

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

УДК 621.391

Д.В. АГЕЕВ, д-р техн. наук, М.Т. САЛАХ

СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ САМОПОДОБНОГО ТРАФИКА С НЕСКОЛЬКИМИ ПЕРИОДАМИ НАГРУЗКИ

Введение

Инфокоммуникационные сети предназначены для обеспечения функционирования информационных систем и характеризуются большим разнообразием предоставляемых услуг. В сети передается трафик с различными требованиями к качеству обслуживания. Требования к качеству обслуживания принято описывать параметрами QoS. Кроме этого, следует обратить внимание на то, что спрос на различные информационные и инфокоммуникационные услуги не одинаков во времени и обладает периодами роста и спадов. При этом образуется периодическое изменение нагрузки. В случае, если производительность сети недостаточна для обслуживания возросшей нагрузки, это приводит к ухудшению качества обслуживания.

Традиционный подход, широко используемый для односервисных сетей, базируется на расчете параметров сети для худшего случая, а именно, для часа наибольшей нагрузки, что обычно позволяет гарантировать удовлетворение требований к качеству обслуживания. Это подход, хоть и не позволяет получить решение эффективного использования сетевых ресурсов на всем временном интервале, но хорошо себя зарекомендовал при планировании сетей.

В случае мультисервисных сетей с большим разнообразием трафика эта ситуация усугубляется тем, что обычно периоды максимальной нагрузки (час наибольшей нагрузки) для различных информационных и инфокоммуникационных услуг не совпадают [1]. В этом случае традиционный подход, базирующийся на расчете для максимальной нагрузки (равной сумме максимальных нагрузок для каждой из услуг), также позволяет получить параметры и конфигурацию инфокоммуникационной сети, удовлетворяющей требованиям к качеству обслуживания для любого периода времени, но эффективность использования сетевых ресурсов падает еще значительно.

При планировании инфокоммуникационных сетей, особенно с учетом колебаний интенсивности трафика на малых периодах времени, возникает необходимость в наиболее точном описании и моделировании трафиков, циркулирующих в сети. На данный момент наиболее корректными считаются модели самоподобных процессов [2], которые позволяют более точно, чем модели простейших потоков описать процессы, протекающие в современных мультисервисных инфокоммуникационных сетях.

В связи с этим возникает структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей с несколькими периодами нагрузки и с учетом самоподобного характера передаваемого трафика в сети.

Предметная постановка задачи синтеза

Проектируемая инфокоммуникационная сеть обеспечивает предоставление абонентам множества инфокоммуникационных услуг посредством соответствующих серверов. В процессе планирования данной сети необходимо определить места установки соответствующих серверов, маршруты передачи трафиков услуг для каждого из периодов и пропускные способности каналов связи.

Исходными данными при решении задачи являются:

$U = \{u_i\}$ – множество абонентов инфокоммуникационной сети;

$S = \{s_i\}$ – множество инфокоммуникационных услуг, предоставляемых в сети;

$Z = \{z_i\}$ – множество серверов инфокоммуникационных услуг;

$G = \{g_i\}$ – множество сетевых узлов.

Для каждого сервера задано множество сетевых узлов, где он может быть установлен, и затраты на его установку в этом узле:

$G_i^Z = \{g_{ij}^Z\}$ – подмножество сетевых узлов, где возможна установка сервера z_i ;

d_{ij}^Z – затраты на установку сервера z_i в сетевом узле $g_j \in G_i^Z$

Все множество сетевых узлов, где возможна установка серверов услуг, разбивается на два подмножества:

G^M – множество узлов, где возможна установка нескольких серверов инфокоммуникационных услуг;

G^S – множество узлов, где допустима установка только одного сервера.

В множестве сетевых узлов задано подмножество узлов $R \subset G$, которые могут выполнять функции коммутации (в этих узлах установлено коммутационное оборудование).

Топология сети считается известной с известным местоположением абонентских узлов $u_i \in U$ и узлов коммутации.

$B = \{b_{ij}\}$ – множество каналов связи в инфокоммуникационной сети, которые могут использоваться для передачи трафика, образуемого при предоставлении услуг абонентам, где b_{ij} – канал связи, связывающий узлы сети g_i и g_j .

Заданными считаются удельные затраты на организацию пропускных способностей каналов с необходимым значением:

d_{ij} – удельные расходы на обеспечение пропускной способности канала связи.

Зависимость затрат на организацию пропускной способности канала связи заданной величины имеют линейную зависимость от их пропускной способности.

Трафик, передаваемый между серверами и абонентами инфокоммуникационной сети, считается известным и известны все его параметры.

По своим характеристикам трафик образует несколько периодов нагрузки. Количество таких периодов заранее известно. Для каждого периода нагрузки заданы его характеристики.

Необходимо найти:

- пропускные способности каналов связи;
- маршруты передачи трафика в сети для каждого из периодов нагрузки;
- места установки серверов.

Найденная конфигурация должна обеспечивать минимальные затраты на организацию пропускных способностей каналов связи необходимой величины и на установку серверов в сетевых узлах, при условии, что среднесетевая задержка не превысит допустимой величины.

Метод решения подзадачи выбора мест установки серверов и маршрутов передачи трафиков

Планируемая инфокоммуникационная система обладает наложенной структурой. Согласно общей методике синтеза с применением моделей в виде многослойного графа, необходимо выделить интересующие нас слои. В данном случае к таким слоям, представленным наложенными сетями, можно отнести:

- слой телекоммуникационной сети, которая обеспечивает передачу трафика возникающего при предоставлении в сети инфокоммуникационных услуг;

– совокупность слоев, каждый из которых отвечает инфокоммуникационной услуге, а их количество равно количеству услуг, предоставляемых в проектируемой инфокоммуникационной сети.

Далее каждый из слоев описываем графом, который соответствует данной наложенной сети. Так, граф слоя телекоммуникационной сети $\Gamma^N = (V^N, E^N)$ описывает топологию телекоммуникационной сети. Вершины данного графа соответствуют сетевым узлам:

$$g_i \Leftrightarrow v_i^N, \quad \forall g_i \in G, v_i^N \in V^N. \quad (1)$$

Ребра $e_{ij}^N = (v_i^N, v_j^N)$ графа Γ^N соответствуют каналам $b_{ij} \in B$ связи телекоммуникационной сети:

$$b_{ij} \Leftrightarrow e_{ij}^N, \quad \forall b_{ij} \in B, e_{ij}^N \in E^N, e_{ij}^N = (v_i^N, v_j^N) \quad (2)$$

Совокупность графов $\Gamma^S = \{\Gamma^s\}$ слоев инфокоммуникационной сети

$$s_i \Leftrightarrow \Gamma^i, \quad \forall s_i \in S, \Gamma^i \in \Gamma^S \quad (3)$$

содержит вершины, соответствующие абонентам и серверам инфокоммуникационных услуг, которые задействованы в предоставлении инфокоммуникационной услуги соответствующей этому слою:

$$u_i \Leftrightarrow v_i^S, v_i^S \in V^S, \quad \forall u_i \in U. \quad (4)$$

Для каждой информационной связи, которая возникает при предоставлении инфокоммуникационной услуги, в состав графов этого слоя вводятся ребра, их моделирующие.

Далее синтезируется граф $\Gamma' = (V^N, V^S, E')$, связывающий вершины слоев многослойного графа, который содержит ребра, соединяющие вершины V^N графа Γ^N с вершинами V^S графов $\{\Gamma^s\}$ и описывают местоположение абонентов соответствующих инфокоммуникационных услуг в узлах телекоммуникационной сети. Кроме этого в состав графа Γ' входят ребра, связывающие вершины V^S графа $\{\Gamma^s\}$, которые соответствуют серверам инфокоммуникационных услуг с вершинами V^N графов Γ^N , соответствующих сетевым узлам, в которых данный сервер может быть расположен.

Исходный многослойный граф MLG , который используется при решении задачи является объединением этих графов:

$$MLG = \Gamma^N \cup \left(\bigcup_{s=1}^{N_S} \Gamma^s \right), \quad N_S = |S|. \quad (5)$$

По ребрам $\{\Gamma^s\}$ пропускаем поток $\{\gamma(e_{ij}^s)\}$, величина которого равна интенсивности трафика между узлами отправитель – получатель. Решение поставленной задачи состоит в нахождении структуры многослойного подграфа MLG' минимального веса графа MLG и выборе значений пропускных способности ребер графа Γ^N , которые удовлетворяли бы ограничениям по пропускной способности ребер, структуре многослойного графа и условиям сохранения потоков в вершинах.

Потоковая модель для этого многослойного графа описывается условиями-ограничениями. Условие сохранения потока в вершинах графа:

$$\sum_j x_{ji}^{sk}(t) - \sum_j x_{ij}^{sk}(t) = \begin{cases} -x_{mn}^{sk}, & (v_i^N, v_d^S) \in E', v_d^S \Leftrightarrow \alpha_k^S; \\ x_{mn}^{sk}, & (v_i^N, v_d^S) \in E', v_d^S \Leftrightarrow \beta_k^S; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

$$\forall v_i^N \in V^N, \forall s \in S, \forall \mu_k^S \in M^S, \quad (6)$$

где $x_{ij}^{sk}(t)$ – переменная-индикатор, отображающая использование ребра $e_{ij}^N \in \Gamma^N$ для передачи k -го потока s -й услуги в направлении от v_i^N к v_j^N в период времени t ; x_{mn}^{sk} – переменная-индикатор, отображающая использование ребра $e'_{smn} = (v_m^S, v_n^N)$ для передачи k -го потока s -й услуги; α_k^S, β_k^S – узел-отправитель и узел-получатель k -го потока s -й услуги.

Условие, запрещающее передачу транзитных потоков через вершины, которые не являются маршрутизаторами в инфокоммуникационной сети:

$$\sum_s \sum_{k: (v_i^N, v_d^S) \notin E', v_d^S \Leftrightarrow \alpha_k^S} \sum_j x_{ij}^{sk} + \sum_s \sum_{k: (v_i^N, v_d^S) \notin E', v_d^S \Leftrightarrow \beta_k^S} \sum_j x_{ji}^{sk} = 0, \quad \forall v_i^N \in V^N \setminus V^R, \forall t, \quad (7)$$

Потоки могут протекать только по существующим ребрам, которые связывают слои:

$$\sum_{k: v_m^S \in \{v_\alpha^S, v_\beta^S\}, v_\alpha^S \Leftrightarrow \alpha_k^S, v_\beta^S \Leftrightarrow \beta_k^S} x_{mn}^{sk} \leq K \cdot y_{mn}^S, \quad \forall (v_m^S, v_n^N) \in E', \quad (8)$$

где y_{mn}^S – отражает вхождение ребра (v_m^S, v_n^N) в состав результирующего подграфа MLG' .

Для передачи потоков между слоями для каждой вершины v_m^S может быть использовано только одно ребро (сервер может быть установлен только в одном узле):

$$\sum_{n: (v_m^S, v_n^N) \in E'} y_{mn}^S \leq 1, \quad \forall v_m^S \in V^S. \quad (9)$$

Для узлов, где допускается установка только одного сервера, вводится ограничение

$$\sum_s \left(\sum_{m: (v_m^S, v_n^N) \in E'} y_{mn}^S \right) \leq 1, \quad \forall v_n^N \in V^A. \quad (10)$$

Потоки в ребрах $e_{ij}^N \in \Gamma^N$ и их пропускные способности должны удовлетворять условию

$$\sum_s \sum_k \lambda_k^S \cdot x_{ij}^{sk}(t) \leq c_{ij}, \quad \forall t, \forall e_{ij}^N \in E^N, \quad (11)$$

$$c_{ij} = c_{ji}, \quad \forall e_{ij}^N \in E^N. \quad (12)$$

Суммарный вес многослойного графа должен быть минимальным:

$$\sum_{e'_{mn} \in E'} d'_{sn} \cdot y_{mn}^s + \sum_{e_{ij}^N \in E^N} d_{ij} \cdot c_{ij} \rightarrow \min. \quad (13)$$

Эта задача сведена к задаче целочисленного программирования и решается с использованием программного пакета CPLEX v.12.

Метод выбора пропускных способностей каналов связи для самоподобного трафика при известном распределении потоков

Согласно общему методу решения задачи следующим этапом после нахождения местоположения серверов услуг и распределения потоков в сети является выбор пропускных способностей каналов связи с учетом самоподобного характера трафика в инфокоммуникационной сети.

Исходными данными при решении данной подзадачи являются следующие.

Дано:

$U = \{u_i\}$ – множество абонентов инфокоммуникационной сети;

$S = \{s_j\}$ – множество инфокоммуникационных услуг, предоставляемых в сети;

$Z = \{z_i\}$ – множество серверов инфокоммуникационных услуг;

$G = \{g_i\}$ – множество сетевых узлов.

Известна топология сети с известным местоположением абонентских узлов $u_i \in U$, узлов коммутации и серверов $z_i \in Z$.

$B = \{b_{ij}\}$ – множество каналов связи в инфокоммуникационной сети, которые могут использоваться для передачи трафика, образуемого при предоставлении услуг абонентам, где b_{ij} – канал связи, связывающий узлы сети g_i и g_j .

(z_i, g_j) – местоположение серверов инфокоммуникационных услуг, заданное парами соответствий сервер – сетевой узел; $z_i \Rightarrow g_j, z_i \in Z, g_j \in G_i^Z \subseteq G$.

Заданы удельные затраты на организацию пропускных способностей каналов с необходимым значением:

d_{ij} – удельные расходы на обеспечение пропускной способности канала связи.

Задано множество потоков с их характеристиками и маршрутами передачи между узлами отправитель – получатель (между абонентами и серверами и между серверами):

$M^j = \{\mu_i^j\}$ – множество трафиков, возникающих в сети предоставления услуги $s_j \in S$;

$(\alpha_i^j, \beta_i^j, \gamma_i^j, a_i^j, H_i^j)$ – набор параметров самоподобного трафика $\mu_i^j \in M^j$;

α_i^j, β_i^j – узлы получатель и отправитель для трафика μ_i^j ;

γ_i^j, a_i^j, H_i^j – интенсивность, индекс дисперсии и значение параметра Херста трафика μ_i^j ;

Необходимо определить: значения пропускных способностей каналов связи c_{ij} таким образом, чтобы среднесетевая задержка в сети не превышала заранее определенную величину T_{don} . Критерий оптимальности – минимум суммарных затрат на организацию требуемых пропускных способностей каналов связи сети.

В качестве математической модели, используемой при решении данной подзадачи, будем использовать модель сети в виде многослойного графа, синтезированного при решении предыдущей подзадачи.

Таким образом, математическую модель задачи с использованием многослойного графа можно представить следующим образом.

Задано:

MLG' – многослойный граф, описывающий структуру синтезируемой сети. Этот граф является результирующим подграфом исходного многослойного графа, найденного при решении предыдущей задачи;

$d(e_{ij}^N)$ – удельные затраты на организацию канала связи единичной пропускной способности;

$Y(t) = \{Y^l(t)\}$ – множество потоков, протекающих ребрами многослойного графа MLG' во временном интервале t ;

$(\gamma_i^j(t), a_i^j(t), H_i^j(t))$ – параметры потока, протекающего ребрами многослойного графа MLG' во временном интервале t .

Необходимо найти: $c_{ij}^N, \forall e_{ij}^N \in E^N$ – пропускные способности ребер графа, соответствующих каналам связи синтезируемой телекоммуникационной сети.

Распределение потоков и их маршруты передачи определены при решении предыдущей задачи.

Потоки, протекающие ребрами e_{ij}^N графа телекоммуникационной сети Γ^N , являются групповыми потоками, протекающими во временном интервале t , и для их моделирования применяется модель фрактального броуновского трафика [3, 4], характеризующегося набором параметров: $\lambda_{ij}^s(t)$ – интенсивность потока, бит/с; $\iota_{ij}^s(t)$ – средняя длина пакета, бит; $\xi_{ij}^s(t)$ – коэффициент дисперсии; $H_{ij}^s(t)$ – параметр Херста.

Обозначим как $\gamma_{ij}^N(t)$ поток, протекающий по ребру графа нижнего слоя. Поток γ_{ij}^N образуется в результате объединения потоков, соответствующих потокам, протекающим по ребрам верхних слоев многослойного графа. Учитывая, что найденные при решении предыдущей задачи значения переменных индикаторов $x_{ij}^{sk}(t)$ определяют маршруты протекания потоков в ребрах e_{ij}^N графа телекоммуникационной сети Γ^N , можно записать:

$$\lambda_{ij}(t) = \sum_s \sum_k \lambda_k^s(t) \cdot x_{ij}^{sk}(t) \quad (14)$$

$$H_{ij}(t) = \max_{s,k} [H_k^s(t) x_{ij}^{sk}(t)] \quad (15)$$

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\sum_s \sum_k \lambda_k^s(t) \cdot \xi_k^s(t) \cdot x_{ij}^{sk}(t)}{\sum_s \sum_k \lambda_k^s(t) \cdot x_{ij}^{sk}(t)} \quad (16)$$

Таким образом, основываясь на приведенной математической модели инфокоммуникационной системы, задачу параметрического синтеза сформулируем как оптимизационную задачу следующего вида.

Критерий оптимальности:

$$\sum_{e_{ij}^N \in E^N} d_{ij} \cdot c_{ij} \rightarrow \min . \quad (17)$$

Ограничения:

$$\frac{1}{\Lambda} \sum_{e_{ij}^N \in E^N} \left[\frac{\lambda_{ij}(t)}{c_{ij}} \left(1 + \frac{\left(\lambda_{ij}(t) \right)^{2H_{ij}(t)-1} / \left(2-2H_{ij}(t) \right) \cdot c_{ij}^{1/(2-2H_{ij}(t))}}{\left(c_{ij} - \lambda_{ij}(t) \right)^{H_{ij}(t)/(1-H_{ij}(t))}} \right) \right] \leq T_{don}, \quad \forall t; \quad (18)$$

$$\lambda_{ij}(t) = \sum_s \sum_k \lambda_k^s(t) \cdot x_{ij}^{sk}(t) \quad (19)$$

$$H_{ij}(t) = \max_{s,k} [H_k^s(t) x_{ij}^{sk}(t)] \quad (20)$$

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\sum_s \sum_k \lambda_k^s(t) \cdot \xi_k^s(t) \cdot x_{ij}^{sk}(t)}{\sum_s \sum_k \lambda_k^s(t) \cdot x_{ij}^{sk}(t)} \quad (21)$$

$$c_{ij} = c_{ji}, \quad \forall e_{ij}^N \in E^N \quad (22)$$

$$\lambda_{ij}^1(t) < c_{ij}^1, \quad \forall e_{ij}^1 \in E^1, \forall t, \quad (23)$$

Задача параметрического синтеза (17) – (23) была сведена к задаче без ограничений и решена с применением метода наискорейшего спуска, реализованного в среде MatLab.

Сопоставление результатов многопериодного синтеза с применением моделей простейшего потока и моделей самоподобного процесса

Исследования предложенного метода структурно-параметрического синтеза с несколькими периодами нагрузки проведем посредством эксперимента, цель которого – проверка целесообразности использования моделей самоподобных процессов вместо моделей простейшего потока, принятого в классической теории телетрафика.

Для этого проведем сравнительный анализ двух методов, один из которых на стадии параметрического синтеза и выбора значений пропускных способностей каналов базируется на моделях простейшего потока. Второй – метод структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей, который использует модели самоподобных процессов.

В эксперименте использовалась методика, предусматривающая решение задачи структурно-параметрического синтеза обоими методами при одинаковых исходных данных.

Сравнение результирующей стоимости полученной конфигурации инфокоммуникационной сети показало, что стоимость сети, синтезированная предложенным в работе методом структурно-параметрического синтеза, имеет большее значение. Это объясняется тем, что при передаче в сети трафика с эффектом самоподобия пропускные способности каналов связи должны быть больше, чем для трафика, описываемого моделями простейшего потока (трафик без эффекта самоподобия).

Полученные в результате решения задачи методом, базирующимся на классических моделях простейшего потока, значения пропускных способностей каналов связи использовались при расчете среднесетевой задержки в сети с использованием расчетных выражений для самоподобного трафика. При этом расчете использовались параметры самоподобного трафика с интенсивностями, равными интенсивностям потоков, используемых

при решении задачи структурно-параметрического синтеза методом, базирующимся на классических моделях (табл. 1).

По результатам исследования можно сделать вывод, что при использовании для решения задачи структурно-параметрического синтеза метода, базирующегося на использовании моделей простейшего потока, мы получаем значения пропускных способностей каналов связи, которые не позволяют получить конфигурацию инфокоммуникационной сети, удовлетворяющей требованиям по среднесетевой задержке для случая, если в сети будет передаваться трафик с эффектом самоподобия. Это объясняется тем, что применение классических моделей выдает оптимистическую оценку задержки пакетов в узлах сети и, как результат, занижает необходимое значение производительности узлов и пропускных способностей каналов связи.

Таблица 1

Вариант набора исходных данных	$\bar{T}_{доп}$, мс	$\bar{T}_{п.м.}$, мс	$\bar{T}_{с.м.}$, мс
1	8,8	10,3	8,7
2	4,9	6,1	4,8
3	2,0	2,3	2,0
4	7,2	8,6	7,1
5	2,9	3,4	2,9
6	3,5	4,0	3,5

Полученные в результате эксперимента результаты и выводы дают в некоторой степени ожидаемый результат: увеличение пропускных способностей каналов связи, с одной стороны, позволяет передавать трафик с большей интенсивностью, а с другой стороны – увеличивает затраты на строительство сети. Поэтому возникает интерес к исследованию конфигураций сети с одинаковыми стоимостями.

Следует обратить внимание, что применение обоих методов приводило к тому, что структура (топология и размещение серверов) сети была одинаковой и одинаковыми были распределения потоков в сети. Это объясняется тем, что в обоих случаях в результате декомпозиции решаемой задачи использовался метод, который не зависит от используемой модели трафика в сети. В этом случае для уравнивания стоимостей сети весь избыток средств можно направить на увеличение пропускных способностей каналов связи. В проводимом эксперименте мы для конфигурации, полученной методом, базирующимся на классических моделях, пропорционально увеличили пропускные способности каналов связи.

Полученная после увеличения пропускных способностей каналов связи конфигурация сети использовалась для расчета среднесетевой задержки с использованием как моделей простейшего потока, так и моделей самоподобных процессов.

Сравнительный анализ среднесетевых задержек (табл. 2) показал, что увеличение пропускных способностей, как и ожидалось, привело к уменьшению среднесетевой задержки в случае передачи через сеть трафика без эффекта самоподобия. В то же время, в случае передачи в сети самоподобного трафика среднесетевая задержка в конфигурации сети, синтезированной с применением классических моделей с их дальнейшим пропорциональным увеличением, была на 5 – 13 % больше среднесетевой задержки, чем в сети, синтезированной предложенным методом.

Таблица 2

Вариант набора исходных данных	\bar{T} , мс	$\bar{T}_{п.м.}$, мс	$\bar{T}_{с.м.}$, мс	Выигрыш, %
1	8,8	9,0	8,4	7,1
2	4,9	5,2	4,6	13,0
3	2,0	2,1	1,9	5,3

4	7,2	7,3	6,9	5,8
5	2,9	3,0	2,8	7,3
6	3,5	3,7	3,3	12,1

Выводы

1. Представление структуры инфокоммуникационной сети в виде модели многослойного графа позволяет повысить эффективность решения задач синтеза и описать систему как единый целостный объект.

2. Применение модели трафика в инфокоммуникационной сети в виде модели самоподобного процесса позволяет более точно описать характеристики современного трафика.

3. В качестве модели групповых потоков в инфокоммуникационных сетях целесообразно использовать модель фрактального броуновского движения.

4. Усовершенствован метод многопериодного параметрического синтеза инфокоммуникационной сети за счет использования моделей потоков как самоподобных процессов.

По результатам сравнительного анализа установлено, что многопериодный синтез, по сравнению с однопериодным, позволяет получить структуру инфокоммуникационной сети в среднем на 10 % процентов меньшей стоимости при удовлетворении одинаковых значений ограничений на среднесетевую задержку. Также использование предложенного метода позволило уменьшить среднее время задержки на 7 – 14 % по сравнению с методами, которые базируются на пуассоновских процессах.

Список литературы: 1. *Pióro M. Routing, flow, and capacity design in communication and computer networks / M. Pióro, D. Medhi. – San Francisco : Morgan Kaufmann, 2004. – 765 p.* 2. *Leland W. E. Self-similarity in high-speed packet traffic: analysis and modeling of Ethernet traffic measurements / W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, D. V. Wilson // Statistical Science. – 1995. – Vol. 10. – P. 67–85.* 3. *Norros I. A Storage Model with Self-Similar Input // Queueing Syst. – 1994. – Vol. 16, No 3–4. – P. 387–396.* 4. *Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks // Sel. Areas Commun. IEEE J. – 1995. – Vol. 13, No 6. – P. 953–962.*

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 21.10.2016