АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫЗОВОВ В СЕТЯХ СОТОВОЙ СВЯЗИ

М. Фаттахова, А. Бабаев

Институт кибернетики НАН Азербайджана
Баку, Азербайджан
krokos@inbox.ru

Предложен приближенный метод расчета характеристик процессов обслуживания вызовов в сетях сотовой связи, в которых хэндовер-вызовы являются нетерпеливыми и обслуживаются согласно схеме резервирования радиоканалов базовой станции соты. Разработаны достаточно простые алгоритмы расчета вероятностей потерь новых и хэндовер-вызовов, а также среднее число вызовов каждого типа в соте.

Ключевые слова: сотовая связь, качество обслуживания, алгоритм расчета.

1. ВВЕДЕНИЕ

В беспроводных коммуникационных сетях связи вся область обслуживания делится на небольшие территории, называемые микросотами (или просто сотами) [1]. В таких сетях подвижные абоненты (Mobile Subscriber, MS) направляют свои вызовы к базовой станции (Base Station, BS) соты с помощью одного свободного радиоканала. Когда MS переходит границы данной сети, то для продолжения разговора он требует свободный канал в новой соте. Эта процедура называется хэндовер (handover или handoff), а вызов, порождающий эту процедуру, называется хэндовер-вызовом (*h*-вызов). Известно, что *h*-вызовы являются более чувствительными к возможным потерям и задержкам, чем новые вызовы (*n*-вызов) [2, 3]. Поэтому в литературе предложены различные схемы приоритетизации *h*-вызвов [4]–[7]. Эти схемы, главным образом, подразумевают использование резервных каналов (guard channels) для *h*-вызовов и/или организация их очереди в BS. Время, за которое MS пересекает хэндовер-зону, называется интервалом деградации [6].

В цитированных работах [3]–[6] предложены подходы для расчета показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) разнотипных заявок в рассматриваемых сетях при различных допущениях относительно их работы. Так, в работах [4, 6] использованы аналитические модели сети для FIFO схемы обслуживания бесконечной очереди *h*-вызовов при использовании допущения о том, что интервал деградации имеет экспоненциальное распределение. Аналогичная модель с ограниченной длиной очереди *h*-вызовов и неограниченным интервалом деградации была исследована в [5]. Модель, в которой порядок обслуживания *h*-вызовов изменяется динамически в зависимости от длины интервалов деградации индивидуальных вызовов в очереди, изучена в работе [3]. При этом из-за сложности модели она изучается с помощью имитационного моделирования.

В настоящей работе исследуется модель, изученная в [5], но при этом предполагается, что интервал деградации является конечным. Именно эта модель является достаточно адекватной к реальной ситуации, так как бесконечной очереди в реальных сетях не существует. Важно отметить, предложенный здесь подход к исследованию данной модели существенным образом отличается от подходов работ [3]–[6] и основан на принципах теории фазового укрупнения состояний стохастических систем [8, 9]. Достаточно подробный обзор работ по рассматриваемым здесь проблемам можно найти в [10].

2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Здесь описана модель BS, которая содержит $N > 1$ радиоканалов и буфер конечного размера $B < \infty$ лишь для ожидания в очереди h-вызовов. Предполагается, что n-вызовы (h-вызовы) поступают в данную соту согласно закону Пуассона с интенсивностью λ_1 (λ_2) и требуемое время обслуживания n-вызовов (без учета процедуры хэндовер) является экспоненциально распределенной случайной величиной со средним μ^{-1}. Если в период обслуживания n-вызова происходит процедура хэндовер, то оставшееся время обслуживания данного вызова в новой соте (уже в качестве h-вызова) также имеет экспоненциальное распределение с тем же средним μ^{-1} вследствие отсутствия памяти экспоненциального распределения. Как и в [2]–[7], значение параметра λ_2 в дальнейшем считается известным.

Обслуживание вызовов осуществляется согласно схеме резервирования каналов, т. е. поступивший n-вызов принимается лишь тогда, когда число свободных каналов BS не меньше, чем $g + 1$; в противном случае n-вызов теряется (блокируется), т. е. n-вызовы не буферируются. Поступивший h-вызов принимается при наличии хотя бы одного свободного канала. Если все N каналы являются занятыми, то h-вызов присоединяется к очереди при наличии там хотя бы одного свободного места; в противном случае (т. е. когда все места в буфере уже заняты) поступивший h-вызов теряется. Отметим, что нетерпеливый h-вызов может быть потерян и из очереди, если до окончания интервала его деградации не освобождается ни один канал новой соты. С целью получения обозримых результатов, как и в [4, 8], предполагается, что интервалы деградации для всех h-вызовов являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами и имеют экспоненциальные распределения со средним γ^{-1}.

В момент освобождения канала очередь h-вызовов (если она имеется) обслуживается согласно дисциплине FIFO; если очередь отсутствует, то освобожденный канал простаивает. Проблема состоит в нахождении показателей QoS данной системы.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ И НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ QOS

Для более детального описания работы соты используется двумерная цепь Маркова (ЦМ), т. е. состояние соты в произвольный момент времени задается вектором

$\mathbf{k} = (k_1, k_2)$, где k_i означает число n-вызовов (h-вызовов) в системе, $i = 1,2$. Тогда множество всех возможных состояний, т. е. фазовое пространство состояний (ФПС), системы определяется следующим образом:

$$S = \left\{\mathbf{k} : \ k_1 = \overline{0, g},\ k_2 = \overline{0, N+B}; k_1 + k_2 \le N + B\right\}. \quad (1)$$

Рассмотрим модель с нетерпеливыми h-вызовами (т. е. модель с ограниченным интервалом деградации h-вызовов). Для такой модели элементы производящей матрицы, соответствующей ЦМ, $q(\mathbf{k}, \mathbf{k}')$, $\mathbf{k}, \mathbf{k}' \in S$, определяются так:

$$q(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = \begin{cases} \lambda_1, \text{если } k_1 + k_2 \le N - g - 1, \mathbf{k}' = \mathbf{k} + e_1 \\ \lambda_2, \text{если } \mathbf{k}' = \mathbf{k} + e_2 \\ k_1\mu, \text{если } \mathbf{k}' = \mathbf{k} - e_1 \\ k_2^s \mu I(k_2^q = 0) + (k_2^s\mu + k_2^q\gamma) I(k_2^q > 0), \text{если } \mathbf{k}' = \mathbf{k} - e_2 \\ 0 \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \quad (2)$$

где $e_1 = (1, 0)$, $e_2 = (0, 1)$, $I(A)$ – индикаторная функция события A.

Следовательно, математической моделью данной системы является двумерная ЦМ с фазовым пространством состояний (1), для которой элементы производящей матрицы определяются с помощью соотношений (2). Стационарную вероятность состояния $\mathbf{k} \in S$ обозначим $p(\mathbf{k})$. Тогда исходя из того, что модель является марковской, находим, что вероятность блокировки n-вызовов ($P_b(N, g, B)$) и вероятность потери h-вызовов ($P_d(N, g, B)$) в данной системе определяются следующим образом:

$$P_b(N, g, B) = \sum_{\mathbf{k} \in S} p(\mathbf{k}) I(k_1 + k_2^s \ge N - g), \quad (3)$$

$$P_d(N, g, B) = \sum_{\mathbf{k} \in S_f^B} p(\mathbf{k}) + \sum_{i=0}^{B-1} \sum_{S_f^i} p(\mathbf{k}) \cdot P_f(i), \quad (4)$$

где $S_f^i = \{\mathbf{k} \in S : k_1 + k_2 = N + i\}$, $i = \overline{0, B}$, $P_f(i) = \text{Prob}\{$ h-вызов, поступивший в очередь в позиции $i + 1$, будет потерян$\}$, $i = \overline{0, B-1}$.

В работе [4] показано, что

$$P_f(i) = 1 - a \prod_{j=1}^{i} \left(1 - a \cdot 0,5^j\right),$$

где $a = \gamma / (N\mu + \gamma)$.

Среднее число n-вызовов ($K_n(N, g, B)$) и h-вызовов ($K_h(N, g, B)$) в системе определяются также через стационарное распределение модели:

$$K_n(N, g, B) = \sum_{r=1}^{g} r \sum_{\mathbf{k} \in S_1^r} p(\mathbf{k}), \quad (5)$$

$$K_h(N,g,B)=\sum_{r=1}^{N+B} r\sum_{\mathbf{k}\in S_2^r} p(\mathbf{k}), \tag{6}$$

где $S_i^r=\{\mathbf{k}\in S : k_i=r\}, i=1,2.$

Следовательно, для нахождения показателей QoS (3–6) необходимо определить стационарное распределение модели ($p(\mathbf{k})$, $\mathbf{k}\in S$). Однако решение последней задачи сталкивается с огромными вычислительными трудностями при больших значениях N и B, так как соответствующая система уравнений равновесия (СУР) для $p(\mathbf{k})$, $\mathbf{k}\in S$, имеет мультипликативное решение лишь при $g=0$ (даже и в этом частном случае существуют известные вычислительные трудности). Для преодоления указанных трудностей в работе предлагается новый метод расчета стационарного распределения данной модели.

Рассматривается следующее расщепление ФПС (1):

$$S=\bigcup_{r=0}^{N-g} S_1^r, \quad S_1^r\bigcap S_1^{r'}=\emptyset, \quad r\neq r', \tag{7}$$

где множества S_1^r, $r=\overline{0,N-g}$ определены в (5), (6).

Множества S_1^r объединяются в отдельные укрупненные состояния $<r>$ и вводится функция укрупнения с областью определения (1), определяющая укрупненную модель, которая является одномерной ЦМ. Далее согласно алгоритму фазового укрупнения (АФУ) [8] и матрицы (2) определяется стационарное распределение расщепленных моделей.

$$\rho^r(r,m)=\begin{cases}\frac{\upsilon_2^m}{m!}\rho^r(r,0), \text{если } m=\overline{1,N-r}\\ \frac{\upsilon_2^m}{(N-r)!}\cdot\frac{\lambda_2^{m+r-N}}{\prod_{i=1}^{m+r-N}[(N-r)\mu+i\gamma]}\rho^r(r,0), \text{если } m=\overline{N-r+1,N-r+B}\end{cases}, \tag{8}$$

где $\upsilon_2=\lambda_2/\mu$,

$$\rho^r(r,0)=\left(1+\sum_{m=1}^{N-r}\frac{\upsilon_2^m}{m!}+\frac{1}{(N-r)!}\sum_{m=N-r+1}^{N-r+B}\upsilon_2^m\cdot\frac{\lambda_2^{m+r-N}}{\prod_{i=1}^{m+r-N}[(N-r)\mu+i\gamma]}\right)^{-1}. \tag{9}$$

Для нахождения стационарного распределения ($\pi(<r>), <r>\in\tilde{S}$) укрупненной модели сперва потребуется определение элементов производящей матрицы соответствующей укрупненной ЦМ. Указанные параметры определяются с помощью (2), (8) и (9). Для краткости изложения ниже приводятся конечные расчетные формулы (подробное описание методики применения АФУ для решения подобных задач можно найти в [9]):

$$\pi(<r>)=\frac{\upsilon_1^r}{r!}\prod_{i=1}^{r}\Lambda(i)\pi(<0>), r=\overline{1,N-g}, \text{ где } \upsilon_1=\lambda_1/\mu, \tag{10}$$

$$\Lambda(i+1) = \rho^i(i,0)\sum_{j=0}^{N-g-i-1}\frac{\upsilon_2^j}{j!},\ i=\overline{0,N-g-1}, \qquad (11)$$

$$\pi(<0>) = \left(1+\sum_{i=1}^{N-g}\frac{\upsilon_1^i}{i!}\prod_{j=1}^{i}\Lambda(j)\right)^{-1}. \qquad (12)$$

Следовательно, с учетом (8)–(12) находятся следующие формулы для расчета показателей QoS (4), (5), (8), (9):

$$P_d(N,g,B) = \sum_{i=0}^{g}\sum_{j=0}^{B-1}\rho^i(i,N-i+j)\pi(i)P_f(j)+\sum_{i=0}^{g}\rho^i(i,N+B-i)\pi(i). \qquad (13)$$

$$P_b(N,g,B) = \sum_{r=0}^{N-g}\sum_{i=N-g-r}^{N+B-r}\rho^r(r,i)\pi(<r>), \qquad (14)$$

$$K_n(N,g,B) = \sum_{r=1}^{g} r\pi(<r>), \qquad (15)$$

$$K_h(N,g,B) = \sum_{r=1}^{N+B-g} r\sum_{i=0}^{g}\rho^i(i,r)\pi(<i>) + \sum_{r=N+B-g+1}^{N+B} r\sum_{i=0}^{N+B-r}\rho^i(i,r)\pi(<i>). \qquad (16)$$

Резюмируя вышеизложенное, можно предложить следующий алгоритм расчета показателей QoS модели с ограниченным интервалом деградации h-вызовов.

Шаг 1. Для $r=\overline{0,N-g}$ и $m=\overline{0,N+B-r}$ вычислить $\rho^r(r,m)$ из (8), (9).

Шаг 2. Для $r=\overline{0,N-g}$ вычислить величины $\pi(r)$, $r=\overline{0,N-g}$ из (10)–(12).

Шаг 3. Показатели QoS системы вычисляются с помощью (13)–(16), соответственно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен новый подход к расчету основных показателей QoS в сотовых сетях связи, в которых хэндовер-вызовы являются нетерпеливыми и при этом допускается образование лишь ограниченной очереди таких вызовов. Данный подход имеет следующие основные достоинства: во-первых, он позволяет разработать достаточно простые алгоритмы расчета показателей QoS исследуемой системы; во-вторых, в отличие от других известных подходов он позволяет вычислить индивидуальные характеристики разнотипных потоков (среднее число n- и h-вызовов в системе). Важно отметить, что полученные здесь алгоритмы позволяют решать задачи оптимизации данной системы. Они будут рассматриваться в последующих работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rappoport S. S.* Wireless communications, principles and practice. NY: Prentice-Hall, 1996.

2. *Tekinay S., Jabhari B.* A measurement-based prioritization scheme for handovers in mobile cellular networks // IEEE J. Sel. Areas in Comm. 1992. V. 10. № 8. P. 1343–1350.
3. *Tekinay S., Jabhari B.* Handover policies and channel assignment strategies in mobile cellular networks // IEEE Comm. Mag. 1991. V. 29. № 11.
4. *Hong D., Rappoport S. S.* Traffic model and performance analysis of cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures // IEEE Tran. on Veh. Tech. 1986. V. 35. № 3. P. 77–92.
5. *Yoon C. H., Un C. K.* Performance of personal portable radio telephone systems with and without guard channels // IEEE J. Sel. Areas in Comm. 1993. V. 11. № 6. P. 911–917.
6. *Lin Y.-B., Mohan S., Noerpel A.* Queueing priority channel assignment strategies for PCS handoff and initial access // IEEE Tran. on Veh. Tech. 1994. V. 43. № 3. P. 704–712.
7. *Haring G., Marie R., Puigjaner R., Trivedi K.* Loss formulas and their application to optimization for cellular networks // IEEE Tran. on Veh. Tech. 2001. V. 50. № 3. P. 664–673.
8. *Korolyuk V. S., Korolyuk V. V.* Stochastic models of systems. Boston: Kluwer Academic Pulishers, 1999.
9. *Меликов А. З., Фаттахова М. И.* Фазовое укрупнение в задачах расчета и оптимизации многопотоковых систем обслуживания большой размерности // Совр. мат. методы анализа и оптимизации телеком. сетей: Тр. междунар. конф. 2003. С. 178–181.
10. *DasBit S., Mitra S.* Challenges of computing in mobile cellular environment – a survey // Computer Communications. 2003. V. 26. P. 2090–2105.