

РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ

На правах рукописи

Меркулов Владимир Евгеньевич

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ
В СОТОВЫХ СЕТЯХ

Специальность 05.13.17 - теоретические основы
информатики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2004

Работа выполнена на кафедре систем телекоммуникаций факультета физико-математических и естественных наук Российского университета дружбы народов

Научный руководитель -
заслуженный деятель науки РФ, академик РАЕН,
доктор технических наук, профессор Г. П. Башарин

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор С. Я. Шоргин
кандидат физико-математических наук, доцент В. А. Наумов

Ведущая организация:
Институт проблем передачи информации РАН

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2004 г. в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета К 212.203.08 в Российском университете дружбы народов.

Адрес: 117923, г. Москва, ул. Орджоникидзе, 3

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Автореферат разослан " ____ " _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук,
доцент



В. А. Кокотушкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

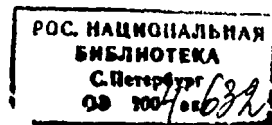
Актуальность проблемы

Связь - одна из наиболее динамичных отраслей инфраструктуры современного общества. Причиной этой динамики является как постоянно растущий спрос на услуги связи и информацию, так и непрерывный и быстрый прогресс в области электроники, средств передачи информации и вычислительной техники.

Наряду со стационарными сетями большую роль играют сегодня сети подвижной связи, и особенно сети сотовой подвижной связи (ССПС), число абонентов которых во всем мире быстро растет. К началу 2004 г. чисто абонентов сотовых сетей в России достигло 36 млн¹. При этом важно отметить, что значительная доля этих абонентов проживает в сельской местности, где стационарная телефонизация значительно менее развита и сотовая связь фактически стала ее заменой.

Естественно, что проектирование сотовых сетей на начальном этапе их развития сводилось к решению таких радиотехнических задач, как выбор числа и расположения ячеек (сот) на заданной территории, частотное планирование, проектирование антенн, решение задач электромагнитной совместимости и т.п. В последнее время внедрение цифровых ССПС требует разработки более реалистичных математических моделей, а также эффективных методов и алгоритмов для расчета качественных характеристик услуг. В рамках теории телетрафика многими известными российскими и зарубежными учеными разработано большое количество математических моделей и численных методов их анализа, которые широко применяются при создании различных сетей и систем телекоммуникаций и могут быть адаптированы к решению специфических задач, возникающих при проектировании и анализе систем сотовой связи. В числе таких ученых следует назвать Башарина Г. П., Бочарова П. П., Вишневого

¹Тихвинский В. О. Сети подвижной связи третьего поколения. Экономические и технические аспекты развития в России. Под ред. Ю. В. Зубарева. — М.: Радио и связь, 2004. — 312 с.



В. М., Наумова В. А., Степанова С. Н., Харкевича А. Д.", Iversen V. B., Kelly F. P., Rappaport S. S., Ross K. W., др.

Известные сегодня модели ТМО и теории телетрафика, -применяемые для анализа ССПС, разработаны в основном зарубежными специалистами, такими как Everitt D., Iversen V. B., Rappaport S. S., Tran-Gia P. и др. В российской научной литературе работ, посвященных вопросам теории телетрафика в ССПС очень мало. Можно лишь назвать работы Демьянова А.И., Ромашковой О.Н! и Шорина О.А. Некоторые базовые аспекты телетрафика в ССПС рассматриваются также в вышедшем в 2002 году учебном пособии Маковеевой М. М. и Шинакова Ю. С.²

Построение и- анализ математических моделей как отдельных элементов сетей сотовой связи, так и ССПС в целом, необходим не только производителям оборудования, но даже в большей степени — операторам сотовой связи, для которых улучшение качества обслуживания в их сетях за счет использования усовершенствованных алгоритмов доступа и распределения частотного спектра является важным фактором в конкурентной борьбе.

Таким образом, разработка математических моделей и эффективных методов анализа ВВХ систем сотовой связи является весьма актуальной задачей, особенно для российской научной среды.

Целью диссертационной работы является адаптация классических и разработка новых методов теории телетрафика, а также вычислительных алгоритмов для анализа вероятностно-временных характеристик в сотовых сетях.

Методы исследования. В работе использованы методы теории вероятностей, теории систем и сетей массового обслуживания, теории телетрафика, линейной алгебры, теории дифференциальных уравнений, теории графов и теории исследования операций.

²Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами: Учеб. пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 2002. — 440 с.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту, состоят в следующем:

- Разработан новый эффективный алгоритм вычисления точных значений стационарных вероятностей для модели одной соты с ожиданием;
- Впервые предложен эффективный аналитический метод приближенной оценки вероятностей блокировки в модели одной соты с повторными вызовами;
- Построена модель фрагмента двухуровневой ССПС с переупаковкой каналов, для которой сформулированы и доказаны условия мультипликативности стационарного распределения и дана подробная физическая интерпретация этих условий.
- Для фрагмента двухуровневой ССПС без переупаковки каналов построена модель нагрузки на макросоту. Предложенная модель позволяет применить метод эквивалентных замен для анализа требуемых ВВХ.

Обоснованность научных положений. Все полученные в диссертации теоретические результаты полностью обоснованы строгими математическими доказательствами и подтверждены проведенными численными исследованиями.

Практическая ценность работы. Аналитические методы и вычислительные алгоритмы, полученные в диссертации, предназначены для анализа характеристик качества обслуживания в сетях сотовой подвижной связи. Вычислительные алгоритмы и аналитические методы оценки ВВХ одной соты, представленные во второй главе работы, могут быть использованы непосредственно при анализе фрагментов сотовых сетей. Теоретические результаты главы 3 работы определяют границы, в которых для анализа характеристик иерархических ССПС могут применяться классические методы теории телетрафика. Результаты исследований используются в учебном процессе на кафедре систем телекоммуникаций РУДН для студентов, обучаю-

щихся по направлению "Прикладная математика и информатика", а также в курсовых и дипломных работах.

Реализация результатов работы. Разработка математических моделей и вычислительных алгоритмов для анализа качества обслуживания в сотовых сетях проводилась в рамках НИР "Математическое моделирование и анализ информационно-вычислительных сетей и интеллектуальных систем" (государственный регистрационный номер 020602-1-175), выполняемой в соответствии с планами РУДН, а также при частичной поддержке программ "Университеты России", УР.03.01.004 (2002-2003) и УР.03.01.022 (2004).

Апробация работы. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались на

- XXXVII-XL научных конференциях факультета физико-математических наук Российского университета дружбы народов (Москва, 2001-2004);
- LVII научной сессии Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова (Москва, 2002);
- 7-й международной конференции ConTEL'2003 (Загреб, Хорватия, 2003);
- Международной конференции NEW2AN'2004 (Санкт-Петербург, Россия, 2004);
- Научной конференции МТУСИ, в секции "Радиотехнические системы и устройства" (Москва, 2004);
- Семинарах кафедры систем телекоммуникаций РУДН (Москва, 2001-2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из которых 3 - в центральной печати, 2 - в трудах международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав; заключения, списка литературы из 86 наименований. Диссертация содержит 105 страниц текста, 33 рисунка и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности работы, приведен краткий обзор существующих научных работ по теме диссертации, указано направление и цель исследований и кратко охарактеризованы результаты, полученные в каждой из глав диссертации.

Первая глава содержит изложение основных принципов функционирования ССПС в объеме, достаточном для постановки задач и физического обоснования математических моделей, предложенных в двух следующих главах.

В разделах 1.1-1.5 дается краткое описание отличительных особенностей функционирования сетей сотовой связи, которые необходимо учитывать при построении и анализе моделей сетей этого типа. Вводятся и характеризуются такие понятия, как "базовая станция", "подвижная станция", "зона покрытия", "хендовер", "кластер", приводятся основные принципы частотно-территориального планирования и организации сотовых сетей иерархической структуры.

В разделе 1.6 анализируется роль теории телетрафика в решении проблемы оценки качества обслуживания в сотовых сетях, и формулируются следующие задачи:

1. Построение модели нагрузки на отдельную соту;
2. Анализ вероятностей блокировки в отдельной соте при различных параметрах функционирования базовой станции;
3. Построение модели нагрузки в иерархических ССПС. Данная задача включает в себя построение моделей нагрузки на отдельные микро- и макросоты;
4. Анализ вероятностей блокировки в иерархических ССПС.

Глава 2 посвящена решению задач, связанных с анализом отдельной соты одноуровневой сотовой сети.

В разделе 2.1 приводится метод оценки нагрузки, создаваемой хендовер-вызовами. Этот метод строится на предположении, что все соты в рассматриваемой сети идентичны по размеру, количеству каналов и используемому алгоритму доступа.

Пусть ξ - длительность обслуживания произвольного принятого в систему вызова при отсутствии блокировок и технических сбоев. Обычно для ССПС среднее значение ξ берется порядка 2 мин. Пусть ξ_1 - время от момента принятия произвольного вызова на обслуживание в систему до момента его первого хендовера, а $\xi_2^{(k)}$ - время пребывания произвольного вызова в A_2 -й соте его маршрута, $k = 2, 3, \dots$ Обозначим

$$q(m) = P \left\{ \xi_1 + \sum_{k=2}^m \xi_2^{(k)} < \xi \mid \xi_1 + \sum_{k=2}^m \xi_2^{(k)} < \xi \right\} = \frac{P \left\{ \xi_1 + \sum_{k=2}^m \xi_2^{(k)} < \xi \right\}}{P \left\{ \xi_1 + \sum_{k=2}^m \xi_2^{(k)} < \xi \right\}} \quad (1)$$

- вероятность того, что произвольный принятый вызов потребует не менее m хендоверов, $m = 1, 2, \dots$; $\sum_0^1 (\cdot) := 0$. Тогда

$$p_n = (1 - \pi_2)^{n-1} \prod_{m=1}^n q(m) [\pi_2 + (1 - q(m+1))(1 - \pi_2)], \quad (2)$$

где π_2 - вероятность блокировки хендовер-вызова в произвольной соте, есть вероятность того, что произвольный принятый вызов потребует ровно m хендоверов.

Оценка λ_2 интенсивности нагрузки, создаваемой хендовер-вызовами, может быть получена по формуле

$$\lambda_2 = \lambda_1(1 - \pi_1)\bar{N}, \quad (3)$$

где $\lambda_1(1 - \pi_1)$ - интенсивность принятой нагрузки, создаваемой новыми вызовами, а $\bar{N} = \sum_{n=1}^{\infty} n p_n$ - среднее количество хендоверов на один принятый вызов. В частном случае, если ξ имеет экспонен-

циальное распределение с параметром μ_0 , а с.в. ξ_1 и $\xi_2^{(k)}$, $k = 2, 3, \dots$, распределены одинаково, то \overline{N} представимо в виде

$$\overline{N} = \frac{f^*(\mu_0)}{1 - (1 - \pi_2)f^*(\mu_0)}, \quad (4)$$

где $f^*(x)$ – преобразование Лапласа ФР ξ_1 .

В разделе 2.2 рассматривается наиболее общая модель функционирования одной соты ССПС. Предполагается, что базовая станция соты имеет C каналов связи, причем действует политика доступа с резервированием: если в системе свободно не более $g < C$ каналов, то на обслуживание принимаются только хендвер-вызовы. Кроме этого, система имеет два накопителя для новых и хендвер-вызовов (емкостью g_1 и g_2 соответственно), причем хендвер-вызовам и здесь дается приоритет, т.е. при освобождении одного из каналов он будет предоставлен одному из ожидающих новых вызовов только в случае, когда очередь хендвер-вызовов пуста. Обозначим накопители через Q_1 и Q_2 соответственно.

Пусть n_1 – суммарное количество вызовов, обслуживаемых системой и ожидающих в накопителе Q_2 , а n_2 – количество вызовов, ожидающих в накопителе Q_1 . Тогда пространство состояний рассматриваемой системы записывается в виде

$$S = \{(n_1, 0) : n_1 = \overline{0, C - g - 1}\} \cup \{(n_1, n_2) : n_1 = \overline{C - g, C + r_2}, n_2 = \overline{0, r_1}\}. \quad (5)$$

Для простоты дальнейшего изложения обозначим $s_{i,j} := (i, j)$, $(i, j) \in S$ и $a(s, t)$, $s, t \in S$ – интенсивность перехода системы из состояния s в состояние t .

Для нахождения ненормированных стационарных вероятностей $P_{i,j}$, $(i, j) \in S$ воспользуемся следующим алгоритмом.

Шаг 1. Положим $P_{0,0} := 1$ и выразим рекурсивно следующие вероятности:

$$P_{i,0} = \prod_{k=1}^i \frac{a(s_{k-1,0}, s_{k,0})}{a(s_{k,0}, s_{k-1,0})} P_{0,0}, \quad i = \overline{1, C - g} \quad (6)$$

Шаг 2. Обозначим вероятности $P_{C-g,j}$, $j = \overline{1, r_1}$ через x_1, \dots, x_{r_1} и будем искать остальные вероятности в виде неоднородной линейной комбинации этих величин, т.е. в виде

$$P_{i,j} = U_{i,j}^{(0)} + \sum_{k=1}^{r_1} U_{i,j}^{(k)} x_k, \quad i = \overline{C-g+1, C+r_2}, \quad j = \overline{0, r_1}.$$

Шаг 3.

Для всех $i = \overline{C-g+1, C+r_2-1}$:

Для всех $j = \overline{0, r_1}$:

$$\begin{aligned} U_{ij}^{(k)} = & -\frac{1}{a(s_{i,j}, s_{i-1,j})} \left[U_{i-1,j}^{(k)} a(s_{i-1,j}, s_{i-1,j}) + \right. \\ & + U_{i-2,j}^{(k)} a(s_{i-2,j}, s_{i-1,j}) (1 - u(j) + u(j)u(i-1-C+g)) + \\ & + U_{i-1,j-1}^{(k)} a(s_{i-1,j-1}, s_{i-1,j}) u(j) + \\ & \left. + U_{i-1,j+1}^{(k)} a(s_{i-1,j+1}, s_{i-1,j}) u(r_1 - j) \right], \quad k = \overline{0, r_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $u(x)$ - функция Хевисайда.

Шаг 4- Как и на предыдущем шаге, выразим вероятность $P_{C+r_2,0}$ через известные вероятности соседних состояний. После этого, последовательно выражая вероятности $P_{C+r_2,j}$, $j = 1, 2, \dots, r_1$, заметим, что каждую из этих вероятностей можно выразить двумя способами: "слева", из уравнения баланса для состояния $s_{C+r_2-1,j}$ и "снизу", из уравнения баланса для состояния $s_{C+r_2,j-1}$. Это дает возможность построить r_1 линейных уравнений для неизвестных x_1, \dots, x_{r_1} , откуда они могут быть однозначно найдены.

Предложенный алгоритм позволяет свести решение СУР $\mathbf{p}^T \mathbf{A} = \mathbf{0}^T$, которая имеет размерность $(C-g) + r_1(C+r_2-g)$, к решению системы линейных уравнений размерности r_1 .

На рисунках 1 и 2 изображены графики зависимости вероятностей блокировки соответственно новых и хендвер-вызовов от интенсивности поступления новых вызовов, полученные с помощью предложенного алгоритма.

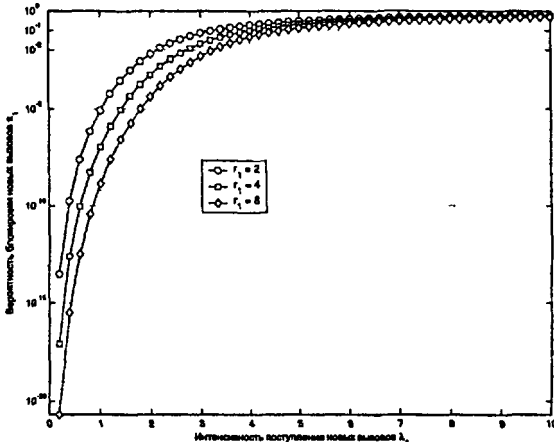


Рис. 1: Вероятность π_1 блокировки новых вызовов, полученная с помощью алгоритма

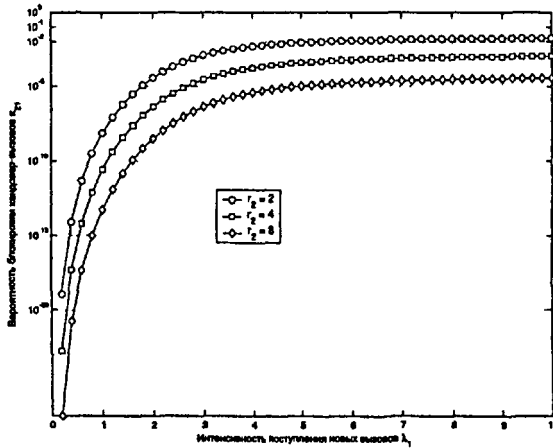


Рис. 2: Вероятность π_{21} мгновенной потери хендвер-вызовов, полученная с помощью алгоритма

В разделе 2.3 представлен приближенный метод вычисления вероятностей блокировки новых и хендвер-вызовов в одной соте ССПС с учетом эффекта повторных вызовов. Предложенный метод строится на анализе периодов времени (называемых интервалами блокировки), в течение которых рассматриваемая система, в силу нехватки свободных каналов, блокирует все предложенные новые вызовы, как первичные, так и повторные.

Пусть ξ_i - время между поступлениями новых первичных вызовов в систему, а η_j - время между поступлениями новых повторных вызовов от одного абонента, $i, j = 1, 2, \dots$. Будем предполагать, что все эти величины независимы и имеют экспоненциальное распределение, причем параметр распределения для $\xi_i - \lambda_1$, а для $\eta_j - \lambda_{12}$, $i, j = 1, 2, \dots$.

Введем τ - длительность произвольного интервала блокировки, и обозначим $\alpha_n := \sum_{i=1}^n \xi_i$, $\beta_m := \sum_{j=1}^m \eta_j$, $n, m = 1, 2, \dots$;

$$p(n) := P \{ \alpha_n < \tau \mid \alpha_{n-1} < \tau \} = \frac{P \{ \alpha_n < \tau \}}{P \{ \alpha_{n-1} < \tau \}} \quad (8)$$

- вероятность того, что n -й по счету первичный вызов, поступивший с момента начала произвольного интервала блокировки, попадет в этот же интервал, при условии, что предыдущие $n - 1$ первичных вызовов в него попали, $n = 1, 2, \dots$;

$$q(n, m) := P \{ \alpha_n + \beta_m < \tau \mid \alpha_n + \beta_{m-1} < \tau \} = \frac{P \{ \alpha_n + \beta_m < \tau \}}{P \{ \alpha_n + \beta_{m-1} < \tau \}} \quad (9)$$

- вероятность того, что m -й повторный вызов, порожденный блокировкой n -го для произвольного интервала блокировки первичного вызова, попадет в этот же интервал блокировки, при условии, что все предыдущие $m - 1$ повторных вызовов в него попали, $n, m = 1, 2, \dots$.

Тогда среднее число \bar{Q} блокированных повторных вызовов, соответствующих блокировке одного и того же произвольного первичного вызова, выражается из соотношения

$$\begin{aligned}\bar{Q}_n &= h_1 \sum_{m=1}^{\infty} m h_2^{m-1} \prod_{k=1}^m q(n, k) [1 - h_2 q(n, m + 1)], \\ \bar{Q} &= \frac{1}{p(1)} \sum_{n=1}^{\infty} \prod_{k=1}^n p(k) [1 - p(n + 1)] \bar{Q}_n,\end{aligned}\tag{10}$$

где h_1 – вероятность того, что блокировка первичного вызова повлечет повторный вызов, а h_2 – вероятность того, что блокировка повторного вызова повлечет следующий повторный вызов.

Можно показать, что вероятность π_1 блокировки нового вызова с учетом повторений может быть оценена по формуле

$$\pi_1 = \frac{1 + \bar{Q}}{\frac{1}{\pi_1^0} + \bar{Q}},\tag{11}$$

где π_1^0 – вероятность блокировки новых вызовов в системе, идентичной рассматриваемой, но без повторений.

В диссертационной работе рассмотрены два частных случая описанной модели.

Случай полного доступа. При отсутствии резервных каналов с.в. τ имеет экспоненциальное распределение с параметром $C\mu$, где μ – интенсивность обслуживания произвольного вызова.

Лемма 2.2 Пусть случайная величина τ имеет экспоненциальное распределение с параметром $C\mu$. Тогда имеет место следующее соотношение:

$$P\{\alpha_n + \beta_m < \tau\} = p^n q^m, \quad n, m = 0, 1, \dots,\tag{12}$$

где $p = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + C\mu}$, $q = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + C\mu}$.

В силу леммы 2.2 для данного случая оценка вероятности блокировки π_1 может быть получена из соотношения

$$\pi_1 = \frac{1 + \frac{qh_1}{1-qh_2}}{\frac{1}{\pi_1^0} + \frac{qh_1}{1-qh_2}}.\tag{13}$$

Заметим, что в этом случае величина π_1^0 есть эрланговская вероятность потерь.

Случай доступа с резервированием. При наличии резервных каналов в системе св. г имеет РН-распределение с трехдиагональной якобиевой матрицей A размерности $g+1^3$. Для данного случая имеет место следующее обобщение леммы 2.2.

Пусть ϕ_k, v_k – модули собственных значений и собственные векторы матрицы A ; U_k – решение системы уравнений $\sum_{j=0}^g U_j v_j = (1, 0, \dots, 0)$, $b_k = U_k \sum_{j=0}^g v_{kj}$, $k = \overline{0, g}$.

Лемма 2.3 Пусть случайная величина t имеет РН-распределение с матрицей A . Тогда имеет место следующее соотношение:

$$P\{\alpha_n + \beta_m < \tau\} = \sum_{k=0}^g b_k p_k^n q_k^m, \quad n, m = 0, 1, \dots, \quad (14)$$

где $p_k = \frac{\lambda_{11}}{\lambda_{11} + \phi_k}$, $q_k = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \phi_k}$.

Из леммы 2.3 следует, что в данном случае

$$\bar{Q} = \frac{1}{P(1)} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^g b_k p_k^n (1 - p_k) \frac{\sum_{k=0}^g b_k p_k^n \frac{\lambda_{11} q_k}{1 - \lambda_{22} q_k}}{\sum_{k=0}^g b_k p_k^n} \right]. \quad (15)$$

Глава 3 посвящена анализу качества обслуживания в иерархических сетях сотовой связи. В этой главе рассмотрена модель кластера двухуровневой ССПС, состоящего из K микросот и одной покрывающей их макросоты. Рассматриваемая модель имеет следующие структурные параметры: $C, c_k, k = \overline{1, K}$ – емкости макросоты и микросот; $\mu_k, k = \overline{1, K}$ – интенсивности обслуживания абонентов в каждой из микросот; $r_k, 0 \leq r_k \leq C, k = \overline{1, K}$ – индивидуальные потолки, установленные для каждой микросоты на использование ресурса макросоты.

В разделах 3.1 и 3.2 данная модель исследуется для случая, когда в системе организована переупаковка каналов.

³ Башарин Г.П., Бочаров П.П., Коган Я.А. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 336 с. (прил. 2 к гл. 5)

Пусть λ_0 - интенсивность суммарной предложенной нагрузки, $\Theta_0 = [\theta_{ij}]_{i,j=\overline{0},\overline{K}}$ - маршрутная матрица, описывающая движение абонентов внутри рассматриваемого кластера, $\Theta = [\theta_{ij}]_{i,j=\overline{1},\overline{K}}$ - ее главная подматрица, а $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_K)$ - решение матричного уравнения:

$$\lambda^T (\mathbf{I} - \Theta) = \lambda_0 (\theta_{01}, \dots, \theta_{0K}). \quad (16)$$

Легко показать, что при мгновенной переупаковке каналов функционирование рассматриваемой системы может быть описано марковским процессом $\mathbf{X}(t) = (X_1(t), \dots, X_K(t))$, $t \geq 0$, где $X_k(t)$ - количество абонентов k -микросоты, обслуживаемых системой в момент времени t , $t \geq 0$.

Теорема 3.1 Пусть для элементов вектора λ выполняются соотношения $\lambda_k \theta_{kj} = \lambda_j \theta_{jk}$, $k = \overline{1}, \overline{K}$, $j \neq k$. Тогда:

а) Выполняются дополнительные условия

$$\lambda_0 \theta_{0k} = \lambda_k \theta_{k0}, \quad k = \overline{1}, \overline{K}; \quad (17)$$

б) Выполняются условия частичного баланса

$$\begin{cases} p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_k) \lambda_0 \theta_{0k} 1(\mathbf{n} - \mathbf{e}_k \in S) = p(\mathbf{n}) \mu_k n_k \theta_{k0}, \\ p(\mathbf{n} - \mathbf{e}_k + \mathbf{e}_j) \mu_j (n_j + 1) \theta_{jk} 1(\mathbf{n} - \mathbf{e}_k \in S) = p(\mathbf{n}) \mu_k n_k \theta_{kj}, \end{cases} \\ k, j = \overline{1}, \overline{K}, \quad k \neq j, \quad \mathbf{n} \in S; \quad (18)$$

и случайный процесс $\mathbf{X}(t)$, $t \geq 0$, имеет стационарное распределение мультипликативного вида:

$$p(\mathbf{n}) = G \prod_{k=1}^K \frac{\rho_k^{n_k}}{n_k!}, \quad \rho_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k}, \quad k = \overline{1}, \overline{K}, \quad G = \left(\sum_{\mathbf{n} \in S} \prod_{k=1}^K \frac{\rho_k^{n_k}}{n_k!} \right)^{-1}. \quad (19)$$

в) Условия (17) являются необходимыми для того, чтобы (19) было стационарным распределением процесса $\mathbf{X}(t)$.

Лемма 3.2 Пусть для любых $k, j \in \{1, \dots, K\}$, $j \neq k$, выполняется соотношение:

$$\theta_{0k}\theta_{kj}\theta_{j0} = \theta_{0j}\theta_{jk}\theta_{k0}. \quad (20)$$

Тогда для любого набора $i_1, i_2, \dots, i_n, i_k \in \{1, \dots, K\}, k = \overline{1, n}, n = 1, 2, \dots$, выполняется соотношение

$$\theta_{0i_1}\theta_{i_1i_2} \cdots \theta_{i_{n-1}i_n}\theta_{i_n0} = \theta_{0i_n}\theta_{i_ni_{n-1}} \cdots \theta_{i_2i_1}\theta_{i_10}. \quad (21)$$

Теорема 3.2 Условия (20) леммы 3.2 эквивалентны условиям теоремы 3.1.

По существу, (20)–(21) являются условиями обратимости марковского процесса $X(t)$. Результаты разделов 3.1 и 3.2 дают возможность выделить класс иерархических ССПС, для анализа которых применимы классические методы теории телетрафика, разработанные для мультипликативных систем и сетей массового обслуживания.

Раздел 3.3 посвящен анализу случая, когда переупаковка каналов в рассматриваемой системе не используется. При этом система разбивается на две подсистемы: подсистему \mathcal{S}_1 , состоящую только из микросот, и подсистему \mathcal{S}_2 , состоящую только из макросоты. При этом \mathcal{S}_1 является частным случаем системы, рассмотренной в разделе 3.2, поэтому основную часть данного раздела занимает анализ подсистемы \mathcal{S}_2 , для которой строится модель поступающей нагрузки в виде пуассоновского потока с марковским управлением и вычисляются вероятности блокировки с использованием метода эквивалентных замен (МЭЗ).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе исследовались математические модели отдельных фрагментов ССПС. Рассмотрено две модели функционирования одной соты ССПС - с ожиданием и с повторными вызовами - а также две модели одного кластера двухуровневой ССПС - с переупаковкой каналов и без. Для всех четырех случаев разработаны новые аналитические и алгоритмические методы, позволяющие

оценить различные ВВХ этих систем- Ниже приводится краткая характеристика полученных результатов.

- Разработан новый эффективный алгоритм вычисления точных значений стационарных вероятностей для модели одной соты с ожиданием;
- Впервые предложен эффективный аналитический метод приближенной оценки вероятностей блокировки, в модели одной соты с повторными вызовами;
- Построена модель фрагмента двухуровневой ССПС с переупаковкой каналов, для которой сформулированы и доказаны условия мультипликативности стационарного распределения и дана подробная физическая интерпретация этих условий;
- Для фрагмента двухуровневой ССПС без переупаковки каналов построена модель нагрузки на макросоту. Предложенная модель позволяет применить метод эквивалентных замен для анализа требуемых ВВХ.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

1. Башарин Г. П., Меркулов В. Е. Новые модели теории телеграфика для оценки качества обслуживания в сетях сотовой подвижной связи // Труды LVI Кокф. РНТОРЭС. — Т. 2. — 2002. - С. 183-185.
2. Башарин Г. П., Меркулов В. Е. Анализ пропускной способности в иерархических сетях сотовой связи // Электросвязь.— 2003. - № 4. - С . 45-47.
3. Башарин Г. П., Меркулов В. Е., Смоленков Р. В. Некоторые модели для анализа характеристик качества обслуживания в сетях сотовой подвижной связи // Системы телекоммуникаций и моделирование сложных систем. — М.: Изд-во РУДН, 2002. — С. 5-13.
4. Башарин Г. П., Меркулов В. Е., Смоленков Р. В. Построение математической модели нагрузки одного кластера сотовой по-

- движной связи // Системы телекоммуникаций и моделирование сложных систем. — М.: Изд-во РУДН, 2003.
5. Башарин Г. П., Дубовкина О. В., Меркулов В. Е. Оценка вероятностей блокировки в одной соте сети сотовой подвижной связи с учетом повторных вызовов // Системы телекоммуникаций и моделирование сложных систем. — М.: Изд-во РУДН, 2003.
 6. Меркулов В. Е. Объектно-ориентированная модель для симуляции систем телекоммуникаций // Системы телекоммуникаций и моделирование сложных систем.— М.: Изд-во РУДН, 2003.
 7. Basharin G. P., Merkulov V. E. Performance Analysis of a Two-Layer Cellular Mobile Communication System Fragment // Вестник РУДН (Прикладная и компьютерная математика).— 2002.- Vol. I, no. 1. - Pp. 14-24.
 8. Basharin G. P., Merkulov V. E. Approximate Analysis of Repeated Calls Impact in Cellular Systems with Guard Channels // Вестник РУДН (Прикладная и компьютерная математика).— 2003.— Vol. 2, no. 1. - Pp. 5-12.
 9. Basharin G. P., Merkulov V. E. Blocking Probability Analysis of New and Handover Calls in Cellular Mobile Networks with Repeated Attempts // Proc. ConTel Conf. — Vol. 1. — Zagreb: 2003.-Pp. 278-281.
 10. Basharin G. P., Merkulov V. E. Analysis of Repeated Calls in Cellular Systems with Guard Channels // Proc. NEW2AN Conf. — Vol. 1. - St. Petersburg: 2004.- Pp. 119-122.
 11. Башарин Г. П., Меркулова О. В., Меркулов В. Е. Анализ интенсивности возникновения хендвер вызовов в сети сотовой подвижной связи // Системы телекоммуникаций и моделирование сложных систем. — М.: Изд-во РУДН, 2004.

Меркулов Владимир Евгеньевич (Россия)

Математические методы и алгоритмы для анализа качества обслуживания в сотовых сетях

В диссертационной работе рассмотрены математические модели фрагментов сетей сотовой подвижной связи и предложены эффективные алгоритмы вычисления их вероятностно-временных характеристик. Рассмотрено две модели одной соты ССПС - с ожиданием и с повторными вызовами - и две модели фрагмента двухуровневой ССПС - с переупаковкой каналов и без переупаковки. Для первых двух моделей предложены эффективные аналитические и алгоритмические методы анализа их ВВХ. Для фрагмента иерархической ССПС сформулированы и доказаны условия, при которых для анализа соответствующих моделей могут использоваться известные методы теории телетрафика.

Merkulov Vladimir Evgenievich (Russia)

Mathematical Models and Algorithms for QoS Analysis in Cellular Mobile Networks

The thesis studies mathematical models of certain cellular communication system fragments and presents effective algorithms for their analysis. Four models are concerned: two models of a single cell (a model with finite queues for new and handover calls and a model with repeated calls) and two models of a single two-layer cellular network cluster (with and without channel repacking). For the first set of models new effective analytical and algorithmic approaches for evaluating their probability characteristics are presented. For the concerned hierarchical cellular network models classic teletraffic methods are adopted.

15796

Подписано в печать 6.09.04. Формат 60×84/16.
Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1 . Заказ 82.8

Типография Издательства РУДН
117923, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3