

## Введение

Рост информационных потребностей современного общества привел к созданию мобильных сетей 3G, в которых доступ к цифровому контенту стал такой же равноправной услугой, что и передача речевой информации. Дальнейшее повышение объемов потребления цифрового контента и требований к пропускной способности каналов обеспечивающих процесс доступа к информационным ресурсам привело к появлению технологий сетей 3.5G и 4G и переходу к полностью пакетному виду коммутации с повсеместным использованием в современных инфокоммуникациях на сетевом уровне протокола *IP (Internet Protocol)*. Поэтому, в связи с тем, что *IP* изначально использовался в сетях передачи данных, технологии данных сетей также стали применяться для обеспечения доступа к медиаресурсам. Наиболее распространенным способом организации беспроводного доступа в локальных сетях передачи данных (*LAN – local area network*) является технология *WiFi*, использование которой, как альтернативы мобильным сетям в сетях доступа, представляется наиболее перспективным.

Кроме того, существующие технологии обработки информационных потоков должны обеспечивать заданный уровень качества обслуживания (*QoS – quality of service*) для каждого вида трафика. Основными показателями *QoS* при этом являются: вероятность потери пакета, среднее время задержки пакета в системе и др. Однако, многовариантность маршрутов передачи информационных потоков, динамическое распределение ресурсов узлов и т.д., все это усложняет задачу определения показателей *QoS* [1,2]. В данной работе предлагается обеспечить распределение трафика между точками доступа беспроводной сети *WiFi* с применением тензорного анализа сетей с целью обеспечения заданного уровня *QoS*.

## 1. Предварительные сведения

Основными составляющими беспроводной сети являются (рис. 1): *UE – user equipment* (пользовательское оборудование), *AP – access point* (точка доступа), *Router – маршрутизатор*. В качестве сети передачи данных часто используется сеть Интернет. Взаимодействие между *UE* и *AP* осуществляется с использованием стандартных видов модуляции и кодирования, позволяющих выделить пропускную способность для передачи информации от пользовательского оборудования в сеть и обратно. При этом одна точка доступа обслуживает несколько абонентских устройств, каждое из которых получает доступ в соответствии с алгоритмом *CSMA/CA (carrier sense multiple access/collision avoidance – многостанционный доступ с прослушиванием несущей и*

предотвращением коллизий). При обработке потоков данных поддержка *QoS* обеспечивалась на уровне имеющихся возможностей, но с ростом аудио и видео трафика роль качества обслуживания резко возросла [1,2], так как эти потоки чувствительны к временным задержкам, возникающими при их обработке.

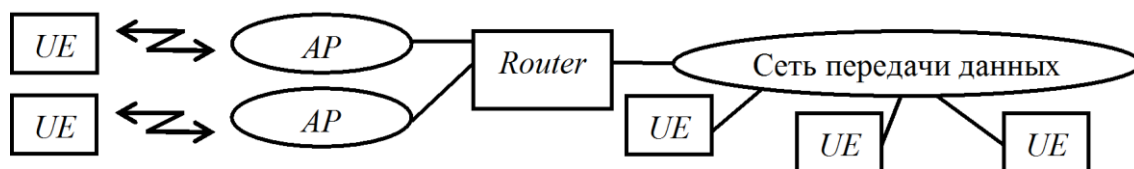


Рисунок 1 – Общая структурная схема сети *WiFi*

Временная задержка в сетях *WiFi* определяется двумя составляющими: первая связана с процессом доступа *UE* к разделяемой радиосреде, т.е. с занятием определенного радиоканала к определенной точке доступа; вторая зависит от скорости передачи, установленной для данного соединения. При этом общее время задержки (для речевой информации в соответствии с рекомендацией *ITU Y.1541* не должно превышать 150 мс) будет состоять из времени задержки на участке *UE-AP* и времени задержки в остальной части тракта передачи информации. Так как основной вклад во время задержки будет вносить время доступа к радиоканалу, то для повышения уровня качества обслуживания и снижения среднего времени задержки необходимо распределить пользовательский трафик по точкам доступа таким образом, чтобы обеспечить минимальное среднее время задержки пакетов на всем тракте передачи информации. С этой целью предлагается использование узлового метода тензорного анализа с целью оценки среднего времени задержки для сети *WiFi*.

## 2. Тензорная модель исследуемой сети

В качестве модели сети будем рассматривать сеть, состоящую из систем массового обслуживания (СМО), каждая из которых является моделью обработки пакетов на соответствующем уровне. Рассматривая интерфейсный уровень взаимодействия узлов, любому устройству сети можно сопоставить часть сети массового обслуживания, каждая система которой будет моделировать отдельный физический интерфейс устройства передачи информации (входной/выходной интерфейс), в т.ч. и радиointерфейс.

На следующем (канальном) уровне можно рассматривать уже не только физические соединения, существующие между узлами, а учитывать направления передачи к узлам сети. Каждое направление будет задано отдельной СМО, тип которой определяется дисциплиной обслуживания реальной системы обработки информационных потоков. Также, необходимо учитывать, что основные функциональные зависимости исследуемых показателей являются

функциями от загрузки устройств:  $p_{\text{потерь}} = f(\rho)$  и  $T_{\text{задержки}} = f(\rho)$ . Полученные при расчете значения показателей необходимо использовать для получения значений оценок качества обслуживания  $QoS$  на следующем сетевом уровне, т.к. в конкретной реальной сети распределение потоков по узлам не случайное, а подчиняется таблице маршрутизации. Для каждого маршрута можно записать следующие выражения [3]:  $p_{\text{потерь}} = 1 - \sum_{i=1}^m (1 - p_{\text{потерь},i})$ ;  $T_{\text{задержки}} = \sum_{i=1}^m T_{\text{задержки},i}$ , где  $m$  определяется общим числом систем, составляющих маршрут передачи. Для всей сети в целом есть смысл в определении общего среднего времени задержки:  $T_{\text{задержки}} = \sum_{i=1}^n T_{\text{задержки},i}$ , где  $n$  общее количество систем в сети.

В данной работе использован тензорный подход к задаче определения параметров качества обслуживания в беспроводной сети. Для этого используется понятие «примитивная сеть» [3]. Примитивная сеть, при узловом методе тензорного анализа, состоит из не замкнутых обособленных ветвей, ее простейший элемент – ветвь. Уравнение состояния ветви определяется соотношением:  $\lambda = \mu\rho$ , где:  $\rho$  – загрузка СМО;  $\lambda$  – интенсивность поступления пакетов от пользователя сети *WiFi*;  $\mu$  – интенсивность обслуживания в СМО. Геометрические объекты примитивной сети:  $\bar{\lambda}'$  вектор интенсивностей потоков пакетов в ветвях;  $\bar{\rho}'$  вектор загрузки СМО;  $\bar{\mu}'$  квадратная матрица, диагональные элементы выражают интенсивности обслуживания пакетов.

Для установления формул преобразования между сетями используется предположение о том, что поток вызовов с одной и той же интенсивностью ( $\lambda$ ) поступления вызовет при неизменной интенсивности обслуживания одну и ту же загрузку ( $\rho$ ) устройств при изменении структуры и можно считать, что будет выполняться соотношение (инвариант):  $\rho\lambda = \rho'\lambda'$ , где переменные со штрихом для одной структуры сети, без штриха для другой. Находя соотношение между нагрузками ветвей примитивной сети и нагрузками в исходной сети, определяем матрицу перехода из одной системы координат в другую  $\mathbf{A}$ . Вектор интенсивностей потоков сообщений выразим, как:  $\lambda = \mathbf{A}^T \lambda'$ . Матрицу значений интенсивностей обслуживания пакетов представим в виде:  $\mu = \mathbf{A}^T \mu' \mathbf{A}$ . Производя замену в уравнении исходной сети  $\lambda = \mu\rho$  получаем систему линейных уравнений:

$$\mathbf{A}^T \lambda' = (\mathbf{A}^T \mu' \mathbf{A}) \rho \quad (1)$$

Решая уравнение (1), определяем загрузки исходной сети, а далее находим значения загрузок в ветвях при заданных значениях вероятностей поступления вызовов в отдельные системы массового обслуживания. При проектировании или эксплуатации сети *WiFi*, согласно

приведенным выше теоретическим выкладкам можно распределять потоки между точками доступа таким образом, чтобы каждый поток получил требуемое качество обслуживания.

### 3. Численные результаты

В качестве иллюстрации применения предлагаемого метода к расчету среднего времени задержки проведем исследование сети, структурная схема которой представлена на рис. 2. Пользователи подключаются к одной из трех точек доступа, каждая из которых использует свой частотный канал и свой маршрут передачи. Управляя распределением трафика на данных точках доступа, т.е. назначая каждому *UE* определенный частотный канал, можно обеспечить требуемые значения среднего времени задержки, как одного из показателей качества обслуживания в исследуемой сети связи.

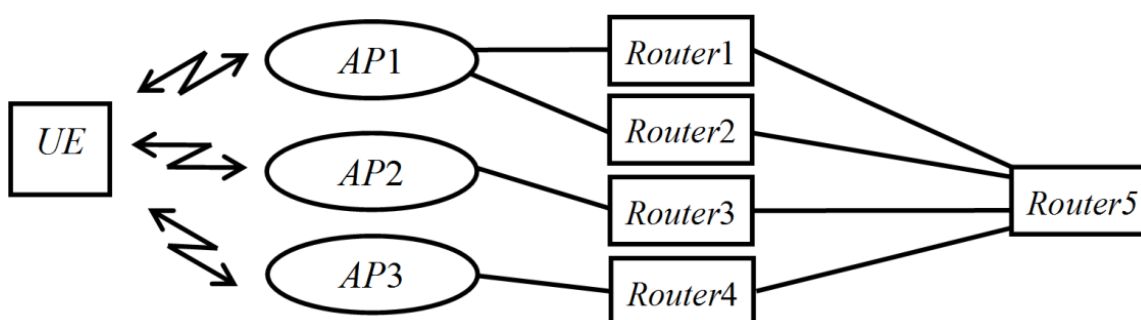


Рисунок 2 – Структура исследуемой сети

Моделью исследуемой сети является сеть массового обслуживания, состоящая из одноканальных СМО (рис. 3). СМО1 определяется процессом обслуживания информационных потоков в *UE*, а СМО13 обработкой информации в *Router5*. Для любых маршрутов время задержки, вносимое этими системами, будет одинаковым, поэтому учет временных характеристик этих узлов можно производить на заключительном этапе расчета.

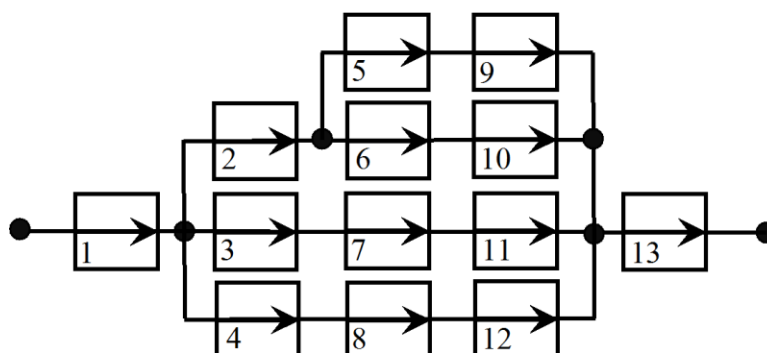


Рисунок 3 – Модель исследуемой сети

Точка доступа AP1 представлена в виде трех СМО: СМО2, как модель входного интерфейса; СМО5 и СМО6, как модели выходных интерфейсов. В связи с тем, что задержка во внутреннем коммутаторе намного меньше задержек в интерфейсах, в составе моделей этот коммутатор отсутствует. Кроме того, необходимо учитывать и задержку на распространение сигнала в радиоканале. Процессы обслуживания информационных потоков в маршрутизаторах Router1-Router4 моделируют СМО9-СМО12.

Данную модель преобразуем к узловому виду: в местах образования контуров производим «размыкание» связей между СМО9-СМО12. Находя соответствие между нагрузками в исходной и примитивной сети, определяем матрицу  $A$  согласно [3] (ввиду большой размерности здесь не приводится). Так как трафик поступает в сеть только через СМО1, то все интенсивности поступления пакетов в остальные СМО могут быть определены через  $\lambda_1$ . С этой целью в уравнение вводятся коэффициенты  $p_i$ , которые определяют долю трафика поступающего на  $i$  СМО. При этом, исходя из структуры модели сети:  $p_2 + p_3 + p_4 = 1$ ,  $p_5 + p_6 = 1$  и  $\lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} = \lambda_1 = \lambda_{13}$ . Таким образом, с учетом того, что сумма интенсивностей поступления в узле равна нулю, левая часть уравнения (1) преобразуется к виду:

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4 \\ \lambda_2 - \lambda_5 - \lambda_6 \\ \lambda_3 - \lambda_7 \\ \lambda_4 - \lambda_8 \\ \lambda_5 - \lambda_9 \\ \lambda_6 - \lambda_{10} \\ \lambda_7 - \lambda_{11} \\ \lambda_8 - \lambda_{12} \\ \lambda_9 \\ \lambda_{10} \\ \lambda_{11} \\ \lambda_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \\ \lambda_7 \\ \lambda_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ p_5 \lambda_2 \\ p_6 \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ p_5 p_2 \lambda_1 \\ p_6 p_2 \lambda_1 \\ p_3 \lambda_1 \\ p_4 \lambda_1 \end{pmatrix} = \lambda_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ p_5 p_2 \\ p_6 p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Используя вектор управления, содержащий вероятности разделения нагрузки по узлам  $(p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6)$  можно управлять распределением трафика по узлам сети с целью обеспечения определенного значения среднего времени задержки либо по заданному маршруту, либо по всей сети в целом при установленном значении интенсивности информационных потоков. При этом, исходя из уравнения (2) и  $p_5 + p_6 = 1$ , достаточно использовать вероятности  $p_2, p_3, p_5$ . Например, при входном значении  $\lambda_1$  равном 80 условных единиц, интенсивности обслуживания в

каждой системе равной 100 условных единиц (кроме СМО10, для которой примем интенсивность обслуживания равную 200 для повышения наглядности метода) и использовании в качестве модели системы массового обслуживания вида  $M/M/1$  можно изменяя значения выбранных

коэффициентов из  $p_2$ ,  $p_3$  и  $p_5$  определить изменение времени задержки по сети как  $T = \sum_{i=1}^{12} \frac{1/\mu_i}{1-\rho_i}$ ,

где  $\rho_i$  определяется из решения уравнения (2) относительно  $\rho$  и нахождения коэффициентов использования узлов в сети ( $\rho_{\text{узлов}} = \mathbf{A}\rho$ ). Результаты расчетов представлены на рис. 4 (для  $p_3 = 0.3$  и  $p_5 = 0.1$ , как наиболее показательные значения).

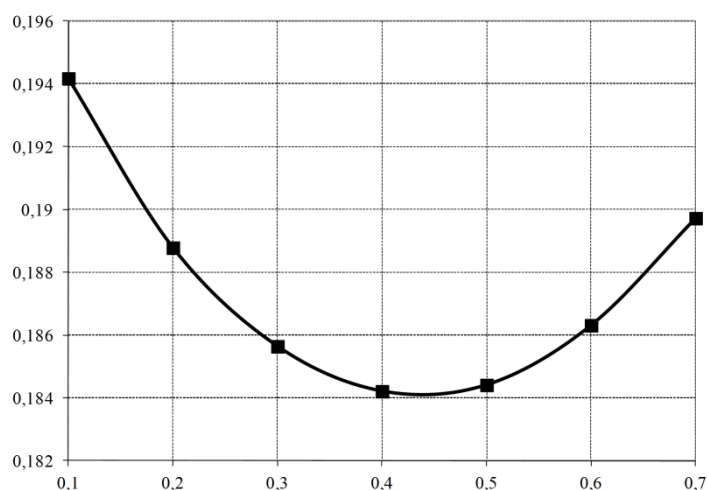


Рисунок 4 – Изменение времени задержки в сети в зависимости от значений  $p_2$

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что минимальное среднее время задержки (при  $p_3 = 0.3$  и  $p_5 = 0.1$ ) достигается при  $p_2 \approx 0.45$ , т.е. необходимо произвести закрепление пользовательского оборудования за точками доступа таким образом, чтобы 45% трафика поступало на AP1 при условии, что 30% трафика проходит через AP2 и 25% трафика обслуживается AP3.

### Заключение

В связи с тем, что в современных беспроводных сетях необходимо управлять большим количеством устройств и проводить обработку множества информационных потоков с заданным качеством обслуживания для каждого типа потока, решение задачи управления эффективным использованием ресурсов сети значительно усложняется. Тензорный метод анализа сетей, как обладающий возможностями по учету процессно-структурного взаимодействия и гибкости применения, позволяет достаточно просто формализовать проектные процедуры для решения данной задачи, уменьшить задержки при динамическом управлении инфокоммуникационными системами и обеспечить хорошую масштабируемость сети как при внедрении новых услуг, так и при изменении структуры и внедрении новых технологий инфокоммуникационной сети.

### Список литературы

1. Pochiang Lin; Wu-I Chou; Tsungnan Lin. *Achieving airtime fairness of delay-sensitive applications in multirate IEEE 802.11 wireless LANs // IEEE Communications Magazine – 2011. – Vol. 49 – 9 – Pp. 169-175.*
2. Vardakas, J.S.; Papapanagiotou, I.; Logothetis, M.D.; Kotsopoulos, S.A. *On the End-to-End Delay Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // Second International Conference on Internet Monitoring and Protection (ICIMP) – 2007. – Pp.16-20.*
3. Пономарев Д.Ю. Исследование характеристик пакетных сетей узловым методом тензорного анализа // Программные продукты и системы. – 2009. – №4. – С. 65-69.