

**Бегишев В.О., Мачнев Е.А., Молчанов Д.А., Самуйлов А.К.**

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

## **ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОРЕСУРСОВ СЕТИ LTE С ТРАФИКОМ NARROW-BAND IOT\***

### **Аннотация**

*С внедрением стандарта NB-IoT операторы традиционной сотовой связи смогут подключить к своим сетям сотни тысяч IoT-устройств. Предполагается, что сети NB-IoT найдут широкое применение в решениях для умных городов и многих других задач. Ориентируясь на указанную ситуацию, в работе представлены возможные стратегии совместного использования ресурсов мультимедийными данными и данными, полученными от сенсоров, в гибридной беспроводной сети LTE/NB-IoT. В рамках разработанной методологии проведено сравнение стратегий и сделаны рекомендации к выбору оптимальной стратегии.*

### **Ключевые слова**

*Интернет вещей; NB-IoT (NarrowBandIoT); LTE (LongTermEvolution); аналитическая модель; стратегии распределения ресурсов.*

**Begishev V.O., Machnev E.A., Molchanov D.A., Samuylov A.K.**

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

## **NUMERICAL ANALYSIS OF THE MODEL OF DISTRIBUTION OF LTE NETWORK RESOURCES WITH NARROW-BAND IOT TRAFFIC**

### **Abstract**

*With the introduction of the NB-IoT standard operators of traditional cellular communication will be able to connect to their networks hundreds of thousands of IoT-devices. It is assumed that NB-IoT networks will find wide application in solutions for smart cities and many other tasks. Based on this situation the paper presents possible strategies for sharing resources with multimedia data and data from sensors in a hybrid LTE/NB-IoT wireless network. Within the framework of the developed methodology, a comparison of strategies was made and recommendations were made for the choice of the optimal strategy.*

### **Keywords**

*Internet of Things; NB-IoT (NarrowBandIoT); LTE (Long Term Evolution); analytical model; resource allocation strategies.*

### **Введение**

Сравнением методов обработки больших данных значительно улучшились технологии сбора информации из распределенных источников. Начиная с низкоуровневых систем для проводных сенсорных сетей, технологии превратились в широкомасштабные стандартизированные беспроводные сети для разных категорий датчиков. Наиболее успешными примерами систем, предназначенных для передачи данных с низкими объемами, являются GSM, LTE-M, LoRaWAN, SIGFOX, GPRS/EDGE [1,2,3], а также недавно разработанный 3GPP стандарт беспроводной узкополосной сети – NB-IoT [4]. Последние три из перечисленных технологий характеризуются диапазонами охвата в десятки километров, высокой энергоэффективностью и низкой стоимостью оборудования. Эти свойства позволяют их считать основными кандидатами для технологии сбора больших данных (BigData) в отрасли Интернета вещей [5, 6, 7].

\* 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

Внедрение интеллектуальных устройств, таких как, системы видеонаблюдения [8, 9], предъявляют принципиально новые требования к системам сбора и доставки информации. Существующие коммуникационные решения для межмашинных взаимодействий не применимы в этих сценариях из-за большой емкости потоковой передачи видео. Таким образом, применение высокоскоростных (сотовых) беспроводных решений для передачи данных на большие расстояния становится единственным возможным вариантом.

Комбинация двух или более гетерогенных сетей увеличивает интеллектуальность и надежность систем принятия решений [10]. Например, сигнал об обнаружении чрезвычайных ситуаций, сообщаемый группой интеллектуальных счетчиков, может быть сразу проверен через визуальный канал. Одновременно, в комбинации таких гетерогенных сетей используется ряд задач, в которых надежность доставки потоков данных играет ключевую роль [11]. Учитывая ограниченное количество радиоресурсов, выбор стратегии распределения радиоресурсов между меньшим количеством высокоскоростных видеокамер [12] и большим количеством низкоскоростных смарт-счетчиков [13] является важной задачей для операторов беспроводных сетей. В рамках этой задачи необходимо сбалансировать вероятностно-временные характеристики (VBX), такие как вероятности потери сеанса для отдельных потоков данных, и долю использования радиоресурсов.

В данной статье разработана аналитическая модель для исследования VBX обработки трафика NB-IoT при наличии конкурирующего трафика LTE. Используя разработанный инструмент, мы сравниваем три возможные стратегии распределения радиоресурсов: статическую, динамическую и динамическую с резервированием. В качестве эталонной модели рассматривается внутрисполосный режим, представленный в LTE Rel. 13 [14, 15, 16], где радиостанция LTE разделяет спектр частот с технологией NB-IoT. Эта комбинация была выбрана в силу 1) LTE и NB-IoT – единственные два решения, которые используют один и тот же спектр частот; 2) эта комбинация получает наибольшую поддержку со стороны отрасли Интернет вещей, как ожидается, станет основным стандартом для сбора больших данных в мире Интернет вещей. Основные результаты нашего исследования изложены в следующих выводах:

- статическое распределение радиоресурсов для обслуживания разных типов данных чувствительно к поступающей нагрузке. Для достижения оптимальной производительности распределения необходимо динамически корректировать поступающую нагрузку в соответствии с колебаниями трафика, что часто недоступно на практике;
- динамическое распределение ресурсов значительно улучшает пропускную способность системы, но не дает каких-либо гарантий производительности;
- резервирование минимального количества ресурсов в динамической схеме распределения радиоресурсов устраняет проблему снижения производительности. При этом динамический характер распределения незарезервированных ресурсов по-прежнему обеспечивает высокую степень статистического мультиплексирования сессий и обеспечивает высокую пропускную способность системы.

### Системная модель

В этом разделе вводится понятие оператора, реализующего службу наблюдения, используя возможности технологий LTE и NB-IoT. Далее, формализуется модель LTE соты с поддержкой технологии NB-IoT и вводятся стратегии распределения ресурсов. Обозначения, используемые в статье, представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Обозначения, используемые в статье

Параметр	Описание
$C$	Общее число базовых каналов
$S$	Число ресурсных блоков в соте
$c$	Число базовых каналов в одном ресурсном блоке
$\lambda$	Интенсивность входящего потока NB-IoT
$1/\theta$	Средняя длительность сессии NB-IoT
$\nu$	Интенсивность входящего потока от абонентов LTE
$1/\mu$	Средняя длительность сессии LTE
$\rho = \lambda\theta$	Предложенная нагрузка от NB-IoT
$\alpha = \nu/\mu$	Предложенная нагрузка от LTE
$R_N$	Число базовых каналов NB-IoT
$R_L$	Число базовых каналов LTE
$c(m)$	Количество каналов, занятых NB-IoT сессиями
$b(m)$	Минимальное количество базовых каналов NB-IoT
$b$	Минимальное требование для NB-IoT
$d$	Минимальное требование для LTE

$M$	Максимальное число NB-IoT в одном ресурсном блоке
$m(t)$	Число активных NB-IoT сессий в момент времени $t$
$n(t)$	Число активных LTE сессий в момент времени $t$
$\chi$	Пространство состояний $\{m(t), n(t), t > 0\}$
$p(m, n)$	Стационарное распределение NB-IoT/LTE сессий
$G(\chi)$	Нормирующая константа
$p_N$	Вероятность блокировки для NB-IoT сессий
$p_L$	Вероятность блокировки для LTE сессий
$\mathcal{B}_L, \mathcal{B}_N$	Множество блокировок NB-IoT/LTE сессий
$E[T_N]$	Среднее время передачи блоков данных NB-IoT
$E[N_N]$	Среднее число NB-IoT сессий
$E[N_L]$	Среднее число LTE сессий
$E[b_N]$	Среднее количество занятых каналов NB-IoT
$E[b_L]$	Среднее количество занятых каналов LTE
$E[S_N]$	Среднее число занятых ресурсных блоков NB-IoT
$E[S_L]$	Среднее число занятых ресурсных блоков LTE
$E[b_{NL}]$	Среднее количество занятых каналов NB-IoT и LTE

### Концепция услуги наблюдения

Рассмотрим "оператора", который управляет системой зонального наблюдения. Система представляет собой гибридное решение, состоящее из 1) некоторого количества видеокамер для проведения видеомониторинга, 2) многочисленных датчиков для обнаружения вторжений, пожаров, а также для контроля температуры и давления воздуха и 3) системы обработки больших объемов данных, получаемых как с видеокамер, так и с смарт-датчиков.

Поскольку проводное и Wi-Fi соединения не всегда доступны в районах наблюдения, передача трафика от камер наблюдения производится при помощи сотовой сети LTE. Предполагается, что смарт-датчики подключены по NB-IoT, которая является одной из наиболее перспективных технологий IoT отрасли. Такая комбинация решений может эффективно сосуществовать в рамках одной сети. Поскольку оба решения работают в лицензированных частотах, поставщик услуг, ориентированный на надежность связи, будет приобретать определенный частотный ресурс у оператора сети через механизм "сетевого среза" [17]. Такой подход может обеспечить бесперебойное обслуживание независимо от того, в каком состоянии находятся оставшиеся частотные полосы оператора.

Сценарий развертывания, описанный выше, предполагает совместное использование предоставленных ресурсов LTE между двумя типами конечных узлов: камерами наблюдения и датчиками NB-IoT, которые поднимают вопрос об эффективном распределении ресурсов. В этой связи характеристики надежности обоих потоков трафика приобретает первостепенное значение, поскольку сервер обработки не сможет принимать обоснованные решения, если часть потока становится временно недоступна. Одним из возможных примеров может быть система обнаружения пожара, которая развернута в определенных зонах, где любое ложное предупреждение является чрезвычайно дорогостоящим (например, для фабрики). Таким образом, если блок обработки получает предупреждение о пожаре от датчиков дыма/температуры, он сначала перекрестно проверяет его с помощью визуального канала (видеопоток от ближайшей камеры) и только затем передает сигнал аварийной эвакуации.

Для решения вышеперечисленных вопросов подробно рассмотрим модель системы, а затем приступим к формализации стратегий распределения ресурсов.

### Модель LTE соты с поддержкой технологии NB-IoT

Мы рассматриваем соту сети LTE с базовой станцией, расположенной в центре соты. Напомним, что радиус покрытия ячейки для услуг LTE,  $R_L$ , намного меньше по сравнению с покрытием технологии NB-IoT,  $R_N$ . Весь набор доступных ресурсов будем измерять в каналах NB-IoT. В дальнейшем мы называем это базовым каналом. В направлении восходящей линии для NB-IoT доступны  $C$  каналов, которые можно вычислить как  $C = cS$ , где  $S$  – количество ресурсных блоков (RB),  $c$  – количество базовых каналов в одном RB [18].

Входящий поток от сессий LTE является пуассоновским с интенсивностью  $\nu$ . Время предоставления LTE-услуги распределено по экспоненциальному закону со средним  $1/\mu$ , а минимальное количество ресурсов, запрошенных на установление соединения на каждом временном интервале восходящей линии, составляет  $d$  базовых каналов. Пусть  $a = \nu/\mu$  предложенная нагрузка LTE. Запросы на соединение от NB-IoT поступают в соответствии с процессом Пуассона с интенсивностью  $\lambda$ . Каждое поступление данных характеризуется экспоненциально распределенным временем обслуживания с параметром  $\theta$ . Для каждого сеанса NB-IoT требуются  $b$  базовых каналов.

Интенсивность предложенной нагрузки на передачу блоков данных от NB-IoT обозначим через  $\rho = \lambda\theta$ . Аналогично сессиям LTE, устройства NB-IoT считаются статичными в течение всей сессии.

### Стратегии распределения ресурсов

Рассматриваемые стратегии распределения ресурсов между камерами LTE и измерительными датчиками NB-IoT показаны на Рис. 1. Отметим, что максимальное количество базовых каналов, которые могут быть выделены для NB-IoT и LTE, составляет  $C_N = C - R_L$  и  $C_L = C - R_N$  соответственно, где  $R_L$  и  $R_N$  – минимальное количество каналов, которые всегда доступны и зарезервированы для трафика LTE и NB-IoT соответственно. Таким образом, в работе представлено сравнение следующих трех стратегий распределения ресурсов:

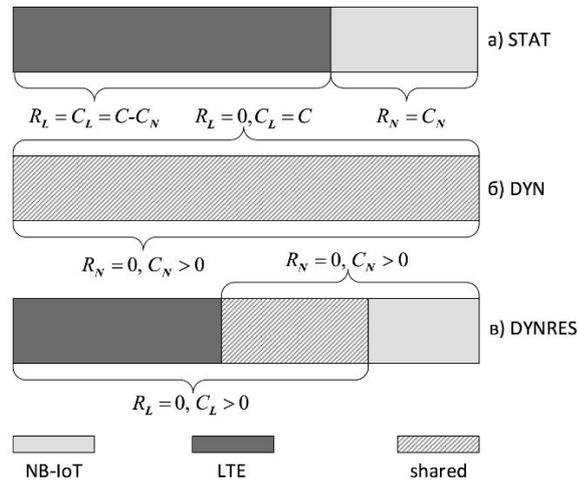


Рис. 1: Предлагаемые стратегии распределения ресурсов

- Статическая стратегия (**STAT**). Эта стратегия соответствует случаю, когда минимальное и максимальное количество базовых каналов, выделенных для NB-IoT и LTE, совпадают,  $R_L = C_L, R_N = C_N$ . Другими словами, все ресурсы строго разделены между NB-IoT и LTE.
- Динамическая стратегия (**DYN**). В этом случае минимальный объем ресурсов не назначается NB-IoT и LTE, то есть  $R_L = R_N = 0$ . Однако максимальный объем ресурсов и  $C_L = C_R = C$  полностью разделены между NB-IoT и LTE.
- Динамическая стратегия с резервированием (**DYNRES**). В этой стратегии максимальные распределения ресурсов, доступные для NB-IoT и LTE, определены так, что  $C_N = C - R_L > 0$  и  $C_L = C - R_N$ . При этом,  $R_N > 0, R_L > 0$ , которые определяют минимальный объем ресурсов, предназначенных для NB-IoT и LTE, соответственно. Остальные ресурсы динамически распределяются между двумя типами трафика.

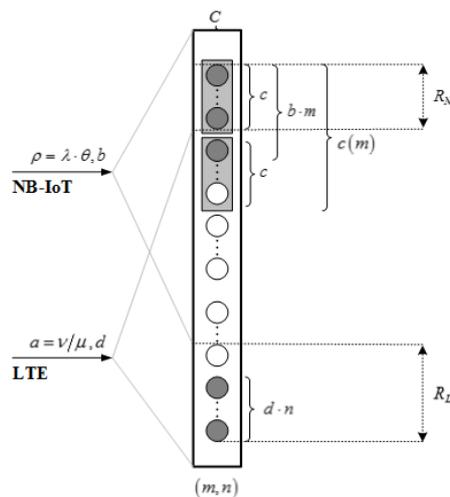


Рис. 2. Схема последовательного распределения ресурсов соты сети LTE

Уникальной особенностью рассматриваемой системы с двумя разнотипными входящими потоками является тот факт, что базовые каналы будут последовательно выделяться с учетом особенностей

внутриполосной технологии NB-IoT [19]. Процесс управления ресурсами показан на Рис. 2. Рассмотрим систему без активных сессий и предположим, что поступает новая сессия от NB-IoT. В этом случае RB становятся доступным для NB-IoT, где каждый запрос на принятие данных требует ровно  $b$  базовых канала NB-IoT. Таким образом, новая сессия NB-IoT занимает базовые каналы в этом RB. Если при следующем установлении сессии NB-IoT все каналы в данном RB уже заняты, то выделяется следующий RB, доступный для услуг NB-IoT.

### Характеристики обслуживания

Мы предполагаем, что оператор системы наблюдения нацелен на то, чтобы сбалансировать надежность обслуживания и показатели производительности системы в направлении восходящей линии. Что касается параметров обслуживания, мы анализируем вероятность блокировки для сессий NB-IoT и LTE. В качестве показателя эффективности системы, рассматривается коэффициент использования радиоресурсов, определяемая как доля ресурсов, занимаемых обоими типами услуг к общему количеству ресурсов системы.

### Модель оценки показателей производительности

В этом разделе проводится анализ модели обслуживания соты LTE с поддержкой технологии NB-IoT. Сначала вводится Марковский процесс, описывающий число сессий NB-IoT и LTE в системе. Далее, приводится аналитическое решение для вероятностей стационарного состояния и определяются показатели производительности.

### Марковская модель системы

Система, описанная выше может быть представлена в виде системы массового обслуживания с двумя входящими потоками, имеющими разные дисциплины обслуживания с выделением ресурсных блоков [20]. Отметим, что система позволяет управлять потерями сессий как NB-IoT так и LTE. Аналогичные модели массового обслуживания были изучены в контексте систем обслуживания с несколькими входящими потоками, каждый из которых характеризуется различными требованиями к обслуживанию, см. [21, 22, 23, 24]. Основное отличие модели, представленной ниже, заключается в комплексной последовательной стратегии распределения ресурсов на основе блоков.

Определим состояние системы. Отметим, что запрос на обслуживание от LTE принимается, если в момент его поступления доступно не менее  $d$  из  $C_L = C - R_N$  каналов, таким образом, уменьшается количество доступных базовых каналов на величину  $d$  и количество RB на  $[d/c]$ . Количество сессий LTE  $[d/c]$  всегда является целым числом  $[d/c] \geq 1$ . Если при принятии запросов на соединение от NB-IoT количество базовых каналов в текущем RB выше, чем  $b$ , то сессия NB-IoT принимается в этом RB. Если количество доступных базовых каналов ниже, чем  $b$ , и новый RB доступен для трафика NB-IoT, то этот RB принимает на обслуживание поступивший запрос от NB-IoT, тем самым уменьшая количество базовых каналов в этом RB на  $b$ . В других случаях сессия NB-IoT теряется.

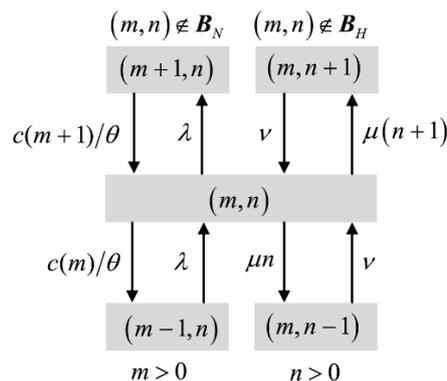


Рис. 3. Диаграмма интенсивностей переходов  $\{m(t), n(t), t > 0\}$

Пусть  $m(t), t > 0$  и  $n(t), t > 0$  определяют число активных сессий NB-IoT и LTE соответственно. Следовательно, состояние системы соты сети LTE, обслуживающей трафик NB-IoT и LTE, может быть описано двумерным случайным процессом,  $\{m(t), n(t), t > 0\}$  со следующим пространством состояний:

$$\chi = \{m \geq 0, n \geq 0: nd \leq C - R_N, c(m) \leq C - R_L, nd + c(m) \leq C\}, \quad (1)$$

где  $c(m) = c[bm/M]$  – количество базовых каналов, занятых сессиями NB-IoT,  $M$  – максимальное количество сессий в NB-IoT, которые могут быть обслужены в одном RB,  $M = [c/b]$  – количество базовых каналов, необходимых для обслуживания этих сессий.

Заметим, что  $\{m(t), n(t), t > 0\}$  является Марковским процессом. Диаграмма состояний системы с интенсивностями переходов показана на рис. 3. Введем  $p(m, n)(t), \{m, n\} \in \chi$  – стационарное распределение вероятностей  $m$  сессий NB-IoT и  $n$  сессий LTE в системе в момент времени  $t$ ,

$$p(m, n) = \lim_{t \rightarrow \infty} p(m, n)(t), \{m, n\} \in \chi. \quad (2)$$

### Стационарное распределение вероятностей

Чтобы получить уравнение локального баланса, рассмотрим произвольный контур в диаграмме перехода состояний, показанной на рис. 4. Стационарное распределение вероятностей случайного процесса

$\{m(t), n(t), t > 0\}$  удовлетворяет следующим уравнениям локального баланса:

$$\begin{cases} p(m, n) \frac{c(m)}{\theta} = p(m-1, n) \lambda, m > 0, (m, n) \in \chi, \\ p(m, n) \mu n = p(m, n-1) \nu, n > 0, (m, n) \in \chi \end{cases} \quad (3)$$

Используя (3), получим для  $m > 0$

$$\begin{aligned} p(m, n) &= p(m-1, n) \frac{\lambda \theta}{c(m)} = \\ &= p(m-1, n) \frac{\rho}{c(m)} = \\ &= p(m-2, n) \frac{\rho^2}{c(m)c(m-1)} = \\ &= p(m-3, n) \frac{\rho^3}{c(m)c(m-1)c(m-2)}, \end{aligned}$$

что приводит к

$$p(m, n) = p(0, n) \frac{\rho^m}{c(m)c(m-1)c(m-2)\dots c(1)}. \quad (4)$$

Подставив  $c(i) = \lfloor bi/M \rfloor$ , получаем

$$\begin{aligned} p(m, n) &= \frac{p(0, n) \rho^m}{c \lfloor \frac{bm}{M} \rfloor c \lfloor \frac{bm-1}{M} \rfloor c \lfloor \frac{bm-2}{M} \rfloor \dots c \lfloor \frac{1}{M} \rfloor} = \\ &= \frac{p(0, n) \rho^m}{Mb \lfloor \frac{c}{M} \rfloor Mb \lfloor \frac{c-1}{M} \rfloor Mb \lfloor \frac{c-2}{M} \rfloor \dots Mb \lfloor \frac{1}{M} \rfloor} = \\ &= p(0, n) \left( \frac{\rho}{Mb} \right)^m \left( \prod_{i=1}^m \lfloor \frac{i}{M} \rfloor \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m > 0, (m, n) \in \chi$ .

Используя (3), можем установить, что

$$\begin{aligned} p(0, n) &= p(0, n-1) \frac{a}{n} = \\ &= p(0, n-2) \frac{a^2}{n(n-1)} = \dots = \\ &= \frac{a^n}{n!} p(0, 0), n > 0, (m, n) \in c. \end{aligned}$$

Подставив выражения (4) и (5) в (3), получим

$$p(m, n) = G^{-1}(\chi) \left( \frac{\rho}{Mb} \right)^m \left( \prod_{i=1}^m \lfloor \frac{i}{M} \rfloor \right)^{-1} \left( \frac{a^n}{n!} \right), \quad (6)$$

где константа  $G(\chi)$  имеет следующий вид:

$$G(\chi) = \sum_{(m,n) \in \chi} \frac{\rho}{Mb} \left( \prod_{i=1}^m \lfloor \frac{i}{M} \rfloor \right)^{-1} \frac{a^n}{n!}. \quad (7)$$

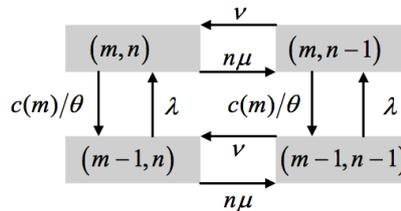


Рис. 4 Существование уравнений локального баланса

### Характеристики обслуживания

Вероятность блокировки для LTE and NB-IoT может быть записана как

$$p_N = \sum_{(m,n) \in \mathcal{B}_N} p(m,n), \quad p_L = \sum_{(m,n) \in \mathcal{B}_L} p(m,n), \quad (8)$$

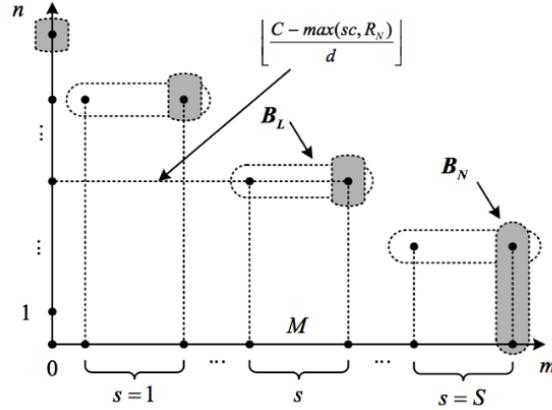


Рис. 5. Разбиение пространства  $\chi$  на макросостояния

где множества блокировок имеет следующий вид:

$$\mathcal{B}_L = \{(m,n) \in \chi: d(n+1) > C - \max(c(m), R_N)\}, \quad (9)$$

$$\mathcal{B}_N = \{(m,n) \in \chi: c(m+1) > C - \max(nd, R_L)\}. \quad (10)$$

Средняя длительность сессии NB-IoT вычисляется следующим образом:

$$E[T_N] = \frac{\sum_{(m,n) \in \chi} mp(m,n)}{\lambda(1-B_N)}. \quad (11)$$

Получение формул вероятностей блокировок сессий (9) и (10) является трудоемким вычислительным процессом, так как пространство состояний системы довольно велико и количество состояний может достигать в несколько десятков тысяч. Чтобы снять это ограничение, мы разработали специальный численный алгоритм, основанный на рекуррентной связи между ненормированными вероятностями макросостояний, которые кратко описаны ниже.

Определим разбиение пространства состояний  $\chi$

$$\chi = \bigcup_{s=0}^S \chi_s, \quad (12)$$

где  $\chi_s = \{(m,n) \in \chi: c(m) = sc\}$ .

Разбиение пространства состояний на макросостояния показано на рис. 5. Здесь мы также иллюстрируем подпространства, соответствующие состояниям блокировки сессий LTE и NB-IoT. Зная стационарное распределение состояний системы, представленные в (6) и (7) и действующее над (12), искомые вероятности блокировок, указанные в (8) легко выводятся. В частности, используя (12) множество блокировок для сессий LTE, могут быть записаны как

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_L &= \bigcup_{s=0}^S \{\chi: (n+1)d > C - c(m) \cup (n+1)d > C - R_N\} = \\ &= \bigcup_{s=0}^S \{\chi: (n+1)d > C - \max(c(m), R_N), c(m) = sc\} = \\ &= \bigcup_{s=0}^S \left\{ \chi: n+1 > \left\lfloor \frac{C - \max(sc, R_N)}{d} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{mb}{c} \right\rfloor = s \right\} = \\ &= \bigcup_{s=0}^S \left\{ \chi: n = \left\lfloor \frac{C - \max(sc, R_N)}{d} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{mb}{c} \right\rfloor = s \right\} = \\ &= \left\{ \chi: n = \left\lfloor \frac{C - R_N}{d} \right\rfloor, m = 0 \right\} \cup \bigcup_{s=1}^S \left\{ \chi: n = \left\lfloor \frac{C - \max(sc, R_N)}{d} \right\rfloor, s < \frac{mb}{c} < s+1 \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

и, наконец, искомое подпространство принимает вид (17), что приводит к следующей вероятности блокировки сессий LTE:

$$p_L = p\left(0, \left\lfloor \frac{C - R_N}{d} \right\rfloor\right) + \sum_{s=1}^{\left\lfloor \frac{C - R_L}{c} \right\rfloor} \sum_{m=\lfloor s-1 \rfloor M + 1}^{sM} p\left(m, \left\lfloor \frac{C - \max[sc, R_N]}{d} \right\rfloor\right). \quad (14)$$

Аналогичные вычисления проводятся для подмножества блокировок сессий NB-IoT

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_N &= \{\chi: c(m+1) > C - nd \cup c(m+1) > C - R_L\} = \\ &= \{\chi: c(m+1) > C - \max(nd, R_L), c(m) = sc\} = \end{aligned}$$

$$= \bigcup_{s=0}^S \{ \chi: nd > C - \max(c(m), R_L), c(m) = sc \} = \bigcup_{s=0}^S \left\{ \chi: n - 1 \geq \left\lfloor \frac{C - \max(sc, R_L)}{d} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{mb}{c} \right\rfloor c = sc \right\} =$$

$$= \bigcup_{s=0}^S \left\{ \chi: n \geq \left\lfloor \frac{C - \max(sc, R_L)}{d} \right\rfloor, m = \frac{sc}{b} \right\}, \quad (15)$$

что в конечном итоге влечет (16) и выражение для вычисления вероятности блокировок сессий NB-IoT в следующем виде:

$$p_N = \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{R_L}{d} \rfloor} p \left( \left\lfloor \frac{C - R_L}{c} \right\rfloor M, n \right) + \sum_{s=\lfloor \frac{R_N}{c} \rfloor}^{\lfloor \frac{C - R_L}{c} \rfloor - 1} \sum_{n=\lfloor \frac{C - (s+1)c}{d} \rfloor + 1}^{\lfloor \frac{C - \max(sc, R_N)}{d} \rfloor} p(sM, n). \quad (16)$$

Средняя длительность сессии (11) принимает вид

$$E(T_N) = \frac{\sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C - R_L}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{C - \max(\lfloor \frac{m}{M} \rfloor c, R_N)}{d} \rfloor} \lfloor \frac{m}{M} \rfloor p(m, n)}{\lambda(1 - p_N)}. \quad (17)$$

Среднее количество сессий NB-IoT и LTE вычисляется по следующим выражениям

$$E[N_N] = \sum_{(m,n) \in \chi} mp(m, n) = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C_N}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{C_L - c(m)}{d} \rfloor} mp(n, m), \quad (18)$$

$$E[N_L] = \sum_{(m,n) \in \chi} np(m, n) = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C_N}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{C_L - c(m)}{d} \rfloor} np(m, n). \quad (19)$$

Следует обратить внимание, что количество RB и базовых каналов, занятых LTE, теперь можно вычислить напрямую. Однако из-за эластичности сессий NB-IoT среднее число сессий NB-IoT и среднее количество каналов, выделенных для NB-IoT, необходимо определять отдельно. В частности, среднее число RB, выделенных для сеансов NB-IoT

$$E[s_N] = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C - R_L}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{C - \max(\lfloor \frac{m}{M} \rfloor c, R_N)}{d} \rfloor} \lfloor \frac{m}{M} \rfloor p(m, n). \quad (20)$$

Среднее количество базовых каналов, занятых одной сессией NB-IoT имеет вид

$$E[b_N] = M \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C - R_L}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{C - \max(\lfloor \frac{m}{M} \rfloor c, R_N)}{d} \rfloor} \lfloor \frac{m}{M} \rfloor p(m, n). \quad (21)$$

Среднее количество RB, выделенных для LTE равно

$$E[s_L] = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C - R_L}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{C - \max(\lfloor \frac{m}{M} \rfloor c, R_N)}{d} \rfloor} np(m, n). \quad (22)$$

Среднее количество каналов, занятых сессиями LTE равно

$$E[b_L] = d \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{C - R_L}{b} \rfloor} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{C - \max(\lfloor \frac{m}{M} \rfloor c, R_N)}{d} \rfloor} np(m, n). \quad (23)$$

Среднее количество базовых каналов, занятых обоими типами трафика, определяется через  $E[b_{NL}] = E[b_N] + E[b_L]$ .

## Численный анализ

Для получения количественной и качественной оценки поведения рассматриваемой системы в данном разделе проводится численный анализ предложенных стратегий распределения ресурсов. Входные параметры для численного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2: Параметры системы для численного анализа

Параметр	Описание	Значение
$C$	Количество базовых каналов в соте LTE	100
$c$	Количество базовых каналов в RB	4
$R_N$	Количество каналов для NB-IoT	$[0, \dots, 100]$
$R_L$	Количество каналов для LTE	$[0, \dots, 100]$
$b$	Количество каналов для NB-IoTсессий	1
$d$	Количество каналов для LTEсессий	4
$\theta$	Средняя скорость NB-IoTсессии	100 кбит
$1/\mu$	Средняя продолжительность LTE сессий	10 сек.
$\lambda$	Интенсивность входящего потока NB-IoT	10/мин.
$\nu$	Интенсивность входящего потока LTE	1/мин.

## Надежность предоставления услуг

Рассмотрим рис. 6, иллюстрирующий значения вероятности блокировки сессии LTE в зависимости от общего количества подключенных датчиков NB-IoT при выбранном статическом распределении ресурсов STAT, в котором общее количество радиоресурсов строго разделено между двумя типами трафика. Для этой стратегии вводится коэффициент разделения ресурсов  $\gamma$ , который характеризует количество ресурсов, зарезервированных для NB-IoT. Заметим, что вследствие жесткого разделения ресурсов между LTE и NB-IoT, характеристики стратегии STAT зависят только от выбранного значения  $\gamma$ . Причиной этому является то, что стратегия STAT создает две независимые виртуальные беспроводные системы: одну для LTE, другую для NB-IoT. Хотя эта стратегия является самой простой с точки зрения ее реализации, ее можно рекомендовать только для таких систем, где средняя нагрузка от всех параллельно выполняющих услуг 1) редко изменяется во времени, 2) известна заранее или 3) может быть хорошо предвиденным. Подобное поведение системы редко наблюдается на практике.

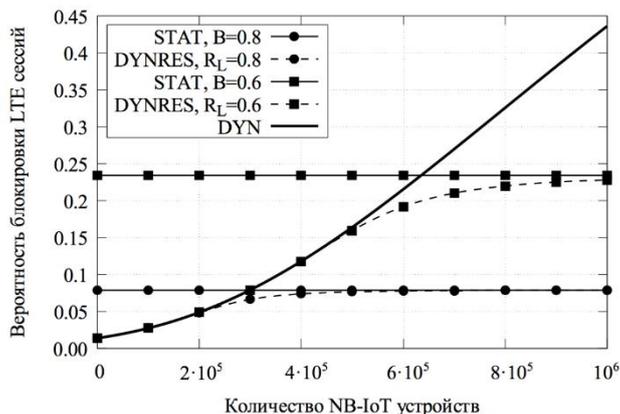


Рис. 6. Вероятность блокировки LTE в зависимости от предложенной нагрузки NB-IoT

Значения вероятности блокировки в стратегии DYN, где общее количество ресурсов доступно для обоих трафиков, сильно зависит от текущей нагрузки из сегмента NB-IoT. Для меньших значений количества подключенных устройств NB-IoT стратегия DYN превосходит STAT, так как позволяет всю полосу частот переключить в режим доступности для LTE-устройств в отсутствие трафика NB-IoT. Рост трафика NB-IoT сопровождается увеличением значений вероятности блокировки для стратегии DYN, поскольку трафик NB-IoT начинает конкурировать за ресурсы с постоянной нагрузкой, исходящей от трафика LTE. Наконец, с поступлением большого количества устройств NB-IoT трафик начинает доминировать в общем диапазоне. В итоге, вероятность блокировки будет выше, чем в стратегии STAT, независимо от выбранного значения коэффициента распределения ресурсов. Стратегия распределения ресурсов DYN может быть рекомендована для систем, где средние нагрузки, требуемые каждым потоком (измеренные в Гц/с), сопоставимы. В то же время, стратегия DYN остается адекватным решением для нестабильных систем, где нагрузка может сильно изменяться во времени.

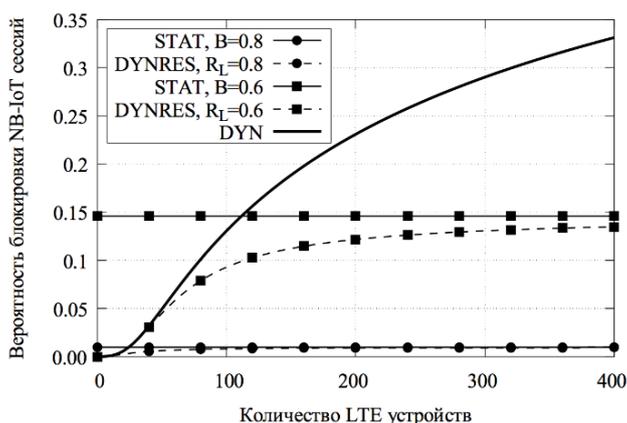


Рис. 7: Вероятность блокировки NB-IoT в зависимости от предложенной нагрузки LTE

Перейдем к третьей стратегии, DYNRES, где определенное количество ресурсов резервируются для трафика каждого типа, а остальные ресурсы динамически распределяются между ними. Значения  $R_L$  выбираются эквивалентными с соответствующими значениями  $\gamma$  в ранее рассмотренной стратегии выделения ресурсов STAT, а  $R_N$  считается нулевым. Другими словами, мы сравниваем статические и

полудинамические варианты распределения. Заметим, что для меньшего количества устройств NB-IoT характеристики стратегии DYNRES идентичны характеристикам стратегии DYN. Однако увеличение значений вероятности блокировок для DYNRES растёт медленнее, чем в случае DYN. Причиной этому является тот факт, что часть ресурсов, которые мог бы занять LTE трафик, занята динамическим разделением. Кроме того, при более высоких нагрузках трафика NB-IoT вероятность блокировки LTE для DYNRES никогда не будет превышать соответствующее значение для системы со стратегией STAT. Для крайне большого количества устройств NB-IoT кривая для DYNRES асимптотически приближается к кривой для системы STAT, но не пересекает ее.

Подводя итоги, стратегия DYNRES – не хуже, чем стратегия STAT и DYN. Объясняется это тем, что стратегия DYNRES включает основные свойства первых двух схем распределения ресурсов. Стратегия DYNRES ведет себя также, как и стратегия DYN при низких нагрузках и стратегия STAT при высоких нагрузках. Следовательно, стратегия DYNRES может быть рекомендована для повышения надежности системы.

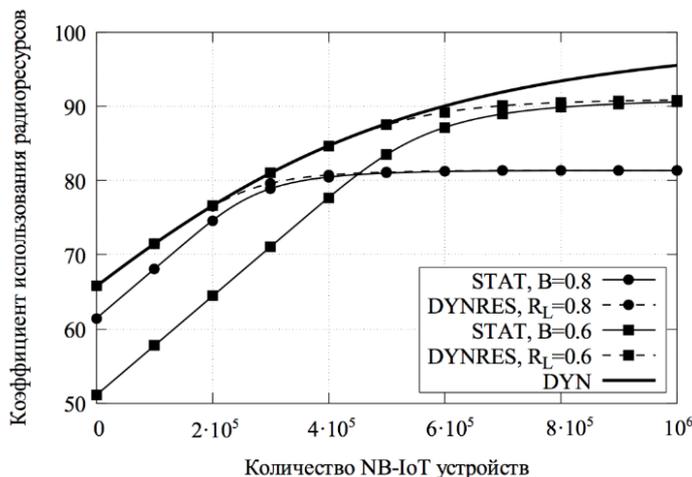


Рис. 8. Коэффициент использования ресурсов в зависимости от предложенной нагрузки NB-IoT

Представим в ортогональном разрезе Рис. 7, который показывает вероятность блокировки сеанса NB-IoT в сравнении с общим количеством подключенных LTE-устройств. Как и в предыдущем случае, мы подбираем параметры для стратегии DYNRES таким образом, чтобы количество ресурсов, зарезервированных для NB-IoT в STAT и DYNRES, были равными. Важно отметить, что в этом случае  $R_N$  равно  $(1 - \gamma)$  вместо  $\gamma$ . Значения  $R_L$  считаются равными нулю. Для такого симметричного случая мы наблюдаем то же качественное поведение, что и на Рис. 6. Тем не менее, имеются заметные количественные различия между Рис. 6 и Рис. 7. Значения вероятности блокировки NB-IoT на порядок ниже, чем для LTE. Это связано с более низкими потребностями в ресурсах отдельной сессии NB-IoT, что, в свою очередь, ведет к увеличению шансов на прием обслуживания даже в почти полностью загруженной системе. Кроме того, способ выделения каналов NB-IoT во внутрислотном режиме также соответствует режиму движения датчика. Сессии LTE занимают весь RB, тогда как трафик NB-IoT получает полный RB, хотя одна сессия и не занимает его полностью. Поэтому следующие несколько сессий NB-IoT гарантировано будут обслуживаться, поскольку оставшаяся часть уже выделенного RB не может быть занята каким-либо потоком LTE. Независимо от количественных значений трафика LTE система DYNRES всегда находится в выигрышном положении.

### Производительность системы

Мы рассмотрели показатели надежности представленных стратегий распределения ресурсов. Теперь сосредоточим внимание на системно-ориентированных показателях, в частности, коэффициенте использования ресурсов.

Перейдем к рассмотрению рис. 8 и рис. 9, иллюстрирующих средние значения коэффициента использования ресурсов для таких же параметров, как и на рис. 6 и рис. 8, соответственно. Анализируя представленные результаты, мы видим, что картина противоположна результатам, представленным на рис. 6 и рис. 7. В частности, стратегия DYN превосходит конкурентов из-за более агрессивного механизма распределения ресурсов: любой доступный RB немедленно предоставляется по запросу от любого типа трафика. Напротив, стратегия STAT демонстрирует худшую производительность, поскольку доминирующему трафику одной услуги никогда не может быть предоставлены ресурсы, зарезервированные для другой услуги. Наконец, стратегия DYNRES демонстрирует «взвешенное»

поведение приближаясь к кривой стратегии DYN при низких нагрузках и к кривой стратегии STAT при высоких.

### Параметризация стратегий

Опираясь на полученный опыт анализа стратегий, сформированную в ходе первых двух частей проведенного численного исследования, мы теперь рассмотрим вопрос определения пороговых значений для обсуждаемых типов трафика в зависимости от требований, определенных серверами обработки данных предоставляемой услуги. Эти требования выражаются в терминах вероятностей блокировок LTE и NB-IoT сессий. Для этого исследования мы не рассматриваем стратегию DYN, поскольку она не обеспечивает требуемые гарантии производительности. Следовательно, далее, мы проводим сравнение стратегий STAT и DYNRES.

Для определения параметров стратегии распределения ресурсов, мы установим максимально допустимый уровень вероятности блокировок для услуг LTE и NB-IoT. Устанавливаем это значение в 1% для обоих типов трафика. Затем используем результаты Раздела 3, для определения минимальных и максимальных значений  $\gamma$ ,  $\gamma_{min}$  и  $\gamma_{max}$ , необходимые для резервирования ресурсов. Далее, для стратегии DYNRES положим  $R_L = \gamma_{min}$ ,  $R_N = 1 - \gamma_{max}$ . Для выбранных порогов вероятностей и потоков нагрузки от 50 видеокамер с привязкой к LTE и 30 000 NB-IoT сенсоров значения коэффициента распределения ресурсов составляют  $\gamma_{min} = R_L = 0,55$  и  $\gamma_{max} = 1 - R_N = 0,7$ . Другими словами, 55% ресурсов должны быть выделены исключительно сегменту LTE, а 30% должны быть предназначены для NB-IoT сессий. Таким образом, задача заключается в том, как эффективно распределять ресурсы между значениями  $\gamma_{min}$  и  $\gamma_{max}$ , которые, в нашем случае, составляют 15%.

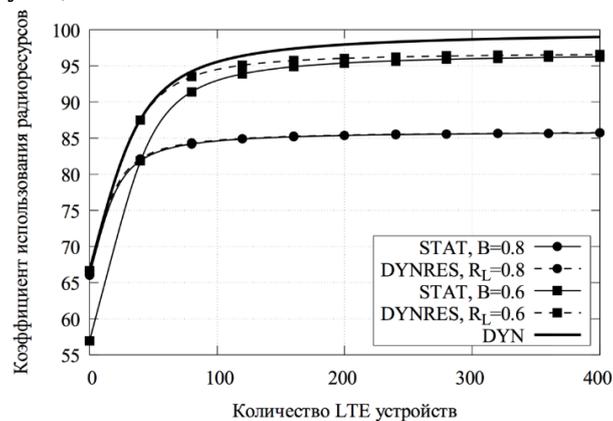


Рис. 9. Коэффициент использования ресурсов в зависимости от предложенной нагрузки LTE

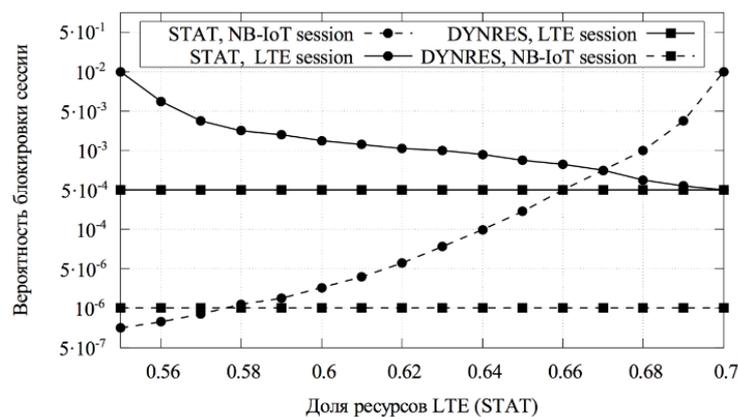


Рис. 10. Вероятность блокировки в зависимости от доли распределения ресурсов  $\gamma$

Сравним стратегию STAT, где  $\gamma \in \{\gamma_{min}, \gamma_{max}\}$  с альтернативной стратегией DYNRES, где доступные после резервирования ресурсы динамически разделяются между обоими типами трафика. На рис. 10 представлено поведение вероятностей блокировки для потоков LTE и NB-IoT, а на Рис. 11 коэффициент использования ресурсов системы. Что касается рис. 10, заметим, что DYNRES предпочтительнее STAT, так как существует очень «узкий» рабочий режим,  $\gamma \leq 0,56$ , когда вероятность блокировки NB-IoT для STAT ниже, чем для DYNRES ( $0,5 \cdot 10^{-6}$  против  $10^{-6}$ ). В то же время это небольшое преимущество

компенсируется большими значениями вероятностей блокировок LTE сессий:  $10^{-2}$  для STAT против  $0.5 \cdot 10^{-3}$  для DYNRES.

Теперь сфокусируем внимание на кривых, показывающих степень использования ресурсов в тех же условиях, что и на рис. 11. Здесь мы видим, что DYNRES превосходит STAT для всех допустимых значений  $\gamma$ . Хотя количественное различие не является значительным, мы можем заключить, что стратегия выделения ресурсов DYNRES является наилучшим вариантом для рассматриваемой гетерогенной системы сбора данных. При оптимальном выборе параметров  $R_L$  и  $R_N$  DYNRES всегда работает лучше, чем STAT. В то же время существует такой режим нагрузки, где DYNRES работает хуже, чем DYN с точки зрения использования ресурсов: четкое доминирование одного типа трафика над другим, например, экстремально-высокая нагрузка от LTE и незначительная нагрузка от NB-IoT. Однако, фактическая разница составляет порядка нескольких процентов и сопровождается значительно более низкой надежностью, так как вероятности блокировки для DYNRES в таких экстремальных условиях на порядок ниже, чем при DYN, см. рис. 6 и рис. 7.

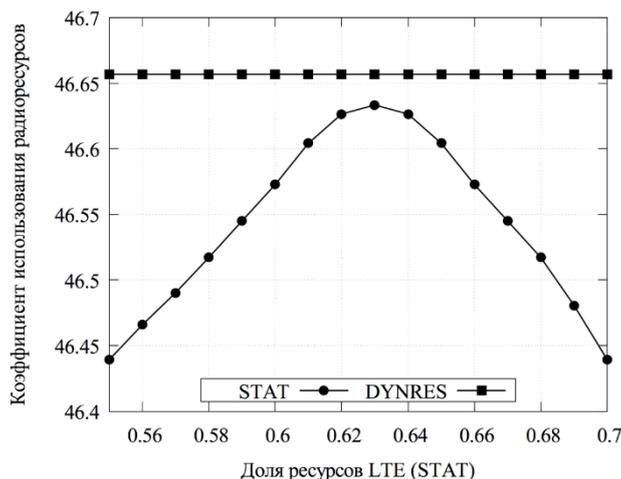


Рис. 11. Коэффициент использования ресурсов в зависимости от доли распределения ресурсов,  $\gamma$

## Заключение

В статье представлены методы эффективного сбора разнородных данных беспроводной сетью Интернета Вещей. Мы сосредоточили внимание на передаче высокоскоростных видеопотоков, поступающих от камер наблюдения, подключенных к LTE, и низкоскоростных сенсорных данных, собираемых с многочисленных устройств, подключенных к технологии NB-IoT (с учетом внутриволнового развертывания NB-IoT). Разработана аналитическая модель оценки эффективности распределения радиоресурсов. Модель позволяет исследовать особенности совместного использования ресурсов LTE и NB-IoT. Наконец, на примере оператора наблюдения, реализующего систему мониторинга, мы провели оценку трех альтернативных стратегий совместного использования ресурсов соты LTE с поддержкой технологии NB-IoT.

Проведенное численное исследование показало, что простейшая стратегия STAT очень чувствительна к предлагаемой нагрузке и требует точной информации об уровне поступающей нагрузки. Также показано, что стратегия DYN с полностью динамическим распределением ресурсов позволяет достичь наивысшей пропускной способности системы, но не может гарантировать требуемую надежность обслуживания. Предложенная стратегия динамического распределения ресурсов с резервированием, DYNRES, позволяет удовлетворять требования надежности при сохранении коэффициента использования ресурсов на высоком уровне. Стратегия DYNRES рекомендуется для будущих развертываний IoT в мобильных сетях 5G, в то время как разработанная аналитическая модель в статье может применяться для оценки эффективности будущих решений.

## Благодарности

Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 02.a03.21.0008) и РФФИ (научные проекты № 16-07-00766 и № 17-07-00845).

## Литература

1. Cisco. The Zettabyte Era: Trends and analysis. White Paper. – 2016.
2. Jagadish H., Gehrke J., Labrinidis A., Papakonstantinou Y., Ramakrishnan R., Shahabi C. Big data and its technical challenges. Communications of the ACM – 2014. – № 7(57). – С. 86-94.
3. Murdoch T., Detsky A. The inevitable application of big data to health care. JAMA. – 2013. – №13(39). – С. 1351-1352.

4. Petrov V., Samouylov A., Begishev V., Moltchanov D., Andreev S., Samouylov K., Koucheryavy Y. Vehicle-based relay assistance for opportunistic crowdsensing over Narrowband IoT (NB-IoT). *IEEE Internet of Things Journal*. – 2017. – №1(99).
5. Margelis G., Piechocki R., Kaleshi D., Thomas P. Low throughput networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations. In *Proc. of the IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. – 2015. – C. 181-186.
6. Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., Gerasimenko M., Tirronen T., Torsner J., Sachs J., Dohler M., Koucheryavy Y. Understanding the IoT connectivity landscape: A contemporary M2M radio technology roadmap. *IEEE Communications Magazine*. – 2015. №9(53). – C. 32-40.
7. Rico-Alvarino A., Vajapeyam M., Xu H., Wang X., Blankenship Y., Bergman J., Tirronen T., Yavuz E. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications. *IEEE Communications Magazine*. – 2016. – № 6(54). – C. 14-21.
8. Zhu W., Cui P., Wang Z., Hua G. Multimedia big data computing. *IEEE MultiMedia*. – 2015. – № 3(22) – C.96-105.
9. Lyon D. Surveillance, snowden, and big data: Capacities, consequences, critique. *Big Data & Society*. – 2014. – № 1(2).
10. Che D., Safran M., Peng Z. From big data to big data mining: Challenges, issues, and opportunities. In *Proc. of the 18th International Conference on Database Systems for Advanced Applications*. – 2013. – C. 1-15.
11. Zuech R., Khoshgoftaar T., Wald R. Intrusion detection and Big Heterogeneous Data: a Survey. *Journal of Big Data*. – 2015. – № 1(2).
12. Ramachandran U, Hong K., Iftode L., Jain R., Kumar R., Rothermel K., Shin J., Sivakumar R. Large-scale situation awareness with camera networks and multimodal sensing. *Proceedings of the IEEE*. – 2012. – № 4(100). – C. 878-892.
13. 3GPP, Standardization of NB-IoT completed, [http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb\\_1ot\\_complete](http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb_1ot_complete), – 2016.
14. Ratasuk R., Vejlgard B., Mangalvedhe N., Ghosh A. NB-IoT system for M2M communication. In *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC)*. – 2016. – C. 1-5.
15. Study on provision of low-cost Machine-Type Communications (MTC) User Equipments (UEs) based on LTE. 3GPP Technical Report (TR) 36.888/r12. – 2013.
16. 3GPP, Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT). Technical Report (TR) 45.820/r13, December. – 2015.
17. Nokia. Dynamic end-to-end network slicing for 5G. WhitePaper. – 2017.
18. Borodakiy V.Y., Buturlin I.A., Gudkova I.A., Samouylov K.E. Modelling and analysing a dynamic resource allocation scheme for M2M traffic in LTE networks. In *Proc. of NEW2AN Conference*. – 2013. – C. 420-426.
19. Wang Y. P. E., Lin X., Adhikary A., Grovlen A., Sui Y., Blankenship Y., Bergman J., Razaghi H. S. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*. – 2017. – № 3(55). – C. 117-123.
20. Yashkov S.F., Yashkova A.S. Processor sharing: A survey of the mathematical theory. *Automation and Remote Control*. – 2007. – № 9(68). – C.1662-1731.
21. Kim H. S., Shro N. B. Loss probability calculations and asymptotic analysis for multiplexers. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2001. – № 6(9). – C. 755-768.
22. Jarvis J.P. Approximating the equilibrium behavior of multi-server loss systems. *Management Science*. – 1985. – № 2(31). – C. 235-239.
23. Lin A.Y.-M., Silvester J.A. Priority queueing strategies and buffer allocation protocols for traffic control an ATM integrated broadband switching system. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (IEEE JSAC)*. – 1991. – № 9(9). – C. 1524-1536.
24. Hou T. C., Wong A.C. Queueing analysis for switching of mixed continuous-bit-rate and bursty traffic. In *Proc. of the 9th Ninth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies (IEEE INFOCOM)*. – 1990. – C.660-667.

## References

1. Cisco. The Zettabyte Era: Trends and analysis. White Paper. – 2016.
2. Jagadish H., Gehrke J., Labrinidis A., Papakonstantinou Y., Ramakrishnan R., Shahabi C. Big data and its technical challenges. *Communications of the ACM* – 2014. – № 7(57). – C. 86-94.
3. Murdoch T., Detsky A. The inevitable application of big data to health care. *JAMA*. – 2013. – №13(39). – C. 1351-1352.
4. Petrov V., Samouylov A., Begishev V., Moltchanov D., Andreev S., Samouylov K., Koucheryavy Y. Vehicle-based relay assistance for opportunistic crowdsensing over Narrowband IoT (NB-IoT). *IEEE Internet of Things Journal*. – 2017. – №1(99).
5. Margelis G., Piechocki R., Kaleshi D., Thomas P. Low throughput networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations. In *Proc. of the IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. – 2015. – C. 181-186.
6. Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., Gerasimenko M., Tirronen T., Torsner J., Sachs J., Dohler M., Koucheryavy Y. Understanding the IoT connectivity landscape: A contemporary M2M radio technology roadmap. *IEEE Communications Magazine*. – 2015. №9(53). – C. 32-40.
7. Rico-Alvarino A., Vajapeyam M., Xu H., Wang X., Blankenship Y., Bergman J., Tirronen T., Yavuz E. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications. *IEEE Communications Magazine*. – 2016. – № 6(54). – C. 14-21.
8. Zhu W., Cui P., Wang Z., Hua G. Multimedia big data computing. *IEEE MultiMedia*. – 2015. – № 3(22) – C.96-105.
9. Lyon D. Surveillance, snowden, and big data: Capacities, consequences, critique. *Big Data & Society*. – 2014. – № 1(2).
10. Che D., Safran M., Peng Z. From big data to big data mining: Challenges, issues, and opportunities. In *Proc. of the 18th International Conference on Database Systems for Advanced Applications*. – 2013. – C. 1-15.
11. Zuech R., Khoshgoftaar T., Wald R. Intrusion detection and Big Heterogeneous Data: a Survey. *Journal of Big Data*. – 2015. – № 1(2).
12. Ramachandran U, Hong K., Iftode L., Jain R., Kumar R., Rothermel K., Shin J., Sivakumar R. Large-scale situation awareness with camera networks and multimodal sensing. *Proceedings of the IEEE*. – 2012. – № 4(100). – C. 878-892.
13. 3GPP, Standardization of NB-IoT completed, [http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb\\_1ot\\_complete](http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb_1ot_complete), – 2016.
14. Ratasuk R., Vejlgard B., Mangalvedhe N., Ghosh A. NB-IoT system for M2M communication. In *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC)*. – 2016. – C. 1-5.
15. Study on provision of low-cost Machine-Type Communications (MTC) User Equipments (UEs) based on LTE. 3GPP Technical Report (TR) 36.888/r12. – 2013.
16. 3GPP, Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT). Technical Report (TR) 45.820/r13, December. – 2015.
17. Nokia. Dynamic end-to-end network slicing for 5G. WhitePaper. – 2017.
18. Borodakiy V.Y., Buturlin I.A., Gudkova I.A., Samouylov K.E. Modelling and analysing a dynamic resource allocation scheme for M2M traffic in LTE networks. In *Proc. of NEW2AN Conference*. – 2013. – C. 420-426.
19. Wang Y. P. E., Lin X., Adhikary A., Grovlen A., Sui Y., Blankenship Y., Bergman J., Razaghi H.S. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*. – 2017. – № 3(55). – C. 117-123.
20. Yashkov S.F., Yashkova A.S. Processor sharing: A survey of the mathematical theory. *Automation and Remote Control*. – 2007. – № 9(68). – C.1662-1731.

21. Kim H. S., Shro N. B. Loss probability calculations and asymptotic analysis for multiplexers. IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2001. – № 6(9). – С. 755-768.
22. Jarvis J. P. Approximating the equilibrium behavior of multi-server loss systems. Management Science. – 1985. – № 2(31). – С. 235-239.
23. Lin A. Y.-M., Silvester J. A. Priority queueing strategies and buffer allocation protocols for traffic control in an ATM integrated broadband switching system. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (IEEE JSAC). – 1991. – № 9(9). – С. 1524-1536.
24. Hou T. C., Wong A. C. Queueing analysis for switching of mixed continuous-bit-rate and bursty traffic. In Proc. of the 9th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies (IEEE INFOCOM). – 1990. – С. 660-667.

#### **Об авторах:**

**Бегисhev Вячеслав Олегович**, аспирант кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, Российский университет дружбы народов, [begishev\\_vo@rudn.university](mailto:begishev_vo@rudn.university)

**Мачнев Егор Андреевич**, студент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, Российский университет дружбы народов, [machnev\\_ea@rudn.university](mailto:machnev_ea@rudn.university)

**Молчанов Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, Российский университет дружбы народов, [molchanov\\_da@rudn.university](mailto:molchanov_da@rudn.university)

**Самуйлов Андрей Константинович**, кандидат физико-математических наук, доцент, Российский университет дружбы народов, [samuylov\\_ak@rudn.university](mailto:samuylov_ak@rudn.university)

#### **Note on the authors:**

**Begishev Vyacheslav O.**, Graduate student of the Department of Applied Probability and Informatics, Peoples' Friendship University of Russia, [begishev\\_vo@rudn.university](mailto:begishev_vo@rudn.university)

**Machev Egor A.**, Student of the Department of Applied Probability and Informatics, Peoples' Friendship University of Russia, [machnev\\_ea@rudn.university](mailto:machnev_ea@rudn.university)

**Molchanov Dmitri A.**, Candidate of Science (PhD) in technology, associate professor, Peoples' Friendship University of Russia, [molchanov\\_da@rudn.university](mailto:molchanov_da@rudn.university)

**Samouylov Andrey K.**, Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Peoples' Friendship University of Russia, [samuylov\\_ak@rudn.university](mailto:samuylov_ak@rudn.university)