

天基物联多码率 QC-LDPC 码构造方法研究

刘哲铭¹, 成俊峰¹, 魏肖¹, 缪德山², 张景¹, 陆洲¹

(1. 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041;

2. 电信科学技术研究院有限公司无线移动通信国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对天基物联场景中的小数据传输进行多码率 QC-LDPC 码研究, 结合 5G 标准中 LDPC 码校验矩阵的设计方法与 DVB-S2X 标准中不同码率条件下编码长度不变的特性, 探索适用于卫星通信中针对短码在固定编码长度条件下实现多码率 QC-LDPC 码的设计方案, 并进行仿真验证; 其中, 校验矩阵是通过基于代数法的 QC-LDPC 码的叠加构造方法进行设计, 结合缩短与扩展操作来构造具有固定编码长度且能实现多码率的循环移位矩阵, 该矩阵同时保持了 5G LDPC 编码标准中的类 Raptor 结构; 最后通过所设计方案与 IEEE802.11n 标准进行误比特率仿真对比, 根据仿真结果显示, 所设计方案与 IEEE802.11n 标准性能相差较小, 且误比特率能到 10^{-7} , 达到了预期的效果。

关键词: 天基物联; QC-LDPC; 卫星通信; 多码率; 小数据

Research on Construction Method of Multi-rate QC-LDPC Codes for Space-based IoT

LIU Zheming¹, CHENG Junfeng¹, WEI Xiao¹, MIAO Deshan², ZHANG Jing¹, LU Zhou¹

(1. China Academic of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China;

2. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Academy of Telecommunications Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Aimed at the study of multi-rate quasi-cyclic low-density parity-check (QC-LDPC) codes for small data transmission in space-based internet of things (IOT) scenarios, combined with the design method of LDPC code check matrix in 5G standard and the characteristics of fixed code length under different code rate conditions in digital video broadcasting's second generation satellite television broadcasting standard extensions (DVB-S2X) standard, the design scheme applicable is explored to the implementation of multi-rate QC-LDPC codes for short codes in satellite communications under fixed code length conditions, and the simulations are verified. The check matrix is designed by the algebraic method of QC-LDPC code superposition construction, shortening and expansion operations are combined to construct a circular shift matrix with fixed coding length and multiple code rates, which maintains the Raptor-like structure of the 5G LDPC coding standard; Finally, the error rate of the designed scheme is compared with that of the IEEE802.11n standard, the simulation results show that the difference of bit error rate is very small, and reaches 10^{-7} , which meets the expected result.

Keywords: space-based IoT; QC-LDPC; satellite communication; multi-code rate; small data

0 引言

随着物联网技术的快速发展, 其在各个领域的应用也急速拓展, 为人们生活带来了极大的便利。然而, 目前由于在大范围、恶劣环境条件下基站的建设成本高且难以维护, 物联网仅仅在城市和部分乡村地区以及偏远地区的局部区域得以应用, 其有限的覆盖范围致使物联网技术的服务能力受到限制。面对更加广阔的海洋、林地、山地等资源监测、数据采集, 以及空域飞行器的指控信息传输等需求没有得到有效满足。卫星通信的快速发展则为信号的广域覆盖提供了很好的解决思路, 3GPP 标准小组已提议将卫星通信与地面通信纳入 5G 网络, 星地通信技术的融合作为

未来通信的发展趋势, 以卫星为基础的天基物联网具有覆盖范围广、系统容量大、抗毁能力强以及不受恶劣天气的影响等优势^[1-4]。

天基物联网业务主要包括数据采集、指挥控制以及数据广播等, 重点聚焦在小数据传输^[5]。卫星通信因其具有的优势受到广泛的关注, 但在应用中面临着很多技术挑战, 例如: 星地信息传输距离长、信道变化速度快, 数据传输易受雨雪天气影响等导致信息传输可靠性降低, 因此, 需要采用差错控制技术以提高信息传输准确性与可靠性。由于星地信息传输距离长, 自动重传请求 (ARQ, automatic repeat request) 方案并不符合实际需求, 混合自动重传请

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-02-03。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2900500)。

作者简介: 刘哲铭(1995-), 男, 河南周口人, 在读硕士研究生, 主要从事信道编码、通信网络方向的研究。

引用格式: 刘哲铭, 成俊峰, 魏肖, 等. 天基物联多码率 QC-LDPC 码构造方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 275-280, 286.

求 (HARQ, hybrid automatic repeat request) 方案显著提高了数据传输的有效性和传输速率^[6], 前向纠错 (FEC, forward error correction) 方案则是其中的重点部分。为了给星地通信提供高可靠的数据传输过程, 必须使用性能较优的信道编码, 误比特率能达到 10^{-7} , 例如: Turbo 码^[7]、低密度奇偶校验 (LDPC, low-density parity-check) 码^[8]、Polar 码^[9]等以实现较低的误码率。其中, LDPC 码具有较强的纠错能力, 可以大大提高系统数据传输的可靠性, 降低数据传输的错误率, 且在很多领域都得到成熟的运用, 本文重点以 LDPC 码为核心对天基物联网场景下的信道编码进行研究。

在传统的卫星通信系统中, 为了保证系统的可靠性和可用性, 通常采用固定的传输方法进行传输, 这种传输方式并不能根据信道条件的变化以及资源的利用率等信息进行灵活的调整。因此, 为了充分利用信道资源, 基于链路特性自适应数据传输技术得以快速发展, 参考文献 [10] 中提到基于准循环 LDPC (QC-LDPC, quasi-cyclic LDPC,) 编码的卫星自适应数据传输系统中, 根据编码要求, 对其编码和构建算法进行全面的分析优化, 该方案已成功应用于嫦娥四号卫星中继项目中。参考文献 [11] 则是根据实际的信道状态来自适应的调整码率, 该技术不仅有助于提高传输速率, 而且有效地提高了频谱效率, 作者首先获取具有高码率的校验矩阵, 然后通过缩短技术, 根据码率变化删除固定列以达到降低码率的效果, 可以根据当前的信道状态自由地改变码率, 更好的利用信道资源。针对 LDPC 码, 大数据长码传输的性能已经得到很好的研究, 天基物联主要为小数据短码传输, 短码相较于长码有较低的延迟, 对于卫星通信远距离传输来说也具有一定的优势。参考文献 [12] 中作者针对 LDPC 短码进行研究, 通过有限几何性质, 利用欧几里得几何和循环分解方法, 并利用分解矩阵、排列矩阵和分布矩阵三个子矩阵来构造混合准循环 LDPC (HQC-LDPC, hybrid quasi-cyclic LDPC) 校验矩阵, 该方案在短码信息传输的误码率性能上表现优异。

本文以天基物联为背景, 针对小数据传输进行研究, 并根据在固定码长条件下信息传输更能满足卫星通信系统的要求, 受 DVB-S2X 标准中信道编码在固定码长条件下实现多码率的效果, 以及 5G LDPC 信道编码校验矩阵类 Raptor 结构设计所表现得优异性能的启发, 对校验矩阵进行设计, 在保证编码性能的前提下实现固定码长条件下的多码率 QC-LDPC (MR-QC-LDPC, multi-rate QC-LDPC) 码的设计。本文第二节介绍以代数法设计循环系数表为基础, 通过叠加构造方法设计 QC-LDPC 码的校验矩阵; 第三节通过缩短与扩展操作在保持类 Raptor 结构不变情况下实现固定码长条件下的 MR-QC-LDPC 码的设计; 第三节针对所设计的 LDPC 码进行不同码率条件下的性能对比仿真图; 第五节对本文内容进行总结。

1 基于代数法的 QC-LDPC 码叠加构造设计方法

校验矩阵的设计是 LDPC 编码的核心内容, 校验矩阵

设计的好坏直接关系到编码性能的优劣。QC-LDPC 码叠加构造的过程主要涉及到基矩阵 B 、循环移位矩阵 P 、循环置换矩阵 (CPM, circulant permutation matrix) 以及矩阵散列过程, 散列后获取到的校验矩阵的大小取决于基矩阵的大小以及移位尺寸 Z 的大小^[13]。当移位尺寸为 $Z=3$ 时, 令

$$Q(-1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, Q(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q(1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, Q(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

基矩阵大小为 2×3 ,

QC-LDPC 校验矩阵叠加构造过程如图 1 所示。

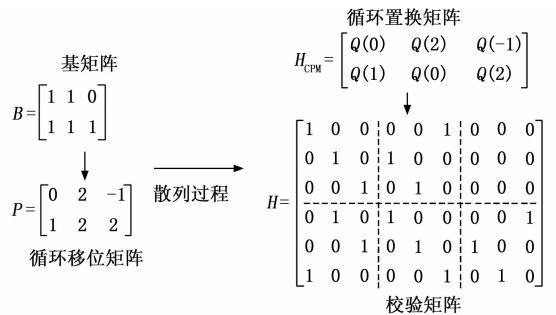


图 1 QC-LDPC 校验矩阵叠加构造过程

接下来, 首先介绍基矩阵设计方案, 然后构造循环系数表, 在循环系数表的基础上对循环移位矩阵进行设计, 然后通过叠加构造方法获取校验矩阵, 最后对所设计的校验矩阵的误码率性能进行对比仿真。

1.1 基矩阵设计

在 5G LDPC 编码标准中, LDPC 码的校验矩阵具有非常强的稀疏性, 这种稀疏性质使得 LDPC 码非常适合于各种迭代译码算法并能获取近似最优的译码性能。5G LDPC 码基矩阵的设计本身具有一定的稀疏性, 如图 2 中 LDPC 码的 Tanner 所示, 若不具有稀疏性, 则变量节点与校验节点之间的连接线将非常的密集, 导致译码复杂度急剧增加, 稀疏性则是在保证译码性能变化不大的情况下降低迭代译码算法的复杂度, 因此节点的度分布特性将是基矩阵构造的重要指标。

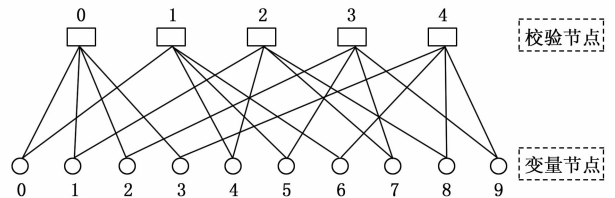


图 2 列重为 2、行重为 4 的 $(10, 5)$ LDPC 编码 Tanner 示意图

LDPC 码采用迭代译码时在低信噪比区域, 即瀑布区域具有译码门限效应, 当信噪比高于此门限值时, 译码的可靠性将会有大幅度提升, 而该门限值的取值将取决于节点

的度分布, 通过码分析工具可预测校验矩阵的译码门限。基于度分布的外信息转移 (EXIT, extrinsic information transfer) 图具有使用简单以及预测精准的优点, 基于基矩阵设计的 LDPC 码具有一定的结构化, 因此可采用基于图结构的 EXIT (P-EXIT, protograph-based EXIT) 技术。结合上述分析, 在构造基矩阵的过程中, 可通过采用 P-EXIT 技术计算基矩阵的译码门限, 从中寻找具有最优译码门限值的基矩阵^[14]。

1.2 循环系数表设计

在循环移位矩阵设计之前, 首先需要获取循环系数表, 循环系数表可通过代数法来进行设计。目前, 有多种代数法都可用于构造满足行列 (RC, row-column) 约束的循环系数矩阵^[15], 其中, RC 约束指任意两行 (或两列) 不会有超过一个相同位置上同时为非零元^[13], 满足 RC 约束条件所设计的校验矩阵, 其迭代译码通常具有较好的性能。本小节采用基于素域来构造循环系数表。

假设 $GF(q)$ 是包含 q 个元素的 Galois 域^[16], 考虑 q 为素数的情况, $GF(q) = \{0, 1, \dots, q-1\}$, 其中元素的加法和乘法可直接进行“模 q ”运算。 a 为 $GF(q)$ 中其中一个本原元, 用 a 的幂次可表示 $GF(q)$ 中所有的元素: $a^{-\infty}, a^0, a^1, \dots, a^{q-2}$, 通过“模 q ”可获得 $GF(q)$ 中所有的元素。因此, 对于 $0 \leq m, n < q$, 取 $GF(q)$ 中元素组成任意两个集合 $S_1 = \{\alpha^{i_0}, \alpha^{i_1}, \dots, \alpha^{i_{m-1}}\}$ 和 $S_2 = \{\alpha^{j_0}, \alpha^{j_1}, \dots, \alpha^{j_{n-1}}\}$, 其中 $i_k, j_l \in \{-\infty, 0, 1, \dots, q-2\}$, 此外 $i_0 < i_1 < \dots < i_{m-1}, j_0 < j_1 < \dots < j_{n-1}$, 可根据这两个集合通过以下多种形式构造循环系数表 T_{cc} :

$$T_{cc} = [t_{k,l}] = [\alpha^{i_k} \times \alpha^{j_l}] \pmod{q} \quad (1)$$

$$T_{cc} = [t_{k,l}] = [\alpha^{i_k} \pm \alpha^{j_l}] \pmod{q} \quad (2)$$

$$T_{cc} = [t_{k,l}] = [\alpha^{i_k} + \alpha^{j_l}] \pmod{q} \quad (3)$$

或者

$$T_{cc} = [t_{k,l}] = [\log_a(\alpha^{i_k} \pm \alpha^{j_l})] \pmod{q} \quad (4)$$

$$T_{cc} = [t_{k,l}] = [\log_a(\alpha^{i_k} + \alpha^{j_l})] \pmod{q} \quad (5)$$

基于上述素域构造方法构造的循环系数表每一行所有的元素都是不相同的, 任意两行 (或两列) 在任何位置上没有相同项。为了获取性能更好的 LDPC 码迭代译码性能, 所设计的 LDPC 码其 Tanner 图应尽量避免短环的存在, 即没有长度为 4 的环和尽量少的长度为 6 的环, 如图 2 所示, 其中黑色粗线即为所形成的长度为 6 的环^[17-18]。基于上述的构造方法获取到循环系数表后, 若基矩阵满足 RC 约束^[19]。

1.3 循环移位矩阵设计

获取到循环系数表 T_{cc} 后, 可据此进行循环移位矩阵 P 的构造, 如何从 T_{cc} 中选取最优的循环系数来构造性能较好的循环移位矩阵, 需要有一个评判标准。

LDPC 码的 Tanner 图是一种图形化的针对 LDPC 码校验矩阵的完全表示方法, 这种表示方法有助于译码算法的描述, LDPC 码的译码算法可描述为 Tanner 图中校验节点与变量节点之间的信息交互, 迭代译码的有效性取决于

Tanner 图的结构特性, 短环会降低 LDPC 码所使用的迭代译码算法的性能, 因此, 可通过不同环长的数量并对不同环长分配以不同的权重来形成一个评判标准从 T_{cc} 中进行筛选, 最终形成性能最优的循环移位矩阵。

设循环移位矩阵为 $P = [p_{i,j}]_{0 \leq i < m_b, 0 \leq j < n_b}$, 长为 $2d$ 的环存在的充要条件是存在 $2d$ 个非负移位值 p_{i_z, j_z} 使下式成立, 其中 $g \leq 2d \leq 2g-2, g$ 为表示围长^[20]。

$$\sum_{z=0}^{d-1} (p_{i_z, j_z} - p_{i_{z+1}, j_{z+1}}) = 0 \pmod{Z} \quad (6)$$

其中: $0 \leq i_z < m_b, 0 \leq j_z < n_b, i_z \neq i_{z+1}, j_z \neq j_{z+1}, i_0 = i_d, j_0 = j_d$ 。

根据上述的环存在的充要条件, 可以对所设计的循环移位矩阵根据不同环长、不同移位尺寸 Z 的条件下满足式 (6) 的组数进行计数, 并设置相应的权重使不同移位尺寸、不同环长条件下具有可比性, 由此获取的环加权平均数 (WANC, weighted average number of cycles) 如下式所示:

$$W(P) = \sum_{i=1}^{N_z} \omega_z(i) \sum_{j=1}^N a_c(j) N(i, j) \quad (7)$$

其中: N_z 为所支持的不同移位尺寸的数量, $\omega_z(i)$ 为所支持的不同移位尺寸的权重, N_c 为环长种类数目, $a_c(j)$ 为不同环长的权重, $N(i, j)$ 为不同移位尺寸, 不同环长条件下计算出满足式 (7) 的组数。由于环长越短对 LDPC 迭代译码性能的影响越大, 因此在考虑权重时应随着环长的增加权重越低, 由此可得出, $W(P)$ 值越大, 性能越差。

为简化算法, 循环系数表 T_{cc} 列数与循环移位矩阵的列数相同, 这样可以行为单位进行筛选。在基矩阵已知的情况下, 先对前两行根据标准进行判断, 然后逐行添加, 为下一节多码率的设计做铺垫。由 T_{cc} 根据判断标准 $W(P)$ 来设计的循环移位矩阵算法流程如算法 1 所示。

算法 1: 循环移位矩阵构造

输入: 基矩阵 B, B 大小为 $m_b \times n_b$, 循环系数表 T_{cc}, T_{cc} 大小为 $m \times n_b$

输出: 循环移位矩阵 P

- 1) 初始化: $W^* = +\infty$
- 2) /* */ 先对前两行进行设计 /* */ /
- 3) repeat
- 4) for $i = 1:m$ do
- 5) $P^*[1, :] = B[1, :] \odot T_{cc}[i, :] + B[1, :] - ones[1, :]$
- 6) for $j = 1:m (j \neq i)$
- 7) $P^*[2, :] = B[2, :] \odot T_{cc}[j, :] + B[2, :] - ones[1, :]$
- 8) if $W(P^*) < W^*$ then
- 9) $P = P^*, W^* = W(P^*)$
- 10) end if
- 11) end for
- 12) end for
- 13) /* */ 对后面逐行设计 /* */ /
- 14) for $k = 3:m_b$ do
- 15) for $j = 1:m$ (不包括已选行)
- 16) $P^*[k, :] = B[k, :] \odot T_{cc}[j, :] + B[k, :] - ones[1, :]$
- 17) if $W(P^*) < W^*$ then

```

18)      P = P* , W* = W(P* )
19)      end if
20)      end for
21) end for
22) return P
    
```

根据上述算法来获取性能最优的循环移位矩阵。

1.4 矩阵叠加构造

如图 1 所示，叠加构造的过程既是 CPM 到校验矩阵 H 的过程，该过程也是从 LDPC 码到 QC-LDPC 码的过程，校验矩阵 H 是由多个大小为基于移位尺寸的 $Z \times Z$ 的循环子矩阵构造而成。CPM 的构造是由循环移位矩阵确定的，确定过程中以单位矩阵为基础，即循环移位值为 0 时，CPM 中对应的元素为 $Q(0)$ ，当循环移位值为 t 时，CPM 中对应的元素为 $Q(t)$ ，其对应的子矩阵是在单位矩阵的基础上每行均右移 t 位，此外， $Q(-1)$ 对应的是全零矩阵，最终通过叠加构造的校验矩阵 H 的大小为 $(m_b \cdot Z) \times (n_b \cdot Z)$ 。

接下来，对所提方案与算法进行有效性验证。首先按照 1.1 节基矩阵设计所提方案利用 P-EXIT 技术进行大小为 4×12 的基矩阵的构造，然后根据 1.2 节通过代数法及式 (4) 进行循环系数表的设计，令 $GF(q)$ 中 q 为素数 241，7 为 $GF(241)$ 中其中一个本原元，以此设计大小为 227×12 的循环系数表，通过从循环系数表中随机选取 12 个元素作为集合 S_1 ，剩余的除 0 和 1 以外的元素作为集合 S_2 ，将两集合中的元素根据式 (4) 进行计算，获取循环系数表 T_{cc} 。

下面在已设计好的大小为 4×12 的基矩阵的基础上，对 T_{cc} 以行为单位进行选取，组成迭代译码性能最优的与基矩阵大小相同的循环移位矩阵。循环移位矩阵设计过程中通过对 T_{cc} 进行行遍历并根据式 (7) 进行判断获取最佳行使译码性能达到最优。本次验证过程选取的移位尺寸 $Z=112$ ，在固定移位尺寸下，式 (7) 可简化为下式：

$$W(P) = \sum_{j=1}^N a_c(j) N(j) \quad (8)$$

通过式 (8) 考虑环长为 4、6、8 的情况，按照多次测试的经验，三种环长相对应的权重分别为 1 000、100、1。

基于上述流程，获取到的循环移位矩阵 P 如下所示：

$$P = \begin{bmatrix} 93 & -1 & 51 & -1 & 33 & -1 & 10 & 97 & 110 & 42 & 0 & 86 \\ 44 & -1 & -1 & 88 & -1 & 84 & 90 & 78 & 34 & 52 & 12 & 73 \\ -1 & 90 & 81 & -1 & -1 & 83 & -1 & 27 & 45 & 5 & 66 & 89 \\ -1 & 109 & -1 & 110 & 3 & -1 & -1 & 88 & 72 & 18 & 65 & 38 \end{bmatrix}$$

根据循环移位矩阵 P 可获取 CPM，再根据移位尺寸进行叠加构造，最终获取到大小为 448×1344 的校验矩阵 $H_{448 \times 1344}$ ，码率 $R=2/3$ ，信息位长度为 896。然后利用同样的方法获取相同大小、移位尺寸 $Z=28$ 的循环移位矩阵，通过叠加构造最终获取到大小为 112×336 的校验矩阵 $H_{112 \times 336}$ 。对获取到校验矩阵进行编码，本文所有仿真中信道噪声均为二进制输入加性高斯白噪声 (BI-AWGN, binary input additive white gaussian noise)，并通过和积算法

(SPA, sum-product algorithm) 进行译码，最大迭代次数为 50。根据所上述方案设计的校验矩阵与 5G LDPC 编码标准中的校验矩阵性能对比仿真图如图 3 所示。

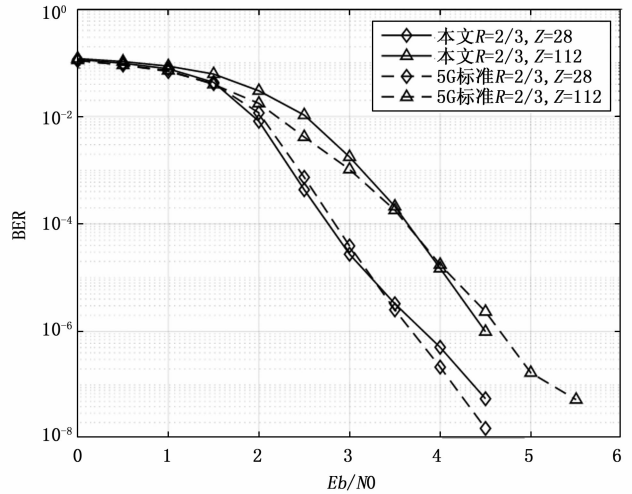


图 3 所设计方案与 5G 标准方案的性能对比仿真图

图 3 中，在码率统一为 $R=2/3$ 条件下，移位尺寸分别为 $Z=112$ 、 $Z=28$ 情况下进行误比特率仿真，同时与 5G LDPC 编码标准中相同码率下，相同移位尺寸误比特率仿真结果进行对比。经过 1×10^5 帧次仿真，每帧大小与需编码的信息位长度相同，结果显示，上文所述校验矩阵设计方案所得仿真结果与 5G 标准中对应条件下的仿真结果大致相同，证明了设计方案的有效性。

2 固定码长条件下的多码率 QC-LDPC 码设计方法

根据算法 1 中循环移位矩阵的构造过程是逐行构造的，这为固定码长条件下的多码率 QC-LDPC 码的设计中针对循环移位矩阵的行列变化提供操作方法。在卫星广播系统中为保证系统的可靠性和可用性通常采用固定的有效载荷大小，对应固定的码字长度，但是具有灵活的码率。现有的 5G LDPC 编码标准中，根据码率的不同，相同信息位长度编码后的码字长度不同。本节针对天基物联场景，参考 5G LDPC 码设计方案并在此基础上通过基矩阵和循环移位矩阵的设计来构造具有类 Raptor 结构的具有固定编码长度条件下实现不同码率的 QC-LDPC 校验矩阵。

2.1 类 Raptor 结构稀疏校验矩阵设计

参考 5G LDPC 码标准中校验矩阵 H 的设计，5G 标准中的校验矩阵是具有类 Raptor 结构的稀疏矩阵。Raptor 码是 LT 码的一个扩展，Raptor 码相对于 LT 码增加一个纠错码作为外码用以解决 LT 码可靠性较低的问题^[21]，借鉴 Raptor 码的结构生成的校验矩阵易于编译码的硬件实现，且可基于类 Raptor 结构的校验矩阵直接进行编码，不需再将校验矩阵转换为生成矩阵。此外，参考 5G LDPC 码标准中的基矩阵的设计结构进行基矩阵的设计，实现循环移位矩阵的稀疏化，最终通过叠加构造形成的具有更加稀疏性的校验矩阵，大大降低了译码算法的复杂度。

Raptor 结构是以高码率校验矩阵为基础进行拓展, 扩展后的校验矩阵会伴随着码率的逐步降低, 以此来实现降低码率的效果, 该结构非常适用于多码率的设计。类 Raptor 结构的稀疏校验矩阵的设计如图 4 所示。

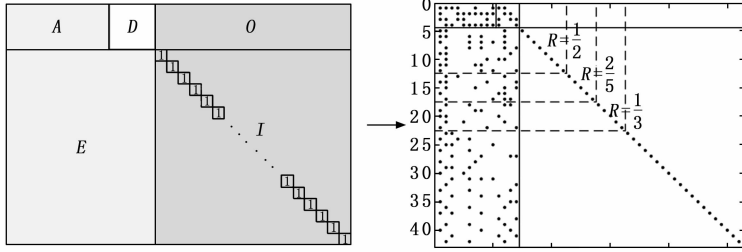


图 4 类 Raptor 结构校验矩阵设计及 BG2 中不同码率分布图

其中, 图 4 中左图为类 Raptor 结构整体组成划分, 右图为 5G LDPC 标准中 BG2 的点图以及实现不同码率的扩展示意图。矩阵 D 是固定的大小为 4×4 的矩阵; O 为全零矩阵; I 为单位矩阵; $[A D]$ 共同构成了高码率矩阵, 在其基础上向 E 逐行扩展, 可以将高码率看成外码, 扩展的校验矩阵看成内码进行串行级联以实现降低码率的设计。根据上图可看出, 实现不同码率的过程是向下并向右进行矩阵拓展, 导致不同码率下最后通过编码获取的码字长度不同。接下来, 以高码率校验矩阵为基础通过缩短和扩展操作来实现固定编码长度条件下实现多码率的设计思路。

2.2 基于缩短与扩展条件下的多码率设计

所提出的多码率设计方案仍然采用类 Raptor 结构, 在构造过程中加入了缩短和扩展操作来实现不同码率条件下, 编码后码字拥有固定的长度。假设所给校验矩阵 H 的大小为 $M \times N$, 则其码率可表示为 $R = (N - M) / N$ 。构造过程中, 缩短操作可通过减少信息位的列数来降低信息长度, 但仅通过缩短操作就会改变编码后码字的长度, 为了实现固定码字长度, 通过扩展操作可在高码率条件下通过添加列向量和行向量来实现, 同时实现了降低码率的效果。扩展操作已在标准 5G LDPC 码的多码率设计过程中有所体现, 标准中, 在 $[A D]$ 高码率矩阵的基础上进行行向量和列向量扩展。

图 5 展示了通过缩短和扩展操作来实现多码率以及编码后码字长度固定的效果, 操作后的矩阵结构符合类 Raptor 结构的设计。根据图 5 所示, $A_{4 \times 8}$ 矩阵码率为 $R = 1/2$, D 矩阵为固定矩阵, 保持不变。通过缩短操作, 去掉靠近 D 矩阵左侧的列向量, 为保持矩阵编码后码字长度不变, 并保持类 Raptor 结构的设计, 在 D 矩阵右侧添加列向量, 可参考 BG2 矩阵所示, 所添加列向量是固定的且具有一定的规律, 即最后一位为 1, 其他全部为 0。接下来在矩阵底部添加行向量, 行向量的添加过程是基于 2.2 节基矩阵的设计与 2.3 节循环移位矩阵的设计过程进行添加, 根据码率的不同, 缩短列数与添加

列数与行数也发生相应的变化, 最终实现不同码率下的循环移位矩阵。

图 5 中, 子图 (a) 中矩阵 $A_{4 \times 8}$ 即为码率为 $R = 1/2$ 的高码率矩阵, 子图 (b) 演示了缩短与扩展的操作过程, 最终得到子图 (c) 中矩阵 $A_{5 \times 8}$, 码率为 $R = 3/8$, 实现了码率的降低, 子图 (d) 为再次缩短一行, 扩展一行及一列的过程, 实现码率为 $R = 1/4$ 的矩阵 $A_{6 \times 8}$, 码率得到进一步降低, 但是编码后的码字长度并未改变, 并符合类 Raptor 结构。

2.3 固定码长条件下的多码率 QC-LDPC 码设计仿真分析

根据 1.1 节基矩阵的设计方案以 5G LDPC 编码标准中 BG2 为蓝本对其前 14 列重新进行设计, 然后根据 1.2 节令 $GF(q)$ 中 q 为素数 769, 11 为其中一个本原元, 构造大小为 753×14 大小的循环系数表, 最后根据 1.3 节设计方案构造大小为 4×14 的循环移位矩阵形成高码率母本, 形成高码率母本后可根据 2.2 节的缩短和扩展方案进行固定编码长度的多码率设计, 根据码率的不同, 缩短与扩展的大小不同。根据上述过程形成的高码率母本码率为 $R = 5/7$, 再根据缩短和扩展方案缩短两列信息位并进行相应扩展形成码率为 $R = 4/7$ 、 $R = 3/7$ 的循环移位矩阵, 令移位尺寸 $Z = 28$ 时进行仿真对比, 如图 6 所示。

经过 1×10^5 帧次仿真, 每帧大小与需编码的信息位长度相同情况下进行仿真对比, 仿真结果显示, 码率越小, 性能越好, 可证明所提方案的有效性。由于所选移位尺寸较小, 不同码率之间的性能差距并不是很大。

3 不同码率条件下的仿真结果

IEEE802.11n 标准的编码特点保持了编码后码字长度的固定, 并根据行数增加实现不同码率, 且可实现相对较小的码字长度。综合第 1~2 节阐述的构造固定编码长度条件下多码率 QC-LDPC 设计过程, 结合天基物联场景下短码传输的特点, 通过上述过程进行不同码率的设计, 并与 IEEE802.11n 标准中相同移位尺寸, 对应码率条件下进行性能仿真对比。仿真过程中信道噪声采用 BI-AWGN, 译码方案采用 SPA 译码算法, 最大迭代次数为 50。

为与 IEEE802.11n 标准中不同码率条件下进行性能对

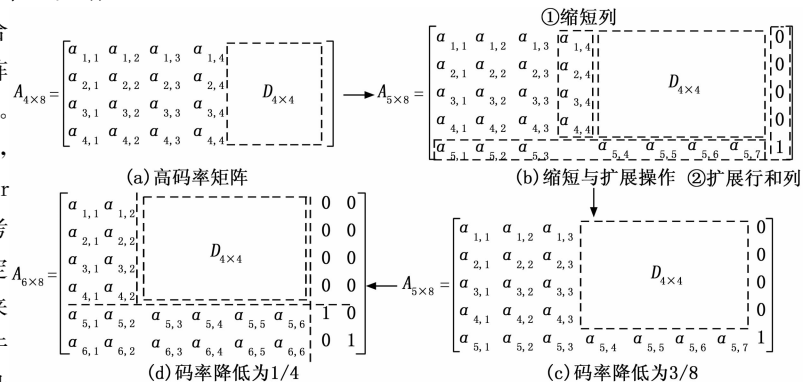


图 5 基于缩短和扩展的固定码长多码率设计过程图

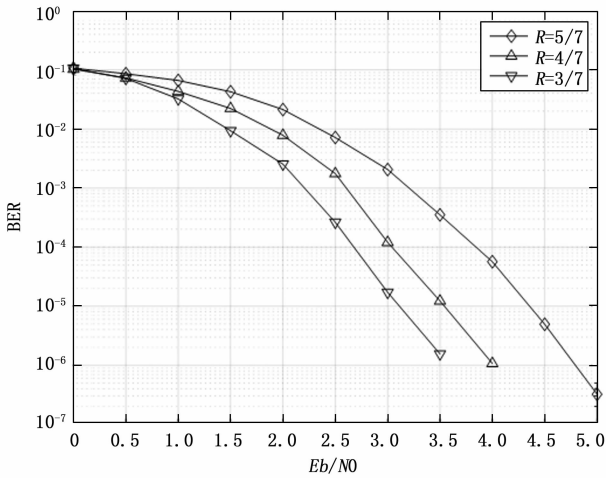


图 6 固定码长不同码率条件下的仿真图

比, 参照标准中校验矩阵大小, 结合上述构造过程进行循环移位矩阵的构造。所构造的高码率循环移位矩阵大小为 4×24 , 通过缩短与扩展操作实现不同码率。

表 1 不同码率条件下缩短与扩展大小列表

码率	缩短	扩展	循环移位矩阵大小
$R=5/6$	0 列	0 行	4×24
$R=2/3$	4 列	4 行	8×24
$R=1/2$	8 列	8 行	12×24

循环移位矩阵构造过程中, 令 $GF(q)$ 中 q 为素数 769, 选取本原元为 11, 移位尺寸 $Z=54$, 经过 1×10^5 帧次仿真, 每帧大小与需编码的信息位长度相同, 仿真结果如图 7 所示。

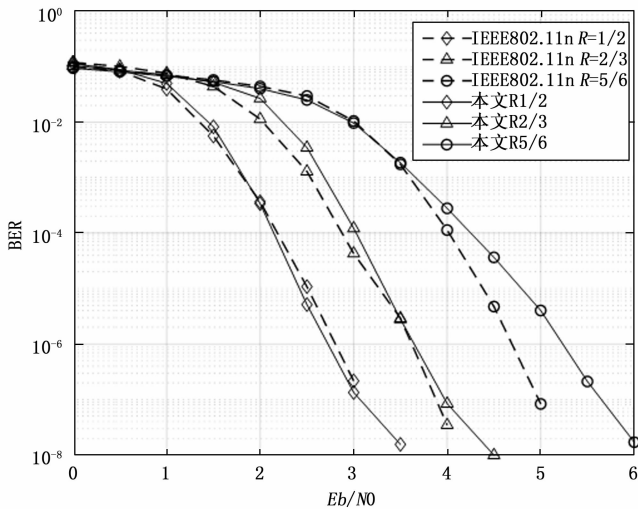


图 7 不同码率条件下的性能仿真对比图

仿真结果显示, 本文所提方案均能达到误比特率低于 10^{-7} , 可有效满足卫星通信高可靠性的要求。除在高码率高信噪比情况下性能有所下降外, 其他条件下与 IEEE802.11n 标准相同码率条件下性能相差很小, 所提方

案能达到预期的编码效果。

4 结束语

卫星通信网络与地面通信网络融合发展是未来通信网络发展的趋势, 卫星通信的发展目前正处于加速阶段。天基物联场景将从广域范围内进行数据采集与指令交互, 该场景数据传输的特点为小数据传输, 因此, 本文聚焦于短码传输, 借鉴 5G LDPC 编码标准类 Raptor 结构, 进行基矩阵设计与循环移位矩阵设计。此外, 参考 DVB-S2X 标准编码特点通过缩短与扩展操作实现固定编码长度下的多码率设计。本文提供了基本的设计思路并验证其有效性, 为天基物联场景下信道编码构造提供思路, 但在基矩阵设计过程中还可根据码率调整进一步优化, 循环移位矩阵的设计也可将多个移位尺寸条件考虑进去进行优化, 缩短与扩展的操作对于整个矩阵的影响还需要进一步深入研究, 这些内容可作为未来研究的方向。

参考文献:

- [1] DING J, JIAO J, HUANG J H, et al. Age-optimal network coding HARQ scheme for satellite-based internet of things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022; 21984 - 21998.
- [2] 3GPP TR 38.811 Version 15.2.0. Technical specification group radio access network; study on new radio (NR) to support non-Terrestrial networks (Release 15) [S]. San Diego: 3GPP, 2019.
- [3] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. LEO satellite constellation for Internet of Things [J]. IEEE access, 2017; 18391 - 18401.
- [4] 褚建杭. 低轨卫星物联网的鲁棒预编码技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [5] 张景, 魏肖, 吴云飞, 等. 天基物联网技术研究与综述 [J]. 无线电通信技术, 2021; 543 - 548.
- [6] SZCZECINSKI L, KHOSRAVIRAD S R, DUHAMEL P, et al. Rate allocation and adaptation for incremental redundancy truncated HARQ [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013; 2580 - 2590.
- [7] BERROU C, GLAVIEUX A. Near optimum error correcting coding and decoding; Turbo-codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 1996; 1261 - 1271.
- [8] GALLAGER R G. Low-density parity-check codes [J]. IRE Trans. Inf. Theory, 1962; 21 - 28.
- [9] ARIKAN E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009; 3051 - 3073.
- [10] NIE S K, LI G T, LIU X, et al. Research on LDPC channel coding technology in satellite communication system [C] // Xian; 2021 IEEE/ACIS 20th International Fall Conference on Computer and Information Science (ICIS Fall), 2021; 295 - 298.

(下转第 286 页)