

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ РАДИОСЕТИ С ВЫДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ ПО ТРЕБОВАНИЮ

Шиманов С. Н., Крикунов А. А.*

Ключевые слова: мультисервисная радиосеть, сеть радиосвязи, многопоточная модель, предоставление каналов по требованию, неоднородный трафик, двухфазное обслуживание трафика, случайный множественный доступ, транкинговая система связи, нестационарная абонентская нагрузка, динамическое распределение канального ресурса, оперативность информационного обмена.

Аннотация.

Цель работы: совершенствование научно-методического аппарата для оценки и оптимизации характеристик мультисервисных сетей радиосвязи в условиях динамики абонентского трафика и доступного канального ресурса.

Методы: методы теории телетрафика, методы аналитического и имитационного моделирования, теории вероятностей и теории марковских процессов.

Результаты: разработана комплексная математическая модель обслуживания абонентского трафика в мультисервисной радиосети с предоставлением каналов по требованию в условиях конечного числа абонентов и малого канального ресурса; полученная модель позволяет учесть взаимную зависимость длительностей различных фаз обслуживания: этапа отправки запроса по каналу случайного доступа в адрес главной станции и этапа непосредственной передачи пользовательского трафика согласно принятому алгоритму обслуживания; показано, что существует оптимальное распределение канального ресурса между служебными и рабочими каналами, которое зависит от текущей нагрузки и доступной канальной емкости сети радиосвязи.

DOI:10.21681/1994-1404-1-24-35

Введение

Современные сети радиосвязи в составе крупномасштабных автоматизированных систем типа ГАС РФ «Правосудие» [1, 9] являются, как правило, мультисервисными, т.е. ориентированы на интегральное обслуживание различных видов абонентского трафика с использованием единого канального ресурса (КР) [2, 3]. Как следствие, на этапе проектирования таких радиосетей возникает необходимость эффективно решать задачу распределения информационного ресурса сети связи между ее абонентами в условиях совместного обслуживания сервисов (трафика) реального времени (ТВ) и трафика данных (ТД), допускающего некоторую задержку при передаче. В условиях ограни-

ченного КР сети радиосвязи его распределение между абонентами чаще всего организуется на основе процедуры предоставления каналов по требованию (ПКТ). Такой подход в настоящее время успешно применяется в подсистемах спутниковой связи, а также в мобильной сотовой связи, транкинговых системах связи и позволяет обеспечить обслуживание абонентского трафика с приемлемым качеством [5, 11, 15, 16].

Как правило, в таких системах общий КР жестко разделен между служебными каналами (СК), которые предназначены для организации процедуры обслуживания абонентов, и рабочими каналами, предназначенными непосредственно для передачи абонентского трафика. Общее время обслуживания трафика для систем ПКТ складывается из двух составляющих: времени передачи требования на предоставление КР по СК и времени обработки требования, принятого на обслуживание

* Шиманов Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированных систем боевого управления» филиала Военной академии ВВСН имени Петра Великого, Московская область, г. Серпухов, Российская Федерация.

E-mail: 41kaf_rabota@mail.ru

Крикунов Алексей Александрович, кандидат технических наук, докторант филиала Военной академии ВВСН имени Петра Великого, Московская область, г. Серпухов, Российская Федерация.

E-mail: 41kaf_rabota@mail.ru

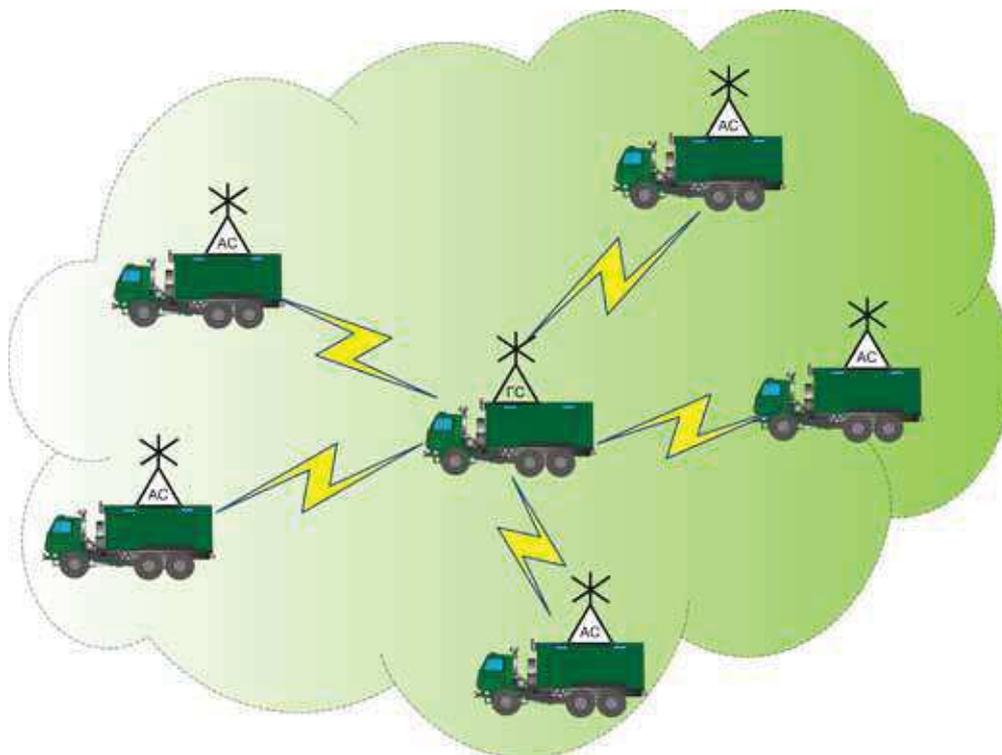


Рис. 1. Структура сети радиосвязи с предоставлением каналов по требованию

(ожидание в очереди плюс непосредственная передача трафика). Как известно, применение динамического способа распределения КР позволяет значительно повысить эффективность его использования [2, 11, 13], в то же время требуется решить ряд дополнительных проблем на этапе проектирования и эксплуатации таких радиосетей. В условиях малого количества каналов, доступных для распределения, и относительно небольшого числа абонентов возникает достаточно сильная корреляция между характеристиками качества обеих фаз обслуживания трафика. Велика вероятность простаивания СК при перегрузке рабочих каналов (абоненты находятся на обслуживании или в очереди, ожидая начала обслуживания, и не генерируют вызывной трафик) либо обратная ситуация с простаиванием рабочих каналов в условиях блокировки СК [7]. Таким образом, особенно остро стоит задача обеспечения эффективности использования каждой единицы КР. Кроме того, абонентский трафик, как правило, не является стационарным, а объем доступного КР радиосети может изменяться в зависимости от условий прохождения радиосигналов. С учетом этих особенностей, для поддержания нормального режима функционирования радиосети с ПКТ в условиях динамики трафика и доступного КР необходимо соответствующим образом перераспределять КР между служебными и рабочими каналами в зависимости от текущего состояния сети радиосвязи. Для решения этой задачи требуется прежде всего разработать математический аппарат, позволяющий оценить необходимые показатели эффективности и качества информационного обмена.

Математическое моделирование радиосети с предоставлением каналов по требованию

Рассмотрим радиосеть (рис. 1), в которой выделение КР осуществляется централизованно главной станцией (ГС) по запросам абонентских станций (АС) с использованием служебного канала. В информационном потоке можно выделить трафик реального времени, требующий фиксированной скорости передачи (телефонная связь) и трафик передачи данных (файловый обмен), допускающий задержку. Трафик реального времени имеет преимущество в занятии и использовании КР [10, 14].

Для такой системы с динамическим резервированием оперативность обслуживания абонентов характеризуется средним временем $\bar{T}_{обсл.общ.}$ обслуживания заявки на выделение КР, которое складывается из среднего времени $\bar{T}_{СК}$ задержки в СК и среднего времени $\bar{T}_{обр}$ обработки заявки, принятой на обслуживание. Соответственно, общий КР системы разделен на две части:

- первая – ресурс, необходимый для функционирования СК;
- вторая – КР, динамически выделяемый по требованию на обслуживание абонентского трафика.

Очевидно, что оперативность обслуживания в каждой отдельной составляющей системы будет повышаться с увеличением соответствующего объема КР. Следовательно, с учетом ограниченности КР возникает задача оптимального его разделения с целью минимизации общего времени обслуживания заявки:

$$\bar{T}_{\text{обсл.общ}} = \bar{T}_{\text{СК}} + \bar{T}_{\text{обр}}. \quad (1)$$

Для решения этой задачи необходимо рассмотреть и проанализировать две подсистемы: служебный канал и непосредственно систему динамического выделения КР (подсистему распределения рабочих каналов (ПРРК)) по требованию.

Для построения математической модели второй подсистемы примем следующие *исходные данные*. В системе имеется два различных потока заявок на обслуживание, соответствующих различным видам трафика (ТРВ и ТД) и образованных конечным числом абонентов N_1 и N_2 соответственно. Поступление заявок этих потоков в СК происходит через интервалы времени, имеющие показательное распределение с соответствующими параметрами λ_1 и λ_2 , которые зависят от состояния сети. Пусть $V_{\text{об}}$ — скорость передачи информации мультисервисной линии, выраженная в единицах канального ресурса (к.е.); M — число к.е., выделенное для работы СК; $V = V_{\text{ид}} - M$ — объем КР, предназначенный для непосредственного обслуживания принятых заявок; b_1 — число единиц канального ресурса, необходимого для обслуживания одной заявки первого потока (трафика реального времени), причем $b_1 > 1$; $\tau_1 = \frac{1}{\mu_1}$

— среднее время для обслуживания этой заявки (длительность обслуживания также распределена экспоненциально) [8, 13].

Если для обслуживания поступившей заявки нет необходимого канального ресурса, заявка становится в очередь. Соответственно, $l_1 \leq N_1$, $l_2 \leq N_2$ — длина очереди для заявок каждого потока; $i_1 \leq N_1$, $i_2 \leq N_2$ — количество заявок, находящихся на обслуживании.

Преимущества трафика реального времени (ТРВ) над трафиком в занятости и использовании канального ресурса заключаются:

- в снижении скорости передачи данных с ростом нагрузки на сеть;
- в первоочередном обслуживании заявок первого потока, находящихся в очереди.

Второй пункт означает, что освободившийся канальный ресурс при условии его достаточности будет выделен находящейся в очереди заявке на передачу трафика реального времени, независимо от относительного времени поступления требований двух потоков.

Положим, что заявки на передачу трафика реально времени являются «нетерпеливыми», т.е. покидают очередь, если время ожидания начала обслуживания превысит некоторое заданное. Будем предполагать, что каждая поступившая заявка первого потока может ожидать начала обслуживания не более случайного времени, распределенного по показательному закону с параметром σ .

Механизм динамически изменяемой скорости передачи реализуется путем выделения соответствующему трафику так называемого *макроканала*, пропускная способность которого изменяется в зависимости от те-

кущей загрузки канального ресурса (например, в соответствии с алгоритмом двоичного изменения пропускной способности [13, 14]). Будем считать минимальную скорость макроканала $g_0 = 1$ к.е., $g = 1, 2, \dots, V$. Время обслуживания одной заявки второго потока распределено по показательному закону и при минимальной

пропускной способности $\tau_{02} = \frac{1}{\mu_{02}}$. Следовательно, $\mu_2 = g \cdot \mu_{02}$. Обозначим $w = i_1 b_1$ — число канальных единиц, занятых обслуживанием трафика реального времени; $f = V - w$ — оставшийся канальный ресурс. В общем случае средняя интенсивность $\mu_2 = \mu_2(f, i_2)$ обслуживания для потока заявок однозначно определяется для каждого состояния сети.

Состояние модели задается вектором (i_1, l_1, i_2, l_2) , совокупность таких векторов образует пространство состояний модели S . Вероятности $P(i_1, l_1, i_2, l_2)$ интерпретируются как доля времени пребывания системы в соответствующих состояниях.

Динамика изменения состояний системы описывается случайным процессом $r(t) = (i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t))$, определенном на конечном пространстве состояний S ; $U_1 \subset S$ — множество состояний, в которых заявка первого потока встает в очередь на обслуживание ($w + i_2 + b_1 > V$). Аналогично $U_2 \subset S$, ($w + i_2 + 1 > V$).

Если поступление заявок от каждого абонента подчиняется закону Пуассона с интенсивностью γ_1, γ_2 для соответствующего потока, то суммарные интенсивности потоков на входе СК:

$$\lambda_1(i_1, l_1) = N_{a1} \cdot \gamma_1 = (N_1 - i_1 - l_1) \gamma_1, \Rightarrow (i_1 + l_1) \leq N_1, \quad (2)$$

$$\lambda_2(i_2, l_2) = N_{a2} \cdot \gamma_2 = (N_2 - i_2 - l_2) \gamma_2, \Rightarrow (i_2 + l_2) \leq N_2$$

где N_{a1}, N_{a2} — количество активных абонентов, создающих в текущем состоянии соответствующий поток заявок в СК;

$$N_{a1} = (N_1 - i_1 - l_1), \quad N_{a2} = (N_2 - i_2 - l_2). \quad (3)$$

Так как заявки на обслуживание попадают в систему через СК, интенсивности соответствующих потоков на входе модели будут отличаться от приведенных в выражениях (2, 3). Для их расчета зададим следующие параметры.

Пусть СК функционирует на основе синхронного протокола случайного множественного доступа (СМД) [2, 12, 16]. В настоящее время известно и хорошо исследовано множество таких протоколов, они получили широкое распространение и обладают лучшими характеристиками по сравнению с асинхронными. Для поддержания высокой эффективности использования канала при изменении интенсивности входного потока, в СК реализована процедура оптимального параметрического управления. Тогда относительная пропускная способность, равная средней скорости передачи по каналу, будет постоянной и максимальной для данного протокола при достаточной первичной нагрузке [6, 16, 17]. Для СК, под который выделена 1 к.е., $C = C_{\text{оптимальное}} = C_0$. Соответственно, если под СК выделено M единиц канального ресурса, $C = M \cdot C_0$.

Пусть C_1, C_2 — пропускные способности канала по соответствующему потоку. Независимо от конкретного протокола, несложно показать, что

$$C = M \cdot C_0 = C_1 + C_2. \quad (4)$$

Приняв длительность цикла передачи (временного такта) равной единице без потери общности результатов и переходя к первичной активности абонентов [5, 16], выраженной через вероятность генерации заявки в очередном кадре, получим:

$$p_1 = 1 - e^{-\gamma_1}, p_2 = 1 - e^{-\gamma_2}. \quad (5)$$

Основным недостатком существующих математических моделей протоколов СМД в условиях ограниченного множества абонентов является их резкое усложнение и увеличение вычислительных ресурсов, необходимых для расчетов, при возрастании числа входных потоков и количества абонентов, создающих эти потоки [4, 14]. Следовательно, невозможно напрямую использовать такие математические модели как составную часть комплексной модели исследуемой системы. В рамках решаемой задачи достаточно с допустимой погрешностью определить пропускную способность и время задержки передачи требования в СК для каждого потока.

Проведенные для различных протоколов СМД исследования показывают, что для выбранной модели входного потока при условии поддержания канала в оптимальном режиме с высокой точностью (погрешность не более 5%) выполняется соотношение:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{p_1 \cdot N_{a1}}{p_2 \cdot N_{a2}}. \quad (6)$$

Будем полагать, что при падении первичной нагрузки в служебном канале ниже оптимального (максимального) значения пропускной способности, время задержки будет составлять приблизительно один такт (непосредственно на передачу), а пропускная способность СК будет примерно равна первичной нагрузке в нем. Тогда с учетом (4–6) получим:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= M \cdot C_0 \cdot \frac{p_1 \cdot N_{a1}}{p_1 \cdot N_{a1} + p_2 \cdot N_{a2}} \\ C_2 &= M \cdot C_0 \cdot \frac{p_2 \cdot N_{a2}}{p_1 \cdot N_{a1} + p_2 \cdot N_{a2}} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{при } p_1 \cdot N_{a1} + p_2 \cdot N_{a2} > M \cdot C_0 \\ C_1 &= p_1 \cdot N_{a1}, \quad C_2 = p_2 \cdot N_{a2}, \\ \text{при } p_1 \cdot N_{a1} + p_2 \cdot N_{a2} \leq M \cdot C_0 \end{aligned}$$

Значения C_1 и C_2 можно рассматривать как интенсивности входных потоков для рассматриваемой математической модели [7, 14]:

$$\lambda_{11} = C_1, \quad \lambda_{12} = C_2$$

Используя известные соотношения из [4, 6] с учетом (7), получим следующие выражения для времени задержки (передачи) в СК:

$$\left. \begin{aligned} T_{1СК} &= \frac{p_1 \cdot N_{a1} + p_2 \cdot N_{a2} - M \cdot C_0}{p_1 \cdot M \cdot C_0} + 1 \\ T_{2СК} &= \frac{p_1 \cdot N_{a1} + p_2 \cdot N_{a2} - M \cdot C_0}{p_2 \cdot M \cdot C_0} + 1 \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

при $p_1 \cdot N_{a1} + p_2 \cdot N_{a2} > M \cdot C_0$

$$T_{1СК} = T_{2СК} = T_{СК} = 1, \quad \text{при } p_1 \cdot N_{a1} + p_2 \cdot N_{a2} \leq M \cdot C_0$$

Среднее время передачи требования на предоставление КР по СК находится как математическое ожидание по всем состояниям системы:

$$\bar{T}_{1СК} = \sum_{(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \in S} p(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \cdot T_{1СК} \quad (9)$$

$$\bar{T}_{2СК} = \sum_{(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \in S} p(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \cdot T_{2СК}$$

Качество обслуживания трафика реального времени оценивается по следующим показателям [8, 10, 13, 14]:

– среднее число заявок первого потока, находящихся на обслуживании

$$I_1 = \sum_{(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \in S} p(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \cdot i_1; \quad (10)$$

– средний объем канального ресурса, занятый обслуживанием заявок первого потока

$$m_1 = I_1 \cdot b_1; \quad (11)$$

– средняя длина очереди

$$L_1 = \sum_{(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \in S} p(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \cdot l_1; \quad (12)$$

– среднее время обработки (нахождения в системе) заявки первого потока (определяется по формуле Литтла)

$$\bar{T}_{1\text{ид}} = \frac{I_1 + L_1}{\lambda_{11}}; \quad (13)$$

где λ_{11} — средняя интенсивность заявок первого потока,

$$\lambda_{11} = \sum_{(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \in S} p(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \cdot \lambda_{11}; \quad (14)$$

– доля заявок первого потока, потерянная вследствие неудачного завершения времени ожидания,

$$\pi_\sigma = \frac{\sigma}{\lambda_{11}} \cdot \sum_{(i_1(t), l_1(t), i_2(t)) \in S} p(i_1(t), l_1(t), i_2(t)) \quad (15)$$

Для трафика данных, помимо показателей (10–13) дополнительно введем b_2 — среднее число к.е., занятых обслуживанием заявок второго потока,

$$\bar{b}_2 = \frac{\sum_{(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \in S} p(i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \cdot \mu_2(i_2, f)}{I_2 \cdot \mu_{02}} \quad (16)$$

Объединив выражения (10–14, 8, 9), получим:

$$\bar{T}_{1i\dot{a}\dot{o}} = \frac{\sum_{(i_1, l_1, i_2, l_2) \in S} P(i_1, l_1, i_2, l_2) \cdot i_1 + \sum_{(i_1, l_1, i_2, l_2) \in S} P(i_1, l_1, i_2, l_2) \cdot l_1}{\sum_{(i_1, l_1, i_2, l_2) \in S} P(i_1, l_1, i_2, l_2) \cdot \left(\frac{M \cdot C_0}{t_c} \cdot \frac{p_1 \cdot (N_1 - i_1 - l_1)}{p_1 \cdot (N_1 - i_1 - l_1) + p_2 \cdot (N_2 - i_2 - l_2)} \right)} \quad (17)$$

$$\bar{T}_{2i\dot{a}\dot{o}} = \frac{\sum_{(i_1, l_1, i_2, l_2) \in S} P(i_1, l_1, i_2, l_2) \cdot i_2 + \sum_{(i_1, l_1, i_2, l_2) \in S} P(i_1, l_1, i_2, l_2) \cdot l_2}{\sum_{(i_1, l_1, i_2, l_2) \in S} P(i_1, l_1, i_2, l_2) \cdot \left(\frac{M \cdot C_0}{t_c} \cdot \frac{p_2 \cdot (N_2 - i_2 - l_2)}{p_1 \cdot (N_1 - i_1 - l_1) + p_2 \cdot (N_2 - i_2 - l_2)} \right)}$$

Система уравнений равновесия

Для расчета введенных показателей эффективности и качества необходимо составить и решить систему уравнений равновесия. Существование стационарного режима обеспечивается заданными ограничениями. В рассматриваемой модели из состояния (i_1, l_1, i_2, l_2) возможны следующие переходы $r(t)$:

Из состояния (i_1, l_1, i_2, l_2) (рис. 2):

В состояние $(i_1 - 1, l_1, i_2, l_2) \leftarrow \frac{\mu_1 \cdot i_1}{(l_1=0, l_2=0)}$ переход осуществляется по завершении обслуживания заявки ТРВ при отсутствии в очереди заявок других потоков.

В состоянии $(i_1, l_1 - 1, i_2, l_2) \leftarrow \frac{(\mu_1 \cdot i_1 + \sigma \cdot l_1)}{(l_1 \neq 0)}$ переход осуществляется или при успешном завершении обслуживания заявки ТРВ (при этом на ее место встает очередная заявка из очереди ТРВ), или при отказе от обслуживания заявки соответствующего потока, находящейся в очереди, вследствие превышения интервала ожидания.

В состоянии $(i_1, l_1 + 1, i_2, l_2) \leftarrow \frac{\lambda_1(i_1, l_1)}{(w+i_2+b_1 > V)}$ переход осуществляется при поступлении очередной заявки ТРВ и отсутствии достаточного свободного КР для ее обслуживания.

В состоянии $(i_1 + 1, l_1, i_2, l_2) \leftarrow \frac{\lambda_1(i_1, l_1)}{(w+i_2+b_1 \leq V)}$ переход осуществляется при поступлении очередной заявки ТРВ и наличии достаточного свободного КР для ее обслуживания.

В состоянии $(i_1, l_1, i_2 + 1, l_2) \leftarrow \frac{\lambda_2(i_2, l_2)}{(w+i_2+1 \leq V)}$ переход осуществляется при поступлении очередной заявки ТД и наличии достаточного свободного КР для ее обслуживания.

В состоянии $(i_1, l_1, i_2, l_2 + 1) \leftarrow \frac{\lambda_2(i_2, l_2)}{(w+i_2+1 > V)}$ переход осуществляется при поступлении очередной заявки ТД и отсутствии достаточного свободного КР для ее обслуживания.

В состоянии $(i_1, l_1, i_2 - 1, l_2) \leftarrow \frac{\mu_2(i_2, f)}{((l_1=0) \text{ or } (w+i_2+b_1-1 > V), l_2=0)}$ переход осуществляется при завершении обслуживания заявки ТД и пустой очереди соответствующего потока, при этом очередь заявок ТРВ тоже нулевая либо свободного КР недостаточно, чтобы начать обслуживание очередной заявки первого потока.

В состоянии

$(i_1, l_1, i_2, l_2 - 1) \leftarrow \frac{\mu_2(i_2, f)}{(l_2 \neq 0, (w+i_2+b_1-1 > V) \text{ or } (l_1=0))}$ переход

осуществляется при завершении обслуживания заявки ТД (при этом на ее место встает новая из очереди ТД), при условии, что освободившийся КР не может быть выделен очередной заявке ТРВ.

В состоянии

$(i_1 + 1, l_1 - 1, i_2 - 1, l_2) \leftarrow \frac{\mu_2(i_2, f)}{(w+i_2+b_1-1=V, l_1 \neq 0)}$ переход

осуществляется при завершении при завершении обслуживания заявки ТД и принятии на обслуживание очередной заявки ТРВ, имеющей приоритет, при условии достаточности КР.

В состоянии $(i_1 - 1, l_1, i_2 + a, l_2 - a) \leftarrow \frac{\mu_1 \cdot i_1}{(l_1=0, l_2 \neq 0)}$

переход осуществляется при завершении обслуживания заявки ТРВ и пустой очереди соответствующего потока, при этом в зависимости от длины очереди ТД на обслуживание будет принято от 1 до b_1 заявок второго потока.

В состоянии (i_1, l_1, i_2, l_2) (рис. 3):

Из состояния $(i_1 - 1, l_1, i_2, l_2) \xrightarrow{\frac{\lambda_1(i_1-1, l_1)}{(w+i_2+b_1 \leq V)}}$ переход осуществляется при поступлении очередной заявки ТРВ и наличии достаточного свободного КР для ее обслуживания.

Из состояния $(i_1, l_1 - 1, i_2, l_2) \xrightarrow{\frac{\lambda_1(i_1-1, l_1)}{(w+i_2+b_1 > V)}}$ переход осуществляется при поступлении очередной заявки ТРВ и отсутствии достаточного свободного КР для ее обслуживания.

Из состояния $(i_1, l_1 + 1, i_2, l_2) \xrightarrow{\frac{(\mu_1 \cdot i_1 + \sigma \cdot (l_1+1))}{(l_1 \neq 0)}}$ переход осуществляется или при успешном завершении обслуживания заявки ТРВ (при этом на ее место встает очередная заявка из очереди ТРВ), или при отказе от обслуживания заявки соответствующего потока, находящейся в очереди, вследствие превышения интервала ожидания.

Из состояния $(i_1 + 1, l_1, i_2, l_2) \xrightarrow{\frac{\mu_1 \cdot (i_1+1)}{(l_1=0, l_2=0)}}$ переход осуществляется по завершении обслуживания заявки ТРВ при отсутствии в очереди заявок других потоков.

Из состояния

$(i_1, l_1, i_2 + 1, l_2) \xrightarrow{\frac{\mu_2(i_2+1, f)}{((l_1=0) \text{ or } (w+i_2+b_1 > V), l_2=0)}}$ переход

осуществляется при завершении обслуживания заявки ТД и пустой очереди соответствующего потока, при этом очередь заявок ТРВ тоже нулевая либо свободного КР недостаточно, чтобы начать обслуживание очередной заявки первого потока.

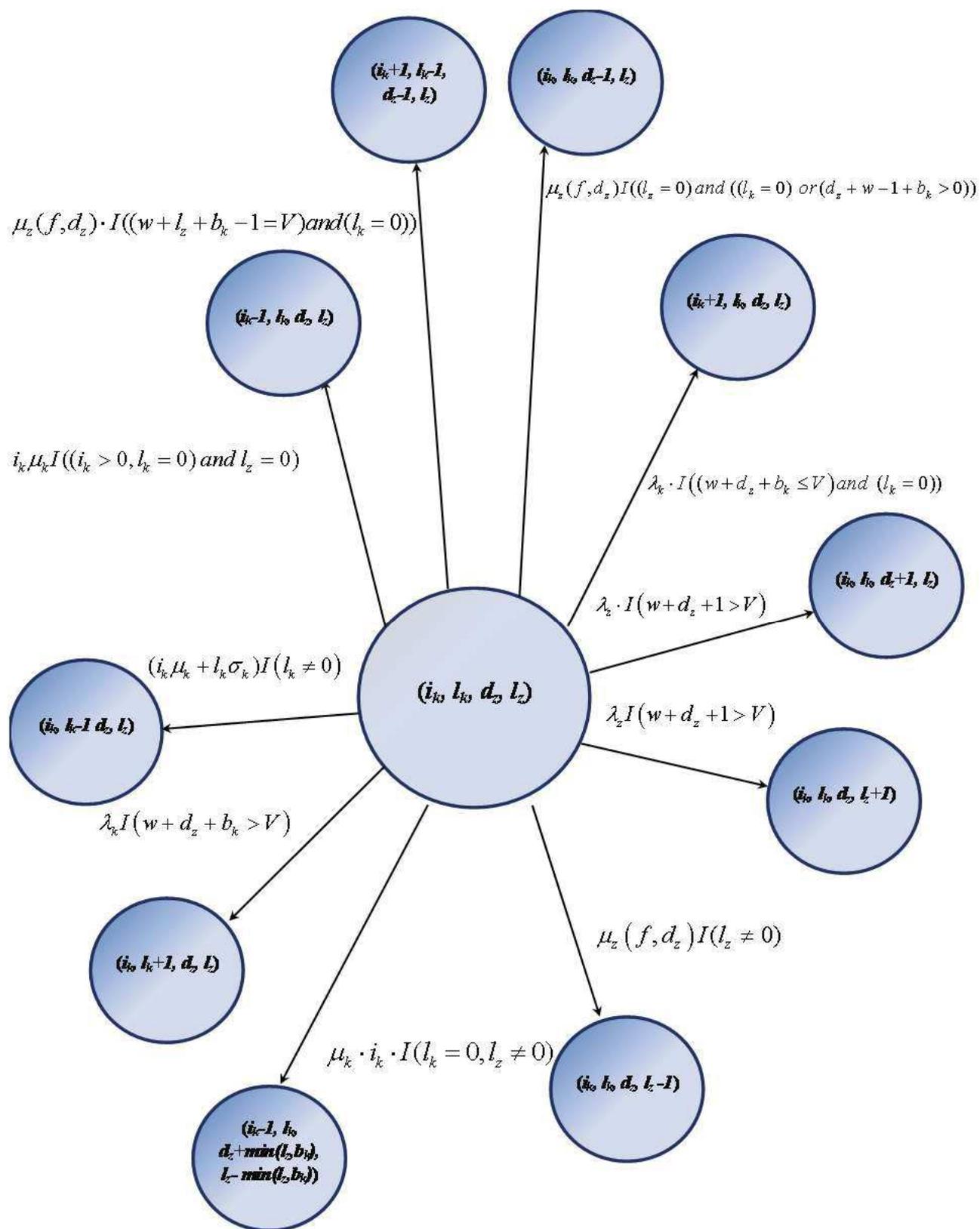


Рис. 2. Возможные переходы системы из текущего состояния

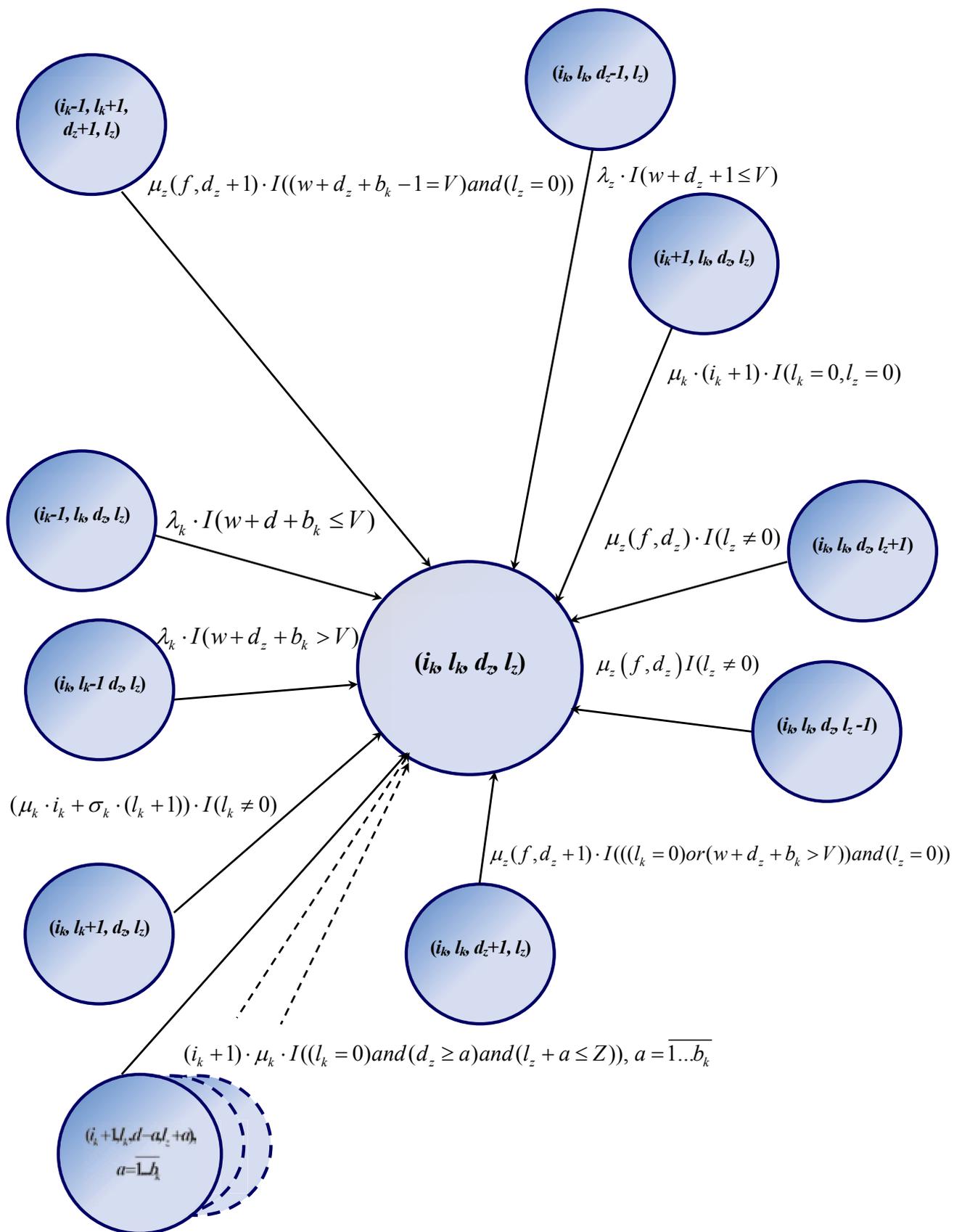


Рис. 3. Возможные переходы системы в текущее состояние

Из состояния

$$(i_1, l_1, i_2, l_2 + 1) \xrightarrow{\frac{\mu_2(i_2, f)}{((w+i_2+b_1-1 > V) \text{ or } (l_1=0), l_2 \neq 0)}} \text{переход}$$

осуществляется при завершении обслуживания заявки ТД (при этом на ее место встает новая из очереди ТД), при условии, что освободившийся КР не может быть выделен очередной заявке ТРВ.

Из состояния $(i_1, l_1, i_2 - 1, l_2) \xrightarrow{\frac{\lambda_{r_2}(i_2-1, l_2)}{(w+i_2 \leq V)}}$ переход осуществляется при поступлении очередной заявки ТД и наличии достаточного свободного КР для ее обслуживания.

Из состояния $(i_1, l_1, i_2, l_2 - 1) \xrightarrow{\frac{\lambda_{r_2}(i_2, l_2-1)}{(w+i_2+1 > V)}}$ переход осуществляется при поступлении очередной заявки ТД и отсутствии достаточного свободного КР для ее обслуживания.

Из состояния

$$(i_1 - 1, l_1 + 1, i_2 + 1) \xrightarrow{\frac{\mu_2(i_2+1, f)}{(w+i_2+b_1=V, l_1 \neq 0)}} \text{переход осу-}$$

ществляется при завершении при завершении обслуживания заявки ТД и принятии на обслуживание оче-

редной заявки ТРВ, имеющей приоритет, при условии достаточности КР.

Из состояний

$$(i_1 + 1, i_2 - a, l_2 + a) \xrightarrow{\frac{(i_1+1) \cdot \mu_1}{(l_1=0, i_2 \geq a, l_2+a \leq N_2)}} \text{переход}$$

осуществляется при завершении обслуживания заявки ТРВ и пустой очереди соответствующего потока, при этом в зависимости от длины очереди ТД на обслуживание будет принято от 1 до b_1 заявок второго потока.

Заметим, что при $l_2 \neq 0$ пропускная способность всех макроканалов, выделенных ТД, минимальна, т.е. для всех обслуживаемых заявок второго потока $b_2 = g_2 = 1$.

Чтобы в записи системы уравнений равновесия упростить вид состояний, из которых совершается переход, оставим в их обозначении только те компоненты, которые при этом изменяются. Система уравнений формируется путем последовательного перебора всех возможных состояний, для которых предварительно необходимо провести общую нумерацию:

$$\begin{aligned} & P(i_1, l_1, i_2, l_2) \cdot \{ \lambda_{r_1}(i_1, l_1) \cdot I(w+i_2+b_1 \leq V) + \lambda_{r_1}(i_1, l_1) \cdot I(w+i_2+b_1 > V) + \\ & + \lambda_{r_2}(i_2, l_2) \cdot I(w+i_2+1 \leq V) + \lambda_{r_2}(i_2, l_2) \cdot I(w+i_2+1 > V) + \mu_1 \cdot i_1 \cdot I(l_1=0, l_2=0) + \\ & + (\mu_1 \cdot i_1 + \sigma \cdot l_1) \cdot I(l_1 \neq 0) + \mu_2(i_2, f) \cdot I((l_1=0) \text{ or } (w+i_2+b_1-1 > V), l_2=0) + \\ & + \mu_2(i_2, f) \cdot I(l_1 \neq 0) + \mu_1 \cdot i_1 \cdot I(l_1=0, l_2 \neq 0) + \mu_2(i_2, f) \cdot I(w+i_2+b_1-1=V, l_2=0) \} = \\ & = \{ P(i_1-1) \cdot \lambda_{r_1}(i_1-1, l_1) \cdot I(w+i_2+b_1 \leq V) + P(l_1-1) \cdot \lambda_{r_1}(i_1-1, l_1) \cdot I(w+i_2+b_1 > V) + \\ & + P(i_2-1) \cdot \lambda_{r_2}(i_2-1, l_2) \cdot I(w+i_2+1 \leq V) + P(l_2-1) \cdot \lambda_{r_2}(i_2, l_2-1) \cdot I(w+i_2+1 > V) + \\ & + P(i_1+1) \cdot \mu_1 \cdot (i_1+1) \cdot I(l_1=0, l_2=0) + P(l_1+1) \cdot (\mu_1 \cdot i_1 + \sigma \cdot (l_1+1)) \cdot I(l_1 \neq 0) + \\ & + P(i_2+1) \cdot \mu_2(i_2+1, f) \cdot I((l_1=0) \text{ or } (w+i_2+b_1 > V), l_2=0) + \\ & + P(l_2+1) \cdot \mu_2(i_2, f) \cdot I(l_2 \neq 0) + P(i_1-1, l_1+1, i_2+1) \cdot \mu_2(i_2+1, f) \cdot I(w+i_2+b_1-1=V, l_2=0) + \\ & + \sum_{a=1 \dots b_1} P(i_1+1, i_2-a, l_2+a) \cdot (i_1+1) \cdot \mu_1 \cdot I(l_1=0, i_2 \geq a, l_2+a \leq N_2) \}, \quad (i_1(t), l_1(t), i_2(t), l_2(t)) \in S. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь $I(\cdot)$ — индикаторная функция, значение которой равно «1» при выполнении условия в скобках или «0» — в противном случае. Для значений $P(i_1, l_1, i_2, l_2)$ выполняется условие нормировки.

Эксперимент

В общем случае решение системы уравнений (17) может быть получено с помощью стандартных программных средств для ЭВМ численными методами [13]. Общее время обслуживания рассчитывается по выражению (1).

На рис. 4 и 5 приведены типовые графики зависимостей $\bar{T}_{\text{обсл.общ.}}$, $\bar{T}_{\text{СК}}$, $\bar{T}_{\text{обр}}$ от M для первого и второго потока заявок соответственно.

Ввиду сложности вывода точных аналитических зависимостей приведенные выше графики можно получить только путем последовательного решения

системы (17) для различных значений M . Из графиков видно, что функции $\bar{T}_{\text{обсл.общ.}}$ для обоих потоков имеют минимум в одной и той же точке, который может быть найден численными методами. Таким образом, существует решение рассматриваемой оптимизационной задачи по поиску оптимального распределения канального ресурса между служебными и рабочими каналами.

Как отмечалось выше, в процессе функционирования сети радиосвязи структура и характер абонентского трафика не являются стационарными, в частности, возможны значительные колебания интенсивности первичной нагрузки, кроме того, может меняться доступный объем распределяемого канального ресурса. На рис. 6 и 7 приводятся результаты исследования влияния указанных факторов на положение точки минимума функции $\bar{T}_{\text{обсл.общ.}}(M)$ для ТРВ, т.е. значения $\bar{T}_{\text{обсл.общ.}}^{\text{om}}$ и $M_{\text{СК}}^{\text{om}}$.

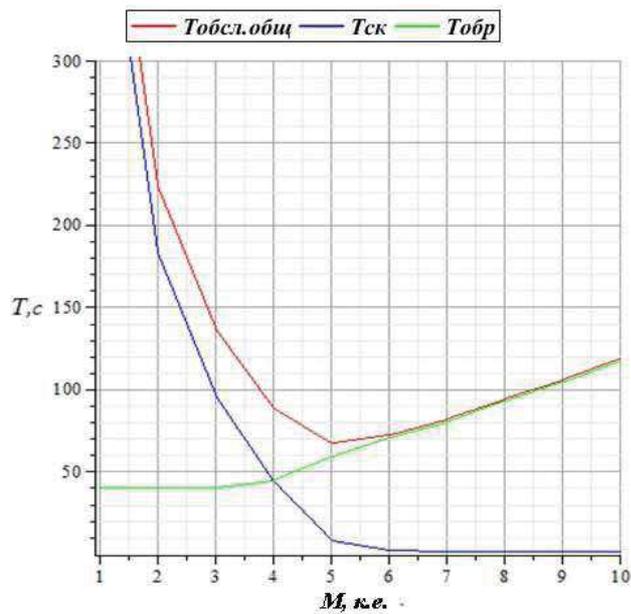


Рис. 4. Графики зависимостей времени обслуживания заявок трафика реального времени от величины КР, выделенного под СК

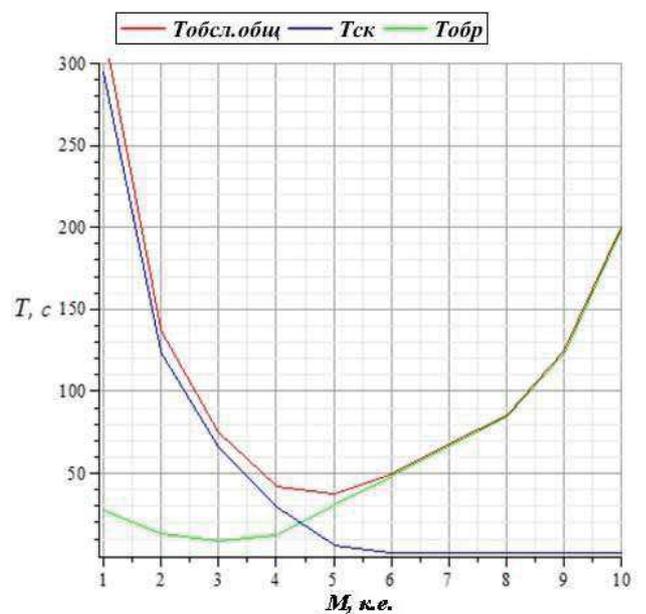


Рис. 5. Графики зависимостей времени обслуживания заявок трафика данных от величины КР, выделенного под СК

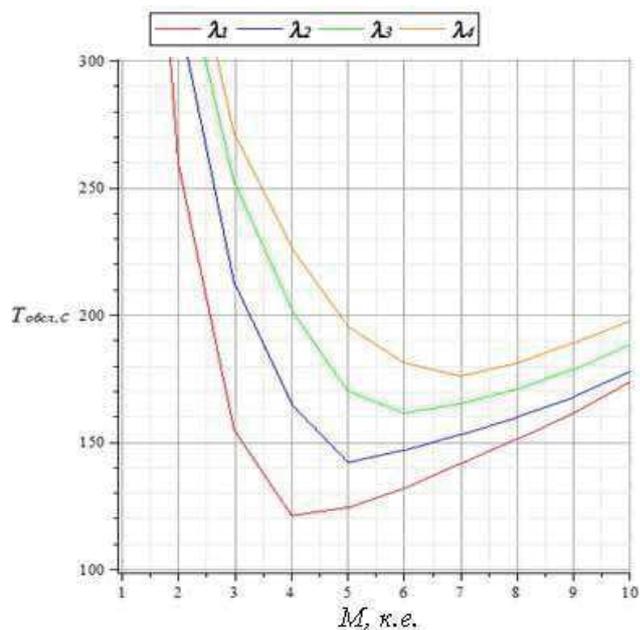


Рис. 6. Графики зависимости среднего времени обслуживания трафика реального времени от величины КР, выделенного под СК при различной первичной нагрузке

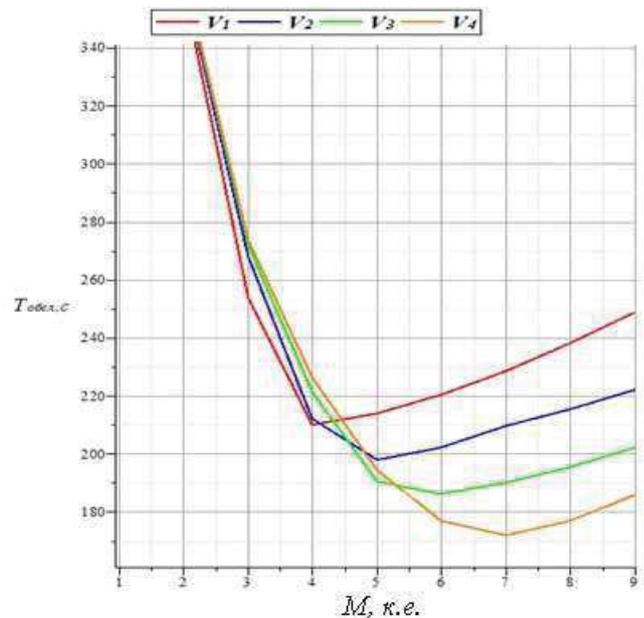


Рис. 7. Графики зависимости среднего времени обслуживания трафика реального времени от величины КР, выделенного под СК при различном объеме доступного КР

С ростом первичной нагрузки значение $M_{СК}^{opt}$, соответствующее оптимальному времени обслуживания абонентского трафика, также увеличивается — точка минимума смещается вправо. Очевидно, что при большей первичной нагрузке требуется бо-

лее высокая пропускная способность СК, при этом $T_{обсл.общ}^{opt}$ возрастает. Увеличение доступного КР сопровождается, во-первых, смещением точки минимума вправо, а во-вторых, уменьшением значения $T_{обсл.общ}^{opt}$.

Заключение

Для решения задачи оценки эффективности и качества информационного обмена в мультисервисной радиосети с предоставлением каналов по требованию разработана комплексная математическая модель, которая является объединением математических моделей двух подсистем: широковещательного служебного канала с тактированным случайным множественным доступом и подсистемы распределения рабочих каналов. Математическая модель служебного канала задает входную нагрузку для второй модели, текущее состояние которой, в свою очередь, оказывает воздействие на входную нагрузку в служебном канале. Так учитывается взаимное влияние двух фаз обслуживания абонентского трафика в сети радиосвязи.

На основе анализа большого числа результатов аналитического и имитационного моделирования были получены достаточно простые выражения, позволяющие в пределах погрешности 5–10% оценить пропускную способность и среднее время передачи для широкого набора протоколов синхронного случайного множественного доступа по каждой из групп разнородных абонентов, что обеспечило относительную простоту разработанной модели.

В качестве основы для построения аналитической модели подсистемы распределения рабочих каналов была использована *многопоточковая модель мультисервисной линии связи* с динамически изменяемой скоростью передачи данных, которая обеспечивает эффективное использование канального ресурса радиосети. Требуемые показатели определяются путем численного

решения системы уравнений равновесия, для которой составлены правила автоматизированного синтеза. Следует заметить, что предложенный подход к комплексному математическому описанию двухфазного обслуживания трафика позволяет легко изменить выбранную модель мультисервисной линии связи в соответствии со спецификой рассматриваемой радиосети.

Разработанный математический аппарат позволяет, в частности, рассчитать заданные показатели оперативности информационного обмена. Анализ результатов моделирования показал, что в радиосети с предоставлением каналов по требованию для фиксированных значений входных параметров существует оптимальное разделение общего ограниченного канального ресурса между служебными и рабочими каналами, при котором достигается *минимум среднего времени обслуживания* абонентского трафика. Длительность проведения необходимых расчетов на современных ЭВМ дает возможность напрямую использовать полученную модель при организации оперативного управления параметрами радиосети.

При изменении входной нагрузки и общего объема доступного канального ресурса радиосети требуемое количество служебных каналов, соответствующее оптимальному общему времени обслуживания абонентского трафика, также меняется. Следовательно, в условиях нестационарности первичной нагрузки и объема канального ресурса необходимо осуществлять динамическое перераспределение канального ресурса между служебными и рабочими каналами для поддержания оптимальной оперативности информационного обмена.

Литература

1. Андреев Г. И., Летунов В. В., Андреева Д. В. Эффективная спутниковая телесигнализация в подсистеме безопасности ГАС РФ «Правосудие» // Правовая информатика. 2017. № 1. С. 23–27. DOI: 10.21681/1994-1404-2017-1-23-27.
2. Григорьев, В. А., Лагутенко О. И., Распаев Ю. А. Сети и системы радиодоступа. М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
3. Деарт В. Ю. Мультисервисные сети связи. Транспортные сети и сети доступа. М.: Инсвязьиздат, 2007. – 166 с.
4. Ковальков Д. А., Крикунов А. А., Гаврилин Е. А., Ломов П. С. Расчет характеристик протокола случайного множественного доступа в широковещательной радиосети в условиях различного приоритета обслуживаемых абонентов // Труды Всеросс. конф. (с междунар. участием) «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2019» (29–31 мая 2019 г.). Сер. «Научные конференции, посвященные дню Радио». М.: Моск. НТОРЭС им. А. С. Попова, 2019. С. 195–200.
5. Крикунов А. А., Ковальков Д. А. Расчёт показателей качества обслуживания в радиосети декаметрового диапазона на основе многопоточковой модели с конечным числом абонентов и повтором заблокированных заявок // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2011. № 3. С. 72–76.
6. Крикунов А. А., Ковальков Д. А., Гаврилин Е. А. Оптимизация параметров протокола доступа в пакетной радиосети с интеграцией служб // Труды Междунар. симп-ма «Надежность и качество» / Пензенский гос. ун-т. Том 1. Пенза: ПГУ, 2017. С. 91–94. ISSN. 2220-6418.
7. Крикунов А. А., Лапшин В. Ю., Ковальков Д. А., Шиманов С. Н. Оптимизация длительности обслуживания трафика в мультисервисной радиосети с динамическим выделением каналов по требованию // Известия института инженерной физики. 2012. № 3 (25). С. 49–53.
8. Крылов В. В. Теория телетрафика и ее приложения. СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2005. 288 с.

9. Ловцов Д. А., Лобан А. В. Развитие информационно-телеметрического обеспечения наземно-космической связи в ГАС РФ «Правосудие» // Правовая информатика. 2019. № 1. С. 29–35. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-1-29-35.
10. Наумов В. А., Самуйлов К. Е., Яркина Н. В. Теория телетрафика мультисервисных сетей связи. М.: Изд-во РУДН, 2007. 191 с.
11. Овчинников А. М. Открытые стандарты цифровой транкинговой радиосвязи: серия изданий «Связь и бизнес». М.: МЦНТИ, «Мобильные коммуникации», 2000. 166 с.
12. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 1104 с.
13. Степанов С. Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. М.: Эко-Трендз, 2010. 392 с.
14. Степанов С. Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 867 с.
15. Сухов А. В. Оценка информационного ресурса радионавигационных станций в условиях помех от средств мобильной связи // Правовая информатика. 2019. № 1. С. 36–45. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-1-36-45.
16. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. СПб.: Питер, 2012. 960 с.
17. Шиманов С. Н., Ковальков Д. А., Крикунов, А. А. Оценка интенсивности абонентской нагрузки в ширококонтинентальной радиосети // Всеросс. конф. «Современные технологии обработки сигналов» (СТОС-2019). Сер. науч. Всеросс. конф.-ции / РНТОРЭС им. А.С. Попова. Вып. VII. М.: «БРИС-М», 2019. С. 52–57. ISBN 978-5-905278-39-6.

Рецензент: **Сухов Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-производственного объединения «Специальная техника и связь», Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: avs57@mail.ru

EFFICIENCY OF INFORMATION EXCHANGE IN A MULTI-SERVICE RADIO NETWORK WITH ON-DEMAND CHANNEL ALLOCATION

Sergey Shimanov, Dr. Sc. (Technology), Professor, Professor of the Department of Automated Combat Control Systems of the branch of the Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces, Moscow Region, Serpukhov, Russian Federation.

E-mail: 41kaf_rabota@mail.ru

Alexey Krikunov, Ph.D. (Technology), Doctoral student of the branch of the Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces, Moscow Region, Serpukhov, Russian Federation.

E-mail: 41kaf_rabota@mail.ru

Keywords: multiservice radio network, radio communication network, multithreaded model, provision of channels on demand, heterogeneous traffic, two-phase traffic service, random multiple access, trunked communication system, non-stationary subscriber load, dynamic distribution of the channel resource, efficiency of information exchange.

Abstract.

Purpose of the article: is to improve the scientific and methodological apparatus for evaluating and optimizing the characteristics of multiservice radio communication networks in the context of the dynamics of subscriber traffic and available channel resource.

Methods used: methods of the theory of teletraffic, methods of analytical and simulation modeling, probability theory and the theory of Markov processes.

Results: a complex mathematical model for servicing subscriber traffic in a multiservice radio network with on-demand channel allocation in conditions of a finite number of subscribers and a small channel resource is developed; the resulting model allows us to take into account the mutual dependence of the durations of various service phases: the stage of sending a request via a random access channel to the main station and the stage of direct transmission of user traffic according to the accepted service algorithm; It is shown that there is an optimal distribution of the channel resource between the service and working channels, which depends on the current load and the available channel capacity of the radio network.

References

1. Andreev G. I., Letunov V. V., Andreeva D. V. E`ffektivnaia sputneykovaia tele-signalizatsiia v podsysteme bezopasnosti GAS RF «Pravosudie» // Pravovaia informatika. 2017. № 1. S. 23-27. DOI: 10.21681/1994-1404-2017-1-23-27.
2. Grigor`ev, V. A., Lagutenko O. I., Raspaev Iu. A. Seti i sistemy` radiodostupa. M.: E`ko-Trendz, 2005. 384 s.
3. Deart V. Iu. Mul`tiservisny`e seti sviazi. Transportny`e seti i seti dostupa. M.: Insviaz`izdat, 2007. 166 s.
4. Koval`kov D. A., Krikunov A. A., Gavrilin E. A., Lomov P. S. Raschet harakteristik protokola sluchai`nogo mnozhestvennogo dostupa v shirokoveschchatel`noi` radioseti v usloviakh razlichnogo prioriteta obsluzhivaemy`kh abonentov // Trudy` Vseross. konf. (s mezhdunar. uchastiem) «Radioe`lektronny`e ustroi`stva i sistemy` dlia infokommunikatsionny`kh tekhnologii` – RE`US-2019» (29–31 maia 2019 g.). Ser. «Nauchny`e konferentsii, posviashchenny`e dniu Radio». M.:Mosk. NTORE`S im. A. S. Popova, 2019. S. 195-200.
5. Krikunov A. A., Koval`kov D. A. Raschyot pokazatelei` kachestva obsluzhivaniia v radioseti dekametrovogo diapazona na osnove mnogopotokovoi` modeli s konechny`m chislom abonentov i povtorom zablokirovanny`kh zaiavok // Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionny`e sistemy`. 2011. № 3. S. 72-76.
6. Krikunov A. A., Koval`kov D. A., Gavrilin E. A. Optimizatsiia parametrov protokola dostupa v paketnoi` radioseti s integratsiei` sluzhb // Trudy` Mezhdunar. simp-ma «Nadezhnost` i kachestvo» / Penzenskii` gos. un-t. Tom 1. Penza: PGU, 2017. S. 91-94. ISS. 2220-6418.
7. Krikunov A. A., Lapshin V. Iu., Koval`kov D. A., Shimanov S. N. Optimizatsiia dlitel`nosti obsluzhivaniia trafika v mul`tiservisnoi` radioseti s dinamicheskim vy`deleniem kanalov po trebovaniu // Izvestiia instituta inzhenernoi` fiziki. 2012. № 3 (25). S. 49-53.
8. Kry`lov V. V. Teoriia teletrafika i ee prilozheniia. SPb.: BKHV-Sankt-Peterburg, 2005. 288 s.
9. Lovtsov D. A., Loban A. V. Razvitie informatcionno-telemetricheskogo obespecheniia nazemno-kosmicheskoi` sviazi v GAS RF «Pravosudie» // Pravovaia informatika. 2019. № 1. S. 29-35. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-1-29-35.
10. Naumov V. A., Samui`lov K. E., Iarkina N. V. Teoriia teletrafika mul`tiservisny`kh setei` sviazi. M.: Izd-vo RUDN, 2007. 191 s.
11. Ovchinnikov A. M. Otkry`tye standarty` tcifrovoy` trankingovoy` radiosviazi: seriia izdaniy` «Sviaz` i biznes». – M.: MTCNTI, «Mobil`ny`e kommunikatsii», 2000. 166 s.
12. Scliar B. Tcifrovaia sviaz`. Teoreticheskie osnovy` i prakticheskoe primenenie. Izd. 2-e, ispr. M.: Izd. dom «Vil`iams», 2004. 1104 s.
13. Stepanov S. N. Osnovy` teletrafika mul`tiservisny`kh setei`. M.: E`ko-Trendz, 2010. 392 s.
14. Stepanov S. N. Teoriia teletrafika: kontseptcii, modeli, prilozheniia. M.: Goriachaia liniia-Telekom, 2015. 867 s.
15. Suhov A. V. Ocenka informatcionnogo resursa radionavigatsionny`kh stantsii` v usloviakh pomekh ot sredstv mobil`noi` sviazi // Pravovaia informatika. 2019. № 1. S. 36-45. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-1-36-45.
16. Tanenbaum E`., Ue`zeroll D. Komp`iuterny`e seti. 5-e izd. SPb.: Peter, 2012. 960 s.
17. Shimanov S. N., Koval`kov D. A., Krikunov, A. A. Ocenka intensivnosti abonentskoi` nagruzki v shirokoveschchatel`noi` radioseti // Vseross. konf. «Sovremenny`e tekhnologii obrabotki signalov» (STOS-2019). Ser. nauch. vseross. konf-tcii / RNTORE`S im. A.S. Popova. Vy`p. VII. M.: «BRIS-M», 2019. S. 52-57. ISBN 978-5-905278-39-6.