

УДК 681.324

Г.А. КУЧУК<sup>1</sup>, С.Н. НЕЧАУСОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

## КОНВЕРГЕНЦИЯ АВТОНОМНЫХ ТРАФИКОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ

Рассмотрен механизм конвергенции автономных трафиковых процессов, формируемых отдельными службами мультисервисных сетей (МСС). Предложены математические модели конвергенции, которые используют эффекты, получаемые при объединении одноканальных систем массового обслуживания. Результаты моделирования для автономных трафиковых процессов отдельных служб мультисервисных сетей при большом числе объединяемых систем или при их высокой загрузке показали, что можно говорить о сильном взаимодействии между объединяемыми процессами. В результате проведенных исследований установлено, что модель трафика МСС, которая базируется на конвергенции одноканальных систем массового обслуживания типа  $M/M/1/\infty$  в многоканальную систему, достаточно достоверно отображает реальные трафиковые процессы; а полученный трафик, во-первых, обладает свойством долговременной зависимости (гиперболическая зависимость основных параметров объединенного трафика), и, во-вторых, – свойством масштабной инвариантности, т.е. имеет фрактальный характер.

**мультисервисная сеть, автономный трафиковый процесс, конвергенция, трафиковая модель**

### Введение

При обработке информационных потоков в современных телекоммуникационных системах необходимо обеспечить: высококачественную передачу, распределение, хранение и преобразование больших объемов разнородной информации, высокую степень гибкости при ее последующей обработке, возможности управления процессом обработки со стороны пользователя; оперативное получение от сети соответствующей реакции; возможность объединения и перераспределения ресурсов.

Существующие сети связи, которые были созданы на традиционных принципах электросвязи, не позволяют обеспечить эти требования. Интеграция разных видов связи (телеграфного, телефонного, передачи данных и др.) и появление новых сетевых технологий привело к созданию мультисервисных сетей (МСС), под которыми понимаются телекоммуникационные инфраструктуры, позволяющие переносить или комбинировать с контролируемыми и гарантированными параметрами трафик любого вида, создаваемый, в свою очередь, взаимодействием пользователей и поставщиков услуг связи, соблюдая при этом требуе-

мый уровень качества и конфиденциальности для каждого вида услуг [1, 2]. Система коммутации МСС при обслуживании вызова, в зависимости от вида информации должна соединять между собой одновременно некоторое количество ( $i$ ) каналов ( $1 \leq i \leq V$ ,  $V$  – количество каналов в направлении устанавливаемой связи), что приводит к последующему осложнению механизмов управления телекоммуникационной сетью. Поэтому в случае перегрузки сети может процесс обработки текущего трафика резко усложняться [3]. Важно отметить, что в подобных ситуациях могут возникать очень сложные взаимосвязи между флуктуациями рабочей нагрузки и разными сетевыми механизмами управления. Эти взаимодействия являются потенциальной причиной возникновения фрактальной структуры трафика в МСС [4], при этом трафик характеризуется свойством самоподобия или присутствия долговременной зависимости (ДВЗ) [5], что подразумевает наличие периодов высокой активности сетевых источников трафика и периодов бездействия в широком диапазоне временных масштабов. Кроме того, особенностями трафика МСС являются наличие последствия и мас-

штабная инвариантность статистических характеристик [6]. Такой характер трафика приводит к тому, что фиксированная пропускная способность канала связи приводит либо к нерациональному использованию канала, либо к большим задержкам и даже к потерям передаваемой информации, что приводит к падению производительности используемого протокола и соединения в целом. Однако, наличие ДВЗ в трафике делает возможным исследование и применение принципиально новых методов, позволяющих повысить эффективность работы протокола ТСР. Существует много различных подходов к решению данной проблемы [1 – 5], одним из наиболее перспективных среди которых является конвергенция информационных потоков [6, 7]. На сегодня, несмотря на значительное количество как теоретических, так и экспериментальных работ, посвященных телекоммуникационному трафику, который имеет фрактальную структуру [3 – 7], проблема моделирования процессов конвергенции нескольких информационных потоков в обобщенный трафик, а также процессу передачи такого трафика независимым потребителям решенная лишь в самых простых частных случаях.

Потому проведение анализа механизма конвергенции автономных трафиковых процессов, формируемых отдельными службами мультисервисных сетей, и создание адекватной математической модели является актуальной *научной задачей*.

**Целью данной статьи** является создание математической модели конвергенции автономных трафиковых процессов на основе проведенного анализа их характеристик и особенностей.

## Результаты исследований

**1. Исходные данные.** Будем рассматривать процессы, которые происходят в мультисервисных сетях при одновременном обслуживании конечного числа каналов и потребителей. При проведении анализа соответствующих процессов будем рассматривать каждый отдельный автономный канал как одноканальную систему массового обслуживания (СМО) типа  $M/M/1/\infty$ , являющуюся составной частью многока-

нальной системы. Досконально исследованы модели телекоммуникационного трафика, созданные на основе теории массового обслуживания с приоритетами [6, 7], предполагающие марковский характер как составляющих, так и объединенного процесса. Эти модели позволяют учитывать некоторые специфические особенности фрактального трафика, такие как существование кластеризации и непостоянство характеристик во всех временных масштабах. Для более детального анализа фрактальный трафик можно описать медленно затухающими распределениями (например, распределения Парето, Вейбулла, гиперэкспоненциальное). В дальнейшем рассмотрении ограничимся рассмотрением стохастических моделей, функционирование которых описывается дискретными марковскими процессами, что позволит использовать известные формулы для стационарных распределений и теоремы для объединения сетей Джексоновского типа.

**2. Объединение однотипных каналов.** Объединяя однотипные каналы, построим СМО, у которой стационарная длина очереди и время релаксации существенно меньше, чем в ее составляющих. Проведем исследование влияния способа коммутации на показатели эффективности сконструированных систем, обнаруживая конвергенционные эффекты.

Пусть  $X_1, X_2, \dots$  – последовательность независимо работающих систем массового обслуживания типа  $M/M/1/\infty$  с интенсивностью входного потока  $\lambda$  и интенсивностью обслуживания  $\mu$ , удовлетворяющих условию эргодичности

$$\rho = \lambda / \mu < 1. \quad (1)$$

Построим из заданных  $n$  элементов последовательности такую систему обслуживания  $S$ , в которой стационарная длина очереди  $a(S)$  и характерное время релаксации (установление стационарного режима) ( $S$ ) удовлетворяют следующим неравенствам:

$$a(S) \leq A; \tau(S) \leq T, \quad (2)$$

где  $A, T$  – некоторые положительные числа, которые не превосходят аналогичные показатели

$$a(X_i), \tau(X_i) \quad (3)$$

элементов начальной последовательности (такая двухкритериальная постановка задачи обоснована коммутационными эффектами в СМО [8], базирующимися на соответствующих правилах синтеза).

Рассмотрим объединение  $n$  независимых однолинейных СМО  $X_1, \dots, X_n$  в многолинейную систему  $S_n$  типа М/М/п/∞. Операцию коммутации представим следующей формулой:

$$S_n = X_1 \oplus \dots \oplus X_n. \quad (4)$$

Поскольку выполнены условия эргодичности (1) для систем  $X_1, \dots, X_n, S_n$ , то при некоторых положительных  $C$  и  $\gamma$  стационарная средняя длина очереди  $a(S_n)$  в системе  $S_n$  удовлетворяет неравенству

$$a(S_n) \leq C e^{-\gamma n}. \quad (5)$$

Далее проведем объединение рассматриваемых автономных систем  $X_1, \dots, X_n$  в систему  $\Sigma_n$  типа М/М/1/∞. Заданную в этом случае операцию коммутации автономных систем представим в виде

$$\Sigma_n = X_1 \otimes \dots \otimes X_n.$$

При выполнении условия эргодичности (1) стационарная средняя длина очереди  $a(\Sigma_n)$  в системе  $\Sigma_n$  с учетом однотипности каналов удовлетворяет следующему соотношению:

$$a(\Sigma_n) \equiv a(X_1) < \infty. \quad (6)$$

Теперь выясним, как влияет тип коммутации на время релаксации. Из анализа времени релаксации  $\tau(S_n)$  системы  $S_n$  и соотношений (2), (4–6) следует, что коммутация систем  $X_1, \dots, X_n$  по типу « $\oplus$ » приводит к геометрической сходимости к нулю стационарной средней длины очереди при  $n \rightarrow \infty$ , а коммутация  $X_1, \dots, X_n$  по типу « $\otimes$ » никакого влияния на среднюю длину очереди не оказывает.

Справедливо и обратное: коммутация систем  $X_1, \dots, X_n$  по типу « $\oplus$ », в сущности, на время релаксации не влияет, а коммутация  $X_1, \dots, X_n$  по типу « $\otimes$ » приводит к убыванию времени релаксации к нулю со скоростью порядка  $1/n$  при  $n \rightarrow \infty$ .

Если система обслуживания  $S_n^m$  синтезирована из  $N = n \cdot m$  систем типа М/М/1/∞, то, имея достаточ-

но большое количество начальных систем обслуживания  $N$  и используя способы коммутации « $\oplus$ » и « $\otimes$ », можно провести конвергенцию таким образом, что в синтезированной системе и время релаксации, и стационарная средняя длина очереди будут удовлетворять условию (2) для достаточно малых заданных значений верхних граничных констант.

Характерной особенностью большинства известных СМО является увеличение среднего времени ожидания заявки в очереди (средней длины очереди) с ростом загрузки системы. В нашем случае, когда с ростом числа экземпляров  $n$  систем М/М/1/∞, которые объединяются в систему  $S_n$ , загрузка растет, характер поведения системы напоминает по своей сути фазовый переход в физических системах.

**3. Объединение разнотипных каналов.** Порядок проведения анализа процесса конвергенции разнотипных каналов рассмотрим на примере двухканальной системы массового обслуживания, полученной в результате объединения систем типа М/М/1/∞ с одинаковыми коэффициентами загрузки, но разными скоростями обслуживания. Обозначим через  $X', X''$  – интенсивности входных потоков,  $\mu', \mu''$  – интенсивности обслуживания в начальных одноканальных системах. Тогда интенсивность входного потока  $\lambda$  равняется  $\lambda' + \lambda''$ . Коэффициент загрузки равняется  $\rho = \lambda'/\mu' = \lambda''/\mu'' = \lambda/\mu$ . Нетрудно доказать [9], что при  $\rho < 1$  распределение вероятностей состояний суммарного марковского процесса удовлетворяет следующей системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} \lambda p(0) = \mu' p(1') + \mu'' p(1''); \\ (\lambda + \mu') p(1') = \lambda' p(0) + \mu'' p(2); \\ (\lambda + \mu'') p(1'') = \lambda'' p(0) + \mu' p(2); \\ (\lambda + \mu) p(2) = \lambda (p(1') + p(1'')) + \mu p(3); \\ (\lambda + \mu') p(i) = \lambda p(i-1) + \mu p(i+1); \quad i = 3, 4, \dots; \\ p(0) + p(1') + p(2) + p(3) + \dots = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Введем следующие обозначения:

$$A = p(1') / p(1''); \quad B = p(0) + p(1') + p(1''); \quad (8)$$

$$\varphi = \mu' / \mu = \lambda' / \lambda; \quad \beta = \varphi(1 - \varphi) \quad (9)$$

и проведем исследование системы уравнений (7).

Величина  $A$  характеризует отличия в стационарной вероятности загрузки отдельных каналов, а величина  $B$  – стационарную вероятность отсутствия ожидания для заявки, которая снова поступила в объединенную систему. При этом при фиксированном  $\varphi$  ( $1/2 < \varphi < 1$ ) верна монотонная сходимость

$$A \downarrow (1 - \alpha^2) / (\alpha(2 - \alpha)) \quad (10)$$

при  $p \uparrow 1$ , а при фиксированном  $p$ ,  $0 < p < 1$ ,  $A \rightarrow 0$  при  $\alpha \rightarrow 1$ . Следовательно, в объединенной двухканальной системе более мощный канал является менее загруженным, чем другой. Этот эффект усиливается при увеличении коэффициента загрузки  $p$  и при направленности коэффициента  $\alpha$  к единице. Таким образом, стационарная вероятность  $B$  отсутствия ожидания увеличивается при уменьшении отличия каналов по мощности.

### Выводы

Проведенный анализ эффектов конвергенции автономных трафиковых процессов отдельных служб мультисервисных сетей при большом числе объединяемых систем или при их высокой загрузке показал, что можно говорить о сильном взаимодействии между объединяемыми отдельными процессами. В результате проведенных исследований установлено:

– модель трафика МСС, которая базируется на конвергенции одноканальных СМО типа  $M/M/1/\infty$  в многоканальную систему, достаточно достоверно отображает реальные трафиковые процессы;

– трафик, полученный в результате моделирования, во-первых, владеет свойством долговременной зависимости (гиперболическая зависимость основных параметров объединенного трафика), и, во-вторых, свойством масштабной инвариантности, что, в свою очередь, можно рассматривать как доказательство фрактального характера смоделированного трафика.

Направление дальнейших исследований связано с построением модели конвергенционного процесса для автономных трафиковых процессов хаотического характера.

### Литература

1. Кучук Г.А., Гахов Р.П., Пашнев А.А. Управление ресурсами инфотелекоммуникаций. – М.: Физматлит, 2006. – 220 с.
2. Телекоммуникационные системы и сети: Учебн. пос. В 3-х т. Т. 3. Мультисервисные сети / В.В. Величко, Е.А. Субботин, В.П. Шувалов, А.Ф. Ярославцев, под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 592 с.
3. Li G.L., Dowd W.D. An Analysis of Network Performance Degradation Induced by Workload Fluctuations // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1995. – Vol. 3, No. 4. – P. 163-171.
4. Erramili A., Narayan O., Willinger W. Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1996. – Vol. 4. – P. 209-223.
5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография // Г.А. Кучук, А.А. Можаяев, Р.Э. Пащенко и др. – Х.: Эко-Перспектива, 2006. – 360 с.
6. Лосев Ю.И., Руккас К.М. Анализ системы массового обслуживания с приоритетами с учетом фрактальности входного трафика // Радиотехника. – Х.: ХТУРЭ, 2006. – Вып. 146. – С. 189-195.
7. Кучук Г.А., Можаяев О.О., Воробйов О.В. Метод прогнозирования фрактального трафика // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 6 (18). – С. 181-188.
8. Гургенидзе А.Т., Кореш В.И. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа. – М.: Наука и техника, 2003. – 400 с.
9. Королев А.В., Кучук Г.А., Пашнев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. – Х.: ХВУ, 2003. – 224 с.

Поступила в редакцию 1.06.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Харьковский национальный технический университет «ХПИ», Харьков.