

# О МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МНОГОШАГОВЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПОНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ МНОГОФАЗНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С КОРРЕЛИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ

**В.М. Вишнеvский**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [vishn@inbox.ru](mailto:vishn@inbox.ru)

**А.А. Ларионов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [larioandr@gmail.com](mailto:larioandr@gmail.com)

**Ключевые слова:** сети массового обслуживания, беспроводные сети, коррелированные потоки.

**Аннотация:** В докладе рассматривается метод оценки производительности многошаговых беспроводных сетей с использованием математического аппарата теории массового обслуживания с коррелированными потоками. В качестве модели беспроводной сети используется тандемная сеть массового обслуживания с входящими марковскими потоками (МАР), распределением времени обслуживания фазового типа (РН) и ограниченной емкостью очередей. В докладе описываются подходы к нахождению РН-распределений, адекватно описывающих время передачи пакетов по реальным беспроводным каналам. Рассматриваются методы расчета характеристик многофазной тандемной сети массового обслуживания. Для борьбы с проблемой экспоненциального роста пространства состояний сети массового обслуживания с увеличением числа приборов предлагается использовать методы понижения размерности входящих МАР-потоков.

## 1. Введение

Одной из важнейших проблем при исследовании существующих и разработке новых поколений телекоммуникационных систем является оценка производительности сетевых протоколов. Использование аналитических подходов для этой цели сталкивается с трудностями математического характера в связи с большой размерностью пространства состояний стохастических систем, адекватно описывающих функционирование сетевых протоколов и многоэтапную процедуру обслуживания пакетов. Указанные трудности значительно увеличиваются в связи с тем, что потоки в совре-

менных телекоммуникационных сетях имеют коррелированный характер, что требует использования моделей теории очередей с входящим марковским потоком (МАР) и предположения о фазовом характере распределения (РН) времени передачи пакетов, которые наилучшим образом отражают сложный характер информационного взаимодействия в существующих и перспективных сетях IEEE 802.11 и позволяют провести его точный анализ.

В настоящем докладе предлагается метод оценки производительности многошаговых беспроводных систем, основанный на построении тандемной сети массового обслуживания (СеМО) типа  $МАР/РН/1/N \rightarrow \bullet/РН/1/N \rightarrow \dots \bullet/РН/1/N$  [1]. Для построения такой модели необходимо решить ряд задач: найти адекватно описывающее время передачи пакетов по беспроводным каналам распределение, подобрать поток, учитывающий параметры сетевого трафика, а также разработать способ расчета характеристик СеМО. Последняя задача имеет чрезвычайно высокую вычислительную сложность в связи с тем, что в тандемных СеМО размерность входящего на  $n$ -ю фазу МАР-потока экспоненциально зависит от  $n$ .

## 2. Моделирование беспроводной сети с помощью сети массового обслуживания

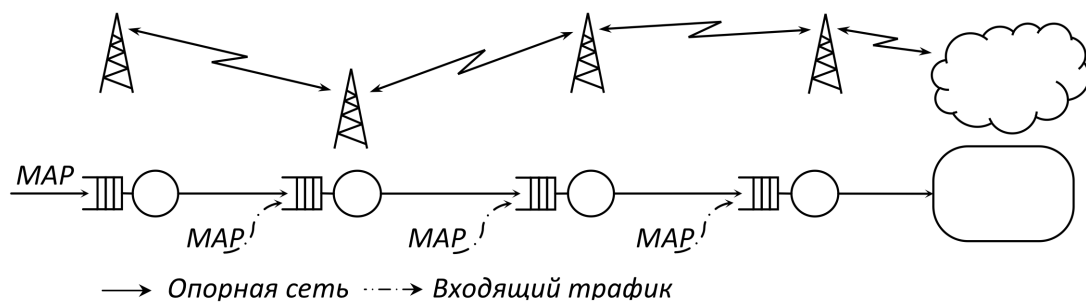


Рис. 1. Моделирование беспроводной сети с помощью СеМО

В тандемной сети массового обслуживания, моделирующей многошаговую телекоммуникационную сеть, обслуживающие приборы соответствуют каналам связи между соседними станциями, а входящие потоки – сетевой трафик. Разумно предполагать, что очереди имеют конечную емкость, поскольку объем памяти в реальных сетевых устройствах всегда ограничен. В сети может быть кросс-трафик – потоки, входящие на промежуточные фазы. Применяемые в модели марковские входящие потоки (Markovian Arrival Process, МАР) позволяют адекватно описывать реальный сетевой трафик [2,3]. Пример модели показан на рис. 1.

Характеристики СеМО типа  $МАР/РН/1/N \rightarrow \bullet/РН/1/N \rightarrow \dots \rightarrow \bullet/РН/1/N$  с  $S$  узлами могут быть вычислены, используя итерационную процедуру, поскольку выходной поток из системы  $МАР/РН/1/N$  является МАР-поток, как и объединение (наложение) МАР-потоков [1]:

1. Пусть  $i = 1$ .
2. Вычислить среднюю длину очереди, коэффициент занятости и задержку на  $i$ -й фазе.

3. Найти MAP-поток обслуженных пакетов, выходящий из  $i$ -й фазы.
4. Если на  $(i + 1)$ -ю фазу поступает кросс-трафик, построить объединение найденного потока обслуженных пакетов с кросс-трафиком.
5. Если  $i < S$ , то, используя найденный на предыдущем шаге поток в качестве входного, увеличить  $i$  и перейти на шаг 2.

Построение выходящего MAP-потока, объединения MAP-потоков, а также формулы, необходимые для расчета средней длины очереди, коэффициента занятости и задержки на  $i$ -й фазе рассмотрено в работе [4]. Далее рассмотрим, что необходимо сделать для построения СеМО и вычисления ее характеристик по описанной схеме.

## 2.1. Построение РН-распределений

При моделировании простых протоколов связи, основанных на CSMA/CA (например, механизм DCF стандарта IEEE 802.11), в качестве распределения времени обслуживания можно использовать распределения фазового типа (РН). Следует отметить, что в более сложных беспроводных протоколах (например, механизм доступа EDCA стандарта IEEE 802.11e), времена передачи пакетов оказываются коррелированными, из-за чего более подходящей моделью может быть марковский процесс обслуживания (Markovian Service Process, MSP). Это связано с тем, что станции получают доступ к каналу не на время передачи отдельного пакета, а на определенный интервал, в течение которого станция не испытывает конкуренции со стороны соседей. Хотя использование MSP усложняет модель, описываемый в статье метод остается применимым и в этом случае. Для простоты изложения в дальнейшем будет предполагаться использование РН-распределения.

Для построения РН-распределения нужно решить две задачи: во-первых, вычислить или измерить характеристики беспроводного канала и, во-вторых, восстановить по этим характеристикам РН-распределение. Есть три способа измерения или вычисления характеристик канала: проведение измерений на реальном оборудовании, использование имитационной модели и аналитический расчет. Измерение на реальном оборудовании позволяет получить наиболее точные результаты, однако оказывается затруднительным в связи с тем, что большинство представленного на рынке оборудования не дает возможности измерить непосредственно время передачи пакета, а измерение задержки передачи от клиента к серверу, соединенных через беспроводной канал, позволяет вычислить лишь время пребывания пакетов в системе.

Наиболее доступными методами получения данных о времени передачи данных по беспроводному каналу являются аналитическое и имитационное моделирование. Для имитационного моделирования можно использовать систему дискретно-событийного моделирования NS-3 или OMNeT++ с пакетом моделей INET. Обе системы моделирования содержат достаточно точные модели беспроводных устройств стандарта IEEE 802.11, распространяются бесплатно, имеют открытый исходный код и большое сообщество разработчиков.

В качестве математической модели канала, позволяющей вычислить моменты распределения, можно использовать, например, полумарковский процесс, построенный на основе модели Bianchi [5]. Для этого дискретная марковская цепь, описанная в статье [5], дополняется поглощающим состоянием, в которое цепь попадает

после успешной передачи пакета. Далее рассматривается полумарковский случайный процесс, переходы которого описываются данной цепью. Время передачи пакета определяется как время до поглощения в этом полумарковском процессе.

Получив последовательность времен передачи пакетов из имитационной модели или оценки первых  $k$  моментов из аналитической модели, можно воспользоваться одним из методов восстановления РН-распределения. Если известна выборка времен обслуживания, хорошие результаты дает алгоритм максимизации ожидания (ЕМ-алгоритм) [6], если же известны лишь моменты, можно воспользоваться методом моментов. Подробнее эти методы и их применение рассмотрены в работе [7].

## 2.2. Построение МАР-потока

Как и в случае РН-распределений, входящий МАР-поток может быть восстановлен, используя выборку интервалов между пакетами, или же известные оценки моментов и корреляции. Если известна выборка, то можно также применить ЕМ-алгоритм [8], а если известны моменты и корреляция - метод моментов. Есть и иные способы построения МАР-потока. Например, в работе [9] предложено отдельно восстанавливать матрицу  $D_0$ , используя методы построения РН-распределения по известным моментам, а матрицу  $D_1$  находить из решения задачи оптимизации с ограничениями, заданными известными коэффициентами корреляции (если известен только коэффициент первого порядка, то задача оказывается линейной).

Необходимо отметить, что проблема поиска МАР-потока заданной размерности является чрезвычайно сложной, так как для размерностей выше третьей трудно определить даже границы множества значений моментов, для которых существует МАР-поток. Подробнее перечисленные методы рассмотрены в работе [7].

## 2.3. Вычисление характеристик СеМО

Использование итерационного алгоритма, описанного в начале раздела, сталкивается с очень высокой вычислительной сложностью, поскольку размерность МАР-потока обслуженных пакетов имеет порядок  $O(NMQ)$ , где  $N$  - порядок входящего МАР-потока,  $M$  - порядок РН-распределения,  $Q$  - емкость системы. Из-за этого сложность расчета характеристик  $n$ -й фазы даже без кросс-трафика имеет порядок  $O(N(MQ)^n)$ , то есть экспоненциально зависит от размера сети.

Для получения численных оценок можно использовать метод Монте-Карло, вычисляя характеристики СеМО с помощью ее имитационной модели. Основным недостатком этого подхода является высокая вычислительная сложность: для получения стабильных оценок требуется большое количество измерений. Альтернативой является замена МАР-потоков обслуженных пакетов с промежуточных приборов, имеющих большую размерность, МАР-потоками меньшей размерности [7]. В этом случае для потока обслуженных пакетов строится эквивалентный поток меньшей размерности, значения первых  $L$  моментов и первых  $K$  коэффициентов корреляции которого отклоняются от значений исходного потока не более, чем на  $\epsilon$ . Для реализации данного подхода можно использовать методы построения МАР-потока, описанные в разделе 2.2.. Отметим, что для использования ЕМ-процедуры можно произвести генерацию выборки необходимого объема из исходного МАР-потока.

### 3. Заключение

В докладе был представлен метод оценки производительности многошаговой беспроводной сети с использованием тандемных сетей массового обслуживания с коррелированными входными потоками, распределением времени обслуживания фазового типа и ограниченной емкостью очередей. Рассмотрены способы построения распределений времени передачи пакетов по беспроводным каналам, восстановления MAP-потоков, а также подходы к получению численных характеристик сети массового обслуживания с понижением размерности выходных потоков.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант №18-57-00002.

### Список литературы

1. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Мн.: БГУ, 2000. 175 с.
2. Neyman D., Lucantoni D. Modelling Multiple IP Traffic Streams with Rate Limits // IEEE ACM Transactions on Networking. 2003. Vol. 11. P. 948-956.
3. Klemm A., Lindermann C., Lohmann M. Modelling IP Traffic Using the Batch Markovian Arrival Process // Performance Evaluation. 2008. Vol. 54. P. 149-173.
4. Vishnevsky V., Dudin A., Kozyrev D., Larionov A. Methods of performance evaluation of broadband wireless networks along the long transport routes // Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 601. P. 72-85.
5. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, No. 18. P. 535-547.
6. Thummler A., Buchholz P., Telek M. A novel approach for fitting probability distributions to real trace data with the EM algorithm // Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN'05). Yokohama, Japan, 2005. IEEE, 2005. P. 712-721.
7. Vishnevsky V., Larionov A., Semenova O., Ivanov R. State Reduction in Analysis of a Tandem Queueing System with Correlated Arrivals // Communications in Computer and Information Science. 2017. Vol. 800. P. 215-230.
8. Horvath G., Okamura H. A Fast EM Algorithm for Fitting Marked Markovian Arrival Processes with a New Special Structure // Lecture Notes in Computer Science. 2013. Vol. 8168. P. 119-133.
9. Horvath G., Buchholz P., Telek M. A MAP fitting approach with independent approximation of the inter-arrival time distribution and the lag correlation // Proceedings of the Second International Conference on the Quantitative Evaluation of Systems (QEST'05). Torino, Italy, 2005. IEEE, 2005. P. 124-133.