杂度、信道条件依赖性等问题难以直接应用于工业实践中。为此, 3GPP 最终采用了单一嵌套的构

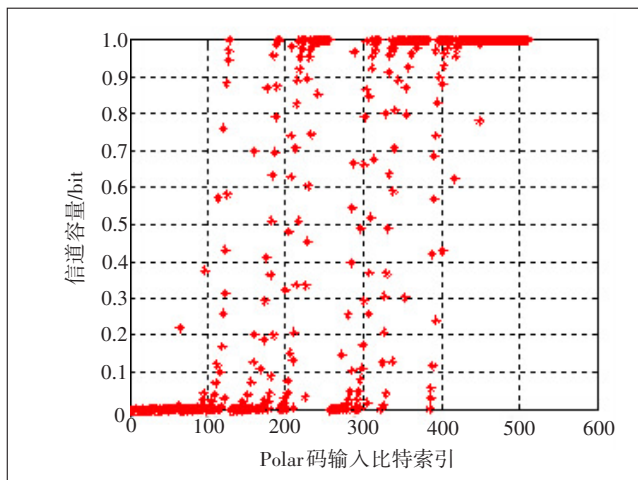


图5 N=512 Polar 码各子信道的信道容量

造序列, 该构造序列中索引按照可靠度排列, 长度为 $N_{\max}=1024$ 。对于任意长度不超过 $N_{\max}=1024$ 的构造序列, 均可通过该序列得到。

1.2.3 速率匹配

Polar 码编码后比特长度为 2 的幂级数, 为此, 速率匹配需满足任意长度传输比特的需求。5G Polar 码的速率匹配包括子块交织和比特选择 2 个过程。其中子块交织过程先将编码后的比特均分为 32 个子块, 各个子块之间按照预定的图样交织, 如图 6 所示。之后, 再将交织后比特写入循环缓存 (circular buffer) 中。

比特选择包括重复 (repetition)、打孔 (puncturing)

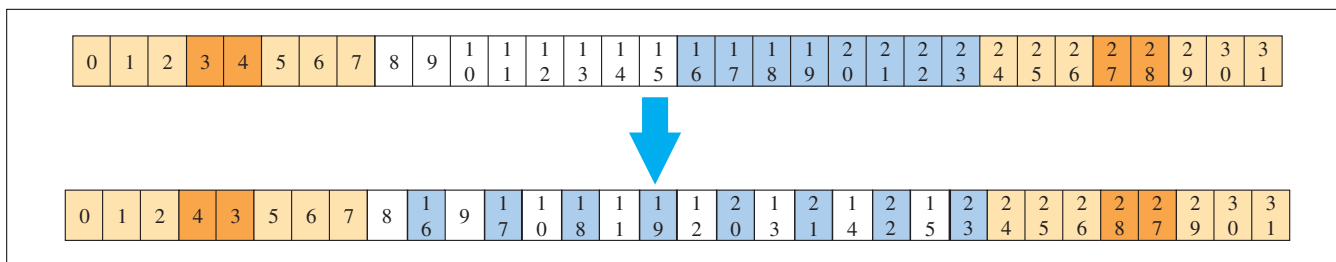


图6 5G Polar 码速率匹配子块交织

和缩短 (shortening) 3 种方式。其中, 当传输比特长度 M 不小于编码后比特长度 N 时, 采用重复的方式, 从循环缓存的第 1 个比特开始, 依次选取 M 个比特; 当传输比特长度 $M < N$ 且码率 $R \leq 7/16$ 时, 采用打孔的方式, 从循环缓存的第 $N-M+1$ 个比特开始, 依次选取 M 个比特; 当传输比特长度 $M < N$ 且码率 $R > 7/16$ 时, 采用缩短的方式, 从循环缓存的第 1 个比特开始, 依次选取 M 个比特。

1.2.4 比特交织

比特交织不但可以实现时频分集而且可以提升

高阶调制的性能。所以比特交织只应用于上行控制信道速率匹配之后, 并且该交织器为等腰直角三角形交织。在比特交织过程中, 数据按行写入等腰直角三角形交织器, 再按列读出。

1.2.5 码块分段

为减小译码复杂度, 3GPP 会议决定下行控制信息 Polar 码编码的最大母码长度 $N_{\max,D}=512$, 上行控制信息 Polar 码编码的最大母码长度 $N_{\max,U}=1024$ 。而在上行方向, 载波聚合的 UCI (包括 ACK/NACK/CSI) 可能包含 500 或更多信息比特。为提高 UCI 的覆盖和性能,

Polar 码码块分段方案被提出: 当满足分段条件时, 将信息比特分成 2 段, 分别添加 CRC 校验比特后再进行 Polar 码编码、速率匹配、和比特交织。该方案最终被 3GPP 会议采纳。

1.2.6 CA-SCL

Arikan 提出的原始 SC 算法性能中等, 但在工程实

现上, 相对当时流行的 Turbo 码和 LDPC 码不具有竞争力。Ido Tal 和 Alexander Vardy 教授提出的串行消去列表解码算法 (SCL) 使得 Polar 达到甚至超过了 Turbo 码和 LDPC 码的性能。如图 7 所示, 在 SCL 基础上, 再加上 CRC 的辅助解码 (即对每条解码路径进行 CRC 校验), 可进一步提升 Polar 码的性能。

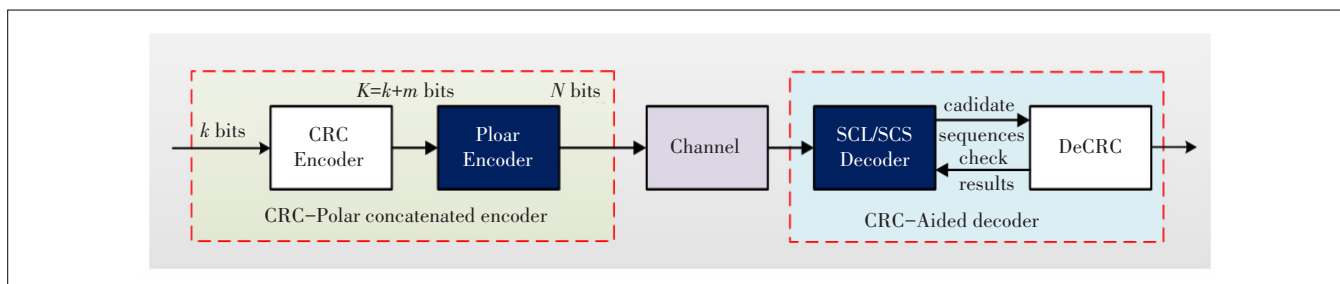


图 7 CA-Polar 的编码和译码过程

2 5G 编码和 4G 编码的比较

2.1 5G NR LDPC 码和 4G LTE Turbo 码的比较

4G LTE 采用 Turbo 编码作为数据信道编码方案, 与 Turbo 码相比, 准循环 LDPC 码具有以下优势:

a) 准循环 LDPC 码性能优于 Turbo 码。如图 8 所示, 仿真比较了不同码率条件下 5G NR LDPC 码和 4G LTE Turbo 码的性能, 目标误码率为 $BLER=10^{-2}$ 。在图 8 中, 横坐标对应于不同的信息块长度 (TBS), 纵坐标对应于目标误码率为 $BLER=10^{-2}$ 时的符号信噪比。可以发现, 5G LDPC 码相对 4G Turbo 码有 0.3~0.4 dB 的 SNR 增益。其中, LDPC 码采用分层 BP 解码和最多 25 次的迭代, Turbo 码采用 Scaled Max-log-MAP 解码和最多 8 次的迭代。

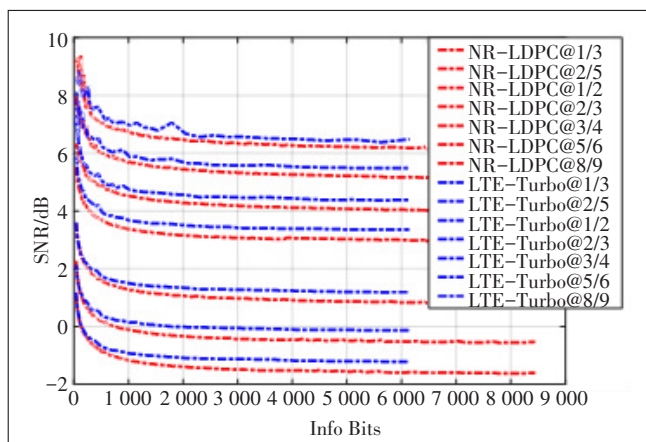


图 8 5G LDPC 和 4G Turbo 码的性能对比

b) 准循环 LDPC 码的复杂度低于 Turbo 码。根据

表 3 的计算方法, 5G 标准的准循环 LDPC 码和 LTE 标准的 Turbo 码的计算复杂度对比如图 9 所示, 其中 $K=6144$ 。为了保证 Turbo 译码性能, 滑动窗长 AL 随着码率增加而增加, 如码率为 1/3 时 $AL=32$, 而码率较高时 $AL=128$, 在此为了方便计算 AL 取值为 32。由于 Turbo 码在任意码率下只能采用母码进行解码, 所以其计算复杂度保持不变。而准循环 LDPC 码可以截取所需要的矩阵进行解码, 所以随着码率的增加其译码计算复杂度反而降低。

表 3 准循环 LDPC 码和 Turbo 码的复杂度计算公式

计算方法	LDPC (Min-Sum+offset)	Turbo (Max Log Map+extrinsic scaling)
A: 加法器 (1)	$2d_r N + 2(N-K)$	$(12 \times 2^{t-1} + 11) \times K + 8 \times 2^{t-1} \times P \times AL$
C: 比较器 (1)	$(2d_c - 3)(N-K) + 2(N-K)$	$(8 \times 2^{t-1} - 4) \times K + 4 \times 2^{t-1} \times P \times AL$
S: 缩放器 (2)	-	$2 \times K$

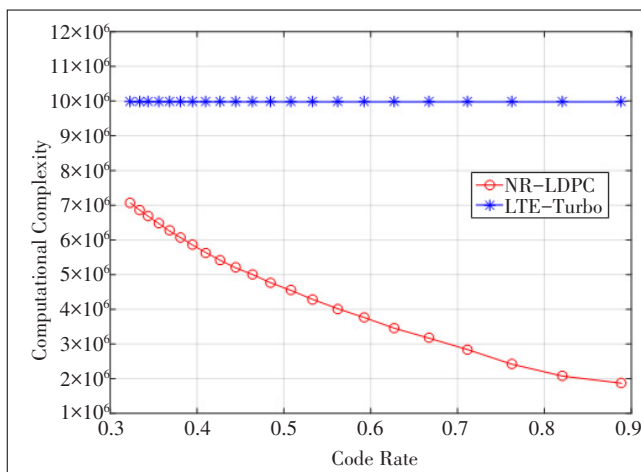


图 9 5G LDPC 和 4G Turbo 码的复杂度对比

c) 吞吐量方面 LDPC 码优于 Turbo 码。Turbo 码的解码都是采用母码进行串行译码,而 LDPC 码可以依据码率不同截取不同矩阵进行解码,所以当码率增加时,LDPC 的吞吐量也显著增加,而 Turbo 码的吞吐量基本不变,实际通信系统在码率越高时要求吞吐量越高,LDPC 码可以更好地匹配实际通信系统的需求。特别是,准循环 LDPC 码可以采用很高的解码并行度,所以其吞吐量潜力巨大,可以满足不同 UE 类型需求。有研究表明,在假定使用相同的复杂度的情况下,LDPC 码的吞吐率是 Turbo 码的 8.4 倍,LDPC 码的解码时延是 Turbo 码的 1/8。

2.2 5G NR Polar 码和 4G LTE 卷积码的比较

与数据信道所用的编码方案不太相同,对于控制信息和控制信道(PDCCH/PBCH/UCI),其所用的信道编码方案需要满足极低的处理时延、低复杂度、极低的误码平台、高解码性能等需求,Polar 码可以很好地满足上述需求。

Polar 码明显优于卷积码。图 10 为码率分别为 1/6、1/3、1/2、2/3 下,仿真对比的 5G Polar 码和 4G TBCC 码的性能。在图 10 中,行坐标对应于不同的信息块长度,纵坐标对应于在对应目标误码率为 $BLER=10^{-2}$ 下的信噪比。可以发现,5G Polar 码相对 4G TBCC 码有 0.5~1.5 dB 的信噪比增益。其中,Polar 码采用 SCL 解码,List 大小为 8,TBCC 码采用 Viterbi 解码。

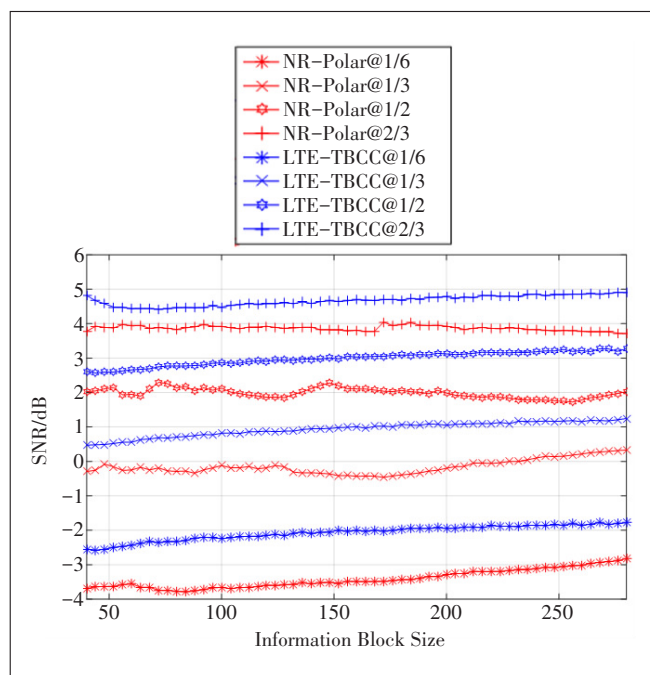


图 10 Polar 码与 TBCC 的 SNR 性能对比

3 结论

本文给出了 5G 信道编码的关键技术。通过大量的仿真,本文比较了 5G 信道编码与 4G 信道编码的性能差异。随着技术的进步,LDPC 码和 Polar 码将会进一步发展,LDPC 码的研究可以考虑新的单一基本图、多边 LDPC、更紧凑 LDPC 等内容;Polar 码研究可以考虑新的序列设计和速率匹配算法,支持递增冗余 HARQ、支持更好的码长渐进性和并行解码等方向。

参考文献:

- [1] Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (Release 14): 3GPP TR 38.913 [S/OL]. [2018-07-19]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/>.
- [2] GALLAGER R G. Low-density parity-check codes [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(1): 3-26.
- [3] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes [C]// ICC'93 - IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2002: 1064-1070.
- [4] ARIKAN E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 55(7): 3051-3073.
- [5] SOLOMON G, TILBORG H C A V. A Connection Between Block and Convolutional Codes [J]. Siam Journal on Applied Mathematics, 1979, 37(2): 358-369.
- [6] MA H, WOLF J. On Tail Biting Convolutional Codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 34(2): 104-111.
- [7] XU J, XU J. Structured LDPC Applied in IMT-Advanced System [C]// International Conference on Wireless Communications, NETWORKING and Mobile Computing. IEEE, 2008: 1-4.
- [8] 3GPP. R1-166370 LDPC rate compatible design [EB/OL]. [2018-08-20]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_86/Docs/R1-166370.zip.
- [9] 3GPP. R1-1711982 WF on LDPC parity check matrices [EB/OL]. [2018-08-20]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TS-GR1_AH/NR_AH_1706/Docs/R1-1711982.zip.
- [10] 3GPP. R1-1715664 On rate matching for LDPC code [EB/OL]. [2018-08-20]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TS-GR1_AH/NR_AH_1709/Docs/R1-1715664.zip.

作者简介:

徐俊,高级工程师,东南大学在读博士,主要从事 4G、5G 信道编码和 MIMO 等研究工作;彭佛才,毕业于北京邮电大学,高级工程师,博士,主要从事 5G 信道编码研究工作;许进,毕业于武汉大学,高级工程师,博士,主要从事 5G 信道编码研究工作。