

3.5 GHz 5G 新空口基站设计与外场实验研究

刘光毅, 王启星, 刘建军, 王飞, 郑毅

(中国移动研究院无线与终端技术研究所, 北京 100053)

摘 要: 5G 的设计目标是满足 2020 年以后移动通信市场的业务发展新需求, 满足更高速率、更低时延、更大连接数密度等能力要求。3.5 GHz 是目前全球规划的最典型的 5G 频率, 并有望实现全球统一划分, 5G 在该频段上的性能表现对未来全球的 5G 部署具有极大的参考意义。结合 5G 新空口标准的第一个版本, 中国移动联合国内合作伙伴开展了面向 3.5 GHz 的 5G 样机设计和优化, 并在典型的城区外场环境开展了小规模的外场实验, 针对 5G 系统的峰值速率、小区吞吐量、覆盖能力等进行了测试验证。测试结果充分证明, 5G 新空口系统可以实现 1 Gbit/s 以上的峰值速率和 4 ms 的空口单向时延。

关键词: 5G; 新空口; 大规模天线; 外场实验

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019045

Latest progress on 3.5 GHz 5G NR trial

LIU Guangyi, WANG Qixing, LIU Jianjun, WANG Fei, ZHENG Yi

Department of Wireless and Device Technology, China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: The 5th generation mobile system (5G) was designed to fulfill the mobile market requirements for higher data rate, lower latency and higher connection density beyond 2020. 3.5 GHz spectrum was a typical band for 5G deployment and could be a global band for 5G development. The performance of 3.5 GHz 5G would be very meaningful as a reference for global operators. Based on the first release of 5G specification frozen in June 2018 by 3rd generation partner project (3GPP), field trials of 5G network in typical urban area were conducted to validate the peak data rate, cell throughput and latency of 5G network. The trial results show that 5G NR system can achieved 1 Gbit/s peak data rate and 4 ms latency of single direction.

Key words: 5G, new radio, massive MIMO, field trial

1 引言

第四代移动通信系统(4G)的快速部署和渗透不仅带来了移动互联网业务的空前繁荣,也催生着新的业务和应用。随着4G的成功商用,研究人员开始将目光投向新一代移动通信系统——5G。5G旨在提供更高数据速率、更低延迟、极高的可靠性、极高流量密度以满足增强的移动宽带、超低时延超高可靠、大连接等场景下的未来业务需求^[1]。为了实现这些能力,5G系统需要支持更大的带宽、更多

的天线、更高的处理能力、更灵活的协议和硬件结构,这些都构成了对基站和系统的设计和实现提出了代际更替要求,对基站的产品研发提出了非常高的挑战。

考虑到5G从技术研究到标准和产品的整个周期大为缩短,这就要求5G的发展要以超常规的方式来推进,实现技术成熟、标准制定和产品化的齐头并进。随着5G的第一个完整的标准版本Release 15在2018年6月的功能冻结,5G的产业化推进进入最后冲刺阶段,基于5G标准的技术实验和外场测

收稿日期: 2019-01-13; 修回日期: 2019-02-14

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2017ZX03001012-002)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China (No.2017ZX03001012-002)

试对加速 5G 的商用进程尤为关键。为此, 在 IMT-2020 推进组的统筹规划下, 国内三大运营商纷纷开始了面向 5G 的规模实验。

本文结合产业的最新进展, 介绍 5G 预商用基站系统设计和优化, 特别是面向 3.5 GHz 的上行覆盖增强技术 (SUL, supplementary uplink) 及其仿真性能评估, 并开展 5G 基站样机的外场实验, 对 5G 系统的单用户峰值吞吐量、多用户吞吐量、室内外覆盖的能力和时延进行了详细的测试和验证。

2 5G 实验样机设计

对于 5G 基站样机的设计, 需要考虑的主要包括空口的基本参数和大规模天线的设计和优化。

2.1 5G 基站的基本参数

工作频段: 3 400~3 600 MHz, 系统带宽 ≥ 100 MHz^[2-3]。

波形: 下行链路采用循环前缀-正交频分复用 (CP-OFDM, cyclic prefix-orthogonal frequency division multiplexing); 上行链路采用 CP-OFDM 和离散傅里叶变换扩频 OFDM (DFT-S-OFDM, digital Fourier transform spread orthogonal frequency division multiplexing)^[4]; 支持为免调度物理上行共享信道 (PUSCH, physical uplink share channel) 配置波形; 支持通过重新配置或物理下行控制信道 (PDCCH, physical downlink control channel) 指示调整上行波形。

链路的多址: 支持上行链路和下行链路的正交多址 (OFDMA, orthogonal frequency division multiple access)。

信道编码: 上行链路和下行链路数据信道采用低密度校验码 (LDPC, low density parity check code), 上行链路和下行链路控制通道采用 Polar 码^[5]。

调制方案: 下行链路支持 QPSK (quadrature phase shift keying)、16QAM (QAM, quadrature amplitude modulation)、64QAM 和 256QAM; 上行链路支持 $\frac{\pi}{2}$ -BPSK (BPSK, binary phase shift keying), BPSK, QPSK, 16QAM 和 64QAM, 建议使用 256QAM^[6]。

MIMO (multiple input and multiple output): 下行单用户 MIMO 支持 4 个下行链路 MIMO 层, 建议使用 8 个下行链路 MIMO 层; 上行链路单用户 MIMO 支持 2 个上行链路 MIMO 层, 建议使用

4 个上行链路 MIMO 层; 下行链路多用户 MIMO 支持的层数 ≥ 16 , 上行链路多用户 MIMO 支持的层数 ≥ 8 ; 支持基于覆盖要求的公共 PDCCH 覆盖增强, 如系统信息块 (SSB, system synchronization/public broadcast channel block), 信道状态信息参考符号 (CSI-RS, channel status information reference signal), 剩余最小系统消息 (RMSI, remaining minimum system information) 等; 根据上行链路探测导频 (SRS, sounding reference signal) 或测量报告^[7], 区分 UE 选择下行链路波束以增加覆盖范围。

假设 100 MHz 带宽中, 下行链路的资源配置占 70%, 上行链路的资源配置占 20%, 保护间隔占 10%。单用户峰值速率要求为: 下行链路 1.3 Gbit/s (256 QAM, 不少于 4 个数据流) 或者 2 Gbit/s (64 QAM, 不少于 8 数据流); 上行链路 175 Mbit/s (64 QAM, 2 个数据流) 或者 370 Mbit/s (64 QAM, 4 个数据流)。多用户的小区峰值吞吐量要求为: 下行大于 4 Gbit/s (大于 16 个数据流), 上行大于 700 Mbit/s (大于 8 个数据流)。多用户 MIMO 技术的使用是 5G 系统提供更高速率的关键^[8]。5G 样机帧结构如图 1 所示。

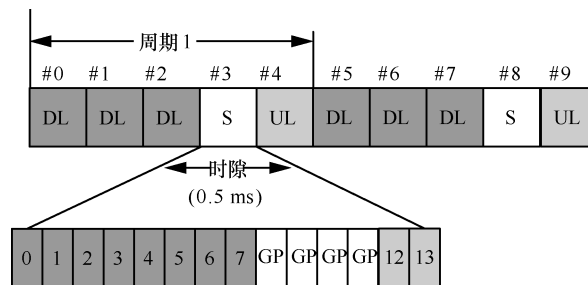


图 1 5G 样机帧结构

帧结构采用 2.5 ms 传输周期; 支持 2~4 符号 GP 配置 (例如 4 个符号 GP); #0、#1、#2 时隙每 2.5 ms 固定为下行时隙。#3 时隙是下行-GP-上行格式中的下行为主的时隙。SSB 信号可以在 #0、#1、#2 及 #3 时隙中传输。#4 时隙固定为上行时隙, 随机接入信道可以在 #4 时隙中传输。

2.2 大规模天线的设计和优化

对于基站样机的设计和开发, 除 200 W 总发射功率和 100 MHz 带宽要求外^[2-3], 最大的挑战来自于大规模天线的设计和优化。

对于 3.5 GHz 频率, 考虑铁塔对天面尺寸的要求, 迎风面小于 0.5 m^2 的要求、半波长的水平方向

阵元间距, 以及 0.75 波长的垂直方向间距, 阵子的双极化等因素, 一副天面总共可以布设 192 个阵子, 每个阵子的极化方向 96 个, 如图 2 所示, 图中“×”表示交叉极化的 2 个天线阵元。

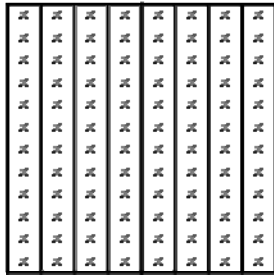


图 2 3.5 GHz 所能采用的最大天线尺寸和天线数布局

考虑系统性能的提升与硬件复杂度之间的折中, 需要优化有源天线单元 (AAU, active antenna unit) 所支持的射频 (RF, radio frequency) 通道数, 也就是独立的天线端口数。为便于基带的数字信号处理的优化, 天线端口数通常选择 2 的幂次, 如 2 个、4 个、8 个、16 个、32 个、64 个、128 个。

综合考虑不同天线端口数的物理能力对比, 64 通道天线在垂直维度上具有最好的波束扫描能力, 适用于覆盖更加立体的环境, 所以在后续的实验中采用 64 通道的 3D-MIMO 天线。

2.3 CPRI/eCPRI 的选择

对于支持 100MHz 带宽, 64 通道天线端口的 3.5 GHz 3D-MIMO 天线, 由于考虑 RF 和天线的一体化集成 AAU, 需要定义 AAU 和基带处理之间的接口。考虑传统的 (CPRI, common public radio

interface) 接口, 对于 100 MHz 和 64 通道天线端口的 3.5 GHz 样机来说, 如果考虑传统的 CPRI 接口、16 bit 量化方式, CPRI 的接口容量要求是 259.5 Gbit/s, 需要 3 根 100 Gbit/s 的光纤, 特别是对于 C-RAN (centralized radio access network) 的集中化部署场景, 对光纤的需求量将是非常巨大的, 实际难以满足容量的要求。同时, 由于目前前传接口的光模块成本比较高, 导致基站成本大幅上升, 所以需要考虑优化的解决方案, 以及加快推动 100 Gbit/s 光模块的成熟和成本下降。

1) CPRI 压缩

CPRI 压缩方案。通过降低采样率和量化比特数以降低接口带宽, 比如 2.6:1 的压缩率, 这样可以用一个 100 Gbit/s 的光模块满足容量的需求, 大幅降低成本, 同时光模块数量少, 接口的复杂度低, 对重量的增加最少。目前, 100 Gbit/s 的光模块预计 2020 年前可以成熟, 并且成本可以大幅度下降, 满足 2020 年 5G 商用部署的需求。

2) 增强的公共无线接口标准 (eCPRI, enhanced common public radio interface)

eCPRI 接口方案。将一部分物理层 (PHY 层) 功能上移到 AAU 中, 如在下行仅传输编码后的数据, 在上行仅传输空间处理 (MIMO 处理) 之后的数据, 如图 3 所示, 从而降低前传接口带宽。

eCPRI 的基带上移可以有不同的定义, 如图 3 所示, 虚线以下或者实线以下的功能都可以上移到 AAU, 移动越多, 对 AAU 的挑战越大。

eCPRI 方案 1 25 Gbit/s 接口容量, AAU 完成

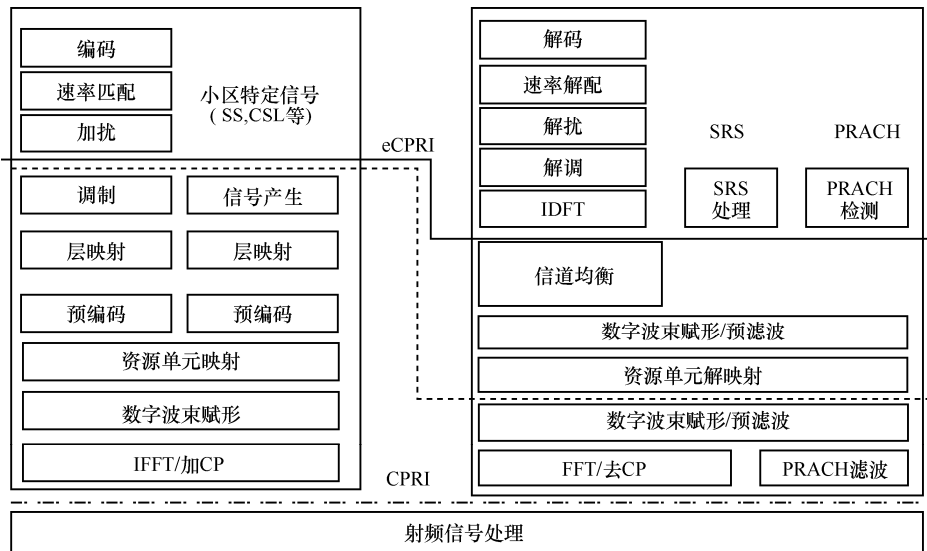


图 3 CPRI 和 eCPRI 的接口划分方案

Digital BF、信道估计/均衡等功能。由于基带上移到 AAU，为了降低对功耗、体积的影响，可能简化算法以降低处理复杂度，进而损失 3D-MIMO 的性能。

eCPRI 方案 2 2×25 Gbit/s 接口容量，AAU 主要完成 digital BF 的功能，如使用空间滤波相当于做了矩阵降维的处理，性能取决于算法实现，如滤波使用的导频（SRS 或 DMRS），性能需要验证。

对于 eCPRI 解决方案，虽然解决了接口容量的问题，但是带来了许多新的问题和风险，需要在后续产业化中充分重视和考虑，具体如下。

① 增加 AAU 的重量、体积和功耗，增加工程部署和施工难度。

② 物理层功能上移，为了优化重量、功耗和体积，可能简化算法性能，进而影响基站的整体性能。

③ 物理层功能上移，增加 AAU 的故障率，增加未来天面操作的概率，潜在增加网络维护成本。

④ 基带上移，现有的能力可能难以满足未来更先进、更复杂的物理层功能的要求，影响基站的前向兼容性。

整个大规模天线基站的几何特征，包括整机的重量、尺寸、体积等，基本满足铁塔对 AAU 的要求。5G 样机的几何特征如表 1 所示。

表 1 5G 样机的几何特征

尺寸	迎风面/m ²	重量/kg
880 mm×450 mm×140 mm	0.4	约 43

3 上行辅助传输（SUL）

对于 5G 的网络部署，考虑到目前全球分配的大多数 5G 频率都在 3 GHz 以上，预期其覆盖能力将比 4G 的频率要差，为了提升 5G NR 的单基站覆盖能力，特别是上行链路的覆盖能力，3GPP 在 5G 标准中引入了一种辅助上行载波来增强上行覆盖能力，即在中高频段的上行覆盖不足时，将 5G 的上行链路切换到一个更低频段，而下行链路仍然保留在原有的频段。这样，利用更低频段的较好传播特性，可以提升 5G 系统上行链路的覆盖性能。

在较高频段（3.5 GHz 频段）部署宏网无缝覆盖的 5G 系统时，可能存在上行传输覆盖受限和数据速率受限问题，采用更低频段的 SUL 可较好地缓解该问题。将一个低频的全上行载波（如 1.8 GHz 的 10 MHz）与一个上行覆盖受限的

TDD 载波进行配对传输，从而有效地提升弱覆盖用户的上行传输覆盖。

为了对 SUL 引入后的性能有一个合理的预期，本文对引入 1.8 GHz（10 MHz）SUL 进行了理论仿真分析，具体的仿真假设如表 2 所示，仿真的主要结果如图 4 所示。

表 2 仿真评估假设

参数	值
仿真场景	3D-Uma ISD 500m
天线极化模型	TR 36.873 天线模型 2
业务模型	FTP Model 1 数据分组大小为 0.5 MB, lambda= 6
系统带宽	10 MHz (50 PRB)
UE 接入方法	基于 CRS 端口 0 的 RSRP 的测量
载波频率	3D-Uma ISD 500 m: 2 GHz
下倾角	3D-Uma ISD 500 m: 100°
UE 速度	3 km/h
UE 分布	根据 TR36.873
UE 天线配置	2 Rx 交叉极化 (+90°/0°)
双工方式	TDD
CQI 反馈	5 ms
SRS 配置	2Tx, 10 ms 周期，宽带发送方式
传输模式	传输模式 10，一个 CSI 进程，动态 SU/MU-MIMO 自适应
开销	下行控制信道 3 个符号，每个 PRB 中 2 个 CRS 端口以及 DMRS 符号共占 12 个 RE
调度算法	频率选择性调度，每个 TTI 可以调度多个用户

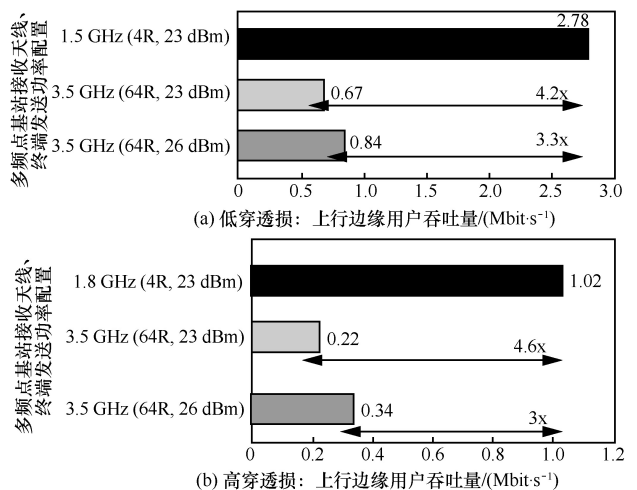


图 4 上行边缘吞吐量的仿真对比

从图 4 的仿真结果可以看出，在低穿透室内环境下，1.8 GHz 在基站 4 天线收和终端 23 dBm 发射功率（简称 4R，12 dBm）的情况下，小区边缘吞吐量可达 2.78 Mbit/s；而 3.5 GHz 在 64 天线

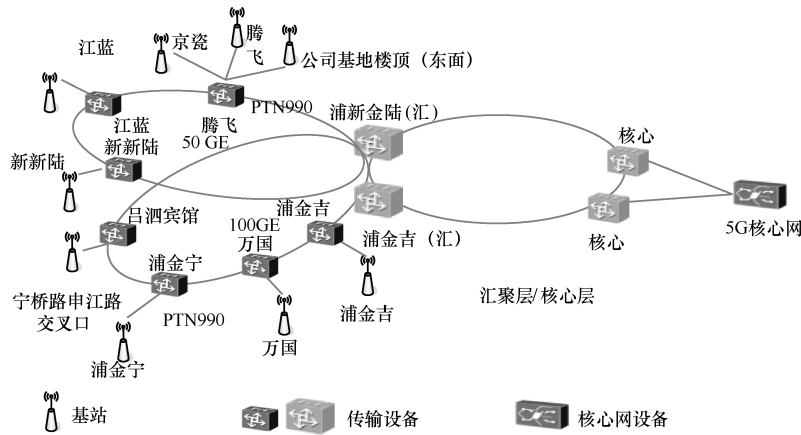


图 5 5G 实验网的结构

收和 23 dBm 发射功率下 (简称 64R, 23 dBm), 上行边缘吞吐量为 0.67 Mbit/s; 如果上行发射功率增加为 26 dBm (简称 64R, 26 dBm), 则吞吐量可增加到 0.84 Mbit/s。所以 1.8 GHz 的 SUL 相对于 3.5 GHz, 可增加边缘速率 2.3~3.2 倍。对于高穿透室内环境, 1.8 GHz 的 SUL 的增益则为 2~3.6 倍。

4 5G 外场实验

为了尽早对 5G 系统组网、覆盖等性能进行摸底验证, 面向规模实验, 华为在上海研发基地建设了 5G 的实验外场, 结合当地的地形地貌, 该区域可看作是密集城区环境, 建筑物比较密集, 楼层较高。整个实验网的逻辑结构如图 5 所示, 包括测试的终端、基站、传输网和核心网。

对于 5G 初期部署的增强移动宽带应用场景, 峰值数据速率、小区吞吐量、室内覆盖能力和时延是具有标志意义的关键性能指标。因此, 在外场实验中, 着重对上述四大关键性能指标进行了测试和摸底。在测试中, 配置 70% 的时间资源用于下行传输, 剩余的资源为保护时隙间隔和上行传输资源。对于现场实验, 样机支持 QPSK、64QAM、256QAM 等高阶调制以及多种码率。

4.1 单用户峰值速率测试

单用户峰值速率是基站的一种能力测试, 对于实际网络并无多大的参考意义, 所以, 为了完成峰值速率的测试, 本文选择了一个下行接收信号强度 (RSRP, reference signal received power) 足够大的测试点进行测试。具体的测试结果如图 6 所示, 对比了 100 MHz 带宽的 5G 和 10 MHz 带宽的 4G FDD (LTE FDD, long term evolution, full duplex division) 的下行和上行峰值吞吐量。

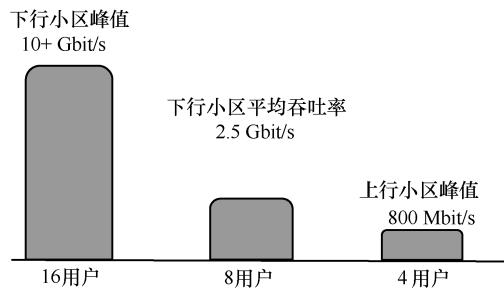


图 6 单用户峰值速率测试环境

4.2 小区峰值和平均吞吐量

在与单用户峰值速率测试相同的环境下, 完成了多用户的小区吞吐量的测试, 测试结果如图 7 所示。

从测试结果可以看出, 下行通信 16 个用户 32 个数据流可实现高于 10 Gbit/s 的峰值速率, 下行 8 个用户可实现 2.5 Gbit/s 的小区吞吐量。而上行 4 用户时, 由于上行分配的传输时间资源有限, 仅可实现 800 Mbit/s 的上行小区吞吐量, 但预期上行空间复用的用户数越多, 上行的峰值吞吐量越高。

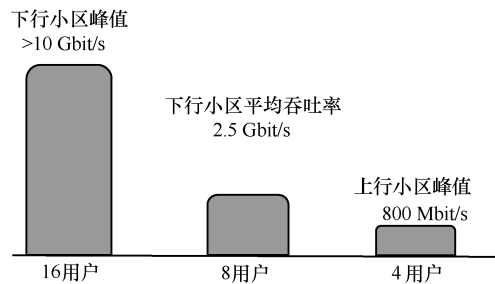


图 7 实测 5G 小区峰值吞吐量

与 4G 系统的 40 Mbit/s、20 MHz 的典型小区吞吐量相比, 当带宽被归一化后, 5G 可以实现数 10 倍以上的下行小区吞吐量增益。因此, 与 4G 相比, 3D-MIMO 可以实现 5G 的频谱效率提升至 4G 的

表 3 室内覆盖对比测试结果

	1.8 GHz		3.5 GHz		吞吐率增益/倍
	下行 RSRP/dBm	上行吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)	下行 RSRP/dBm	上行吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)	
浅层室内	-95.69	15.96	-105.60	5.27	2.03
	-99.46	15.88	-106.17	3.87	3.1
深度室内	-100.45	17.73	-108.67	2.15	7.26
	-100.72	18.90	-109.62	1.75	9.8
	-103.92	13.69	-108.97	1.65	7.31
	-102.51	17.34	-108.41	1.44	11
	-100.68	12.97	-106.97	3.74	2.47

3~5 倍的目标, 满足 3GPP 的最小性能要求。

4.3 室内覆盖能力

对于 5G 系统, 室外基站覆盖室内环境 (O2I, outdoor to indoor) 的性能非常关键, 因为 80% 的业务发生在室内, 而现网中大部分的室内业务是通过室外宏站覆盖室内解决的。所以, 在测试中专门引入了室外覆盖室内的测试, 特别是对比了 1.8 GHz SUL 和仅 3.5 GHz NR 时的边缘吞吐量性能, 具体的测试结果如表 3 所示。

在测试中, 本文选择了一些弱覆盖的点进行对比测试, 将同一个点的 1.8 GHz/3.5 GHz 的下行接收信号强度 RSRP 和相应的上行吞吐量记录在表格中。从结果可以看出, 在弱覆盖的环境下, 1.8 GHz SUL 可以带来 2 倍以上的上行吞吐量的提升。

4.4 9 小区连续覆盖性能测试

为了进一步测试 5G 网络的综合业务体验, 本节对 5G 网络连续覆盖环境下的用户体验速率进行一个连续测试。具体的测试结果如图 8~图 11 所示。其中图 8 和图 9 分别是下行空载和下行 50% 加载条件下的单用户拉网吞吐量的分布。从结果可以看出, 在一般城区 (400 m 站间距), 空载室外路测下行速率 50% 可达 600 Mbit/s; 加扰的影响非常大, 将导致低于 600 Mbit/s 的比例大幅上升, 即由 22% 上升到 54%。

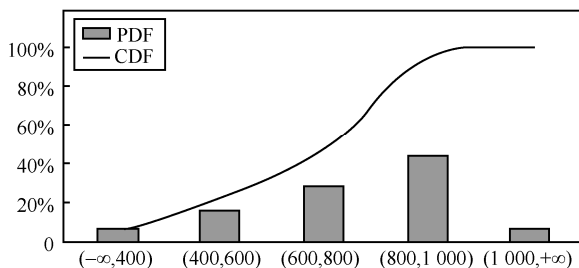


图 8 下行空载的单用户吞吐量分布/(Mbit·s⁻¹)

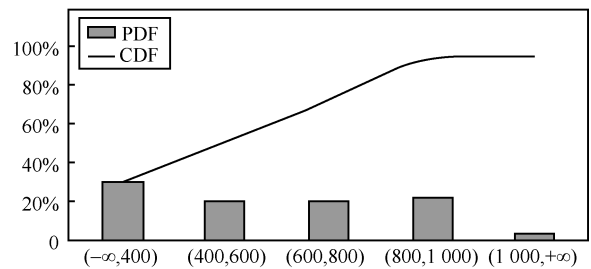


图 9 下行 50% 加载的单用户吞吐量分布/(Mbit·s⁻¹)

图 10 和图 11 分别是上行空载和 5dB 底噪抬升后的单用户拉网吞吐量的分布图。从测试结果可以看出, 在一般城区 (400 m 站间距), 空载室外路测上行速率大部分可以达到 100 Mbit/s 以上; 加扰对吞吐量的影响比较大, 导致低于 100 Mbit/s 的比例大幅上升, 由 24% 上升到 37%。

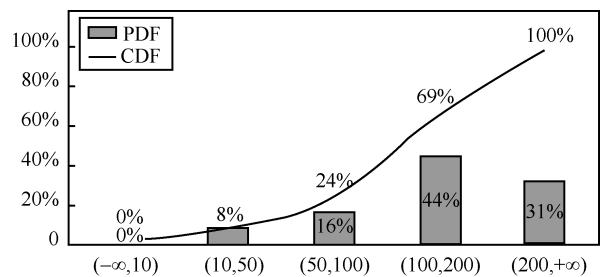


图 10 上行空载的单用户吞吐量分布/(Mbit·s⁻¹)

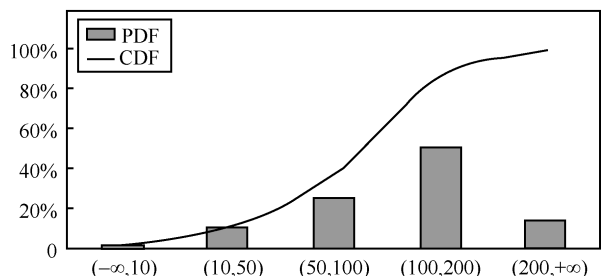


图 11 上行 5dB 底噪抬升后的单用户吞吐量分布/(Mbit·s⁻¹)

4.5 用户面时延

用户面时延,也即数据正确传输的时延,是 5G 标准的重要考核指标之一。在外场实验中,本文现场测试了单向的数据传输等待时间(定义为在无线空口上行或者下行方向,从空口协议栈层 2 或者层 3 SDU 入口点到对端协议栈层 2 或者层 3 SDU 出口点,成功传输一个应用层分组所用的时延)。测试中,传输具有随机大小的 FTP 数据分组,并且测试每个数据分组的传输等待时间,然后在 1 s 的时间窗内进行平均。

外场实验结果显示,eMBB 业务的用户面时延在 3.5~4 ms,5G 标准可以满足增强的移动宽带应用场景下的空口低时延小于 4 ms 的要求。

5 结束语

基于 3GPP 最新标准化进展,本文介绍 5G 新空口技术的基站样机设计、SUL 覆盖增强及性能仿真,以及为了综合验证 5G 通信系统组网、覆盖等性能的外场测试,对 5G 通信系统的单用户峰值吞吐量、多用户吞吐量、室内外覆盖能力和时延进行了详细的测试和验证。测试结果显示,5G 通信系统可以满足 3GPP 定义的增强移动宽带业务场景的 5G 性能指标需求,可带来 5 倍以上的频谱效率的提升。另外,SUL 利用低端 FDD 频谱的更好覆盖特性和连续传输,可较好地提升 3.5 GHz 频率在弱覆盖场景下的上行吞吐量。面对未来 5G 网络连续部署以及更加综合业务的需求,后续的外场实验还需要进行更大规模的组网实验,体现更加真实的干扰环境。同时考虑更加综合的业务,比如 URLLC (ultra reliable and low latency communication) 以及物联网等业务需求,需要更加全面的资源分配策略,保证在同一网络下能满足多种业务的需求。

参考文献:

[1] ITU. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s): ITU-R report M.2410 [S]. Geneva:

International Telecommunication Union, 2017:1-11.

- [2] CMCC. Guideline for 3.5GHz 5G system prototype and trial[S]. Barcelona: China Mobile Communication Corporation,2017:1-51.
- [3] CMCC. 5G Technical requirements for large scale field trial[S]. China Mobile Communication Corporation,2018:1-87.
- [4] 3GPP. Technical specification group radio access network, NR and NG-RAN overall description: 3GPP TS 38.300 V15.3.1[S].3rd Generation Partnership Project, 2018, 92(2):17-18.
- [5] 3GPP. Technical specification group radio access network, multiplexing and channel coding: 3GPP TS 38.212 V15.3.0[S]. 3rd Generation Partnership Project ,2018, 99(6):12-17.
- [6] 3GPP. Technical specification group radio access network, physical channels and modulation: 3GPP TS 38.211 V15.3.0 [S].3rd Generation Partnership Project, 2018, 96(2):13-14.
- [7] 3GPP. Technical specification group radio access network, physical layer procedures for data: 3GPP TS 38.214 V15.3.0 [S].3rd Generation Partnership Project, 2018, 96(39):34-72.
- [8] LIU G Y, HOU X Y, JIN J, et al., 3D-MIMO with massive antennas paves the way to 5G enhanced mobile broadband: from system design to field trials[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6):1222-1233.

[作者简介]



刘光毅 (1974-), 男, 四川彭山人, 博士, 中国移动研究院无线与终端技术研究所教授级高工, 总工程师, 主要研究方向为 5G 关键技术、标准化和产业化应用。

王启星 (1980-), 男, 广东惠州人, 博士, 中国移动研究院技术经理, 主要研究方向为 5G 物理层关键技术研究 and 标准制定。

刘建军 (1979-), 男, 湖北孝感人, 博士, 中国移动研究院无线物理层研究员, 高级工程师, 主要研究方向为 5G 物理层关键技术研究 and 标准制定。

王飞 (1986-), 男, 山西晋城人, 中国移动研究院无线系统研究员, 主要研究方向为 5G 物理层关键技术研究 and 标准制定。

郑毅 (1984-), 男, 吉林长春人, 中国移动研究院无线系统研究员, 主要研究方向为 5G 物理层关键技术研究 and 标准制定。