



研究与开发

移动通信网络评价准则与解决方案

伏玉笋

(上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 面向未来巨大差异化的业务、多样的个性化体验要求, 论述了关键性能指标 (KPI)、关键质量指标 (KQI)、业务质量 (QoS)、业务体验 (QoE) 及关键经营指标 (KBI) 的内在关系以及从 KPI、KQI 和 KBI 出发各自可能的最优设计方法及潜在的挑战和技术研究方向, 这是一个层层递进的统一整体。最后指出, 目前的公平性指标是一种后验的“经验”指导, 没有产生具体的反馈闭环机制以形成对设计准则的明确指导。而从 KBI 角度的牵引, 可能是可选的终结性、归一化的评价准则。需要指出的是, 要从深度和广度上做好这些工作, 需要跨学科、跨领域的深入研究, 需要跨网络不同节点间的密切协同、跨层设计。

关键词: 移动通信网络; 评价准则; 关键性能指标; 关键质量指标; 关键经营指标

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020275

Evaluation criteria and solution of mobile communication network

FU Yusun

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Facing the huge difference of business and various personalized experience requirements in the future, KPI (key performance indicator), KQI (key quality indicator), QoS, QoE and KBI (key business indicator) was discussed, as well as the possible optimal design methods, potential challenges and technical research directions based on KPI, KQI and KBI, which was a progressive and unified whole. Finally, it was pointed out that the current fairness index was a kind of “experience” guidance, and there was no specific feedback closed-loop mechanism to form a clear guidance for the design criteria. The traction from the perspective of KBI may be an optional final and normalized evaluation criterion. It was pointed out that to do these works well in depth and breadth, it needed interdisciplinary in-depth research, close collaboration and cross layer design between different nodes of the network.

Key words: mobile communication network, evaluation criterion, KPI, KQI, KBI

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-09-10

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2019YFB1705703)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB1705703)

1 引言

20 世纪 80 年代以来,移动通信技术逐步实现从固定到移动、从模拟到数字、从电路交换到云网融合、从窄带到宽带、从人人互联到万物智联的演进,为社会、经济的发展不断注入新的动力,带动了整个产业生态的发展,同时也提出了更高的生态系统需求。5G 的到来,促使 5G 与人工智能、云计算、大数据、物联网/工业互联网、边缘计算等融合交织,在各行各业产生“聚变”反应。移动通信网络正在面临非常大的挑战:网络复杂化(从低频到高频毫米波乃至太赫兹、从单天线到大规模天线、超密的分层网络与虚拟云化的网络、分层解耦架构与传输网络异构化)、业务多样化(人与人通信的单一模式逐渐演化为人与人、人与物、物与物的全场景通信模式,业务场景更加复杂,带来巨大的业务级差异化需求:数据分组大小的差异是 10^7 量级、时延的差异是 10^4 量级、吞吐率的差异是 10^5 量级)^[1-3]、体验个性化(随着网络能力和丰富的业务发展,业务体验呈现出多元化、个性化发展态势,比如沉浸式体验、实时交互等)。复杂的网络对于多样化业务及其个性化体验的支撑保障,将颠覆传统模式,迎来全

新挑战,评价准则越来越多元化。

通常对一个移动通信网络的评价,采用端到端的指标体系^[4],如图 1 所示。关键性能指标(key performance indicator, KPI)用来评价网络性能,主要和核心网、接入网有关,是可以从运营商网络自身可获得的客观性指标;关键质量指标(key quality indicator, KQI)用来评价业务质量和业务体验,这涉及第三方应用或者消费者,也是客观性的指标;体验质量(quality of experience, QoE)是指端到端的用户体验,既有客观性的因素,与 KPI、KQI 有关,也有主观性因素^[5];从广义上,服务质量(quality of service, QoS)类似于 QoE,但协议制定中通常不涉及主观因素,而是用来刻画端到端服务质量的客观因素(如分组丢失、时延等),从而对网络进行管理。

不管是 KPI、KQI 还是 QoS,都是从如图 2 所示的通信过程^[4,6-7],相应地通过网络可用性、网络可接入性、业务可接入性、业务完整性、业务保持性来刻画的。

移动通信技术的升级将优化或构建大量通用技术,通用技术与垂直行业的融合将创造大量的应用场景和收入机会。如何发挥自身优势,深度参与行业融合,改变传统的“非差异化”优化,

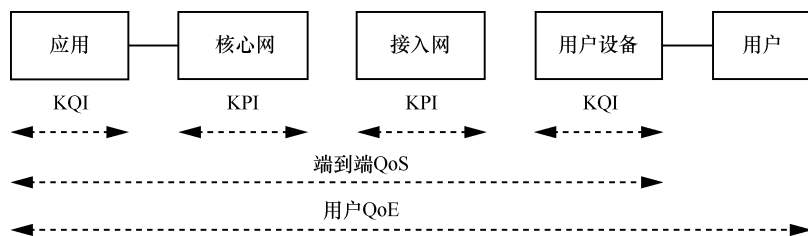


图 1 移动网络评价指标

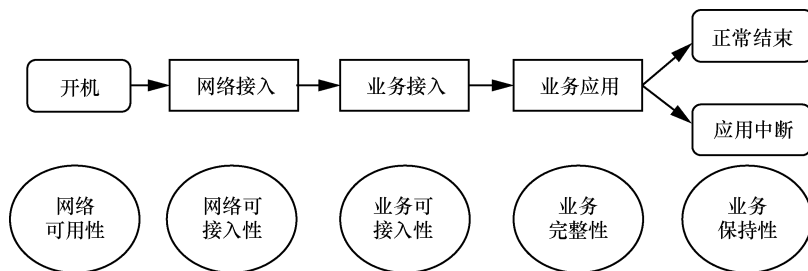


图 2 移动网络评价指标的刻画和不同业务应用阶段的关系



摆脱“增量不增收”的尴尬境地是运营商未来发展的难点。面对未来更多的业务类型、巨大的差异性和“用户”的多元化以及运营商经营方式的变化，必须从关键性能指标/关键质量指标到关键经营指标（key business indicator, KBI），如图3所示。

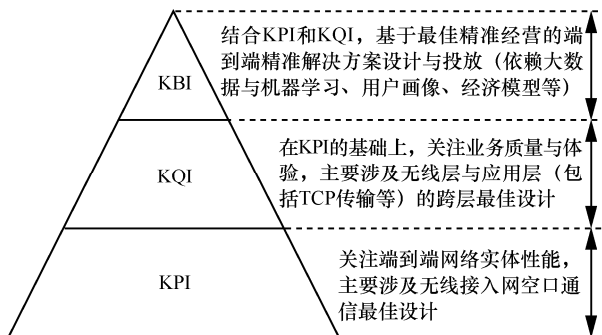


图3 从KPI/KQI到KBI

移动通信网络的评价准则的重要性怎么强调都不过分，因为它是“灯塔”，决定了移动通信网络算法和解决方案设计、网络规划部署与优化的“航向”。评价视角是解决方案导向的指挥棒。KPI好，不一定KQI好。同样地，KPI和KQI好，不一定KBI好。因此，未来以KBI为牵引，基于精准经营的端到端的精准解决方案设计与投放，一定大有可为，而基于大数据和人工智能的感知、挖掘、预测和推理技术^[8-11]，为实现KBI提供了强有力的技术手段。本文从KPI、KQI和KBI出发，层层递进，论述各自可能的最优设计方法以及潜在的挑战和解决方案方向。

2 网络架构与端到端 QoS 管理

为支持差异化的 5G 应用场景和云化部署方式，5G 采用全新的基于服务化架构（service based architecture, SBA）^[12-13]。服务化架构指以下两点。

- 借鉴信息技术（information technology, IT）系统服务化/微服务化架构的成功经验，通过模块化实现网络功能间的解耦和整合，各解耦后的网络功能独立扩容、独立演进、

按需部署。

- 控制面所有网络功能（network function, NF）之间的交互采用服务化接口，同一种服务可以被多种 NF 调用，降低 NF 之间接口定义的耦合度，最终实现整网功能的按需定制，灵活支持不同的业务场景和需求。

QoS 机制主要负责从网络的角度进行业务管理和提供业务的差异性，网络实体根据不同的质量需求来处理不同业务。5G 网络的 QoS 模型如图4所示^[14-15]，其主要特点如下。

- 控制粒度：为适配多样化的业务需求，基于 QoS 流（QoS flow）执行 QoS 控制。
- 同一 PDU 会话（PDU session）的服务流采用同一隧道（tunnel），减少隧道管理开销。
- 5G QoS 流类型：保证比特速率（guaranteed bit rate, GBR）QoS 流和 non-GBR QoS 流。
- 5G QoS 流与数据无线承载（data radio bearer, DRB）的映射：支持多对一。
- QoS 建立机制：支持信令控制 QoS 机制和反射 QoS（reflective QoS）机制（仅用 non-GBR QoS 流），后者可减少信令开销。

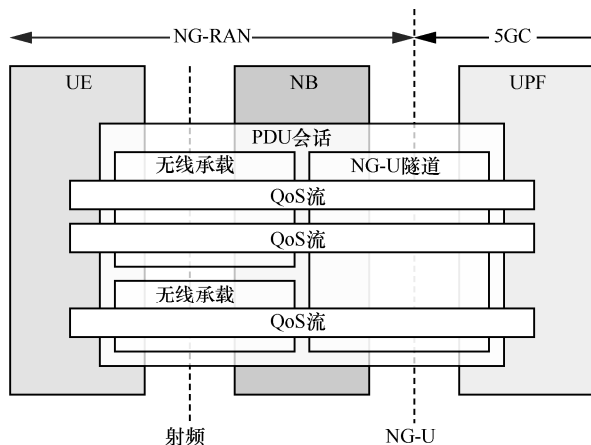


图4 5G 网络的 QoS 模型

涉及 QoS 的主要参数有资源类型（GBR、delay critical GBR 或者 non-GBR）、优先级、分组时延、分组错误率、平滑窗大小以及最大数据量等。

必须强调的是, QoS 是端到端的 QoS, 因此需要端到端、全系统的每个节点及功能模块联合起来, 共同努力^[16]。表 1 说明了用户面处理和 QoS 功能以及参数是如何分配给网络中不同的节点与功能模块的。其中, UPF (user plane function) 为用户面功能, ARP (allocation and retention priority) 为分配与预留优先级, 5QI (5G QoS identifier) 为 5G 服务质量标识, DSCP (differentiated services code point) 为差分服务代码点。

表 1 用户面 QoS 功能总体

类别	用户面 QoS 管理功能	UE	gNB	传输网络	UPF
QoS 流承载的功能操作	分组过滤	√ (上行)			√ (下行)
	GBR/ARP 准入		√		√
	ARP 优先		√		√
	速度策略		√		√
	队列管理	√	√		
	上行/下行调度		√		
	配置层 1、层 2 协议		√		
	将 5QI 映射到 DSCP		√		√
传输层, 以 DSCP 为基础的功能操作	队列管理			√	
	上行/下行调度			√	

3 基于 KPI 的最优解决方案

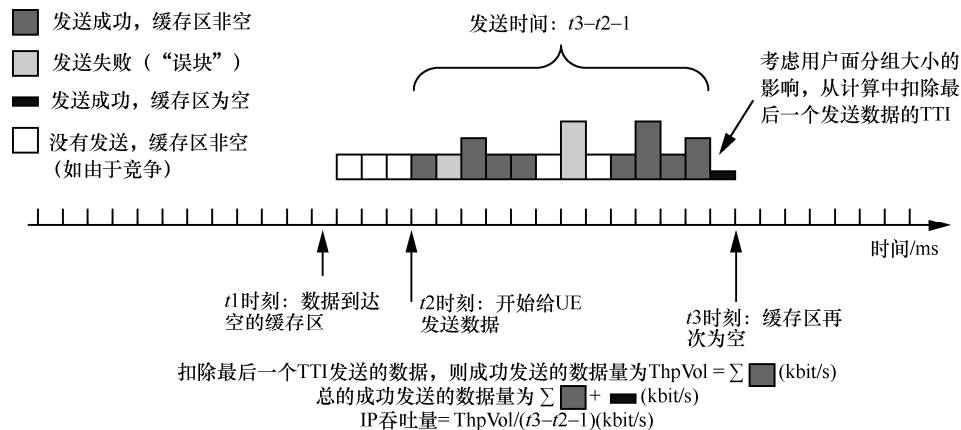
3.1 KPI 的有关定义分析

KPI 通常是网络层面的可监视可测量的重要参数。在当前移动网络的网络管理中, KPI 被理解为网络性能, 在网元管理中, KPI 被理解为网元性能。网络性能是网络运营商和设备厂商便于规划、设计和监测的信息。3GPP 标准组织有关 KPI 的类别和具体定义如下^[6]:

- 接入 (accessibility) KPI, 如无线承载建立成功率等;
- 保持 (retainability) KPI, 如无线承载异常释放率等;
- 移动性 (mobility) KPI, 如切换成功率等;
- 完整性 (integrity) KPI, 如 IP 吞吐率、IP 时延等;
- 可用性 (availability) KPI, 如某类小区可获得率;
- 能效 (energy efficiency) KPI, 如数据速率除以能耗。

其中, 接入、保持、可用性为控制面 KPI, 完整性为用户面 KPI。本文以完整性 KPI 中的 IP 吞吐率定义为例 (IP 吞吐率如图 5 所示), 分析这个 KPI 的特点, 包括其价值和存在的问题。

从图 5 可以看出, 在计算吞吐率的过程中,





时间的计算是从调度时刻算起, 没有考虑数据分组达到缓冲区后的等待时延, 在数据量的统计中, 扣除了最后一个 TTI (transmission time interval, 传输时间间隔) 调度的数据。可见, 这个 KPI 的计算考虑了突发分组业务 (或大分组, 或小分组) 对统计指标的影响, 屏蔽网络中其他节点, 有利于度量无线接入侧空口能力的评估, 但不能全面准确反映业务质量如何。

总之, KPI 无法全面涵盖与用户业务相关的各个环节, 因此评估结果往往与用户真实的业务感知偏离度过大, 无法完成全面和精准的业务质量评估。

3.2 KPI 定义与最优调度算法

下面通过举例的方式, 分析不同的调度算法与业务模型和评价指标的关系。

定义如下效用函数:

$$u(R) = \begin{cases} \ln(R), & \alpha = 1 \\ \frac{R^{(1-\alpha)}}{(1-\alpha)}, & \alpha > 0, \alpha \neq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 为数据速率, 不难得到用户调度优先级为:

$$\hat{k}(t) = \operatorname{argmax}_{k \in U} \frac{r_k(t)}{[R_k(t)]^\alpha} \quad (2)$$

其中, $r_k(t)$ 是 t 时刻用户 k 的实时数据传输速率, $\hat{k}(t)$ 是 t 时刻选择的传输用户, $R_k(t)$ 是到 t 时刻用户 k 的平均传输速率, U 是用户集合, α 为系统调度公平性修正因子, 通常取 $\alpha=1$, 这就是比例公平性调度 (proportional fair, PF) 调度。PF 调度算法一方面充分利用用户信道的时变特性, 另一方面保证较好的系统多用户分集与公平性之间的平衡, 因此成为无线通信系统中常用的动态资源调度分配算法。

一次调度完成后, 平均传输速率 $R_k(t)$ 的更新计算式表示为:

$$R_k(t+1) = \left(1 - \frac{1}{T}\right) R_k(t) + \frac{1}{T} r_k(t) \quad (3)$$

其中, T 是一个时间窗口参数, T 越大, 系统的吞

吐量越大, 但是用户可能需要等待更长的时间以获得服务; T 越小, 调度的公平性越好。调度器将重复上述过程直到所有的资源全部分配完毕或者队列中没有积累的数据需要发送。

不同调度方案在不同业务模型下的结果如图 6 所示, 可以看出^[17], 在一定的评价准则下, 同一个调度方案, 在不同的业务模型下, 其表现出的特性是不同的。对于非 Fullbuffer 业务, 显然是黑色曲线性能更好, 对应 $\alpha=0.6$; 而对于 Fullbuffer 业务, 则灰色曲线性能更好, 对应 $\alpha=1$ 。因此, 首先要确定评价准则 (比如速率 R 如何统计, 是采用类似式 (1) 的效用函数还是直接最大化如图 5 所示的小区 IP 吞吐率等), 然后在这一评价准则下, 针对不同的业务特点, 选择最佳的算法方案。事实上, 基于实际网络的业务模型和图 5 中的评价指标, 传统的 PF 算法并不是最优的, 需要研究新的调度算法, 不过这是一个非常有挑战性的问题, 难以推导出具体的表达式, 未来可考虑基于人工智能的方法和工具 (如深度学习等) 进行深入研究^[18-24]。

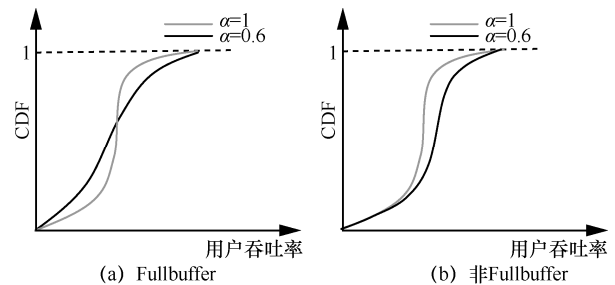


图 6 不同调度方案在不同业务模型下的结果

4 基于 KQI 的最优解决方案

传统的 KPI 主要关注网络控制面的性能 (如是否可以接入、接入后是否产生掉话), 或者用户面的性能偏向于对于网络能力的度量, 但对呼叫建立后的业务体验 (如语音质量差、视频停顿等) 缺乏直观、有效的度量方法。因此, 给运营商带来的难题是网络运维难以保障业务体验。这使很多运营商都感受到 “KPI 好, 但业务体验不

一定好”的运维压力。同时，因为输入信息的不完整，接入网如何分配资源保证业务体验也面临很大挑战。

4.1 KQI 的有关定义分析

KQI 是主要针对不同业务提出的贴近用户感受的业务质量参数，是业务层面的关键指标。基于业务可用性 (serverability) [7]：

- service accessibility performance (接入性)；
- service retainability performance (保持性)；
- service integrity performance (完整性)。

参考文献[9]研究了若干业务的 KQI 指标及其定义。基于以上 3 个方面，为每个 KQI 设计了详细的计算式以及计算式中各项因子的具体识别、提取、计算方法等，从而建立一整套基于大数据分析的移动互联网用户感知评估体系，举例如下。

- 网页浏览：页面响应成功率、页面响应时长、页面显示完整性、页面显示成功率、页面显示时长以及页面下载速率。
- HTTP 视频业务：视频播放成功率、视频播放等待时长、视频卡顿频次以及视频卡顿占比。
- QQ 业务：QQ 登录成功率、QQ 登录时长、QQ 服务器响应成功率、QQ 服务器响应时长、QQ 终端响应成功率、QQ 终端响应时长以及 QQ 终端掉线率。

4.2 KQI 与最佳跨层设计

3GPP 标准组织以 DASH (dynamic adaptive streaming over HTTP) 为例，研究了基于 KQI 的服务器和网络辅助 DASH (server and network assisted DASH, SAND) 的跨层设计解决方案[25]。

上下文识别 (context awareness) 主要是为了完成不同层之间的交互。从接入网 (radio access network, RAN) 侧来说期望达到：

- 接入网或核心网获取应用 (application, App) 层信息，从而提升 RAN 的服务质量和效率；

- RAN 获取用户设备 (user equipment, UE) 环境的相关信息，辅助无线资源管理 (radio resource management, RRM) 和自组织网络 (self-organizing network, SON) 优化；
- RAN 或核心网向 App 提供 RAN 侧相关信息，辅助 App 层进一步提升用户体验。

以如图 7 所示的跨层设计为例，可以基于核心网或者 RAN 进行业务动态识别，然后把有关的 QoS 参数传递给 RAN 和 UE。UE 报告其缓存状态等信息给 RAN，RAN 据此进行网络资源分配。

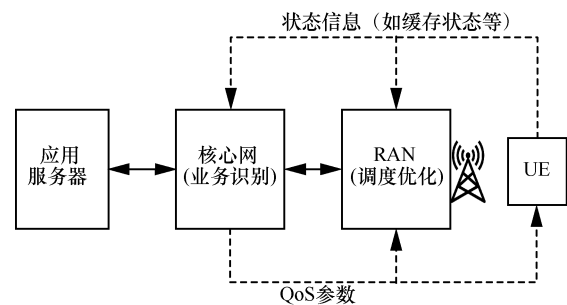


图 7 最优跨层设计[26]

最优跨层设计问题可以建模如下：

$$\max u(R) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } KQI \geq KQI_{\text{threshold}} \quad (5)$$

其中， $KQI_{\text{threshold}}$ 表示有关满足 KQI 要求的参数约束，可得如下的调度优先级方案[26]：

$$\hat{k}(t) = \underset{k \in U}{\operatorname{argmaxe}} \left[e^{a_k(t)W_k(t)} \dot{u}(R(t))r_k(t) \right] \quad (6)$$

其中， $a_k(t)$ 和 $W_k(t)$ 是和缓存有关的参数[26]。

面向未来移动通信系统中的通信与计算融合，在信息传输机制方面，打通移动通信传输管道和上层业务应用之间的联系，融合通信、计算与存储能力，研究业务感知业务内容的需求与特性、跨层信息传输机制，与移动通信管道传输能力相适配，提高移动通信系统总体的信息传输能力[27]。欧洲电信标准化协会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 给出了边缘计算的 7 类应用场景[28-29]，其中智能移动视频加速 (开放无线网络信息、支持应用层和网络



层的跨层联合优化视频等数据传输)等,无不体现了这一点。

必须说明的是,通常难以推导跨层最优设计问题的具体表达式^[30],未来可考虑基于人工智能的方法和工具(如深度强化学习等)进行深入研究^[31]。

5 基于 KBI 的最优解决方案

5.1 KBI 的基本思想

无论是 KPI 还是 KQI,都会涉及公平性问题。公平性准则有多种,最常用的为最大最小公平(max-min fair)准则和比例公平(proportional fair)准则。在有线网络中,最大最小公平为常用准则,而无线网络中比例公平为常用准则。

公平性是一个抽象概念,可以分为过程公平和结果公平。调度机会均等可以看作过程公平。结果公平又有物理资源公平和可达速率公平,比如物理资源一样,但由于错误率不一样,则实际的可达速率不同,这就是两者的区别。事实上,资源分配,很难考虑绝对的公平,同时还要考虑效率。绝对的公平是不存在的,只有相对的公平。

关于公平性的几种量化统计方法举例如下^[32]。

(1) Jain 指标

设想网络中被服务的所有用户,用集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示,其中 x_i 表示第 i 用户。

Jain 指标定义如下:

$$\text{Jain's index} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (7)$$

(2) 熵(entropy)指标

假设资源的分配比例为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 并且:

$$p_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (8)$$

其中, $0 \leq p_i \leq 1 (i=1, 2, \dots, n)$, $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。分布 P 的不确定性,即熵 $H(P) = H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 如下:

$$H(P) = -\sum_{i=1}^n (p_i \lg p_i) \quad (9)$$

(3) Tian Lan 指标(统一 Jain 和熵指标)

$$f_\beta(X) = \text{sign}(1 - \beta) \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\sum_{j=1}^n x_j} \right)^{1-\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

其中, $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数, $\beta \in (0, 1) \cup (1, \infty)$, $f_\beta(X)$ 是比例公平, $\beta \rightarrow 0$ 是熵公平, $\beta = 1$ 是 Jain 指标。

(4) 其他指标

如最大最小的比例、洛伦兹曲线(Lorenz curve)、基尼系数(Gini coefficient)等,但是这些指标并没有广泛用于公平性研究的评估中。

可以看出,上面的指标都是一种后验的“经验”指导,没有形成具体的反馈闭环机制形成对设计准则的指导。

下面以无线资源管理中引入价格^[33-34]要素说明 KBI 的基本思想、动机。

RRM 的目标仅考虑了效用,没有考虑价格因素,这是不合理的。第一个原因是如果来自用户的收入不够,运营商不会提供业务;另一方面,如果价格变化,用户的感知不同。实际上,用户对价格和质量都满足才是可接受的。

设想 $u(q)$ 是和服务质量有关,参数 q ($0 \leq q < \infty$ 。简单起见,仅考虑单维度)表示网络给用户的资源。因为效用映射到感受的服务质量,所以应该是参数 q 的增函数,也即分配给用户的资源越多,满意度越高。这意味着函数 $u(q)$ 满足:

$$\frac{du(q)}{dq} \geq 0, \lim_{q \rightarrow \infty} \frac{du(q)}{dq} = 0 \quad (11)$$

式(11)也是经济学中的边际效益递减原则,意味着满足度很高时,QoS 的改进不会再带来效用增量。类似用 $u(q)$ 表示效用,用 $p(q)$ 表示价

格要素（不妨认为价格是没有上界的），显然有：

$$\frac{dp(q)}{dq} \geq 0 \quad (12)$$

设每个用户的可接受概率为 $A(u, q)$ ，依赖与 QoS 有关的 u 和价格 p ，这个概率函数随效用增，随价格减，满足：

$$\frac{\partial A}{\partial u} \geq 0, \frac{\partial A}{\partial p} \leq 0 \quad (13)$$

$$\forall p > 0 \lim_{u \rightarrow 0} A(u, p) = 0, \lim_{u \rightarrow \infty} A(u, p) = 1 \quad (14)$$

$$\forall p > 0 \lim_{u \rightarrow 0} A(u, p) = 1, \lim_{u \rightarrow \infty} A(u, p) = 0 \quad (15)$$

收入 G 由式 (16) 决定：

$$G = \sum_{i=1}^N G_i = \sum_{i=1}^N p_i A(u_i, p_i) \quad (16)$$

则最大化收入的资源分配为：

$$\begin{aligned} & \max_{q_i} G \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^N q_i \leq T_q \end{aligned} \quad (17)$$

其中， i 表示用户， T_q 表示总资源。

需要说明的是，这只是一个示例，更多的是强调“经营”理念与对应的方案渗透到移动通信网的方方面面，包括设计、规划、部署和优化。为了形成对算法设计的指导，从理论到实践层面，还需大量深入的研究。

5.2 基本 KBI 的解决方案精准投放与网络经营

基于业务识别、用户画像、计费 and 签约等信息，本文提出基于 KBI 的解决方案精准投放与网络经营，如图 8 所示，涉及的主体有核心网、接

入网和网络运维运营以及各主体间的跨层信息交互。其中，AMF（access and mobility management function）为接入和移动性管理网络功能，PCF（policy control function）为策略控制功能，UDM（unified data management）为统一数据库、存放用户的签约数据等，UPF（user plane function）为用户面功能，执行用户面数据的转发等功能，NWDAF（network data analytics function）为网络数据分析功能。

下面以一个具体的例子来举例说明。

比如有 4 个用户，分别使用：基本包用户 40 元/GB，套餐一是 25 元/GB，套餐二是 12 元/GB，视频定向包是 8 元/GB。如果这 4 个用户的信道质量一样，根据流量调度（比例公平性调度），如果有 8 GB 的流量，则每个用户 2 GB；如果是价值调度（考虑收益），则第一个用户是 3.76 GB，第二个用户是 2.35 GB，第三个用户是 1.13 GB，第四个用户是 0.76 GB。流量调度获得的总收入为 170 元，而价值调度获得的总收入为 228.79 元。

在图 8 中增加如下信息。

- 核心网：将用户的计费信息传递给 RAN，按照 QoS 流通知单位流量价值。
- RAN：利用用户计费信息和 QoS 流单位流量价值，确定无线资源管理策略，如分组数据汇聚协议（packet data convergence protocol, PDCP）队列权重和调度器权重等。

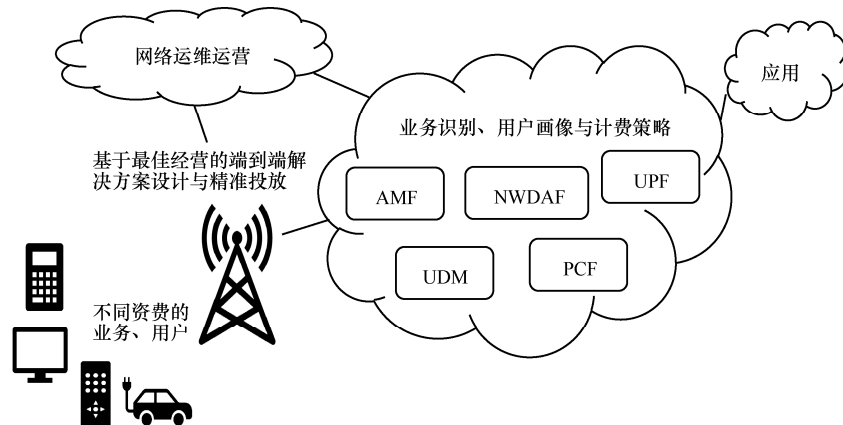


图 8 基于 KBI 的解决方案精准投放与网络经营（以 5G 网络架构为例）



5.3 网络切片与 KBI

传统移动通信网络主要用来服务单一的移动宽带业务,无法适应 5G 多样化的业务场景。如果为每种业务场景都建设一个专有的物理网络,必然会导致网络运维复杂、成本昂贵以及可扩展性差等问题。因此,为应对在一个物理网络上同时支持多种具有不同性能要求的业务场景,满足差异化服务对网络的不同需求,网络切片技术应运而生^[35]。通过网络切片技术,运营商可以根据不同用户的需求,将同一个物理网络基础设施切分为多个虚拟网络,满足 5G 多元化的业务需求。网络切片是实现业务快速上线和自动化运维、实现 5G 网络同时支持多种不同业务的核心技术。基于虚拟化、服务化架构的 5G 核心网,可以实现切片和网络功能的按需编排、快速部署、灵活弹性和高可靠性要求,为网络切片奠定了基础。网络切片划分的粒度、网络切片架构、网络切片管理与编排、网络切片自动化运

维是关键所在。图 9 就是基于租户和应用分类的网络切片选择示例,其中的切片类型可以是 5G 中通常提到的几大应用场景如增强移动宽带通信(enhanced mobile broadband, eMBB)、超可靠低时延通信(ultra-reliable and low-latency communication, uRLLC)或者大规模机器类通信(massive machine type communication, mMTC)等。

目前在云网络的资源管理的研究中,通常用到经济与定价模型^[36-37],如图 10 所示。

事实上,如何进行网络切片间和切片内的动态资源分配,同样可以引入 KBI 的思想。基于用户的方法论很容易推广到切片,因为单用户/业务可认为是切片的极端情况。

6 结束语

随着移动通信技术的发展及对各行各业的渗透、交叉融合,未来业务将更加多样化、体验将更加个性化。由此带来如何确定移动通信网络可

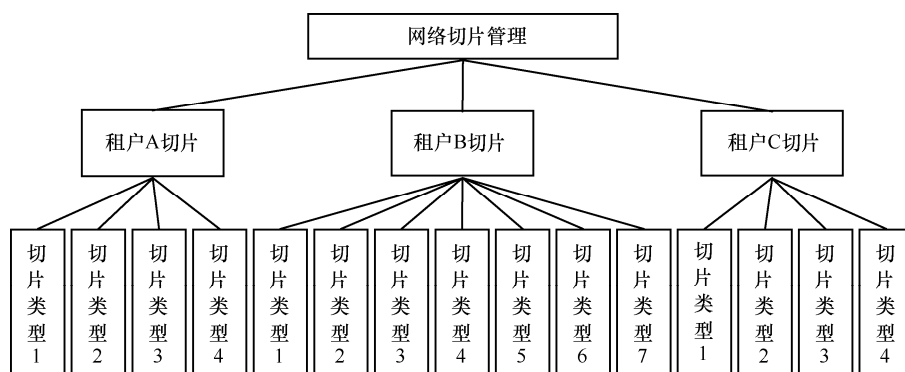


图 9 基于租户和应用分类的网络切片选择

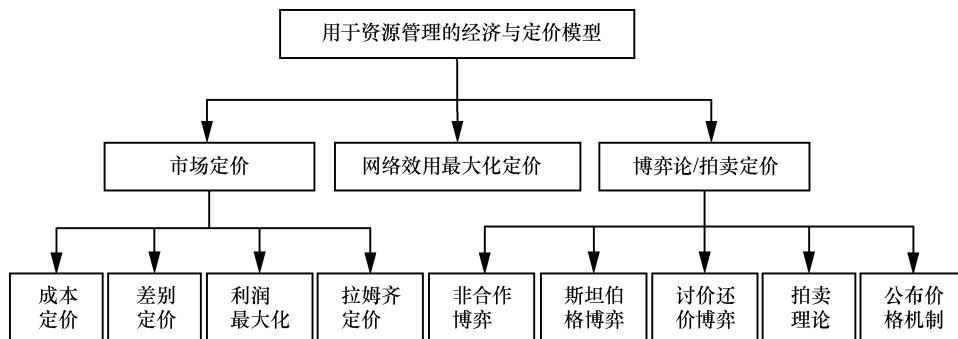


图 10 经济与定价模型

量化执行的评价准则显得更加重要,因为它是“灯塔”,决定了移动通信网络算法和解决方案设计、网络规划部署与优化的“航向”。

本文分别论述了 KPI、KQI、QoS 及 KBI 这些概念的内在关系以及从 KPI、KQI 和 KBI 出发各自可能的最优设计方法以及面临的挑战和技术研究方向,这是一个层层递进的统一整体。此外,无论是 KPI 还是 KQI,都会涉及公平性问题,但目前的公平性指标是一种后验的“经验”指导,没有产生具体的反馈闭环机制以形成对设计准则的明确指导。而从 KBI 角度的牵引,可能是可选的终结性、归一化的评价准则。

必须要说明的是,本文尽力做了一个仅是全方位的初步梳理和探讨,要从深度和广度上做好这些工作,需要跨学科、跨领域地进一步深入研究,需要跨网络不同节点间的密切协同、跨层设计。基于人工智能和大数据的感知、挖掘、预测和推理,无疑是强有力的技术工具候选,将贯穿于移动通信网络算法和解决方案设计、网络规划部署与优化的各个环节。

参考文献:

- [1] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TS 22.261[S]. 2018.
- [2] 3GPP. Telefónica 5G vision: RWS-150005[S]. 2015.
- [3] 肖子玉, 韩研, 马洪源, 等. 5G 网络面向垂直行业业务模型[J]. 电信科学, 2019, 35(6): 132-140.
XIAO Z Y, HAN Y, MA H Y, et al. Business service model of 5G network for vertical industry[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(6): 132-140.
- [4] ITU-T. QoS aspects for popular services in mobile networks[R]. 2014.
- [5] 杨燕. 浅谈移动通信网中的 QoE[J]. 电信科学, 2007, 23(8): 34-38.
YANG Y. Simple analysis of QoE in mobile communication network[J]. Telecommunications Science, 2007, 23(8): 34-38.
- [6] 3GPP. Key performance indicators (KPI) for evolved universal terrestrial radio access network: TS32.450[S]. 2018.
- [7] 3GPP. Study on key quality indicator (KQI) for service experience: TR32.862[S]. 2016.
- [8] 潘思宇, 张云勇, 张溶芳, 等. 5G 时代, 人工智能为运营商赋能[J]. 电信科学, 2019, 35(4): 95-102.
PAN S Y, ZHANG Y Y, ZHANG R F, et al. Empowering MNO with AI in 5G era[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(4): 95-102.
- [9] 陈森, 陈超, 张小勇, 等. 基于大数据分析的移动互联网用户感知评估系统[J]. 电信科学, 2015, 31(4): 147-154.
CHEN S, CHEN C, ZHANG X Y, et al. Evaluation system of mobile internet user experience based on big data analysis[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(4): 147-154.
- [10] 林浩凌, 吴奕生, 郑伟旭, 等. 基于移动互联网应用的感知评估体系研究[J]. 电信科学, 2014, 30(Z1): 1-5.
LIN H L, WU Y S, ZHENG W X, et al. Research on perception evaluation system based on mobile internet application[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(Z1): 1-5.
- [11] 张平, 崔琪桐, 侯延昭, 等. 移动大数据时代: 无线网络的挑战与机遇[J]. 科学通报, 2015, 60(5-6): 433-438.
ZHANG P, CUI Q M, HOU Y Z, et al. Opportunities and challenges of wireless networks in the era of mobile big data[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(5-6): 433-438.
- [12] 3GPP. System architecture for the 5G system: TS23.501[S]. 2018.
- [13] 3GPP. Study on architecture for next generation system: TR23.799[S]. 2016.
- [14] 3GPP. Policy and charging control framework for the 5G system: TS23.503[S]. 2018.
- [15] 3GPP. NR and NG-RAN overall description: TS38.300[S]. 2018.
- [16] EKSTROM H. QoS control in the 3GPP evolved packet system[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(2): 76-83.
- [17] AMEIGEIRAS P, WANG Y Y, NAVARRO-ORTIZ J, et al. Traffic models impact on OFDMA scheduling design[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012.
- [18] CUI W, SHEN K M, YU W. Spatial deep learning for wireless scheduling[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(6): 1248-1261.
- [19] SUN H R, CHEN X Y, SHI Q J, et al. Learning to optimize: training deep neural networks for wireless resource management[C]// Proceedings of IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [20] SUN Y H, PENG M G, ZHOU Y C, et al. Application of machine learning in wireless networks: key techniques and open issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3072-3108.
- [21] HAN S F, CHIH L I, LI G, et al. Big data enabled mobile network design for 5G and beyond[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9): 150-157.
- [22] IMRAN A, ZAHA A, ABU-DAYYA A. Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 27-33.
- [23] KLAINE P V, IMRAN M A, ONIRETI O, et al. A survey of



- machine learning techniques applied to self organizing cellular networks[J]. IEEE Communications Survey & Tutorials, 2017, 19(4): 2392-2431.
- [24] HUAWEI. The future of wireless network—AI inside[R]. 2018.
- [25] 3GPP. Study on server and network-assisted dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH) (SAND) for 3GPP multimedia services: TR26.957[S]. 2017.
- [26] 3GPP. Study on context aware service delivery in RAN for LTE: TR36.933[S]. 2017.
- [27] 周一青, 李国杰. 未来移动通信系统中的通信与计算融合[J]. 电信科学, 2018, 34(3): 1-7.
- ZHOU Y Q, LI G J. Convergence of communication and computing in future mobile communication systems[J]. Telecommunication Science, 2018, 34(3): 1-7.
- [28] ETSI. Mobile edge computing (MEC); service scenarios[R]. 2015.
- [29] 马洪源, 肖子玉, 卜忠贵, 等. 5G 边缘计算技术及应用展望[J]. 电信科学, 2019, 35(6): 114-123.
- MA H Y, XIAO Z Y, BU Z G, et al. 5G edge computing technology and application prospects[J]. Telecommunication Science, 2019, 35(6): 114-123.
- [30] OYMAN O, SINGH S. Quality of experience for HTTP adaptive streaming services[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(4): 20-27.
- [31] XU Z Y, TANG J, YIN C X, et al. Experience-driven congestion control: when multi-path TCP meets deep reinforcement learning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(6): 1325-1335.
- [32] SHI H Z, PRASADR V, ONUR E, et al. Fairness in wireless networks: issues, measures and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 5-22.
- [33] BADIA L, LINDSTROM M, ZANDER J, et al. Demand and pricing effects on the radio resource allocation of multimedia communication systems[C]//Proceedings of 2003 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2004: 4116-4121.
- [34] BADIA L, SATURNI C, BRUNETTA L, et al. An optimization framework for radio resource management based on utility vs. price tradeoff in WCDMA systems[C]//Proceedings of Third International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Piscataway: IEEE Press, 2005: 404-412.
- [35] 王睿, 张克落. 5G 网络切片综述[J]. 南京邮电大学学报, 2018, 38(5): 19-27.
- WANG R, ZHANG K L. Survey of 5G network slicing[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018, 38(5): 19-27.
- [36] LUONG N C, WANG, NIYATO D, et al. Resource management in cloud networking using economic analysis and pricing models: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 954-1001.
- [37] ZHANG Y, LEE C, NIYATO D, et al. Auction approaches for resource allocation in wireless systems: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(3): 1020-1041.

[作者简介]



伏玉笋 (1972-), 男, 博士, 上海交通大学助理研究员, 主要研究方向为无线通信与系统、无线网联智能系统、工业互联网与安全、智能制造等。