ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 2 (4)

УДК 004.7:681.324 DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.012

А. А. Коваленко, Г. А. Кучук, И. В. Рубан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ШКАЛ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ДЛИНЫ ОЧЕРЕДЕЙ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Предмет исследования: прогнозирование длины очереди к коммуникационному устройству высокоскоростной компьютерной сети при негауссовском трафике. **Цель** данной статьи: исследование возможностей использования временных шкал, использующихся при изучении организации очередей современных высокоскоростных компьютерных сетей. **Методы исследования**: фрактальный анализ, методы шкалирования, методы аппроксимации. **Результаты** исследования. Представлены результаты выбора временных шкал для построения адекватных моделей современного трафика. Использование таких моделей, в частности, позволяет изучать динамику очередей активных сетевых устройств, что важно для планирования и распределения загрузки сети. Использование статистических характеристик трафика на небольшом количестве временных масштабов позволяет расширить теоретические концепции для критических временных масштабов, что делает такой подход применимым к любому трафиковому процессу, включая трафик с долговременной зависимостью. Кроме того, рассмотрены вопросы описания поведения хвостов очередей применительно к современным высокоскоростным компьютерным сетям и определены свойства предлагаемых модельных аппроксимаций. Анализ независимой гауссовской модели области вейвлета и мультифрактальной вейвлет-модели показал преимущество первой для фрактального трафика и незначительное расхождение результатов при трафике, близком к гауссовскому. **Выводы**. Проведено исследование различных подходов к выбору временных шкал, использующихся при изучении организации очередей современных высокоскоростных сетей передачи данных. Проанализировано влияние необходимой точности и вычислительной мощности, требуемой для вычисления аппроксимации максимума, и установлено, что экспоненциальные временные шкалы являются оптимальными для фрактального трафика. Также показано влияние хвостов распределений в различных масштабах времени на процесс организации очередей. Отмечено, что при негауссовских трафиковых сценариях корреляционная структура (краткосрочная и долгосрочная) описывает поведение очередей недостаточно адекватно.

Ключевые слова: протокол TCP, трафик, фрактальность, масштабная инвариантность, сетевые протоколы, модель, телекоммуникационная сеть.

Введение

Многочисленные исследования трафика современных высокоскоростных сетей передачи данных подтверждают наличие фрактальной природы трафика [1 – 3] в этих сетях. Особенностями современного трафика также являются наличие последействия и масштабная инвариантность его статистических характеристик [1, 4 – 7]. Такой характер трафика в больших масштабах времени может привести к неравномерности загрузки существующих каналов сетей передачи данных, которая характеризуется или перегрузкой или недостаточной используемостью выделенных каналов.

Будем рассматривать очередь сетевого маршрутизатора как очередь бесконечной длины с постоянным коэффициентом обслуживания [8] для исследования вероятности того, что длина очереди Q превысит пороговое значение b, $P\{Q > b\}$. Такое значение является метрикой для различных приложений, включая методику поддержания маленьких задержек постановки пакетов в очередь и флуктуаций размеров очередей при управлении доступом и инициализации сети [9, 10]. Маленькие задержки в сети являются критичными для живучести приложений, использующих потоки данных реального времени.

Существующие подходы и модели не позволяют проводить адекватное прогнозирование ситуации, когда $P\{Q > b\}$. Таким образом, разработка нового подхода к анализу процесса постановки данных в очередь, реализующего возможность прогнозирования трафикового процесса, непосредственно исходя из измеренных статистических характеристик трафика, является актуальной.

Целью данной статьи является исследование возможностей использования временных шкал, использующихся при изучении организации очередей современных высокоскоростных компьютерных сетей.

Результаты теоретических исследований

Классические пуассоновские и марковские подходы к организации очередей неприменимы для фрактального трафика, для которого необходимо создание новых аналитических средств. До сих пор точных выражений для задержки постановки в очередь фрактальных процессов, отличных от асимптотически больших задержек [11 – 13], не существовало, и, следовательно, существовала необходимость использования аппроксимаций.

Большинство аппроксимаций для вероятности хвоста очереди фрактальных процессов основаны на понятии критической временной шкалы [11 – 18]. При заданном пороговом значении длины очереди b критической временной шкалой наиболее вероятно является количество времени, необходимое для заполнения очереди до значения, большего чем b.

Поскольку критическая временная шкала является мощным теоретическим средством, ее вычисление непосредственно из эмпирических результатов является неосуществимым, вследствие необходимости наличия статистики трафика во всех временных шкалах. Используя статистические характеристики трафика на конечном наборе временных масштабов θ, видится возможной разработка подхода, предоставляющего три

ISSN 2522-9818 (print)
Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2018. № 2 (4) ISSN 2524-2296 (online)

практических аппроксимации для $P\{Q > b\}$: аппроксимацию максимума, аппроксимацию произведения и аппроксимацию суммы. У всех них есть следующие важные свойства:

- применимость к любому конечному порогу очереди b, то есть, неасимптотичность;
- применимость к любой модели трафика, включая нестационарные;
- простота реализации, что обусловлено необходимостью знать статистические характеристики трафика только на нескольких масштабах времени θ.

1. Размер очереди как многошкальная функция

Рассмотрим непрерывную во времени текучую очередь с постоянной интенсивностью обслуживания c и трафиковым процессом $X_t, t \in R$ на входе. Обозначим посредством

$$K_t[\tau] := \int_{t-\tau}^{t} X_\omega d\omega \qquad (1)$$

трафиковый процесс с временной шкалой τ. Для идентификации трафикового процесса в обозначениях будем добавлять надстрочный индекс $K_t^{\{X\}}[\tau]$. Также для удобства обозначений опустим нижний индекс для всех инвариантных во времени величин. Положим, что очередь была пуста в некоторый момент времени ранее *t*. Тогда размер очереди Q_t равен разности между общим количеством трафика, прибывшего в очередь, и общим количеством трафика, обслуженным с того момента времени, когда очередь была пуста последний раз. Это кратко излагается формулой Рейча

$$Q_t := \sup_{\tau>0}\left(K_t[\tau] - c\tau\right), \qquad (2)$$

т.е. Q_t равно функции $K_t[\tau]$ трафикового процесса на всех временных шкалах τ.

2. Аппроксимация критической шкалы времени

Большинство предложенных аппроксимаций $P\{Q > b\}$ для очередей ДВЗ трафика основаны на одной временной шкале, называемой критической временной шкалой [11 – 18]:

$$\lambda_t(b) := \arg\sup_{\tau>0} P\{K_t[\tau] - c\tau > b\}. \qquad (3)$$

Определим аппроксимацию критической временной шкалы как

$$C_t(b) := \sup_{\tau>0} P\{K_t[\tau] - c\tau > b\} = \\ = P\left\{K_t\left[\lambda_t(b)\right] - c\lambda_t(b) > b\right\}. \qquad (4)$$

Очевидно, что $C_t(b)$ является нижней границей $P\{Q_t > b\}$, поскольку, согласно выражению (2), $K_t\left[\lambda_t(b)\right] - c\lambda_t(b) \le Q_t$, следовательно

$$C_t(b) \le P\{Q_t > b\}. \qquad (5)$$

В работах, основанных на теории больших отклонений, было показано, что $C_t(b)$ имеет такое же лог-асимптотическое затухание, как и $P\{Q > b\}$ при $b \to \infty$ для обширного класса входных трафиковых процессов включая фракционное Броуновское движение [11, 12]. Таким образом, если $\{Q_t > b\}$ является редким событием и размер очереди превышает значение *b*, то это происходит в момент времени $\lambda_t(b)$, когда это наиболее правдоподобно. То есть, основываясь на $\{Q_t > b\}$, получим, что Q_t приблизительно равно $K\left[\lambda_t(b)\right] - c\lambda_t(b)$.

Хотя критическая временная шкала является мощным инструментом, имеющим внедрение в теории очередей, ее использование на практике не является непосредственным.

Во первых, рассмотрим задачу вычисления $C_t(b)$ для очереди случайного процесса, исключительно из эмпирических замеров трафика. Из выражения (4) видно, что требуется знать распределение $K_t[\tau]$ для всех возможных τ, что невозможно получить эмпирически. Даже если полностью заменить эмпирические схемы техникой, использующей и эмпирические статистики и аналитические модели, подобные вычислительные проблемы по-прежнему могут присутствовать. Например, если использовать модели трафика, для которых аналитические выражения для $C_t(b)$ неизвестны, то, возможно, для вычисления $C_t(b)$ необходимо будет применять сложные вычислительные алгоритмы.

Во-вторых, нужно вычислить аппроксимацию критической временной шкалы $C_t^{\{X+Y\}}(b)$, когда два независимых процесса *X* и *Y* мультиплексированы и попадают на вход очереди. Такой сценарий часто возникает при управлении доступом и сетевой инициализации [9, 10], а при вычислении непосредственно используются статистики процессов *X* и *Y*.

3. Многошкальные аппроксимации

В настоящем подразделе приводятся три варианта аппроксимации организации очередей, не имеющие вычислительных сложностей, связанных с использованием аппроксимаций критических временных шкал. Ключевым фактором, упрощающим их вычисление, является то, что они используют статистические характеристики трафика только на фиксированном ограниченном наборе временных шкал $\theta \subset R_+$.

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 2 (4)

Необходимо заметить, поскольку некоторые теоретические результаты касаются счетно бесконечных наборов θ, на практике всегда принимается укороченный конечный набор θ при вычислении аппроксимаций. Обычно набор θ выбирается для охвата диапазона временных шкал, на которых ожидается расположение критической временной шкалы $\lambda(b)$ для значений b, подходящих для конкретной аппроксимации.

Аппроксимация максимума. По аналогии с выражением для длины очереди и критической временной шкалы (согласно (2) и (3)), определим

$$Q_t^{[\theta]} := \sup_{\tau\in\theta}\left(K_t[\tau]-c\tau\right) \quad (6)$$

и

$$\lambda_t^{[\theta]} := \arg\sup_{\tau\in\theta} P\left\{K_t[\tau]-c\tau > b\right\} \quad (7)$$

для $\theta \subset R_+$, что приводит к следующей аппроксимации максимума

$$M_t^{[\theta]}(b) := \sup_{\tau\in\theta} P\left\{K_t[\tau]-c\tau > b\right\} = \\ = P\left\{K_t\left[\lambda_t^{\theta}(b)\right]-c\lambda_t^{\theta}(b) > b\right\}. \quad (8)$$

При сравнении выражений (4) и (8) видно, что аппроксимация максимума сходна с аппроксимацией критической временной шкалы. Разница заключается в том, что верхняя граница выбрана большей конечного набора в (8), вместо большей всех временных шкал в (4). Согласно выражениям (4), (5) и (8), получим границы

$$M_t^{[\theta]}(b) \le C_t(b) \le P\left\{Q_t > b\right\}. \quad (9)$$

Необходимо заметить, что, согласно выражениям (2) и (6),

$$Q_t = Q_t^{[R_+]} \ge Q_t^{[\theta]}. \quad (10)$$

и согласно (6), (8) и (10), получим

$$M_t^{[\theta]}(b) \le P\left\{Q_t^{[\theta]} > b\right\} \le P\left\{Q_t > b\right\}. \quad (11)$$

Аппроксимация максимума является практической заменой $C_t(b)$. Поскольку такая аппроксимация требует оценок $P\left\{K_t[\tau]-c\tau > b\right\}$ только для $\tau\in\theta$, сложностей, описанных ранее и связанных с вычислением $C_t(b)$, не возникает.

Рассмотрим задачу получения аппроксимации максимума из эмпирических замеров трафика. Достаточно просто вычислить гистограммы трафика на временных шкалах $\tau\in\theta$ и затем оценить $P\left\{K_t[\tau]-c\tau > b\right\}$.

Рассмотрим задачу вычисления аппроксимации максимума, когда два независимых процесса создают очередь. Простой операцией свертки распределений $K_t^{\{X\}}[t]$ и $K_t^{\{Y\}}[\tau]$ для $\tau\in\theta$ можно получить соответствующие распределения $K_t^{\{X+Y\}}[\tau]$, которые непосредственно дают аппроксимацию максимума.

Аппроксимации произведения и суммы. Две традиционных аппроксимации $P\left\{Q_t > b\right\}$, основанные на наборе временных шкал θ, являются аппроксимацией произведения

$$P_t^{[\theta]}(b) := 1-\prod\nolimits_{\tau\in\theta} P\left\{K_t[\tau]-c\tau < b\right\} \quad (12)$$

и аппроксимацией суммы

$$S_t^{[\theta]}(b) := \sum\nolimits_{\tau\in\theta} P\left\{K_t[\tau]-c\tau > b\right\}. \quad (13)$$

Аппроксимация произведения равна $P\left\{Q_t^{[\theta]} > b\right\}$ когда события $\left\{K_t[\tau]-c\tau > b\right\}$, $\tau\in\theta$ независимы, а аппроксимация суммы равна $P\left\{Q_t^{[\theta]} > b\right\}$ когда они взаимоисключающие.

Точность аппроксимаций. Три вышеприведенные аппроксимации на практике наследуют точность аппроксимаций критической временной шкалы. Если существует элемент θ достаточно близкий к критической временной шкале, то $M_t^{[\theta]}(b)$ будет близко к $C_t(b)$ (согласно выражениям (4) и (8)). Кроме того, если единственно вероятный терм преобладает при суммировании в (13), то аппроксимации произведения и суммы будут близко аппроксимировать $M_t^{[\theta]}(b)$ и, следовательно, $C_t(b)$.

4. Многошкальные аппроксимации

Наиболее приемлемым описанием поведения хвостов очереди фрактального трафика является асимптотическое распределение Вейбулла и Паретто [4, 5, 8 – 10]:

$$P\left\{Q_\infty > b\right\} \cong \vartheta b^{(1-H)(1-2H)/H} e^{-\eta b^{(2-2H)}/2}, \quad (14)$$

где ϑ является константой, не зависящей от значения b.

Если показатель Херста в (14) изменяется в пределах $0{,}5 < H < 1$, это указывает на то, что трафиковый процесс является фрактальным, и распределение Вейбулла убывает медленнее, чем экспоненциальное распределение очереди трафика, не обладающего ДВЗ.

Тогда, исходя из (14) получим, что $e^{-\eta b^{(2-2H)}/2}$ является асимптотической верхней границей $P\left\{Q_\infty > b\right\}$ при $0{,}5 < H < 1$.

Теперь сравним степени логарифмически-асимптотического и асимптотического поведений для аппроксимаций максимума, произведения и суммы при $P\left\{Q_\infty > b\right\}$. Для этого можно доказать такое соотношение.

ISSN 2522-9818 (print)
Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2018. № 2 (4) ISSN 2524-2296 (online)

Аппроксимации максимума, произведения и суммы имеют одинаковое логарифмически-асимптотическое поведение, поскольку

$$P\left\{Q^{\lceil\theta_\alpha\rceil} > b_k\right\} \text{ и } P\{Q_\infty > b_k\};$$

т.е. $b_k \to \infty$, получим

$$\log M^{\lceil\theta_\alpha\rceil}(b_k) \cong \log P^{\lceil\theta_\alpha\rceil}(b_k) \cong \log S^{\lceil\theta_\alpha\rceil}(b_k) \cong \cong \log P\left\{Q^{\lceil\theta_\alpha\rceil} > b_k\right\} \cong \log P\{Q_\infty > b_k\}. \quad (15)$$

Кроме того, аппроксимации максимума, произведения и суммы имеют одинаковое асимптотическое спадание, поскольку $P\left\{Q^{\lceil\theta_\alpha\rceil} > b_k\right\}$; т.е. при $b_k \to \infty$, получим

$$M^{\lceil\theta_\alpha\rceil}(b_k) \cong P^{\lceil\theta_\alpha\rceil}(b_k) \cong S^{\lceil\theta_\alpha\rceil}(b_k) \cong P\left\{Q^{\lceil\theta_\alpha\rceil} > b_k\right\}. \quad (16)$$

В то же время

$$\lim_{k\to\infty} P\left\{Q^{\lceil\theta_\alpha\rceil} > b_k\right\} \Big/ P\{Q_\infty > b_k\} = 0. \quad (17)$$

Таким образом, видны достоинства и ограничения использования статистических характеристик трафика только на экспоненциальных временных шкалах θ_α для выявления характера поведения очередей и $Q^{\lceil\theta_\alpha\rceil}$ аппроксимирует размер очереди Q на временных шкалах $\tau \in \theta_\alpha$.

Согласно (16), аппроксимации максимума, произведения и суммы имеют одинаковое асимптотическое затухание, поскольку $P\left\{Q^{\lceil\theta_\alpha\rceil} > b_k\right\}$. Как результат, они имеют одинаковые логарифмически-асимптотические затухания, но различное асимптотическое затухание, поскольку $P\{Q_\infty > b_k\}$. Далее представлены неасимптотические результаты сравнения различных аппроксимаций с $P\left\{Q^{\lceil\theta_\alpha\rceil} > b_k\right\}$.

Знание того, имеют ли различные аппроксимации верхнюю или нижнюю границы $P\{Q > b\}$ помогает различным приложениям. Например, если задать коэффициент обслуживания очереди такой, что аппроксимация критической временной шкалы $C(b)$ будет равняться 10–6, то необходимо ожидать реальной вероятностью появления хвоста очереди $P\{Q > b\}$ превышения значения 10–6, поскольку $C(b)$ ограничивает снизу $P\{Q > b\}$. Если заменить нижнюю границу $C(b)$ аппроксимацией, т.е. верхней границей $P\{Q > b\}$, то $P\{Q > b\}$ будет гарантировано меньше 10–6.

5. Влияние распределения на очереди

Влияние различных статистических характеристик трафика на поведение очередей интенсивно изучается. Некоторые исследования, в частности, освещают влияние долговременной зависимости (ДВЗ). ДВЗ является лишь функцией асимптотической корреляционной структуры трафика второго порядка (или дисперсией трафика на различных масштабах времени).

Проводилось сравнение поведение очередей независимой гауссовской модели области вейвлета (НГМОВ) и мультифрактальной вейвлет-модели (МФВМ) для процессов с видео и Интернет WAN трафиком с помощью моделирования. Они отличаются статистическими характеристиками: НГМОВ является гауссовским процессом, тогда как МФВМ – негауссовским.

Модели НГМОВ и МФВМ были согласованы с реальными данными и проведена генерация суммарного трафика. Затем производилось сравнение поведения очередей суммарного трафика с реальными данными, когда они поступают в очередь бесконечной длины с постоянной интенсивностью обслуживания. Вероятности $P\{Q > b\}$ рассчитывались по среднему значению, полученному за 1000 реализаций.

Анализ полученных результатов производится с использованием аппроксимации произведения и результатов работ по влиянию коэффициента использования канала на динамику очередей [11 – 14]. Результаты анализа показали, что экспоненциальные временные шкалы являются оптимальными для фрактального трафика, а лучшие результаты показала МФВМ.

В экспериментах с VIDEO трафиком, который намного более близок к гауссовскому процессу, чем трафик Интернет, наблюдалось близкое совпадение НГМОВ и МФВМ с правильным поведением очередей. Это доказывает то, что МФВМ является достаточно гибкой для моделирования гауссовского трафика.

Выводы

В данной статье проведено исследование различных подходов к выбору временных шкал, использующихся при изучении организации очередей современных высокоскоростных сетей передачи данных. Проанализировано влияние необходимой точности и вычислительной мощности, требуемой для вычисления аппроксимации максимума, и установлено, что экспоненциальные временные шкалы являются оптимальными для фрактального трафика.

Также показано влияние хвостов распределений в различных масштабах времени на процесс организации очередей. Отмечено, что при негауссовских трафиковых сценариях корреляционная структура (краткосрочная и долгосрочная) описывает поведение очередей недостаточно адекватно.

Анализ независимой гауссовской модели области вейвлета и мультифрактальной вейвлет-

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 2 (4)

модели показал преимущество первой для фрактального трафика и незначительное расхождение результатов при трафике, близком к гауссовскому.

В дальнейшем планируется разработка моделей трафика наряду с разработкой аппроксимаций для вычисления вероятности возникновения хвоста очереди ДВЗ процессов.

Список литературы

1. Crovella, M., Bestavros, A. (1997), "Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, P. 835–846.
2. Kuchuk, G., Kharchenko, V., Kovalenko, A. and Ruchkov, E. (2016), "Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems", *East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, P. 1–6. Doi: https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655.
3. Willinger, W., Taqqu, M. S., Sherman, R., Wilson, D. V. (1991), "Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level", *ACM SIGCOMM'91*, P. 149–157.
4. Leland, W., Taqqu, M., Willinger, W. (1997), "On the self-similar nature of IP-trafic", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, No. 3, P. 423–431.
5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Г.А. Кучук, А.А. Можаев, Р.Э. Пащенко и др. Х.: ЭкоПерспектива, 2006. 360 с.
6. Kuchuk, G. A., Kovalenko, A. A., Mozhaev, A. A. (2010), "An Approach to Development of Complex Metric for Multiservice Network Security Assessment", *Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP – 2010): Proceedings of Int. Conf., NAU, RED, IEEE Ukraine section joint SP, Kyiv*, P. 158–160.
7. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи (Advanced Information Systems)*. 2018. Т. 2, № 1. С. 4–9. Doi:https://doi.org/10. 20998/2522-9052.2018.1.04.
8. Papagiannaki, K., Moon, S., Fraleigh, C., Tobagi, F., Diot, C. (2002), "Analysis of measured single-hop delay from an operational backbone network", *Proc. IEEE INFOCOM*, P. 535–544.
9. Кучук Г.А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*, 2013, № 2 (35). С. 97–102.
10. Fraleigh, C., Tobagi, F., Diot, C. (2003), Provisioning IP backbone networks to support latency sensitive traffic, *Proc. IEEE INFOCOM*. P. 375–385.
11. Norros, I. (1994), "A storage model with self-similar input", *Queueing Syst*, vol. 16, P. 387–396.
12. Kosenko, V. (2017), "Mathematical model of optimal distribution of applied problems of safety-critical systems over the nodes of the information and telecommunication network", Advanced Information Systems, Vol. 1, No. 2, P. 4–9. Doi: https://doi.org/10. 20998/2522-9052.2017.2.01.
13. Ruban, I., Kuchuk, H., Kovalenko, A. (2017), "Redistribution of base stations load in mobile communication networks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (1), P. 75–81. Doi: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075
14. Neidhardt, A. L., Wang, J. L. (1998), "The concept of relevant time scales and its application to queueing analysis of self-similar traffic", *Proc. ACM SIGMETRICS*, P. 222–232.
15. Kosenko, V. V. (2017), "Principles and structure of the methodology of risk-adaptive management of parameters of information and telecommunication networks of critical application systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (1), P. 75–81. Doi: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.046
16. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Kharchenko, V., Shamraev, A. (2017), "Resource-oriented approaches to implementation of traffic control technologies in safety-critical I&C systems", *Green IT Engineering: Components Network and Systems Implementation, Springer International Publishing*, Vol. 105, P. 313–338.
17. Erramilli, A., Narayan, O., Neidhardt, A., Sanjee, I. (2000), "Performance impacts of multi-scaling in wide area TCP/IP traffic", *Proc. IEEE INFOCOM*, P. 352–359.
18. Debicki, K., Rolski, T.(2002), "A note on transient Gaussian fluid models", *Queueing Syst*, vol. 41, P. 321–342.

References

1. Crovella, M., Bestavros, A. (1997), "Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, P. 835–846.
2. Kuchuk, G., Kharchenko, V., Kovalenko, A. and Ruchkov, E. (2016), "Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems", *East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, P. 1–6. Doi: https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655.
3. Willinger, W., Taqqu, M. S., Sherman, R., Wilson, D. V. (1991), "Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level", *ACM SIGCOMM'91*, P. 149–157.
4. Leland, W., Taqqu, M., Willinger, W. (1997), "On the self-similar nature of IP-trafic", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, No. 3, P. 423–431.
5. Kuchuk, G. A., Mozhayev, A. A., Pashchenko, R. E. and other. (2006), Fractal analysis of processes, structures and signals: Collective monograph [Fraktal'nyy analiz protsessov, struktur i signalov: Kollektivnaya monografiya], Kharkiv : EkoPerspektiva, 360 p.
6. Kuchuk, G. A., Kovalenko, A. A., Mozhaev, A. A. (2010), "An Approach to Development of Complex Metric for Multiservice Network Security Assessment", *Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP – 2010): Proceedings of Int. Conf., NAU, RED, IEEE Ukraine section joint SP, Kyiv*, P. 158–160.
7. Kovalenko, A., Kuchuk, H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, P. 4–9. Doi: https://doi.org/10. 20998/2522-9052.2018.1.04.

ISSN 2522-9818 (print)
Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2018. № 2 (4) *ISSN 2524-2296 (online)*

8. Papagiannaki, K., Moon, S., Fraleigh, C., Tobagi, F., Diot, C. (2002), "Analysis of measured single-hop delay from an operational backbone network", *Proc. IEEE INFOCOM*, P. 535–544.
9. Kuchuk, G. A. (2013), "Method of corporate multiservice networkcoherent fragment informative structure synthesis", *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 2 (35), P. 97–102.
10. Fraleigh, C., Tobagi, F., Diot, C. (2003), Provisioning IP backbone networks to support latency sensitive traffic, Proc. *IEEE INFOCOM*. P. 375–385.
11. Norros, I. (1994), "A storage model with self-similar input", *Queueing Syst*, vol. 16, P. 387–396.
12. Kosenko, V. (2017), "Mathematical model of optimal distribution of applied problems of safety-critical systems over the nodes of the information and telecommunication network", Advanced Information Systems, Vol. 1, No. 2, P. 4–9. Doi: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.01.
13. Ruban, I., Kuchuk, H., Kovalenko, A. (2017), "Redistribution of base stations load in mobile communication networks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (1), P. 75–81. Doi: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075
14. Neidhardt, A. L., Wang, J. L. (1998), "The concept of relevant time scales and its application to queueing analysis of self-similar traffic", *Proc. ACM SIGMETRICS*, P. 222–232.
15. Kosenko, V. V. (2017), "Principles and structure of the methodology of risk-adaptive management of parameters of information and telecommunication networks of critical application systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (1), P. 75–81. Doi: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.046
16. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Kharchenko, V., Shamraev, A. (2017), "Resource-oriented approaches to implementation of traffic control technologies in safety-critical I&C systems", *Green IT Engineering: Components Network and Systems Implementation, Springer International Publishing*, Vol. 105, P. 313–338.
17. Erramilli, A., Narayan, O., Neidhardt, A., Sanjee, I. (2000), "Performance impacts of multi-scaling in wide area TCP/IP traffic", *Proc. IEEE INFOCOM*, P. 352–359.
18. Debicki, K., Rolski, T.(2002), "A note on transient Gaussian fluid models", *Queueing Syst*, vol. 41, P. 321–342.

Поступила (Receive) 15.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Коваленко Андрій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри електронно-обчислювальних машин, м. Харків, Україна; e-mail: andriy_kovalenko@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-2817-9036.

Коваленко Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры электронно-вычислительных машин, г. Харьков, Украина; e-mail: andriy_kovalenko@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-2817-9036.

Kovalenko Andrey – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, Assistant Professor of the Department of Electronic computing machines, Kharkiv, Ukraine; e-mail: andriy_kovalenko@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-2817-9036.

Кучук Георгій Анатольович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, м. Харків, Україна; e-mail: kuchuk56@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2862-438X.

Кучук Георгий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры вычислительной техники и программирования, г. Харьков, Украина; e-mail: kuchuk56@ukr.net, ORCID: 000-0002-2862-438X.

Kuchuk Heorhii – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of computer engineering and programming, Kharkiv, Ukraine; e-mail: kuchuk56@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2862-438X.

Рубан Ігор Вікторович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, проректор з науково-методичної роботи, м. Харків, Україна; e-mail: ihor.ruban@nure.ua, ORCID: 0000-0002-4738-3286

Рубан Игорь Викторович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Проректор по научно-методической работе, г. Харьков, Украина; e-mail: ihor.ruban@nure.ua, ORCID:0000-0002-4738-3286.

Ruban Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, Vice-Rector for Scientific and Methodological Work, Kharkiv, Ukraine; e-mail: ihor.ruban@nure.ua, ORCID: 0000-0002-4738-3286.

ВИКОРИСТАННЯ ЧАСОВИХ ШКАЛ ПРИ АПРОКСИМАЦІЇ ДОВЖИНИ ЧЕРГ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

Предмет дослідження: прогнозування довжини черги до комунікаційного пристрою високошвидкісної комп'ютерної мережі при негаусівському трафіку. **Мета** даної статті: дослідження можливостей використання часових шкал, що використовуються при вивченні організації черг сучасних високошвидкісних комп'ютерних мереж. **Методи** дослідження: фрактальний аналіз, методи шкалювання, методи апроксимації. **Результати** дослідження. Представлені результати вибору часових шкал для побудови адекватних моделей сучасного трафіку. Використання таких моделей, зокрема, дозволяє вивчати динаміку черг активних мережевих пристроїв, що важливо для планування і розподілу завантаження мережі. Використання статистичних характеристик трафіку на невеликій кількості часових масштабів дозволяє розширити теоретичні концепції для

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 2 (4)

критичних часових масштабів, що робить такий підхід таким, що застосовується до будь-якого трафікового процесу, включаючи трафік з довготривалою залежністю. Крім того, розглянуті питання опису поведінки хвостів черг стосовно сучасних високошвидкісних комп'ютерних мереж і визначені властивості запропонованих модельних апроксимацій. Аналіз незалежної гаусівської моделі області вейвлета і мультифрактальної вейвлет-моделі показав перевагу першої для фрактального трафіку і незначну розбіжність результатів при трафіку, котрий є близьким до гаусівського. **Висновки**. Проведено дослідження різних підходів до вибору часових шкал, що використовуються при вивченні організації черг сучасних високошвидкісних мереж передачі даних. Проаналізовано вплив необхідної точності і обчислювальної потужності, необхідної для обчислення апроксимації максимуму, і встановлено, що експоненціальні часові шкали є оптимальними для фрактального трафіку. Також показано вплив хвостів розподілів в різних масштабах часу на процес організації черг. Відзначено, що при негаусівських трафікових сценаріях кореляційна структура (короткострокова і довгострокова) описує поведінку черг недостатньо адекватно.

Ключові слова: протокол TCP, трафік, фрактальнІсть, масштабна інваріантність, мережеві протоколи, модель, телекомунікаційна мережа.

USING TIME SCALES WHILE APPROXIMATING THE LENGTH OF COMPUTER NETWORKS

The **subject** of the research is to predict the queue length for the communication device of a high-speed computer network with non-Gaussian traffic. The **goal** of this article is to examine the probabilities of the application of time scales used to study the organization of queues of modern high-speed computer networks. The following **methods** were used: the fractal analysis, scaling methods, methods of approximation. The following **results** were achieved: the results of the time scale selection for constructing adequate models of modern traffic were presented. The use of such models, in particular, enables studying the dynamics of the queues of active network devices, which is important for planning and distributing the network load. The use of statistical characteristics of traffic on a small number of time scales enables expanding theoretical concepts for critical time scales, which makes this approach applicable to any traffic process including the long-term traffic. In addition, the issues of describing the behaviour of queue tails for modern high-speed computer networks are considered and the properties of the proposed model approximations are determined. The analysis of the independent Gaussian model of a wavelet domain and the multifractal wavelet model showed the advantage of the first one for the fractal traffic and a slight discrepancy in the results for traffic close to the Gaussian one. **Conclusions**. Various approaches to the selection of time scales used in the study of the organization of queues of modern high-speed data networks were studied. The effect of the necessary accuracy and computational power required for calculating the maximum approximation were analyzed and it was established that exponential time scales are optimal for the fractal traffic. The impact of the tails of distributions in different time scales on the process of queue organization was also shown. It was noted that in the context of non-Gaussian traffic scenarios, the correlation structure (both short-term and long-term ones) does not describe the queues behaviour adequately enough.

Keywords: TCP protocol, traffic, fractality, scale invariance, network protocols, model, telecommunication network.