

RedCap 下行速率 优化技术研究

Study on RedCap Downlink Rate Optimization Technology

欧阳晖(中国电信股份有限公司佛山分公司,广东 佛山 528000)

Ouyang Hui(China Telecommunications Co.,Ltd. Foshan Branch,Foshan 528000,China)

摘要:

RedCap已逐步应用,但在20 MHz带宽和默认基本网络参数配置条件下,终端下行峰值速率和理论计算结果有显著差异。针对此差异,分析了影响下行速率的网络参数配置,如平均调度次数、编码速率和信道开销等因素。从公共信道广播机制优化和PDCCH资源调度参数优化2个方面,提出并总结RedCap下行速率优化手段。根据RedCap和eMBB业务分布的特点和要求,合理运用RedCap承载的BWP、广播波束和PDCCH资源调度等下行速率优化手段的组合。最后根据典型优化手段的实际效果,进一步给出相应的建议。

关键词:

RedCap; 下行速率; BWP; 波束赋形; CORESET
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.03.009
文章编号:1007-3043(2026)03-0046-06
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:

RedCap has gradually been applied to practical 5G application projects, but with the 20MHz bandwidth and the default basic network parameter configurations, there is a significant difference between the actual downlink peak rate and the theoretical calculation results. To address this difference, factors such as average scheduling times, encoding rate, and channel overhead that affect the downlink rate of network parameter configuration are analyzed and studied. Proposals and summarizations of RedCap downlink rate optimization methods are also provided from two aspects, including optimizing the public channel broadcasting mechanism and the PDCCH resource scheduling parameters. Based on the characteristics and requirements of the distribution of RedCap and eMBB services, a reasonable combination of downlink rate optimization methods such as BWP, broadcast beam, and PDCCH resource scheduling carried by RedCap should be utilized. Based on the practical results of typical optimization methods, further recommendations are provided.

Keywords:

RedCap; Downlink-Rate; BWP; Beamforming; CORESET

引用格式:欧阳晖. RedCap 下行速率优化技术研究[J]. 邮电设计技术, 2026(3):46-51.

1 RedCap 技术简介

为了低成本支持工业传感器、视频监控和可穿戴设备,3GPP通过NR RedCap工作项目建立了一个框架,以支持适用于一系列用例的低性能NR设备。这

些用例要求低UE复杂性,有时还要求低UE功耗。为了进一步扩大成本相对较低、能耗低、数据速率要求低的RedCap的市场,3GPP的各个工作组将考虑进一步降低其复杂性^[1]。

在Release 17阶段,3GPP TR 38.875^[2]的第7.2至7.7节分别记录了所研究的RedCap每种UE复杂度降低技术的评估结果,包括UE接收和发射天线数量降

收稿日期:2026-01-21

低、UE 带宽降低、半双工 FDD 操作、UE 处理时间放宽、最大 MIMO 层数放宽和最大调制阶数放宽等；第 7.8 节描述了不同 UE 复杂度降低技术组合的特性。

在 Release 18 阶段，3GPP TR 38.865^[3] 的第 7.2 至 7.4 节分别记录了所研究的 RedCap 每种 UE 复杂度降低技术的评估结果，包括 UE 带宽降低、UE 峰值速率降低和 UE 处理时间放宽。对于放宽的 UE 处理时间线，第 7.4 节提供了分析，而第 7.5 节仅结合其他技术提供了复杂性评估，其中描述了不同单个 UE 复杂度降低技术组合的属性。

目前，RedCap 已经逐步应用到 5G 项目中，国内业界对其关键技术、峰值速率、部署策略及网络、业务规划等方面已经有了一定的研究^[4-5]。在实际应用中，发现如果直接应用 NR 基站的默认配置，Release 17 版本的 RedCap 终端在 20 MHz 带宽配置下的下行峰值速率和理论计算结果有较大差异。针对此问题，本文结合对各种参数配置的理论研究和终端测试数据，分析产生这种差异的原因，给出优化方法和建议，并评估建议方案的应用效果。

2 RedCap 下行速率影响因素分析

2.1 RedCap 下行峰值速率理论分析

根据 3GPP 协议，结合无线通信和数字通信原理，无论是 RedCap 用户还是普通 5G eMBB 用户，物理层意义的峰值速率（单位为 Mbit/s）可由式（1）计算^[4,6]：

$$R = 10^{-6} \times \sum_{j=1}^J \left\{ v_{\text{Layers}}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{\text{max}} \cdot \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}, \mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot [1 - \text{OH}^{(j)}] \right\} \quad (1)$$

在 TDD 情况下，考虑上下行配比的影响，在单载波且比例因子设置为 1 的情况下，式（1）可以简化为：

$$R = 10^{-6} \times v_{\text{Layers}} \cdot Q_m \cdot R_{\text{max}} \cdot \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}, \mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot [1 - \text{OH}] \cdot R_{\text{DL}} \quad (2)$$

其中， v_{Layers} 、 Q_m 、 R_{max} 、 $N_{\text{PRB}}^{\text{BW}, \mu}$ 、 T_s^μ 、OH 和 R_{DL} 分别表示最大 MIMO 层数、调制阶数、最大编码率、在带宽和子载波间隔确定后可支持的最大 RB 数、OFDM 符号的时间长度、下行开销占比和下行符号数占比。根据文献 [4] 中的推导计算，当下行开销占比为 14% 时，最大编码率取 948/1 024，最大 MIMO 层数取 2（1T2R 终端配置），调制阶数取 8（256QAM），最大 RB 数取 48（20 MHz 带宽的典型配置，总 RB 数为 51，按照 B 厂家采用 RBG 调度方式，可调度数为 48），OFDM 符号的时间长

度取 0.5 ms/14，对于 3.5 GHz 频段，如果采用 2.5 ms 双周期（上下行配比为 7:3），特殊时隙配比为 8:4:2（这是目前中国电信和中国联通共建共享 3.5 GHz 频段的典型配置，特殊时隙配比 8:4:2 是为了减少远端干扰 [RIM]），可算出下行符号数占比为 61.43%，RedCap 的峰值速率约为 103.25 Mit/s，与参考文献 [4] 中图 2 的结果基本相符。

2.2 RedCap 下行峰值速率的实际应用效果

表 1 所示为实际应用中 RedCap 下行速率的 3 种配置下的测试用例的测试指标数据对比，均采用 3.5 GHz 频段（N78），带宽为 20 MHz，采用 2.5 ms 双周期（上下行配比 7:3），特殊时隙配比 8:4:2。在第 3 个测试用例中，A 设备厂家测试结果与理论实际较为相符。而前 2 个测试用例对应的 B 厂家的结果则与理论值相差较大。在第 1 个测试用例中，当使用基础 BWP 时（此时只采用 CD-SSB 而不采用 NCD-SSB）的速率“打折”更加严重，峰值速率仅有理论值的 40% 左右。

表 1 实际应用中 3 个测试用例的 RedCap 下行速率对比

基站设备厂家	BWP 配置数	使用 BWP	带宽/MHz	物理层速率/(Mbit/s)	MAC 层速率/(Mbit/s)	RLC 层速率/(Mbit/s)
B	1	基础	20	41.745	38.159	37.978
B	2	叠加	20	73.840	65.985	65.599
A	2	叠加	20	100.415	91.547	91.285

2.3 RedCap 下行峰值速率影响因素的分解

根据式（1），影响下行速率的主要因素下行开销占比（OH）。然而，影响开销占比大小的因素既有时域上的，也有频域上的。为了进一步研究影响因素，本文分析表 1 中对应测试数据记录的重要指标（参数）。结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，这 3 组数据差异较大的是下行调度次数、平均下行 MCS 和 SSB GSCN，而每时隙 RB 调度数则有轻微差别。采用 B 厂家的第 2 个测试用例的 RedCap，由于采用了 NCD-SSB，测试数据中显示的 SSB GSCN 与小区定义的 SSB 不同。而采

表 2 表 1 测试用例数据中对应的重要测试指标（参数）

基站设备厂家	BWP 配置数	物理层速率/(Mbit/s)	下行调制方式	下行调度次数/(次/s)	每时隙 RB 调度数	平均下行 MCS	SSB GSCN
B	1	41.745	256QAM	691	46.65	20.51	7 853
B	2	73.840	256QAM	1 328	47.71	20.39	7 835 ^①
A	2	100.415	256QAM	1 399	48.75	25.73	7 853

注：①这里采用的 NCD-SSB 的 GSCN 是 7 835，实际上位于 3.4~3.5 GHz 这 100 MHz 带宽内的最高的那个 BWP 内，可以推断出其对应的 CD-SSB 的 GSCN 是 7 783，因此和另外 2 个测试用例并不相同。

用A厂家的第3个测试用例数据并没采用NCD-SSB。可见2个厂家的RedCap BWP指配方式和策略有较大的不同,在后面的分析可以看到这间接影响了最终的下行速率表现。

为了更好地分析影响下行速率的因素,将 $Q_m^{(i)} = 8, T_s^\mu = 0.5/14$ 代入式(2),并将式(2)改写为:

$$R = 10^{-6} \times 2 \times 8 \times 12 \times 14 \times \sum_{s \in S_{DL}} N_{PRB}^{(s)} \cdot R^{(s)} \cdot [1 - OH^{(s)}] \quad (3)$$

其中, S_{DL} 为1s内被调度的下行时隙的集合,对于其中的一个时隙 $s \in S_{DL}$, $N_{PRB}^{(s)}$ 、 $R^{(s)}$ 和 $OH^{(s)}$ 分别为该时隙内调度的RB数、信道编码率和公共信道开销。因此,下行速率可以分解为平均调度次数、信道编码率(由于调制阶数认为都是256QAM,MCS等价于信道编码率因素)、每时隙RB调度次数和公共信道开销。根据表2,每时隙RB调度次数均在48个左右,因此这里仅考虑其他3个因素的影响,进一步将式(3)简化为:

$$R = 10^{-6} \times 2 \times 8 \times 12 \times 14 \times \overline{N^s} \cdot \overline{R^s} \cdot [1 - OH^s] \quad (4)$$

其中, $\overline{N^s}$ 是平均1s内的PDSCH调度时隙数, $\overline{R^s}$ 是调度符号内平均业务信道编码速率, OH^s 是时隙内调度符号开销(即CSI-RS等占比)。

2.4 平均调度次数分析

本节将分析式(4)中 $\overline{N^s}$ 的影响。根据表2,3个测试用例的平均每秒调度次数分别为691、1328和1399,与1400次/s的理论值相比,分别接近50%、95%和100%。特别是第1个测试用例的调度次数严重不足,存在大量的整个时隙调度不上的情况。最终原因是承载公共信道的控制资源集合(CORESET)导致RedCap用户无法使用该时隙的CORESET,而无法进一步调度对应的PDSCH。

根据3GPP协议^[7],CORESET是用于下行控制信道传输的物理资源集合,以连续的6个RB资源粒度进行配置。CORESET内的频域资源可以是连续的或者非连续的,时域上通过MIB、SIB或者专用RRC信令为UE配置最多3个CORESET。CORESET#0是一个特殊的CORESET,特指通过SSB/PBCH配置的CORESET,主要用于初始接入过程中广播消息的调度,例如传输调度SIB1的PDCCH。

搜索空间由UE需要盲检的一组候选PDCCH组成,分为公共搜索空间(CSS)和用户搜索空间(USS)。CSS分为Type0/0A/1/2/3-PDCCH CSS,分别用于RMSI

(SIB1)、OSI、RAR/Msg4、寻呼信道以及组公共控制信息的调度或者传输。

在NR的系统初始接入阶段^[7-8],UE首先读取SSB中的MIB消息中的pdcch-ConfigSIB1字段,包括controlResourceSetZero(CORESET#0配置,现网取值为10)和searchSpaceZero(Type0-PDCCH CSS的监听时机的配置)2个字段,进而解调对应的PDCCH和SIB1。在现网中,当controlResourceSetZero取值为10时,对应查3GPP TS 38.213中表13-4的Index=10那一行,得到SSB和CORESET复用模式为1,占用RB数为48,占用时隙数为1,频域偏移RB数为12。其中,协议定义了3种SSB和CORESET#0的复用模式^[7],分别是复用模式1、2和3。对于复用模式1,在时域上SSB和相关联的CORESET#0出现在不同的时刻(很可能不是同一个时隙)。在频域上,SSB传输带宽(20个RB)被CORESET#0传输带宽(48个RB)所覆盖。结合以上分析,RedCap使用的BWP和CORESET#0的关系如图1所示。

类似地,在测试用例1中,调用其他公共信道的CORESET所在的时隙也无法调用RedCap的PDSCH。在此理论基础上,可以分析表2中前2个测试用例的下行调度次数。

a) 测试用例1。RedCap默认DL-BWP与小区的初始DL-BWP重合,需要调度大部分公共信道,如RMSI、OSI、寻呼信道、RAR/Msg4等;而且每种公共信道对每个广播波束相应都要调度一次,而现网配置7个波束,等价于在每个调度周期内,CORESET调度次数乘以7。在这些信道中,寻呼信道的周期一般设置

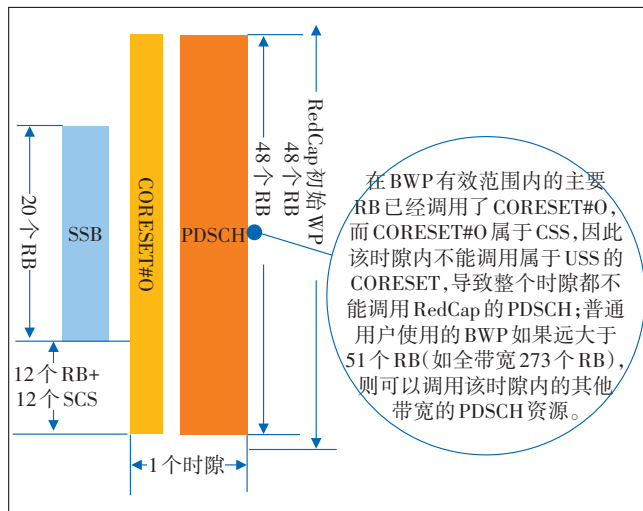


图1 复用模式1下RedCap使用BWP和CORESET#0的关系

为 10 ms(20 时隙), RMSI 周期为 20 ms(40 时隙), 其他公共信道的周期比较长。考虑到这些公共信道的 CORESET 资源相互之间可能有重叠, 估算不可调度时隙的比例下限是 7/20, 上限是 7/20+7/40, 即 35%~52.5%, 且重叠的概率较低, 更接近上限, 与实际测试结果 50% 基本相符。

b) 测试用例 2。RedCap 默认 DL-BWP 不与小区的初始 DL-BWP 重合, 有 NCD-SSB, 但调度的公共信道仅需服务 RedCap 用户, 因此 CORESET 资源被占用的概率大大降低, 只有 5% 左右。

2.5 信道编码速率和信道开销分析

本节将分析式(4)中 $\overline{R^s}$ 和 OH^s 的影响。根据 3GPP TS 38.214 协议^[9]中表 5.1.3.1-2 的定义(这里假定 UE 所处的无线质量足够好, 因此调度采用 256QAM 表, 即表 5.1.3.1-2), 当 MCS 取值为 20~27 时, PDSCH 采用 256QAM 调制方式, 将该表略加整理, 结果如表 3 所示。

将表 3 的编码速率, 采用插值估计的方法, 可估算出表 2 中 3 个测试用例的编码速率($\times 1024$)分别为 696.75、693.615 和 907.995。在此基础上, 可以估算一个被调度时隙内 14 个符号中无法被调度的符号数, 3 个用例分别是 4、5 和 5 个, 结合表 3 和式(4), 可以测算出理论上 3 个测试用例的速率和实际测试值的比较, 结果如表 4 所示。

尽管以上测算方式准确性比较高, 但结果是通过

表 3 3GPP TS 38.214 协议表 5.1.3.1-2 中 MCS 取值 20~27 分析

MCS 索引	调制阶数	目标编码速率 ($\times 1024$)	与理想编码速率的比值/%	频谱效率
20	8	682.5	71.99	5.332 0
21	8	711	75.00	5.554 7
22	8	754	79.54	5.890 6
23	8	797	84.07	6.226 6
24	8	841	88.71	6.570 3
25	8	885	93.35	6.914 1
26	8	916.5	96.68	7.160 2
27	8	948	100.00	7.406 3

表 4 根据 MCS 测算的 3 个测试用例下行速率与实际比较

基站设备/厂家	BWP 配置数	下行调度次数/(次/s)	每时隙 RB 调度数	估算编码速率 ($\times 1024$)	无法调度符号数/开销/%	测算物理层速率/(Mbit/s)	实际物理层速率/(Mbit/s)
B	1	691	46.65	696.750	28.571	42.112	41.745
B	2	1 328	47.71	693.615	35.714	74.160	73.840
A	2	1 399	48.75	907.995	35.714	104.500	100.415

MCS 算出来的(属于从一个测试结果推导另一个测试结果), 无法解释 3 个用例中 MCS 为什么有这样的差异。可以将待优化的 $\overline{R^s}$ 和 OH^s 的开销合并考虑, 即考虑在一个被调度的时隙中, 有哪些符号无法被调用, 计算这个开销的比例, 包括 SSB RE、RMSI、PDSCH DMRS、TRS 和 CSI-RS 等, 分析结果如表 5 所示。在此基础上, 测算出 3 个用例的下行速率, 结果如表 6 所示, 测算的结果和实际也较为接近。

表 5 不同配置下的公共信道开销对比

开销项	配置说明	开销计算	开销/%
SSB RE	20 ms 周期, 7 波束	$(48/48) \times (4/28) \times (12/14) - 2 \times (2 \times 2/14) \times (1/7)/8$ (SSB 和 S slot 有重合, 需要减去一部分重合的开销)	11.22
	20 ms 周期, 单波束	$(48/48) \times (1/28) \times (12/14)$	3.06
SIB1 (RMSI)	20 ms 周期, 7 波束 ^①	$(48/48) \times (7/28) \times (12/14) - 2 \times (2 \times 2/14) \times (1/7)/4$ (RMSI 和 S slot 有重合, 需要减去一部分重合的开销)	19.39
	40 ms 周期, 单波束	$(48/48) \times (0.5/28) \times (12/14)$	1.53
公共信号	默认配置	PDSCH DMRS: 1+1, type1 TRS: 20 ms CSI-RS: 20 ms	25.05
B 厂家 (测试用例 1、2)	RMSI 周期 20 ms, 7 波束	$11.22\% + 19.39\% + 25.05\%$	55.66
A 厂家 (测试用例 3)	RMSI 周期 40 ms, 单波束	$25.05\% + 2/14$ ^②	39.34

注: ①实际上 SIB1 (RMSI) 和其他公共信道/信号的广播波束数量和扫描方式是跟随 SSB 的; ②这个多出的符号开销是 2 个厂家之间的差异。

表 6 根据信道开销测算的 3 个测试用例下行速率与实际比较

基站设备/厂家	BWP 配置数	下行调度次数/(次/s)	每时隙 RB 调度数	估算信道开销/%	测算物理层速率/(Mbit/s)	实际物理层速率/(Mbit/s)
B	1	691	46.65	55.66	35.568	41.745
B	2	1 328	47.71	55.66	69.910	73.840
A	2	1 399	48.75	39.34	102.959	100.415

3 RedCap 下行速率优化方法和效果

根据第 2 章的分析, 影响 RedCap 下行速率的因素包括每秒调度的时隙数和调度时隙内公共信道的开销。优化手段可以分为公共信道广播机制优化和 PDCCH 资源调度参数优化两大类。

3.1 公共信道广播机制优化

RedCap 设计的本意就是要通过降低天线端口数、降低调制阶数、放松处理时延等达到降低终端成本和节能的目的。因此,如果仅考虑 RedCap 用户的需求,降低波束数量等参数是可取的。表 7 给出了公共信道广播机制优化手段的作用和局限性。

表 7 公共信道广播机制优化 RedCap 下行速率

优化手段	参数配置建议	主要作用	局限性
减少 SSB 广播波束数量	从默认值的 7 个减少到 1 个	减少承载公共信道的 CORESET, 从而增加平均调度的时隙数; 减少 SSB 对时频资源的占用	降低小区的波束赋形扫描能力, 从而降低小区的整体覆盖能力
减少 SIB1 的广播周期	从默认的 20 ms 增加到 40 ms 或者更高	增加平均调度的时隙数; 减少 SIB1 对视频资源的占用	降低小区内所有 UE 对 SIB1 的解调能力
增加 RedCap 的 BWP 数量	从默认的 1 个增加到 2 个或者更多	RedCap 默认的 BWP 内很少承载公共信道的 CORESET, 从而增加平均调度的时隙数; 减少时频资源被普通用户争抢的概率	影响小区内普通用户的吞吐率, 特别是造成连续高带宽 BWP 被中断, 难以达到峰值速率
频域调度方式 ^①	默认 type0 调度方式, 即 RBG 调度方式, 以 16 个 RB 为单位调度; 增加 type1 调度方式, 可以调度若干个连续的 RB	RedCap 每时隙可以最多调度 51 个 RB, 峰值速率有所提高	提高的幅度有限

注: ①实际上, 2024 年的版本中, B 厂家仅采用 type0 调度方式, A 厂家可采用 type1 调度方式, 因此每时隙调度 RB 数略高于前者, 但以后可能会改变。

3.2 PDCCH 资源调度参数优化

从前面的分析可知, 提高 RedCap 下行速率的关键因素是提高 RedCap 用户 PDCCH 资源调度的机会。造成 RedCap 无法得到足够 PDCCH 资源的一大原因是原有 5G 系统设计主要面向 100 MHz 带宽的用户, PDCCH 资源中的 CSS (通常占用了 RedCap 默认的 BWP 全带宽) 不能被 USS 调度, 也就无法调度 RedCap 的信道资源。为了解决此问题, 一个比较有效的方法是放开 CSS 搜索空间占用带宽内的资源, 让包括 RedCap 用户在内的普通用户也能在该带宽范围内调用相应的 USS, 并在此基础上优化其他参数。具体的参数优化方案如表 8 所示。

3.3 场景化优化方案组合

根据表 7 和表 8 对各种优化手段的作用和局限性的分析, 结合 5G 行业应用的实际需求, 总结出 RedCap 场景化 (分室内/室外、宏站/有源室分/无源室分、Red-

表 8 PDCCH 资源调度参数优化方案

参数名称	参数功能	作用机制	对性能影响
RedCap Common PDCCH 符号调度开关	该参数用于控制 RedCap Common PDCCH 符号调度功能是否生效	当开关打开时, 在 CORESET#0 上配置小带宽 BWP 上的 USS, 支持 RedCap 使用 Common PDCCH 符号的资源; 当开关关闭时, 该功能不生效	当开关打开时, RedCap 用户的上行与下行体验速率提升, 但小区中系统广播消息与寻呼等公共信号的覆盖下降; 当开关关闭时, 对网络性能没有影响
RedCap 下行 Type1 调度开关	该参数用于控制 RedCap 下行 Type1 调度功能是否生效	当开关打开时, 针对支持 Type0/1 动态指示能力的 RedCap 大包用户生效 Type1 调度; 当开关关闭时, 该功能不生效	当开关打开时, RedCap 用户下行吞吐率增加, 但小区下行吞吐率可能下降; 当开关关闭时, 对网络性能没有影响
上下行 Common CCE 共享开关	该参数用于控制上下行 Common CCE 共享功能是否生效	当开关打开时, 小区生效上下行 Common CCE 共享功能, 上行调度不受 Common CCE 资源比例的约束, 可以占用下行 Common CCE 资源; 当开关关闭时, 小区上下行 Common CCE 共享功能不生效	当开关打开时, Common CCE 分配失败率下降, 小区接入成功率和在网用户数增加, 但用户感知速率可能下降; 当开关关闭时, 对网络性能无影响

Cap 应用需求、eMBB 用户分布和需求) 优化方案组合建议如表 9 所示。在方案选择时, 需要根据 RedCap 业务和 eMBB 业务分布的特点和要求, 合理部署 RedCap 承载的 BWP、广播波束和 PDCCH 资源调度等参数。

3.4 场景化优化方案实施效果

聚焦工业互联网中 RedCap 应用的优化, 即室内有源室分覆盖场景, 对应第 3.3 节表 9 中第 3 个和第 4 个

表 9 RedCap 场景化优化方案组合建议

场景编号	室内/室外	宏站/有源室分/无源室分	RedCap 应用需求	eMBB 用户分布和需求	建议优化方案组合
1	室外	宏站	低	用户多, 有一定速率需求	RedCap 用单 BWP, 使用 CD-SSB, 室外站保持 7 波束/SIB1 周期 40 ms
2	室外	宏站	高	用户多, 有一定速率需求	RedCap 配置多 BWP, 优先采用 NCD-SSB, 室外站保持 7 波束/SIB1 周期 40 ms
3	室内	有源室分	高	用户少, 有一定速率需求	RedCap 用单 BWP, 使用 CD-SSB, 室分站采用单波束/SIB1 周期 40 ms
4	室内	有源室分	高	用户少, 速率要求低	RedCap 采用单 BWP, 使用 CD-SSB, 打开“RedCap Common PDCCH 符号调度开关”等开关, 室分站采用 7 波束/SIB1 周期 40 ms
5	室内	无源室分	高	用户少, 速率要求低	RedCap 配置多 BWP, 优先采用 NCD-SSB, 室分站采用单波束/SIB1 周期 40 ms

场景,并采用对应的优化方案组合。

首先研究单独一个 RedCap 用户 (1T2R/20 MHz) 下载数据的情况。从表 10 的结果可以看出,2 套优化方案都对 RedCap 用户的速率有大幅提升,场景 3 对应的方案优化效果更佳,接近理论值。场景 4 对应的方案尽管调度次数更多,但由于 SSB、SIB1 等公共开销更多,降低了 MCS,整体效果不如前者。

表 10 单独 RedCap 用户的优化实施效果

优化方案	广播波束个数	下行调度次数/(次/s)	每时隙 RB 调度数	平均下行 MCS	实测物理层速率/(Mbit/s)	理论计算速率/(Mbit/s)
优化前	7	691	46.65	20.51	41.745	42.112
场景 3 方案	1	1 318	47.28	25.17	103.268	104.029
场景 4 方案	7	1 385	47.17	20.88	86.158	86.674

进一步,研究一个 RedCap 用户 (1T2R/20 MHz) 和一个 eMBB 用户 (2T4R/100 MHz) 同时下载的情况,此时 2 个用户均采用 5QI=9,因此调度优先级一致。优化实施效果如表 11 所示。从表 11 可以看出,2 种方案的 RedCap 性能基本与表 10 一致。如果采用场景 4 方案,eMBB 用户的速率受到一定影响;如果采用场景 3 方案,由于单载波配置大幅降低系统开销,RedCap 和 eMBB 用户的速率均有所提升,eMBB 用户速率略优于默认配置下单用户情况。

表 11 RedCap/eMBB 混合用户的优化实施效果

优化方案	广播波束个数	用户	DL RA NK	下行调度次数/(次/s)	每时隙 RB 调度数	平均下行 MCS	实测物理层速率/(Mbit/s)	理论计算速率/(Mbit/s)
参考值	7	eMBB	3	1 399	251.92	23.59	813.642	815.740
优化前	7	RedCap	2	694	46.88	20.63	41.929	42.668
		eMBB	3 ^①	1 399	239.44	23.59	789.835	775.328
场景 3 方案	1	RedCap	2	694	47.76	25.17	53.325	55.334
		eMBB	3	1 395	226.53	26.38	820.736	825.202
场景 4 方案	7	RedCap	2	1 392	46.82	20.77	88.721	86.083
		eMBB	3	1 397	221.28	23.76	724.059	722.004

注:①尽管 eMBB 用户具有 4 个接收天线,但受限室内测试无线环境,下行 RANK 只能达到 3。

表 10 和表 11 还给出实际测试结果和理论分析结果的比较,两者已很接近,说明本文的分析方法有效。根据以上优化效果,对于室内场景,推荐使用场景 3 方案,即仅配置 1 个广播波束,可有效减少系统开销。

4 结束语

RedCap 通过多种技术方案降低了复杂度、成本以

及终端能耗。在实际部署中,RedCap 复用了 NR 现有频点,在 NR 定义的小区带宽范围(如 100 MHz)内,通过定义 RedCap 专用的 BWP 实现类似多载波的效果,并共享 PDCCH、PDSCH 等信道资源。在默认情况下,RedCap 采用单个 BWP,并正好涵盖 CD-SSB 和对应的 CORESET#0,因此峰值速率受到一定的影响,明显低于理论值。通过对广播波束配置、PDCCH 资源复用等参数的优化,以及多 BWP 的配置能够提高 RedCap 的下行速率,但会对同一小区下的 eMBB 用户造成一定的影响。优化方案的实施结果显示,需要根据 RedCap 应用场景和用户分布合理组合运用优化手段。

随着 Release18 协议的冻结,支持 Release18 的 RedCap 终端将会逐步出现,更多支持带宽、天线数和调制阶数的终端将会在 5G 网络中并存。如何在不同能力和 SLA 需求的终端并存的情况下做好多用户需求的优化和权衡,将是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 3GPP. New SID on study on further NR RedCap UE complexity reduction: 3GPP RP-213661 [R/OL]. [2025-12-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [2] 3GPP. Study on support of reduced capability NR devices: 3GPP TR 38.875 [S/OL]. [2025-12-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [3] 3GPP. Study on further NR RedCap UE complexity reduction: 3GPP TR 38.865 [R/OL]. [2025-12-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [4] 王璐璐,曹亘,韩潇,等. 5G RedCap 关键技术研究[J]. 邮电设计技术,2023(3):10-14.
- [5] 曹恒,尚海波,平军磊,等. RedCap 部署策略建议[J]. 邮电设计技术,2024(1):1-5.
- [6] 3GPP. NR; user equipment (UE) radio access capabilities: 3GPP TR 38.306 [S/OL]. [2025-12-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [7] 3GPP. NR; Physical layer procedures for control: 3GPP TS 38.213 [S/OL]. [2025-12-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [8] 3GPP. 5G; NR; physical channels and modulation: 3GPP TS 38.211 [S/OL]. [2025-12-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [9] 3GPP. 5G; NR; physical layer procedures for data: 3GPP TS 38.214 [S/OL]. [2025-12-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

作者简介:

欧阳晖,毕业于北京邮电大学,系统分析师和系统架构设计师,硕士,主要从事 5G 无线网络优化和 5G 工业互联网应用研究工作。

