

文章编号:1007-5321(2018)05-0092-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2018-161

面向5G的递增冗余 HARQ 传输方案研究

张睿, 朱敏, 张冀, 冯丹, 白宝明

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 西安 710071)

摘要: 针对原有固定重传起始位置方案所存在的问题, 基于第5代移动通信系统(5G)的混合自动重传请求(HARQ)传输策略, 提出了一种重传位置灵活可变的动态低密度校验码递增冗余 HARQ 传输方案. 与5G标准中的现有方案相比, 在每次传输长度相同的情况下, 该方案具有较低的译码复杂度和译码时延. 仿真结果表明, 所提出的方案在不同初传码率和不同调制方式下比5G现有方案均有一定的性能提升.

关键词: 低密度校验码; 第5代移动通信系统; 递增冗余; 混合自动重传请求

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

Study on 5G Incremental Redundancy HARQ Transmission Strategy

ZHANG Rui, ZHU Min, ZHANG Ji, FENG Dan, BAI Bao-ming

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the hybrid automatic repeat request (HARQ) transmission strategy, an incremental redundancy HARQ (IR-HARQ) retransmission scheme with flexible retransmission location suitable for the fifth generation of mobile communications system (5G) low-density parity-check (LDPC) codes was proposed. Compared with the existed scheme in 5G standard, this new transmission scheme has low decoding complexity and decoding delay for the same transmission length. Simulation results also showed that the proposed IR-HARQ scheme outperformed the 5G HARQ retransmission scheme over the additive white Gaussian noise (AWGN) channel with different modulation constellations and different transmission code rates.

Key words: low-density parity-check codes; the fifth generation of mobile communications system; incremental redundancy; hybrid automatic repeat request

信道编码技术是实现第5代移动通信系统(5G)需求和目标的一项关键技术. 在2016年11月的3GPP RAN 87会议^[1]上, 对5G增强移动宽带(eMBB, enhanced mobile broadband)数据信道和控制信道的候选码类进行了最终的评估. 在通过对性能、吞吐量、硬件实现的复杂度和能耗等方面进行全面评估之后, 确定了5G eMBB场景数据信道采用二

元低密度校验(LDPC, low-density parity-check)码^[2], 控制信道采用polar码. 5G中无线信道的不断变化对系统资源配置的灵活性产生了一定需求, 对此, 可以通过自适应编码调制、功率控制、混合自动重传请求(HARQ, hybrid automatic repeat request)等技术来适应信道的特性.

笔者针对5G eMBB数据信道提出一种递增冗

收稿日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771364, 61372074); 国家自然科学基金青年科学基金项目(61701368); 西安电子科技大学研究生创新基金项目(B182001)

作者简介: 张睿(1987—), 女, 博士生, E-mail: ruizhang53@stu.xidian.edu.cn; 白宝明(1966—), 男, 教授, 博士生导师.

余 HARQ 传输方案,建立系统模型,并进行仿真分析.

1 5G LDPC 码

LDPC 码是一类线性分组码,由一个包含少量非零元素的 $m \times n$ 校验矩阵 H 的零空间定义. 若矩阵 H 中的非零元素仅为 1,则将矩阵 H 的零空间定义的 LDPC 码称为二元 LDPC 码^[3]. 随机构造的 LDPC 码的存储和编译码过程都比较复杂,因此,实际应用的 LDPC 码一般应具有一定的结构特征.

5G eMBB 场景数据信道采用的 LDPC 码是一类具有 Raptor-like 结构的速率兼容准循环 LDPC 码^[4-6],其校验矩阵结构如图 1(a)所示,子矩阵 A 和子矩阵 E 由循环置换矩阵和全零矩阵组成, D 是具有双对角结构的矩阵, O 为全零矩阵, I 为单位阵.

基于此矩阵结构,3GPP 确定了 2 个速率兼容的基图(BG, base graph):BG1 和 BG2^[7]. BG1 支持的最高码率为 8/9,其大小为 46×68 ;而 BG2 支持的最高码率为 2/3,其大小为 42×52 ;BG1 和 BG2 具有类似的结构.

3GPP 针对 LDPC 码给出 2 种不同的基图,而针对 BG1 和 BG2 的码块划分直接关系到编码器的使用. 如图 1(b)所示,BG1 适用于信息位长度区间 $(3\ 840, 8\ 448]$ bit,且初传码率 $R_0 > 0.25$;或信息位长度区间 $(308, 8\ 448]$ bit,且 $R_0 > 0.67$. BG2 适用于信息位长度区间 $(0, 3\ 840]$ bit 且 $R_0 \leq 0.67$;或信息位长度区间 $(0, 308]$ bit,且 $0.67 < R_0 \leq 0.95$. 标准中规定初传码率 $R_0 > 0.95$,则译码器不工作^[8].

3GPP 标准^[8]中最终确定了每个基图包含了 8

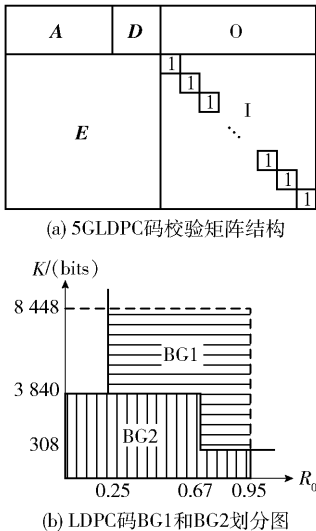


图 1 5G LDPC 码校验矩阵结构及 BG 划分图

个移位尺寸集合,每个移位尺寸集合对应一个循环移位矩阵. 每一个循环移位矩阵又可以通过取模运算得到多个不同移位尺寸的校验矩阵,对应关系如表 1 所示.

表 1 循环移位矩阵与其支持的移位尺寸的对对应关系

循环移位矩阵	移位尺寸(Z)							
p_1	2	4	8	16	32	64	128	256
p_2	3	6	12	24	48	96	192	384
p_3	5	10	20	40	80	160	320	
p_4	7	14	28	56	112	224		
p_5	9	18	36	72	144	288		
p_6	11	22	44	88	176	352		
p_7	13	26	52	104	208			
p_8	15	30	60	120	240			

2 5G HARQ 模型和传输方案

基于上述的可变码率 LDPC 码,5G 通信系统结合自动重传请求(ARQ, automatic repeat request)技术给出了自适应可靠传输方案.

5G HARQ 系统模型如图 2 所示,信道估计与控制模块根据当前的信道状态信息选择合适的传输码率和调制阶数,数据分段模块根据传输码率选择 BG1/BG2. 发端缓存模块即循环缓存区,存储编码后的比特. 速率匹配模块的作用是,根据 HARQ 控制模块返回的重传请求来选择合适的重传顺序和冗余版本等信息,然后将重传的信息进行比特交织.

“循环”是指一次传输从循环缓存区中指定的开始点发起,依次读取 N 个比特,当读取长度超过

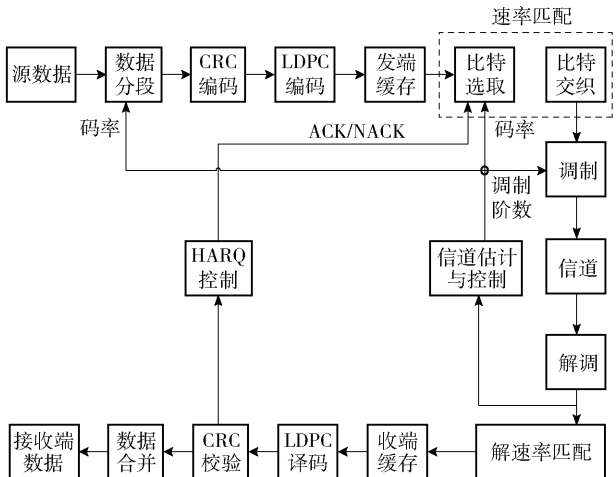


图 2 5G HARQ 系统模型

缓存区长度,比特数仍然没有达到 N ,读取指针则跳转至循环缓存区的头部继续读取数据,直至比特数达到 N . 如果初传码率低于 BG1 和 BG2 的最低码率或者需要第 2、3、4 次传输时,会要求重复发送部分编码位,本文称之为重复位. 重复位是根据循环缓存区的存储位置顺序选取的,在译码端如果接收到重复位的解调信息,则需要将该部分信息与之之前收到的信息 Chase 合并.

3GPP 确定的 5G HARQ 传输方案^[8,9]如图 3 所示,其中 kT 表示第 k 次传输($k=1,2,3,4$). 循环缓冲区存储着除了前 $2Z$ 个打孔信息位以外所有的编码比特. 前 $2Z$ 个信息位的列重较大,因此即使不发送,也可以很大概率被恢复出来. 最终标准中所定义的循环缓冲区内不包含前 $2Z$ 个信息比特.

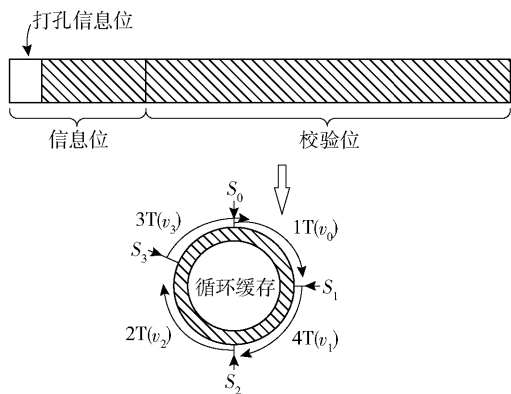


图 3 5G 标准循环缓冲区重传图

3GPP 还规定其 HARQ 冗余版本 (RV, redundancy version) 为 4 个^[8,10-11],定义 4 次传输的冗余版本为 v_0, v_1, v_2 和 v_3 . 对于 BG1 冗余版本 v_i 的传输起始位置 $\{S_i = \{0, 17, 33, 56\} \times Z, 0 \leq i \leq 3\}$, BG2 冗余版本 v_i 的传输起始位置为 $\{S_i = \{0, 13, 25, 43\} \times Z, 0 \leq i \leq 3\}$. 所确定的最大传输次数为 4 次,冗余版本的传输顺序延续了 4G LTE 方案,即 $\{v_0, v_2, v_3, v_1\}$.

3 改进的 HARQ 传输方案

静态固定重传起始位置会导致重传时冗余比特的重复和缺失,而 $\{v_0, v_2, v_3, v_1\}$ 的重传顺序又会增加系统的译码复杂度. 因此,笔者提出了以下改进重传方案.

所采用的是递增冗余 HARQ 策略^[12],即根据系统要求的初传码率和信息位长度得出所需发送的比特数,第 1 次传输发送信息比特和一部分冗余比特,而通过重传发送额外的冗余比特. 如果第 1 次传输

没有成功译码,则发送端从上次传输结束的位置开始顺序地重传新的冗余比特以降低码率,从而实现更高的译码成功率. 在接收端,采用递增冗余 (IR, incremental redundancy) 合并的方式,将接收到的所有数据进行合并,送入译码器. 如果加上重传的冗余比特仍然无法正确译码,则进行再次重传. 直至达到最大重传次数,若接收端仍不能成功译码,则交到上层处理.

改进的循环缓冲区动态传输方案如图 4 所示,在循环缓冲区同样存储着除了前 $2Z$ 个打孔信息位以外所有的编码比特,在传输长度相同的情况下,每次传输起始位置可以通过式(1)求得:

$$S_i = \text{mod} \left(\frac{K}{R_0} i, (N_z - 2)Z \right), 0 \leq i \leq 3 \quad (1)$$

其中: K 是信息位长度; N_z 表示所选取 BG 的列数,对于 BG1, $N_z = 68$; 对于 BG2, $N_z = 52$. 传输次数同样选取 4 次,因此,可以根据初传码率动态地选取每次传输的起始位置,这样就会避免出现在重传时校验位重复发送或者校验位缺失的情况.

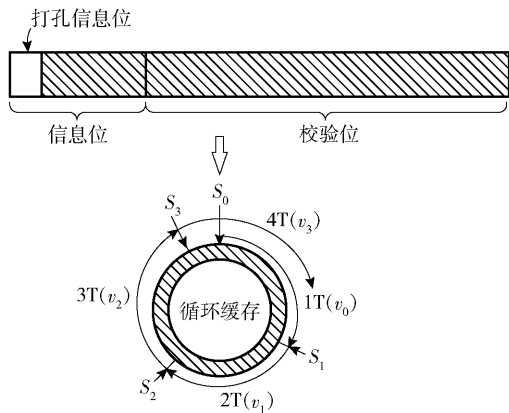


图 4 循环缓冲区动态重传示意图

所采用的冗余版本传输顺序为 $\{v_0, v_1, v_2, v_3\}$,相比较于 5G 标准所确定的 $\{v_0, v_2, v_3, v_1\}$ 传输顺序,具有较低的译码复杂度和译码时延. 令每次传输比特数为 N ,前 $2Z$ 比特的打孔位不进行传输,如图 5(a) 所示,5G 标准中的方案在第 2 次传输时需要发送 v_2 ,即从 S_2 位开始发送比特数为 N ,所以此时译码所需的矩阵为 \mathbf{H}_{2T}^{5G} . 而笔者给出的方案如图 5(b) 所示,在第 2 次传输时需要发送 v_1 ,即从第 1 次传输结束的位置起继续发送 N 比特信息,此时译码所需的矩阵为 \mathbf{H}_{2T}^{IR} . 显然,矩阵 $|\mathbf{H}_{2T}^{5G}| \geq |\mathbf{H}_{2T}^{IR}|$.

不同初传码率下空缺位所占比例如图 6 所示,5G 传输策略固定了传输的起始位置和 $\{v_0, v_2, v_3,$

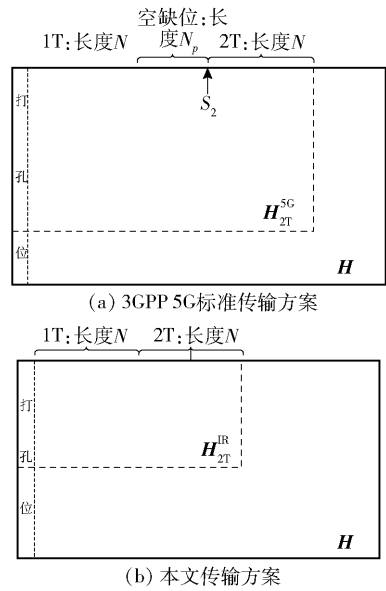


图 5 重传矩阵大小示意图

$v_1\}$ 的传输顺序,导致在第 2 次传输和第 3 次传输时会出现中间一部分没有发送的校验位,笔者称之为空缺位。由于空缺位的出现,现有 5G HARQ 方案会额外增加译码复杂度。

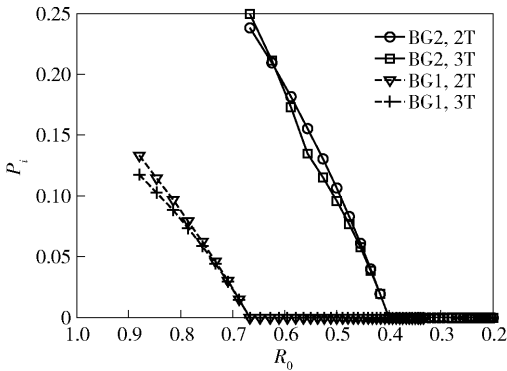


图 6 不同初传码率下空缺位所占比例示意图

下面对复杂度进行定性分析。令 $\mathcal{O}(\mathbf{H})$ 为校验矩阵 \mathbf{H} 的译码复杂度,在校验矩阵 \mathbf{H} 确定的情况下,第 i 次传输后的译码复杂度 $\mathcal{O}(\mathbf{H}_{iT}^{5G})$ 是随矩阵大小的增加而增加, N_{iT}^{5G} 表示译码矩阵为 \mathbf{H}_{iT}^{5G} 时矩阵的列数。因此,假定迭代次数相近,而译码复杂度 $\mathcal{O}(\mathbf{H}_{iT}^{5G})$ 会随着矩阵列数 N_{iT}^{5G} 增加而增加。在初传码率确定的情况下,2 种方案在第 1 次传输时发送的信息相同,所以在第 1 次译码时,使用的矩阵大小也是一致的。在第 4 次传输时,2 种方案均循环至循环缓冲区的起始位置,因此,此时译码矩阵均为 \mathbf{H} ,即 2 种方案在第 1 次传输和第 4 次传输后的译码复杂度相同。所以,在此只需比较第 2 次传输和第 3 次

传输后的译码复杂度。定义空缺位所占译码矩阵列数的比例为

$$P_i = N_p / N_{iT}^{5G}, \quad i = 2, 3 \tag{2}$$

其中 N_p 表示空缺位所占的列数。可以看出, P_i 越大,所需额外的译码代价越高。

由图 6 可见,在初传码率 $R_0^{BG2} > 2/5, R_0^{BG1} > 2/3$ 时,第 2 次和第 3 次传输后均会存在空缺位,而且初传码率越高,重传后 P_i 越大,即所需额外的译码代价越高。所提出的传输方案较 3GPP 5G 现有方案相比,是动态地选取重传起始位置,每次传输的起始位置是从上一次传输结束位置的后一个比特开始的,因此避免了空缺位,有效地降低了译码复杂度和译码时延。

4 仿真结果与分析

仿真中选择 5G LDPC 码,采用 3GPP 5G eMBB 数据信道传输方案、本文传输方案以及三星公司所给出传输方案^[13]进行对比分析。选取 BG1 中 $Z = 32$ 和 BG2 中 $Z = 72$ 的 LDPC 码,具体参数如表 2 所示。假设信道模型为 AWGN 信道,译码器采用和积译码算法(SPA, sum-product algorithm),最大迭代次数设置为 50 次。

表 2 仿真具体参数

图 7 编号	基图	移位尺寸 Z	信息位长度 K	初传码率 R_0	调制方式
(a)	BG1	32	704	8/9	QPSK
(b)	BG2	72	720	1/2	QPSK
(c)	BG2	72	720	2/3	QPSK
(d)	BG2	72	720	2/3	64QAM

图 7 给出了传输方案性能对比。从图 7(a) ~ (c)可以看出,与 3GPP 5G 标准相比,笔者所提出的方案在第 2 次传输时具有与其相近的性能,但具有更低的译码复杂度;而对于第 3 次传输,在初传码率 $R_0^{BG2} = 1/2$ 时,较 5G 标准有约 0.15 dB 的增益,且随着初传码率的增加,在 $R_0^{BG2} = 2/3, R_0^{BG1} = 8/9$ 时,与 5G 标准相比,均有约 0.4 dB 的增益。从图 7(d)可以看出,在调制方式为 64QAM 时,笔者所提出的传输方案较 3GPP 5G 传输方案同样也具有一定的增益。从图 7(b) ~ (d)也可以看出,笔者所提出的方案较三星公司所提出的方案,在第 2、3 次传输时性能也均有提升。

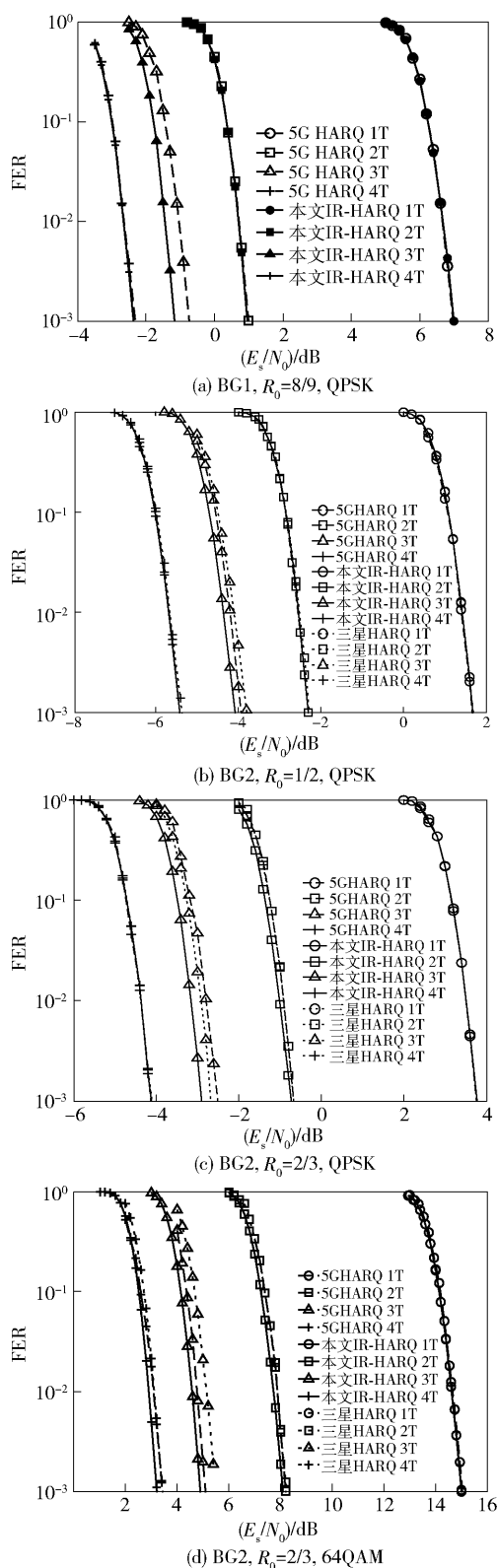


图7 3种传输方案性能对比

5 结束语

针对原有固定重传起始位置方案所存在的问

题,笔者提出了一种根据初传码率动态选取重传起始位置的改进方案,基于此方案给出了冗余版本的传输顺序。笔者所提出的传输方案较3GPP 5G现有方案具有较低的译码复杂度和译码时延。仿真结果表明,所提出的传输方案较3GPP 5G现有方案在不同初传码率和不同调制方式下均有一定的性能增益。

参考文献:

- [1] 3GPP TSG RAN WG1. Chairman's notes of agenda item 7.1.5 channel coding and modulation (Meeting #87) [EB/OL]. Reno; 3GPP, 2016 [2018-07-01]. http://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_87/Docs/R1-1613710.zip.
- [2] Gallager R G. Low-density parity-check codes [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.
- [3] Ryan William E, Lin Shu. 信道编码:经典与现代[M]. 白宝明, 马啸, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017: 171-172.
- [4] Li J E, Liu K K, Lin S, et al. Algebraic quasi-cyclic LDPC codes: construction, low error-floor, large girth and a reduced-complexity decoding scheme [J]. IEEE Transactions on Communication, 2014, 62(8): 2626-2637.
- [5] Chen T Y, Vakilinia K, Divsalar D. Protograph-based raptor-like LDPC codes [J]. IEEE Transactions on Communication, 2015, 63(5): 1522-1532.
- [6] Richardson T, Kudekar S. Design of low-density parity check codes for 5G new radio [J]. IEEE Communications Magazines, 2018, 56(3): 28-34.
- [7] 3GPP TSG RAN WG1. Chairman's notes of agenda item 7.1.4 channel coding (Meeting #89) [EB/OL]. Hangzhou; 3GPP, 2017 [2018-07-01]. http://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_89/Docs/R1-1709681.zip.
- [8] 3GPP TSG RAN WG1. Multiplexing and channel coding (Release 15): 3GPP TS 38.212 V15.1.1-2018 [S]. France; 3GPP, 2018: 28.
- [9] 3GPP TSG RAN WG1. Chairman's notes of agenda item 6.1.4 channel coding (Meeting #90) [EB/OL]. Prague; 3GPP, 2017 [2018-07-01]. http://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_90/Docs/R1-1715121.zip.
- [10] 3GPP TSG RAN WG1. Chairman's notes of agenda item 6.1.4 channel coding (Meeting Adhoc#3) [EB/OL]. Nagoya; 3GPP, 2017 [2018-07-01]. http://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_90/Docs/R1-1715121.zip.

- 3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_AH/NR_AH_1709/Docs/R1-1716868.zip.
- [11] 3GPP TSG RAN WG1. Chairman's notes of agenda item 7.4 channel coding (Meeting #90bis) [EB/OL]. Prague: 3GPP, 2017 [2018-07-01]. http://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_90b/Docs/R1-1719116.zip.
- [12] Zhu M, Bai B M, Dou J F, et al. Kite code-based incremental redundancy hybrid ARQ scheme for fast-fading channels [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59 (35): 5029-5041.
- [13] Samsung, 3GPP TSG RAN WG1. RV order for special case [EB/OL]. Prague: 3GPP, 2017 [2018-07-01]. http://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_90b/Docs/R1-1717681.zip

(上接第91页)

系统实现的实际问题。笔者提出的 MEC 联合部署架构可以充分利用网络中的设备资源,以智能 DNS 和 RESTful 接口实现基于服务的架构,从而满足 5G 场景下苛刻的性能指标和拓展性要求。通过实验测试表明,联合部署架构能够在同样的资源配置下,能够根据业务特性分配合理的 MEC 节点,一定程度上减少用户请求的响应时间。

参考文献:

- [1] Hu Y C, Patel M, Sabella D, et al. Mobile edge computing-a key technology towards 5G[EB/OL]. Sophia Antipolis: ETSI, 2015 [2018-08-08]. https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp11_mec_a_key_technology_towards_5g.pdf.
- [2] 3GPP. 3GPP TS 23. 501—2018, System architecture for the 5g system (Release 15) [S]. Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2018: 127.
- [3] Markakis E K, Karras K, Sideris A, et al. Computing, caching, and communication at the edge: the cornerstone for building a versatile 5G ecosystem[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(11): 152-157.
- [4] Satyanarayanan M, Bahl V, Caceres R, et al. The case for vm-based cloudlets in mobile computing [J]. IEEE Pervasive Computing, 2009, 8(4): 14-23.
- [5] Lertsinsrubtavee A, Ali A, Molina-Jimenez C, et al. Pi-Casso: a lightweight edge computing platform [C] // 2017 IEEE 6th International Conference on Cloud Networking (CloudNet). Prague: IEEE Press, 2017: 1-7.
- [6] Huang A, Nikaein N, Stenbock T, et al. Low latency MEC framework for SDN-based LTE/LTE-A networks [C] // 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [7] Lee S Q, Kim J. Local breakout of mobile access network traffic by mobile edge computing [C] // 2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju: IEEE Press, 2016: 741-743.
- [8] Fielding, Thomas R. Architectural styles and the design of network-based software architectures [D]. Irvine: University of California, 2000.