

文章编号:1000-582X(2012)08-144-07

用 SEM 法构建客户感知量化计算

赵飞龙¹, 赵舒², 余轮¹

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350001; 2. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要:提升客户网络感知度是电信营运商确保市场份额,提高业务收益的关键。笔者着重探讨技术面因素对客户感知度的影响,根据对客户感知调查与网络性能统计数据进行分析,采用 structural equation modeling(SEM)分析方法,挖掘影响客户网络质量感知因素间的关联规则,建立了 key quantity indicators(KQI)和 key performance indicators(KPI)间的映射关系,提出了一种能量化反映客户感知度的 quality of experience(QoE)计算表,通过该表格不但能直接计算出客户感知度值,还能直观确定网络的指标短板,有利于指导针对性的网络优化工作。最后探讨针对数据业务通过优化 quality of service(QoS)机制来提升客户感知的有效性和可行性。

关键词:服务质量;结构方程模型;用户感知;网络优化

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

Building the method of calculating quality of experience based on SEM

ZHAO Feilong¹, ZHAO Shu², YU Lun¹

(1. School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350001, Fujian, P. R. China;
2. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Now increasing customer Quality of Experience (QoE) has become a key factor to maintain competitiveness and improve business income. The paper lays emphasize on addressing the influence from technology element, and builds up a model of mapping network key performance indicators to QoE value by the SEM analysis method. A table is provided for calculating QoE value, which can get the short board of network performance directly. The effectiveness and feasibility of optimizing QoS parameter are discussed to improve QoE level of data service.

Key words: QoS; SEM; QoE; network optimizing

随着通信业务的快速发展,市场竞争日趋白热化,客户对业务使用的要求是不仅要能用,还要好用。全球各大电信运营商都意识到良好的网络质量感知是公司核心竞争能力的直接表现,也是确保市场份额,提高业务收益的关键^[1]。传统的网络质量评价体系只能反映网络或设备的性能,不能反映所承载业务的质量^[2],已经不适应现有的服务环境和网络环境。建立新型的基于客户感知的业务端到端

质量评估体系,科学反映与用户使用和感知最密切的网络质量情况,进而有针对性地开展网络维护工作,是电信网络运行维护发展的新方向。

ITU、ETSI、3GPP 和 TMF 等国际组织都有对 QoE (quality of experience, 用户体验质量) 展开相关的研究 (ITU-T Rec E. 800, 3GPP 26. 944/ITU G. 100, TMF GB923)^[3-7]。

ITU-T 对 QoE 的研究最早是从 IPTV 开始的,

收稿日期:2012-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No 60672146/F010104)

作者简介:赵飞龙(1977-),男,福州大学博士研究生,主要从事无线通信的规划与优化研究,(Tel)13950200518;
(E-mail)13950200518@139.com。

ITU-T Rec E. 800 从 QoS 的角度定义了 QoE 的评估体系框架,从业务的支持性能、操作性能、安全性能和可用性 4 个维度对业务的感知进行评估,其中业务可用性又进一步细分为 3 个子维度,即业务接入性、保持性和完整性。2009 年新发布的 E800 建议书中,分类和术语有所调整,如保持性合入完整性等。

3GPP 强调 QoE 是属于主观层面用户对某项业务或者应用的综合满意程度,为移动网络 QoS 管理定义了较为超前的端到端 QoS 体系架构。

TMF 则重点研究如何构建客户感知管理(在 TMF 中被称为 CEM(customer experience mangement))系统,并提出了一套系统构建的方法论。

ETSI 的 QoS 架构^[8]中,充分考虑了端到端用户的体验,以用户的角度对不同类别业务的性能指标加以定义和描述,提出了具体的统计方法和参考点,为 QoE KQI 到网络/网元 KPI 的映射分析奠定了基础。

各组织对于 QoE 的定义不尽相同。一般的,用户体验质量 QoE,定义为用户对某项业务的真实感知程度^[9-11],并且普遍认为 QoE 可以一种量化的方式来反映最终用户对业务性能的满意程度。QoE 的量化指标可以用优秀、很好、好、一般、差 5 个级别来标识。

QoE 牵涉了所有参与移动通信完整价值链的各个方面:包括用户、运营商、内容提供商或应用提供商、设备制造商或系统集成商、终端设备和应用软件。显然影响 QoE 的因素很多,大体可分为 2 个方面:技术面因素——端到端网络质量、业务质量和终端功能和非技术面因素——业务使用简易、业务内容、资费和客户支持^[12-15]。

基于 GSM 网络阐述技术面因素对客户感知度的影响,从运营商的角度,建模客户感知度模型、评价体系和计算方法,探讨开展基于客户感知的网络优化工作的可行性、重点方向和方式方法。

1 客户感知获取与建模方法

1.1 客户感知度数据采集

QoE 客户感知度评价的常见方法有 3 种:客户抽样调查统计法、现网业务指标拨测法和设备性能指标推导法。其中客户抽样调查统计法由于较为真实地反映客户对网络的体验情况,因此评价准确性最高,一般也成为了客户感知建模的基础数据。

通过对经常使用 GSM 网络的数据业务和语音业务各 1×10^4 用户进行电话访问调查(如图 1 所

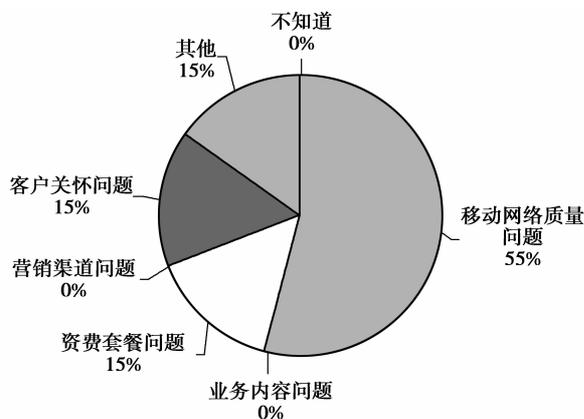
示),60.73%的用户接受了问卷调查,37.92%的用户配合完成了整个调查工作,两项业务分别获得了 604 份和 608 份有效调查表。

q1:请问您对手平时的网络信号是否满意?	1.非常满意 2.满意 3.一般 4.不太满意 5.不满意
q2:请问您对从开始拨号到听到振铃音(或彩铃)的等待时长是否满意?	1.非常满意 2.满意 3.一般 4.不太满意 5.不满意
q3:请问您对平时拨打电话的接通成功率是否满意?	1.非常满意 2.满意 3.一般 4.不太满意 5.不满意
q4:请问您对通话的畅通情况是否满意?	1.非常满意 2.满意 3.一般 4.不太满意 5.不满意
q5:请问您使用手机通话时的语音清晰度是否满意?	1.非常满意 2.满意 3.一般 4.不太满意 5.不满意
q6:您对在某地用手机打电话的总体满意度如何?	1.非常满意 2.满意 3.一般 4.不太满意 5.不满意

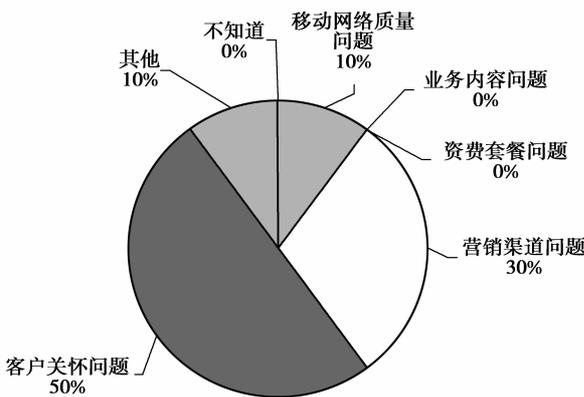
图 1 问卷调查表

1.2 客户感知初步分析

分析结果表明:对于语音业务和数据业务造成客户不良感知的因素存在明显的差异(如图 2 所示),在语音业务中,有 55%的用户认为是网络质量影响了感知,而在数据业务中,则仅有 10%的用户认为是网络问题,影响数据业务的客户感知主要因素是客户关怀和营销渠道。



(a) 造成语音业务感知差的各因素占比

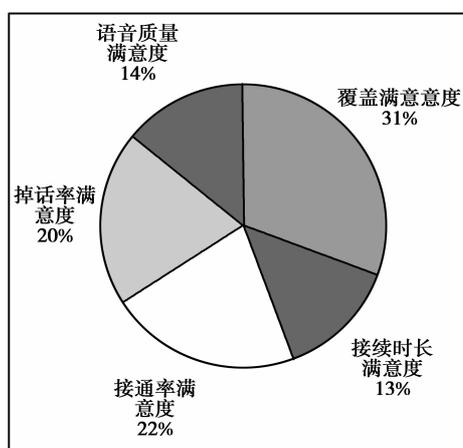


(b) 造成数据业务感知差的各因素占比

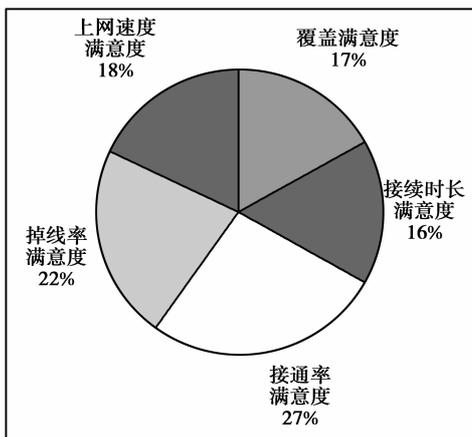
图 2 不同因素对客户感知的影响情况

对影响客户感知的技术面因素做进一步分析,对于语音业务仅有 53.57% 的用户认为是网络质量问题,而有 39.29% 的用户认为是终端质量问题;对于数据业务有 77.78% 的用户认为是网络质量问题,仅有 13.89% 的用户认为是终端质量问题。

对影响客户感知的网络质量问题做进一步分析(如图 3 所示),对于语音业务主要的影响因素是网络覆盖、其次是接通率和掉话率;对于数据业务主要的影响因素是接通率,其次是掉线率和上网速度。



(a) 造成语音业务感知差的网络面各因素占比



(b) 造成数据业务感知差的网络面各因素占比

图 3 不同因素对客户感知的影响情况

根据以上 3 个层次的初步分析,可以看到影响客户感知的因素是多方面的,其中技术面的因素约占 1/2 左右的比重,而在技术面的因素中,是网络质量的问题约为 60%—70%,同时在影响网络质量的子因素中,各种子因素的影响基本上同等重要。

1.3 客户感知建模方法

探讨网络质量各子因素对客户感知的影响,以 ITU 的业务评估体系框架为基础,通过对客户感知的问卷调查数据与网络性能统计数据的联合分析,

以结构方程为分析方法,同时从时间、空间、业务和客户 4 个维度对地域和人文等因素做了简化,建立起一个能较为全面、真实地反映客户感知的评价体系及其计算方法。

即从网络性能 NP 提炼出关键性能指标 KPI,然后通过一个映射模型实现从 KPI 到业务关键服务质量指标 KQI 的映射,最后通过对各业务 KQI 的加权计算来获得具体业务的 QoE 值。

1.3.1 指标体系建立

根据 ITU 业务评估体系框架和 TMF 的指标体系,客户感知指标体系可以分为 3 个层次即网络层的 NP(Counter 和 KPI)、业务层的 KQI 和用户层的 QoE。其中 QoE 是被评估网络的客户感知度值,以 1—5 分来表示;KQI 分为业务接入性、业务保持性和业务完整性 3 个子项^[7];NP(Counter 和 KPI)为网络性能统计数据(如表 1 和 2 所示)。

表 1 语音业务的指标体系

KQI	语音业务 KPI	网管 NP
接入性	信号良好率/%	下行测量报告中电平值超过 -100 dBm 的采样点占比
	端到端接通率/%	无线侧 SDCCH 分配成功率 * 核心网侧语音业务接通率
保持性	端到端接续时长/s	无线侧 SDCCH 平均分配时间 + 核心网侧呼叫建立时间
	端到端掉话率/%	$2 * \text{无线侧语音信道掉话次数} / (\text{核心网侧始发连接数} + \text{核心网侧终结连接数})$
完整性	语音质量	$\text{SUM}(\text{每种编码每种 FER 的采样点数} * \text{对应的 MOS 值}) / \text{采样点总数}$

表 2 数据业务的指标体系

KQI	数据业务 KPI	网管 NP
接入性	信号良好率/%	下行测量报告中电平值超过 -100 dBm 的采样点占比
	端到端接通率/%	Attach 成功率 * PDP 激活成功率 * TBF 建立成功率
	端到端接续时长/s	Attach 平均时间 + PDP 激活平均时间 + 平均 TBF 建立时间

续表

	端到端掉 线率/%	下行 TBF 掉线率
保持性	平均响应时 延/s	(3 600 * 占用的 PDCH 的 平均数目 - (下行 TBF 平均 持续时长 * 下行 TBF 成功 建立次数)) / PDCH 复用度
完整性	平均时延 抖动/%	(下行 TBF 平均持续时长 * 下行 TBF 成功建立次数 - RLC 总块数 / 50) / 下行 TBF 平均持续时长
	平均会话吞吐 量/kbps	PDCH 承载速率 * 每 TBF 占用时隙数 / PDCH 复用度

建立归一化表完成的工作主要是根据先验知识建立的 KQI 与 KPI 的关系表,将 KPI 指标取值按 1~5 进行区间划分;AMOS 建模主要是完成多因素的联合分析,输出各因素的权重系数。

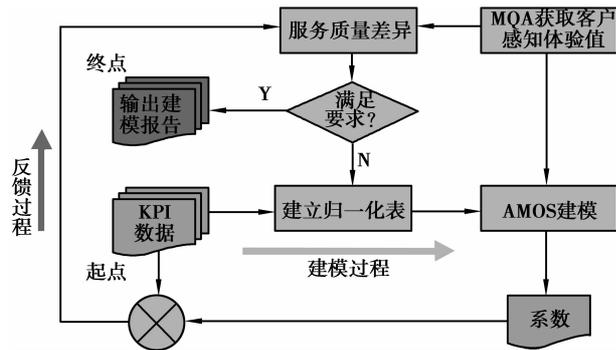


图 4 客户感知度建模流程

1.3.2 客户感知建模方法

客户感知建模的主要工作就是确定 QoE 和 KPI 间的映射关系,主要的方法有:

权重比值建模方法^[14-15]:根据业务特征、优化经验,预先定义各个 KPI 与 QoE 的线性关系,运用统计分析方法确定关系式中的加权系数,最终得到一个可直接计算 QoE 的显式线性关系式。可采用的统计分析方法有:多元线性回归分析,SEM 分析,聚类回归分析等。该方法的特点是关系式简单直观,可以进行逆向推导,便于后期运用;

基于数据挖掘的建模方法^[14-15]:通过神经网络对输入序列做训练,建立起一种非线性的数学化模型,该方法的特点是算法复杂,不够直观,不利于后期的运用。

基于遗传基因的建模方法^[14-15]:通过把每个 KPI 当作一个个体,模拟生物的遗传和进化过程,算法通过选择、交叉和变异等操作以种群的方式并行地搜索问题的最优解。该方法的特点是算法复杂,无法反映客户主观因素对 QoE 值的影响,且常常无法收敛。

根据以上的分析,权重比值建模法由于计算复杂度低,模型稳定性和有效性也较好,能够运用在大规模网络中,是研究的重点。

1.3.3 使用 SEM 建模整体思路

客户感知度建模是一个循环迭代的过程(如图 4 所示)。其目标就是根据输入的 KPI 数据,进行建模操作,输出各 KPI 指标的系数,根据这些系数能够计算出网络的满意度(客户感知体验值)。整个迭代过程涉及的操作主要有:采集 KPI 数据,建立归一化表,运用 AMOS 软件进行建模。其中,KPI 数据指小区级的无线 KPI 指标,主要取自网管系统;

归一化表(KQI 与 KPI 的映射表)是根据先验知识建立起来的,为保证 AMOS 建模输出结果的稳定性,需要增加一个反馈过程对归一化表进行干预,整个循环迭代过程在 QoE 评估值和计算值的差值收敛到一个合理的范围内时停止。

1.3.4 客户感知度模型与评价

结构方程模型(SEM)是一种建立、估计和检验因果关系模型的方法(如图 5,6 所示)。SEM 分析法结合了因素分析和路径分析的优点,除了能建立自变量和因变量间的关系,通过验证性因素分析考察测量模式的有效性,还能建立因变量间因果路径关系,可以考察结构模式的适配性^[8]。SEM 方法自 1973 年由 Jorekog 首次提出最大似然参数估计的 SEM 分析概念,于 2000 年之后在亚洲和国内逐渐得到了重视,现在已经广泛运用于社会学、统计学、经济学、心理学等多个领域^[8-9]。

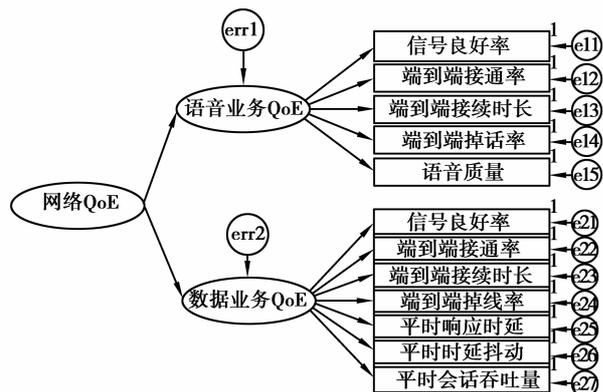


图 5 SEM 分析模型图

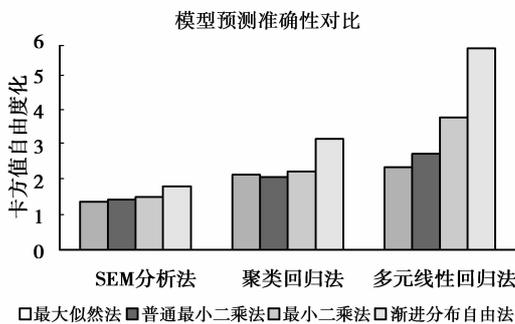


图 6 采用不同统计分析技术的模型卡方值

根据以上的分析,可以看到 SEM 分析法较其他分析法都能达到较小的卡方值,卡方自由度比基本小于 2,表明模型具有理想的拟合度^[8],建模结果能与问卷调查结果较为吻合。需要指出的是以上建模结果只是在统计意义上没有明显错误地去代表观察值,但无法证明该模型是绝对正确的。

2 QoE 计算表及其运用

基于 SEM 分析的权重比值建模方法为客户感知度建模指出了一条可行的建模思路,从实际网络运维需要来看,这样做还远远不够。在上述方法的基础,对 QoE 计算方法进一步做实用化处理,提出了一种分层映射的 QoE 计算表(如表 3 所示)。表格参照 TMF GB923 所定义的 QoE-KQI-KPI 体系结构,具体处理步骤如下:

- 1) 将电信业务划分为语音业务和数据业务,业务比重由两大类业务的业务量决定;
- 2) 根据实际网络中各 KPI 取值的分布情况,采用专家评估法,先由各网优专家独立填写归一化表,将 KPI 划分为 1—5 级,与客户满意度相对应;再对各专家的归一化表以取中值的方式进行统一,得到一份较为权威的归一化表。
- 3) 获取足够的客户感知调查数据和网络 KPI 数据,首先进行数据清洗,剔除异常值和离群值;再进行变量的主成分分析,完成变量的合并和替代,降低分析维度;然后做 SEM 分析,确定自变量与因变量间的测量模式——即系数矩阵。

4) 由式 $C = \sum_i (\omega_i k_i \sum_j q_{ij} p_{ij})$ 来计算业务的 QoE 值,其中 k 是调整系数,根据计算值和调查值的拟合结果来确定。

5) 输入实际的网络的 KPI 指标,即可获得网络对应的客户感知度值。

6) 该表格的显著特点:a)可以体现出 QoE—

KQI—KPI 的逐层映射关系;b)可以直观地计算了网络 QoE;c)可以直观地确定网络短板,便于指导后续的网络优化工作。

表 3 QoE 计算表

业务应用	语音业务 (2.8, 0.48)				数据业务 (3.6, 0.52)			
	接入性		保持性		接入性		保持性	
业务应用的比重 (对 QoE 的贡献率)	48%				52%			
业务应用的 QoS 要素 (QoE KPI)	业务可靠性 (2.7, 0.39)		舒适性 (3.0, 0.4)		业务可靠性 (2.6, 0.44)		业务舒适性 (3.8, 0.56)	
业务应用的 QoS 要素 (QoS KPI)	接入性		保持性		接入性		保持性	
网络性能指标 (NP)	信号良好率	端到端接通率	端到端掉话率	语音质量	信号良好率	端到端接通率	端到端掉话率	平均响应时延
	x	y	z	w	x	y	z	w
NP 的比重 (对 QoE 的贡献率)	x	y	z	w	x	y	z	w
归一化表	0	[0, 18]	(99.5%, [0, 4])	[0, 0.2%	[0, 18]	(99.5%, [0, 4])	[0, 0.5%	[0, 0.2%
	1	[18, 36]	(98%, [4, 6])	[0.2%, 0.4]	[18, 36]	(98%, [4, 6])	[0.5%, 1]	[0.2%, 0.4]
	2	[36, 54]	(96%, [6, 8])	[0.4%, 0.6]	[36, 54]	(96%, [6, 8])	[1, 2]	[0.4%, 0.6]
	3	[54, 100]	(92%, [10, 10])	[0.6%, 1]	[54, 100]	(92%, [10, 10])	[2, 3]	[0.6%, 1]
NP 测量结果	0.83%	98.60%	6.6	0.56%	3.5	0.83%	98%	6.5
NP 对应的 QoE 值	5	3	4	3	5	2	3	4
业务应用的 QoE	1	0.6	0.4	0.6	0.75	0.4	0.3	0.6
全网的 QoE	3.526							

运用上述的计算表格,在某地的网络做中随机抽取 100 个小区进行了为期一周的效果检验,取小区级的 QoE 中值与该小区下 10 个用户的问卷调查得分的中值做对比,结果如图 7 所示。

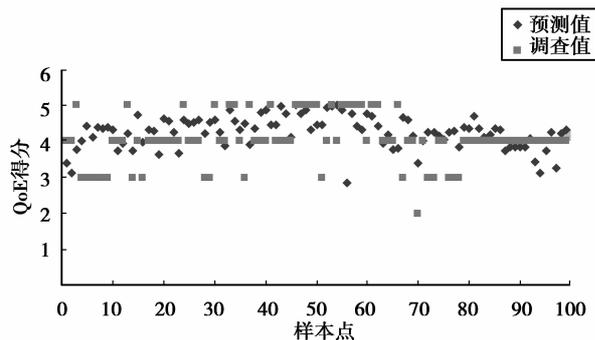


图 7 预测值与问卷调查值分布云图

如误差区间取 $[-1, 1]$,有 10% 的预测点落在调查的误差范围之内。若两份数据服从方差相同的正态分布,采用 T 检验来检验两份数据是否存在明显差异, P 值为 2.2%,属于非小概率事件,没有理由拒绝原假设^[13],也就是说该方法能够在一定程度上以数值的方式体现出客户感知的实际情况。

3 全网客户感知度计算

网络满意度计算模型用来计算全网的网络满意度的表现值,是上述原因分析模型(KQI 和 KPI 映射建模结果)的直接应用,通过计算关系矩阵的各象限表现,通过加权平均的方法得到满意度值(如图 8 所示)。

其中,

k :修正系数,可根据实际的需要对两种业务的权重做适当的调整;

w :各类业务的比重,具体在应用中可简化为 CS 业务和 PS 业务两种业务,根据两种业务的收入

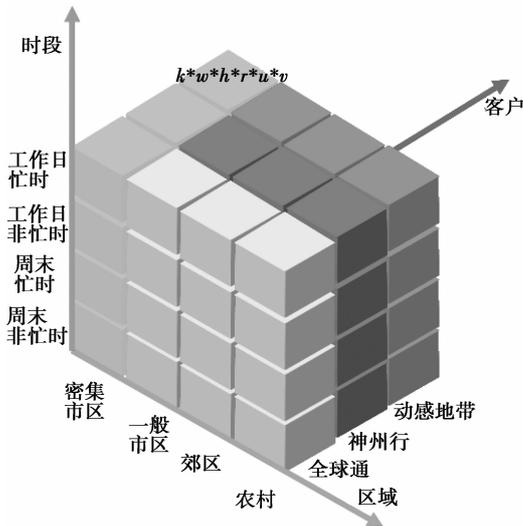


图 8 网络满意度计算模型

来折算比重,如 CS 话音业务每爱尔兰按 8 元折算, PS 数据流量每 KB 按 3 分折算;

h : 业务进行的时段,忙时为早忙时 08:00—11:00,晚忙时 18:00—21:00,通过话务量来折算比重;(注:个别区域的忙时定义未必完全适合,如大学城、CBD 商务区)

r : 用户所处的区域,可以根据当地的地理条件,通过话务量来折算比重;

u : 各类用户比重,总和为 1;

全球通比例 = 小区内活动过品牌为全球通的人数 / 小区内活动过所有人数;

神州行比例 = 小区内活动过品牌为神州行的人数 / 小区内活动过所有人数;

动感地带比例 = 小区内活动过品牌为动感地带的人数 / 小区内活动过所有人数;

v : 用户体验质量评分,最高 5 分,最低 1 分。

$$v_i = \sum_j^N q_{ij} p_{ij}, N \text{ 为某个业务的 KQI 维度, } q_{ij} \text{ 为该 KQI 维度的权值, } p_{ij} \text{ 为该维度的 KPI 主观评价得分。}$$

因此,网络满意度 C 的综合得分为

$$C = \sum_i^2 w_i \sum_{i1}^4 \sum_{i2}^4 \sum_{i3}^3 k_i h_{i1} r_{i2} u_{i3} v_i。$$

4 总 结

总的来说,影响客户感知的原因是非常复杂的,对于语音业务和数据业务的感知也存在较大的差异,技术面的因素仅仅在其中贡献了不足 50% 的比重,而在技术面因素中,网络质量的贡献率也不足

80%,因此综合来看网络质量对客户感知的影响程度也不足 40% 的比重。

随着数据业务爆炸式增长,数据业务带来的高资源要求与低资费收入形成了尖锐的矛盾,如何解决这个问题,成为了摆在运营商面前的一道不可跨越的坎。除了要运用更新的无线制式来提高频谱利用率外,更重要的是完善并发挥现有的 QoS 机制,利用不同业务的特性和不同客户的需求,提高无线信道的利用率,在不降低客户感知的情况下,减少对无线资源的占用。

从上面的分析可以看到,数据业务的技术面因素在整个客户感知体系中仅占一个较小的比重,同时在技术面因素中,网络质量又有较高的比重。这更为数据业务的 QoS 优化创造了良好的条件,即,对于重要客户或业务通过网络优化提高感知是有效的,而对于非重要客户或业务通过网络优化降低的感知是不明显的。因此对于运营商来说,基于 QoS 开展数据业务的网络优化工作,不但可以有效提升客户感知,而且还能够降低数据业务对网络资源的过度消耗,完全可以同时获得经济效益和社会效益的双丰收。

结合实际网络对客户感知的量化计算做了一个尝试,受限于当前网络可提供的指标集,同时部分指标统计不能完全真实地反映网络的实际运行性能,因此建立的模型在拟合度上还不够理想,预测的精度还不够准确。尽管仍需要进一步研究,以提高计算的精度,但该方法还是具备了一定的实际运用价值,特别的,可以在数据业务的 QoS 优化中,用于衡量优化工作的成效。

参考文献:

[1] GSM Association. Mobile World Congress 2013 Preview [EB/OL]. (2012-02-27) [2012-04-01]. <http://www.mobileworldcongress.com>.

[2] Soldani D. Means and methods for collecting and analyzing QoE measurements in wireless networks[C]//Proceedings of the 2006 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, June 26-29, 2006. Buffalo-Niagara Falls, NY, USA; IEEE, 2006: 530-535.

[3] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 26. 944 End-to-end multimedia services performance metrics [S]. [S.l.]: 3GPP, 2009.

[4] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 26. 234 Transport end_to_end packet-switched steaming service(PSS)[S]. [S.l.]: 3GPP, 2010.

- [5] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). S. R 0079-0 Support for end_to_end QoS [S]. [S. l.]: 3GPP, 2004.
- [6] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). TS 102 250-2 Definition of QoS parameters and their computation [S]. [S. l.]: ETSI, 2006.
- [7] ITU Telecommunication Sector, International Telecommunication Union. ITU-T Rec E. 800 (08/94) Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability [S]. [S. l.]: International Telecommunication Union, 1994.
- [8] 邱皓政, 林碧芳. 结构方程模型的原理与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
- [9] 荣泰生. AMOS 与研究方法(第 2 版)[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- [10] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 32. 405 Performance measurements Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) [S]. [S. l.]: 3GPP, 2009.
- [11] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 32. 406 Performance measurements Core Network (CN) Packet Switched (PS) domain [S]. [S. l.]: 3GPP, 2009.
- [12] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 32. 407 Performance measurements Core Network (CN) Circuit Switched (CS) domain [S]. [S. l.]: 3GPP, 2009.
- [13] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [14] 泰力信息咨询(北京)有限公司. 用户体验质量(QOE)及用户体验管理(CEM)研究报告[R]. 北京: 泰力信息咨询(北京)有限公司, 2009.
- [15] Soldani D, Li M, Cuny R. QoS and QoE management in UMTS cellular systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2006.

(编辑 侯 湘)

(上接第 143 页)

- [12] 李师波, 赵建中, 吴文. 3mm 线性调频源线性度实时数字校正技术研究[J]. 南京理工大学学报, 2005, 29(2): 166-168.
- Li Shibo, Zhao Jianzhong, Wu Wen. Digital real-time correction algorithm of linearity for 3mm linear frequency-modulated source [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005, 29(2): 166-168.
- [13] 黄仁欣. LFM CW 系统测距精度及补偿方法研究[J], 微计算机信息, 2005, 21(1): 77-78.
- Huang Renxin. Research on the leasuring accuracy and compensation method for LFM CW system [J]. Microcomputer Information, 2005, 21(1): 77-78.
- [14] 肖玮, 涂亚庆, 李先利. VCO 扫频非线性校正技术综述[J], 电测与仪表, 2009, 46(12): 33-38.
- Xiao Wei, Tu Yaqing, Li Xianli. Review of sweeping nonlinearity correction technology for VCO [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(12): 33-38.

(编辑 侯 湘)