

5G NR PDCCH 资源容量优化探讨

Discussion on Resource Capacity Optimization of 5G NR PDCCH

徐波, 庞启文, 钟孟杰(中国联通河南分公司, 河南 郑州 450011)

Xu Bo, Pang Qiwen, Zhong Mengjie(China Unicom Henan Branch, Zhengzhou 450011, China)

摘要:

5G 负荷增长带来的控制资源受限问题日益突出, 针对 PDCCH 信道, 从容量的角度进行系统的研究, 分析了不同用户模型下 PDCCH 的容量需求; 在控制资源和业务资源的配置中保持平衡, 兼顾资源利用率和用户感知; 最终得出当 PDCCH 符号数配置为 1/2/3 时, 一个小区可以满足 50/200/200 以上用户的日常调度需求的结论, 并通过实验验证了方案的合理性。

关键词:

5G NR; PDCCH; CCE; 容量; 估算; 优化

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.03.009

文章编号: 1007-3043(2023)03-0044-07

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

The problem of limited control resources due to 5G load growth is becoming more and more serious. It researches the capacity of the PDCCH, and analyzes the capacity requirements of the PDCCH under different user models. It balances the configuration of control resources and service resources, taking into account the resource utilization and user perception. It finally concludes that when the number of PDCCH symbols is configured as 1/2/3, a cell can meet the daily scheduling requirements of 50/200/200 plus users. And the rationality of the scheme is verified through practice.

Keywords:

5G NR; PDCCH; CCE; Capacity; Estimation; Optimization

引用格式: 徐波, 庞启文, 钟孟杰. 5G NR PDCCH 资源容量优化探讨[J]. 邮电设计技术, 2023(3): 44-50.

0 引言

随着 5G 技术发展和商用化推进, 5G 用户数和流量呈现爆发式增长。大话务场景下控制资源的容量研究是保障用户感知的重要课题。相较于 LTE, 5G 控制信道设计更加精简, 配置更加灵活, 其资源分配、容量设计和优化方式都与 LTE 有较大不同。本文重点研究 5G 物理下行控制信道(Physical Control Channel, PDCCH)容量调整的方法及其效果。

本文对 NR 3.5 GHz 系统进行分析, 默认系统带宽为 100 MHz, 子载波间隔(Sub-Carrier Spacing, SCS)为 30 kHz, 子帧结构采用 2.5 ms 双周期(DDDSUDDS),

频域物理资源块(Physical Resource Block)个数为 273。

1 5G 下行控制信道资源结构

为了支持空口上下行数据的传输, 系统需要先传输一些定义好的下行控制信令。这些下行控制信令携带下行控制信息(Downlink Control Information, DCI), 用于指示终端在特定频域和时域接收或发送数据。由于这些信息来自于物理层(L1)和 MAC 层(L2), 因此也被称为下行 L1/L2 控制信令^[1]。

在 NR 系统中, PDCCH 在一个可配置的 CORESET (Control Resource Set) 上传输。CORESET 是 5G 新引入的概念, 用以定义发送 PDCCH 的时频资源, 类似于 LTE 的子帧上用于 PDCCH 传输的控制资源区域, 但 CORESET 的时频结构配置更加灵活。一个 BWP 可配

收稿日期: 2023-01-30

置多个 CORESET, 并且每个 CORESET 在频域上并不一定要占据整个系统带宽。CORESET 的这种设计主要是考虑系统需要支持不同带宽能力的 UE, 不需要 UE 支持整个带宽, 有利于降低终端成本和前向兼容。而与 LTE 相比, 另一个显著不同的地方在于 NR 的 PDCCH 支持 UE Specific 波束赋形, 这也意味着每个 PDCCH 需要自己专属的 DMRS, 并对每个 PDCCH 独立处理^[2]。

UE 通过盲检 1 个或多个搜索空间 (Search Space) 的多个 PDCCH candidate 来检测是否存在有发送给自己的 PDCCH。一个搜索空间可以包含多个 PDCCH candidate, 并位于某个特定的 CORESET 内。

一个 CORESET 由频域上的 $N_{RB}^{CORESET}$ 个 RB 和时域上的 $N_{symb}^{CORESET}$ ($N_{symb}^{CORESET} \in \{1, 2, 3\}$) 个符号组成。仅当 dmrs-TypeA-Position (第 1 个前置 DMRS 的位置) 的值等于 3 时, 才支持 $N_{symb}^{CORESET} = 3$ ^[3]。

与 LTE 一样, 一个 PDCCH 由 1 个或多个 CCE 构成。一个 PDCCH 占据 n 个 CCE, 则称该 PDCCH 的聚合度等级为 n , n 的取值范围是 $\{1, 2, 4, 8, 16\}$ 。而与 LTE 不同, NR 中一个 CCE 由 6 个 REG 组成。在一个 CORESET 内, REG 会按先时域后频域的方法进行编号。可以看出, 一个 CCE 包含了 72 个 RE (剔除 PDCCH DMRS 后, 实际数量是 54 个 RE 用于传输 PDCCH), 因此一个 CORESET 包含了 $N_{REG}^{CORESET} = N_{RB}^{CORESET} N_{symb}^{CORESET}$ 个 REG, $N_{CCE}^{CORESET} = \lfloor N_{REG}^{CORESET} / 6 \rfloor$ 个 CCE。图 1 所示为一个 CORESET 的配置结构。

不同聚合度等级下的 PDCCH 包含的资源数如表 1 所示。

2 5G PDCCH 容量模型估算

NR CORESET 按照使用范围又可分为公共 CORESET (Common CORESET) 和 UE 专用 CORESET (UE Specific CORESET)。

a) 公共 CORESET 属于初始 BWP 配置信息的一部分, 由 MIB 提供给 UE, 携带 SIB1 (RMSI) 对应的 PDCCH 配置信息, 主要用于小区的初始接入过程广播信道的调度。公共 CORESET 编号通常为 0, 因此也称 CORESET0。

b) UE 专用 CORESET 携带 DCI, 主要用于指示 UE 在特定位置接收和传输数据。RRC 连接建立之后, UE 可以通过重配消息, 获得更多专用 CORESET 配置。

系统带宽为 100 MHz, 子载波间隔为 30 kHz 配置

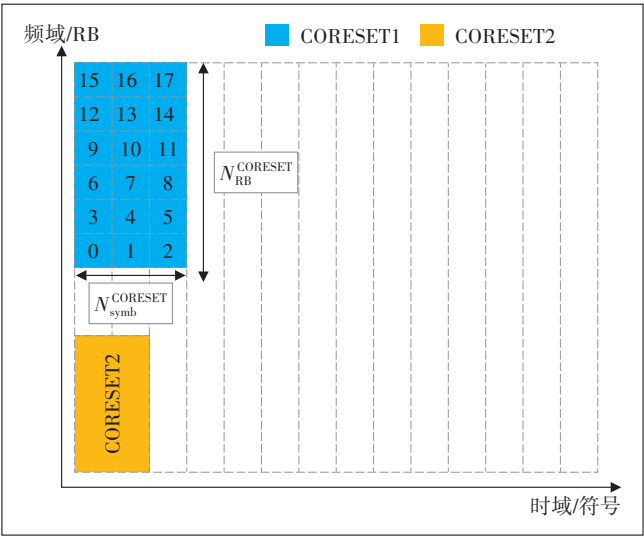


图 1 NR CORESET 结构

表 1 NR 支持的 CCE 聚合度等级及其对应的 REG/RE/bit 数^[4]

CCE 聚合度等级	REG 数量	RE 数 (剔除 PDCCH DMRS)	PDCCH 包含的 bit 数
1	6	54	108
2	12	108	216
4	24	216	432
8	48	432	864
16	96	864	1 728

下, CORESET0 支持的配置如表 2 所示。

以 index=11 配置为例, 公共 CORESET 占用频域 48RB, 时域 1 符号, 则固定配置 $N_{CCE}^{CORESET} = \lfloor N_{REG}^{CORESET} / 6 \rfloor =$

表 2 CORESET0 的 RB 和符号配置集合 (SCS=30 kHz)^[5]

Index	SSB 和 CORESET 复用方式	CORESET0 占用的 RB 数 ($N_{RB}^{CORESET}$)	CORESET0 占用的符号数 ($N_{symb}^{CORESET}$)	频域偏移/RB
0	1	24	2	0
1	1	24	2	1
2	1	24	2	2
3	1	24	2	3
4	1	24	2	4
5	1	24	3	0
6	1	24	3	1
7	1	24	3	2
8	1	24	3	3
9	1	24	3	4
10	1	48	1	12
11	1	48	1	14
12	1	48	1	16
13	1	48	2	12
14	1	48	2	14
15	1	48	2	16

8 CCE;类似地,专用CORESET占用的时域符号数由高层参数frequencyDomainResources给定,通常为了提高资源利用率,且公共CORESET的符号数保持一致,频域上剩余 $N_{\text{CCE}}^{\text{CORESET}} = \lfloor 270/6 \rfloor - 8 = 37\text{CCE}$ (协议规定 $N_{\text{RB}}^{\text{CORESET}}$ 最大取值为 270), UE 专用 CORESET 配置 36CCE,预留 1CCE 保护间隔。

CORESET0配置主要影响同时接入的用户数,UE 专用 CORESET 配置影响业务态用户感知。在确定了 PDCCH 的物理资源后,还需要配置不同的聚合度等级的候选集个数,用于 UE 在搜索空间中进行盲检,候选集个数同时也是对应聚合度等级的盲检次数,同时影响每个 slot 内的 PDCCH 的调度性能。现网 PDCCH 公共 CORESET 和专用 CORESET 资源配置如表 3 所示。

表 3 现网 PDCCH 资源容量相关配置举例

配置项		参考值
CORESET时域符号个数		1
初始 CORESET RB 和符号数		48 个 RB 1 个符号
UE 专用 CORESET 资源	UE 专用 CORESET CCE 自适应模式	自适应选择 CCE 聚合度
	聚合度是 1 对应的候选集个数	n4
	聚合度是 2 对应的候选集个数	n4
	聚合度是 4 对应的候选集个数	n4
	聚合度是 8 对应的候选集个数	n0
	聚合度是 16 对应的候选集个数	n0
公共 CORESET 资源	公共 CORESET CCE 自适应模式	固定聚合度 4
	聚合度是 1 对应的候选集个数	n0
	聚合度是 2 对应的候选集个数	n0
	聚合度是 4 对应的候选集个数	n4
	聚合度是 8 对应的候选集个数	n2
	聚合度是 16 对应的候选集个数	n1

对于 USS (UE Specific Search Space) 的配置,协议^[5]规定了每 slot 最大盲检次数为 36 次,最大盲检 CCE 个数为 56 个,按照如下配置:UE 总的盲检次数=3 种聚合度×n4×2 种 DCI (DCI0/DCI1)=24 次,盲检 CCE 个数=(1CCE×4+2CCE×4+4CCE×4)×2 种 DCI=48 个 CCE 的位置,可以满足要求。对于 CSS (Common Search Space) 的配置,协议^[5]直接给出了最大支持的聚合度等级和对应候选集个数,如表 4 所示。

2.1 UE 专用 CORESET 容量估计

表 4 公共 CORESET 聚合度等级和最大候选集个数

CCE 聚合度等级	候选集个数
4	4
8	2
16	1

鉴于 DCI 不是周期性发送的信息,不能时分复用,本文除了计算每个 slot 上的可用 PDCCH 资源,还需结合常用业务模型进行估算。类似于 PDSCH, PDCCH 资源在每个 slot 由多个用户共享,其不限制小区支持的最大用户数,只限制每个 DL slot 能分配多少个用户的调度信息。

当前 UE 专用 CORESET 调度采用的是 CCE 自适应调度,gNodeB 会根据 DCI bit 数和信道质量等因素来决定某个 PDCCH 的聚合度等级。因此会根据当前配置的 CORESET 中 CCE 个数、聚合度等级、对应等级的候选集个数、时频域位置共同决定 CCE 资源分配流程。考虑到存在 CCE 候选位置冲突,CCE 资源和功率受限等因素可能导致 CCE 分配失败,以 CCE 利用率 80% 为标准(因 CCE 分配失败比例通常以 20% 为质差门限),估计 UE 专用 CORESET 的容量。

现网中使用聚合度分别为 1/2/4 的 CORESET 来分别调度近、中、远点用户,各配置 4 个候选位置,时域符号数配置 1 个符号。以 VoNR 业务和下行数据业务为例进行 UE 专用 CORESET 容量估算:

a) 以小区内近、中、远点的 UE 数比例 3:4:3 为例,用户平均使用的聚合度等级为: $1 \times 0.3 + 2 \times 0.4 + 4 \times 0.3 = 2.3$ 。

b) 再计算每个 slot 内 CCE 资源数为单符号 UE 专用 CORESET 配置 CCE 数×PDCCH 符号数=36×1=36 个,则平均每 slot 调度的 UE 数为: $\lfloor 36 \times 80\% / 2.3 \rfloor = 12$ 。

c) 业务模型选取 VoNR,单用户语音业务,激活期调度周期为 20 ms,每秒调度上下行各 50 (1 000/20) 个 DCI,共需 100 次调度;静默期调度周期为 160 ms,每秒上下行各调度 6.25 (1 000/160) 个 DCI,共需要 12.5 次调度,假设静默因子取 0.5,则每秒语音用户平均调度次数为: $100 \times 0.5 + 12.5 \times 0.5 = 56.25$,平均占用的 CCE 个数为:平均聚合度等级×平均调度次数=2.3×56.25=129.375。

d) 考虑子帧结构为 2.5 ms 双周期,子帧配比 D:S:U 为 5:2:3,每秒内有 1 000 个下行 slot 和 400 个特殊 slot 用于传输下行数据。每秒内可用 CCE 数量为:每秒传输下行时隙数×专用 CCE 个数×PDCCH 符号数×CCE 利用率=1 400×36×1×80%=40 320,能保证 $\lfloor 40 320 / 129.375 \rfloor = 311$ 个用户同时做语音业务。

e) 再考虑业务模型选取 DL Data,单用户下行业务按 1 000 次/s 进行调度,则共需 1 000 个 DCI,此用户模型下平均每次数据业务占用的 CCE 个数为:2.3×

$1\,000=2\,300$, 每秒内的可用 CCE 数量可保证 $\lfloor 40\,320/2\,300 \rfloor = 17$ 个用户同时进行下行数据业务。

2.2 公共 CORESET 容量估计

当 CORESET0 配置频域 48 个 RB, 时域 1 个符号时, 公共 CORESET 固定使用 4CCE 进行调度:

- a) 每个 slot 能调度公共 DCI 为 $8\text{CCE}/4\text{CCE}=2$ 个。
- b) 每个 UE 接入时, 大约需要调度上/下行各 15 次 DCI, 共需调度 30 次 DCI; 则一个 UE 接入需要 $4 \times 30 = 120$ 个 CCE。
- c) 1 s 内 1 400 个下行 slot 内共有 $1\,400 \times 8 = 11\,200$ 个 CCE, 能保证 $\lfloor 11\,200/120 \rfloor = 93$ 个用户接入。

d) 同时 CORESET0 还需支持 SIB1、OSI (Other System Information)、paging 等公共调度。SIB1 的周期是 40 ms, 单 SSB 配置下 1 s 内共有 25 次 DCI 调度; OSI 需根据实际系统侧下发情况调度, 平均占用 50 次 DCI/s; paging 周期为 80 ms, 1 s 内共有 12.5 次 DCI 调度。因此考虑公共开销占用, 大约可以满足 $\lfloor (11\,200 - 87.5 \times 4)/120 \rfloor = 90$ 个用户的接纳容量。

3 PDCCH 容量优化方案研究

大话务场景下, PDCCH 资源容量受限会影响 UE 调度次数, 进而影响 UE 速率以及用户业务时延等用户感知指标。当用户数超过一定数量时, 网络侧通过调整 CORESET 时域符号个数, 可以降低 PDCCH 受限比例, 提升用户感知。

利用上述讨论建立的 PDCCH 容量模型, 结合现网超忙小区分析经验, 本文旨在提供一套通过大话务常用 KPI 指标分析识别 PDCCH 容量受限小区, 并针对性地区别用户档位进行 PDCCH 容量调整的方案。

3.1 PDCCH 容量指标监控

考虑到各小区用户行为存在不同, 忙时时间段不同, 因此采用一周的监控和评估周期, 满足表 5 中所列条件的小区被认为是超忙小区, 实际评估过程中可以根据当地网络负荷情况适量调整判断门槛。

筛选出超忙小区后, 需要从大话务常用 KPI 中识别出 PDCCH 容量受限小区。将常用 KPI 分为“关键监

控”和“辅助分析”2 类, 指标分类如表 6 所示。

表 6 大话务场景常用 KPI 和质差门槛

指标分类	评估维度	关联 KPI	质差小区门槛
关键监控类指标	接入	无线接通率/%	<95
		SN 添加成功率/%	<93
	速率/时延	小区上行 UE Throughput/(kbit/s)	<500
		小区下行 UE Throughput/(kbit/s)	<10
		小区下行 RLC SDU 平均时延/ms	>200
		小区下行 TCP 报文 RTT 平均值/ms	>100
	频谱效率	小区上行 RLC SDU 平均时延/ms	>10
		上行频谱效率/(bit/PRB)	<200
	CCE 资源	下行频谱效率/(bit/PRB)	<200
		UL CCE 分配失败比例/%	>20
辅助分析类指标	干扰	DL CCE 分配失败比例/%	>20
		PUSCH 信道平均干扰平/dBm	>-105
	资源	PUCCH 信道平均干扰平/dBm	>-105
		小区上行 PRB 平均占用率/%	>80
		小区下行 PRB 平均占用率/%	>80
		PDCCH 信道 CCE 占用率/%	>40
		上行调度的平均 UE 数(基于可调度 slot 数)	>8
		下行调度的平均 UE 数(基于可调度 slot 数)	>4
	解调	MAC 层上行残留误块率/%	>10
		上行 HARQ 重传比率/%	>20
		上行 QPSK 编码比例/%	>70
		MAC 层下行残留误块率/%	>10
		下行 HARQ 重传比率/%	>20
		下行 QPSK 编码比例/%	>80
		DL DTX ratio/%	>10
	覆盖	UL DTX ratio/%	>1
		分区间上行业务态用户的路损分布(>135)占比/%	>10
		CQI 优良率(CQI≥10)/%	<80
		上行业务态用户平均路损/dB	>115

关键监控类指标用于识别大话务场景下质差小区, 按评估维度分 4 类。

- a) 接入: 包含无线接通率和 SN 添加成功率。
- b) 速率/时延: 包含 UE Throughput 和时延指标, 2 项指标强相关, 一般 UE Throughput 低的情况下, 时延也高。
- c) 频谱效率: 包含频谱效率, 评估小区资源的利用效率。

d) CCE 资源: PDCCH 容量受限识别重点关注指标, 包含 CCE 分配失败比例, TDD 制式下行 slot 比上行 slot 更多, 一般关注 UL CCE 的分配失败比例。

按表 5 中的条件筛选出的超忙小区中, 只要上下

表 5 现网超忙小区判断标准

监控对象	全网小区
监控粒度	1 h
监控周期	一周自忙时 7×1 h
条件	RRC 连接最大连接用户数≥200 且 RRC 连接平均连接用户数≥100 的天数 N≥4

行任一方向 CCE 分配失败比例满足表 6 中的质差门限,则界定为 PDCCH 质差小区。

辅助分析类包含干扰、资源、解调和覆盖 4 类指标,用于从质差小区中进一步筛选出 PDCCH 容量受限小区。其中质差门限是根据以往排查问题的经验而定,相对严苛,后续可以根据实际问题进行适当调整。

针对按前面所述方法筛选出的 PDCCH 质差小区进行进一步指标分析,当表 6 中资源类任一指标满足质差门限,且均不满足其他评估维度质差门限时,则可定性为 PDCCH 容量受限小区。

3.2 PDCCH 容量优化方案

现网 PDCCH 配置下,公共 CORESET+UE 专用 CORESET 频域上已达到 270RB 上限,时域占用 1 个符号,因此考虑通过扩充符号数的方法提高 PDCCH 资源容量。而扩充 PDCCH 资源会占用原先用于 PDSCH 传

输的资源位置,导致下行业务信道资源减少,影响 UE 下行速率和流量。从资源分配角度,控制资源数量和业务资源数量是相互均衡的,根据前文建立的 PDCCH 容量模型估算出最大支持调度的用户数量,用于识别出 PDCCH 容量受限的小区后,根据用户数档位对 PDCCH 容量进行精细化的调整。这种方案既能减少非必要的资源损耗,也能提高业务用户感知。

按照第 2 章的 PDCCH 容量模型进行估算:

a) CORESET0 不同资源配置对应支持的接入用户数如表 7 所示,协议定义 SCS=30 kHz 配置下 CORESET0 最大支持 48RB 2 个符号。

b) UE 专用 CORESET 不同 PDCCH 符号数配置下对应支持的业务态用户数如表 8 所示。

根据上述模型,随着 PDCCH 符号数扩充,网络中 CORESET0 配置最大支持 180 个用户同时接入,UE 专

表 7 基于模型估算 CORESET0 不同符号数配置下支持的接入用户数

初始 CORESET RB 和符号数	时域符号数	频域 CCE 数	CORESET0 聚合度	支持接入用户数/(UE/s)
48 个 RB 1 个符号[48-1]	1	11 200CCE	4	90
48 个 RB 2 个符号[48-2]	2	22 400CCE	4	183

表 8 基于模型估算 UE 专用 CORESET 不同符号数配置下支持的业务态用户数

UE 专用 PDCCH 时域符号数	频域 CCE 数/(个/slot)	每 slot 支持调度的用户数	专用 CORESET 聚合度	最大支持语音用户数/(UE/s)	最大支持数据业务用户数/(UE/s)
1	36	12	自适应	311	17
2	72	25	自适应	623	35
3	108	75	自适应	934	52

用 CORESET 最大可以支持 900 个语音用户或 50 个数据用户同时进行业务。受限于协议限制,当需要更大容量时,只能通过降低 CCE 聚合度的方式减少用户对控制资源占用,例如可以将 CORESET0 对应使用的 CCE 聚合度降低,使用 1CCE/2CCE,当使用 1CCE 时,此时最大可调度 $\lfloor 11\ 200/30 \rfloor = 373$ 个用户。但需注意,当使用较低的 CCE 聚合度调度信道质量条件较差的用户时,会影响用户 DCI 的解调成功率,造成上下行不连续调度的比例增加,损失调度次数。

从控制资源合理规划的角度,根据小区间用户数模型的不同,本文提出了 3 个适用于现网用户数规模的场景,配置不同的 PDDCH 容量档位,预期可以达到兼顾控制资源利用率和提升用户业务感知的目的,具体配置如表 9 所示。

4 PDCCH 容量优化方案实验

为了验证基于用户模型估算的 PDCCH 容量调整

方案的准确性,在现网区域对上述方案进行了针对性的验证。根据小区平均用户数规模,筛选出了以下 3 种场景,分别对比分析 3 种 PDCCH 容量档位下的参数适配情况。

a) 空闲小区(一周内 RRC 连接最大用户数小于 50 或超过 50 但平均用户数大于 50 的天数小于 4 天)。

b) 繁忙小区(一周内 RRC 连接最大用户数介于 50~200,且平均用户数大于 50 的天数不小于 4 天)。

c) 超忙小区(一周内 RRC 连接最大连接用户数不小于 200,且平均用户数不小于 100 的天数不小于 4 天)。

4.1 空闲小区 PDCCH 容量优化方案实验

根据现网数据统计,空闲小区平均接入用户数小于 50,平均业务态用户数小于 15,上下行每 slot 调度最大用户数小于 12,按照 PDCCH 容量模型估算,PDCCH 配置单符号即可满足下行控制信道资源需求,因此,本实验中空闲小区只考虑对比 PDCCH 单符号和 2 个

表9 基于模型估算PDCCH容量调整(时域符号数扩充)配置

小区用户数档位		0~50	50~200	>200
CORESET时域符号个数		1	2	3
初始CORESET RB和符号数		48个RB 1个符号	48个RB 2个符号	48个RB 2个符号
UE 专用 CORESET	CCE自适应模式	自适应选择CCE聚合度	自适应选择CCE聚合度	自适应选择CCE聚合度
	聚合度是1对应的候选集个数	n4	n4	n4
	聚合度是2对应的候选集个数	n4	n4	n4
	聚合度是4对应的候选集个数	n4	n4	n4
	聚合度是8对应的候选集个数	n0	n0	n0
	聚合度是16对应的候选集个数	n0	n0	n0
公共 CORESET	CCE自适应模式	固定CCE聚合度4	固定CCE聚合度4	固定CCE聚合度4
	聚合度是1对应的候选集个数	n0	n0	n0
	聚合度是2对应的候选集个数	n0	n0	n0
	聚合度是4对应的候选集个数	n2	n4	n4
	聚合度是8对应的候选集个数	n0	n2	n2
	聚合度是16对应的候选集个数	n0	n1	n1

符号容量方案。

表10 空闲小区PDCCH容量优化方案实验结果

配置模型	CCE分配失败比例/%		PDCCH信道CCE可用数(归一化)	PDCCH信道CCE占用率/%	小区用户评价速率/(kbit/s)		小区下行TCP报文RTT时延/ms	小区下行平均调度时延/ms
	UL	DL			DL	UL		
PDCCH 1个符号	1.5	0.2	0.6	5.9	190 983	12 801	17.3	6.0
PDCCH 2个符号	0.0	0.0	1.0	1.9	173 778	12 285	17.9	6.1

从实验结果得知,空闲小区PDCCH保持单符号,CCE分配失败比例在可容忍范围,对用户上下行感知没有较大影响。在保持CCE占用率的基础上,提升了用户的下行平均速率。

4.2 繁忙小区PDCCH容量优化方案实验

繁忙小区平均接入用户数为50~200,平均业务态用户数小于30,上下行每slot调度最大用户数小于25,按照PDCCH容量模型估算,PDCCH需要配置2个符号以满足忙时控制信道资源需求,降低CCE容量受限导致CCE分配失败的比例,本实验对比了繁忙小区PDCCH单符号和2个符号容量方案。

繁忙小区PDCCH容量优化方案实验结果如表11所示,从表11可以看出,PDCCH单符号上行CCE分配失败比例为6.6%,下行1.0%,扩容到2个符号后,

单符号下每下行slot多让出了1个符号位给PDSCH使用,子帧结构2.5 ms双周期配置下,每秒多出1 400个符号位。因此2个符号相比于单符号,PDSCH资源数量约减少: $[1\ 400/(1\ 000\times 13+400\times 9)]\times 100\%=8.4\%$,小区下行频谱效率和下行业务感知会有所降低。

空闲小区PDCCH容量优化方案实验结果如表10所示,从表10可以看出:PDCCH单符号上行CCE分配失败比例为1.5%,下行为0.2%,扩展到2个符号都下降至0%,但都远低于PDCCH容量质差小区门限20%;PDCCH信道2个符号的CCE可用个数是单符号的1.7倍,但控制信道资源利用率从5.9%降低至1.9%,利用率整体偏低。从用户感知角度,因为PDCCH 2个符号下PDSCH资源数量减少,小区用户平均下行速率从单符号的191 Mbit/s下降至173 Mbit/s,降低幅度为9.4%,小区用户平均上行速率基本维持不变;2个符号小区下行TCP报文RTT时延和小区下行调度时延基本保持不变。

CCE分配失败比例降低至近0%,单符号CCE分配失败比例高的小区容易满足质差门限;PDCCH信道单符号CCE可用个数是2个符号的60%,但控制信道资源利用率从3.9%提升至15%,利用率明显提高。从用户感知角度,因为PDCCH 2个符号下PDSCH资源数量减少,小区用户平均下行速率从154 Mbit/s下降至138 Mbit/s,降幅为10.4%,小区用户平均上行速率基本维持不变;2个符号小区下行TCP报文RTT时延从17.6 ms提升至18.6 ms,增幅5.7%,而调度时延略有减少。

目前5G网络处在低负荷水平,忙时平均小区业务信道利用率不足15%,现网小区容量仍有较多余量。针对繁忙小区将PDCCH容量保持2个符号,可以在现阶段有效抑制CCE分配失败比例,减少质差小区的出现,但同时扩容控制信道会占用额外的共享信道资源

表11 繁忙小区PDCCH容量优化方案实验结果

配置模型	CCE分配失败比例/%		PDCCH信道CCE可用数(归一化)	PDCCH信道CCE占用率/%	小区用户评价速率/(kbit/s)		小区下行TCP报文RTT时延/ms	小区下行平均调度时延/ms
	UL	DL			DL	UL		
PDCCH 1个符号	6.6	1.0	0.6	15.0	154 257	8 442	17.6	7.1
PDCCH 2个符号	0.1	0.0	1.0	3.9	138 797	7 999	18.6	6.5

源,影响下行用户感知。

4.3 超忙小区PDCCH容量优化方案实验

5G网络高业务量时期还远未到来,现阶段PDCCH 2个符号的容量已经可以满足大多数应用场景。而现网超忙小区主要集中在核心城区个别站点,呈现离散分布,因此可以选择对这些小区进行针对性地将PDCCH容量扩容至3个符号,减少批量扩容对下行业务感知的影响。

相较于单符号和2个符号,3个符号进一步占用了PDSCH的时频资源。PDSCH资源相对于单符号缩减 $[1400 \times 2 / (1000 \times 13 + 400 \times 9)] \times 100\% = 16.9\%$,相较于2个符号缩减 $[1400 / (1000 \times 12 + 400 \times 8)] \times 100\% = 9.2\%$,牺牲了部分下行业务感知。

以某个现网中超忙小区为例,该小区平均接入用户数大于150,平均业务态用户数大于50,上下行每slot调度最大用户数介于10~20,按照PDCCH容量模型估算,忙时控制信息需求可能会超过2个符号的容量。同时,该小区忙时UL CCE分配失败比例超过20%,且PDCCH CCE占用率超过40%,根据PDCCH容量指标监控分析属于PDCCH容量受限小区,因此尝试

扩容到3个符号。

超忙小区PDCCH实验方案的实验结果如表12所示,从表12可以看出,PDCCH单符号上行CCE分配失败比例为31.2%,下行为16.0%,上行已超过质差小区判决门限,扩容到2个符号和3个符号后,CCE分配失败比例大幅下降,配置为3个符号时已经降至0%;从PDCCH信道CCE可用个数可以看到,3个符号CCE可用资源是单符号的2.5倍,是2个符号的1.4倍,利用率从单符号接近50%降低至较低水平的6.8%。从用户感知角度,虽然如前文所述PDCCH多符号下PDSCH资源数量会相应减少,但是超忙小区控制资源较少时存在大量上下行数据来不及被调度,大量缓存于队列中无法及时传输,同样影响小区用户平均速率,均衡情况下,下行用户平均速率基本保持不变,而由于上行CCE个数的增加得到调度机会的增加,小区用户平均上行速率从4 Mbit/s提升至13 Mbit/s,提升2.25倍;超忙小区下行TCP报文RTT时延从32.7 ms降低至26.1 ms,降幅为20%,主要受益于调度时延从27.2 ms降低至13.6 ms。

从超忙小区实验结果来看,针对性地调整PDCCH

表12 超忙小区PDCCH容量优化方案实验结果

配置模型	CCE分配失败比例/%		PDCCH信道CCE可用数(归一化)	PDCCH信道CCE占用率/%	小区用户评价速率/(kbit/s)		小区下行TCP报文RTT时延/ms	小区下行平均调度时延/ms
	UL	DL			DL	UL		
PDCCH 1个符号	31.2	16.0	0.4	49.9	98 776	4 084	32.7	27.2
PDCCH 2个符号	1.2	0.1	0.7	10.8	72 006	6 739	29.9	17.5
PDCCH 3个符号	0.0	0.0	1.0	6.8	67 011	13 239	26.1	13.6

质差小区容量到3个符号可以有效降低CCE分配失败比例,同时小区上行用户平均速率会因为上行调度机会的增加明显提升,小区下行RTT时延降低,用户感知得到提升。

5 结束语

5G协议中对PDCCH的设计更加灵活,不需要占据整个带宽且支持多个CORESET的配置。而在实际网络中,控制信道的分配需要考虑更多因素。控制信道和业务信道共享频谱资源,两者相互均衡,控制信道资源分配过多会占用业务信道资源,分配过少会造成控制信道资源受限。本文通过PDCCH容量模型去估算控制信道容量,再结合用户数模型、控制信道利用率等因素综合考虑,给出了一套适合现网用户规模的PDCCH容量调整方案,并定量评估了不同方案对用户业务速率和时延的影响,指导现网中控制信道资源

的分配,优化无线资源利用率和用户感知。

参考文献:

- [1] 温金辉. 深入理解LTE-A 基于3GPP RELEASE-10协议[M/OL]. [2022-12-01]. <https://wenku.baidu.com>.
- [2] 温金辉. PDCCH: 简介[EB/OL]. [2022-12-01]. <https://www.stg.ekuibu.com/>.
- [3] NR; Physical channels and modulation; 3GPP TS 38.211[S/OL]. [2022-12-01]. <ftp://3gpp.org/specs/>.
- [4] 张建国,徐恩. 5G NR控制信道容量能力综合分析[J]. 无线通信, 2019(9):45-50.
- [5] NR; Physical layer procedures for control; 3GPP TS 38.213[S/OL]. [2022-12-01]. <ftp://3gpp.org/specs/>.

作者简介:

徐波,高级工程师,硕士,主要从事移动通信网络优化工作;庞启文,高级工程师,学士,主要从事移动通信网络规划建设维护一体化管理工作;钟孟杰,工程师,硕士,主要从事移动通信网络优化工作。