

5G NR 控制信道容量能力综合分析

Comprehensive Analysis of Capacity Capability of 5G NR Control Channel

张建国¹,徐恩¹,黄正彬²(1. 华信咨询设计研究院有限公司,浙江 杭州 310014;2. 中国移动通信集团广西有限公司玉林分公司,广西 玉林 537000)

Zhang Jianguo¹,Xu En¹,Huang Zhengbin²(1. Huaxin Consulting Co.,Ltd.,Hangzhou 310014,China;2. China Mobile Group Guangxi Co.,Ltd. Yulin Branch,Yulin 537000,China)

摘要:

首先分析了PDCCH的结构、DCI格式和容量能力,当配置的OFDM符号是1、2、3个时,可用的CCE数分别是45、90、135个,可用的PDCCH数分别是11~22、22~45、33~67个。然后分析了PUCCH的格式、UCI的负荷和每个PUCCH格式的容量能力,同一个PRB上可以复用1~12个PUCCH格式0;同一个PRB上可以复用12~84个PUCCH格式1;根据PUCCH的长度和分配的PRB数,PUCCH格式2可用bit数是16~512;PUCCH格式3可用bit数是24~4 608;同一个PRB上可以复用2个或4个PUCCH格式4,1个PUCCH格式4可用的bit数是6~144。

Abstract:

Firstly, it analyzes the structure, DCI format and capacity capability of PDCCH. When the number of OFDM symbols is 1, 2 and 3, the available CCE number is 45, 90 and 135 respectively, and the available number PDCCH is 11~22, 22~45, 33~67 respectively. Then it analyzes PUCCH format, the payload of UCI and capacity capability for every PUCCH format. There are 1~12 UEs multiplexing in the same PRB for PUCCH format 0. There are 12~84 UEs multiplexing in the same PRB for PUCCH format 1. According to the length of PUCCH and the number of PRB assigned, there are 16~512 bits for PUCCH format 2 and 24~4 608 bits for PUCCH format 3. There are 2 or 4 UEs multiplexing in the same PRB for PUCCH format 4 and 6~144 bits for one PUCCH format 4.

Keywords:

5G NR; PDCCH; PUCCH; DCI; UCI; Capacity capability

关键词:

5G NR; PDCCH; PUCCH; DCI; UCI; 容量能力
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.09.010
中图分类号: TN929.5
文献标识码: A
文章编号: 1007-3043(2019)09-0045-06

引用格式:张建国,徐恩,黄正彬. 5G NR控制信道容量能力综合分析[J]. 邮电设计技术,2019(9):45-50.

0 引言

与LTE相比,5G NR控制信道的时域和频域位置更加灵活,既可以承载小的负荷,也可以承载大的负荷,其容量计算方法也与LTE有较大的不同,本文接下来分析5G NR控制信道的容量能力。

本文假定系统带宽是100 MHz,子载波间隔是30 kHz,共计有273个PRB^[1]。

1 PDCCH的容量能力分析

1.1 PDCCH结构

PDCCH在控制资源集合(CORESET——Control Resource Set)区域上传输,CORESET在频域上占用 $N_{RB}^{CORESET}$ 个PRB,根据3GPP TS 38.331协议^[7], $N_{RB}^{CORESET}$ 最大取值为270,在时域上占用 $N_{\text{sym}}^{CORESET} \in \{1, 2, 3\}$ 个OFDM符号。

一个UE可以分配1~3个CORESET,本文接下来以1个CORESET为例来分析PDCCH的容量。

收稿日期:2019-06-03

一个PDCCH由1个或者多个控制信道单元(CCE——Control Channel Element)组成, PDCCH包括的CCE数也即PDCCH的聚合等级是{1, 2, 4, 8, 16}之一, 一个CCE由6个REG组成, 一个REG在频域上占用1个RB, 在时域上占用1个OFDM符号。假设 $N_{RB}^{CORESET}=270$, 当配置的OFDM符号是1、2和3个时, 可用的CCE数分别是45、90和135个^[2]。

PDCCH和解调参考信号(DM-RS)是频分复用关系^[2], 其结构如图1所示。

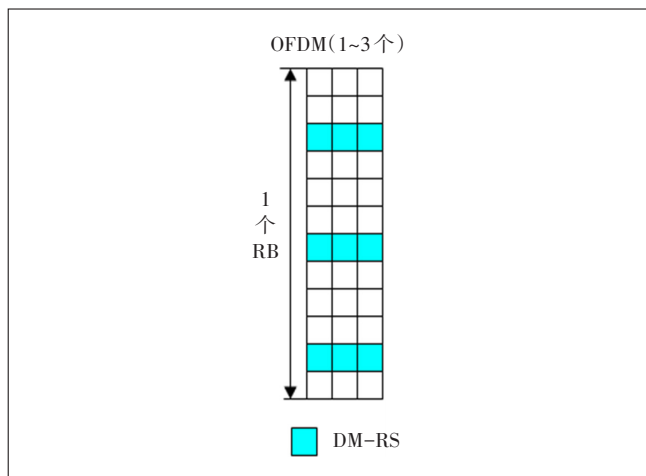


图1 PDCCH结构

1个RB有12个RE, 其中3个RE用于DM-RS, 剩余的9个RE用于PDCCH, 采用QPSK调制, 1个REG可用的bit数是18。不同聚合等级的PDCCH的CCE数、REG数、RE数、可用的bit数如表1所示。

表1 不同聚合等级PDCCH的CCE、REG、RE和可用bit数

聚合等级	CCE/个	REG/个	RE/个	可用bit数/个
1	1	6	54	108
2	2	12	108	216
4	4	24	216	432
8	8	48	432	864
16	16	96	864	1 728

1.2 DCI格式

5G NR的下行控制信息(DCI)格式共有3大类, 分别是DCI格式0、1、2, 其中DCI格式0用于调度PUSCH, DCI格式1用于调度PDSCH, DCI格式2用于其他目的^[3]。

每种DCI传输的信息单元(Information Element)是不固定的, 与5G NR的L1层参数配置、复用的用户数(对于DCI格式2)密切相关。信息单元包括频域资源

指配、时域资源指配、天线端口数、传输块信息、预编码信息和层数等, 有些信息单元的尺寸是固定的, 有些信息单元的尺寸是可变的, 其中频域资源指配的尺寸变化较大, 本文接下来分析频域资源指配的影响因素^[3]。

频域资源指配的尺寸由BWP(Bandwidth Part)的带宽、频域资源分配类型2个因素共同决定。

BWP是系统带宽的一个子集, 上行和下行各可以配置最多4个BWP, 每个BWP由频域位置和带宽、子载波间隔、CP(常规CP、扩展CP)3部分组成, 在某一个时刻, 每个UE只能有1个上行和1个下行BWP被激活。BWP的带宽最大为系统带宽, 本文假定BWP的带宽等于系统带宽即 $N_{RB}^{BWP}=273$ 个PRB^[7]。

PDSCH或PUSCH的频域资源分配类型有2种, 分别是type 0和type 1^[5]。

Type 0是位图类型, 以RBG为单位分配频域资源, RBG的大小与BWP的带宽有关, 取值是{2, 4, 8, 16}个PRB, 当 $N_{RB}^{BWP}=273$ 时, RBG的取值是16, 可以用 $N_{RBG}=\lceil N_{RB}^{BWP}/16 \rceil=18$ bit来指示, 每个bit对应着1个RBG。

Type 1是连续RB分配类型, 由RIV(Resource Indication Value)来指示分配的PRB的开始位置和长度, 当 $N_{RB}^{BWP}=273$ 时, 可以用 $\lceil \log_2(N_{RB}^{BWP}(N_{RB}^{BWP}+1)/2) \rceil=16$ bit来指示。

DCI格式0_0和DCI格式1_0只能用type 1, 频域资源指配是16 bit; DCI格式0_1和DCI格式1_1既可以用type 0也可以用type 1, 频域资源指配是 $\max\{16, 18\}+1=19$ bit^[3]。

其他信息单元的尺寸按照最大值计取, DCI格式0和DCI格式1的负荷分别如表2和表3所示。

DCI格式2_0用于向一组UE通知时隙格式, 最大负荷是128 bit; DCI格式2_1用于向一组UE通知不可用的PRB和OFDM符号, 最大负荷是126 bit; DCI格式2_2用于向一组UE通知PUCCH和PUSCH的TPC命令; DCI格式2_3用于传输一组被1个或多个UE使用的SRS的TPC命令^[3]。本文假定DCI格式2的负荷是128 bit。

1.3 PDCCH的容量能力分析

第1.2节计算出来的DCI负荷, 还要经过CRC添加、信道编码和速率匹配3个步骤后才在PDCCH上传输。

表2 DCI格式0的负荷

信息单元	DCI格式0_0	DCI格式0_1	备注
载波指示	-	3	0或3 bit
UL/SUL指示	1	1	DCI格式0_0是1 bit; DCI格式0_1是0或1 bit
DCI格式指示	1	1	用于区分DL DCI和UL DCI
BWP指示	-	2	0、1或2 bit
频域资源指配	16	19	-
时域资源指配	4	4	DCI格式0_1是0~4个bit; DCI格式0_0未定义, 假定也是4 bit
VRB-to-PRB映射	-	1	0或1个bit
频率跳频标签	1	1	DCI格式0_0是1个bit; DCI格式0_1是0或1个bit
MCS	5	5	-
新数据指示	1	1	-
冗余版本	2	2	-
HARQ进程	4	4	-
第1个下行指配指示	-	2	1或2 bit
第2个下行指配指示	-	2	0或2 bit
PUSCH的TPC命令	2	2	DCI格式0_0是0或2 bit; DCI格式0_1是2 bit
SRS资源指示	-	5	与SRS数和PUSCH支持的最大层数有关
预编码信息和层数	-	6	0~6 bit
天线端口	-	5	2~5 bit
SRS请求	-	2	-
CSI请求	-	6	0~6个bit
CBG传输信息	-	8	0、2、4、6或8 bit
PTRS-DMRS关联	-	2	0或2 bit
beta_offset指示	-	2	0或2 bit
DMRS序列初始化	-	1	0或1 bit
合计	37	87	-

CRC是16 bit, 假定信道编码速率是1/3, DCI格式0_0需要的bit数是 $(37+16) \times 3 = 159$, DCI格式0_1需要的bit数是 $(87+16) \times 3 = 309$ 个, DCI格式1_0需要的bit数是 $(44+16) \times 3 = 180$ 个, DCI格式1_1需要的bit数是 $(88+16) \times 3 = 312$ 个, DCI格式2需要的bit数是 $(128+16) \times 3 = 432$ 个。

根据表1, 可知DCI格式0_0、DCI格式0_1、DCI格式1_0、DCI格式1_1、DCI格式2需要的CCE数分别是2、4、2、4、4个。当配置的OFDM符号是1、2和3个时, 可用的PDCCH数如表4所示。

2 PUCCH的容量能力分析

PUCCH共有5种格式, 分别是PUCCH格式0~4^[2]。PUCCH格式0的长度是1或2个OFDM符号, 在

表3 DCI格式1的负荷

信息单元	DCI格式1_0	DCI格式1_1	备注
载波指示	-	3	0或3 bit
DCI格式指示	1	1	用于区分DL DCI和UL DCI
BWP指示	-	2	0、1或2 bit
频域资源指配	16	19	-
时域资源指配	4	4	DCI格式1_1是0~4 bit; DCI格式1_0未定义, 假定也是4 bit
VRB-to-PRB映射	1	1	DCI格式1_0是1 bit; DCI格式1_1是0或1 bit
PRB捆绑尺寸指示	-	1	0或1 bit
速率匹配指示	-	2	0、1或2 bit
ZP CSI-RS触发	-	2	0、1或2 bit
传输块1	-	-	-
MCS	5	5	-
新数据指示	1	1	-
冗余版本	2	2	-
传输块2	-	-	-
MCS	-	5	-
新数据指示	-	1	-
冗余版本	-	2	-
HARQ进程	4	4	-
下行指配指示	2	4	DCI格式1_0是2 bit; DCI格式1_1是0、2或4 bit
PUCCH的TPC命令	2	2	DCI格式1_0是0或2 bit; DCI格式1_1是2 bit
PUCCH资源指示	3	3	-
PDSCH-to-HARQ反馈定时指示	3	3	DCI格式1_0是0或3 bit; DCI格式1_1是3 bit
天线端口	-	6	4、5或6 bit
传输配置指示	-	3	0或3 bit
SRS请求	-	2	-
CBG传输信息	-	8	0、2、4、6或8 bit
CBG清除信息	-	1	0或1 bit
DMRS序列初始化	-	1	-
合计	44	88	-

表4 可用的PDCCH数(个)

OFDM符号	可用的CCE数	DCI格式				
		0_0	0_1	1_0	1_1	2
1	45	22	11	22	11	11
2	90	45	22	45	22	22
3	135	67	33	67	33	33

频域上占用1个PRB, 最多传输2 bit的上行控制信息(UCI——Uplink Control Information)负荷, 同一个PRB可以复用多个PUCCH格式0。

PUCCH格式1(含DM-RS)的长度是4~14个

OFDM符号,在频域上占用1个PRB,最多传输2 bit的UCI负荷,同一个PRB可以复用多个PUCCH格式1。

PUCCH格式2的长度是1或2个OFDM符号,在频域上占用1个或多个PRB,传输大尺寸的UCI负荷,同一个PRB只能传输1个PUCCH格式2。

PUCCH格式3(含DM-RS)的长度是4~14个OFDM符号,在频域上占用1个或多个PRB,传输大尺寸的UCI负荷,同一个PRB只能传输1个PUCCH格式3。

PUCCH格式4(含DM-RS)的长度是4~14个OFDM符号,在频域上占用1个PRB,传输中等尺寸的UCI负荷,同一个PRB可以复用多个PUCCH格式4^[6]。

PUCCH格式0~4的总结如表5所示。

表5 PUCCH格式0~4的总结

PUCCH格式	长度(含DM-RS)	PRB数	bit数	调制方式	是否在同一个PRB上复用
0	1~2	1	≤2	/	是
1	4~14	1	≤2	BPSK或QPSK	是
2	1~2	1个或多个	>2	QPSK	否
3	4~14	1个或多个	>2	QPSK或 $\pi/2$ -BPSK	否
4	4~14	1	>2	QPSK或 $\pi/2$ -BPSK	是

UCI的负荷包括3类信息,分别是调度请求(SR)、HARQ-ACK和信道状态信息(CSI)。SR用于UE通知gNB是否需要上行资源以便PUSCH的传输,如果UE有上行数据需要传输,则发送SR,如果UE没有上行数据需要传输,则不发送SR,因此SR只需要1个状态即可。HARQ-ACK用于UE通知gNB,PDSCH是否正确解码,如果PDSCH只传输1个传输块(TB),则HARQ-ACK是1 bit,如果PDSCH传输2个TB,则HARQ-ACK是2 bit。CSI用于传输RI、PMI和CQI,其需要的bit数与宽带模式或子带模式、天线端口数、码本配置、子带数目等有关系^[4]。

PUCCH格式0~4的容量能力分析方法不尽相同,对于PUCCH格式0和格式1,分析同一个PRB可以复用的PUCCH数目;对于PUCCH格式2和格式3,分析1个PUCCH可用的bit数;对于格式4,分析同一个PRB可以复用的PUCCH数目以及每个PUCCH可用的bit数。PUCCH可用的bit数是信道编码后的bit数,实际传输的有效信息还要考虑信道编码速率和CRC等因素。

2.1 PUCCH格式0

PUCCH格式0没有DM-RS,其结构如图2所示。

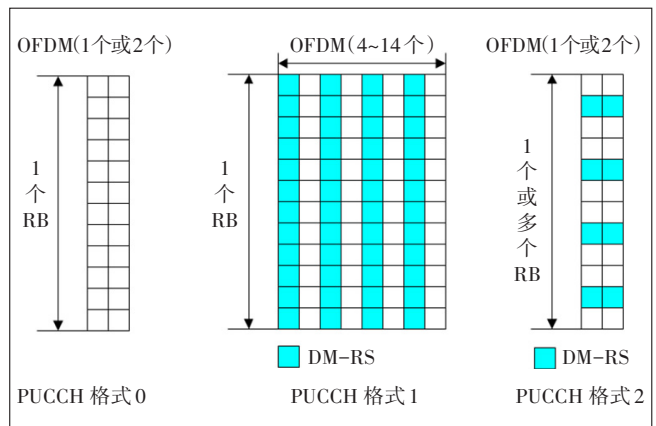


图2 PUCCH格式0、格式1和格式2

PUCCH格式0通过ZC序列的不同循环移位(CS——Cyclic Shift)来传递信息,ZC序列共有12个不同的CS,因此可以传递12个信号^[2]。

同一个PRB可以复用的PUCCH格式0的数目与UCI有关。

a) 仅传输HARQ-ACK,传输1 bit的HARQ-ACK需要2个CS,同一个PRB最多复用6个PUCCH格式0;传输2 bit的HARQ-ACK需要4个CS,同一个PRB最多复用3个PUCCH格式0。

b) 仅传输SR,只需要1个CS,同一个PRB最多复用12个PUCCH格式0。

c) HARQ-ACK和SR同时传输,如果HARQ-ACK是1 bit,传输HARQ-ACK和1个正的SR、传输HARQ-ACK和1个负的SR各需要2个CS,共需要4个CS,同一个PRB最多复用3个PUCCH格式0;如果HARQ-ACK是2 bit,传输HARQ-ACK和1个正的SR、传输HARQ-ACK和1个负的SR各需要4个CS,共需要8个CS,同一个PRB只能传输1个PUCCH格式0^[4]。

同一个PRB可以复用的PUCCH格式0的数目如表6所示。

表6 同一个PRB可以复用的PUCCH格式0的数目

UCI类型	CS数	PUCCH格式0
1 bit的HARQ-ACK	2	6
2 bit的HARQ-ACK	4	3
SR	1	12
1 bit的HARQ-ACK+SR	4	3
2 bit的HARQ-ACK+SR	8	1

2.2 PUCCH格式1

PUCCH格式1与DM-RS是时分复用的关系,偶数位置的符号是DM-RS,其结构如图2所示^[2]。

PUCCH 格式 1 传输 1 bit 的 HARQ-ACK, 用 BPSK 调制, 传输 2 bit 的 HARQ-ACK, 用 QPSK 调制; 仅传输 SR, 用 BPSK 调制; 同时传输 1 bit 的 HARQ-ACK 和 SR, 用 QPSK 调制, PUCCH 格式 1 无法同时传输 2 bit 的 HARQ-ACK 和 SR。因此, 同一个 PRB 可以复用的 PUCCH 格式 1 的数目与 UCI 无关^[4]。

同一个 PRB 上, 不同 UE 的 PUCCH 格式 1 和 DM-RS 通过 ZC 序列的 CS 和时域上的正交码(OCC)来区分^[2]。ZC 序列共有 12 个不同的 CS。可用的 OCC 数目与 PUCCH 的长度和时隙内是否跳频有关, 以 PUCCH 格式 1 的长度(含 DM-RS)是 14 个 OFDM 符号为例, 如果时隙内不跳频, 可用的 OCC 的数目是 7 个, 同一个 PRB 最多可以复用 $12 \times 7 = 84$ 个 PUCCH 格式 1; 如果时隙内跳频, 可用的 OCC 的数目是 3 个, 同一个 PRB 最多可以复用 $12 \times 3 = 36$ 个 PUCCH 格式 1。同一个 PRB 上可以复用的 PUCCH 格式 1 的数目如表 7 所示。

表 7 同一个 PRB 上可以复用的 PUCCH 格式 1 的数目

PUCCH 长度	OCC 数		PUCCH 格式 1 数	
	时隙内不跳频	时隙内跳频	时隙内不跳频	时隙内跳频
4	2	1	24	12
5	2	1	24	12
6	3	1	36	12
7	3	1	36	12
8	4	2	48	24
9	4	2	48	24
10	5	2	60	24
11	5	2	60	24
12	6	3	72	36
13	6	3	72	36
14	7	3	84	36

2.3 PUCCH 格式 2

PUCCH 格式 2 与 DM-RS 是频分复用的关系, 其结构如图 2 所示^[2]。

PUCCH 格式 2 可以分配的 PRB 数为 $1 \sim 16$ ^[7], 1 个 PRB 上有 4 个 RE 用于 DM-RS, 剩余的 8 个 RE 用于 PUCCH。当分配 1 和 2 个 OFDM 符号时, 每个 PRB 上可用的 RE 数分别是 8 和 16, 采用 QPSK 调制, 每个 PRB 可用的 bit 数分别是 16 和 32。根据分配的 PRB 数和 OFDM 符号数即可算出 PUCCH 格式 2 可用的 bit 数, PUCCH 格式 2 最少可用的 bit 数是 16 (频域上 1 个 PRB, 时域上 1 个 OFDM 符号), 最多可用的 bit 数是 $16 \times 32 = 512$ (频域上 16 个 PRB, 时域上 2 个 OFDM 符

号)。

2.4 PUCCH 格式 3 和 4

PUCCH 格式 3 和 4 与 DM-RS 是时分复用关系, DM-RS 的数量和位置与 PUCCH 格式 3 和 4 的长度、是否有额外的 DM-RS 有关, 其中长度是 4 的 PUCCH 格式 3 和 4, 其 DM-RS 的数量和位置还与时隙内是否跳频有关^[2], 以 PUCCH 格式 3 和 4 的长度(含 DM-RS)是 14 个 OFDM 符号为例, 其结构如图 3 所示。

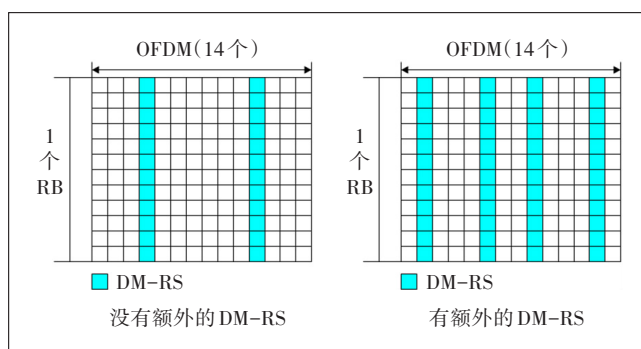


图 3 PUCCH 格式 3 和 4

PUCCH 格式 3 和 4 每个 PRB 上可用的 RE 数如表 8 所示。

表 8 PUCCH 格式 3 和 4 每个 PRB 上可用的 RE 数

PUCCH 长度	没有额外的 DM-RS		有额外的 DM-RS	
	时隙内不跳频	时隙内跳频	时隙内不跳频	时隙内跳频
4	36	24	36	24
5	36		36	
6	48		48	
7	60		60	
8	72		72	
9	84		84	
10	96		72	
11	108		84	
12	120		96	
13	132		108	
14	144		120	

对于 PUCCH 格式 3 和 4, 如果高层配置使用 QPSK, 每个 RE 可以传输 2 bit, 如果高层配置使用 $\pi/2$ -BPSK 调制, 每个 RE 可以传输 1 bit。

对于 PUCCH 格式 3, 可以分配 $2^{\alpha_2} \cdot 3^{\alpha_3} \cdot 5^{\alpha_5}$ 个 PRB, 其中 $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_5$ 是非负的整数, PUCCH 格式 3 可以分配的 PRB 数是 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 16\}$ 之一^[7]。根据表 8 分配的 PRB 数和调制方式, 即可算出 PUCCH 格式 3 可用的 bit 数, PUCCH 格式 3 最少可用的 bit 数是

24(频域上1个PRB,时域上4个OFDM符号,时隙内跳频, $\pi/2$ -BPSK调制),最多可用的bit数是 $16 \times 144 \times 2 = 4608$ (频域上16个PRB,时域上14个OFDM符号,没有额外的DM-RS,QPSK调制)。

对于PUCCH格式4,根据高层配置,同一个PRB上可以复用2个或4个PUCCH格式4。不同UE的PUCCH通过扩频因子(SF)来区分,DM-RS通过ZC序列的CS来区分。根据表8扩频因子和调制方式,即可算出PUCCH格式4可用的bit数。如果扩频因子是2,1个PUCCH格式4最少可用的bit数是 $24/2=12$ (时域上4个OFDM符号,时隙内跳频, $\pi/2$ -BPSK调制),最多可用的bit数是 $144 \times 2/2=144$ (时域上14个OFDM符号,没有额外的DM-RS,QPSK调制);如果扩频因子是4,1个PUCCH格式4最少可用的bit数是 $24/4=6$ (时域上4个OFDM符号,时隙内跳频, $\pi/2$ -BPSK调制),最多可用的bit数是 $144 \times 2/4=72$ (时域上14个OFDM符号,没有额外的DM-RS,QPSK调制)。

3 结束语

5G NR控制信道和数据信道共享空口资源,控制信道分配资源过多会导致数据信道资源减少,控制信道分配资源过少会导致控制信道拥塞,两者都会导致数据吞吐量下降,因此需要在控制信道资源和数据信道资源分配上进行折中。在实践中,可以根据本文给出的控制信道容量计算方法,再结合用户数、控制信道利用率等参数,指导控制信道资源的分配,以便为用户提供更好的5G业务体验。

参考文献:

[1] NR; Base Station (BS) radio transmission and reception; 3GPP TS 38.104[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[2] NR; Physical channels and modulation; 3GPP TS 38.211[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[3] NR; Multiplexing and channel coding; 3GPP TS 38.212[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[4] NR; Physical layer procedures for control; 3GPP TS 38.213[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[5] NR; Physical layer procedures for data; 3GPP TS 38.214[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[6] NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2; 3GPP TS 38.300[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[7] NR; Radio Resource Control (RRC) protocol specification; 3GPP TS 38.331[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[8] 肖清华,毛卓华,凌文杰,等.TD-LTE容量能力综合分析[J]. 邮电

设计技术,2012(4):36-40.

[9] Dahlman E, Parkvall S, Skold J. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G[M]. Third Edition. USA: Academic Press, 2016.

[10] NR; Services provided by the physical layer; 3GPP TS 38.202[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[11] NR; Physical layer measurements; 3GPP TS 38.215[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[12] NR; User Equipment (UE) radio access capabilities; 3GPP TS 38.306[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[13] NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification; 3GPP TS 38.321[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[14] NR; Radio Link Control (RLC) protocol specification; 3GPP TS 38.322[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[15] NR; Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification; 3GPP TS 38.323[S/OL]. [2019-05-17]. [ftp://3gpp.org/specs/](http://3gpp.org/specs/).

[16] 张建国,徐恩,肖清华. 5G NR频率配置方法[J]. 移动通信,2019(2):33-37.

[17] 黄陈横. 3GPP 5G NR物理层关键技术综述[J]. 移动通信,2018,42(10):5-12.

[18] 谢德胜,柴蓉,黄蕾蕾,等. 面向5G新空口技术的Polar码标准化研究进展[J]. 电信科学,2018,34(8):62-75.

[19] 董文佳,阮航,王小旭. 5G NR组网方式下的终端实现方案研究[J]. 移动通信,2017,41(19):84-89.

[20] HASEGAWA F, TAIRA A, NOH G, et al. High-Speed Train Communications Standardization in 3GPP 5G NR[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(1):44-52.

[21] 邵敏. 5G通信系统中信道的估计和均衡的方法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2018.

[22] 张海涛. 5G NR系统频谱干扰协调分析[J]. 移动通信,2019(2):38-42.

[23] 冯宇,王立春. 5G信道测量解决方案[J]. 电信网技术,2015(11):84-88.

[24] 孙健,张文胜,王承祥. 5G高频段信道测量与建模进展[J]. 电子学报,2017,45(5):1249-1260.

[25] 董春利,王莉. 5G网络实施中的管理技术和方法研究[J]. 无线互联科技,2018(3):18-20.

[26] 杨乐. 5G新无线接入技术频带与信道关键参数设计[J]. 移动通信,2017,41(19):77-81.

[27] 黄陈横. 5G大规模MIMO高低频信道模型对比探讨[J]. 移动通信,2017,41(14):64-69.

[28] 庞立华,张阳,任光亮,等. 5G无线通信系统信道建模的现状和挑战[J]. 电波科学学报,2017,32(5):487-497.

作者简介:

张建国,毕业于南京邮电学院,高级工程师,硕士,主要从事无线网络的规划和设计工作;徐恩,毕业于中国人民大学,高级工程师,硕士,主要从事移动通信网络咨询、规划、设计和优化工作;黄正彬,毕业于西安邮电学院,工程师,学士,主要从事无线网络的规划和优化工作。