

基于 3D-Markov 链的异构网络用户 QoE 分析方法

张祖凡^{①②}, 张宇^{①*}

① 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

② 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065

* 通信作者. E-mail: 493619526@qq.com

收稿日期: 2015-08-15; 接受日期: 2015-11-20; 网络出版日期: 2015-12-25

国家自然科学基金 (批准号: 61440062) 和重庆市自然科学基金 (批准号: CSTC2013jjB40001) 资助项目

摘要 针对融合 IEEE802.11ad 的 LTE-A 异构网络中的用户接入体验质量 (quality of experience, QoE) 问题, 本文通过引入接入竞争时间窗口函数, 构造一种适用于异构网络用户接入退避行为的 3D-Markov 链模型, 考虑不同业务类型用户体验质量, 分析系统服务质量 (quality of service, QoS), 采用典型的平均意见得分 (mean opinion score, MOS) 评价方法映射得到用户 QoE 性能指标. 计算机仿真结果表明, 在系统带宽一定情形下, 融合 IEEE802.11ad 的 LTE-A 异构网络可以提高包括吞吐量、时延、丢包率等指标的系统 QoS 和包括 MOS 的用户 QoE.

关键词 异构网络 接入控制 服务质量 体验质量 3D-Markov 链

1 引言

作为 5G 移动通信系统的关键技术之一的异构网络^[1], 充分融合了传统蜂窝移动通信和短距离通信的技术优势, 一方面实现了集中式广域信号和分布式密集信号的融合覆盖, 另一方面实现了低速数据业务和高速数据业务的融合传输, 从而构成满足不同网络架构下的系统业务能力、用户需求质量的异构融合^[2]. 事实上, 未来信息技术一个较为明显的特点是, 在不断提升网络系统业务能力的基础上更为关注用户对网络使用感受的提升, 尤其是针对用户在高速数据、高清信号、低时延等传输方面的需求和要求^[3]. 为了满足这一技术要求的改变, 学术界和产业界从网络异构架构基础入手开展了大量相关研究工作, 例如异构网络组成元素或网络属性^[4]、异构网络资源管理^[5]、异构网络接入控制^[6]等.

虽然如此, 当前大多异构网络方面的研究主要集中在融合传统蜂窝移动通信和短距离通信的技术优势, 重点解决覆盖和容量等问题^[7], 而实际上未来信息技术还将进一步强调用户接入体验质量方面的研究^[8], 从技术层面上看可以理解为实现从系统服务质量到用户接入体验质量提升的转变. 众所周知, 当前 IEEE 802.11ad 作为未来 5G 通信系统潜在的网络架构的网元之一^[9], 有效解决了短距离高清信号传输过程中对吞吐量、时延的要求^[10]. 研究表明融合 IEEE802.11ad 的 LTE-A 异构网络, 不仅

引用格式: 张祖凡, 张宇. 基于 3D-Markov 链的异构网络用户 QoE 分析方法. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 85-99, doi: 10.1360/N112015-00192

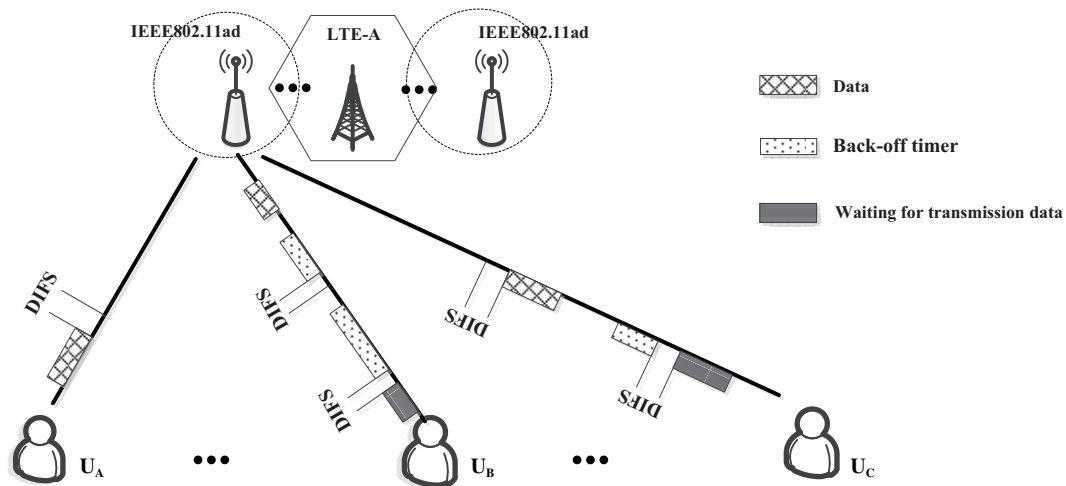


图 1 异构网络模型

Figure 1 Heterogeneous network model

可以打破现有频谱资源制约实现全频谱通信^[11], 而且可以改善系统吞吐量、时延、能耗等性能指标实现系统 QoS 提升^[12].

从用户接入控制层面上看, 当前融合 IEEE802.11ad 的 LTE-A 异构网络的研究主要集中在包括吞吐量、时延、丢包率等指标的系统 QoS 方面研究^[13], 而进一步的用户 QoE 方面研究较少. 更重要的是, 研究所提出的 3D-Markov 分析模型主要针对业务的饱和状态^[14], 亦或者三维参数的选择忽略 IEEE802.11ad 对时延参数的高敏感^[15], 为此, 本文围绕用户 QoE 分析方法, 通过引入一种竞争时间窗口函数^[16], 构建一种适用于融合 IEEE802.11ad 的 LTE-A 异构网络用户接入退避行为的 3D-Markov 链模型, 在分析包括时延、吞吐量、丢包率 3 个指标的系统 QoS 基础上, 结合系统 QoS 与用户 QoE 的 MOS 映射模型, 重点对用户的语音和视频业务 QoE 进行分析研究.

2 3D-Markov 链退避机制模型

为了分析方便, 建立如图 1 所示的由 LTE-A 和 IEEE802.11ad 组成的异构网络模型, 在异构网络中, 不同业务类型的用户通过随机竞争接入网络 IEEE802.11ad 或 LTE-A 网络, 当用户向目标网络发送接入请求时, 网络通过接入控制策略协调不同业务种类用户的接入. 假设有 N 个用户同时接入一个网络, 以 IEEE802.11ad 网络为例, N 个用户记为 U_A, U_B, \dots, U_N , 为便于讨论, 选取 3 个用户进行分析, 即 U_A, U_B, U_C . 假定 U_A 用户业务优先级最高, 且每个用户持续正确地侦听信道, 当 3 个用户感知到信道空闲时, U_A 用户接入并发送数据, 次级 U_B, U_C 等用户在等待信道连续空闲 DIFS^[17] (distributed inter frame space) 时间后, 进入退避状态, 此时用户 U_B 和 U_C 在 0 到竞争时间窗口函数内随机产生一个退避时间. 退避时间短的用户 U_C 退避计时器最先减至 0, 开始发送数据, 依次类推. 如若该用户发送数据失败, 采用二进制指数回退策略, 增大竞争时间窗口函数值, 进入下一阶的退避状态.

不失一般性, 本文通过对采用二进制指数回退策略来避免冲撞的 DCF (distributed coordination function) 算法进行研究, 根据典型的退避分析方法^[18], 借鉴其所涉及的退避计数器、退避阶数所构成的 2D-Markov 退避机制, 通过引入一个控制接入竞争过程的竞争时间窗口函数, 建立适应于异构网络的 3D-Markov 链退避机制模型.

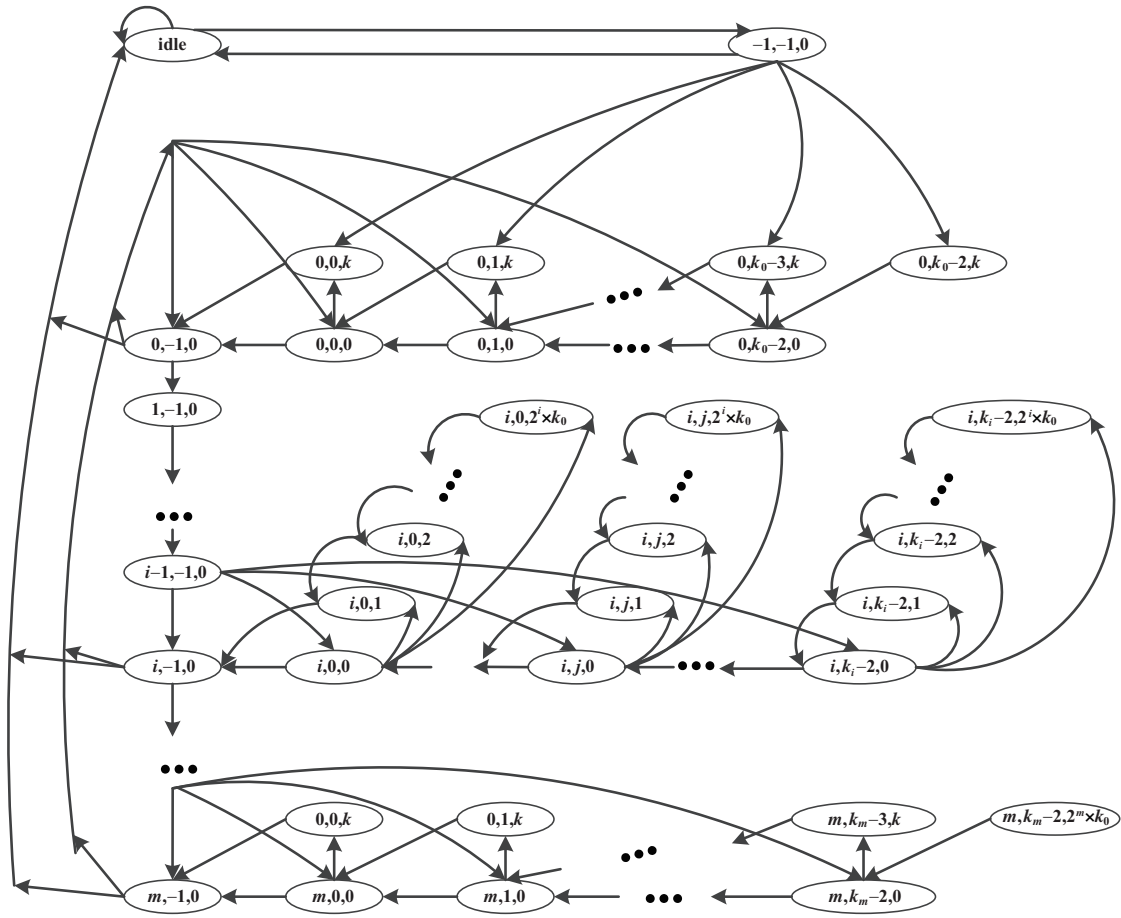


图 2 3D-Markov 模型的数据传输状态图
 Figure 2 3D-Markov chain model for packet transmission states

这里, 以单一 IEEE802.11ad 基站的 3D-Markov 链为分析的基础, 用于描述每个用户接入过程如图 2 所示. 假定 $s(t)$ 表示退避阶数 i 的随机过程, $i \in [0, m]$, $b(t)$ 表示退避计数值 j 的随机过程, $j \in [-1, k_i - 2]$, $k_i = 2^i \times k_0$, $d(t)$ 表示竞争时间窗口值 k 的随机过程, $k \in [k_0, k_m]$, 其中 k_0 大小依赖于业务优先级的不同, $k_m = 2^m \times k_0$. 假设在每一次尝试重传时, 不考虑已经经历的重传次数, 每一个数据的碰撞概率都用恒定独立的常数 p_c 来表示, 由于 $b(t)$ 和 $d(t)$ 的值均与重传次数有关, 在此种假设下, 3 个随机过程彼此独立, 符合 Markov 性质, 满足建立 3D-Markov 的条件.

令 $b_{i,j,k}$ 为状态 (i, j, k) 的稳态概率, 即 $b_{i,j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} p\{s(t) = i, b(t) = j, d(t) = k\}$, 定义特殊状态 idle, 表示在站点完成一次传输后没有新的数据需要立刻传输的状态; 特殊状态 $(-1, -1, 0)$, 表示一个站点在新数据要发送时侦听到信道空闲达到一个 DIFS 后直接发送的状态. 设共有 N 个用户, $v \in [0, N]$, 每个用户在有限次的退避阶段进行转移, 每次成功发送数据后, 该用户就转移到初始退避状态, 否则用户进入下一阶退避状态.

由第一个时隙开始具体分析, 用户感知到信道为空闲状态的概率为 p_{iv} , 此时退避计数值减 1,

$$p(i, j, 0 | i, j + 1, 0) = p_{iv}, 0 \leq i \leq m, -1 \leq j \leq k_i - 3. \tag{1}$$

当用户进入 DIFS 周期时, 退避计数值保持其现有的值不变, 进入子 Markov 链,

$$p(i, j, k | i, j, 0) = 1 - p_{iv}, 0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq k_i - 2. \quad (2)$$

当用户完成 DIFS 周期后, 退避计数值从现有的值开始继续减 1 计数,

$$p(i, j, 0 | i, j + 1, 1) = p_{tv}, 0 \leq i \leq m, -1 \leq j \leq k_i - 2. \quad (3)$$

若用户在 DIFS 周期时, 检测到信道被占用, 该用户将返回到状态 b_{i,j,d_v} ,

$$p(i, j, d_v | i, j, k) = 1 - p_{tv}, 0 \leq k \leq d_v. \quad (4)$$

若用户发送数据时产生碰撞, 用户将进入下一阶的退避状态, 重新进行新一轮的退避计数,

$$p(i, j, d_v | i - 1, -1, 0) = p_c/k_i, 1 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq k_i - 1. \quad (5)$$

若用户发送数据成功, 数据缓冲寄存器中仍有待传输数据, 用 q_v 表示寄存器中没有传输数据的概率, 则用户将返回第一阶退避计数值进行退避,

$$p(0, j, d_v | i, -1, 0) = (1 - p_c)(1 - q_v)/k_0, 0 \leq i \leq m - 1, 0 \leq j \leq k_i - 1. \quad (6)$$

若用户经过 m 次退避或重传, 数据缓冲寄存器中仍有待传输数据, 用户将返回第一阶退避计数值重新开始新一轮退避,

$$p(0, j, d_v | m, -1, 0) = (1 - q_v)/k_0, -1 \leq k \leq k_i - 1. \quad (7)$$

若用户发送数据成功, 数据缓冲寄存器中没有待传输数据, 用户将转移到空闲状态,

$$p(-1, -1, 0 | i, -1, 0) = q_v(1 - p_c), 0 \leq i \leq m - 1, 0 \leq j \leq k_i - 1. \quad (8)$$

若用户经过 m 次退避或重传, 数据缓冲寄存器中没有待传输数据, 用户将转移到空闲状态,

$$p(-1, -1, 0 | m, -1, 0) = q_v, 0 \leq j \leq k_i - 1. \quad (9)$$

当用户处于特殊状态 $(-1, -1, 0)$ 时, 下一时隙数据缓冲仍没有新业务到达, 用户将继续处于特殊状态,

$$p(-1, -1, 0 | -1, -1, 0) = q_v. \quad (10)$$

则特殊状态间的一步转移概率可以表示为

$$\begin{cases} p(\text{idle} | \text{idle}) = q_v, \\ p((-1, -1, 0) | \text{idle}) = (1 - q_v)p_{iv}, \\ p((0, k_i - 1, k) | \text{idle}) = (1 - q_v)(1 - p_{iv})/k_0. \end{cases} \quad (11)$$

由 Markov 链的时间齐次性有

$$b_{i,-1,0} = p_c^i b_{0,-1,0}, 0 \leq i \leq m. \quad (12)$$

进一步由 Markov 链规律性可以得到如下关系:

$$b_{i,j,0} = \frac{k_i - j - 1}{k_i} \cdot \begin{cases} (1 - p_c)(1 - q_v) \sum_{i=0}^{m-1} b_{i,-1,0} + (1 - q_v)(b_{m,-1,0} + b_{-1,-1,0}), & j = 0, \\ p_c b_{i,-1,0}, & 0 \leq j \leq m, \end{cases} \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^{m-1} b_{i,-1,0} = b_{0,-1,0} / (1 - p_{iv}), \quad (14)$$

其中, 定义 $b_{-1,-1,0}(i)$ 为用户成功发送数据的概率, 将式 (12) 代入式 (13) 和 (14) 可变形为

$$b_{i,j,0} = \frac{k_i - j - 1}{k_i} \cdot b_{i,-1,0}, 0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq k_i - 2. \quad (15)$$

本文主要研究的是语音和视频两个业务, 则当两个业务用户同时处在退避过程, 低优先级的用户将再次进入退避过程, 可得到

$$b_{i,j,k} = b_{i,j,d(t)} p_{tv}^{k-1}, 1 \leq k \leq d_v - 1. \quad (16)$$

结合式 (15) 及 (16), Markov 链中所有的稳态概率 b_{i,j,d_v} 可以表示为

$$b_{i,j,d_v} = \begin{cases} \frac{p_c^i \cdot b_{0,-1,0}}{k_i p_{tv}^k} [1 + (1 - p_c)(k_i - j - 1)], & 0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq k_{iv} - 2, \\ \frac{p_c^i \cdot b_{0,-1,0}}{k_{iv} p_{tv}^k}, & 0 \leq i \leq m, j = k_{iv} - 1. \end{cases} \quad (17)$$

通过归一化条件可获得 $b_{0,-1,0}$ 的等式关系有

$$\sum_{i=0}^m \sum_{j=-1}^{k_i-2} b_{i,j,0} + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{k_i-1} \sum_{k=1}^{d_v} b_{i,j,k} + b_{-1,-1,0} = 1, \quad (18)$$

$$b_{0,-1,0} = \left[\sum_{i=0}^m \frac{k_i + 1}{2} p_c^i + \frac{(1 - p_{tv}^{d_v})}{p_{tv}^{d_v} (1 - p_{tv})} \left((1 - p_f) \sum_{i=0}^m \frac{k_i - 1}{2} p_c^i + \frac{1 - p_c^{m+1}}{1 - p_c} \right) + \frac{q_v}{1 - q_v} \right]^{-1}, \quad (19)$$

$$p_f = \prod_{u=0}^N (1 - \tau_u)^{n_u}, \quad (20)$$

其中, p_f 表示对任意一个退避过程中的随机时隙信道空闲的概率, τ_v 表示一个时隙内 AC_v (access category) 用户发送数据的概率. 当忽略退避阶数 i , 且退避计数器减至零时, 将会进行一次传输, 可表示为

$$\tau_v = b_{0,-1,0} (1 - p_c^{m+1}) / (1 - p_c). \quad (21)$$

因为高优先级的业务用户不会与该接入基站优先级低的用户发生碰撞, 则发送数据发生碰撞的概率 p_c 可以表示为

$$p_c = 1 - \prod_{u \leq v} (1 - \tau_u)^{n_u - 1} \prod_{u > v} (1 - \tau_u)^{n_u}, \quad (22)$$

其中, 假设 AC_v 业务的数量为 n_v .

当 DIFS 周期中存在多个用户业务, 在此 DIFS 周期中信道空闲的概率 p_{tv} 为

$$p_{tv} = \prod_{u > v} (1 - \tau_u)^{n_u}. \quad (23)$$

进一步可得任意一个时隙至少有一次传输的概率 p_{tr} 为

$$p_{tr} = 1 - \prod_{u=0}^N (1 - \tau_u)^{n_u}. \quad (24)$$

最后, 各个业务用户在任意一个时隙中成功传输数据的概率 p_{slot_v} 为

$$p_{slot_v} = n_v \tau_v \prod_{u \leq v} (1 - \tau_u)^{n_u - 1} \prod_{u > v} (1 - \tau_u)^{n_u}. \quad (25)$$

3 系统 QoS 和用户 QoE 的数学分析

3.1 3 种不同网络架构的 QoS 分析

(1) IEEE 802.11ad 网络的 QoS 分析

MAC (medium access control) 层服务时间^[19]是从数据进入缓冲寄存器, 到数据被成功传输, 或者数据被丢弃的时间过程. 定义代表服务时间的随机变量 Z , 其平均值为 $E[Z]$. 对任一 AC_v 用户而言, 服务时间由用户的竞争接入和数据传输时延 T_{sv} 两部分组成, 而竞争接入又由平均退避时延 $E[T_{bo}]_v$ 和平均碰撞时延 $E[T_{co}]_v$ 构成, 具体表示为

$$E[Z] = E[T_{bo}] + E[T_{co}] + T_{sv}, \quad (26)$$

其中,

$$E[T_{bo}] = E[N_{bo}] \left[p_{iv} \sigma + \sum_{u=0}^N p_{slot_u} \cdot T_{sv} + \left(p_{tr} - \sum_{u=0}^N p_{s,v} \right) T_{cv} + p_{tr} \cdot E[N_{sns}]_v T_{av} \right], \quad (27)$$

$$E[T_{co}] = E[N_{co}] T_{cv}. \quad (28)$$

式 (27) 的右边包括: 退避时延期望 $E[N_{bo}]$,

$$E[N_{bo}] = \sum_{t=0}^m \frac{p_v^t k_{iv} / 2}{1 - p_v^{m+1}}; \quad (29)$$

平均退避次数 $E[N_{sns}]$,

$$E[N_{sns}] = \frac{1}{p_{tv}^d} - 1; \quad (30)$$

退避过程的平均持续时间 T_{av} ,

$$T_{av} = \sum_{u>v} p_{slot_u} T_{sv} + \left(p_{tr} - \sum_{u>v} p_{slot_u} \right) T_{cv} + \sum_{k=1}^{d_v-1} s(1 - p_{tv}) p_{tv}^k \sigma. \quad (31)$$

式 (28) 的右边包括: 平均碰撞次数 $E[N_{co}]$,

$$E[N_{co}] = \sum_{i=0}^m \frac{i(1 - p_c) p_c^i}{1 - p_c^{m+1}}. \quad (32)$$

进一步以 T_p 表示数据有效载荷部分需要的传输时间, T_h 表示数据传输头部开销的信道占用时间, T_{sifs} 为 SIFS (short inter frame space) 时间, T_{ack} 为 ACK (acknowledgement) 的传输时间, ACK-timeout

表示发端没有收到 ACK, 确认传输时变的最长等待时间, δ 为传输时延. 可以得到成功传输所需时间 T_{sv} 和产生碰撞所需时间 T_{cv} 分别为

$$\begin{cases} T_{sv} = T_h + T_p + T_{sift} + \delta + T_{dift} + \delta, \\ T_{cv} = T_h + T_p + T_{sift} + \text{ACK} - \text{timeout} + \delta. \end{cases} \quad (33)$$

由于寄存器空闲的概率 q_v 为

$$q_v = \frac{1 - \rho_v^{s+1}}{1 - \rho_v}, \quad (34)$$

其中, 服务密度 $\rho_v = \lambda_v E[Z]_v$, λ_v 表示当前数据包的到达速率. s 为寄存器能容纳的数据容量. 则端到端时延 T_d 可以表达为

$$T_d = \frac{E[Z]_v}{1 - \rho_v} - \frac{s \cdot \rho_v^s E[Z]_v}{1 - \rho_v^s}. \quad (35)$$

当寄存器溢出或者达到最大重传次数 l_v 时, 将会发生数据丢包情况, 故丢包率 P_{loss} 可描述为

$$P_{\text{loss},d} = 1 - (1 - p_d)(1 - p_{tv}) = 1 - \left(1 - \frac{1 - \rho_v}{1 - \rho_v^{s+1}} \rho_v^s\right) (1 - \rho_v^{l_v+1}). \quad (36)$$

进一步可得每个用户能达到的吞吐量 R_d , 可以表示为

$$R_d = \lambda_v E(P)(1 - P_{\text{loss},d})(1 - \rho_v^{l_v+1}), \quad (37)$$

其中, $E(P)$ 表示发送数据的平均长度.

(2) LTE-A 网络的 QoS 分析

令 LTE-A 网络与 IEEE802.11ad 网络系统带宽一定, 重叠覆盖区域小区的容量为 C . 可以将 LTE-A 网络的服务速率 μ_c 表示为

$$\mu_c = \frac{C}{N \cdot s}. \quad (38)$$

LTE-A 网络存在 n_c 个数据流的概率 $p(n_c)$ 表示为

$$p(n_c) = \rho_c^{n_c} \frac{1 - \rho_c}{1 - (\rho_c)^{N_c+1}}, \quad (39)$$

其中, ρ_c 表示接入 LTE-A 网络的负载因子.

由上述可得, LTE-A 网络中平均的数据流数 $E[N]$ 可以表示为

$$E[N] = \sum_{i=0}^{N_c} i p_i = \sum_{i=0}^{N_c} i \frac{1 - \rho_c}{1 - (\rho_c)^{N_c+1}} (\rho_c)^i = \frac{\rho_c - (N_c + 1)(\rho_c)^{N_c+1} + N_c(\rho_c)^{N_c+2}}{(1 - (\rho_c)^{N_c+1})(1 - \rho_c)}. \quad (40)$$

若 LTE-A 网络中允许接入的最大数据业务流为 N_c , 网络的阻塞概率为 LTE-A 网络中有 N_c 个数据业务时的概率 $B(N_c)$, 即

$$B(N_c) = \rho_c^{N_c} \frac{1 - \rho_c}{1 - (\rho_c)^{N_c+1}}, \quad (41)$$

根据 Little 定理, 可得到 LTE-A 网络的平均时延 T_c 为

$$T_c = \frac{E[N]}{\lambda_c(1 - B(N_c))}. \quad (42)$$

令 l 为到达的数据总长度, 则丢包的概率 $p_{\text{loss},c}$ 可表示为

$$p_{\text{loss},c} = p(l > N_c) = \int_{N_c}^{\infty} \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{1}{\lambda} l} d(l). \quad (43)$$

进一步可得每个用户能达到的吞吐量 R_c , 可以表示为

$$R_c = \lambda_v E(P)(1 - P_{\text{loss},c})(1 - \rho_c^{l_v+1}). \quad (44)$$

(3) LTE-A 与 IEEE802.11ad 融合的异构网络 QoS 分析

假定 θ_c 是业务分流到 LTE-A 网络的概率, θ_w 是业务分流到 IEEE 802.11ad 网络的概率, 且 $\theta_c + \theta_w = 1$, 异构网络系统的平均时延 $E[T]$ 可表示为

$$E[T] = \frac{1}{\lambda} (\lambda_w T_d + \lambda_c T_c), \quad (45)$$

其中, $\lambda_w = \theta_w \lambda$ 和 $\lambda_c = \theta_c \lambda$.

同理可得, 异构网络系统的平均丢包率 $E[P_{\text{loss}}]$ 可表示为

$$E[P_{\text{loss}}] = \frac{1}{\lambda} (\lambda_w P_{\text{loss},d} + \lambda_c P_{\text{loss},c}). \quad (46)$$

异构网络系统的平均吞吐量 $E[R]$ 可表示为

$$E[R] = \frac{1}{\lambda} (\lambda_w R_d + \lambda_c R_c). \quad (47)$$

3.2 基于系统 QoS 的用户 QoE 映射

系统 QoS 与用户 QoE 的映射模型有很多种, 非线性模型是较为常见的一种. 本文采用的是非线性模型作为映射模型, 仅考虑影响语音和视频两种业务一些重要的 QoS 因素, 包括吞吐量、接入时延和丢包率, 使用目前最为广泛的 QoE 量化方法, 即平均意见得分 MOS, 将用户主观 QoE 通过一些客观 QoS^[20] 表示. MOS 评价方法将主观评价分为 5 个等级, 分别将非常糟糕、差、一般、满意、非常满意这 5 个不同等级的用户 QoE 用分数 1~5 表示. 常用的无线接入机制 MOS 近似如下式:

$$\text{MOS} = A \sum_{v=0}^{N-1} \frac{\alpha_v T_v R_v e^{-\gamma T_v}}{\lambda_v (1 + \beta_1 P_{\text{loss},v} + \beta_2 P_{\text{loss},v}^2)}, \quad (48)$$

其中, A 是 MOS 评价机制中的满分 5, $\alpha_0, \alpha_1, \beta_1, \beta_2, \gamma$ 表示客观 QoS 参数的权重系数, 不同的业务用户其权重系数不同.

3.3 3 种不同网络架构基于不同业务的用户 QoE 分析

(1) 将语音业务的用户 QoE 建模成传输速率因子 TRF (transmission rating factor) 的函数, TRF 如下式所示:

$$R_{\text{TRF}} = R_0 - I_s - I_d - I_{e\text{-eff}} + A, \quad (49)$$

其中, 基本传输速率因子表示为 R_0 , 由语音信号压缩标准所对应的不同参数集决定的设备损害系数表示为 $I_{e\text{-eff}}$, 理想值为 0 的分别为补偿系数 A , 以及传输过程中的信号损伤系数 I_s .

表 1 不同语音压缩标准的应用层设定参数以及损伤系数

Table 1 The setting parameters and damage coefficient of application layer of different voice compression standards

| Standard | Bit rate (bps) | Packet length (bit) | Packet interval (ms) | $I_{e\text{-eff}}$ |
|----------|----------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| G.711 | 64 | 1280 | 20 | 0 |
| G.728 | 16 | 480 | 30 | 7 |
| G.729 | 8 | 160 | 20 | 10 |
| G.723.1 | 6.3 | 192 | 30 | 15 |
| G.723.1 | 5.3 | 160 | 30 | 19 |

与用户的听觉体验有关的时延损害系数表示为 I_d , 由于时延是影响语音业务的用户 QoE 主要因素, 可以表示为 T_a 的函数^[21],

$$I_d(T_a) = \begin{cases} 0, & T_a < 100 \text{ ms}, \\ 25 \left\{ (1 + X^6)^{1/6} - 3[1 + (X/3)^6]^{1/6} + 2 \right\}, & 100 \text{ ms} \leq T_a \leq \tau_c + 2T_s, \\ \infty, & T_a < \tau_c + 2T_s, \end{cases} \quad (50)$$

其中, $X = \log 2(T_a/100)$.

最后, 语音业务的用户 QoE 可以表示为

$$f_{\text{QoE-AC-VO}}(R_{\text{TRF}}) = \begin{cases} 1.0, & R_{\text{TRF}} < 0, \\ 1 + 0.035R_{\text{TRF}} + R_{\text{TRF}}(R_{\text{TRF}} - 60)(100 - R_{\text{TRF}}) \times 7 \times 10^{-6}, & 0 \leq R_{\text{TRF}} < 100, \\ 4.5, & R_{\text{TRF}} \geq 100. \end{cases} \quad (51)$$

(2) 视频业务的用户 QoE 受到众多 QoS 指标的影响, 比如数据传输速率、误包率 PER (packet error rate)、吞吐量等. 由于 IEEE802.11ad 的高数据传输速率特性, 本文将视频业务的用户 QoE 建模成吞吐量^[22] 和 PER^[23] 的函数.

令 r 表示数据传输速率, 视频业务的用户 QoE 可以表示为

$$f_{\text{QoE-AC-VI}}(P_{\text{loss}}, r) = a_1 \left\{ \frac{1}{1 + e^{-a_2[r(1-P_{\text{loss}})-a_3]}} + a_4 \right\}, \quad (52)$$

其中 a_1, a_2, a_3, a_4 为视频传输因子, 均固定即 $a_1 = 4.5, a_2 = 0.04, a_3 = 250, a_4 = 0$.

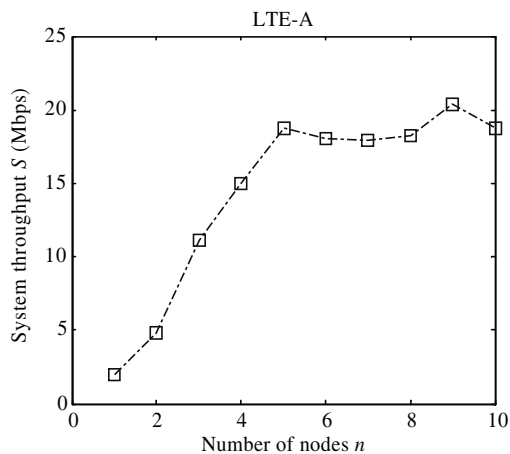
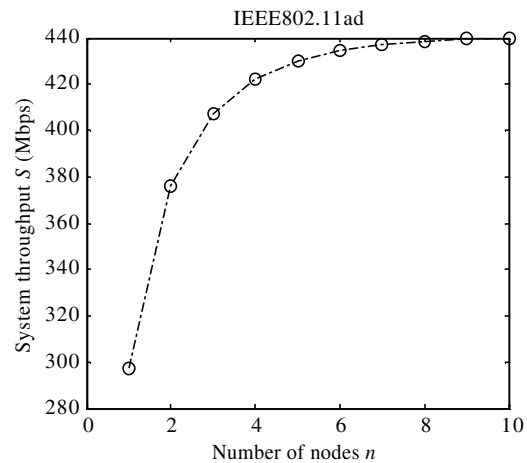
4 仿真结果与分析

为了验证本文提出的适用于异构网络的 3D-Markov 分析模型的准确性, 需要将理论分析结果所得到的系统性能与通过仿真得到的系统性能进行分析对比, 验证 3D-Markov 链分析模型的准确性. 表 1 和 2 是仿真使用的参数, 其他参数按照文献 [24] 中的 IEEE802.11ad 物理层参数以及 IEEE802.11ad 协议进行设置, 参见文献 [25] 对业务分流概率进行设置.

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameters settings

| Parameter | Configuration |
|---------------------------------------|---------------|
| The maximum upload speed | 37.5 Mbps |
| The maximum download speed | 150 Mbps |
| IEEE802.11ad data transmission rate | 3 Gbps |
| LTE-A data transmission rate | 11 Mbps |
| IEEE802.11ad slot interval | 3 μ s |
| LTE-A slot interval | 1 ms |
| The maximum number of retransmissions | 7 |
| The number of access nodes | 10 |
| The maximum packet size | 1024 |
| C | 2 Mbps |
| Slot | 20 μ s |

图 3 LTE-A 场景下的吞吐量
Figure 3 Throughput of LTE-A图 4 IEEE802.11ad 场景下的吞吐量
Figure 4 Throughput of IEEE802.11ad

4.1 系统 QoS 仿真分析

在 3 种不同的场景下, 其吞吐量、接入时延、丢包率分别如图 3~7 的曲线所示. 由虚线的走势可以发现, 本文所提出的 3D-Markov 模型分析方法所预测的用户接入性能, 与实际所关注场景下的真实 QoS 性能几乎是一致的, 验证了 3D-Markov 分析模型的准确性.

图 3~7 中, 横坐标的节点数表示业务用户负载程度. 吞吐量特性由图 3~5 所示. 首先, 当业务用户负载较低时, 系统处于非饱和状态, 在非饱和状态下, 信道有足够的带宽承载各类业务流, 因而网络吞吐量随着负载的增加而线性增加; 其次, 随着网络负载的增大, 随机接入过程逐渐开始产生碰撞并进行信道争夺, 此时出现拐点, 且拐点后呈现平顶趋势; 最后, 由于 IEEE802.11ad 的高传输速率特性, 使 3 种网络环境中, IEEE802.11ad 以及融合有 IEEE802.11ad 的异构网络环境更有利于提升网络吞吐量的 QoS 性能; 而 LTE-A 采用的是基站进行统一式的集中控制管理, 虽然能保证所有的接入业务的

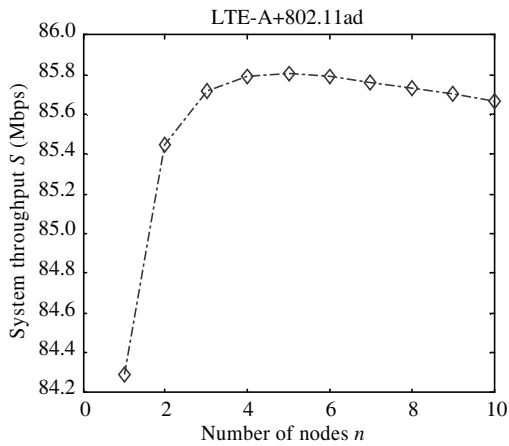


图 5 异构网络场景下的吞吐量

Figure 5 Throughput of heterogeneous network

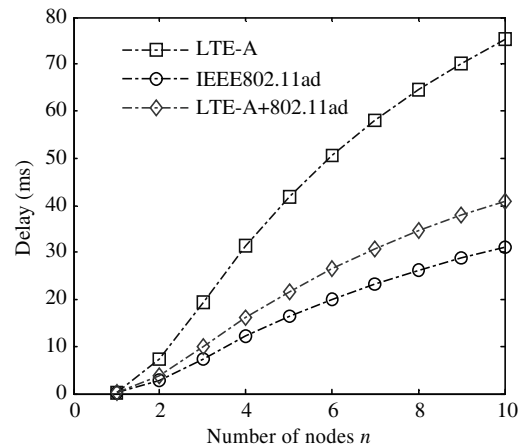


图 6 MAC 时延对比图

Figure 6 MAC delay comparison

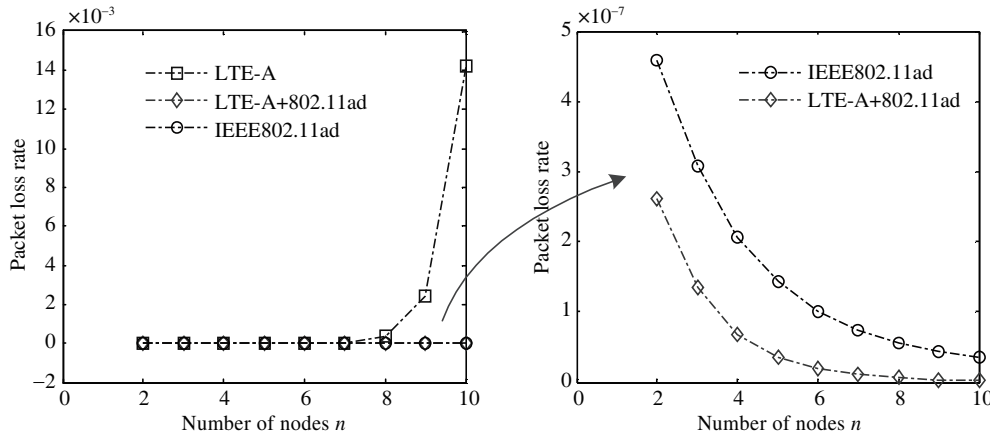


图 7 丢包率对比图

Figure 7 Packet loss rate comparison

QoS 要求,但同时却无法保证在不同竞争区间内均能够最优地利用信道,因而 LTE-A 获得的吞吐量性能最低.

对于传输时延,IEEE802.11ad 的传输时延明显很小,如图 6 所示.首先,随着业务负载的不断增长,当网络进入饱和状态时,业务的传输已经无法得到 QoS 保证,节点队列中待发送的数据不断被堆积,使得传输延迟呈不断增长的趋势;然后,对于异构网络,平均时延由最大服务速率的网络决定,其中主要受可提供较大速率的 IEEE802.ad 网络决定. IEEE802.11ad 控制机制中,通过增加竞争窗口的大小,节点之间碰撞发生的概率大大减小,信道的利用率高,使得系统性能得到很大改善;并且,由于采用的是竞争机制,随着最大接入的数据流数的增加,需要更多的冲突分解,故而异构网络和 IEEE802.11ad 的时延增长率比 LTE-A 的低.而 LTE-A 在均享服务原则下,越少的数据流进入网络,每一个数据流可利用带宽越大,数据流的平均时延就越小.

图 7 描述了丢包率特性.首先,由于 LTE-A 特殊的传输机制,实际丢包为碰撞和拥塞丢包,则系

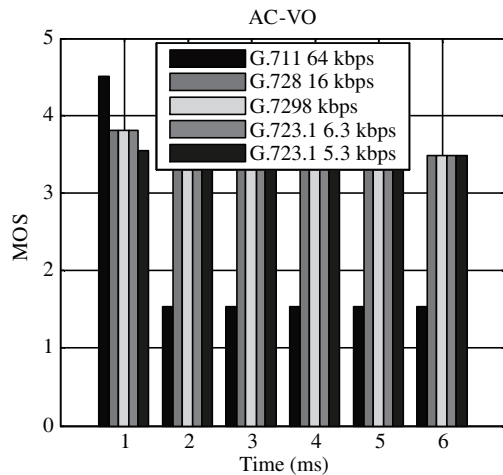


图 8 语音业务的 MOS 指标

Figure 8 The MOS index of voice service

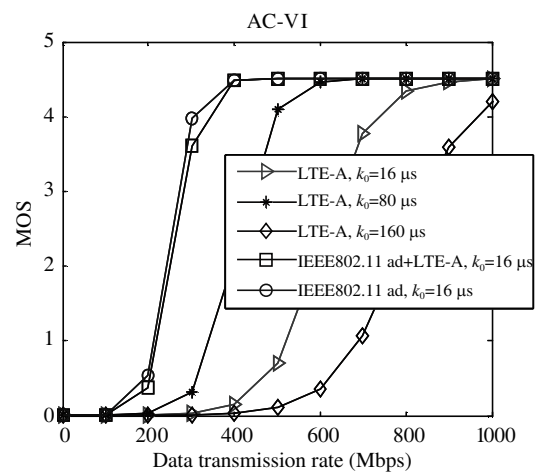


图 9 视频业务的 MOS 指标

Figure 9 The MOS index of video service

统在非饱和阶段, 数据传输的信道丢包率增长非常缓慢, 当 LTE-A 网络负载较重, 系统接近饱和时, 丢包率会产生急剧增大现象, 所以, 为了获得较好的系统性能, 需要将系统控制在邻近饱和的状态, 避免系统进入饱和状态导致性能降低; 然后, IEEE802.11ad 网络可以根据竞争机制, 动态选择竞争窗口的大小, 避开了大量的拥塞和丢包, 所以 IEEE802.11ad 与异构网络的丢包率呈现下降趋势。

由吞吐量、时延和丢包率 3 个指标可以看出, IEEE 802.11ad 网络可以带来巨大 QoS 性能提升. 异构网络与其他两个网络相比, 可以获得最小的平均时延, 但是在吞吐量和丢包率上面, 没有获得比 IEEE 802.11ad 更好的增益. 因此, 可以根据不同的场景和业务 QoS 的要求, 通过动态调整竞争窗的大小, 在业务用户的平均时延和丢包率之间取得良好的折中。

4.2 用户 QoE 仿真分析

本文只考虑语音和视频两种业务流接入等级, 分别用 AC-VI 和 AV-VO 表示承载语音和视频业务的用户, 在实际无线通信网络中, 根据可测的客观 QoS 性能指标, 预测用户的体验指标, 并与真实用户体验打分相对比, 以验证模型的准确性和可信性。

图 8 是异构网络环境下在不同的语音压缩标准下用户 QoE 随着时延的变化图. 从图中可以看出, 首先, 当信道质量较好, 端到端时延较小时, 由于压缩率越低, 质量损伤越小, 故压缩率较低, 发送速率较高的压缩标准能够令用户获得良好的 QoE; 然后, 当信道质量较差, 时延较大时, 由于无线信道能够承载的数据传输速率低于对应压缩标准的数据包传输速率, 造成 VoIP (voice over Internet protocol) 业务无法传输, 故 MOS 值突变为最低. 另外, 压缩率越高的 VoIP 业务要求的数据传输速率低, 则其能够忍受的时延越大, 因此在较高失真情况下仍能维持数据传输, 保证业务顺利完成. 综上所述, 对于语音业务的压缩标准采用 G.711 标准较好。

由图 9 所示, 视频业务用户 QoE 随数据传输速率的变化曲线呈现出接近“S”的趋势. 首先, 当网络的数据传输速率仅能支持较低发送比特速率的视频时, 其清晰度和流畅性完全不能满足用户需求, 所以 MOS 分数最小; 其次, 当网络支持的数据传输速率进一步增大时, MOS 值存在较快速增长, 直到已经基本达到用户的期望时, MOS 值会逐渐到达平顶阶段, 即使给该业务分配更多的资源, 用户

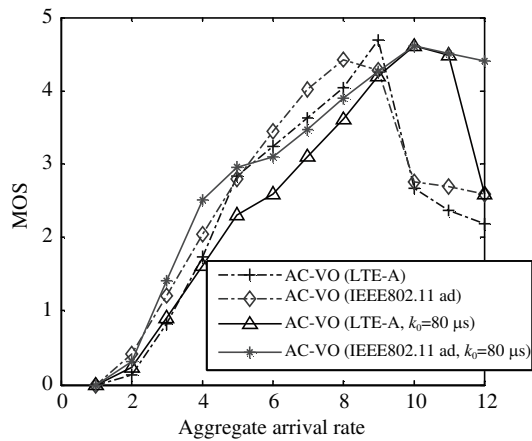


图 10 不同环境的 QoE 性能对比

Figure 10 Comparison of QoE performance in different environments

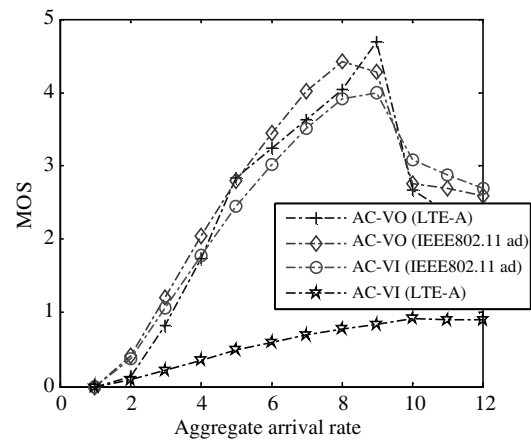


图 11 不同业务不同环境的 QoE 性能对比

Figure 11 Comparison of QoE performance under different services and environments

QoE 对数据速率的增加也不再敏感, 难以获得更大的 QoE 性能提升; 最后, 由于 IEEE802.11ad 与 LTE-A 占用不同的频段, 不同频段的物理层特性差别很大, IEEE802.11ad 超高帧率能够提升视频质量, 而 LTE-A 的统一集中式管理, 所有的节点都要根据基站控制接入信道, 所以 IEEE802.11ad 环境以及异构环境下, MOS 值提前可以达到平顶状态, 提升了 QoE, LTE-A 网络环境则相对较慢达到平稳。

图 10 和 11 给出了语音业务 (AC-VO)、视频业务 (AC-VI) QoE 性能图。首先, 在轻负载时, 相比于 LTE-A 网络, 用户业务 MOS 值在 IEEE802.11ad 网络中大, 二者相差却不大。这是因为 IEEE802.11ad 网络的随机竞争机制, 随着业务到达率的增加, 冲突分解产生开销也随着增大, 所以在轻负载时, 一般选择 LTE-A 网络进行对语音业务的传输; 然后, 随着业务到达率的增加, LTE-A 网络在重负载的情况下, 平均时延快速增加, 而 IEEE802.11ad 网络可以提供更高的速率, 基于这些影响用户 MOS 值的指标的变化, 在重负载时, 选择 IEEE802.11ad 网络进行对视频业务的传输, 使得系统可以获得更小的平均时延, 进而将各个无线网络分别工作在最佳的状态, 改善异构无线网络系统的性能, 避免单个网络过载。

5 结束语

本文围绕用户 QoE 分析方法, 通过引入接入竞争时间窗口函数, 采用 3D-Markov 模型分析接入退避行为, 针对融合 IEEE802.11ad 的 LTE-A 异构网络, 在分析包括时延、吞吐量、丢包率 3 个指标的系统 QoS 基础上, 结合系统 QoS 与用户 QoE 的 MOS 映射模型, 重点对用户的语音和视频业务 QoE 进行分析研究。经过仿真实验结果与理论结果的对比表明: 新的模型能很好地分析用户 QoS 性能, 且在系统带宽一定情形下, 融合 IEEE802.11ad 的 LTE-A 异构网络可以提高包括吞吐量、时延、丢包率等指标的系统 QoS 和包括 MOS 的用户 QoE。

参考文献

- 1 You X H, Pan Z W, Gao X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques. *Sci Sin Inform*, 2014, 44: 551–563 [尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术.

- 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 551–563]
- 2 Scott-Hayward S, Garcia-Palacios E. Multimedia resource allocation in mmwave 5G networks. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 240–247
 - 3 Liotou E, Elshaer H, Schatz R, et al. Shaping QoE in the 5G ecosystem. In: *Proceedings of the 7th International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, Pylos-Nestoras, 2015. 1–6
 - 4 Aziz A, Rizvi S, Saad N M, et al. An overview of integrated architectures solutions in wireless heterogeneous networks. In: *Proceedings of IEEE National Postgraduate Conference (NPC)*, Kuala Lumpur, 2011. 1–4
 - 5 Khatibi S, Correia L M. Modelling of virtual radio resource management for cellular heterogeneous access networks. In: *Proceedings of IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Washington, 2014. 1152–1156
 - 6 Pei X B, Jiang T, Qu D M, et al. Radio-Resource management and access-control mechanism based on a novel economic model in heterogeneous wireless networks. *IEEE Trans Veh Tech*, 2010, 59: 3047–3056
 - 7 Dhillon H S, Ganti R K, Baccelli F, et al. Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2012, 30: 550–560
 - 8 Lin C, Hu J, Kong X Z. Model and evaluation method of QoE. *Chinese J Comput*, 2012, 35: 1–15 [林闯, 胡杰, 孔祥震. 用户体验质量 (QoE) 的模型与评价方法综述. *计算机学报*, 2012, 35: 1–15]
 - 9 Nitsche T, Cordeiro, Flores A B, et al. IEEE 802.11ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 132–141
 - 10 Zhang X, Cheng W C, Zhang H L. Heterogeneous statistical QoS provisioning over 5G mobile wireless networks. *IEEE Netw*, 2014, 28: 46–53
 - 11 Galiotto C, Marchetti N, Doyle L. Flexible spectrum sharing and interference coordination for low power nodes in heterogeneous networks. In: *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Quebec City, 2012. 1–5
 - 12 Charfi E, Charri L, Kamoun L. PHY/MAC enhancements and QoS mechanisms for very high throughput WLANs: a survey. *IEEE Commun Surv Tut*, 2013, 15: 1714–1735
 - 13 Bacci G, Belmega E, Mertikopoulos P, et al. Energy-aware competitive power allocation in heterogeneous networks with QoS constraints. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2015, 14: 4728–4742
 - 14 Alshanyour A, Agarwal A. Three-dimensional Markov chain model for performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. In: *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Honolulu, 2009. 1–7
 - 15 Malone D, Duffy K, Leith D. Modeling the 802.11 distributed coordination function in nonsaturated heterogeneous conditions. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2007, 15: 159–172
 - 16 Wang R P, Zhang J, Zou X Y. Performance analysis and optimization of IEEE 802.11 DCF with constant contention window. In: *Proceedings of IEEE ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management (CCCM'08)*, Guangzhou, 2008. 407–411
 - 17 Lee J, Lee H, Yi Y, et al. Making 802.11 DCF near-optimal: design, implementation, and evaluation. In: *Proceedings of the 10th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, New Orleans, 2015. 86–94
 - 18 Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2000, 18: 533–547
 - 19 Chatzimisios P, Boucouvalas A C, Vitsas V. Packet delay analysis of IEEE802.11 MAC protocol. *Electron Lett*, 2003, 39: 1358–1359
 - 20 Sun X H, Piamrat K, Viho C. QoE-based dynamic resource allocation for multimedia traffic in IEEE 802.11 wireless networks. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, Barcelona, 2011. 1–6
 - 21 Wu H R, Ferguson T, Qiu B. Digital video quality evaluation using quantitative quality metrics. In: *Proceedings of IEEE 4th International Conference on Signal Processing Proceedings (ICSP'98)*, Beijing, 1998. 1013–1016
 - 22 Santos M A, Villalon J, Orozco-Barbosa L. A novel QoE-aware multicast mechanism for video communications over IEEE 802.11 WLANs. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2012, 30: 1205–1214
 - 23 Khan A, Sun L F, Ifeachor E, et al. Video quality prediction model for H.264 video over UMTS networks and their application in mobile video streaming. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Cape

- Town, 2010. 1–5
- 24 Sheng L Z, Lei W, Wei H F, et al. Performance analysis and enhancement for priority based IEEE 802.11 network. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Istanbul, 2006. 4768–4773
- 25 Zheng J. Study on resource management in heterogeneous wireless networks. Dissertation for Ph.D. Degree. Xi'an: Xidian University, 2014 [郑杰. 异构无线网络中资源管理研究. 博士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2014]

QoE analysis method for heterogeneous network user based on 3D-Markov chain

Zufan ZHANG^{1,2} & Yu ZHANG^{1*}

1 *School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

2 *Chongqing Key Labs of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*

*E-mail: 493619526@qq.com

Abstract To address the problem of user access QoE (quality of experience) in LTE-A heterogeneous networks integrating IEEE802.11ad, this paper constructs a 3D-Markov chain model that can be applied to the user's access backoff behavior in a heterogeneous network by introducing the time function of an access contention window. The proposed model takes the users' QoE of different types of service into consideration, analyzes the system QoS (quality of service), adopts a typical evaluation method MOS (mean opinion score), and maps the performance indexes of QoE. The simulation results show that the LTE-A heterogeneous network integrating IEEE802.11ad can improve the system QoS including throughput, time delay, packet-dropping rates, and the QoE of user who contains MOS under the circumstance of certain system bandwidth.

Keywords heterogeneous network, access control, quality of service, quality of experience, 3D-Markov chain



Zufan ZHANG received his M.S. in electromagnetic field and microwave technology from Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, China, and his Ph.D. in communication and information systems from the University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China, in 1997 and 2007, respectively. He is currently a professor in the school of communications and information engineering at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His major research interests focus on wireless and mobile communication networks, radio resource management, and network coding.



Yu ZHANG received her B.S. from the college of mobile telecommunications at Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2013. She is currently an M.S. candidate at Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her research interest concerns wireless and mobile communication networks.