

移动电话网络性能评价：文献综述

朱思涵，梁子轩*

上海交通大学物理与天文学院，上海 200240，中国

摘要：改善电话网络的服务质量（QoS），必然要先研究已有的性能指标评价工作。已有多位研究者探讨过移动电话网络服务性能的评价问题：一些人采用面向用户的问卷调查，另一些人则选择更为客观的方法——或使用专业扫描仪，或自行开发超文本标记语言（HTML）页面与 Android 应用。结果表明，无论主观方法还是客观方法，这些工作都推动了研究进展，使后来的研究者得以在移动网络评价上更进一步。本文是一篇文献综述，考察了研究者们为评价服务质量所提出的不同思路、方法与最新结果，并更多地立足于客观评价。尽管这些工作已有诸多进展，其局限依然存在；有鉴于此，本文提出借助数据科学及其工具，以更高的精度评价服务质量。

关键词：数据科学；评价；移动网络；性能指标；服务质量

Evaluation of the Performance of Mobile Telephone Networks: Literature Review

SiHan Zhu, ZiXuan Liang*

School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Improving the quality of service (QoS) of telephone networks inevitably involves studying previous work on the evaluation of its performance indicators. Several researchers have addressed the subject of evaluating the performance of service of mobile telephone networks. Some proceeded through user surveys and others opted for more objective methods using either professional scanners or developed: hyper text markup language (HTML) or Android applications. The results show that whether by subjective or objective methods, this work has made it possible to advance research and allow other researchers to progress further in the process of evaluating mobile networks. In this study which constitutes a review of the literature, we investigated the different approaches, methods, and most recent results mentioned by researchers to evaluate the QoS by relying much more on objective evaluation. Despite the advances and their limits, in our proposal we intend to rely on data sciences through their tools to evaluate the QoS with more precision.

Keywords: Data science; Evaluation; Mobile networks; Performance indicator; Quality of service

一、引言

21 世纪见证了移动宽带 (MBB) 网络的出现与发展, 尽管在部分国家 4G 与 5G 技术的应用仍是新生事物。即便存在这种滞后, 人们仍希望以先进网络取代早期各代网络。作为日常生活的一部分, 电话在人们的生活中占据的位置一天比一天重要。它是一种国际化产品, 对运营商、设备设计者与研究者而言都构成了一个重要的消费市场。尽管电信领域技术不断进步, 但所建设的网络类型、与环境相关的接收问题以及频率限制, 仍然妨碍着良好的服务质量 (QoS)。当用户处于移动状态时, 信号的劣化更为严重: 出行意味着穿越各种不同的环境, 而这些环境往往使通信难以为继。然而对普通用户而言, 可靠、保真地进行通信始终是其最持久的诉求。移动网络用户数量的增长与用户的不满, 迫使人们追问运营商实际提供的服务质量究竟如何。这促使工程师们持续投入这一课题, 于是有了从第一代到第五代、频带不断加宽的演进。即便如此, 研究者们仍不满足, 围绕网络性能的研究成果不断发表, 以推动供应商改进服务、更好地满足客户。

网络服务性能同时取决于运营商的投入与意愿, 各国必须通过其监管机构对这一服务质量实施管控[1]。然而, 与网络性能相关的数据采集往往并不规律: 在监管方看来其成本高昂, 而运营商提供的数据既缺乏可信度, 又常常迟迟才送达监管机构[1]。

在本研究中, 笔者借助 Google、Google Scholar 等检索工具查找论文, 并用 Zotero 管理参考文献。在所收集的文献中, 本文选取了近二十年 (2004—2023 年) 发表的、研究网络性能与蜂窝网络服务质量评价的论文, 并着重关注其中涉及服务质量客观评价的部分。对每一篇文献, 本文采用来源分析与笔记摘录的方法来形成结论。

就本研究而言, 全文的组织首先依据评价类型展开: 先讨论涉及主观评价的文献, 再转向涉及客观评价的文献; 后一部分内容更为充实, 也是本文后续研究的重点。

尽管以改进服务质量为唯一目标的研究已取得可喜成果, 用户投诉却依然突出。正因如此, 本文提出另一种服务质量评价方案——依托数据科学及其能够分析大规模数据的工具, 以促使相关方更快作出反应[1]。全文结构如下: 第一节为引言; 第二节梳理已有工作, 突出其关键结果、解释、优势与不足; 第三节围绕结果给出本文方案的概貌; 第四节比较所查阅文献的共同点; 第五节为结论性思考; 第六节为结论。

二、移动电话网络服务质量评价的相关研究

通过对移动网络用户进行问卷调查来采集数据, 是评价服务质量的方法之一。这种与体验质量 (QoE) 评价相关的主观方法[2], 正是文献[2]用来评估阿富汗服务质量的手段。在该研究中, 研究者先在喀布尔对一组人群使用问卷法, 随后将调查范围扩大至 1515 名移动网络用户。问卷含 15 道多选题, 并以三种语言呈现以便用户充分理解; 调查覆盖该国 30 个省的五个不同网络, 时间为 2015 年 8 月至 12 月。然而, 该调查仅限于用户受教育程度、偏好网络和用机目的等有限内容, 几乎没有对服务质量本身作出分析。从问卷设计和所得结果来看, 它并未分析更多依赖于运营商所提供各项业务的服务质量。

问卷法虽被保留为一种服务质量评价方法, 却不是 2017 年一组研究者所采用的方法[3]。该文的思路是利用网络管理系统 (NMS) 的数据, 通过分析服务质量的主要性能指标, 评估上帝救赎基督教会 (RCCG) 周边区域的蜂窝网络服务。研究者从运营商在线 NMS 的数据库中, 采集了 2016 年 12 月 RCCG 圣灵大会期间的业务可接入性、时延和呼叫失败率等指标; 采集时段为 12:00 至 19:00, 用以评估大会期间及其结束之后的服务质量。所采集的数据与尼日利亚通信委员会 (NCC) 的建议值作了对比, 如表 1 所示, 数据取自文献[3]。

由这一对比可见, 大会期间明显劣化的服务质量, 在大会结束之后反而是可以接受的。作者由此认为, 大会期间该区域人员的高度流动影响了服务质量, 应增设基站收发信台 (BTS) 以疏导大型集会期间的通信。不

过应当指出，对监管机构、消费者维权组织和客户等部分利益相关方而言，运营商的数据并不容易获得；即使可以获得，也往往滞后且缺乏可信度。正因如此，科学家们早已着手在用户终端中开发智能代理来评价服务质量[4-5]。在该项工作中，Augustin Radu 为了把用户置于评价的中心，首先识别出影响用户对全球移动通信系统（GSM）网络服务质量感知的各项参数。他选取电子邮件、在线服务（www）和视频流作为业务，并用 JAVA 语言在自己的手机上开发了一个智能代理来评价这些业务。这一探索很快显露出局限：手机内存太小、无法存储数据，而技术又在向更先进的制式演进；此外，所选业务也并非用户使用的全部业务。随着通用分组无线业务（GPRS）、通用移动通信系统（UMTS）以及后来的长期演进（LTE）相继出现，该研究暴露出的不足促成了文献[6]的发表。该文只针对 LTE 网络作评价：研究者在美国马萨诸塞州某城市中心，对静止与移动两种模式下的服务质量作了对比评估。方法上，他把终端连到装有 Java 采集软件的计算机上；在驾车行驶过程中制造视频流量并上传至一个网站，以约 43 km/h 的平均速度、在同时存在 LTE 与码分多址（CDMA）网络的环境中连续测试 90 分钟，随后又在静止状态下作了同样时长的测试。

Table 1 Coverage of RCCG, Redemption Camp Lagos

表 1 拉各斯 RCCG 救赎营地的覆盖情况

关键性能指标	NCC 规定值 (%)	平常日出现值 (%)	大会期间统计值 (%)
PCONG (拥塞率)	≤ 2.00	0.83	26.52
PCTRLFAIL (控制失败率)	≤ 1.20	1.87	32.97
PDROP (掉话率)	≤ 2.00	1.79	1.87
HOSR (切换成功率)	≥ 99.00	63.60	40.50
CSSR (呼叫建立成功率)	≥ 98.00	98.20	42.79
PTTCH (业务信道分配成功率)	≥ 98.50	100.00	88.73

借助 MATLAB 的用户界面，他分析了采集到的信道质量指示（CQI）、信干噪比（SINR）、误块率（BLER）和参考信号接收功率（RSRP），并把两种测试情形的结果绘成曲线。通过分析所得曲线，他得出结论：静止模式下的业务质量优于移动模式，后者需要占用更多资源。但研究区域单一、两种测试所用参数不一致、所涉业务类型有限，都不足以全面评估服务质量，这正是该研究的局限所在。

随着智能手机的普及以及开发 Android 应用[7]从用户设备采集指标的可能性，一种新的评价形式得以确立[1]：作者开发了一个 Android 应用和一个网页，用以采集网络性能数据、评价服务质量并在 Google 地图上显示覆盖图。从这项工作可见，为得到预期结果，该方法需要进行两类测量。

首先，用两部 Sony 手机分别在喀土穆和 Chrwani 汽车站进行测量；第二项测试针对信号强度，把两部手机的测量值与精度约为 ± 2 dB 的专业设备 Aaronia Spectran 的测量值作对比。数据比对结果表明，用安装在手机中的 Android 应用评价服务质量参数是可行的。尽管结果可喜，仍存在若干局限：需要采集更多与网络性能有关的参数，需要具备离线分析与显示地图的能力，也需要把采集到的数据保存到手机以外的服务器上。

2018 年发表的文献[8]进一步研究了评价 RSRP 以外的参数并把参数保存到服务器的可能性。作者评价了 RSRP、参考信号接收质量（RSRQ）、SINR、接收信号强度指示（RSSI）以及上下行下载速率共六项网络性能参数，测量地点为拉各斯某购物中心及其周边和拉各斯大学。研究区域覆盖拉各斯大学（基站 1）、Ikorodu（基站 2）和 Oniru（基站 3）[6]。三处建筑相距约 20 m，各高约 15 m。为限制某些干扰因素，测量在最远 1 km 的范围内进行，每 100 m 读取一次数据。

为完成测量, 研究者按图 1 所示的应用处理流程(取自文献[8]), 使用一台安装了 GENEX PROBE 测试软件的计算机, 并连接一部华为 E392 型 4G 终端。全部设备置于一辆装有约 1.5 m 接收天线的车辆中; 发射天线高度为 30 m, 发射功率为 46 dB。测量数据用 MAPInfo 工具导出, 统计分析用 MATLAB 完成。所采集的数据与 NCC 的数据对比后表明二者较为一致。不过作者认为, 还需要评价抖动与时延、检验其对服务质量的影响, 以弥补该工作的局限。

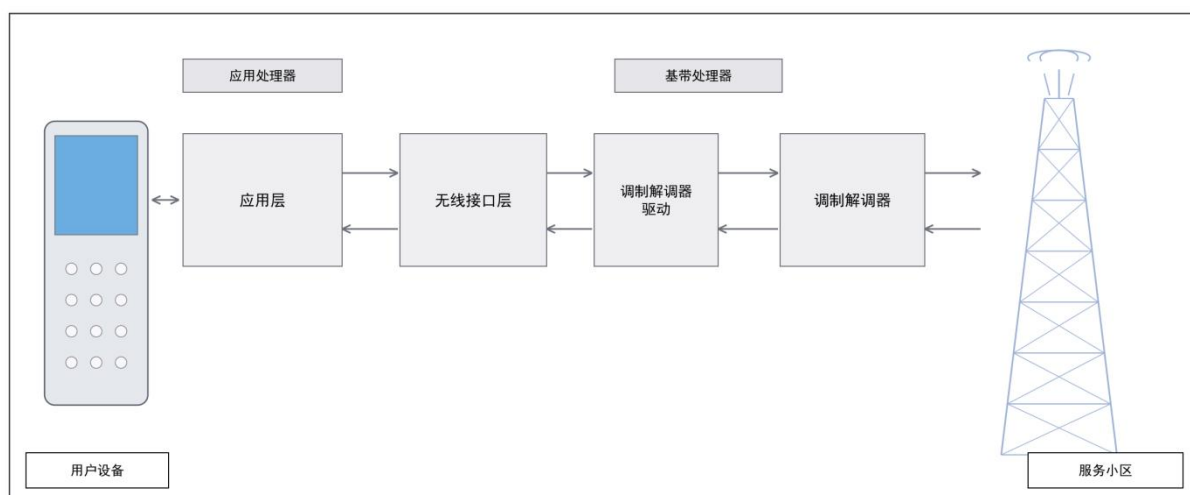


Figure 1 Application Process

图 1 应用处理流程

沿着文献[7]的思路、并与文献[8]相去不远, 2018 年发表了文献[9]。其目标是检验能否用安装在手机中的 Android 应用评价网络的 RSRP, 并把数据存储在终端中。为此, 作者选择在美国佛罗里达州墨尔本市区、气候温和的时段开展实验, 以尽量减小会加剧接收电平下降的信号衰落。他用两分别命名为 A 和 B 的手机进行测量与采集, 即一部 LG K20 和一部 Kyocera Hydro Shore, 两者分别为 2 GB 内存、1400 MHz 处理器和 1 GB 内存、1100 MHz 处理器。测试在同一网络的室内与室外进行, 采样频率为 60 次/秒, 并用 MATLAB 生成图形加以比较。

室内结果显示, 手机 B 的接收质量比手机 A 好约 0.31 dB, 但手机 A 的标准差优于手机 B, 说明手机 A 更为稳定; 室外情形与之相同[10]。由此可以得出结论: 用安装在手机中的 Android 应用评价该参数是可行的。不过两部手机所得结果的差异也说明, 这一做法在推广上仍有不足: 既然不同手机的稳定性有别, 在采用之前有必要先评估手机本身的质量。

为进一步确认能否用安装在终端中的 Android 应用评价网络性能参数及其精度, 2018 年发表了文献[9]一。为达成这一目标, 该研究团队开发了名为 LTENetScan 的 Android 应用, 并把它安装在两部三星 Galaxy S7 和一部同版本 (Android 7.1) 的 LG K20 中[11]。用用户终端从服务小区采集数据、并用扫描仪核验关键性能指标的过程如图 2 所示, 该图出自文献。

他选择佛罗里达州西部的墨尔本作为研究区域, 仅针对 RSRP 在室内和室外进行测量。为验证结果, 他把测得的数据与专业的 SeeHawk 扫描仪测得的数据作对比。实验在这一约 20 000 m² 的乡村平坦区域内进行了两天, 其间大气条件稳定, 以避免引起信号质量的波动与衰落[12-15]。

用 MATLAB 对采集数据所作的统计分析 with 扫描仪测量结果的对比, 证实了二者结果的一致性, 即用

LTENetScan 应用评价该参数是可行的, 均方根偏差 (RMSE) 为 3 dB。这一差异可归因于测量设备本身: 天线位置、增益、处理器速度等因素都会影响接收质量。但作者认为, 还需要评价 RSRP 以外的参数才能进一步确认其结果。

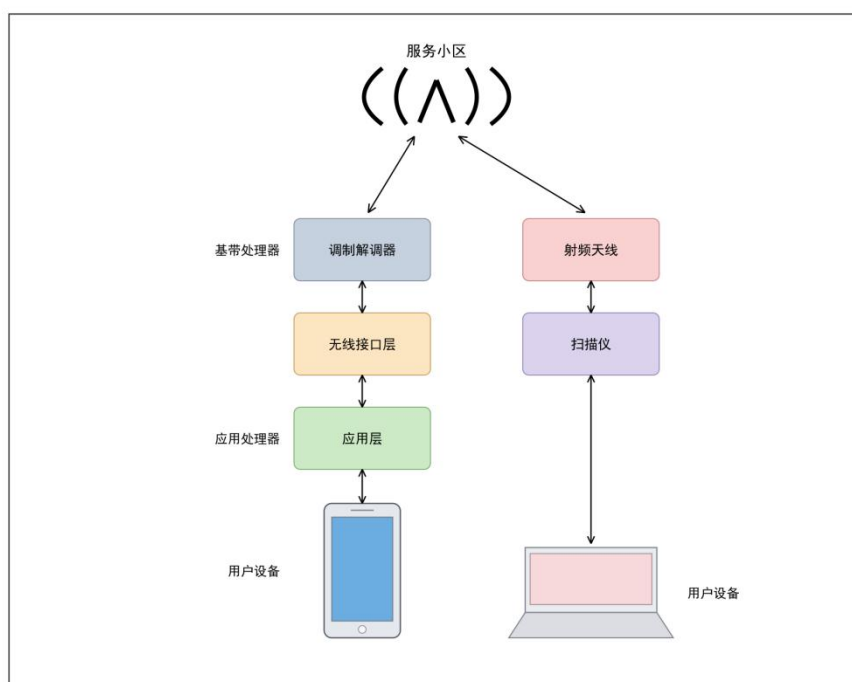


Figure 2 Process of Obtaining RSRP by Android Application and Scanner

图 2 由 Android 应用与扫描仪获取 RSRP 的过程

为验证位置会影响接收质量这一设想, 尼日利亚的一位研究者针对 GPRS 与高速分组接入 (HSPA) 网络开展了研究。测量在总部、教学区和大学校园三个地点进行, 涉及三个网络, 分别记为 A、B、C。数据采集持续 60 天, 时段为 7:00—8:00、13:00—14:00 和 19:00—20:00, 使用装有 CellInfo 应用的 Tecno Y6 终端。采集到的数据用社会科学统计软件包 (SPSS) 分析, 并用 MATLAB 仿真生成图形, 比较三个网络的信号强度。

该研究分两个阶段进行: 第一阶段测量各网络的信号强度, 第二阶段对数据作统计研究。各网络信号强度的平均值表明, 每个网络在其自身的采集区域内信号最好, 而质量取决于用户密度。研究者由此得出结论: 信号强度的优劣取决于用户相对于其归属网络的位置以及时间。其方法也暴露出一些局限, 尤其是在 LTE 网络登场之后。

同样为了评价 GSM 网络的信号质量、验证这一质量随位置与时间变化, 同年发表了文献。该研究评价了尼日利亚南南地区 Ogoni 地方四家 GSM 移动网络——MTN Nigeria、Airtel、Globacom 和 Etisalat 的覆盖质量, 采集持续五天、间隔一小时。为达成目标, 研究者使用了如下设备: 一部装有 CellInfo 应用的 Tecno D3 手机, 置于距地面 1.5 m 处 (视为用户的平均高度), 可同时测量不同网络的信号强度; 一台用于监测和分析 RSSI 与信号质量的 GSM 信号控制器; 一台笔记本电脑。

采集到的数据用 GraphPad Prism 7 作统计分析, 并用 Microsoft Excel 绘制各测量量随时间变化的曲线。对各网络所得结果加以比较, 以评估其性能。基于采集结果, 作者认为信号强度最好的 MTN 同时也是最好的网络, 但补充指出: 在非高峰时段信号强度会受到影响, 且业务量随时间变化。该研究仍局限于单一参数、单一地理区域和 GSM 网络。

同年，文献[4]采用类似方法转而研究农村地区。所选的四个地方位于尼日利亚东南部，每个地方采集八天。测量使用两部装有 CellInfo 应用的 GIONEE M5 手机，时间为 2018 年 8 月 18 日至 9 月 16 日，在四个村庄的中心分别于白天和夜间的特定时刻进行。虽然该应用能够测定 LTE、宽带码分多址（WCDMA）、CDMA 和 GSM 网络的信号强度，但采集只针对 GSM 网络，所评价的网络为 Airtel、Globacom、MTN 和 9Mobile。对所得数据的分析给出了这些地方的 GSM 覆盖、信号可用性和网络质量。实验结果表明，某些地方根本没有网络，而在人口密度稍高的地方网络略有覆盖、覆盖水平也稍高。由于该研究仅限于 GSM，不能仅凭低覆盖率下结论，因为该区域还存在未被评价的其他网络（LTE）。这正是 2020 年发表的文献所讨论的问题：用安装在 GM8 移动终端中的名为 CoverMe 的 Android 应用评价 LTE 网络的服务质量。在 Isparta 省进行的采集分为被动与主动两种方式。

数据的测量、采集与分析过程依据文献中图 3 所示的框图。被动测量自动完成，无需点击应用即可把数据保存到 SQLite 中，并收到确认存储生效的消息。

点击应用则进行主动测量：此时应用下载一个 100 MB 的文件并按时间折算以评价下载速率；时延则用 Ping 得到，仅用于确认测量的精度。85% 的测量为步行完成，15% 为约 40 km/h 的车载完成，共得到 1186 组 RSRP、RSRQ、RSSI 和 CQI 测量数据。

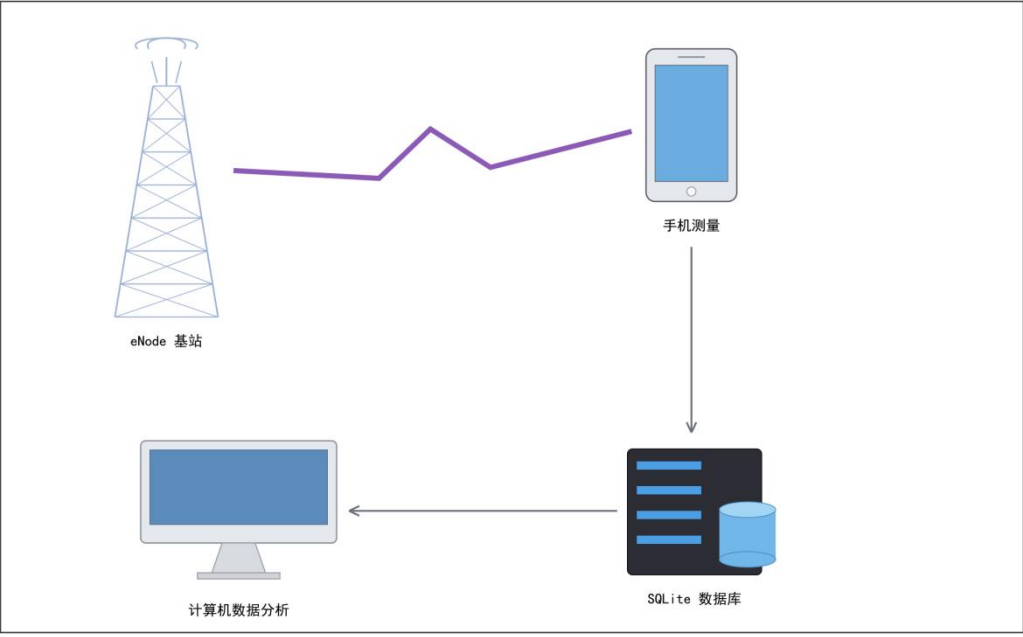


Figure 3 Equipment Used for Measurements

图 3 测量所用设备

该研究的目的是考察实测的 RSRQ、RSRP、RSSI 与参考信号信噪比（RSSNR）之间的关系，以及这些取值与下载速率的相关性[5]。分析表明，RSSI 与 RSRQ 的变化会提高数据下载速率的均值，但并不能给出关于数据性能或数据速率的精确信息；换言之，在 RSRQ 较低的点上同样可能获得良好的数据速率。

尽管技术不断进步、局限依然存在，把用户置于评价中心、用安装在终端中的应用来验证测量结果的意愿与努力，正是文献的目标。该文在三部终端——Nokia 6、Samsung A-6 和 Samsung S7 Edge 上测试路测（DT）应用 SignalDetect。三部终端在设计上元器件并不相同，操作系统与界面也各不相同。采集到的数据经仿真，相关系数为 0.99。该实验所得的信号强度曲线表明，所得数据存在差异，说明手机采集到的数值取决于其硬件与

软件,这也印证了以往的研究结论。作者由此认为,在用路测评价性能之前,必须先对其结果加以验证。

既然 2G 至 4G 网络的性能已可借助部分终端上的 Android 应用来评价,研究者们转而关注宽带网络的评价。在 2021 年发表的这项研究中,作者针对阿曼 Ibra 市提供 3G 与 4G 业务的宽带网络,使用 Gyokov Solution 开发的 Android 应用 G-Net Track,装在两部三星 Galaxy 手机中,采集 Omantel 与 Ooredoo 两家运营商的 RSRP、RSRQ、CQI 及上下行速率,下载文件大小为 1 Gbit。两部固定在车辆中的终端以最高 70 km/h 的速度行驶,数据被连续记录在手机内存中。文献中图 4 所示的数据采集与分析方法与文献相差不大。

测试中还记录了小区切换与重选。就室外采集的参数而言,所有网络在测试区域内均实现了 4G 覆盖,且在所有测量时刻都具有良好的信号电平和数据速率。作者认为,各运营商良好的服务质量取决于带宽、站点数量、活跃用户的数量与类型等不同因素,这些因素都会显著影响数据速率、进而降低网络性能。不过他也指出了自己工作的局限:研究区域单一;环境单一(仅室外);测试时段单一(高峰时段),因而此时业务需求较低;业务类型单一(网页),可以尝试语音或视频流。

三、结果与讨论

随着网络日趋复杂,数据科学开始被引入网络性能数据的分析。该项研究的结论性结果证明了在运营商网络运营中使用数据科学的意义与可行性,这些可喜的结果可用于未来的评价工作。为使质量得到保障、监管得当,各相关方定期监测服务质量十分必要。

随着网络的演进,用户所需的业务也不断增多,这在运营商与监管机构之间、运营商与客户之间催生了新的约定。既然如此,评价就必须是持续的,不仅要跟上技术的发展,还要跟上用户的需求和新的约定。这也是本文倾向于开展另一项研究的原因——对喀麦隆的移动网络作客观评价:那里用户投诉十分明显,运营商的数据缺乏可信度,而监管方又因成本高昂而使评价缺乏规律性[1]。为实现这一目标,本文将立足现有条件,对电话网络的服务质量开展客观评价。所选取的关键性能指标是监管机构认定的、并且属于运营商技术规范范围内的指标。

更具体地说,需要先选定一部能够精确测量性能指标的用户设备(UE),通过与专业扫描仪的对比测试对其加以验证,再通过安装在这部手机中的 Android 应用持续采集性能指标,同时记录网络类型、采集时段、终端移动速度等信息,采集周期要足够长(至少六个月,昼夜兼顾,并考虑各季节的气候变化)。所采集的测量数据以逗号分隔值(CSV)格式存储在用户终端中。下一步是用数据科学工具分析这些指标:在分析阶段,本文将用 Python 编写算法,并借助其函数库生成图表与统计量。为了较为全面地评估状况,研究将把常住或临时人口密度较高的农村与城市地区纳入考虑,评价在连接省会或大区首府的高速公路上静止与移动两种状态下的表现;边境地区也将被纳入,以了解与他国接壤之处的情况。

四、所查阅文献的比较分析

所选取的各篇文献之间存在若干共同点。第一是目标:都是通过采集网络的关键性能指标来评价网络性能,以改进服务质量。第二是所用硬件:多数研究使用 Android 应用进行测量与指标采集,用计算机或终端存储数据,并只用计算机及其集成软件来分析数据、生成图形。第三是数据采集:为实现各自的目标,都必须采集数据,方式或为路测,或为问卷调查,或借助运营商的服务器。

五、结论性思考

综观各位研究者的成果,可以看到服务质量评价技术已取得显著进展。今天,客户或者说用户处于这一评

价的中心。在数据科学的助力下,有必要把软件与算法的进步结合起来,从采集的规律性、用户的地理位置、采集的持续时间以及分析所用工具的类型等方面入手,实现对网络的有效评价。

六、结论

本文旨在梳理那些以性能指标分析为基础、聚焦移动网络评价的文献。在所选取的二十余篇文献中,实验所用的方法与工具存在诸多相似之处。对不同文献的采集与分析结果,使我们得以了解各篇文献的思路、所得结果及其优势与不足。

基于这些进展,在展望中可以考虑:在很长的时间跨度上,用数据科学工具分析从装有 Android 应用的终端采集到的性能指标,从而评价喀麦隆移动电话网络的服务质量。这些结果将使决策者能够把用户纳入服务质量评价的过程,以更低的成本开展评价,并据此提出服务质量的改进方案。

参考文献

- [1] 周秉根. 风电叶片复合材料成型工艺. 复合材料学报, 2021, 39(03): 1067-1078.
- [2] 李爱群. 老旧建筑抗震加固改造技术. 工程力学, 2022, 39(04): 1-10.
- [3] 刘吉臻. 新能源火电耦合调峰系统. 动力工程学报, 2023, 42(04): 265-273.
- [4] 张友军. 船舶动力系统减振降噪技术. 船舶工程, 2023, 44(03): 1-7.
- [5] Ukhurebor K. Evaluation of the quality of service of a cellular network using the network statistics. International Journal of Advanced Engineering and Technology, 2017, 1(5): 1-7.
- [6] Okoro R C, Iwuji P C. Investigation of GSM signal strength in rural communities in the South-Eastern Region of Nigeria. European Scientific Journal ESJ, 2019, 15(15): 140.
- [7] 杨孟飞. 星载计算机容错设计技术. 中国空间科学技术, 2022, 42(02): 1-8.
- [8] 王树国. 机器人关节驱动器高精度控制. 机器人, 2022, 44(02): 1-8.
- [9] 郝吉明. 工业烟气多污染物协同治理. 中国环境科学, 2023, 42(04): 1501-1508.
- [10] 肖立业. 超导输电线路工程化关键问题. 电工电能新技术, 2022, 41(02): 1-10.
- [11] 朱合华. 城市地下管网数字孪生建模. 地下空间与工程学报, 2023, 18(02): 369-378.
- [12] 李元昊. 数控机床热误差补偿技术. 中国机械工程, 2022, 33(08): 905-912.
- [13] Julien G. Mesurer la performance des réseaux mobiles: couverture, qualité de service et cartes. Douala: Fratel (www.fratel.org), 2019.
- [14] Habibi M A, Ulman M, Vaněk J, et al. Measurement and analysis of quality of service of mobile networks in Afghanistan - end user perspective. Agris On-line Papers in Economics and Informatics, 2016, 8(4): 73-84.
- [15] Augustin R. Evaluation de la qualité de service par l'utilisateur final. Marne-la-Vallée: Université de Marne-la-Vallée, 2004.