ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С ОЧЕРЕДЯМИ ВЫЗОВОВ НЕРЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А. З. Меликов[1], М. И. Фаттахова[2]

[1]*Национальная академия авиации*
Баку, Азербайджан
[2]*Институт кибернетики НАН Азербайджана*
Баку, Азербайджан

Предложен численный метод расчета показателей качества обслуживания в мультисервисных беспроводных сотовых сетях связи, в которых допускается образование очереди лишь для трафика нереального времени, а доступ вызовов реального времени регулируется с помощью двухпараметрической стратегии. Решение о доступе нового и хэндовер вызова реального времени принимается на основе информации об общем числе занятых каналов соты.

Ключевые слова: мультисервисные сети, вызовы речи и данных, качество обслуживания, алгоритмы расчета.

ВВЕДЕНИЕ

Обзор публикаций, посвященных различным аспектам расчета и оптимизации адекватных моделей мультисервисных беспроводных сетей связи (МСБСС), можно найти в работах [1–3]. В данной работе исследуются модели МСБСС, в которых обрабатываются трафики реального и нереального времени, при этом предполагается, что вызовы нереального времени могут буферироваться. Для конкретности изложения здесь рассматриваются сети передачи речи (трафик реального времени) и данных (трафик нереального времени). В них различаются четыре типа вызовов: хэндовер речевые вызовы (*hv*-вызовы), новые речевые вызовы (*ov*-вызовы), хэндовер вызовы данных (*hd*-вызовы) и новые вызовы данных (*od*-вызовы). Модели сетей с абсолютными приоритетами речевых вызовов перед вызовами данных, которые могут образовать очередь ограниченной длины, были изучены в работе [4]. При этом предполагается, что *d*-вызовы являются нетерпеливыми, т. е. они могут покидать очередь не обслуженными, если время их ожидания превышает некоторую случайную величину. Разработана итеративная процедура для расчета показателей качества обслуживания (Quality of Service, *QoS*) разнотипных вызовов. Приближенный подход к исследованию этих моделей предложен в работе [5]. Модели сетей, в которых не допускается прерывание начатого процесса обработки данных, были изучены в работах [6–8]. В них для расчета показателей *QoS* используется метод производящих функций. Однако, как отмечают сами авторы, такой подход является громоздким и неконструктивным, так как он не позволяет разработать эффективные вычислительные процедуры для решения поставленной проблемы даже для моделей малой размерности.

В настоящей работе предложен численный подход к исследованию моделей МСБСС с очередями вызовов данных, в которых решение о доступе разнотипных речевых вызовов в каналы соты принимается на основе общего количества занятых каналов соты. Он основан на принципах фазового укрупнения состояний двумерных цепей Маркова [9].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ПРЕДЛОЖЕННОЙ СТРАТЕГИИ ДОСТУПА

Рассматривается изолированная сота интегрированной беспроводной сети связи, в которой обрабатываются речевые вызовы и пакеты данных (далее – вызовы данных). В сети действует фиксированная схема распределения каналов между ее сотами, и данная сота имеет $N>1$ радиоканалов. Эти каналы используются совместно пуассоновскими потоками *hv*-вызовов, *ov*-вызовов, *hd*-вызовов и *od*-вызовов. Интенсивность *x*-вызовов обозначается через λ_x, $x\in\{hv, ov, hd, od\}$. Предполагается, что среднее время занятия канала для одного речевого вызова (нового или хэндовер) равно $1/\mu_v$, а соответствующий показатель для вызовов данных (новых или хэндовер) равен $1/\mu_d$. Отметим, что если в момент поступления *od*-вызова имеется хотя бы один свободный канал соты, то он принимается на обслуживание; в противном случае он теряется. Однако если в момент поступления *hd*-вызова все каналы соты являются занятыми, то он присоединяется к очереди (конечной или бесконечной длины). Доступ речевых вызовов осуществляется согласно следующей схеме. Если в момент поступления *ov*-вызова общее число занятых каналов меньше G_{ov}, $0 < G_{ov} < N$, то он принимается на обслуживание; в противном случае он получает отказ. Если в момент поступления *hv*-вызова общее число занятых каналов меньше G_{hv}, $G_{ov} \le G_{hv} < N$, то он принимается на обслуживание; в противном случае он получает отказ.

Проблема состоит в нахождении показателей *QoS* данной системы – вероятностей потери вызовов каждого типа и среднего числа *hd*-вызовов в очереди.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ *QoS*

В стационарном режиме состояние соты в произвольный момент времени описывается двумерным вектором $\boldsymbol{n} = (n_v, n_d)$, где n_v и n_d указывают количество речевых вызовов в каналах и суммарное число вызовов данных в системе, соответственно. Поскольку речевые вызовы обслуживаются в режиме блокировки, и система является консервативной (т. е. при наличии очереди вызовов данных простои каналов не допускаются), то в любом возможном состоянии $\boldsymbol{n}$ число *hd*-вызовов в каналах (n_d^s) и в очереди (n_d^q) определяется так:

$$n_d^s = \min\{N - n_v, n_d\},\quad n_d^q = (n_v + n_d - N)^+,$$

где $x^+ := \max(0,x)$. Следовательно, фазовое пространство состояний (ФПС) данной двумерной цепи Маркова определяется так:

$$S := \{\boldsymbol{n} : n_v = 0,1,\dots,G_{hv},\ n_d = 0,1,2,\dots;\ n_v + n_d^s \le N\}. \tag{1}$$

Согласно введенной стратегии доступа неотрицательные элементы *Q*-матрицы данной цепи, $q(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{n}')$, $\boldsymbol{n}, \boldsymbol{n}' \in S$, определяются из следующих соотношений:

$$q(\boldsymbol{n},\boldsymbol{n}')=\begin{cases}\lambda_v, & \text{если } n_v+n_d^s\le G_{ov}-1,\ \boldsymbol{n}'=\boldsymbol{n}+\boldsymbol{e}_1,\\ \lambda_{hv}, & \text{если } G_{ov}\le n_v+n_d^s\le G_{hv}-1,\ \boldsymbol{n}'=\boldsymbol{n}+\boldsymbol{e}_1,\\ \lambda_d, & \text{если } n_v+n_d^s<N,\ \boldsymbol{n}'=\boldsymbol{n}+\boldsymbol{e}_2,\\ \lambda_{hv}, & \text{если } n_v+n_d^s\ge N,\ \boldsymbol{n}'=\boldsymbol{n}+\boldsymbol{e}_2,\\ n_v\mu_v, & \text{если } \boldsymbol{n}'=\boldsymbol{n}-\boldsymbol{e}_1,\\ n_d^s\mu_d, & \text{если } \boldsymbol{n}'=\boldsymbol{n}-\boldsymbol{e}_2,\\ 0 & \text{в остальных случаях,}\end{cases} \tag{2}$$

где $\lambda_d := \lambda_{od}+\lambda_{hd}$, $\lambda_v := \lambda_{ov}+\lambda_{hv}$, $\boldsymbol{e}_1=(1,0)$, $\boldsymbol{e}_2=(0,1)$.

Указанные выше показатели *QoS* данной системы определяются через стационарное распределение вероятностей состояний модели. Так, пусть P_x означает стационарную вероятность потери вызовов типа x, $x\in\{hv, ov, hd, od\}$. Тогда, исходя из предложенной стратегии доступа, находим, что эти величины определяются как соответствующие маргинальные распределения исходной цепи Маркова:

$$P_{hv} := \sum_{\boldsymbol{n}\in S} p(\boldsymbol{n}) I\left(n_v + n_d^s \ge G_{hv}\right), \tag{3}$$

$$P_{ov} := \sum_{\boldsymbol{n}\in S} p(\boldsymbol{n}) I\left(n_v + n_d^s \ge G_{ov}\right), \tag{4}$$

$$P_{od} := \sum_{\boldsymbol{n}\in S} p(\boldsymbol{n}) I\left(n_v + n_d^s \ge N\right), \tag{5}$$

где $p(\boldsymbol{n})$ – стационарная вероятность состояния $\boldsymbol{n}\in S$, $I(A)$ – индикаторная функция события A.

Среднее число *hd*-вызовов в очереди (L_{hd}) определяется следующим образом:

$$L_{hd} := \sum_{k=1}^{\infty} k\xi(k), \tag{6}$$

где $\xi(k) := \sum_{\boldsymbol{n}\in S} p(\boldsymbol{n})\delta\left(n_d^q, k\right)$, $\delta(i,j)$ – символы Кронекера.

Ниже принимается следующее допущение: $\lambda_d >> \lambda_v$, $\mu_d >> \mu_v$ (соответствующие обоснования для принятия данного допущения приводятся в [9]). Рассмотрим следующее разбиение ФПС (1):

$$S = \bigcup_{k=0}^{G_{hv}} S_k,\quad S_k \bigcap S_{k'} = \varnothing,\quad k\ne k', \tag{7}$$

где $S_k := \{\boldsymbol{n}\in S : n_v = k\}$. Иными словами, производится разбиение графа состояний модели по значению первой компоненты вектора состояния. Классы состояний S_k объединяются в укрупненное состояние $<k>$, и в исходном пространстве состояний (1) строится функция укрупнения $U(\boldsymbol{n})=<k>$, если $\boldsymbol{n}\in S_k$, $k = 0,1,\ldots,G_{hv}$. Эта функция определяет укрупненную модель, которая является одномерной цепью Маркова с фазовым пространством состояний $\tilde{S} := \{<k>:\ k=0,1,\ldots,G_{hv}\}$. Стационарные вероятности состояний исходной модели приближенно определяются так:

$$p(k,i) \approx \rho_k(i)\pi(<k>),\quad (k,i)\in S_k,\quad k=0,1,\ldots,G_{hv}, i=0,1,\ldots, \tag{8}$$

где $\{\rho_k(i):(k,i)\in S_k\}$ и $\{\pi(<k>):<k>\in\tilde{S}\}$ являются стационарными распределениями вероятностей состояний внутри класса S_k и укрупненной модели соответственно.

Неотрицательные элементы Q-матрицы расщепленной модели с фазовым пространством состояний S_k обозначим через $q_k(i,j)$. Исходя из (2) и (7) находим, что эти параметры определяются из следующих соотношений:

$$q_k(i,j)=\begin{cases}\lambda_d & \text{если } i\le N-k-1,\ j=i+1,\\ \lambda_{hd} & \text{если } i\ge N-k,\ j=i+1,\\ \min(i,N-k)\mu_d & \text{если } j=i-1,\\ 0 & \text{в остальных случаях.}\end{cases} \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что стационарное распределение вероятностей состояний расщепленной модели с пространством состояний S_k совпадает со стационарным распределением вероятностей состояний модели $M|M|N–k|\infty$ с зависящими от состояний интенсивностями поступления вызовов и постоянной интенсивностью обслуживания одного канала, равной μ_d. Следовательно, при выполнении условия эргодичности (т. е. при $\lambda_d<(N-k)\mu_d$) стационарные вероятности состояний расщепленной модели с пространством состояний S_k определяются так:

$$\rho_k(i)=\begin{cases}\dfrac{\nu_d^i}{i!}\cdot\rho_k(0), & \text{если } 1\le i\le N-k,\\ \left(\dfrac{\nu_d}{\nu_{hd}}\right)^{N-k}\cdot\dfrac{(N-k)^{N\blacklozenge k}}{(N-k)!}\cdot\left(\dfrac{\nu_{hd}}{N-k}\right)^i\cdot\rho_k(0), & \text{если } i\ge N-k+1,\end{cases} \quad (10)$$

где $\nu_d:=\lambda_d/\mu_d$, $\nu_{hd}:=\lambda_{hd}/\mu_d$, $\rho_k(0)=\left(\sum_{i=0}^{N-k}\dfrac{\nu_d^i}{i!}+\dfrac{\nu_d^{N-k}}{(N-k)!}-\dfrac{\nu_{hd}}{N-k-\nu_{hd}}\right)^{-1}$.

Поскольку условие эргодичности $\nu_d < N-k$ должно выполняться для каждого $k = 0,1,\ldots,G_{hv}$, то отсюда получаем условие эргодичности исходной модели: $\nu_d < N-G_{hv}$. Тогда при выполнении этого условия с учетом (10) из (2) получаем следующие соотношения для вычисления интенсивности переходов между состояниями укрупненной модели:

$$q(<k>,<k'>)=\begin{cases}\lambda_v\beta_k, & \text{если } 0\le k\le G_{ov}-1, k'=k+1,\\ \lambda_{hv}\beta_k, & \text{если } G_{ov}\le k\le G_{hv}-1, k'=k+1,\\ k\mu_v, & \text{если } k'=k-1,\\ 0 & \text{в остальных случаях,}\end{cases} \quad (11)$$

где $$\beta_k:=\begin{cases}\rho_k(0)\cdot\sum\limits_{i=0}^{G_{hv}-k-1}\dfrac{\nu_d^i}{i!}, & \text{если } 0\le k\le G_{ov}-1,\\ \rho_k(0)\cdot\sum\limits_{i=0}^{G_{hv}-k-1}\dfrac{\nu_d^i}{i!}, & \text{если } G_{ov}\le k\le G_{hv}-1.\end{cases}$$

Эти соотношения позволяют определить стационарное распределение вероятностей состояний укрупненной модели, которая описывается одномерным процессом размножения и гибели. Следовательно, искомое распределение укрупненной модели находится следующим образом:

$$\pi(<k>) = \begin{cases} \dfrac{v_v^k}{k!}\cdot\prod_{i=0}^{k-1}\beta_i\cdot\pi(<0>), & \text{если } 1\le k\le G_{ov}, \\ \left(\dfrac{v_h}{\nu_{hv}}\right)^{G_{ov}}\cdot\dfrac{v_{nv}^k}{k!}\cdot\prod_{i=0}^{k-1}\beta_i\cdot\pi(<0>), & \text{если } G_{ov}+1\le k\le G_{hv}, \end{cases} \tag{12}$$

где $\pi(<0>) = \left(\sum_{k=0}^{G_{ov}}\dfrac{\nu_v^k}{k!}\cdot\prod_{i=0}^{k-1}\beta_i + \left(\dfrac{\nu_v}{\nu_{hv}}\right)^{G_{ov}}\cdot\sum_{k=G_{ov}+1}^{G_{hv}}\dfrac{\nu_{hv}^k}{k!}\cdot\prod_{i=0}^{k-1}\beta_i\right)^{-1}$.

Окончательно, с использованием (10)–(12) после некоторых преобразований получим следующие приближенные формулы для расчета показателей *QoS* (3)–(6):

$$P_{hv}\approx\pi(<G_{hv}>)+\sum_{k=0}^{G_{hv}-1}\pi(<k>)\left(1-\rho_k(0)\sum_{i=0}^{G_{hv}-k-1}\frac{\nu_d^i}{i!}\right); \tag{13}$$

$$P_{ov}\approx\sum_{k=G_{ov}}^{G_{hv}}\pi(<k>)+\sum_{k=0}^{G_{ov}-1}\pi(<k>)\left(1-\rho_k(0)\sum_{i=0}^{G_{ov}-k-1}\frac{\nu_d^i}{i!}\right); \tag{14}$$

$$P_{od}\approx\sum_{k=0}^{G_{hv}}\pi(<k>)\left(1-\rho_k(0)\sum_{i=0}^{N-k-1}\frac{\nu_d^i}{i!}\right); \tag{15}$$

$$L_{hd}\approx\sum_{k=0}^{G_{hv}}\pi(<k>)\cdot\rho_k(0)\cdot\frac{\nu_d^{N-k}}{(N-k)!}\cdot\frac{\nu_{hd}(k)}{\left(1-\nu_{hd}(k)\right)^2}, \tag{16}$$

где $\nu_{hd}(k) := \nu_{hd}/(N-k)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предложен метод численного анализа моделей МСБСС, в которых осуществляется обработка речевых вызовов и вызовов данных. В ней доступ разнотипных речевых вызовов управляется с помощью двухпараметрической стратегии доступа, которая ограничивает доступ новых и хэндовер речевых вызовов в зависимости от числа занятых каналов соты. Вызовы данных могут образовать очередь бесконечной длины. Предложенный подход может быть использован и для анализа аналогичных моделей с конечными очередями нетерпеливых вызовов данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *DasBit, S.* Challenges of computing in mobile cellular environment – a survey / S. DasBit, S. Mitra // Computer Communications. 2003. Vol.26, № 8. P. 2090–2105.
2. *Ahmed, M. H.* Call admission control in wireless networks: A comprehensive survey / M. H. Ahmed // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2005. Vol.7, № 1. P. 50–69.
3. *Ghaderi, M.* Call admission control for voice/data integration in broadband wireless networks / M. Ghaderi, R. Boutaba // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2006. Vol. 5, № 3. P. 193–207.
4. *Zhuang, W.* Handoff priority scheme with preemptive, finite queuing and reneging in mobile multiservice networks / W. Zhuang, B. Bensaou, K. C. Chua // Telecommunication Systems. 2000. Vol.15. P. 37–51.

5. *Меликов, А. З.* Приближенный расчет характеристик совместной передачи речи и данных в беспроводных сетях сотовой связи / А. З. Меликов, В. Ш. Фейзиев // Электронное моделирование. 2007. Т.29, № 6. С. 47–59.
6. *Pavlidou, F. N.* Two-dimensional traffic models for cellular mobile systems / F. N. Pavlidou // IEEE Transactions on Communications. 1994. Vol. 42. № 2/3/4. P. 1505–1511.
7. *Yuang, M. C.* Bandwidth assignment paradigm for broadband integrated voice/data networks / M. C. Yuang, Y. R. Haung // Computer Communications. 1998. Vol. 21, № 3. P. 243–253.
8. *Haung, Y. R.* Performance analysis for voice/data integration on a finite-buffer mobile system / Y. R. Haung, Y. B. Lin, J. M. Ho // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2000. Vol. 49, № 2. P. 367–378.
9. *Ponomarenko, L.* Performance analysis and optimization of multi-traffic on communication networks / L. Ponomarenko, C. S. Kim, A. Melikov. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010.