

## КАЧЕСТВО УСЛУГ СВЯЗИ

УДК 004.72

## ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ С ПАКЕТНОЙ КОММУТАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ СКРЫТОЙ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ

**В. И. Козачок**, сотрудник Академии ФСО России, д-р соц. н., проф.; kosachok@mail.ru

**В. А. Баранов**, сотрудник Академии ФСО России, д.т.н., доцент; Baranov.va@mail.ru

**О. В. Крюков**, сотрудник Академии ФСО России, к.т.н., доцент; oleghooker@gmail.com

**Д. И. Кривенцев**, в/ч 95306; kriventsevd@gmail.com

Представлен анализ статистических характеристик показателей качества обслуживания транспортной сети с коммутацией пакетов (ТСКП). Для решения проблемы оценивания состояния ТСКП предложена скрытая марковская модель, использующая вейвлет-преобразование.

**Ключевые слова:** транспортная сеть с коммутацией пакетов, оценивание, QoS, скрытая марковская модель, вейвлет-преобразование.

**Постановка задачи.** Современный этап построения мультисервисных сетей связи в интересах различных потребителей, в том числе для нужд государственного управления, характеризуется активным использованием в качестве канальной инфраструктуры ресурсов операторов связи («Ростелеком», «МегаФон», «ТрансТелеКом» и др.). Зачастую такая магистральная подсеть строится на базе технологий, использующих коммутацию пакетов, образуя транспортную сеть с коммутацией пакетов (ТСКП). Например, для обеспечения связности узлов может быть использована услуга L2/VPN или L3/VPN [1].

Арендуемый ресурс характеризуется несколько сниженными значениями управляемости и наблюдаемости. Поэтому при аренде у операторов связи услуг переноса трафика возникает вопрос о соответствии значений показателей качества услуги заранее оговоренным параметрам. К основным параметрам качества (Quality of Service, QoS) относятся: односторонняя и круговая задержка доставки пакета; девиация задержки пакета (джиттер); коэффициент потери пакетов; ширина полосы пропускания; тип услуги вышестоящего уровня; максимальная единица передачи; степень фрагментации пакетов; размер пакета информации. Некоторые из этих параметров взаимосвязаны, например задержка доставки пакета напрямую зависит от размера последнего, а степень фрагментации пакетов — от исходного размера IP-пакета и значений максимальной единицы передачи на участках сети. Однако наибольшее влияние на качество предоставляемых услуг оказывают коэффициент потери пакетов  $K_p$ , время задержки передачи пакета  $t$  и девиация задержки  $\Delta t$ .

В настоящее время разработано (и в некоторых случаях даже внедрено) множество различных систем, осуществляющих мониторинг рассмотренных показателей качества, например WiSLA (Well integrated Service Level Agreement — интегрированное соглашение об уровне предоставления услуги). В таких системах используются датчики SLA, расположенные на границе ТСКП, и серверное оборудование, осуществляющее сбор показателей качества обслуживания с датчиков и их анализ.

Пример использования системы WiSLA показан на рис. 1, где в качестве сети представлен MPLS-сегмент, в котором потребителю предоставляется L3/VPN с топологией Full Mesh. Пути LSP (Label Switch Path) внутри MPLS-домена выстраиваются динамически и определяются работой протокола IGP.

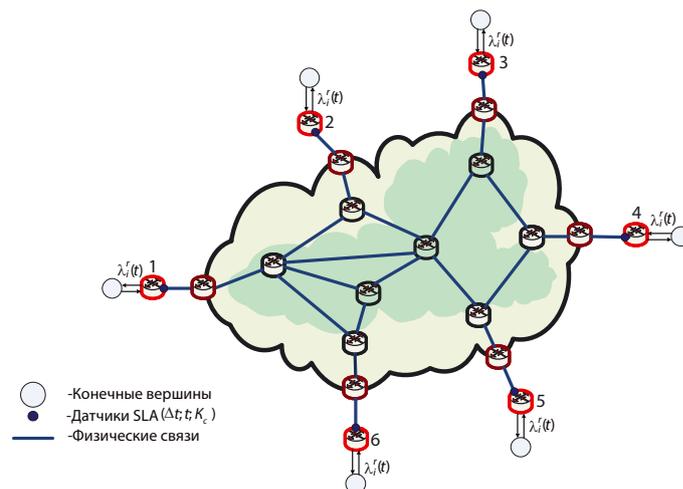


Рис. 1. Схема организации ТСКП (вариант)

Однако у таких систем есть серьезный недостаток: они лишь фиксируют параметры состояния ТСКП, а прогнозировать значения параметров качества обслуживания не способны. К тому же динамика информационных потоков, передаваемых в ТСКП, определяет необходимость получения прогнозных оценок показателей качества обслуживания на коротких временных интервалах. Следовательно, необходимо искать новые подходы к моделированию процессов обеспечения качества услуг по переносу трафика, предоставляемых операторами связи, и к разработке методов оценивания показателей качества услуг по переносу трафика в условиях недостаточной управляемости и наблюдаемости.

**Определение состояний ТСКП.** Опыт практической эксплуатации показывает, что в зависимости от принимаемых значений QoS ТСКП может находиться в трех состояниях: «норма», «деградация» и «отказ». Они характеризуются количественными значениями показателей качества обслуживания, находящихся в допустимых пределах («норма»), в пределах ухудшения качества предоставляемых услуг («деградация») и в пределах невозможности предоставле-

ния услуг («отказ»). За исходные данные принимаем специфичный трафик передачи данных, критичный к показателям качества. Возможные значения параметров качества обслуживания для трех выделенных состояний, определенные с учетом опыта практической эксплуатации ТСКП, представлены в таблице. Эти значения, следует отметить, существенно отличаются от используемых в рекомендации Y.1541, что обусловлено анализом специфичного трафика, критичного ко всем трем параметрам. Однако изменение этих значений никоим образом не повлияет на конечный результат.

#### Параметры качества обслуживания для трех состояний

Состояния	$t$ , мс	$\Delta t$ , мс	$K_c$ , %
Норма	< 100	< 10	< 1
Деградация	100—150	10—25	1—5
Отказ	> 150	> 25	> 5

Наиболее сложным с точки зрения математического моделирования является описание состояния «деградация», характеризующегося снижением уровня качества обслуживания. Следствием нахождения системы в состоянии «деградация» может стать переход в состояние «отказ» или восстановление до состояния «норма». Таким образом, возникает необходимость в математическом представлении переходных процессов, отражающих состояние ТСКП.

**Анализ наблюдаемых параметров.** Для выбора и обоснования математической модели оценивания состояния ТСКП проведем статистический анализ характеристик качества обслуживания на основе выборок, полученных с арендуемых каналов L2/VPN оператора связи:

Вид трафика . . . . .	Специфичный трафик передачи данных, критичный к задержкам
Интервал измерений, с . . . . .	1
Уровень агрегирования, мин . . . . .	5
Длительность реализации . . . . .	20281 отсчетов по 5 мин, 1690 ч

Основными показателями были выбраны значения задержки передачи пакетов, девиации задержки и коэффициента потерь пакетов, полученные как для исходящего, так и для входящего трафика.

На рис. 2 представлена исходная выборка в виде временных рядов, содержащих 20281 единицу измерения. Каждое измерение производилось один раз в секунду с агрегацией по интервалу в 5 мин; соответственно одно значение отра-

жает измеряемый параметр в течение 5 мин. Проведем статистический анализ на примере значений задержки передачи пакетов, полученных на арендуемом канале L2/VPN.

Анализ рис. 2 показывает, что задержки при передаче пакетов имеют участки локальной стационарности, в границах которых наблюдаются резкие всплески. В рамках рассматриваемых выборок на примере значений среднего времени доставки выделим три вышеуказанных состояния: «норма», «деградация» и «отказ».

Для предварительного статистического исследования показателя качества обслуживания (задержки передачи пакетов) построим гистограммы для арендуемого канала L2/VPN. Анализ осуществим на выборках ограниченной длины, соответствующих ранее выделенным состояниям «норма», «деградация» и «отказ». Проведенный анализ должен выявить соответствие между «условно» скрытыми состояниями и наблюдаемыми представленными значениями плотности распределения времени задержки. Гистограммы распределения времени задержки для трех состояний приведены на рис. 3.

Поскольку решение о состоянии ТСКП, с учетом технических условий, необходимо принимать по выборкам ограниченного объема, зададим размер анализируемого окна не более 500 отсчетов.

Следует отметить, что в последние несколько лет как зарубежные, так и отечественные исследователи приходят к выводу о наличии свойства самоподобия (фрактальности) трафика, передаваемого в сетях с пакетной коммутацией [2—4]. Одним из признаков фрактальности является медленно затухающая корреляционная функция. Такой трафик характеризуется распределениями «с тяжелыми хвостами», например Вейбулла и Парето. Вид гистограмм распределения времени задержки передачи пакетов ТСКП L2/VPN (см. рис. 3) указывает на то, что данные характеристики также могут быть представлены распределениями «с тяжелыми хвостами» со своими параметрами. Однако недостатком такого представления является необходимость расчета параметра Хёрста, используемого в распределениях Вейбулла и Парето. Расчет указанного параметра является эвристическим и критичен к размеру окна анализируемого временного ряда и его местоположению.

Такое ограничение наряду с необходимостью постоянного перерасчета параметров распределений для разных каналов и участков временного ряда, представляющего значения одного из параметров QoS, позволяет сделать вывод о невозможности идентификации условно скрытых состояний по функциям плотности вероятности.

**Вейвлет-преобразование временного ряда, характеризующего наблюдаемый параметр.** Для дальнейшего ре-

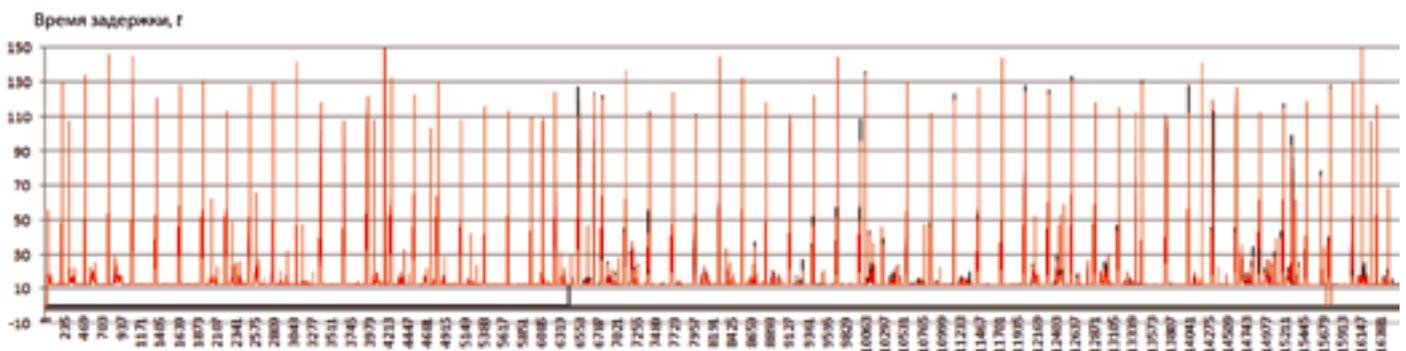


Рис. 2. Задержки передачи пакетов для канала L2/VPN

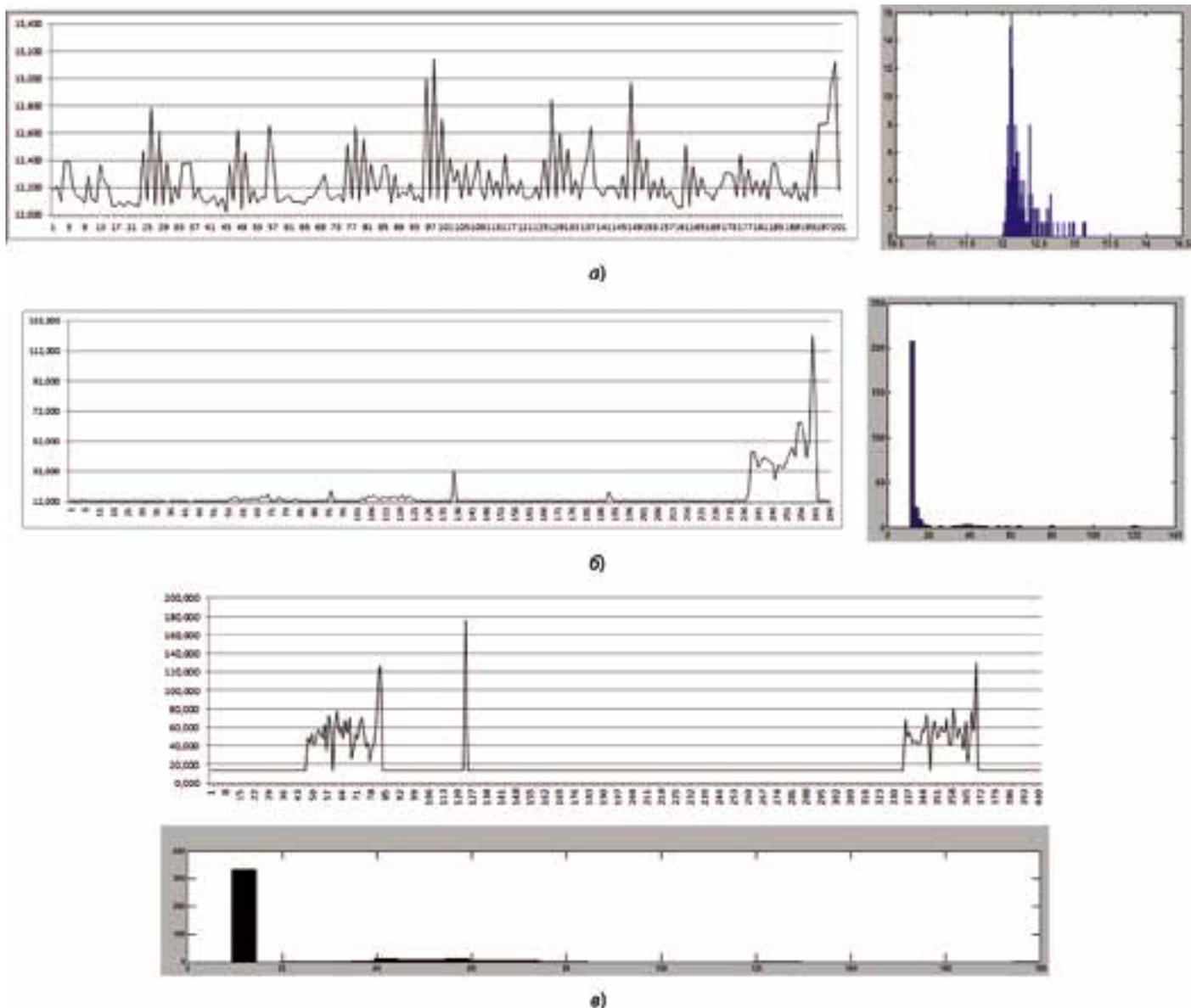


Рис. 3. Гистограммы распределения времени задержки для состояний L2/VPN: а — «норма»; б — «деградация»; в — «отказ»

шения задачи идентификации состояний показателей качества обслуживания ТСКП с последующим выводом прогнозных оценок осуществим вейвлет-преобразование анализируемых выборок. Целью вейвлет-анализа является получение пространственно-временного спектра процесса обеспечения качества обслуживания, выраженного временем задержки. Такое представление должно способствовать обнаружению масштабно инвариантных свойств применительно к их интегральным или статистическим характеристикам. На рис. 4 показан временной ряд, характеризующий один из показателей качества обслуживания — время задержки передачи пакета  $t$  с соответствующими ему вейвлет-спектрограммами. Здесь светлым тоном отражены значимые изменения (экстремумы) временного ряда во времени, а темным — незначительные изменения.

Анализ спектрограмм, представленных на рис. 4, позволяет выдвинуть гипотезу о наличии трех возможных профилей, характеризующих значения времени задержки и их взаимосвязи с ранее выделенными скрытыми состояниями «норма», «деградация», «отказ». В дальнейшем

подтверждение данной гипотезы поможет решить задачу идентификации того или иного состояния ТСКП на основе расчета вейвлет-коэффициентов. Вейвлет-преобразование представляет собой разложение сигналов по системе функций, которые являются сдвинутыми и масштабированными (сжатыми или растянутыми) копиями одной функции — порождающего вейвлета [5, 6].

Наиболее распространенным является диадное преобразование, с помощью которого сигнал  $z(t)$  несложно представить в виде

$$z(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \omega_j^{(l)} \sqrt{2^l} \varphi(2^l t - j),$$

где  $\varphi(t)$  — порождающий вейвлет, минимальными требованиями к которому являются пространственная локализация (финитность, или быстрое затухание) и наличие хотя бы одного нулевого момента (равенство интеграла нулю по всей области определения);  $\omega_j^{(l)}$  — вейвлет-коэффициенты;  $l$  — индекс масштаба, отражающий уровень разрешения.

При этом частичная сумма ряда

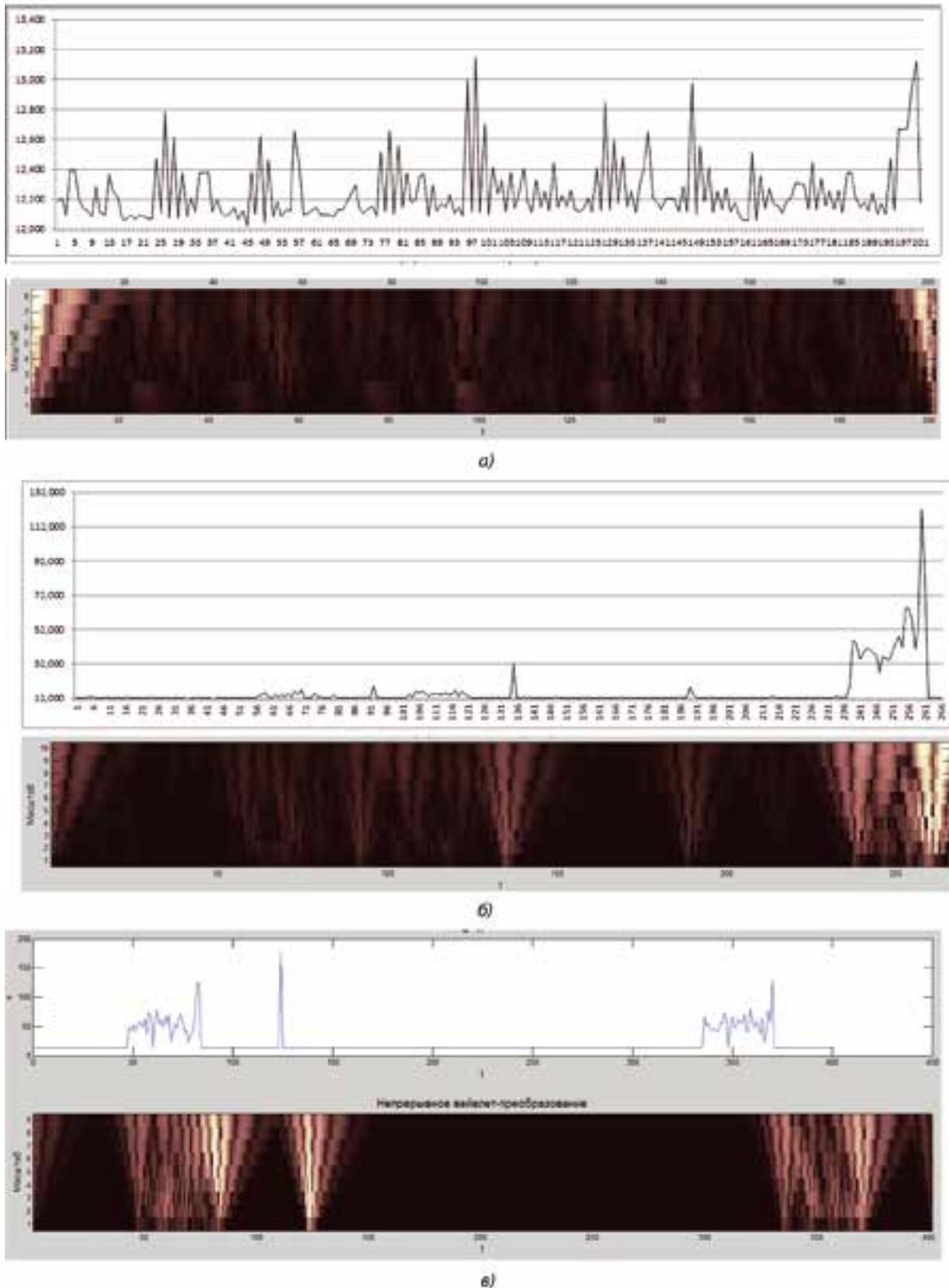


Рис. 4. Визуализация непрерывного вейвлет-преобразования (вейвлет Добеши 4-го порядка): а — для состояния «норма», L2/VPN (200 отсчетов  $t$ ); б — для состояния «деградация» L2/VPN (266 отсчетов  $t$ ); в — для состояния «отказ» L2/VPN (400 отсчетов  $t$ )

$$z^{(l_0)}(t) = \sum_{l=-\infty}^{l_0-1} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \omega_j^{(l)} \sqrt{2^l} \varphi(2^l t - j)$$

является приближением сигнала  $z(t)$  с разрешением  $l_0$ .

Таким образом, сигнал  $z(t)$  описывается в виде суммы начального приближения (т.е. приближения с некоторым начальным разрешением) и элементов детализации (оставшихся членов ряда):

$$z(t) = z^{(l_0)}(t) + \sum_{l=l_0}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \omega_j^{(l)} \sqrt{2^l} \varphi(2^l t - j). \quad (1)$$

Выражение (1) иллюстрирует идеологию многомасштабного представления информации, что соответствует цели разработки математической модели оценивания состояния ТСКП с учетом сформулированной гипотезы.

Каждой паре дискретных отсчетов временного ряда, характеризующего время задержки  $Z = (z_1, \dots, z_N)$  с индексами  $2j$  и  $2j + 1$ , поставим в соответствие два значения:

$$v_j = \frac{z_{2j} + z_{2j+1}}{2}; \quad \omega_j = \frac{z_{2j} - z_{2j+1}}{2}.$$

Эти значения формируют два новых временных ряда:  $U = \{v_j\}$  и  $W = \{\omega_j\}$ , один из которых является огрубленной версией исходного временного ряда (каждой паре элементов  $z$  соответствует их среднее арифметическое), а другой содержит детализирующую информацию, необходимую для восстановления исходного временного ряда. В результате следующего применения аналогичной операции к временному ряду  $U$  также получаем два временных ряда, один из которых является огрубленной версией  $U$ , а другой содержит детализирующую информацию, необходимую для восстановления  $U$ .

Таким образом, поставив в соответствие временному ряду  $z$  произвольный уровень разрешения  $l_1$ , получим рекурсивные формулы вычисления элементов временного ряда для любого разрешения  $l_0 < l_1$ :

$$v_j^{(l)} = \frac{v_{2j}^{(l+1)} + v_{2j+1}^{(l+1)}}{2}; \quad \omega_j^{(l)} = \frac{\omega_{2j}^{(l+1)} - \omega_{2j+1}^{(l+1)}}{2}; \quad (2)$$

где  $l = l_1 - 1, l_1 - 2, \dots, l_0$ , а  $v_j^{l_1} = z_j$ .

Выражение (2) является частным случаем вейвлет-преобразования, известным как прямое преобразование Хаара одномерного дискретного ряда. На каждом шаге преобразования временной ряд распадается на две составляющие: приближение с низким разрешением (аппроксимация) и приближение с высоким разрешением (детализация). Первую часто называют низкочастотной (НЧ), а вторую — высокочастотной (ВЧ). Такая терминология принята по аналогии с анализом Фурье, однако частота в гармоническом анализе и частота в значении уровня разрешения в вейвлет-анализе являются близкими, но не эквивалентными понятиями. Элементы ВЧ-составляющих вейвлет-преобразований называются вейвлет-коэффициентами.

Прямое преобразование Хаара эквивалентно свертке сигнала с фильтром  $q = \left[ \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right]$  для НЧ-составляющей

и с фильтром  $g = \left[ -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right]$  для ВЧ-составляющей, с последующим удалением из полученных сигналов каждого второго элемента.

В соответствии с этим выражение прямого вейвлет-преобразования дискретных отсчетов, характеризующих время задержки, в общем виде запишем так:

$$v_l = \downarrow_2 [v_{l+1} h]; \quad w_l = \downarrow_2 [w_{l+1} g];$$

$$l = l_1 - 1, l_1 - 2, \dots, l_0; \quad v_{l_1} = Z.$$

Результатом вейвлет-преобразования дискретных отсчетов, характеризующих время задержки, является набор вейвлет-коэффициентов  $W = \{\omega_j\}$ , где  $\omega$  — вейвлет-ко-

эффициент;  $l$  — индекс масштаба;  $j$  — порядковый номер вейвлет-коэффициента в пределах масштаба. При этом в соответствии с гипотезой исследования о взаимосвязи трех ранее выделенных профилей, определяемых значениями времени доставки, и трех «условно» скрытых состояний представим данные профили совокупностью вейвлет-коэффициентов, в виде модели  $\Theta$ :

$$\Theta = \{f_1(w), f_2(w), \dots, f_L(w)\},$$

где  $f_i(w)$  — функция плотности распределения вероятности (ФПРВ) вейвлет-коэффициентов на  $i$ -м масштабе (уровне);  $L$  — число уровней вейвлет-преобразования.

Такой подход позволил представить временной ряд, характеризующий время задержки в виде совокупности независимых вейвлет-коэффициентов (рис. 5).

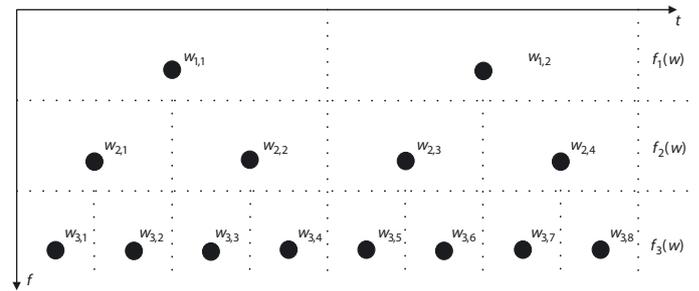


Рис. 5. Описание временного ряда, характеризующего время задержки совокупностью независимых вейвлет-коэффициентов

Полагая, что вейвлет-коэффициенты каждого уровня вейвлет-преобразования временного ряда, характеризующего время задержки, имеют нормальный закон распределения (при этом  $f_i(w) \neq f_j(w)$ ), несложно рассчитать описание классов в виде моделей  $\Theta_i$  и провести тестовую классификацию.

Полное описание ФПРВ всего вейвлет-преобразования с учетом всех возможных зависимостей между состояниями вейвлет-коэффициентов практически нереализуемо, так как число комбинаций различных переменных состояния экспоненциально возрастает в зависимости от числа вейвлет-коэффициентов. Однако в результате декорреляции вейвлет-преобразования происходит значительное ослабление зависимостей при переходе от одного вейвлет-коэффициента к другому. Это позволяет синтезировать модель на основе описания вероятностных связей марковского типа между состояниями только соседних вейвлет-коэффициентов, для чего представим исходный модулированный сигнал деревом вейвлет-преобразования со скрытыми состояниями, связанными зависимостями марковского типа [7]. При этом:

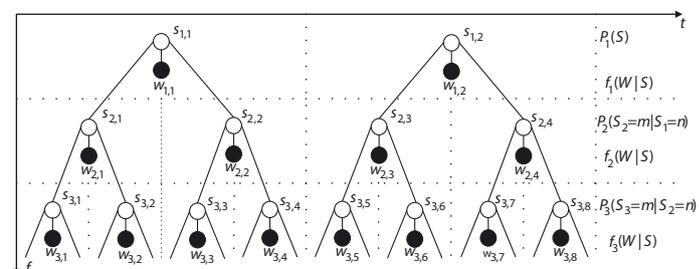


Рис. 6. Модель дерева вейвлет-преобразования со скрытыми марковскими состояниями

• с целью учета негауссовской природы вейвлет-коэффициентов восстановим ФПРВ  $f(w_i)$  каждого вейвлет-коэффициента в виде смеси нормальных распределений;

• с целью учета ключевых зависимостей между вейвлет-коэффициентами введем марковские связи между перемными соседних скрытых состояний (рис. 6).

Марковская структура, накладываемая на состояния вейвлет-коэффициентов (а не на сами вейвлет-коэффициенты), предполагает следующее ограничение:

$$f(w | \{w_j\}_{j \neq i}, \{s_j\}_{j \neq i}, s_i = m) = f(w_i | s_i = m), \quad (8)$$

где  $f(\cdot)$  — плотность распределения вероятности вейвлет-коэффициентов.

Из этого следует, что значение вейвлет-коэффициента  $w_i$  не зависит от значений других вейвлет-коэффициентов и определяется только его текущим состоянием, которое зависит лишь от состояний предка  $s_{p(i)}$  и потомков  $s_{j, j \in c(i)}$ .

Для  $M$  скрытых состояний модель описывается следующим набором параметров:

$P_S(s_i = m)$  — вероятность того, что вейвлет-коэффициент  $w_i$ , находящийся в вершине дерева, пребывает в состоянии  $m$ ;

$P(s_i = m | s_{p(i)} = n)$  — условная вероятность того, что вейвлет-коэффициент  $w_i$  находится в состоянии  $m$  в случае, если состояние предка  $s_{p(i)}$  равно  $n$ ;

$\mu_{i,m}$  и  $\sigma_{i,m}^2$  — соответственно математическое ожидание и дисперсия вейвлет-коэффициента  $w_i$  в состоянии  $m$ .

Совокупность указанных параметров, объединенных в векторе  $\Theta$ , представляет собой стохастическую модель временного ряда, характеризующего время задержки. Эта модель описывается в виде скрытой марковской модели дерева вейвлет-преобразования (СММДВП):

$$\Theta^{\text{СММДВП}} = \{P_S(m), P(s_i = m | s_{p(i)} = n), \mu_{i,m}, \sigma_{i,m}^2\}.$$

**Заключение.** Таким образом, согласно ранее сформулированной гипотезе скрытая марковская модель дерева вейвлет-преобразования должна обеспечить возможность

описания ранее выделенных состояний «норма», «деградация» и «отказ» временного ряда, характеризующего время доставки в виде векторов  $\Theta_{\text{Норма}}^{\text{СММДВП}}$ ,  $\Theta_{\text{Деградация}}^{\text{СММДВП}}$ ,  $\Theta_{\text{Отказ}}^{\text{СММДВП}}$ . В дальнейшем этот результат позволит перейти к решению задачи получения прогнозной оценки рассмотренных состояний. Один из вариантов реализации прогнозной оценки — использование ее для управляющих воздействий на ТСКП с целью перехода на резервный ресурс. Следует отметить, что в дальнейшем для получения достоверной оценки состояния ТСКП необходимо в представленной модели учесть не один показатель, характеризующий время доставки, а дополнительно еще два, которые описывают девиацию задержки пакетов (джиттер) и коэффициент потери пакетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Росляков А. В.** Виртуальные частные сети. Основы построения и применения.— М.: Эко-Трендз, 2006.
2. **Шелухин О. И.** Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения.— М.: Горячая линия-Телеком, 2011.
3. **Watagodakumbura С.** Absolute effects of aggregation of self-similar traffic on quality of service parameters // First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004.
4. **Shomura Y.** Simulation Based Analysis of Queueing Property for Continuous Self-Similar Traffic // ICICIC'08. 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control, 2008.
5. **Переберин А. В.** Многомасштабные методы синтеза и анализа изображений: дис... канд. физ.-мат. наук.— М., 2003.— С. 16—33.
6. **Crouse M. S., Nowak R. D., Baraniuk R. G.** Wavelet-Based Statistical Signal Processing Using Hidden Markov Models.— IEEE Transactions on Signal Processing. August 1997.
7. **Rabiner L.** A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition, Proc. IEEE, Vol. 77, Feb. 1989, p. 257—285.

Получено 27.03.14

## ИНФОРМАЦИЯ

### СДАН В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЦЕНТР ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК «РОСТЕЛЕКОМА»

«Ростелеком» ввел в эксплуатацию Центр исследований и разработок («Research & Development» или Центр R&D), основными функциями которого являются:

- моделирование новых клиентских сервисов с учетом всех программных и аппаратных особенностей систем «Ростелекома»;
- тестирование полного перечня технологического оборудования в целях прогнозирования его поведения при оказании услуг;
- проработка новых технологических решений;
- снятие рисков (путем предварительного тестирования) в процессе внедрения новых версий аппаратного и программного обеспечения;
- проверка совместимости нового оборудования с остальными подсистемами «Ростелекома»;
- отладка наиболее сложных сетевых проблем в лабораторных условиях и т.д.

В Центре R&D «Ростелекома», расположенном в г. Реутово Московской области, созданы условия для проведения испытаний широкого спектра оборудования: транспортной сети, магистральной сети передачи данных, сетей доступа, абонентского и энергетического оборудования, пассивных компонентов, IT-систем, измерительных приборов и пр. Оснащение Центра позволяет проводить полный спектр тестирований, необходимых Компании. Тестирование оборудования перед покупкой и установкой на сети позволяет избежать технологических рисков, что снижает операционные затраты «Ростелекома».

«Глубокое тестирование в Центре R&D позволит существенно повысить качество предоставления услуг и значительно улучшить удовлетворенность клиентов и абонентов услугами Компании», — отметил президент «Ростелекома» **С. Калугин**.

Старший вице-президент по развитию сетей связи «Ростелекома» **И. Зима** подчеркнул, что наличие Центра позволит «Ростелекому» проводить полноценное тестирование и отладку технологического оборудования и сервисов до принятия решения о приобретении и вводе его в коммерческую эксплуатацию. Это позволит сократить сроки внедрения и число проблем, выявленных клиентами.

Центр исследований и разработок станет эффективной площадкой для производителей телекоммуникационного оборудования в процессе выработки технологических решений, направленных на оказание современных инфокоммуникационных услуг.

Центр R&D «Ростелекома» приступил к работе (в частности, по проекту «Устранения Цифрового Неравенства») еще до его официального ввода в эксплуатацию.