

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СХЕМ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ LSA С ПРЕРЫВАНИЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕТИ 3GPP LTE***Аннотация**

В наши дни мобильные операторы все чаще сталкиваются с проблемой нехватки радиоресурсов, необходимых для качественного обслуживания пользователей. Одним из возможных решений этой проблемы является система совместного использования лицензированного спектра частот LSA (Licensed Shared Access), предложенная ETSI. В статье предложены две возможные модели схем управления доступом к радиоресурсам беспроводной сети LTE с системой LSA, представленные в виде конечных СМО с надежными (полоса индивидуального использования) и ненадежными (полоса совместного использования или LSA-полоса) приборами. Для обеих моделей рассмотрен нетолерантный к задержкам трафик. Основные показатели эффективности – показатели качества обслуживания (QoS) – обеих рассмотренных моделей схем управления доступом – вероятность того, что запрос пользователя на предоставление услуги будет заблокирован, вероятность того, что обслуживание запроса пользователя на полосе совместного использования будет прервано, вероятность того, что обслуживание пользовательского запроса, поступившего на полосу совместного использования, будет продолжено на полосе индивидуального использования. Для проведения численного анализа в качестве примера применения системы совместного использования лицензированного спектра частот LSA рассмотрен сценарий воздушной телеметрии.

Ключевые слова

LTE; совместное использование радиочастот; LSA; СМО; рекуррентный алгоритм; прерывание обслуживания.

Markova E.V.¹, Poluektov D.S.¹, Ostriкова D.U.¹, Gudkova I.A.^{1,2}

¹ Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

² Federal Research Center Computer Science and Control of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ON COMPARATIVE ANALYSIS OF SHARED ACCESS SCHEME MODELS WITH SERVICE INTERRUPTION IN 3GPP LTE NETWORK WITH LSA FRAMEWORK**Abstract**

Nowadays, mobile operators are faced with a problem of shortage of radio resources required for qualitative customer services. One of the possible solutions to this problem is the framework named LSA (Licensed Shared Access), which is proposed by ETSI. In this paper we describe two possible Radio Admission Control scheme models of the 3GPP LTE cellular network within LSA framework as finite queuing systems with reliable (single-tenant band) and unreliable (multi-tenant band) servers. For both models, we consider the traffic, which is intolerant to delays. The main models quality of service (QoS) measures are the blocking probability (probability, that a target user's request will be blocked), probability of service interruption (probability, that for a target user's request processed on the multi-tenant band the service will be interrupted), and probability of service band changing (probability that a target user's request processed on the multi-tenant band will continue its service on the single-tenant band). For the numerical analysis, an aeronautical telemetry scenario was considered as an example of the application of the LSA framework.

* Труды II Международной научной конференции «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» (Convergent'2017), Москва, 24-26 ноября, 2017

Proceedings of the II International scientific conference "Convergent cognitive information technologies" (Convergent'2017), Moscow, Russia, November 24-26, 2017

Keywords

LTE; LSA; queuing system; recursive algorithm; interruption probability, service band changing.

Введение

Согласно прогнозам компании Cisco Systems, спрос на услуги мобильной широкополосной связи, а также объем трафика увеличиваются с каждым годом [1,2]. Одновременно растут требования пользователей к качеству предоставляемых услуг [3,4]. В связи с этим, мобильные операторы пытаются привлечь дополнительные ресурсы, чтобы предоставлять свои услуги пользователям на требуемом уровне. В настоящее время, при поддержке Европейской комиссии, разрабатывается система совместного использования частотного спектра LSA [5-7], которая позволяет более эффективно использовать имеющиеся радиоресурсы. Принцип работы системы состоит в том, что владелец лицензированного частотного спектра сдает в аренду оператору-арендатору радиоресурсы в те моменты времени, в которые они ему не требуются. Абсолютный приоритет доступа к этим ресурсам имеет их владелец. Для оператора они временно доступны, что может приводить к прерыванию обслуживания пользователей при возврате ресурсов их владельцу. Следовательно, с точки зрения оператора, наибольший интерес представляет анализ именно показателей прерывания обслуживания. Ввиду изложенного, актуальной является задача оптимального распределения нагрузки между ресурсами совместного и индивидуального использования оператора, при котором показатели прерывания обслуживания пользователей были бы минимальны.

В статье предложены две схемы совместного использования ресурсов оператором-арендатором и владельцем. Арендатор имеет доступ как к полосе индивидуального использования – собственной полосе, доступной ему непрерывно, так и к полосе совместного использования, которую он берет в аренду и использует совместно с владельцем. Обе модели реализованы на основе прерывания обслуживания пользователей арендованной полосы [3], в случае необходимости освобождения ресурсов для владельца. При этом оператор перенаправляет заявки, обслуживаемые на арендованной полосе, на полосу индивидуального использования, если там имеются свободные ресурсы, если свободных ресурсов нет, то обслуживание заявок прерывается. Различие моделей заключается в том, что в первой модели заявки непрерывно обслуживаются на той полосе, ресурсы которой изначально заняты, а во второй – заявки, обслуживаемые на полосе совместного использования, перенаправляются на индивидуальную полосу, если на ней появляются свободные ресурсы.

В построенных моделях рассматривается трафик, не толерантный к задержкам. Модели с трафиком, толерантным к задержкам, ранее исследовались в [8,9]. В работе [10] рассмотрена политика снижения мощности на LSA полосе для уменьшения интерференции между владельцем и арендатором. Авторы [11] предложили математические модели, объединяющие теорию массового обслуживания и стохастическую геометрию, для анализа политики снижения мощности в сети LTE LSA.

Общее описание схем управления доступом к радиоресурсам сети

Основные предположения и параметры

Рассмотрим соту мобильной мультисервисной сети с системой LSA и двумя полосами – индивидуального и совместного использования. Пусть емкость полосы индивидуального использования равна C_1 , а полосы совместного использования – C_2 . Полоса совместного использования может работать в двух режимах s , $s = 1, 2$: если $s = 1$, то полоса находится в активном режиме, если $s = 0$ – в пассивном. Предположим, что полоса совместного использования переходит в пассивный режим с интенсивностью α , возвращение в активный режим происходит с интенсивностью β , т.е. среднее время доступности или недоступности полосы совместного использования для оператора-арендатора определяется как α^{-1} или β^{-1} соответственно. Эти временные интервалы распределены экспоненциально.

Пусть пользователям предоставляется только одна услуга, генерирующая потоковый трафик. Интенсивность поступления запросов является пуассоновской и равна λ . Среднее время обслуживания одного запроса на полосе индивидуального или совместного использования распределено экспоненциально со средними μ_1^{-1} или μ_2^{-1} соответственно. В соответствии с особенностями потокового трафика каждый запрос обслуживается на гарантированной скорости c . Для упрощения положим $c = 1$. С учетом этого максимальное количество пользователей на полосе индивидуального или совместного использования равно C_1 или C_2 соответственно. Сведем все необходимые обозначения в таблицу 1.

Таблица 1. Параметры системы

Обозначение	Описание
C_1	Максимальное количество пользователей на полосе индивидуального использования

C_2	Максимальное количество пользователей на полосе совместного использования
μ_1^{-1}	Среднее время обслуживания одного запроса на полосе индивидуального использования
μ_2^{-1}	Среднее время обслуживания одного запроса пользователя на полосе совместного использования
$s \in \{0,1\}$	Состояние полосы совместного использования: $s = 1$, если полоса находится в активном режиме, $s = 0$, если полоса находится в пассивном режиме
α	Интенсивность перехода полосы совместного использования в пассивный режим
β	Интенсивность перехода полосы совместного использования в активный режим
c	Гарантированная скорость передачи данных
n_1	Количество запросов, обслуживаемых на полосе индивидуального использования
n_2	Количество запросов, обслуживаемых на полосе совместного использования

Сценарий ограничения интерференции

Для ограничения интерференции, создаваемой пользователями мобильного оператора-арендатора на полосе совместного использования, рассмотрим сценарий прерывания обслуживания пользователей на этой полосе. Для более ясного понимания рассматриваемой политики определим правила приема на обслуживание запросов пользователей. Эти правила являются общими для обеих рассматриваемых далее в статье (раздел 3) моделей схем управления доступом к радиоресурсам сети. При поступлении нового запроса возможны следующие сценарии:

- запрос будет принят на обслуживание на полосе индивидуального использования, если количество пользователей на этой полосе меньше C_1 ;
- запрос будет принят на обслуживание на полосе совместного использования, если число пользователей на полосе индивидуального использования равно C_1 , а полоса совместного использования находится в активном режиме ($s = 1$) и количество пользователей на ней меньше C_2 ;
- в противном случае, запрос будет заблокирован.

В случае, когда владелец нуждается в ресурсах, полоса совместного использования переходит в пассивный режим, при этом возможны два случая:

- обслуживаемый на полосе совместного использования запрос продолжит свое обслуживание на полосе индивидуального использования, если количество пользователей на полосе индивидуального использования меньше C_1 ;
- в противном случае запрос, обслуживаемый на полосе совместного использования, будет прерван.

Далее перейдем к детальному описанию рассматриваемых в статье моделей схем управления доступом к радиоресурсам беспроводной мультисервисной сети.

Математические модели схем управления доступом к радиоресурсам сети

С учетом изложенного выше опишем исследуемые системы марковским процессом $\mathbf{X}(t) = (N_1(t), N_2(t), S(t), t \geq 0)$, где $N_1(t)$ – число пользователей на полосе индивидуального использования, $N_2(t)$ – число пользователей на полосе совместного использования, $S(t)$ – состояние полосы совместного использования.

Рассмотрим первую и более простую модель схемы беспроводной сети с системой LSA. В этой модели запрос обслуживается на полосе, на которую он первоначально поступает, и может изменить полосу обслуживания, а именно полосу совместного использования, только тогда, когда полоса переходит в пассивный режим. Пространство состояний данной системы определяется следующим образом

$$\mathbf{X}_1 = \{(n_1, n_2, s) : s = 0, n_1 \in [0, C_1], n_2 = 0 \cup s = 1, n_1 \in [0, C_1], n_2 \in [0, C_2]\}. \quad (1)$$

Перейдем ко второй модели. В отличии от предыдущей модели, запрос, обслуживаемый на полосе совместного использования, продолжает свое обслуживание на полосе индивидуального использования, как только число пользователей на полосе индивидуального использования становится меньше C_1 . Таким образом, изменение полосы возможно не только тогда, когда полоса совместного использования переходит в пассивный режим. Пространство состояний второй модели имеет следующий вид

$$\mathbf{X}_2 = \{(n_1, n_2, s) : s = 0, n_1 \in [0, C_1], n_2 = 0 \cup s = 1, n_1 = C_1, n_2 \in [0, C_2]\}. \quad (2)$$

Системы уравнений равновесия

Диаграмма интенсивностей переходов для первой модели – модели с обслуживанием на первоначально выбранной полосе имеет следующий вид (Рис. 1).

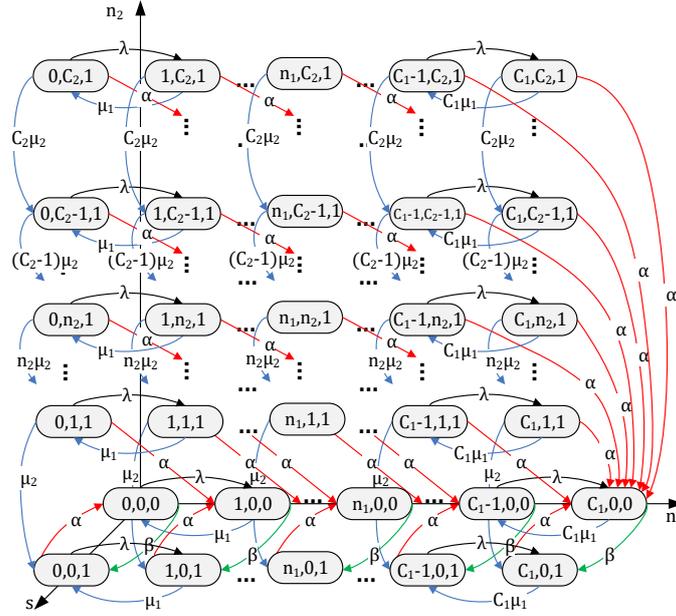


Рис. 1. Диаграмма интенсивностей переходов для модели с обслуживанием на первоначально выбранной полосе

Соответствующий марковский процесс, описывающий поведение системы, можно представить в виде системы уравнений равновесия

$$\begin{aligned} (\lambda + \beta)p_1(0,0,0) &= \mu_1 p_1(1,0,0) + \alpha p_1(0,0,1); \\ (\lambda + \alpha)p_1(0,0,1) &= \beta p_1(0,0,0) + \mu_1 p_1(1,0,1) + \mu_2 p_1(0,1,1); \end{aligned}$$

$$(\lambda + n_1 \mu_1 + \beta)p_1(n_1, 0,0) = \lambda p_1(n_1 - 1,0,0) + (n_1 + 1)\mu_1 p_1(n_1 + 1,0,0) + \alpha \sum_{m=0}^{n_1} p_1(n_1 - m, m, 1),$$

$$\begin{aligned} n_1 = 1, \dots, C_1 - 1; \\ (\lambda + n_1 \mu_1 + \alpha)p_1(n_1, 0,1) &= \lambda p_1(n_1 - 1,0,1) + (n_1 + 1)\mu_1 p_1(n_1 + 1,0,1) + \beta p_1(n_1, 0,0) + \mu_2 p_1(n_1, 1,1), \\ n_1 = 1, \dots, C_1 - 1; \end{aligned}$$

$$(\lambda + n_2 \mu_2 + \alpha)p_1(0, n_2, 1) = \mu_1 p_1(1, n_2, 1) + (n_2 + 1)\mu_2 p_1(0, n_2 + 1, 1), \quad n_2 = 1, \dots, C_2 - 1;$$

$$\begin{aligned} (\lambda + n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \alpha)p_1(n_1, n_2, 1) \\ = \lambda p_1(n_1 - 1, n_2, 1) + (n_1 + 1)\mu_1 p_1(n_1 + 1, n_2, 1) + (n_2 + 1)\mu_2 p_1(n_1, n_2 + 1, 1), \\ n_1 = 1, \dots, C_1 - 1, n_2 = 1, \dots, C_2 - 1 \end{aligned}$$

$$(C_1 \mu_1 + \beta)p_1(C_1, 0,0) = \lambda p_1(C_1 - 1,0,0) + \alpha \left(p_1(C_1, 0,1) + \sum_{m=1}^{C_2} (p_1(C_1, m, 1) + p_1(C_1 - m, m, 1)) \right);$$

$$(\lambda + C_1 \mu_1 + \alpha)p_1(C_1, 0,1) = \lambda p_1(C_1 - 1,0,1) + \beta p_1(C_1, 0,0) + \mu_2 p_1(C_1, 1,1);$$

$$\begin{aligned} (\lambda + C_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \alpha)p_1(C_1, n_2, 1) &= \lambda (p_1(C_1 - 1, n_2, 1) + p_1(C_1, n_2 - 1, 1)) + (n_2 + 1)\mu_2 p_1(C_1, n_2 + 1, 1), \\ n_2 = 1, \dots, C_2 - 1; \end{aligned}$$

$$(C_1 \mu_1 + C_2 \mu_2 + \alpha)p_1(C_1, C_2, 1) = \lambda (p_1(C_1 - 1, C_2, 1) + p_1(C_1, C_2 - 1, 1)),$$

где $p_1(n_1, n_2, s)$, $(n_1, n_2, s) \in \mathbf{X}_1$ – стационарное распределение вероятностей.

Обозначим $p_2(n_1, n_2, s)$, $(n_1, n_2, s) \in \mathbf{X}_2$ стационарное распределение вероятностей для второй модели – модели с предпочтительным обслуживанием на полосе индивидуального использования. На основе диаграммы интенсивностей переходов (Рис.2), выпишем систему уравнений равновесия для второй модели:

$$(\beta + \lambda)p_2(0,0,0) = \alpha p_2(0,0,1) + \mu_1 p_2(1,0,0);$$

$$(\beta + n_1 \mu_1 + \lambda)p_2(n_1, 0,0) = \lambda p_2(n_1 - 1,0,0) + \alpha p_2(n_1, 0,1) + (n_1 + 1)\mu_1 p_2(n_1 + 1,0,0), \quad n_1 = 1, \dots, C_1 - 1;$$

$$(C_1 \mu_1 + \beta)p_2(C_1, 0,0) = \lambda p_2(C_1 - 1,0,0) + \alpha \sum_{m=0}^{C_2} p_2(C_1, m, 1);$$

$$(\alpha + \lambda)p_2(0,0,1) = \beta p_2(0,0,0) + \mu_1 p_2(1,0,1);$$

$$(\alpha + n_1 \mu_1 + \lambda)p_2(n_1, 0,1) = \lambda p_2(n_1 - 1,0,1) + \beta p_2(n_1, 0,0) + (n_1 + 1)\mu_1 p_2(n_1 + 1,0,1), \quad n_1 = 1, \dots, C_1 - 1;$$

$$(\alpha + C_1 \mu_1 + \lambda)p_2(C_1, 0,1) = \lambda p_2(C_1 - 1,0,1) + \beta p_2(C_1, 0,0) + (C_1 \mu_1 + \mu_2)p_2(C_1, 1,1);$$

$$\begin{aligned}
(\alpha + C_1\mu_1 + n_2\mu_2 + \lambda)p_2(C_1, n_2, 1) &= \lambda p_2(C_1, n_2 - 1, 1) + (C_1\mu_1 + (n_2 + 1)\mu_2)p_2(C_1, n_2 + 1, 1), n_2 = 1, \dots, C_2 - 1; \\
(\alpha + C_1\mu_1 + C_2\mu_2)p_2(C_1, C_2, 1) &= \lambda p_2(C_1, C_2 - 1, 1),
\end{aligned}$$

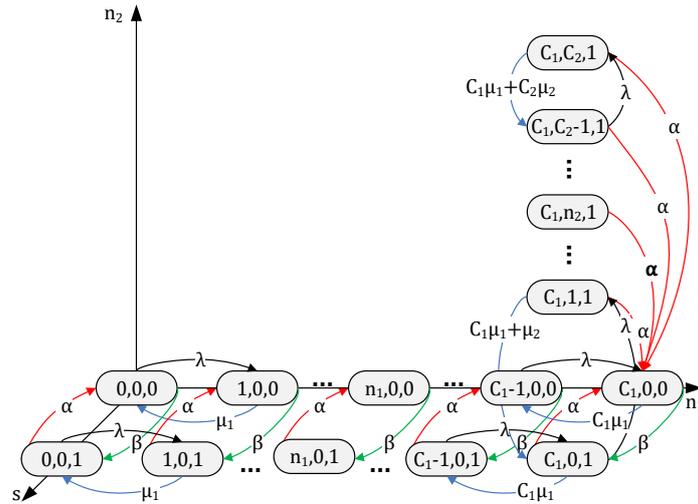


Рис. 2. Диаграмма интенсивностей переходов для модели с предпочтительным обслуживанием на полосе индивидуального использования.

Матрицы интенсивностей переходов

Обозначим стационарное распределение вероятностей, как $p_i(n_1, n_2, s), (n_1, n_2, s) \in X_i, i = 1, 2$. Рассмотрим матрицы интенсивностей переходов $A_i = (a_i((n_1, n_2, s)(n'_1, n'_2, s'))), i = 1, 2$ марковского процесса $X(t)$ для первой и второй модели соответственно. В соответствии с диаграммами интенсивностей переходов (Рис.1, Рис.2) и системами уравнений равновесия, которые были представлены выше в разделе 2.1, элементы $a_i((n_1, n_2, s)(n'_1, n'_2, s'))$ матрицы $A_i, i = 1, 2$ определяются следующим образом

- для модели с обслуживанием на первоначально выбранной полосе

$$a_1((n_1, n_2, s)(n'_1, n'_2, s')) = \begin{cases} \alpha, & n'_1 = \min(C_1, n_1 + n_2), n'_2 = 0, s' = s - 1, \\ \beta, & n'_1 = n_1, n'_2 = n_2 = 0, s' = s + 1, \\ \lambda, & n'_1 = n_1 + 1, n'_2 = n_2, s' = s \text{ or} \\ & n'_1 = n_1 = C_1, n'_2 = n_2 + 1, s' = s = 1, \\ n_1\mu_1, & n'_1 = n_1 - 1, n'_2 = n_2, s' = s, \\ n_2\mu_2, & n'_1 = n_1, n'_2 = n_2 - 1, s' = s = 1, \\ *, & n'_1 = n_1, n'_2 = n_2, s' = s, \\ 0, & \text{в другом случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где $*$ = $-(s\alpha + (1 - s)\beta + \lambda \cdot 1\{n_1 + sn_2 < C_1 + sC_2\} + n_1\mu_1 + n_2\mu_2)$;

- для модели с предпочтительным обслуживанием на полосе индивидуального использования

$$a_2((n_1, n_2, s)(n'_1, n'_2, s')) = \begin{cases} \alpha, & n'_1 = n_1, n'_2 = 0, s' = s - 1, \\ \beta, & n'_1 = n_1, n'_2 = n_2 = 0, s' = s + 1, \\ \lambda, & n'_1 = n_1 + 1, n'_2 = n_2 = 0, s' = s \text{ or} \\ & n'_1 = n_1 = C_1, n'_2 = n_2 + 1, s' = s = 1, \\ n_1\mu_1, & n'_1 = n_1 - 1, n'_2 = n_2, s' = s, \\ C_1\mu_1, & n'_1 = n_1 = C_1, n'_2 = n_2 - 1, s' = s = 1, \\ n_2\mu_2, & n'_1 = n_1 = C_1, n'_2 = n_2 - 1, s' = s = 1, \\ *, & n'_1 = n_1, n'_2 = n_2, s' = s, \\ 0, & \text{в другом случае,} \end{cases} \quad (4)$$

где $*$ = $-(s\alpha + (1 - s)\beta + \lambda \cdot 1\{n_1 + sn_2 < C_1 + sC_2\} + n_1\mu_1 + n_2\mu_2)$.

Распределение вероятностей первой или второй системы $p_i(n_1, n_2, s), (n_1, n_2, s) \in X_i$ может быть вычислено как решение системы уравнений равновесия $\mathbf{p}_i \mathbf{A}_i = \mathbf{0}, \mathbf{p}_i \mathbf{1}^T = \mathbf{1}, i = 1, 2$.

Рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения вероятностей

Для модели схемы доступа к радиоресурсам сети с предпочтительным обслуживанием на полосе индивидуального использования (вторая модель) распределение вероятностей состояний системы $p_2(n_1, n_2, s), (n_1, n_2, s) \in X_2$ может быть вычислено не только при помощи решения системы уравнений

равновесия. Для сокращения расчетов для этой модели рассмотрим рекуррентный алгоритм.

Введем ненормированные вероятности, $q(n_1, n_2, s) (n_1, n_2, s) \in X_2$.

Лемма 1. 1) Значения ненормированных вероятностей $q(n_1, n_2, s)$ определяются по формулам

$$q(0,0,0) = 1, q(0,0,1) = x; \quad (5)$$

$$q(n_1, n_2, s) = \gamma_{n_1, n_2, s} + \delta_{n_1, n_2, s} x, \quad (n_1, n_2, s) \in X_2 : n_1 > 0; \quad (6)$$

$$x = \frac{(C_1 \mu_1 + C_2 \mu_2 + \alpha) \gamma_{C_1, C_2, 1} - \lambda \gamma_{C_1, C_2 - 1, 1}}{\lambda \delta_{C_1, C_2 - 1, 1} - (C_1 \mu_1 + C_2 \mu_2 + \alpha) \delta_{C_1, C_2, 1}}. \quad (7)$$

2) Коэффициенты $\gamma_{n_1, n_2, s}$ и $\delta_{n_1, n_2, s}$ вычисляются по рекуррентным соотношениям

$$\gamma_{0,0,0} = 1, \delta_{0,0,0} = 0; \quad (8)$$

$$\gamma_{0,0,1} = 0, \delta_{0,0,1} = 1; \quad (9)$$

$$\gamma_{1,0,0} = \frac{\lambda + \beta}{\mu_1}, \delta_{1,0,0} = -\frac{\alpha}{\mu_1}; \quad (10)$$

$$\gamma_{1,0,1} = -\frac{\beta}{\mu_1}, \delta_{1,0,1} = \frac{\lambda + \alpha}{\mu_1}; \quad (11)$$

$$n_1 = 2, \dots, C_1, n_2 = 0, s = 0$$

$$\gamma_{n_1,0,0} = \frac{(n_1 - 1 + \gamma_{1,0,0})}{n_1} \gamma_{n_1-1,0,0} + \frac{\delta_{1,0,0}}{n_1} \gamma_{n_1-1,0,1} - \frac{\lambda}{n_1 \mu_1} \gamma_{n_1-2,0,0}, \quad (12)$$

$$\delta_{n_1,0,0} = \frac{(n_1 - 1 + \gamma_{1,0,0})}{n_1} \delta_{n_1-1,0,0} + \frac{\delta_{1,0,0}}{n_1} \delta_{n_1-1,0,1} - \frac{\lambda}{n_1 \mu_1} \delta_{n_1-2,0,0}; \quad (13)$$

$$n_1 = 2, \dots, C_1, n_2 = 0, s = 1$$

$$\gamma_{n_1,0,1} = \frac{(n_1 - 1 + \delta_{1,0,1})}{n_1} \gamma_{n_1-1,0,1} + \frac{\gamma_{1,0,1}}{n_1} \gamma_{n_1-1,0,0} - \frac{\lambda}{n_1 \mu_1} \gamma_{n_1-2,0,1}, \quad (14)$$

$$\delta_{n_1,0,1} = \frac{(n_1 - 1 + \delta_{1,0,1})}{n_1} \delta_{n_1-1,0,1} + \frac{\gamma_{1,0,1}}{n_1} \delta_{n_1-1,0,0} - \frac{\lambda}{n_1 \mu_1} \delta_{n_1-2,0,1}; \quad (15)$$

$$\gamma_{C_1,1,1} = \frac{\lambda + C_1 \mu_1 + \alpha}{C_1 \mu_1 + \mu_2} \gamma_{C_1,0,1} - \frac{\lambda}{C_1 \mu_1 + \mu_2} \gamma_{C_1-1,0,1} + \frac{\lambda}{C_1 \mu_1 + \mu_2} \gamma_{C_1,0,0}, \quad (16)$$

$$\delta_{C_1,1,1} = \frac{\lambda + C_1 \mu_1 + \alpha}{C_1 \mu_1 + \mu_2} \delta_{C_1,0,1} - \frac{\lambda}{C_1 \mu_1 + \mu_2} \delta_{C_1-1,0,1} + \frac{\lambda}{C_1 \mu_1 + \mu_2} \delta_{C_1,0,0}; \quad (17)$$

$$n_1 = C_1, n_2 = 2, \dots, C_2, s = 1$$

$$\gamma_{C_1, n_2, 1} = \frac{\lambda + C_1 \mu_1 + (n_2 - 1) \mu_2 + \alpha}{C_1 \mu_1 + n_2 \mu_2} \gamma_{C_1, n_2 - 1, 1} - \frac{\lambda}{C_1 \mu_1 + n_2 \mu_2} \gamma_{C_1, n_2 - 2, 1}, \quad (18)$$

$$\delta_{C_1, n_2, 1} = \frac{\lambda + C_1 \mu_1 + (n_2 - 1) \mu_2 + \alpha}{C_1 \mu_1 + n_2 \mu_2} \delta_{C_1, n_2 - 1, 1} - \frac{\lambda}{C_1 \mu_1 + n_2 \mu_2} \delta_{C_1, n_2 - 2, 1} \quad (19)$$

Замечание 1. Распределение вероятностей $p_2(n_1, n_2, s)$ рассчитывается по формуле

$$p_2(n_1, n_2, s) = \frac{q(n_1, n_2, s)}{\sum_{(i,j,k) \in X_2} q(n_1, n_2, s)}, \quad (n_1, n_2, s) \in X_2. \quad (20)$$

Показатели эффективности

Вычислив распределение $p_i(n_1, n_2, s), (n_1, n_2, s) \in X_i$ вероятностей состояний можно рассчитать основные показатели эффективности обеих рассмотренных моделей схем управления доступом – модели схемы с обслуживанием на первоначально выбранной полосе ($i = 1$) и модели схемы с предпочтительным обслуживанием на полосе индивидуального использования ($i = 2$):

- Вероятность $B_i, i = 1, 2$ того, что запрос пользователя на предоставление услуги будет заблокирован

$$B_i = p_i(C_1, C_2, 1) + p_i(C_1, 0, 0); \quad (21)$$

- Вероятность $I_i, i = 1, 2$ того, что обслуживание запроса пользователя на полосе совместного использования будет прервано

$$I_1 = \sum_{n_2=1}^{C_2} \sum_{n_1=C_1-n_2+1}^{C_1-1} p_1(n_1, n_2, 1) \frac{\alpha}{\alpha + n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \lambda} \cdot \frac{n_2 - C_1 + n_1}{n_2} + \sum_{n_2=1}^{C_2} p_1(C_1, n_2, 1) \frac{\alpha}{\alpha + C_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \lambda \cdot 1\{C_2 - n_2 > 0\}}; \quad (22)$$

$$I_2 = \sum_{n_2=1}^{C_2} p_2(C_1, n_2, 1) \frac{\alpha}{\alpha + C_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \lambda \cdot 1\{C_2 - n_2 > 0\}}; \quad (23)$$

- Вероятность P_i , $i = 1, 2$ того, что обслуживание пользовательского запроса, поступившего на полосу совместного использования, будет продолжено на полосе индивидуального использования

$$P_1 = \sum_{n_2=1}^{C_2} \sum_{n_1=0}^{C_1-n_2} p_1(n_1, n_2, 1) \frac{\alpha}{\alpha + n_1\mu_1 + n_2\mu_2 + \lambda} + \sum_{n_2=1}^{C_2} \sum_{n_1=C_1-n_2+1}^{C_1-1} p_1(n_1, n_2, 1) \frac{\alpha}{\alpha + n_1\mu_1 + n_2\mu_2 + \lambda} \cdot \frac{C_1 - n_1}{n_2}, \quad (24)$$

в данном случае мобильный оператор не прерывает обслуживание пользователя;

$$P_2 = \sum_{n_2=1}^{C_2} p_2(C_1, n_2, 1) \frac{\mu_2}{\alpha + C_1\mu_1 + n_2\mu_2 + \lambda \cdot 1\{C_2 - n_2 > 0\}}, \quad (25)$$

мобильный оператор перенаправляет обслуживание пользователя на полосу индивидуального использования, несмотря на то что полоса совместного использования доступна.

Численный анализ

Для проведения численного анализа за основу исходных данных был взят сценарий совместного использования частот на примере аэропорта (владельца частот) и арендатора-оператора. Рассмотрим соту с полосами частот индивидуального и совместного использования шириной 10 МГц и 5 МГц соответственно, спектральной эффективностью 4 бит/с/Гц [13]. Пользователи снимают фрагменты видео размером 1 Мбайт и загружают их на облачный сервер со скоростью 1 Мбит/с на полосе индивидуального использования и 2 Мбит/с на полосе совместного использования. При этих исходных данных максимальное число пользователей, занимающих ресурсы индивидуального использования, равно $C_1 = 40$, а ресурсы совместного использования – $C_2 = 10$. Среднее время загрузки данных на полосу индивидуального использования равно $\mu_1^{-1} = 1$ Мбайт / 1 Мбит/с = 8 с, а на полосе совместного использования равно $\mu_2^{-1} = 1$ Мбайт / 2 Мбит/с = 4 с.

Над сотой каждые $\alpha^{-1} + \beta^{-1} = 3$ мин, 4 мин и 5 мин пролетают самолеты. Во время пролета самолета над сотой в течение $\beta^{-1} = 1$ мин ресурсы совместного использования передаются аэропорту, что может вызвать прерывание обслуживания пользователей оператора.

Представленные ниже графики демонстрируют зависимость вероятностей блокировок B_1 и B_2 , (Рис. 3), вероятностей прерывания обслуживания I_1 и I_2 (Рис. 4) и вероятностей смены полосы обслуживания P_1 (Рис. 5) и P_2 (Рис. 6) – для разных значений α^{-1} (среднее время доступности полосы совместного использования).

Вероятности P_1 и P_2 смены полосы обслуживания для пользователя представляют особый интерес, поскольку имеют немонотонный характер и состоят из двух монотонных участков и одного экстремума – глобального максимума. Подобное поведение объясняется тем, что при определенной нагрузке средний объем свободных ресурсов индивидуального использования такой, что потенциальное число пользователей, которые могут их занять, совпадает со средним числом пользователей, занимающих ресурсы совместного использования, т.е. происходит оптимальное распределение нагрузки между обеими диапазонами ресурсов.

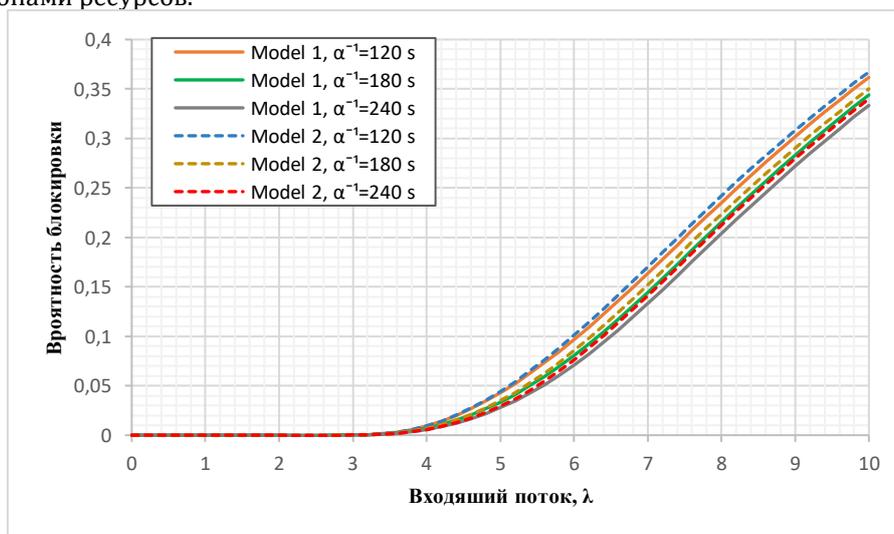


Рис. 3. Вероятность блокировки для разных значений α^{-1}

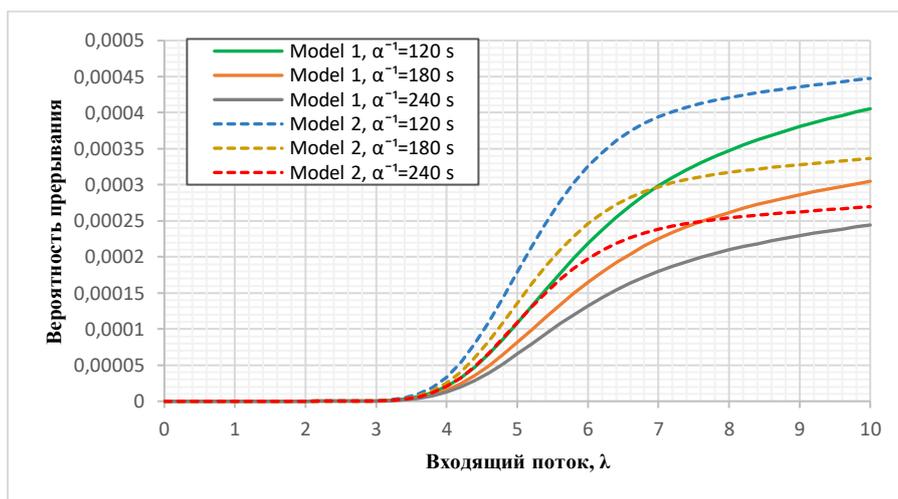


Рис. 4. Вероятность прерывания обслуживания для различных значений α^{-1}

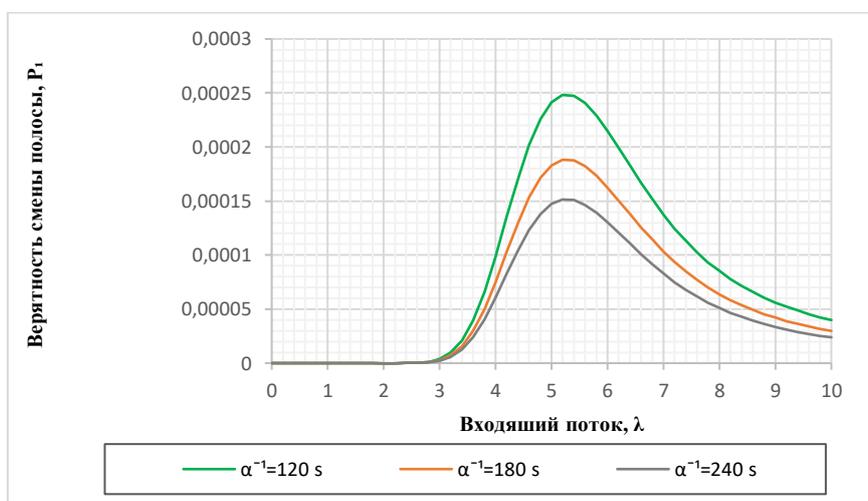


Рис. 5. Вероятность смены полосы обслуживания при изъятии полосы совместного использования для различных значений α^{-1}

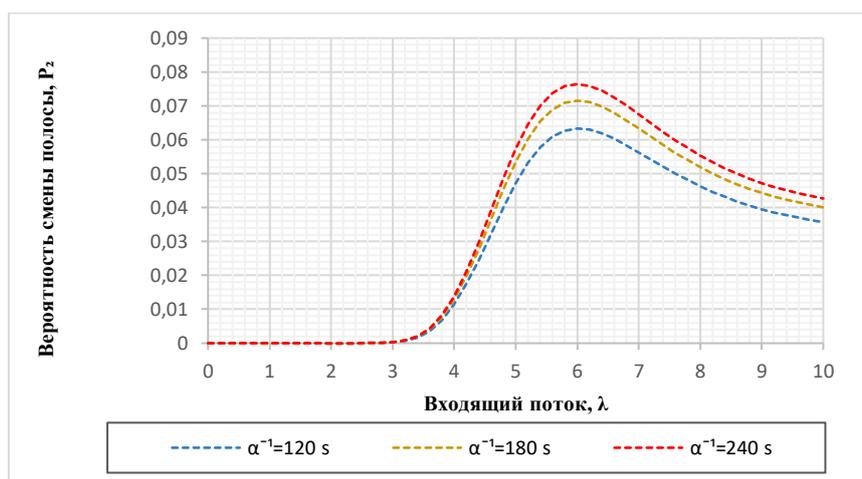


Рис. 6. Вероятность смены полосы обслуживания при доступной полосе совместного использования для различных значений α^{-1}

Заключение

Таким образом, в данной статье авторами разработаны две модели схем совместного использования ресурсов оператором-арендатором и владельцем – с непрерывным обслуживанием на полосе частот совместного использования и перенаправлением пользователей на обслуживание на индивидуальную

полосу оператора. Модели были построены в виде СМО с одновременными отказами ненадежных приборов, надежными приборами не толерантным к задержкам трафиком. Для сравнения эффективности моделей был проведен численный анализ основных показателей эффективности, таких как вероятность блокировки, вероятность прерывания обслуживания и вероятность смены полосы обслуживания. Для примера численного анализа был использован сценарий воздушной телеметрии. Результаты показали преимущество первой модели – без смены полосы обслуживания. В дальнейшем планируется провести численное решение задачи оптимизации числа пользователей на полосе совместного использования.

Благодарности

Публикация подготовлена при поддержке Программы РУДН «5-100» и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-37-00421 мол_а и № 15-07-03608 а.

Литература

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2015–2020 // 2016.
2. Andrews J, Buzzi S, Choi W, Hanly S.V., Lozano A., Soong A.C.K. Zhang J.C. What will 5G be? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications – 2014 – Vol. 32 – pp. 1065-1082
3. Ponomarenko-Timofeev, A., Pyattaev, A., Andreev, S., Koucheryavy, Ye., Mueck, M., Karls I. Highly dynamic spectrum management within licensed shared access regulatory framework // IEEE Communications Magazine – 2015 – Vol. 54 – No. 3 – pp. 100-109
4. Shorgin, S., Y., Samouylov, K., E., Gudkova, I., A., Galinina, O., S., Andreev, S., D. On the benefits of 5G wireless technology for future mobile cloud computing // In: 1st International Science and Technology Conference «Modern Networking Technologies (MoNeTec): SDN & NFV – 2014 – pp. 151-154 ()
5. Buckwitz K, Engelberg J, and Rausch G. Licensed Shared Access (LSA) – regulatory background and view of Administrations // In: CROWNCOM (invited paper) – 2014 – pp. 413-416
6. Ahokangas P., Matinmikko M., Yrjola S., Mustonen M., Luttinen E., Kivimäki A., Kemppainen J. Business models for mobile network operators in Licensed Shared Access (LSA) // In: DYSPAN – 2014 – pp. 407-412
7. Gomez-Miguel I., Avdic E., Marchetti N., Macaluso I., and Doyle L.E. Cloud-RAN platform for LSA in 5G networks – tradeoff within the infrastructure // In: Communications, Control and Signal Processing – 2014 – pp. 522–525
8. Borodakiy, V., Y., Samouylov, K., E., Gudkova, I., A., Ostrikova, D., Y., Ponomarenko A., A., Turlikov, A., M., Andreev, S., D. Modeling unreliable LSA operation in 3GPP LTE cellular networks // In: 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT-2014 – 2014 – pp. 490-496
9. Gudkova, I., A., Samouylov, K., E., Ostrikova, D., Y., Mokrov, E., V., Ponomarenko-Timofeev, A., A., Andreev, S., D., Koucheryavy, Y., A. Service failure and interruption probability analysis for Licensed Shared Access regulatory framework // In: 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT-2015 – 2015 – pp. 123-131
10. Samouylov, K., Gudkova, I., Markova, E., and Yarkina, N. Queuing model with unreliable servers for limit power policy within Licensed Shared Access framework // In: Lecture Notes in Computer Science – 2016 – Vol. 9870 – pp. 404–413
11. Masek, P., Mokrov, E., Pyattaev, A., Zeman, K., Ponomarenko-Timofeev, A., Samouylov, A., Sopin, E., Hosek, J., Gudkova, I., Andreev, S., Novotny, V., Koucheryavy, Y., and Samouylov, K. Experimental evaluation of dynamic Licensed Shared Access operation in live 3GPP LTE system // In: 2016 IEEE Global Communications Conference IEEE GLOBECOM-2016 – 2016
12. 3GPP TS 36.300 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) // Overall description; Stage 2: Release 13 – 2015

Об авторах:

Маркова Екатерина Викторовна, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и теории вероятности, Российский университет дружбы народов, markova_ev@rudn.university

Полуэктов Дмитрий Сергеевич, студент магистратуры кафедры прикладной информатики и теории вероятности, Российский университет дружбы народов, poluektov_dmitri@mail.ru

Острикова Дарья Юрьевна, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры прикладной информатики и теории вероятности, Российский университет дружбы народов, ostrikova_dyu@rudn.university

Гудкова Ирина Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятности, Российский университет дружбы народов; старший научный сотрудник Института проблем информатики, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управления» РАН, gudkova_ia@rudn.university

Note on the authors:

Markova Ekaterina V., Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Probability and Informatics, Peoples' Friendship University of Russia, markova_ev@rudn.university

Poluektov Dmitriy S., Master's Student, Department of Applied Probability and Informatics, Peoples' Friendship University of Russia, poluektov_dmitri@mail.ru

Ostrikova Darya Yu., Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Professor Assistant, Department of Applied Probability and Informatics, Peoples' Friendship University of Russia, ostrikova_dyu@rudn.university

Gudkova Irina A., Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Probability and Informatics, Peoples' Friendship University of Russia; Senior Researcher, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center Computer Science and Control of the Russian Academy of Sciences, gudkova_ia@rudn.university