

基于跨层网络演算模型的无线网络移动性能分析

喻莉 姜烈* 罗晶晶 张婕
(华中科技大学(武汉光电国家实验室) 武汉 430074)

摘要: 为了研究终端移动对无线网络服务质量(QoS)的影响, 该文建立了跨层网络演算模型来计算通信终端处于不同移动速度下无线网络的延时积压性能参数。该模型的建立结合了跨层分析思想和网络演算理论, 将无线网络中网络层、链路层及物理层等层次的特性映射为一系列网络演算模块的串联。基于构造的模型应用网络演算能够方便地推导出终端处于不同移动速度下无线网络的服务曲线, 进而计算出网络的延时积压性能。仿真结果表明, 构造的跨层网络演算模型可以准确地分析终端在不同移动速度下无线网络的延时积压性能。

关键词: 无线网络; 移动性能; 网络演算; 服务质量; 跨层

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0057-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00383

Mobility Analysis in Wireless Networks Based on a Cross-layer Network Calculus Model

Yu Li Jiang Lie Luo Jing-jing Zhang Jie

(Huazhong University of Science & Technology (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics), Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the effect of terminal moving on QoS in wireless networks, a cross-layer network calculus model is established to calculate the delay and backlog performance parameters when communication terminals are under different moving speeds. This model combines the idea of cross-layer analysis and network calculus theory, which mapping the different characteristic of network layer, link layer and physical layer into a series of network calculus components. Based on the cross-layer network calculus model, the corresponding service curve can be derived conveniently when moving terminals are under different moving speeds using network calculus theory, in addition, the backlog and delay performance parameters can be calculated. Simulation results veried that the established cross-layer network calculus model can analysis the backlog and delay performance in wireless networks under different terminal moving speeds.

Key words: Wireless networks; Mobility performance; Network calculus; QoS; Cross-layer

1 引言

随着高速交通工具的普及, 无线网络中通信终端移动速度不断增加, 严重影响了网络的服务能力, 给在无线网络中提供 QoS 保障带来了挑战。同时, 无线网络中实时语音视频等多媒体业务不断出现, 网络业务对传输时延、数据积压等性能指标的要求越来越高。准确分析终端移动时无线网络的延时积压性能可以更好地为各种网络业务提供 QoS 保障, 因此受到越来越多研究人员的关注。

网络演算^[1-3]是基于最小加代数的一种新的网络性能分析理论, 网络演算的主要工具是到达曲线和服务曲线, 到达曲线限制了数据流的进入进程,

服务曲线表示了网络对数据流的服务能力。与传统的统计理论相比, 其优点在于通过到达曲线和服务曲线能直观地分析网络的延时积压性能。网络演算在理论上的创新以及在网络中的应用都得到了长足的发展并期待进一步完善。

近年来, 已有一些研究应用网络演算来分析无线网络性能, 文献[4]中基于网络演算分析了单用户无线网络中, 链路层对多媒体业务 QoS 的影响, 文献[5]把该分析框架扩展到了多用户无线网络场景。文献[6]在分析无线信道时变和衰落特性的基础上推导出了相应的服务曲线, 文献[7]建模和分析了 Rayleigh 衰落信道的特性, 并得到了网络延时和积压性能的概率分布。然而这些研究都只考虑了网络单一层的特性, 为了准确分析网络性能, 需采用跨层分析思想, 从单一层的建模扩展到联合多层的跨层建模。文献[8]中采用跨层设计思想来为无线网络

2011-04-20 收到, 2011-09-08 改回

国家自然科学基金(60972016), 湖北省杰出青年基金(2009CDA150)和新世纪优秀人才支持计划(070339)资助课题

*通信作者: 姜烈 jianglie.hust.gsk@gmail.com

中不同类型的数据流提供 QoS 保障, 文献[9]中设计了一种跨层框架有效地解决了无线网络中的多播发送问题, 文献[10]中构造了一种无线传感器网络的跨层分析框架, 推导出了无线传感器网络端到端延时准确的概率分布, 这些研究都表明了跨层分析思想在网络性能分析时的有效性。同时, 文献[4-7]在分析无线网络性能时都假设通信终端是静止的, 随着终端移动速度不断增加, 终端移动对网络性能的影响将越来越大。因此, 如何引入跨层思想, 并应用网络演算来准确求解终端处于不同移动速度下无线网络的延时积压性能是本文关注的重点。

本文创新地提出将跨层思想和网络演算相结合来分析终端移动对无线网络延时积压性能的影响, 首先对无线网络进行跨层分析, 再将无线网络各层的特性映射为一系列网络演算模块的串联, 从而构造了面向无线网络的跨层网络演算模型, 最后基于该模型推导了终端处于不同移动速度下网络的服务曲线, 进而计算出网络的延时积压性能。本文在第2节介绍网络演算; 第3节介绍跨层框架及用有限状态马尔科夫链(FSMC)定量分析该跨层框架; 第4节在第3节的基础上构造了无线网络的跨层网络演算模型, 推导了网络的服务曲线和延时积压性能; 第5节给出仿真结果分析; 第6节是本文的总结。

2 网络演算基础

下面简要介绍本文在分析无线网络 QoS 时所应用到的网络演算基本定义和定理。

定义 1 (到达曲线)^[11] 给定广义递增函数 α , 对任意时间 $0 \leq t \leq s$, 若输入流量 A 满足 $A(t) - A(s) \leq \alpha(t - s)$, 则称 α 为数据流 A 的到达曲线。

定义 2 (服务曲线)^[12] 网络的服务曲线是网络提供的服务在时间上的累积 $\beta(t) = \int_0^t C(t)dt$, 其中 $C(t)$ 为 t 时刻网络的服务速率。

定理 1 (积压边界)^[11] 数据流 A 的到达曲线为 α , 服务曲线为 β , 任意 t 时刻网络的积压 $B(t)$ 为 α 和 β 之间的最大垂直距离(如图 1 所示), 表示为

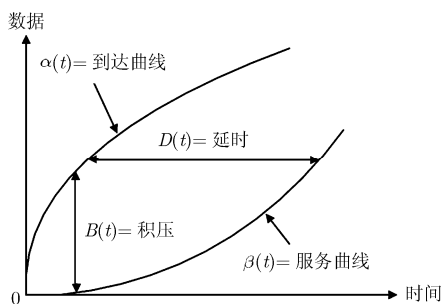


图 1 到达曲线和服务曲线

$$B(t) = \sup_{s \geq 0} \{\alpha(s) - \beta(s)\} \quad (1)$$

定理 2 (延时边界)^[11] 数据流 A 的到达曲线为 α , 服务曲线是 β , 任意 t 时刻网络的延时 $D(t)$ 为 α 和 β 之间的最大水平距离(如图 1 所示), 表示为

$$D(t) = \sup_{t \geq 0} \{\inf\{d \geq 0, \alpha(t) \leq \beta(t+d)\}\} \quad (2)$$

定理 3 (网络服务曲线)^[11] 数据流依次穿过 N 个串联系统, 每个系统提供的服务曲线为 β_n , $n = 1, \dots, N$ 。这一系列节点串联提供的服务曲线称为网络服务曲线, 即

$$\beta_{\text{net}} = \beta_1 \otimes \beta_2 \otimes \dots \otimes \beta_N \quad (3)$$

其中 \otimes 代表最小加卷积运算。

3 无线网络跨层性能分析

3.1 跨层分析框架

图 2 为本文无线网络中数据流端到端传输的跨层分析框架, 其中联合分析网络层、链路层和物理层的特性对数据流端到端传输过程的影响。

本框架采用两种误差更正策略, 即链路层的停止等待 ARQ (SW-ARQ) 协议和物理层的前向纠错编码(FEC)。

在发送端, 数据流首先在网络层进行漏桶整形, 接着数据流依次进行循环冗余编码(CRC)和 FEC^[13]。CRC 和 FEC 都是数据通信中常用的差错编码方式, 其中, CRC 仅具有差错检测功能, 不能更正错误, FEC 不但能发现差错, 而且能根据编码参数的设定具有一定的差错更正功能。本文中设定, CRC 有 100% 的检错能力, 而 FEC 只有部分的纠错能力。编码数据包调制后通过无线信道传输。由于无线信道的时变特性, 数据流在端到端传输过程中会产生误差和丢包, 同时触发 FEC 和 ARQ 对误差数据包进行更正或重传。为了防止信道状况差时数据包无限制地重传, 本文采用具有重传上限的 SW-ARQ 协议。假设反馈信道是理想的, ACK/NAK 传输过程中无误差和延时。

3.2 无线网络的有限状态马尔科夫链(FSMC)模型

3.1 节定性分析了网络各层对数据流端到端传输过程中的影响, 本小节构造一个 FSMC 模型来定量分析图 2 中的跨层框架。该 FSMC 模型重点考虑了终端移动的影响, 通过不同终端移动速度下的 FSMC 参数来表征终端移动速度对无线网络时变服务能力的影响。

文献[14]中得到了一种无线网络的 FSMC 建模, 然而该模型只分析了无线信道的衰落特性且较复杂。本文在其基础上设计一个表征图 2 跨层框架特

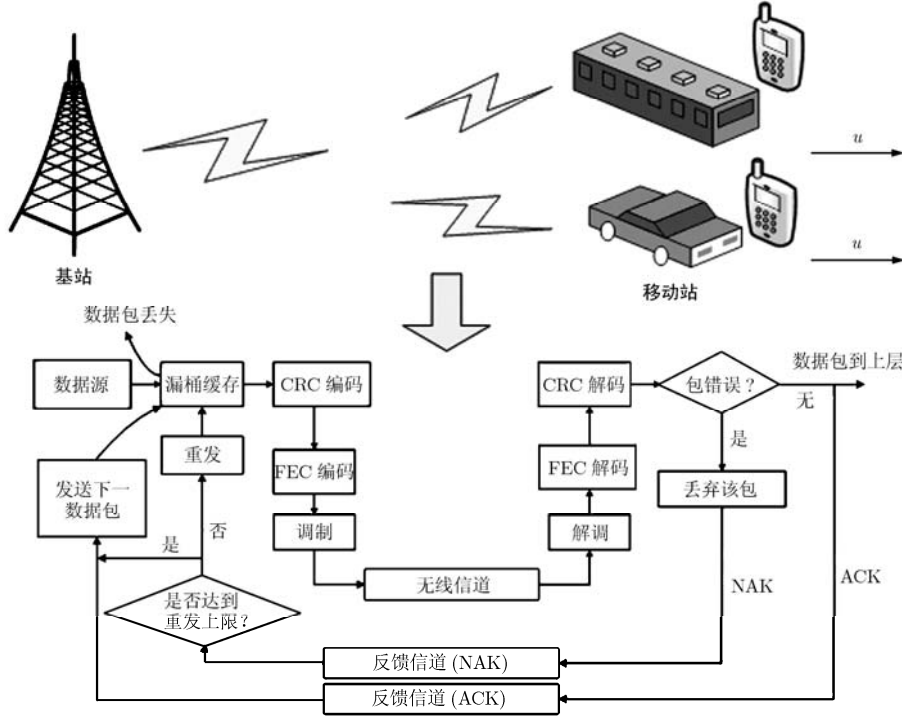


图 2 跨层分析框架

性且复杂度较低的 FSMC 模型。

设无线信道服从 Rayleigh 衰落，平均信噪比 (SNR) 为 ρ ，则信噪比 r 服从均值为 ρ 的指数分布。

无线网络的时变特性主要受终端移动带来的 Doppler 频移的影响，因此终端移动速度不同，网络的服务能力也不同，设 $f_m = uf/c$ 为终端移动速度为 u 时的最大 Doppler 频移。

在终端处于固定移动速度 u 时，将 SNR 划分成 $[\Gamma_0, \Gamma_1) \cdots [\Gamma_{k-1}, \Gamma_k) \cdots [\Gamma_N, \Gamma_{N+1})$ ，其中 $\Gamma_0 = 0, \Gamma_{N+1} = \infty$ 。若 $\text{SNR} \in [\Gamma_{k-1}, \Gamma_k)$ ，代表无线网络处于状态 $S_k, k = 1, \dots, N + 1$ 。

电平通过率 (LCR)^[14] 是描述无线信道衰落速率的统计量，表示为

$$N(\Gamma_k) = \sqrt{\frac{2\pi\Gamma_k}{\rho}} f_m \exp\left(-\frac{\Gamma_k}{\rho}\right) \quad (4)$$

状态 S_k 的平均持续时间 τ_k 为

$$\tau_k = \frac{\pi_k}{N(\Gamma_{k-1}) + N(\Gamma_k)} \quad (5)$$

其中 $\pi_k = \int_{\Gamma_{k-1}}^{\Gamma_k} p(r)dr$ 为状态 S_k 的稳态概率。为简化分析，令

$$\tau_k = MT_p \quad (6)$$

式中 T_p 是编码数据包的发送时间周期^[14]， M 为正整数 (M 一般取 $3 \sim 8$ ^[14])。

联合式(4)-式(6)得

$$M = \frac{\exp\left(-\frac{\Gamma_{k-1}}{\rho}\right) - \exp\left(-\frac{\Gamma_k}{\rho}\right)}{\sqrt{\frac{2\pi\Gamma_{k-1}}{\rho}} \exp\left(-\frac{\Gamma_{k-1}}{\rho}\right) + \sqrt{\frac{2\pi\Gamma_k}{\rho}} \exp\left(-\frac{\Gamma_k}{\rho}\right)} \cdot \frac{1}{f_m T_p}, \quad k = 1, \dots, N + 1 \quad (7)$$

在式(7)中，令 $k=1$ ， M 取定值，在终端移动速度、编码参数等系统参数给定时，可以计算出 Γ_1 ，再令式(7)中 $k=2, 3, \dots$ ，依次迭代可得一系列门限值 Γ_k 。

接下来分析迭代过程结束的条件，即确定门限值 Γ_N 和状态数目。文献[14]中，令状态 S_{N+1} 的稳态概率 π_{N+1} 较小 (10^{-3}) 来计算 Γ_N 。然而，分析表明 SNR 在远小于该方法求出的 Γ_N 时数据包的误包率 (PER) 就为 0 了，产生了很多 PER 相同的状态。基于该方法的不足，本文直接通过 PER 来选取 Γ_N 。

FEC 编码时数据包的误包率 (PER) 为

$$\text{PER} = \sum_{j=\tau+1}^n \binom{n}{j} (P_e(r))^j (1 - P_e(r))^{n-j} \quad (8)$$

式中 n 为编码数据包的比特数， τ 表示数据包中可更正的比特数， $P_e(r)$ 为误比特率。

计算出 PER 近似为 0 (误差为 10^{-10}) 时的 SNR 值，设为 r_{efree} 。当迭代计算出的门限值最接近 r_{efree} 时 (即 $|\Gamma_k - r_{\text{efree}}|$ 最小) 代表迭代过程结束，令该门限值为 Γ_N ，即确定了 FSMC 的门限值序列 $\{\Gamma_k\}_{k=0}^{N+1}$ 。

通过第5节的数值分析可知,在参数设置相同的情况下本文方法得到的FSMC的状态数目明显小于文献[14]中模型的状态数目,降低了模型的复杂度。

状态 S_k 的平均BER表示为

$$P_k^{\text{av}} = \frac{\int_{\Gamma_{k-1}}^{\Gamma_k} P_e(r)p(r)dr}{\pi_k}, k = 1, \dots, N+1 \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)即可得每个状态的PER,令 p_k 代表状态 S_k 的PER。

设SW-ARQ协议的重传上限为 K , re 为重传次数,状态 S_k 数据包平均传输次数为 TR_k 。

$$\begin{aligned} TR_k &= 1 + P\{re = 1\} + 2P\{re = 2\} + \dots \\ &\quad + KP\{re = K\} = 1 + p_k(1 - p_k) \\ &\quad + 2p_k^2(1 - p_k) + \dots + K(1 - (1 - p_k)^K) \\ &= \frac{1 - p_k^{K+1}}{1 - p_k} \end{aligned} \quad (10)$$

忽略各层协议头信息,则FSMC中状态 S_k 的服务速率为

$$C_k = \mu \frac{m}{n} \frac{1}{TR_k} = \mu \frac{m}{n} \frac{1 - p_k}{1 - p_k^{K+1}}, k = 1, \dots, N+1 \quad (11)$$

μ 为信道无损服务速率, m/n 为FEC的编码效率。

该FSMC的建立考虑了跨层框架中链路层和物理层等层次的特性。FSMC的状态数目、状态的服务速率和稳态概率可以根据不同的终端移动速度 u 动态确定,并且复杂度较低,因此可以用来准确地分析终端移动对无线网络的服务能力的影响。

4 跨层网络演算模型及性能分析

4.1 跨层网络演算模型

在第3节中联合分析了整形、网络时变特性、调制和ARQ-FEC检纠错机制对终端移动的无线网络服务能力的影响。本小节中,基于网络演算将图2中抽象的跨层分析框架映射为一系列网络演算模块的串联,构造了图3所示的跨层网络演算模型。

漏桶整形:输入数据流需要经过整形来服从一定的到达曲线。

包损失:无线网络中,整形过程、有限的信道容量以及端到端传输中不可更正的数据包都会造成数据包损失,数据包损失发生在无线网络的各个层次。本文中用包损失模块来表征无线网络各层的丢包特性。

时变服务器:无线网络的时变服务能力随着终端移动速度的变化而变化,3.2节中已经建立了FSMC模型来定量分析不同终端移动速度下无线网络的时变服务能力。数据流在传输过程中将经历一个FSMC状态转移序列,如图3。时变服务器模块基于之前建立的FSMC模型,反映不同终端移动速度下无线网络的时变服务能力,包损失模块代表数据包损失。

时变服务器模块是本模型的关键部分,它表征了无线网络的时变特性,联合考虑了链路层和物理层的ARQ-FEC框架、调制以及无线信道特性对网络服务能力的影响。

固定延时:延时可以分解为固定延时和可变延时。可变延时是由整形、网络的时变特性及检纠错等引起的,之前的模块中已经包含了可变延时。这一部分表征传播和发送等固定延时。

本节中构造的跨层网络演算模型,打破了严格的网络层次框架,把网络中各层的性能建模为图3中一系列网络演算模块的串联,基于该模型,可以推导出无线网络的服务曲线,进而计算延时积压等性能参数。

4.2 延时积压性能分析

基于构造的跨层网络演算模型,先分别计算出每个网络演算模块的服务曲线,再根据定理3计算出无线网络的服务曲线。

假设数据流在发送时间 $[0, t]$ 内经历了 $F+1$ 个状态变化,数据流经历的状态变化序列可对应为一个时间序列,每个时间间隔对应FSMC中的一个状态,设第 j 个时间间隔为 $[\tau_{j-1}, \tau_j]$,其中 $\tau_0 = 0$,则 $F =$

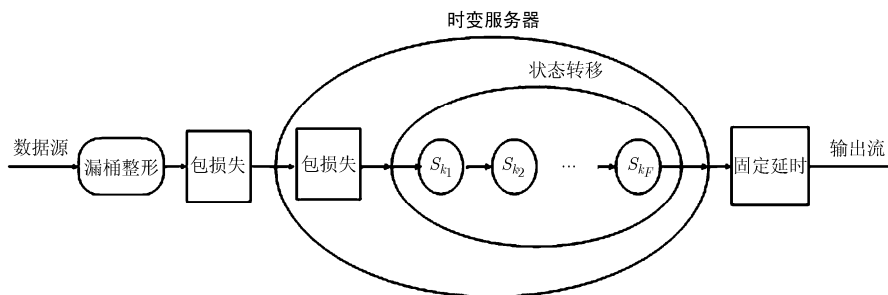


图3 无线网络的跨层网络演算模型

$$\begin{aligned}
& (\max(j) | \tau_j \leq t), \text{ 可得服务器模块服务曲线为} \\
\beta_{\text{server}}(t) &= \int_{\tau_0}^{\tau_1} C_{k_1}(t) dt + \dots + \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} C_{k_j}(t) dt + \dots \\
& + \int_{\tau_{F-1}}^{\tau_F} C_{k_F}(t) dt + \int_{\tau_F}^t C_{k_{F+1}}(t) dt \\
&= \sum_{j=1}^F \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} \mu \frac{m}{n} \frac{1-p_{k_j}}{1-p_{k_j}^{K+1}} \\
& + \int_{\tau_F}^t \mu \frac{m}{n} \frac{1-p_{k_{F+1}}}{1-p_{k_{F+1}}^{K+1}}, k_j \in \{1, \dots, N+1\} \quad (12)
\end{aligned}$$

设漏桶模块的服务曲线为 $\beta_{\text{shap}}(t)$, 固定延时模块的服务曲线为 $\beta_{\text{delay}}(t)$, 则无线网络的网络服务曲线为

$$\beta_{\text{net}}(t) = \beta_{\text{shap}}(t) \otimes \beta_{\text{server}}(t) \otimes \beta_{\text{delay}}(t) \quad (13)$$

设数据流的到达曲线为 $\alpha(t)$, 结合定理 1, 定理 2 得无线网络的延时 $D(t)$ 和积压 $B(t)$ 为

$$D(t) = \sup_{t \geq 0} \{ \inf_{d \geq 0} \{ \alpha(t) \leq \beta_{\text{net}}(t+d) \} \} \quad (14)$$

$$B(t) = \sup_{s \geq 0} \{ \alpha(s) - \beta_{\text{net}}(s) \} \quad (15)$$

5 数值结果分析

本节首先计算出终端处于不同移动速度下的 FSMC 模型参数。然后基于跨层网络演算模型得出不同终端移动速度下无线网络的服务曲线, 进一步计算出无线网络的延时积压性能, 并分析终端移动对延时积压性能的影响。

5.1 FSMC 模型分析

采用里所(RS)编码, 编码参数为(424, 414, 5)(单位 bit), 采用 DBPSK 调制, 即 $P_e(r) = e^{-r/2}$, 3 种终端移动速度分别为 $u=36$ km/h, 72 km/h 和 108 km/h, 信道平均 SNR $\rho=4$, 为了保证传输的实时性, 选取重传上限 K 为一较小值, 本文中设 $K=2$, 载波信号频率 $f=950$ MHz。令 $M=3$, 采用归一化的服务速率, 即 $\mu=1$ 。

根据 3.2 节中的改进算法, 在给定参数的情况下计算出 3 种终端移动速度时 FSMC 的状态数目、状态的服务速率和稳态概率, 如表 1 所示。对比文献[14]中的方法, 在参数设置相同的情况下, FSMC

的状态数目由 10 个以上减少到了本文中的 4~5 个, 在不影响准确度的前提下合并了大量冗余状态, 降低了分析的复杂度。

分析表 1 中终端在不同移动速度下 FSMC 的状态数目和相应状态的服务速率和稳态概率可知, 无线网络的服务能力随终端移动速度的变化而变化。

5.2 延时积压性能分析

以编码数据包为基本数据单位, 数据包发送时间周期 T_p 为基本时间单位。采用经典的 VBR 到达曲线^[4,11]来表征简单的实际数据流, 即假设数据流符合 VBR 到达曲线 $y(t)=\min(0.8t+1; 0.4t+3)$ (该到达曲线符合上述基本单位)。不考虑漏桶整形的数据损失, 即漏桶模块的服务曲线 $\beta_{\text{shap}}(t) = \delta(0)$; 设固定延时为 $5T_p$, 服务曲线为 $\beta_{\text{delay}}(t) = \delta(5T_p)$ 。

在一定 FSMC 状态转移顺序下, 根据表 1 中的服务速率可得服务器模块的服务曲线 $\beta_{\text{server}}(t)$, 再根据式(13)计算出无线网络的网络服务曲线 $\beta_{\text{net}}(t)$ 。

图 4 为到达曲线和终端分别在 3 种移动速度下网络服务曲线之间的关系。对比 3 种终端速度下的服务曲线可知, 随着终端移动速度增加, 服务曲线依次变低, 即网络的服务能力越来越弱。产生这种现象的主要原因是终端移动速度增加导致多普勒频移增大, 使得信道衰落变快, 数据在传输过程中更易产生误差丢包而导致无线网络的服务能力变弱。

图 4 中得到了服务曲线和到达曲线之间的关系, 结合式(14), 式(15)计算出无线网络的延时积压性能, 如图 5 所示。观察可知, 随着终端移动速度增加, 网络的服务能力越来越弱, 无线网络中数据的延时和积压参数都越来越大。

综上所述, 通信终端的移动速度是影响无线网络延时积压性能的重要因素之一。

基于本文中构造的跨层网络演算模型, 计算出了不同终端移动速度下无线网络的延时积压性能, 并分析了终端移动速度对网络延时积压性能的影响。得到的延时积压性能对分析终端不同移动速度下无线网络的 QoS 保障问题具有一定的参考价值。

表 1 3 种移动速度(km/h)下 FSMC 模型参数(归一化服务速率)

状态指数	36		72		108	
	服务速率	稳态概率	服务速率	稳态概率	服务速率	稳态概率
1	0	0.2729	0	0.4053	0	0.2212
2	0.3255	0.3161	0.3318	0.2909	0.3255	0.4292
3	0.3680	0.1342	0.7710	0.1712	0.6223	0.2171
4	0.7839	0.1039	0.9763	0.1326	0.9763	0.1326
5	0.9640	0.1730	-	-	-	-

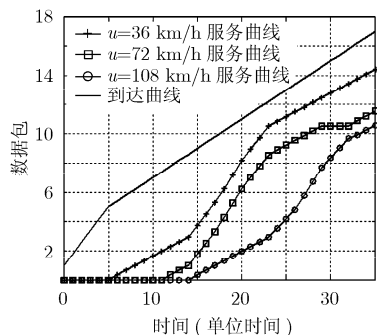


图4 3种移动速度下服务曲线对比

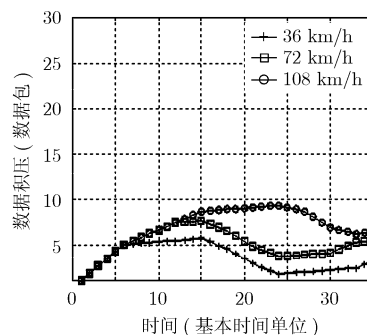
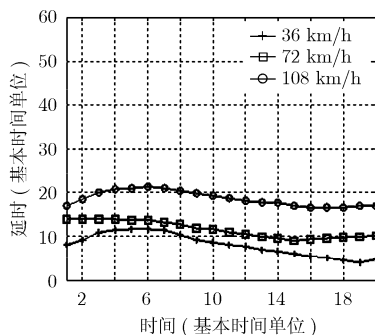


图5 3种移动速度下网络的延时和积压

6 结束语

本文将网络演算和跨层分析思想相结合, 联合无线网络的网络层、链路层及物理层特性构造了面向无线网络的跨层网络演算模型。应用该模型来分析通信终端移动对无线网络 QoS 的影响, 推导了不同终端移动速度下无线网络的服务曲线, 并计算出了网络的延时积压性能。本文中得到的延时积压性能参数对分析终端不同移动速度下无线网络的 QoS 保障问题具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Yuan Yuan, Wu Kui, and Jia Wei-jia. Performance of acyclic stochastic networks with network coding[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(7): 1238-1245.
- [2] Fidler M. Survey deterministic and stochastic service curve models in the network calculus[J]. *IEEE Communications Survey & Tutorials*, 2010, 12(1): 59-86.
- [3] Ciucu F, Schmitt J, and Wang Hao. On expressing networks with flow transformations in convolution-form[C]. *IEEE INFOCOM (INFOCOM'2011)*, Shanghai, April 10-15, 2011: 1979-1987.
- [4] Aghareparast F and Leung V C M. Modeling wireless link layer by network calculus for efficient evaluations of multimedia QoS[C]. *IEEE ICC'05*, Seoul Korea, May 16-20, 2005: 1256-1260.
- [5] Xu Hai-bo, Gao You-jun, and Tian Hui. Network calculus modeling and QoS analysis for wireless packet networks[C]. *IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC2007-Spring)*, Dublin, April 22-25, 2007: 919-923.
- [6] Verticale G and Giacomazzi P. An analytical expression for service curves of fading channels[C]. *IEEE Globcom'09*, Honolulu, HI, Nov. 30-Dec. 4, 2009: 1-6.
- [7] She Hui-min, Lu Zhong-hai, and Jantsch A. Modeling and analysis of Rayleigh fading channels using stochastic network calculus[C]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'2011)*, Cancun, Mexico, March 28-31, 2009: 1056-1061.
- [8] Duong T Q, Zepernick H J, and Fiedler M. Cross-layer design for intergrated mobile multimedia networks with strict priority traffic[C]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2010)*, Sydney, NSW, April 18-21, 2010: 1-6.
- [9] Du Qing-he and Zhang Xi. A cross-layer framework for multi-layer-video multicast with QoS requirements in multirate wireless networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(9): 658-661.
- [10] Wang Yun-bo, Vuran M C, and Goddard S. Cross-layer analysis of the end-to-end delay distribution in wireless sensor networks[C]. *The 30th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS 2009)*, Washington, DC, Dec. 1-4, 2009: 138-147.
- [11] Leboundec J Y and Thiran P. Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing System for the Internet [M]. London: Britain, Springer Verlag, 2004: 76-80.
- [12] Aghareparast F and Leung V C M. Optimal shaping for transmission over wireless fading channels[C]. *IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks(WoWMoM 2007)*, Espoo, Finland, June 18-21, 2007: 1-4.
- [13] Krunz M M and Kim Jeong geun. Fluid analysis of delay and packet discard performance for QoS support in wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2001, 19(2): 384-395.
- [14] Zhang Qin-qing and Kassam S A. Finite-state Markov model for Rayleigh fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1999, 47(11): 1688-1692.

喻莉: 女, 1970年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算机网络与多媒体通信。

姜烈: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为网络演算。

罗晶晶: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为网络演算。