

О границах применимости эмпирических соотношений для очереди с фрактальным дробовым входящим потоком

Д. Е. Соколов, Н. Г. Треногин

ООО «Ростелеком Информационные Технологии» (РТК ИТ)

Аннотация: Сформулированы выводы о границах применимости ранее полученных эмпирических соотношений, позволяющих аналитическим путем рассчитать оценку средней длины очереди в системе массового обслуживания с входящим потоком в виде дробового фрактального процесса (FSNDP). Также приведены краткие обзорные сведения о моделировании сетевого трафика в клиент-серверных системах на основе процесса FSNDP, о структуре самого процесса, а также о подходе, применявшемся при получении аналитических соотношений.

Ключевые слова: фрактальный трафик, фрактальный дробовой процесс, теория очередей, теория телетрафика, FSNDP, СМО.

Для цитирования: Соколов Д. Е., Треногин Н. Г. О границах применимости эмпирических соотношений для очереди с фрактальным дробовым входящим потоком // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 3. С. 111–121. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-3-111-121>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Соколов Д. Е., Треногин Н. Г., 2025

Статья поступила в редакцию 15.04.2025;
переработанный вариант – 12.05.2025;
принята к публикации 24.06.2025.

1. Введение

Трафик сетей передачи данных, в том числе в составе распределенных информационных систем, характеризуемый высокой вариативностью и выраженными корреляционными свойствами, в последние годы описывается разного рода фрактальными моделями [1, 2, 3, 4].

В отличие от геометрических фракталов, определение которых основано на геометрическом подобии части объекта целому, у фрактальных случайных процессов часть траектории подобна целому статистически: при усреднении по времени на различных масштабах процесс в значительной степени сохраняет значения статистических характеристик первого и второго порядка, т. е. не сглаживается, не теряет вариативность и корреляционную структуру.

Фрактальные (или самоподобные) свойства сетевого трафика, выявленные первоначально в сетях Ethernet и широкополосного доступа (ШПД) в 1990-х годах [5, 6], объясняют слабую пригодность классических марковских методов и моделей теории массового обслуживания для моделирования современных высоконагруженных систем и сетей передачи данных. Прежде всего речь идет о выраженной корреляционной структуре – явлении последовательности, которым по определению пренебрегают марковские модели.

В последние годы, в условиях повышенного внимания к вопросам информационной безопасности, фрактальные модели трафика пакетных сетей стали применяться в разработке алгоритмов выявления и отражения сетевых атак [7]. Также продолжают исследования,

связанные с выявлением и описанием фрактальных свойств потоков данных в различных классах сетей, в том числе современных спутниковых сетях передачи данных [8], сетях, включающих трафик «умных устройств» IoT [9] в сочетании с классическими источниками трафика, такими, как человеко-машинные автоматизированные рабочие места. Публикуются результаты исследований в области теории очередей в условиях нагрузки с фрактальными свойствами для различных частных случаев потока трафика [10, 11]. Существуют отдельные разработки по реализации алгоритмов оперативного управления и анализа фрактального трафика на основе нейросетей и машинного обучения.

Несмотря на адекватность описания трафиковых потоков фрактальными моделями, получение пригодных для практических расчетов выражений для систем массового обслуживания (СМО) связано со значительными трудностями. Известно несколько вариантов формул для моделей СМО с простейшим фрактальным потоком на основе дробного броуновского движения [12, 13], но этот поток может считаться адекватным для описания трафика магистральных сегментов, но не распределенных информационных систем на уровне отдельных рабочих станций и малых рабочих групп. Также существуют решения, опирающиеся не на конкретные модели потоков, а на их универсальные статистические характеристики [14].

Ранее авторам на основе имитационного моделирования удалось получить соотношения, пригодные для расчета объема очереди в СМО с входным потоком на основе фрактального дробового процесса и, следовательно, для оценки пропускной способности соответствующих фрагментов пакетных сетей.

В настоящей статье приведены некоторые заключения относительно границ применимости полученных соотношений в привязке к статистическим параметрам входящего потока. Раздел 2.1 является обзорным и содержит математическое определение фрактального дробового процесса FSNDP, наиболее существенную информацию о его параметрах и свойствах, в том виде о объеме, как это необходимо для интерпретации дальнейших результатов – в том числе, в связи с наличием в литературе различных вариантов параметризации данного процесса. В разделе 2.2 приведены в сжатом виде (впервые в публикации на русском языке) ранее полученные авторами ключевые результаты – аналитические соотношения для оценки очереди СМО с входящим потоком в виде процесса FSNDP, а также оценки влияния параметров процесса на очередь; детальное описание подхода изложено в [15]. Раздел 3, базируясь на вышеуказанных результатах и статистических свойствах рассматриваемого процесса, приводит результаты новых исследований, показывающих условия допустимости применения аналитических соотношений для СМО FSNDP/D/1.

2. Фрактальный дробовой процесс и соотношения для очереди

2.1. Фрактальный дробовой процесс как модель сетевого трафика

Фрактальный дробовой процесс, или процесс FSNDP (Fractal Shot Noise Driven Poisson), относящийся к классу дважды стохастических пуассоновских точечных процессов, был впервые предложен в качестве модели пакетного трафика сетей передачи данных Стивеном Лоуэном и Бонгом Рю [16, 17].

Процесс полностью задается пятью параметрами (μ, β, K, A, B) , имеющими следующий физический смысл.

Первичный пуассоновский поток с интенсивностью μ задает моменты начала случайно расположенных всплесков итогового процесса, параметр K – амплитуду всплесков, A и B – соответственно точки левой и правой отсечки каждого всплеска, β – скорость гиперболического убывания интенсивности итогового процесса внутри каждого всплеска:

$$h(t) = \begin{cases} Kt^{-\beta}, & t \in (A, B) \\ 0, & t \notin (A, B) \end{cases} \quad (1)$$

Итоговый процесс представляет собой пуассоновский процесс переменной интенсивности – с интенсивностью в виде суперпозиции всех всплесков:

$$I(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(t-t_i) \quad (2)$$

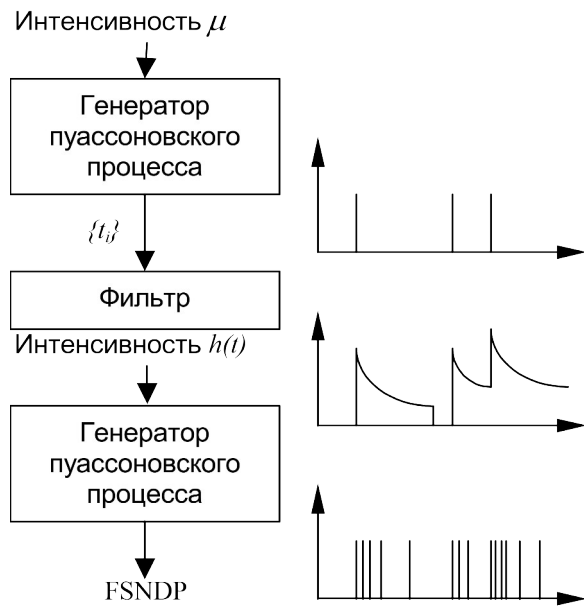


Рис. 1. Составляющие процесса FSNDP

Следует отметить, что параметр β однозначно связан соотношением

$$H = 3/2 - \beta \quad (3)$$

с ключевым параметром любого фрактального процесса – параметром Херста H , принимающим значения между 0.5 и 1 и задающим степень выраженности фрактальных свойств: вблизи 0.5 эти свойства выражены слабо, процесс близок к классическим случайным процессам; вблизи 1 – выражены максимально ярко.

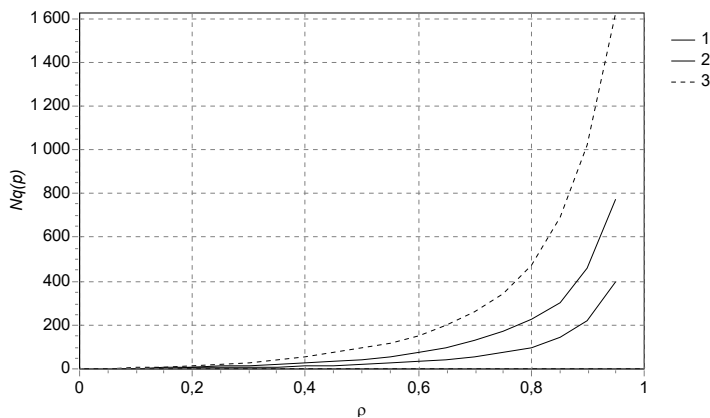
Также отметим, что в литературе встречаются альтернативные определения фрактального дробового процесса FSNDP: в частности, с убыванием интенсивности внутри всплеска с показателем $1 - \alpha/2$ вместо β , что позволяет несколько упростить запись выражений для некоторых фрактальных статистик процесса; суть и свойства процесса при этом остаются теми же, что при задании пятеркой параметров (μ, β, K, A, B) .

Процесс FSNDP обладает устойчиво фрактальными свойствами при $A \ll B$ и A , близком к нулю. При практическом моделировании параметр A обычно принимается равным нулю [15], остальные параметры являются значимыми для статистических и иных свойств процесса.

Параметры процесса поддаются оценке (estimation) по имеющимся последовательностям событий, образующим точечный процесс, т. е. при условии предположения, что некоторая последовательность образует поток FSNDP или в некотором смысле идентична ему, можно получить пятерку параметров (μ, β, K, A, B) . Также имеется алгоритм генерирования процесса FSNDP на основе датчика случайных чисел по заданной пятерке параметров с достаточно невысокой вычислительной ресурсоемкостью. Сравнение поведения реальных срезов трафика, снятых на сети в клиент-серверных системах, с поведением сгенерированных траекторий FSNDP с теми же параметрами в имитационной модели системы массового обслуживания с очередью при разной интенсивности обслуживания позволило авторам настоящей работы подтвердить возможность моделирования такого трафика процессом FSNDP. Подробнее подход к исследованию и полученные результаты, включая усовершенствованные методы оценки параметров и генерирования процесса, изложены в [18].

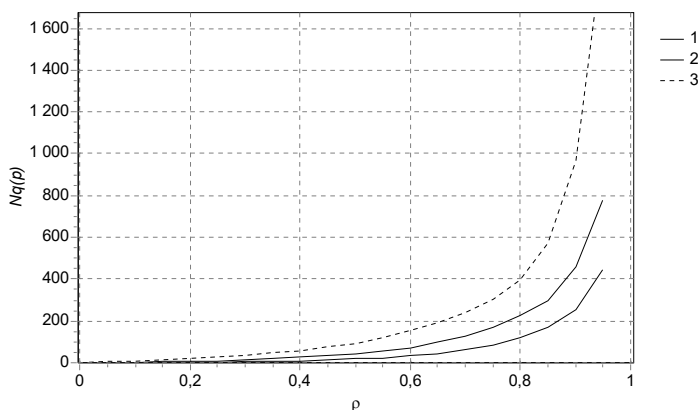
2.2. Эмпирические соотношения для очереди FSNDP/D/1

С помощью многократной генерации траекторий процесса FSNDP с варьированием каждого из значимых параметров, прогонов имитационной модели СМО с подачей каждой траектории на вход при различной интенсивности обслуживания, анализа полученных кривых средней длины очереди в зависимости от загрузки СМО ρ были сделаны выводы о степени влияния варьируемых параметров на длину очереди, а также о прямом или обратном влиянии изменения каждого параметра на эту длину. Базовые значения параметров были выбраны близкими к экспериментально установленным параметрам для трафика реальных клиент-серверных систем, снятых путем sniffing на Ethernet-сегменте сети передачи данных [19]. Также было использовано ранее полученное утверждение о том, что реальному трафику клиент-серверных систем более всего соответствует поток с постоянным временем обслуживания (детерминированным – D), т. е. система массового обслуживания, моделирующая канал передачи данных на клиентском участке клиент-серверной информационной системы, может быть определена как FSNDP/D/1.



	1	2	3
μ	0,1	0,1	0,1
β	0,9	0,9	0,9
K	10	5 (1/2)	20 (x2)
A	0	0	0
B	100	100	100

Рис.2. Средняя длина очереди при варьировании параметра K



	1	2	3
μ	0,1	0,1	0,1
β	0,9	0,8 ▼	0,95 ▲
K	10	10	10
A	0	0	0
B	100	100	100
H	0,6	0,7 ▲	0,55 ▼

Рис.3. Средняя длина очереди при варьировании показателя β

Так, было установлено, что параметр K оказывает прямое (и близкое к прямо пропорциональному) влияние на очередь, а параметр Херста H , однозначно связанный с β – обратное (и близкое к обратно пропорциональному). Примеры кривых при типовых значениях параметров приведены на рис. 2 и 3.

Существенного влияния параметра B не выявлено, а параметр μ оказался влияющим на поведение потока в СМО с очередью только при существенной загрузке СМО, о чем будет подробнее сказано ниже.

Из сопоставления результатов имитационного моделирования, а также статистических свойств были получены следующие эмпирические соотношения для оценки средней длины очереди в системе FSNDP/D/1, т. е. одноканальной СМО с потоком FSNDP на входе и детерминированным распределением процесса обслуживания (соответствует постоянному объему пакета в пакетном трафике):

$$q(\rho) = \frac{1}{2} \frac{K}{H} \frac{\rho}{1-\rho}, \quad (4)$$

или

$$q(\rho) = \frac{K}{2(\frac{3}{2}-\beta)} \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{K}{3-2\beta} \frac{\rho}{1-\rho} \quad (5)$$

Подробнее подход и результаты изложены в статье [15].

3. Границы применимости эмпирических соотношений для FSNDP/D/1

О возможности достаточно точной оценки средней длины очереди (а учитывая универсальность формулы Литтла – и среднего времени задержки) свидетельствует близость кривых длины очереди в зависимости от загрузки СМО ρ , полученных расчетным путем и путем имитационного моделирования с входящим потоком FSNDP, сгенерированным для тех же значений параметров (μ, β, K, A, B).

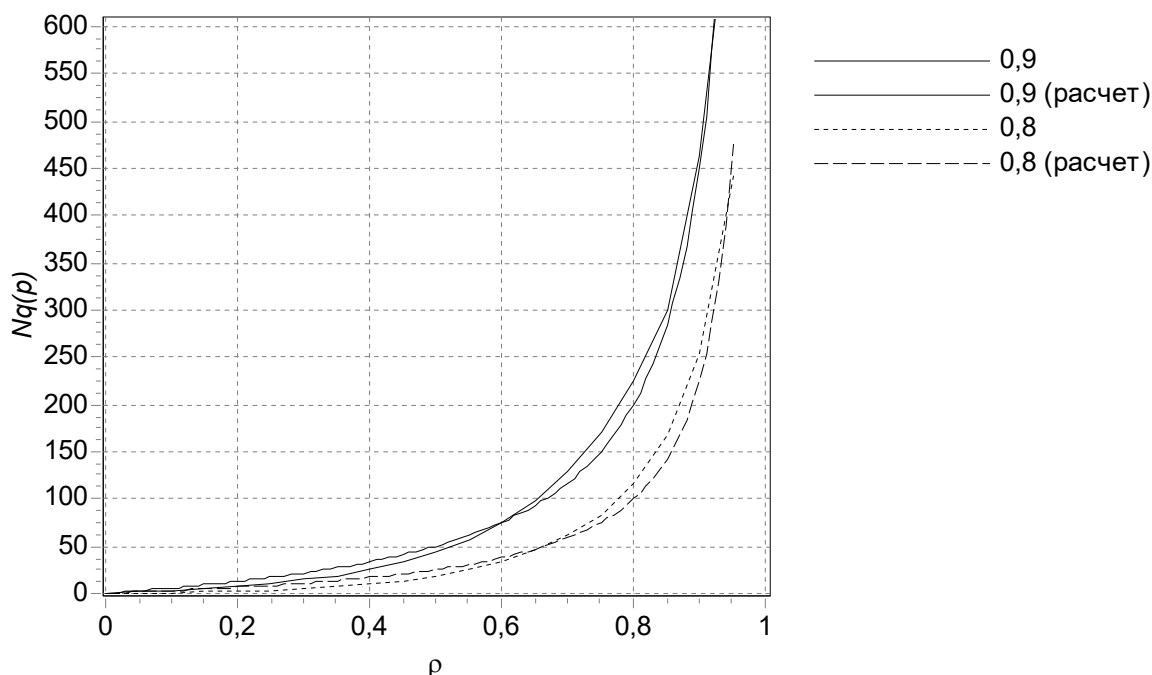


Рис.4. Кривые очереди в зависимости от загрузки СМО, полученные расчетным и имитационным путем, для $\mu = 0.1, K=10, A=0, B=100$ и $\beta=0.8, \beta=0.9$

На рис. 4 приведены две пары кривых – имитационные и расчетные результаты – для достаточно типичных в реальном трафике клиент-серверных систем значений параметров. Сходное поведение демонстрируют кривые и для других близких комбинаций значимых параметров.

Очевидно, что достаточно точным аналитический расчет, в сравнении с поведением системы при имитационном моделировании, видится вплоть до значений загрузки ρ порядка $0.9 - 0.95$, т. е. до режима, близкого к нестационарному.

Однако, если рассмотреть влияние на очередь параметра интенсивности первичного пуассоновского процесса μ , задающего интенсивность всплесков процесса FSNDP, соответствующих всплескам трафика, то возникают основания скорректировать гипотезу о возможности применения соотношений (4)–(5) на столь широком диапазоне.

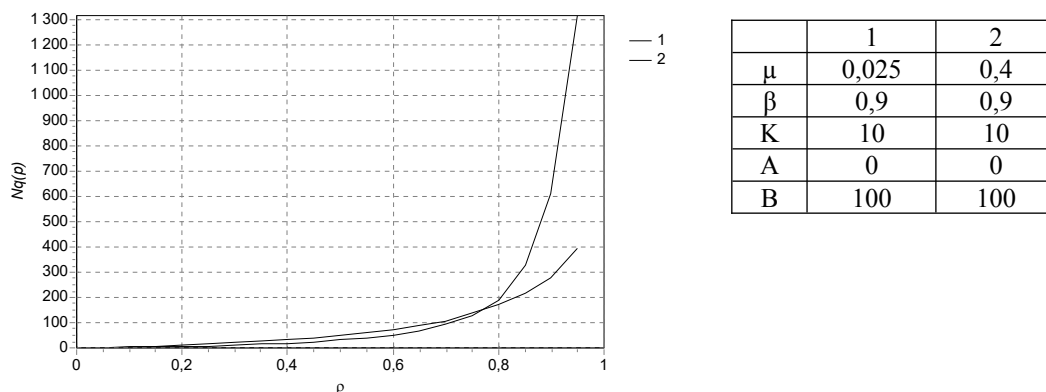


Рис.5. Средняя длина очереди при для существенно отличающихся значений μ

Как указывалось выше, параметр μ не был включен в соотношения в силу отсутствия существенного влияния на реалистичных значениях загрузки СМО.

Подробнее это влияние можно проследить на примере, приведенном на рис. 5. Подобным образом кривые ведут себя при других близких (реалистичных) комбинациях параметров фрактального дробового процесса.

При варьировании μ на четыре двоичных порядка, т. е. в 16 раз, кривые остаются если не идентичными, то по крайней мере близко расположенными вплоть до $\rho = 0.8$ (т. е. поведение потока в системе с очередью практически полностью определяется остальными параметрами), и далее начинают резко расходиться. Следовательно, аналитические соотношения, не включающие параметр μ , могут считаться применимыми не дальше точки $\rho = 0.8$.

Можно также рассмотреть вышеуказанное ограничение применимости во взаимосвязи с задающими параметрами процесса FSNDP.

Для фрактального дробового потока известны соотношения, связывающие параметры (μ, β, K, A, B) с ключевыми статистическими характеристиками. Интенсивность потока, соответствующая числу поступлений событий в единицу времени, выраженная через параметры процесса, согласно [18], равна:

$$\lambda = \frac{1}{1-\beta} \mu K B^{1-\beta} \quad (6)$$

Загрузка системы массового обслуживания, определяемая как отношение интенсивности поступления событий к интенсивности обслуживания, или, что то же самое, произведению интенсивности поступления на среднее время обслуживания единичной заявки без учета ожидания в очереди $\rho = \lambda t_o$, в терминах параметров потока FSNDP, исходя из соотношения (6), а именно подстановкой соотношения (6) в произведение λt_o , запишется как

$$\rho = \frac{t_o}{1-\beta} \mu K B^{1-\beta}, \quad (7)$$

что дает возможность записать границу применимости соотношений для средней длины очереди $\rho < 0.8$ через параметры потока FSNDP и известное для конкретной СМО значение среднего времени обслуживания единичной заявки t_o (которое, если СМО является моделью канала передачи данных, однозначно определяется скоростью передачи и средним объемом пакета в битах либо байтах):

$$\frac{t_o}{1-\beta} \mu K B^{1-\beta} < 0.8. \quad (8)$$

На проверку данного условия необходимо обратить пристальное внимание при использовании соотношений (4) и (5), а также следующих из них на основании формулы Литтла выражений для среднего времени задержки – в аналитических расчетах, а также алгоритмах имитационного моделирования, использующих в том или ином виде указанные соотношения.

Также из условия (8) следует важное следствие, касающееся применения соотношений (4) и (5) в более сложных случаях, чем единичная система массового обслуживания.

Если рассмотреть СМО, на вход которой поступает суперпозиция потоков FSNDP (в простейшем случае идентичных, т. е. с одним и тем же набором задающих параметров (μ, β, K, A, B)), то характер ее поведения сохранится, ее по-прежнему можно рассматривать как систему FSNDP/D/1. Это следует из определения процесса FSNDP и фундаментального свойства суммирования для пуассоновских процессов: результирующий процесс является также пуассоновским, с интенсивностью, равной сумме интенсивностей процессов-составляющих. Для суммирования N процессов FSNDP при идентичных (μ, β, K, A, B) первичный пуассоновский процесс окажется пуассоновским с интенсивностью $N\mu$, выражения (2) и (3) сохранят свой вид, а итоговый процесс будет являться FSNDP с параметрами $(N\mu, \beta, K, A, B)$. Для более сложного случая, при суммировании N потоков с различными μ_i , суммарный поток будет задан пятеркой параметров $(\sum_{i=1}^N \mu_i, \beta, K, A, B)$, сохраняя общие свойства. (Хотя авторам не удалось обнаружить публикаций, описывающих данное свойство для суммирования, в силу очевидности имеет смысл не считать его новым результатом).

Возвращаясь к неравенству (8), получаем важное следствие: хотя параметр μ не входит в эмпирические соотношения для длины очереди (4)–(5), он оказывает влияние на оценку границы применимости данных соотношений, т. к. левая часть неравенства прямо пропорциональна μ . При поступлении на вход СМО суперпозиции нескольких потоков FSNDP, при прочих равных параметрах, за счет подстановки $N\mu$ вместо μ , левая часть возрастет в N раз, что пропорционально сузит допустимые рамки применимости соотношений.

Это следствие имеет важное практическое значение, поскольку в проведенных авторами ранее исследованиях [20] установлено, что фрактальный поток после прохождения через одноканальную систему массового обслуживания с очередью сохраняет фрактальные свойства (хотя и изменяет численные значения параметров); соответственно, при исследовании сетей массового обслуживания с фрактальными потоками заявок в узлах сети будут наблюдаться суперпозиции фрактальных потоков, а для подключенных к узлам сети СМО эти суперпозиции будут являться входящими потоками.

8. Заключение

Полученные результаты, уточняющие границы применимости полученных ранее эмпирических соотношений для СМО с фрактальным входящим потоком и очередью, могут помочь исключить методологические ошибки при аналитических расчетах и имитационном моделировании характеристик как одиночных каналов передачи данных для клиент-серверных систем, так и более сложных структур, описываемых сетями массового обслуживания. В последнем случае условия могут применяться к включению соотношений (4), (5) в тензорные методики анализа сетей массового обслуживания, предложенные, в частности, в [21].

В целом, актуальность подходов к расчету характеристик каналов передачи данных для удаленных компонент информационных систем, интегрируемых с централизованными ресурсами на основе тех или иных клиент-серверных технологий, в последнее время снова возрастает, в связи с активизацией работ по импортозамещению аппаратных и программных разработок, и как следствие, необходимостью возврата к полному циклу проектирования с учетом ограниченности ресурсов. В частности, фрактальный характер трафика выявлен в се-

тях, включающих компоненты IoT [9], постоянный рост распространенности которых наблюдается на протяжении последнего десятилетия. Для устройств IoT, по определению обладающих ограниченными вычислительными мощностями и, как правило, рассчитанных на интеграцию по сколь угодно низкоскоростным каналам, в том числе мобильным вне зоны уверенного радиопокрытия, необходимо уже на стадии проектирования и прототипирования иметь возможность оценить вероятностно-временные характеристики реализуемых на их базе приложений. Аналитические соотношения, учитывающие вносимые каналом задержки в условиях фрактального трафика, позволят на ранних стадиях разработки заложить необходимые требования к встроенному ПО, а данные о границах применимости таких соотношений – исключить ряд ошибок для получаемых оценок.

Также определенный интерес представляет уточненная данным исследованием методика аналитического расчета очереди в условиях фрактальной нагрузки в сочетании с актуальными результатами анализа изменений фрактальных свойств трафика в условиях несанкционированных воздействий на компоненты сети (сетевых атак). Так, например, установленное явление резкого изменения степени выраженности фрактальных свойств трафика при возникновении несанкционированного воздействия [7] следует учесть как при оценке необходимых объемов буфера сетевых устройств (что соответствует теоретическому понятию очереди для модели СМО) в целях обеспечения устойчивости к атакам, так и в алгоритмах противодействия несанкционированным воздействиям. Это направление может рассматриваться как актуальное и перспективное направление дальнейших исследований.

Литература

1. Шелухин О. И., Тенякиев А. М., Осин А. В. Фрактальные процессы телекоммуникациях. Монография. М.: Радиотехника, 2003. 480 с.
2. Цыбаков Б. С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. 1999. № 5. С. 24–31.
3. Нейман В. И. Новое направление в теории телетрафика // Электросвязь. 1998. № 7. С. 27–30.
4. Нейман В. И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика // Труды Международной Академии связи. 1999. № 1. С. 11–15.
5. Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. On The Selfsimilar Nature of Ethernet Traffic (extended version) // IEEE/ACM Trans. Networking. 1994. V. 2 (1). PP. 1–15.
6. Norros I. The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling // ICC '95, IEEE International Conference on Communications. – Seattle, 1995. PP. 451–455.
7. Шелухин О. И., Рыбаков С. Ю., Ванюшина А. В. Модификация алгоритма обнаружения сетевых атак методом фиксации скачков фрактальной размерности в режиме online // Труды учебных заведений связи. 2022. №3. С. 117–126.
8. Zhang, Y., Wang, Y., Cao, H., Hu, Y., Lin, Z., An, K., Li, D. Self-similar traffic prediction for LEO satellite networks based on LSTM // IET Commun. 2025. No 19, PP. 1–9.
9. Шелухин О. И., Рыбаков С. Ю. Статистические характеристики фрактальной размерности трафика IoT на примере набора данных Kitsune. // Труды учебных заведений связи. 2023. 9(5). С. 112–119.
10. Popoola J., Popoola O., Olaniran O. An Exact Method for a Class of Self-Similar M/Ga/1/K Queueing System of Internet Stream. // FUOYE Journal of Engineering and Technology. 2022. Vol. 7, Issue 1. PP. 11–16.
11. Рыжиков Ю. И., Уланов А. В. Численный метод расчета многоканальных систем массового обслуживания с потоком Парето // Системы управления, связи и безопасности. 2021. №2. С. 1–11.

12. *Norros I.* On The Use of Fractional Brownian Motion in The Theory of Connectionless Networks // IEEE J. Sel. Areas Commun. 1995. 13 (6). PP. 953–962.
13. *Chen J., Bhatia H. S., Addie R. G., Zukerman M.* Statistical Characteristics of Queue with Fractional Brownian Motion Input // Electronics Letters. 51 (9). 2015. P. 699–701.
14. *Петров М. Н., Пономарев Д. Ю.* Самоподобие в системах массового обслуживания с ограниченным буфером // Электросвязь. 2002. № 2. С. 35–39.
15. *Trenogin N. G., Petrov M. N., Sokolov D. E.* Empirical Relationship for Queue Length Estimation in a System With Fractal Shot Input // Siberian Journal of Science and Technology. 2017 Vol.18 No 2. PP. 294-299.
16. *Ryu B., Lowen S.* Modeling, Analysis and Simulation of Self-similar Traffic Using the Fractal-shot-noise-driven Poisson Process // Proc. IASTED Modeling and Simulation, Pittsburgh, PA. 1995. PP. 1–4.
17. *Ryu B. K.* Fractal Network Traffic: From Understanding to Implications. Ph.D. thesis. – Columbia University. 1996. – 143 p.
18. *Треногин Н. Г., Соколов Д. Е.* Моделирование сетевого трафика в информационных системах на основе фрактального точечного процесса // Вестник университетского комплекса: сб. научных трудов. Под общей ред. проф. Н. В. Василенко. Вып. 2(16). Красноярск. ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ. 2004. С.12–21.
19. *Треногин Н. Г., Соколов Д. Е.* Фрактальные свойства сетевого трафика в клиент-серверной информационной системе // Вестник НИИ СУВПТ. Сборник научных трудов. Вып. 14. Красноярск. 2003. С. 163–172.
20. *Треногин Н. Г., Петров М. Н., Соколов Д. Е.* Свойства фрактального трафика при прохождении системы массового обслуживания с очередью // Красноярск. Вестник СибГАУ. 2017. т.18. №1. С. 105–110.
21. *Петров М. Н., Треногин Н. Г., Веловатый Е. А.* Система поддержки операционной и бизнес-деятельности предприятия связи с использованием тензорной методологии анализа систем // Электросвязь. 2013. № 1. С. 17–20.

Соколов Дмитрий Евгеньевич

начальник отдела внедрения систем расчетов центра компетенций по внедрению систем программы трансформации, ООО «Ростелеком Информационные Технологии» (ООО «РТК ИТ», 630004, Новосибирск, Вокзальная магистраль 1/1, офис 601), тел. +7 923 250 8740, e-mail: dmsokolov@gmail.com.

Треногин Николай Геннадьевич

к.т.н., доцент кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств СибГУТИ, директор департамента развития информационных систем и платформ ООО «Ростелеком Информационные Технологии» (ООО «РТК ИТ», 630004, Новосибирск, Вокзальная магистраль 1/1, офис 601), e-mail: trenogin@mail.ru.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

On Applicability Limits Of Empirical Relationships For A Queue With Fractal Shot Input

Dmitry E. Sokolov, Nikolay G. Trenogin

Rostelecom Information Technologies (RTK IT)

Abstract: Conclusions are formulated about the applicability limits of previously obtained empirical relationships that allow analytical calculation of the average queue length estimate in a queuing system with an incoming flow in the form of a fractal shot process (FSNDP). Brief overviews of network traffic modeling in client-server systems based on the FSNDP process, the structure of the process itself, and the approach used to obtain the analytical relationships are also given.

Keywords: fractal traffic, fractal shot process, queuing theory, teletraffic theory, FSNDP, queuing system.

For citation: Sokolov D. E., Trenogin N.G. O granitsakh primenimosti empiricheskikh sootnosheniy dlya ocheredi s fractalnym drobovym vkhodyashim potokom [On Applicability Limits Of Empirical Relationships For A Queue With Fractal Shot Input]. *Vestnik SibGUTI*, 2025, vol. 19, no. 3, pp. 111-121. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-3-111-121>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Sokolov D. E., Trenogin N G., 2025

The article was submitted: 15.04.2025;
revised version: 12.05.2025;
accepted for publication 24.06.2025.

References

1. Shelukhin O. I., Teniakshev A. M., Osin A. V. *Fraktal'nye protsessy v telekommunikatsiiakh : monografiia* [Fractal processes in telecommunications : monograph]. Moscow, Radiotekhnika, 2003. 480 p.
2. Tsybakov B. S. *Model' teletrafika na osnove samopodobnogo sluchainogo protsessa* [Teletraffic model based on a self-similar stochastic process]. *Radiotekhnika*, 1999, no. 5, pp. 24-31.
3. Neiman V. I. *Novoe napravlenie v teorii teletrafika* [A Novel Approach in Teletraffic Theory]. *Elektrosviaz'*, 1998, no 7, pp. 27-30.
4. Neiman V. I. *Samopodobnye protsessy i ikh primeneniye v teorii teletrafika* [Self-similar processes and their application in teletraffic theory] // *Trudy Mezhdunarodnoi Akademii sviazi*, 1999, no 1, pp. 11-15.
5. Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. *On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)*. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1994, vol. 2, no 1, pp. 1-15.
6. Norros I. *The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling*. ICC '95. IEEE International Conference on Communications. Seattle, 1995, pp. 451-455.
7. Shelukhin O. I., Rybakov S. Yu., Vanyushina A. V. *Modifikatsiya algoritma obnaruzheniya setevykh atak metodom fiksatsii skachkov fraktalnoy razmernosti v rezhime online*. [Modification Of The Network Attack Detection Algorithm By Recording Fractal Dimension Jumps In Online Mode] . *Proceedings of Telecom. Universities*. 2022. No. 3. PP. 117-126.
8. Zhang, Y., Wang, Y., Cao, H., Hu, Y., Lin, Z., An, K., Li, D. *Self-similar traffic prediction for LEO satellite networks based on LSTM*. *IET Commun*. 2025. No 19. PP. 1-9.
9. Shelukhin O., Rybakov S. *Statisticheskiye kharakteristiki fraktalnoy razmernosti trafika IoT na primere nabora dannykh Kitsune* [IoT Traffic Fractal Dimension Statistical Characteristics on the Kitsune Dataset Example]. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2023, no 9(5), pp. 112-119.
10. Popoola J., Popoola O., Olaniran O. *An Exact Method for a Class of Self-Similar M/Ga/1/K*

- Queueing System of Internet Stream*. FUOYE Journal of Engineering and Technology. 2022 – vol. 7, issue 1., pp. 11-16.
11. Ryzhikov Yu. I., Ulanov A. V. Chislenniy Metod rascheta mnogokanalnykh sistem massovogo obsluzhivaniya s potokom Pareto [Numerical Method For Calculating Multichannel Queuing Systems With Pareto Flow]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2021. No 2. PP. 1-11.
 12. Norros I. *On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, vol. 13, no 6, pp. 953–962.
 13. Chen J., Bhatia H. S., Addie R. G., Zukerman M. *Statistical characteristics of queue with fractional Brownian motion input*. Electronics Letters, 2015, vol. 51, no 9, pp. 699–701.
 14. Petrov M. N., Ponomarev D. Iu. *Samopodobie v sistemakh massovogo obsluzhivaniia s ograniченным буфером* [Self-similarity in Queuing Systems With Limited Buffer]. *Elektrosvyaz'*, 2002, no 2, pp. 35–39.
 15. Trenogin N. G., Petrov M. N., Sokolov D. E. Empirical Relationship for Queue Length Estimation in a System With Fractal Shot Input // *Siberian Journal of Science and Technology*, 2017, Vol. 18, no 2, pp. 294-299.
 16. Ryu B., Lowen S. *Modeling, analysis and simulation of self-similar traffic using the fractal-shot-noise-driven Poisson process*. Proc. IASTED Modeling and Simulation. Pittsburgh, PA, 1995, pp. 1-4.
 17. Ryu B. K. *Fractal Network Traffic: From Understanding to Implications : Ph.D. thesis*. Columbia University, 1996, 143 p.
 18. Trenogin N. G., Sokolov D. E. *Modelirovanie setevogo trafika v informatsionnykh sistemakh na osnove fraktal'nogo tochechnogo protsesssa* [Modeling Of Network Traffic In Information Systems Basing On Fractal Point Process]. *Vestnik universitetskogo kompleksa : sb. nauch. tr. pod obshch. red. prof. N. V. Vasilenko*, Krasnoyarsk, VSF RGUITP, NII SUVPT, 2004, – vol. 2(16), pp. 12-21.
 19. Trenogin N. G., Sokolov D. E. *Fraktal'nye svoistva setevogo trafika v klient-servernoi informatsionnoi sisteme* [Fractal Properties Of Network Traffic In Client-Server Information System]. *Vestnik NII SUVPT : sb. nauch. tr.* Krasnoyarsk, 2003, vol. 14, pp. 163-172.
 20. Trenogin N. G., Petrov M. N., Sokolov D. E. *Svoistva fraktal'nogo trafika pri prokhozhenii sistemy massovogo obsluzhivaniia s ochered'yu*. [Properties Of Fractal Traffic Passing A Queuing System]. *Vestnik SibGAU*, 2017, vol. 18, no 1, pp. 105-110.
 21. Petrov M. N., Trenogin N. G., Velovatyi E. A. *Sistema podderzhki operatsionnoi i biznes-deiatel'nosti predpriiatiia svyazi s ispol'zovaniem tenzornoj metodologii analiza sistem* [Operation And Buisness Support System Of Telecommunication Operator Using Tensor System Analysis Methodology]. *Elektrosvyaz'*, 2013, no 1, pp. 17-20.

Dmitry E. Sokolov

Head of group of billing systems implementation (RTK IT, Russia, 630004, Novosibirsk, Vokzal'naya magistral 1/1 office 601), e-mail: dmsokolov@gmail.com.

Nikolay G. Trenogin

PhD, Docent of the Department of Telecommunication Networks and Computing Facilities of SibGUTI, Director of the Department of Development of Information Systems and Platforms (RTK IT, Russia, 630004, Novosibirsk, Vokzal'naya magistral 1/1 office 601), e-mail: trenogin@mail.ru.