

# 5G NR 峰值速率综合分析

## Comprehensive Analysis of 5G NR Peak Rates

张建国<sup>1</sup>, 徐恩<sup>1</sup>, 张艺译<sup>2</sup> (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 Jianguo<sup>1</sup>, Xu En<sup>1</sup>, Zhang Yiyi<sup>2</sup> (1. Huaxin Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 2. China Mobile Group Guangxi Co., Ltd. Yulin Branch, Yulin 537000, China)

### 摘要:

首先介绍了5G NR物理层的帧结构、物理信道和信号,重点分析了DM-RS结构;然后分析了TBS的计算过程;最后计算出了5G NR下行单用户(SU-MIMO)、下行单小区(MU-MIMO)、上行单用户(SU-MIMO)、上行单小区(MU-MIMO)的理论峰值速率;并根据给定的时隙格式,计算出某5G试验网的下行单用户(SU-MIMO)、下行单小区(MU-MIMO)、上行单用户(SU-MIMO)、上行单小区(MU-MIMO)的峰值速率。

### Abstract:

Firstly it introduces 5G NR physical layer including frame structure, physical channels and physical signals, the structure of DM-RS is discussed in detail. Then it analyzes the calculation procedure of TBS. Finally, the theoretical peak rate of single user(SU-MIMO) for downlink, single cell(MU-MIMO) for downlink, single user(SU-MIMO) for uplink, single cell(MU-MIMO) for duplink are caculated. According to the given slot format, the peak rates in a 5G trial network of single user(SU-MIMO) for downlink, single cell(MU-MIMO) for downlink, single user(SU-MIMO) for uplink, single cell(MU-MIMO) for duplink are worked out.

### Keywords:

5G NR; Frame structure; Physical channel; DM-RS; Peak rates

### 关键词:

5G NR; 帧结构; 物理信道; DM-RS; 峰值速率  
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.07.007  
中图分类号: TN929.5  
文献标识码: A  
文章编号: 1007-3043(2019)07-0028-05

引用格式: 张建国, 徐恩, 张艺译. 5G NR峰值速率综合分析[J]. 邮电设计技术, 2019(7): 28-32.

## 0 引言

5G NR定义了两大频率范围(FR——Frequency Range),分别是FR1和FR2,FR1对应的频率范围为450~6 000 MHz,FR2对应的频率范围为24 250~52 600 MHz。工信部批准了3 300~3 600 MHz(其中3 300~3 400 MHz原则上限室内使用)和4 800~5 000 MHz频段作为5G系统的工作频段,分别对应着FR1范围的n77、n79<sup>[1]</sup>。3家运营商都在积极开展5G试验网的建

设和测试,本文接下来分析5G NR的峰值速率。

## 1 5G NR物理层

与LTE类似,5G NR的峰值速率计算与帧结构、物理信道和信号密切相关,本文接下来分析NR的帧结构、物理信道和信号。

### 1.1 帧结构

5G NR最基本的子载波是15 kHz,但可以根据 $\Delta f = 2^{\mu} \times 15$  kHz进行扩展,对于数据信道, $\mu$ 的取值可以是0、1、2、3,对应的 $\Delta f$ 分别是15、30、60、120 kHz,1个RB由12个子载波组成。

收稿日期: 2019-06-04

5G NR 的帧结构由长度为 10 ms 的无线帧构成, 1 个无线帧由 10 个长度为 1 ms 的子帧构成, 当子载波间隔取值为 15、30、60、120 kHz 时, 1 个子帧分别包括 1、2、4、8 个时隙, 1 个时隙由 14 个 OFDM 符号组成。子载波间隔为 30 kHz 时的无线帧结构如图 1 所示。

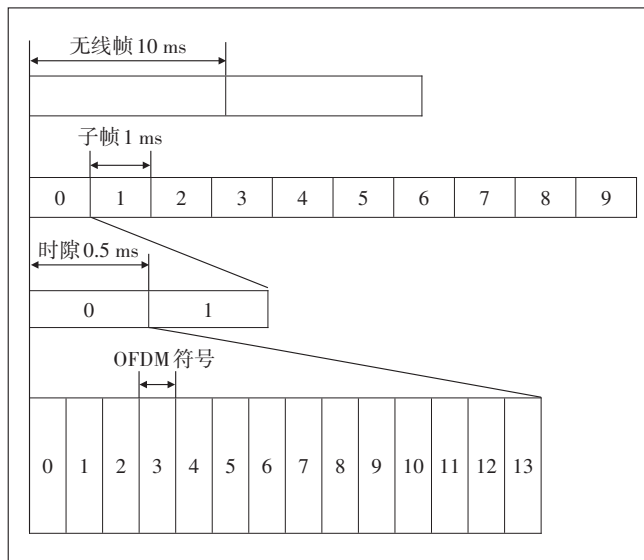


图 1 5G NR 的无线帧结构(子载波间隔=30 kHz)

1 个时隙内的 OFDM 符号被分成 3 类, 分别是下行符号、灵活符号和上行符号。在下行时隙, UE 应假设下行传输发生在下行符号或灵活符号上, 在上行时隙, UE 应假设上行传输发生在上行符号或灵活符号上, 5G NR 共有 62 种时隙格式, 每种时隙格式规定了下行符号、灵活符号和上行符号的数目<sup>[2]</sup>。

### 1.2 物理信道和信号

5G NR 的下行物理信道包括 PDSCH、PDCCH 和 PBCH, 下行物理信号包括参考信号和同步信号, 其中参考信号包括用于 PDSCH 和 PDCCH 的 DM-RS、用于 PDSCH 的相位跟踪参考信号 (PT-RS——Phase-Tracking Reference Signals) 和用于信道状态估计的 CSI-RS, 同步信号包括主同步信号 (PSS——Primary Synchronization Signal) 和辅同步信号 (SSS——Secondary Synchronization Signal)<sup>[2]</sup>。

PDCCH 由 1 个或多个 CCE 组成, 控制资源集合 (CORESET——Control-resource Set) 在频域上占用  $N_{RB}^{CORESET}$  个 RB, 在时域上占用  $N_{symb}^{CORESET} \in \{1, 2, 3\}$  个 OFDM 符号。

5G NR 的上行物理信道包括 PUCCH、PUSCH、PRACH, 上行物理信号包括用于 PUSCH 和 PUCCH 的

DM-RS、用于 PUSCH 的 PT-RS、SRS。

PUCCH 有 5 种格式, PUCCH 格式 0 和 1 在频域上占用 1 个 RB, 在时域上占用 1 个或 2 个 OFDM 符号, PUCCH 格式 2 在时域上占用 4~14 个 OFDM 符号, 在频域上占用 1 个或多个 RB, PUCCH 格式 3 在时域上占用 4~14 个 OFDM 符号, 在频域上占用 1 个或多个 RB, PUCCH 格式 4 在时域上占用 4~14 个 OFDM 符号, 在频域上占用 1 个 RB<sup>[5]</sup>。

峰值速率计算与 DM-RS 的类型、密度密切相关, 本文接下来重点分析 DM-RS。DM-RS 有 Type1 和 Type2 两种格式, 在频域上, DM-RS 占用的带宽与分配给 PDSCH 或 PUSCH 的带宽相一致。在时域上占用 1 个或 2 个连续的 OFDM 符号, 并可以在 1 个时隙内配置额外的 DM-RS。DM-RS 占用 1 个 OFDM 符号时, Type1 和 Type2 分别对应 4 个和 6 个 DM-RS 端口; DM-RS 占用 2 个 OFDM 符号时, Type1 和 Type2 分别对应 8 个和 12 个 DM-RS 端口。PDSCH 和 PUSCH 传输的数据层数不能大于 DM-RS 端口数。Type1 和 Type2 的 DM-RS 结构如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

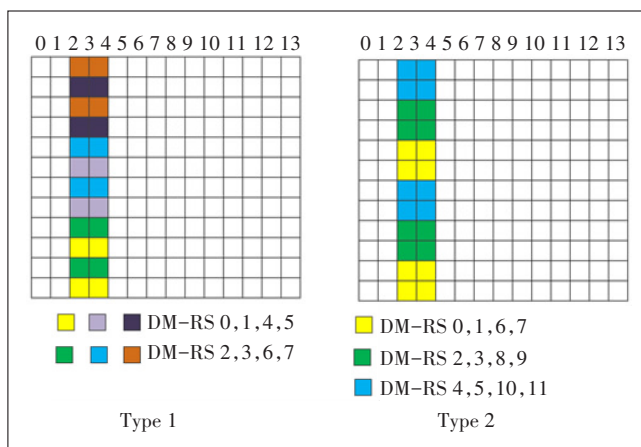


图 2 DM-RS 结构

## 2 TBS 计算过程

5G NR 的峰值速率与 PDSCH 和 PUSCH 上传输的 TB 的尺寸即传输块尺寸 (TBS——Transport Block Size) 密切相关, TBS 的计算过程共有 5 个步骤<sup>[6]</sup>, 分别如下:

第 1 步: 计算 1 个时隙内的 RE 数  $N_{RE}$ 。

计算  $N_{RE}$  共有 3 个小步骤, 分别是:

a) 计算 1 个 PRB 内, 分配给 PDSCH 的 RE 数  $N'_{RE}$ 。

$$N'_{RE} = N_{sc}^{RB} \times N_{symb}^{sh} - N_{DMRS}^{PRB} - N_{oh}^{PRB} \quad (1)$$

其中,  $N_{sc}^{RB} = 12$  是频域上 1 个 PRB 的子载波数;  $N_{ymb}^{sh}$  是该时隙内调度的 OFDM 符号数,  $N_{DMRS}^{PRB}$  是 1 个 PRB 内用于 DM-RS 的 RE 数,  $N_{DMRS}^{PRB}$  与 DM-RS 占用的 OFDM 数目、密度等有关;  $N_{oh}^{PRB}$  是高层配置的负荷, 取值是 {0, 6, 12, 18} 之一。

b) 根据表 1, 查找 1 个 PRB 内量化的 RE 数  $\bar{N}'_{RE}$ 。

表 1 1 个 PRB 内分配给 PDSCH/PUSCH 的量化的 RE 数

$N'_{RE}$	$\bar{N}'_{RE}$	$N'_{RE}$	$\bar{N}'_{RE}$
$N'_{RE} \leq 9$	6	$57 < N'_{RE} \leq 90$	72
$9 < N'_{RE} \leq 15$	12	$90 < N'_{RE} \leq 126$	108
$15 < N'_{RE} \leq 30$	18	$126 < N'_{RE} \leq 150$	144
$30 < N'_{RE} \leq 57$	42	$N'_{RE} > 150$	156

c) 根据分配的 PRB 数  $n_{PRB}$ , 计算 PDSCH 或 PUSCH 总的 RE 数  $N_{RE}$ 。

$$N_{RE} = \bar{N}'_{RE} \times n_{PRB} \quad (2)$$

第 2 步: 计算中间的信息比特  $N_{info}$ 。

$$N_{info} = N_{RE} \times R \times Q_m \times v \quad (3)$$

其中,  $N_{RE}$  由式(2)得到;  $R$  是目标码率,  $Q_m$  是调制阶数, 根据  $I_{MCS}$  查表得到  $R$  和  $Q_m$ 。PDSCH 通过 3GPP TS 38.214 协议<sup>[5]</sup>的表 5.1.3.1-1 或表 5.1.3.1-2 得到, PUSCH 通过 3GPP TS 38.214 协议的表 5.1.3.1-1、表 5.1.3.1-2 或表 6.1.4.1-1 得到;  $v$  是数据的层数, 对于下行 SU-MIMO, 传输给 UE 的数据最多是 2 个 TB, 每个 TB 最多是 4 层; 对于下行 MU-MIMO, 传输给每个 UE 的数据是 1 个 TB, 每个 TB 最多是 4 层; 对于上行 SU-MIMO, 使用 CP-OFDM 编码, UE 传输的数据是 1 个 TB, TB 最多是 4 层, 使用变换预编码, UE 传输的数据最多是 1 层。

第 3 步: 如果  $N_{info} \leq 3824$ , 通过如下方式计算 TBS。

通过式(4)计算量化的中间信息比特  $N'_{info}$ 。

$$N'_{info} = \max \left( 24, 2^n \times \left\lfloor \frac{N_{info}}{2^n} \right\rfloor \right) \quad (4)$$

其中  $n = \max(3, \lfloor \log_2(N_{info}) \rfloor - 6)$ 。

然后, 通过查找 3GPP TS 38.214 协议的表 5.1.3.2-2 得到最接近的不小于  $N'_{info}$  的 TBS。

第 4 步: 如果  $N_{info} > 3824$ , 通过如下方式计算 TBS。

通过式(5)计算量化的中间信息比特  $N'_{info}$ 。

$$N'_{info} = 2^n \times \text{round} \left( \frac{N_{info} - 24}{2^n} \right) \quad (5)$$

其中  $n = \lfloor \log_2(N_{info} - 24) \rfloor - 5$ 。

如果  $R \leq 1/4$ , 则 TBS 如式(6)所示。

$$TBS = 8 \times C \times \left\lfloor \frac{N'_{info} + 24}{8 \times C} \right\rfloor - 24 \quad (6)$$

其中  $C = \left\lfloor \frac{N'_{info} + 24}{3816} \right\rfloor$ 。

如果  $R > 1/4$  且  $N'_{info} > 8424$ , 则 TBS 如式(6)所示,

但其中  $C = \left\lfloor \frac{N'_{info} + 24}{8424} \right\rfloor$ 。

如果  $R > 1/4$  且  $N'_{info} \leq 8424$ , 则 TBS 如式(7)所示。

$$TBS = 8 \times \left\lfloor \frac{N'_{info} + 24}{8} \right\rfloor - 24 \quad (7)$$

第 5 步: 验证有效信道码率。

对于下行初始传输, 如果有效信道码率  $R_{eff}$  大于 0.95, 则 UE 可以不解码 TB, 并由物理层通知高层解码不成功, 有效信道码率定义为下行信息比特(包括 CRC 比特)除以 PDSCH 上的物理信道比特数目  $N_{RE}^{PDSCH}$ 。在分配给 PDSCH 的 PRB 上, 用于 DM-RS、CSI-RS、PT-RS 以及预留 SS/PBCH 的 RE 优先级更高, 不能用于 PDSCH 传输, 因此在计算  $N_{RE}^{PDSCH}$  时需要去掉上述 RE。不成功解码会导致传输速率下降, 本文假设 PDSCH 上的有效信道码率均小于 0.95。

对于上行初始传输, 3GPP 协议没有规定有效信道码率, 但是有效信道码率过高会导致 UE 不解码, 直接丢弃传输块, 本文假设 PUSCH 上的有效信道码率也小于 0.95。

由第 3 步或第 4 步计算得到 TBS 后, 需要验证有效信道码率, 如果有效信道码率大于 0.95, 则降低目标码率  $R$  一个等级, 重复第 2 步到第 4 步, 直至有效信道码率小于 0.95。

### 3 5G NR 峰值速率

本文接下来以 100 MHz 系统带宽为例分析 5G NR 的峰值速率。

#### 3.1 理论的峰值速率

系统带宽为 100 MHz 时, 数据信道的子载波间隔可以取值 30 或 60 kHz, 对应的 RB 数分别是 273 和 135 个<sup>[1]</sup>。本文假设子载波间隔是 30 kHz, 则 1 个子帧内有 2 个时隙, 每个时隙是 0.5 ms。

接下来以下行单用户(SU-MIMO)为例来演示峰值速率的计算过程。

下行单用户(SU-MIMO)达到峰值速率的条件:

PDSCH 在频域上使用 273 个 PRB, PDCCH 使用 1

个 OFDM 符号, PDSCH 在时域上使用 13 个 OFDM 符号; 每个 TB 传输 4 层数据, 那么 2 个 TB 传输 8 层数据; DM-RS 使用 Type1 或 Type2, 时域上占用连续 2 个 OFDM 符号, 对应的 DM-RS 端口数分别是 8 个和 12 个。

下行单用户(SU-MIMO)峰值速率的计算过程如下。

第 1 步: 计算 1 个时隙内的 RE 数  $N_{RE}$ 。该步骤中各个参数的取值:  $N_{\text{symp}}^{\text{sh}} = 13, N_{\text{DMRS}}^{\text{PRB}} = 24, N_{\text{oh}}^{\text{PRB}} = 0, n_{\text{PRB}} = 273$ 。那么  $N'_{RE} = 12 \times 13 - 24 - 0 = 132$ , 通过查找表 1, 得到  $\bar{N}'_{RE} = 144$ , 则  $N_{RE} = 144 \times 273 = 39\,312$ 。

第 2 步: 计算中间的信息比特  $N_{\text{info}}$ 。该步骤中,  $v = 4$ , 先假设  $I_{\text{MCS}} = 27$ , 对应的  $R = 948/1\,024, Q_m = 8$ 。

$N_{\text{info}} = 39\,312 \times 948/1\,024 \times 8 \times 4 = 1\,164\,618$ , 由于  $N_{\text{info}} > 3\,824$ , 跳到第 4 步。

第 4 步: 计算 TBS。通过式(5), 计算出量化的中间信息比特  $N'_{\text{info}} = 1\,179\,648$ ,

由于  $R > 1/4$  且  $N'_{\text{info}} > 8\,428$ , 通过式(6), 计算出 TBS 为 1 179 864。

第 5 步: 验证有效信道码率。该步骤中, 假设分配给 PDSCH 的 PRB 中只有 DM-RS。  $N_{\text{RE}}^{\text{PDSCH}} = (N_{\text{sc}}^{\text{RB}} \times N_{\text{symp}}^{\text{sh}} - N_{\text{DMRS}}^{\text{PRB}} - N_{\text{oh}}^{\text{PRB}}) \times n_{\text{PRB}} \times Q_m \times v = 1\,153\,152$ ,  $R_{\text{eff}} = (1\,179\,864 + 24)/1\,153\,152 = 1.023\,2$ , 大于 0.95, 说明初始传输采用  $I_{\text{MCS}} = 27$  不能解码成功。

假设  $I_{\text{MCS}} = 26$ , 对应的  $R = 916.5/1\,024, Q_m = 8$ , 重复第 2~4 步, 计算出 TBS 为 1 147 488,  $R_{\text{eff}} = (1\,147\,488 + 24)/1\,153\,152 = 0.995\,1$ , 说明初始传输采用  $I_{\text{MCS}} = 26$  不能解码成功。

假设  $I_{\text{MCS}} = 25$ , 对应的  $R = 885/1\,024, Q_m = 8$ , 重复第 2~4 步, 计算出 TBS 为 1 115 048,  $R_{\text{eff}} = (1\,115\,048 + 24)/1\,153\,152 = 0.967\,0$ , 说明初始传输采用  $I_{\text{MCS}} = 25$  不能解码成功。

假设  $I_{\text{MCS}} = 24$ , 对应的  $R = 841/1\,024, Q_m = 8$ , 重复第 2~4 步, 计算出 TBS 为 1 048 976,  $R_{\text{eff}} = (1\,048\,976 + 24)/1\,153\,152 = 0.909\,7$ , 说明初始传输采用  $I_{\text{MCS}} = 24$  可以解

码成功。TBS 为 1 048 976, 单个时隙有 2 个 TB, 时隙长度是 0.5 ms, 假设所有的时隙都是下行时隙, 则下行单用户(SU-MIMO)的峰值速率 =  $2 \times 1\,048\,976 / 0.000\,5 / 1\,024 / 1\,024 = 4\,002$  Mbit/s。

下行单小区(MU-MIMO)达到峰值速率的条件: PDSCH 在频域上使用 273 个 PRB, PDCCH 使用 1 个 OFDM 符号, PDSCH 在时域上使用 13 个 OFDM 符号; 3 个用户复用, 每个用户使用 1 个 TB, 每个 TB 传输 4 层数据; DM-RS 使用 Type2, 在时域上占用连续 2 个 OFDM 符号, 共有 12 个 DM-RS 端口,  $I_{\text{MCS}} = 24$ , 下行 TBS 是 1 048 976, 单个时隙有 3 个 TB, 假设所有的时隙都是下行时隙, 下行单小区(MU-MIMO)的峰值速率 =  $3 \times 1\,048\,976 / 0.000\,5 / 1\,024 / 1\,024 = 6\,002$  Mbit/s。

上行单用户(SU-MIMO)达到峰值速率的条件: PUCCH 使用 2 个 PRB, PUSCH 在频域上使用 271 个 PRB, 在时域上使用 14 个 OFDM 符号; 1 个 TB, 传输 4 层数据; DM-RS 使用 Type1 或者 Type2, 占用 1 个 OFDM 符号, 对应的 DM-RS 端口数分别是 4 个和 6 个。假设  $I_{\text{MCS}} = 27$ , 经过计算后得到的 TBS 是 1 277 992,  $R_{\text{eff}} = (1\,277\,992 + 24)/1\,352\,832 = 0.944\,7$ , 小于 0.95, 说明初始传输采用  $I_{\text{MCS}} = 27$  可以解码成功, 假设所有的时隙都是上行时隙, 上行单用户(SU-MIMO)的峰值速率 =  $1\,277\,992 / 0.000\,5 / 1\,024 / 1\,024 = 2\,438$  Mbit/s。

上行单小区(MU-MIMO)达到峰值速率的条件: PUCCH 使用 2 个 PRB, PUSCH 在频域上使用 271 个 PRB, 在时域上使用 14 个 OFDM 符号; 6 个用户复用, 每个用户 1 个 TB, 传输 2 层数据; DM-RS 使用 Type2, 占用 2 个连续的 OFDM 符号, 共计有 12 个 DM-RS 端口。  $I_{\text{MCS}} = 27$ , 经过计算后得到的 TBS 是 590 128,  $R_{\text{eff}} = (590\,128 + 24)/624\,384 = 0.945\,2$ , 小于 0.95, 说明初始传输采用  $I_{\text{MCS}} = 27$  可以解码成功, 单个时隙有 6 个 TB, 假设所有的时隙都是上行时隙, 上行单小区(MU-MIMO)的峰值速率 =  $6 \times 590\,128 / 0.000\,5 / 1\,024 / 1\,024 = 6\,753$  Mbit/s。

计算上述 4 个峰值速率的参数数值如表 2 所示。

### 3.2 某 5G 试验网的峰值速率

表 2 峰值速率的参数数值

类型	PRB/个	$N_{\text{symp}}^{\text{sh}}$	$N_{\text{DMRS}}^{\text{PRB}}$	$I_{\text{MCS}}$	$v$	$N_{\text{RE}}$	$N_{\text{info}}$	TBS/bit	TB/个	峰值速率(Mbit/s)
下行单用户	273	13	24	24	4	39 312	1 033 169	1 048 976	2	4 002
下行单小区	273	13	24	24	4	39 312	1 033 169	1 048 976	3	6 002
上行单用户	271	14	12	27	4	42 276	1 252 427	1 277 992	1	2 438
上行单小区	271	14	24	27	2	39 024	578 043	590 128	6	6 753



由于3 300~3 600 MHz和4 800~5 000 MHz都是TDD制式,不可能所有的时隙都是上行时隙或者下行时隙,5G NR能达到的峰值速率与时隙格式配置有关,接下来以某5G试验网的配置为例来分析5G NR能达到的峰值速率。

在某5G试验网中,1个子帧内的第1个时隙为下行时隙,14个OFDM符号全部用于下行传输,第2个时隙的5个OFDM符号用于下行传输、2个OFDM符号不发射任何信号、7个OFDM符号用于上行传输。

第1个时隙为下行时隙,根据3.1节的分析,TBS是1 048 976。

第2个时隙中有5个OFDM符号用于下行传输,则 $N_{\text{symb}}^{\text{sh}} = 4$ ,其余参数的取值与3.1节中的取值相同,当 $I_{\text{MCS}}=27$ 时,计算得到的TBS是147 576,  $R_{\text{eff}}=(147 576+24)/209 664=0.704 0$ ,小于0.95,说明初始传输采用 $I_{\text{MCS}}=27$ 可以解码成功。

第2个时隙中有7个OFDM符号用于上行传输,则 $N_{\text{symb}}^{\text{sh}} = 7$ ,其余参数的取值与3.1节中的取值相同。对于上行单用户(SU-MIMO),当 $I_{\text{MCS}}=27$ 时,计算得到的TBS是590 128,  $R_{\text{eff}}=(590 128+24)/624 384=0.945 2$ ,小于0.95,说明初始传输采用 $I_{\text{MCS}}=27$ 可以解码成功。对于上行单小区(MU-MIMO),当 $I_{\text{MCS}}>23$ 时,  $R_{\text{eff}}$ 均大于0.95,说明初始传输不能解码成功,当 $I_{\text{MCS}}=23$ 时,计算得到的TBS是245 976,  $R_{\text{eff}}=(245 976+24)/260 160=0.945 6$ ,说明初始传输采用 $I_{\text{MCS}}=23$ 可以解码成功。

根据该5G试验网的时隙格式配置,5G NR能达到的峰值速率分别如下:

下行单用户(SU-MIMO)峰值速率 $=2 \times (1 048 976 + 147 576) / 0.001 / 1 024 / 1 024 = 2 282 \text{ Mbit/s}$ ;

下行单小区(MU-MIMO)峰值速率 $=3 \times (1 048 976 + 147 576) / 0.001 / 1 024 / 1 024 = 3 423 \text{ Mbit/s}$ ;

上行单用户(SU-MIMO)峰值速率 $=590 128 / 0.001 / 1 024 / 1 024 = 563 \text{ Mbit/s}$ ;

上行单小区(MU-MIMO)峰值速率 $=6 \times 245 976 / 0.001 / 1 024 / 1 024 = 1 407 \text{ Mbit/s}$ 。

## 4 结束语

5G NR单用户(SU-MIMO)和单小区(MU-MIMO)的实际速率还与终端能力、无线环境、业务类型、调度策略等密切相关。在实践中,可以参照本文给出的峰值速率计算方法,根据网络配置参数,如时隙格式、 $N_{\text{symb}}^{\text{sh}}$ 、 $N_{\text{DMRS}}^{\text{PRB}}$ 、 $N_{\text{oh}}^{\text{PRB}}$ 、分配给PDSCH和PUSCH的PRB数、

$I_{\text{MCS}}$ 等,计算出5G NR能达到的峰值速率,然后以此作为基准,用于评估不同设备、不同无线环境下的网络性能。

## 参考文献:

- [1] NR; Base Station (BS) radio transmission and reception; 3GPP TS 38.104[S/OL]. [2018-04-15]. ftp://3gpp.org/specs/.
- [2] NR; Physical channels and modulation; 3GPP TS 38.211[S/OL]. [2018-04-15]. ftp://3gpp.org/specs/.
- [3] NR; Multiplexing and channel coding; 3GPP TS 38.212[S/OL]. [2018-04-15]. ftp://3gpp.org/specs/.
- [4] NR; Physical layer procedures for control; 3GPP TS 38.213[S/OL]. [2018-04-15]. ftp://3gpp.org/specs/.
- [5] NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2; 3GPP TS 38.300[S/OL]. [2018-04-15]. ftp://3gpp.org/specs/.
- [6] NR; Physical layer procedures for data; 3GPP TS 38.214[S/OL]. [2018-04-15]. ftp://3gpp.org/specs/.
- [7] NR; Radio Resource Control (RRC) protocol specification; 3GPP TS 38.331[S/OL]. [2018-04-15]. ftp://3gpp.org/specs/.
- [8] 刘影帆,孙斌. 5G移动通信技术及发展探究[J]. 通信技术,2017,50(2):287-291.
- [9] 许光斌,赵大威,何旭初. 5G帧结构分析[J]. 信息通信,2018,189(9):18-20.
- [10] 冯宇,王立春. 5G信道测量解决方案[J]. 电信网技术,2015(11):84-88.
- [11] 王忱. 浅谈5G通信中的MIMO和LDPC关键技术[J]. 数字通信世界,2017(11):9-10,21.
- [13] 万青晶,陆怡琪,田梦倩. 面向5G无线通信系统中若干物理层技术探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2018,16(6):962-969.
- [14] 刘云. 5G无线通信网络物理层关键技术分析[J]. 通讯世界,2017(9):118-119.
- [15] 倪善金,赵军辉. 5G无线通信网络物理层关键技术[J]. 电信科学,2015,31(12):40-45.
- [16] 刘馨. 基于面向5G无线通信系统的关键技术探讨[J]. 数字通信世界,2018(4):50-50.
- [17] XIA S, HAN X, XIAO Y, et al. Uplink control channel design for 5G ultra-low latency communication [C]// IEEE International Symposium on Personal. 2016.
- [18] 刘涛. 5G无线通信网络物理层关键技术[J]. 通讯世界,2017(20):47-48.
- [19] 张骏. 5G移动通信网络未来发展趋势与应用[J]. 信息技术与信息化,2018,225(12):123-125.

### 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、规划和优化工作;张艺译,毕业于南京邮电大学,工程师,学士,主要从事无线网络的规划和优化工作。