



4G 网络的资源瓶颈分析

王月珍, 尹珂, 梁健生, 陈宇

(中国电信股份有限公司广州研究院, 广东 广州 510630)

摘要: 分析了 LTE 网络的技术能力, 包括小区吞吐量, PDCCH、PHICH 和 PUCCH 信道容量, 接入容量, 寻呼容量等, 并基于技术能力分析了各种典型业务的 PRB、PDCCH CCE、PUCCH、PRACH、寻呼、RRC 连接等网络资源的消耗和占用情况, 最后推导了限制 LTE 网络提供更多用户服务的瓶颈资源, 提出了建设和运营优化时重点考察的瓶颈指标建议。

关键词: LTE; 技术能力; 典型流量模型; 资源消耗; 资源瓶颈

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017131

Analysis of resource bottleneck in 4G network

WANG Yuezhen, YIN Ke, LIANG Jiansheng, CHEN Yu

Guangzhou Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

Abstract: The technical capability of LTE network was analyzed, which included cell throughput, channel capacity of PDCCH, PHICH and PUCCH, random access capacity, paging capacity and so on. Then, based on the technical ability, the consumption and occupancy of network resources such as PRB, PDCCH CCE, PUCCH, PRACH, paging, RRC connection were analyzed. Finally, the bottleneck resources which restrict the LTE network to provide more customer service were deduced, and the bottleneck index proposal which focuses on the construction and operation optimization was put forward.

Key words: LTE, technical capability, classic traffic model, resource consumption, resource bottleneck

1 引言

经过近几年的建设部署,三大运营商的 4G 网络覆盖范围不断延伸和完善,开通 4G 服务的用户也呈现出规模化增长趋势。进入 4G 时代,哪些因素会成为限制网络为更多用户提供服务的瓶颈? 由于 4G 网络采用的是 LTE 空口技术,与 2G、3G 技术存在质的不同,以往重点关注的 WCDMA 资源、时隙占用率、ROT 抬升等瓶颈因素将不再

适用于 4G 网络,运营商在建设和运营过程中应该重点关注哪些瓶颈因素和指标? 本文将围绕这些问题进行相关的分析。

2 4G 网络的技术能力

网络的技术能力是分析资源瓶颈的前提,分析给出 LTE 系统的小区吞吐量, PDCCH、PHICH 和 PUCCH 信道容量,接入容量,寻呼容量等能力数据。所有的分析基于 20 MHz 带宽,采用 2×2

收稿日期: 2017-03-08; 修回日期: 2017-05-08

MIMO 系统进行。

(1) 小区吞吐量

根据 3GPP 标准组织提供的 4G 系统频谱效率指标和现场试验（对 1 800 MHz 频段、2.1 GHz 频段分别进行试验测试，系统带宽为 20 MHz）的测试数据，市区环境下 LTE 小区的平均吞吐量为：下行 33.8 Mbit/s，上行 14.7 Mbit/s。

(2) PDCCH 和 PHICH 信道容量

PDCCH 的主要作用是承载用户调度信息和寻呼指示，PHICH 的作用是针对用户的 PUSCH 数据传送反馈 ACK/NACK 信息。PDCCH、PHICH 的用户支持能力与参数 CFI 、 N_g 的配置相关，在 $CFI=3$ 、 2×2 MIMO 的典型配置下， N_g 为不同值时的 PDCCH 和 PHICH 用户支持能力见表 1。

表 1 PDCCH 和 PHICH 用户支持能力

PDCCH、PHICH 能力	PHICH N_g 配置			
	1/6	1/2	1.0	2.0
PHICH 支持用户数/个	24.0	56.0	104.0	200.0
PDCCH 可用 CCE 数/个	87.0	86.0	84.0	80.0
PDCCH 调度用户数/个	29.0	28.0	28.0	26.0

（注：每个用户的调度可以占用 1、2、4、8 个 CCE（control channel element），当环境越差、速率越低时，占用的 CCE 数越多，通常情况下平均每个用户占用 3 个 CCE。）

由表 1 可知，将 N_g 配置为 1.0 是较优的选择，此时 PDCCH 支持的调度用户数为 28 个用户/ms，PHICH 支持的用户数为 104 个用户/ms。且除了 $N_g=1/6$ 的情况外，PDCCH 均会先于 PHICH 成为瓶颈。考虑到现网中不会把 N_g 配置为 1/6，后续的资源消耗和瓶颈分析将不再把 PHICH 能力作为考察对象。

(3) PUCCH 信道容量

PUCCH 用于传输上行控制信息，包括上行资源请求、周期性的 CQI/PMI 和 RI、ACK/NACK，占用整个带宽边缘的 RB（上边带和下边带 RB 成对占用）进行传送，占用多少个 RB 需要通过参数配置或者网络自适应配置。PUCCH 分成 1/1a/1b 和 2/2a/2b 两种传输模式，由于处于激活态的用户

CQI 和 ACK/NACK 消息通常在 PUSCH 上传递，PUCCH 的容量能力主要表现为可以支持的调度请求（SR）用户数。在 1/1a/1b 配置下，PUCCH 通过循环移位长度为 12 的 Zadach-Bu（ZC）序列和 3 种正交扩频码进行用户消息复用，若以 2 为循环移位间隔，1 个 RB（resource block，资源块）可以支持 $3 \times 12 / 2 = 18$ 个用户，最小配置下（即 $RB=2$ 时）可以支持 $18 \times 2 = 36$ 个用户/ms，在信道条件好的情况下，可以采用比 2 小的循环移位间隔，同时网络上行支持的调度用户数会更大一些。

(4) 接入容量

LTE 系统的用户接入分为竞争接入和非竞争接入，通常提前预留一定比例的资源用于非竞争接入，比例可以调整，非竞争接入不会成为限制因素。这里分析的是小区的竞争接入容量，即每秒支持的竞争接入次数，计算式为：

$$G = (\text{竞争前导数} \times \text{每秒 PRACH 数量}) \times \ln(1-P) \quad (1)$$

其中， G 为每秒支持的竞争接入次数， P 为接入成功率，每秒 PRACH 数与参数“PRACH Configuration Index”的设置相关。现网的默认配置是每秒 PRACH 的数量为 100，每个 PRACH 最大可复用 52 个前缀（一共 64 个前缀，预留 12 个用于非竞争接入）。

如果允许 3 次接入尝试，要求成功率为 99%（即单次接入成功率为 78.45%），根据式（1）可以计算出在默认配置下，单次的同时接入能力为 1 261 次/s，支持的接入容量为： $(1\ 261 \times 78.45\%) / 99\% = 999$ 个接入尝试用户/s。

(5) 寻呼容量

LTE 网络的寻呼容量与物理信道能力，寻呼拥塞率，寻呼对 PDCCH、PDSCH 信道资源的占用以及设备处理能力相关，通过综合分析（考虑到篇幅问题，这里不再列出具体的过程），LTE 小区寻呼能力主要受限于 eNode B 设备处理能力，目前商用设备基站的寻呼能力一般在 400~600 次寻呼/s。



综合上述分析,汇总 LTE 网络技术能力,见表 2。

表 2 LTE 网络技术能力

项目	容量
小区吞吐量	下行 33.8 Mbit/s,上行 14.7 Mbit/s
PDCCH 容量	28 个用户/ms
PHICH 容量	104 个用户/ms
PUCCH 容量	36 个用户/ms
接入容量	999 个接入尝试用户/s
寻呼容量	400~600 次寻呼/s

根据以上分析可以看出,在通常的网络配置下,LTE 信令层面主要的受限因素是 PDCCH 资源,相比于接入容量,寻呼容量更容易成为瓶颈。

3 网络资源瓶颈分析

为了进一步确定哪些资源是 LTE 网络的瓶颈

资源,针对网页浏览、游戏、视频、即时通信、邮件等典型业务,分析每种业务对网络资源的消耗情况,推导出影响 LTE 网络容量的关键资源和瓶颈所在。

3.1 典型业务模型参数

依据业务特征的差异性,移动业务可划分为 9 类,具体见表 3。

参考商用网络的 4G 业务特征,选取以下典型业务模型进行网络资源消耗分析,具体见表 4。

不同的业务行为特征将导致网络资源需求的不同,通过计算各种业务对每种资源的消耗情况,就可以推导出相应的资源瓶颈。

3.2 典型业务的资源消耗

根据表 4 的业务特征数据,结合第 2 节 LTE

表 3 移动业务特征及归类

类别	描述	典型特征
Web 浏览	网页浏览类,包含 WAP 和 WWW。典型应用: Safari、UC 浏览器	稀疏大分组
视频流	流媒体类,包含 HTTP 音视频、P2P 视频等。典型应用: YouTube、Youku、Spotify、Pandora、PPStream 等	持续大分组
文件传送	文件传输类,包含 P2P 文件共享、文件存储、应用程序下载等。典型应用: 手机 Thunder、AppStore、华为网盘等	持续大分组
即时消息	即时消息类,包含各类业务心跳。典型应用: Whatsapp、微信、iMessage 等及各类业务的心跳	稀疏小分组
社交网络	社交网络类,包含 Facebook、Twitter、新浪微博等	稀疏小分组
VoIP 业务	网络电话类,包含语音和视频通话。典型应用: Skype、Viber、Tango、Facetime 等	持续小分组
邮件	邮件类,包含 WebMail、POP3 和 SMTP。典型应用: Gmail、163 Webmail	稀疏大分组
游戏	移动游戏类,包含社交游戏类、棋牌类等。典型应用: Angry Birds、Draw Something、Zynga 社交游戏(如 Words with Friends)	稀疏大分组

表 4 典型业务模型

业务	业务渗透率	会话次数/次	每次会话数传时间/s	每次会话下行数据量/KB	每次会话上行数据量/KB	上行流量/KB	下行流量/KB	呼叫次数	被叫次数	呼叫时长/s	业务体验速率需求/(kbit·s ⁻¹)
网页浏览	44.88%	7.27	4	145.9	10.9	80	1 060	7.27	0	29.08	1 200/128
视频流	10.34%	2.48	91	4 511.7	148.2	368	11 189	2.48	0	225.68	1 800/128
文件传送	2.26%	2.2	80	1 780	160	352	3 916	2.2	0.7	176	3 000/256
即时消息	57.12%	16	2	1	1	16	16	16	11.1	32	128/128
社交网络	15.51%	5.28	12	164	41	216	866	5.28	2.64	63.36	1 200/128
VoIP 语音	0.40%	1.92	90	390	360	691	749	1.92	0.96	172.8	64/64
邮件	1.63%	3.32	8	160	80	199	531	3.32	1.1	26.56	8 000/1 500
游戏	1.05%	1.54	1 200	720	120	185	1 109	1.54	0.77	1 848	256/128
综合业务		13.6	29.1	610	34.4	132.5	1 887.9	13.6	6.8	89	1 185/195

(注:由于移动用户的行为特征,每种业务被使用的概率(业务渗透率)不同,综合业务是按照表 4 中第二列的业务渗透率组合各种业务得到的模型数据。)

网络技术能力的分析结果,给出以下设定条件。

- RRC 空闲休眠定时器设置为 10 s。
- VoIP 语音激活因子为 0.5。
- 每小区支持的最大 RRC 连接数为 1 200。
- 小区的寻址能力为 600 次/s。
- PDCCH CCE 5%的资源开销 (用于寻呼)。
- LTE 网络采用三级寻呼 (基站、TA、TA 列表), 假设每个 TA 列表平均包含 5 个 TA, 每 TA 平均包含 60 个小区, 三级寻呼成功率分别为 80%、85%和 90% (总成功率>99%)。
- LTE 系统带宽 20 MHz (业务可用 RB 数下行 100 个/ms, 上行 96 个/ms)。

计算各种业务网络资源消耗和占用, 具体步骤如下。

步骤 1 根据业务模型, 假设一个固定的用户数 (如 100), 根据式 (2)~式 (9), 计算每一种业务对网络资源的占用情况, 分别计算出上/下行 PRB 资源利用率、上/下行体验用户占用率、PDCCH CCE 占用率、PRACH 占用率、寻呼负荷和 RRC 连接占用率:

$$\text{上/下行体验用户占用率} = \text{小区调度缓存用户数} / (\text{小区平均吞吐量} / \text{业务}) \quad (2)$$

$$\text{上/下行 PRB 资源利用率} = \text{用户数} \times [\text{每会话传输数据量} / \text{平均分组长}] \times [\text{平均分组长} / \text{每 PRB 平均传输数据量}] / (\text{PRB 总数}) \quad (3)$$

其中, 每 PRB 平均传输数据量需要根据小区吞吐量和 PRB 总数得到, 即小区吞吐量/PRB 总数。

$$\text{RRC 连接利用率} = \text{用户数} \times (\text{每次会话数传时间} + \text{RRC 空闲定时器时长}) \times \text{会话次数} / \text{最大 RRC 连接数} \quad (4)$$

$$\text{PDCCH CCE 占用率} = \text{用户数} \times (\text{上行传输分组数量} + \text{下行传输分组数量}) \times 3 / (\text{PDCCH CCE 总数} - \text{开销 CCE 数量} (5\%, \text{用于寻呼})) \quad (5)$$

$$\text{PUCCH 占用率} = \text{用户数} \times \text{上行传输数据分组}$$

$$\text{数量} / \text{PUCCH 信道容量} \quad (6)$$

$$\text{PRACH 占有率} = \text{用户数} \times \text{呼叫次数} / \text{接入容量} \quad (7)$$

$$\text{寻呼负荷} = \text{用户数} \times \text{被叫次数} / \text{小区寻呼容量} \quad (\text{三级寻呼下}) \quad (8)$$

$$\text{小区寻呼容量 (三级寻呼下)} = \text{小区寻呼能力} / 3 + (1 - \text{第一次寻呼成功率}) \times \text{TA 小区数} + (1 - \text{第一次寻呼成功率}) \times (1 - \text{第二次寻呼成功率}) \times \text{TA 小区数} \times \text{TA 列表包含的 TA 数} \quad (9)$$

步骤 2 不断增加用户数直到出现某个资源指标达到 100%, 此时的用户数为 LTE 网络支持该类业务的最大用户数。

步骤 3 根据步骤 2 的用户数, 重复步骤 1, 计算得出上/下行 PRB 资源利用率、上/下行体验用户占用率、PDCCH CCE 占用率、PRACH 占用率、寻呼负荷和 RRC 连接占用率, 单一业务的 LTE 网络资源消耗和综合业务的 LTE 网络资源消耗分别如图 1 和图 2 所示。

图 1 和图 2 所示为每种业务达到其最大容量对网络资源的消耗和占用情况, 具体的资源占用包括: 上/下行 PRB 资源利用率、上/下行体验用户占用率、PDCCH CCE 占用率、PRACH 占用率、寻呼负荷和 RRC 连接占用率。

其中, 上/下行体验用户占用率是一个与目标体验速率以及小区吞吐量相关的指标, 在既定体验速率下, 上/下行体验用户占用率本质上反映的是小区的上/下行吞吐量资源的占用。

- 根据计算结果, 总结各种业务的资源消耗规律如下。
- 网页浏览、游戏和社交网络业务消耗最多的是 PDCCH CCE 资源。
- 视频流、文件传送业务消耗最多的是下行 PRB 资源和小区下行吞吐量资源。
- 邮件业务消耗最多的是小区上行吞吐量资源。

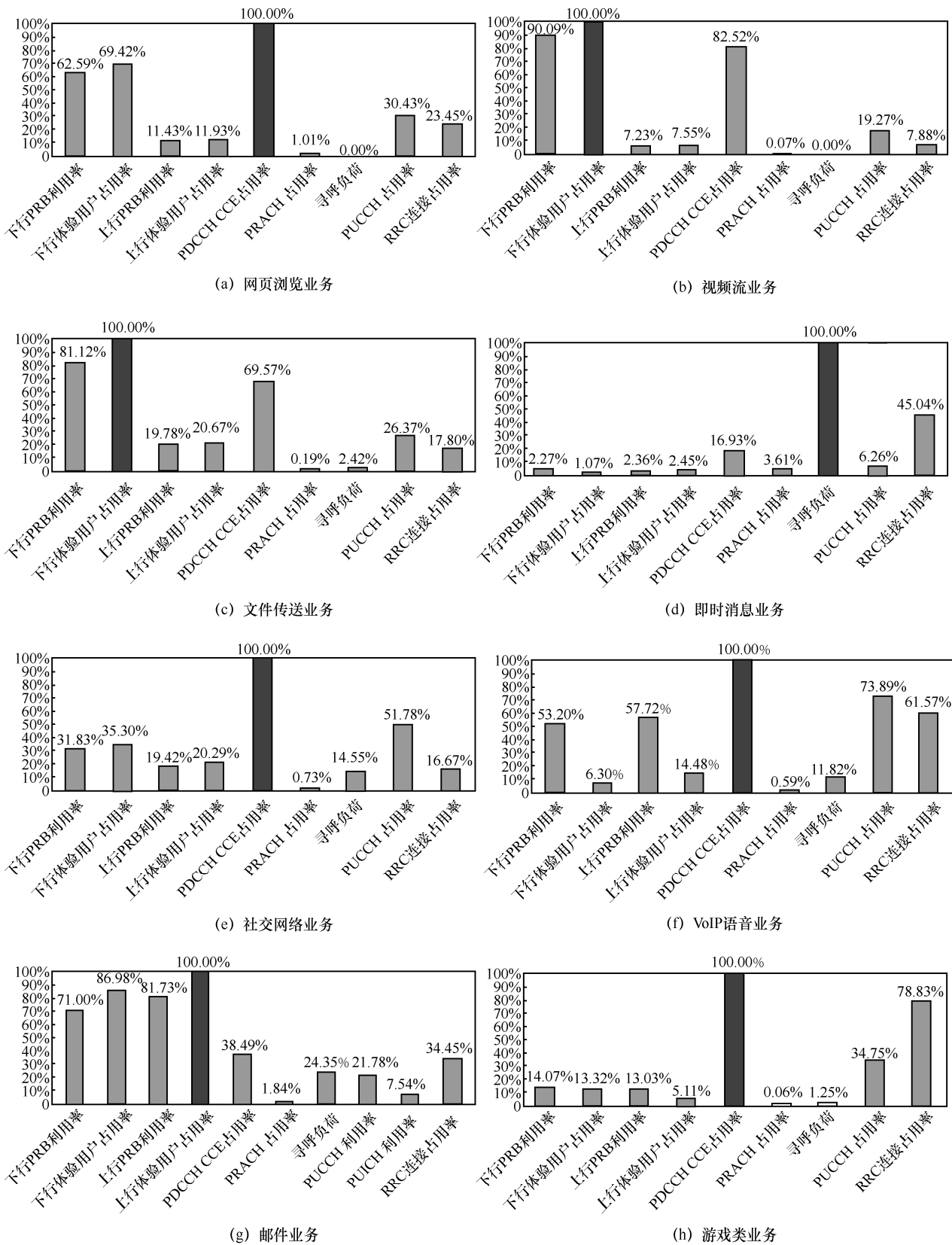


图1 单一业务的LTE网络资源消耗

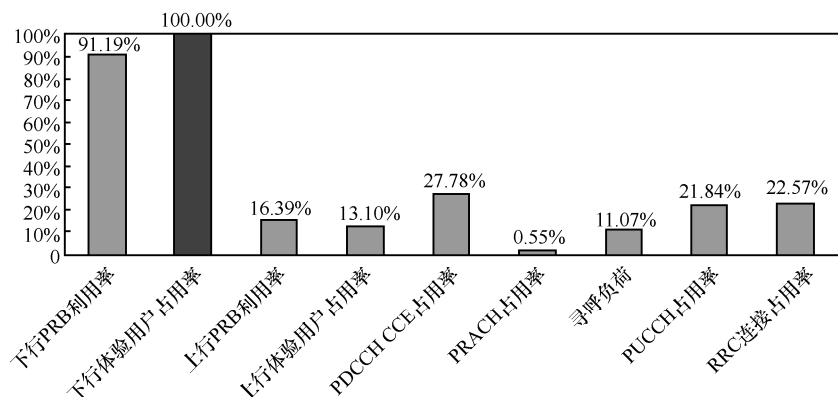


图2 综合业务的LTE网络资源消耗

- VoIP业务消耗最多的是PDCCH CCE资源。
- 即时消息(IM)类业务消耗最多的是寻呼资源。
- 综合业务情况下，消耗最多的是小区下行吞吐量资源和下行PRB资源。

3.3 资源瓶颈分析

基于第3.2节的资源消耗分析，步骤2计算出的用户数为某个资源达到100%时的用户数，即消耗最多的资源占用达到100%时的综合业务和各种单一业务的容量能力（用户数/h），结果如图3所示。

对于单业务而言，视频流和游戏类业务的容量最小，而根据第3.2节的资源消耗分析，这两类业务消耗最多的资源是PDCCH CCE资源、下行PRB资源和小区下行吞吐量资源。在最终网络运营时，应重点关注在综合业务情况下，网络的用户支持能力和资源消耗情况。在表4所示的综合业务模型下，小区下行吞吐量和下行PRB资源受限决定了最终的用户容量。

在进行网络的运营优化时，通常会把网络资

源分为用户面和信令面分别进行考察，根据图1~图3，不难得出以下两条结论。

- 对于用户面而言，下行PRB利用率和下行体验用户占用率是关键瓶颈，应作为重点考察指标。
- 对于信令面而言，PDCCH CCE资源是占用最多的资源，应把PDCCH CCE占有率作为信令面的重点考察指标。

4 结束语

本文基于LTE网络的技术能力，选取典型的业务模型，进行了不同业务对各种LTE网络资源的消耗和占用分析。通过分析得出，下行PRB资源、PDCCH CCE资源是LTE网络的关键资源，限制LTE网络提供更多用户服务的能力瓶颈在于下行PRB利用率、业务的目标体验速率和小区下行吞吐量。在进行LTE网络的建设和运营优化中，重点关注相应的能力瓶颈指标，并采取针对性的扩容和优化手段，可实现资源的有效投放，进一

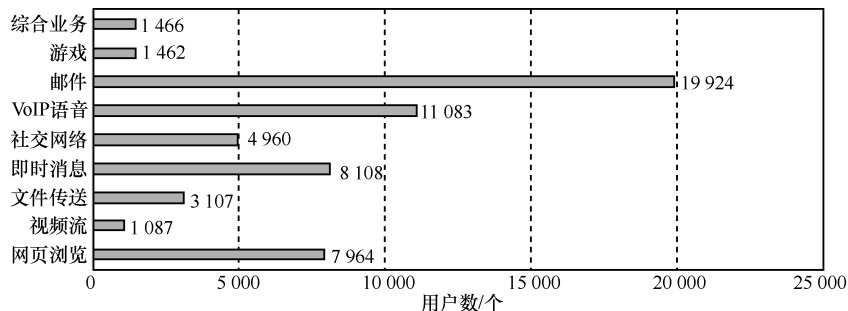


图3 典型业务的容量能力

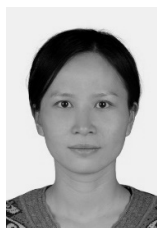


步提升网络的服务能力。

参考文献:

- [1] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation: TS36.211[S]. 2013.
- [2] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures: TS36.213[S]. 2014.
- [3] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); measurements: TS36.314[S]. 2011.
- [4] 3GPP. Feasibility study for evolved universal terrestrial radio access (UTRA) and universal terrestrial radio access network (UTRAN): TR25.912[S]. 2011.

[作者简介]



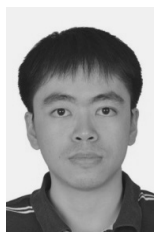
王月珍（1974-），女，中国电信股份有限公司广州研究院高级工程师，主要从事移动通信系统技术、物联网技术的研究和项目管理工



尹珂（1969-），男，中国电信股份有限公司广州研究院高级工程师、移动通信研究部技术总监，主要从事广东移动通信网络高级技术支持、移动通信技术研究等工作。



梁健生（1976-），男，中国电信股份有限公司广州研究院工程师，主要从事 LTE、NB-IoT、4G+等移动通信新技术研究与试验、移动通信网络规划建设、网络优化等方面的研究工作。



陈宇（1988-），男，中国电信股份有限公司广州研究院工程师，主要从事移动通信相关工作。