

АНАЛИТИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ С ТОПОЛОГИЕЙ MESH

Т. М. Татарникова^а, доктор техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: высокий потенциал технологии беспроводных телекоммуникационных сетей с топологией mesh делает актуальной задачу моделирования таких mesh-сетей в целях оценки качества их функционирования. Самоорганизующаяся архитектура обеспечивает живучесть mesh-сети, т. е. выполнение основных функций по доставке данных при потере отдельных элементов сети. **Цель:** разработка аналитико-статистической модели оценки живучести телекоммуникационных сетей с топологией mesh. **Результаты:** предложена имитационная модель, реализующая аналитико-статистический подход к оценке живучести телекоммуникационной сети с топологией mesh, где количественным показателем выбрана вероятность установления соединения, а качественным показателем — предоставление связи абонентам сети в течение заданного интервала времени, начиная с момента поступления вызова. Учитывая условия, соответствующие реальному процессу установления соединения в mesh-сети: динамическую маршрутизацию, скачки сетевой нагрузки, потерю отдельных элементов сети, — разработанная модель позволяет оценить время установления соединения и в зависимости от полученного результата выполнить подбор технических параметров для обеспечения допустимого времени установления соединения при соблюдении вероятности гарантированной доставки вызова. **Практическая значимость:** модель может найти применение при построении mesh-сетей с заданными характеристиками качества функционирования.

Ключевые слова — беспроводные телекоммуникационные сети, топология mesh, живучесть сети, установление соединения в сети, транзит, виртуальный канал, статистическое моделирование, имитационная модель, эксперимент на модели.

Введение

Развитие технологий беспроводной передачи данных повлияло в настоящее время на распространение телекоммуникационных сетей с топологией mesh (англ. *mesh* — петля, ячейка сети, отверстие сита), или mesh-сетей [1].

Mesh-сеть — это телекоммуникационная сеть с децентрализованным управлением, в которой беспроводные устройства объединяются многочисленными соединениями, образующими ячеистую топологию. Отличительной особенностью mesh-сети является самоорганизующаяся архитектура, что позволяет реализовать следующие возможности [2]:

- создание зон сплошного информационного покрытия большой площади;
- масштабируемость сети, т. е. увеличение площади зоны покрытия и плотности информационных потоков в режиме самоорганизации;
- использование беспроводных транспортных каналов для связи точек доступа в режиме «каждый с каждым»;
- устойчивость сети к потере отдельных элементов.

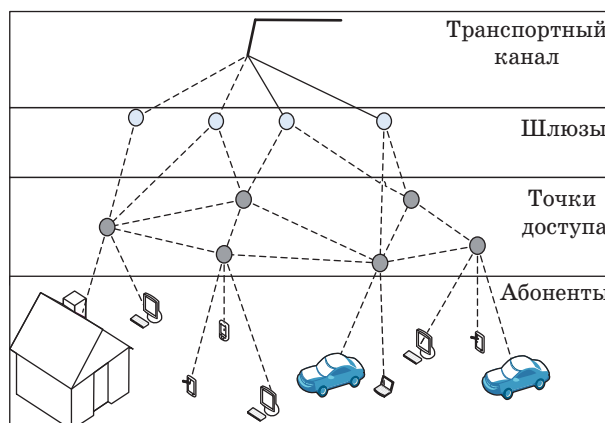
Эти возможности обеспечивают живучесть mesh-сетей. Также немаловажным фактором, обусловившим их быстрое распространение, является стоимость развертывания mesh-сетей, которая может быть значительно меньше стоимости традиционных проводных сетей, поскольку для

этого не требуется наличие дорогостоящей инфраструктуры и прокладка кабеля.

Высокий потенциал технологии, который отмечают специалисты, делает актуальной задачу моделирования mesh-сетей в целях оценки их живучести и производительности.

Общая характеристика mesh-сетей

Общий вид структурной организации mesh-сети показан на рис. 1. Сеть строится как совокупность кластеров, на которые разделяется



■ **Рис. 1.** Общий вид структурной организации mesh-сети: ----- — проводной канал связи; ————— — беспроводной канал связи

территория покрытия, количество кластеров теоретически не ограничено. В одном кластере размещается от восьми до 16 узловых точек доступа. Одна из таких точек является шлюзом [3] и подключается к магистральному информационному каналу с помощью оптического либо электрического кабеля или по радиоканалу с использованием систем широкополосного доступа.

Точки доступа в кластере соединяются между собой по радиоканалу. В зависимости от конкретного решения точки доступа могут выполнять либо функции только маршрутизатора для других узлов сети, либо функции маршрутизатора и абонентской точки доступа. Протоколы, реализующие функции транспортировки в mesh-сети, основаны на создании таблицы абонентов сети с контролем состояния транспортного канала и поддержкой динамической маршрутизации, что позволяет каждой точке доступа отправлять трафик по оптимальному маршруту между соседними точками [4]. При отказе какой-либо из них происходит автоматическое перенаправление трафика по другому маршруту, что гарантирует не просто доставку трафика адресату, а доставку за минимальное время. В условиях резких скачков нагрузки как внутри сети, так и на ее границах перераспределение трафика может решаться установкой новых точек доступа в пределах кластера, интеграция которых в существующую сеть происходит автоматически. Добавлением в сеть новых маршрутизаторов увеличивают зону покрытия. Таким образом выполняется масштабирование mesh-сети.

Недостаток mesh-сетей заключается в том, что использование промежуточных узловых точек может вызвать недопустимую задержку передачи данных и, как следствие, снизить качество трафика реального времени, например речи или видео. Вследствие этого существуют ограничения на количество точек доступа в одном кластере.

В статье предлагается аналитико-статистический подход к оценке живучести mesh-сети. Живучесть сети обеспечивается установлением соединения между узловыми точками, несмотря на отказы отдельных элементов сети [5]. Предлагаемая модель позволяет оценить время установления соединения и благодаря этому выполнить подбор необходимых технических параметров для обеспечения допустимого времени установления соединения при соблюдении вероятности гарантированной доставки вызова. Модель позволяет учесть динамическую маршрутизацию, скачки сетевой нагрузки, потерю отдельных элементов сети, — те условия, которые соответствуют реальному процессу установления соединения в mesh-сети.

Модель оценки живучести mesh-сети

Установление требуемого соединения в сети, несмотря на отказы отдельных ее элементов, позволяет сохранять работоспособность, т. е. обеспечивает живучесть. Для оценки живучести телекоммуникационной сети с топологией mesh количественным показателем может служить вероятность установления соединения при поступлении соответствующего вызова [6]. На качественном уровне живучесть отражает возможность сети предоставлять связь абонентам в течение заданного интервала времени, начиная с момента поступления вызова. В основном эта характеристика зависит от принятой системы назначения маршрутов и плотности информационных потоков [7].

Процесс установления соединения — это прохождение вызова от источника к адресату по одному из множества альтернативных маршрутов, каждый из которых представляет собой виртуальный канал (ВК), построенный для последующей передачи по нему данных. Виртуальный канал состоит из транзитов (каналов), связывающих узловые точки и входящих в данный маршрут [8]. При прохождении вызова от одной узловой точки к другой транзит принимает одно из двух состояний: либо «1» — транзит занят, и вызов по нему не пройдет, либо «0» — транзит имеет канал требуемой скорости, и вызов по нему пройдет.

Повторные попытки установления соединения придают стохастичность этому процессу, так как возникают вынужденные возвращения на предыдущие узловые точки, и число транзитов, пройденных вызовом при его доставке адресату, оказывается случайным числом. Учет данного аспекта позволяет прибегнуть к имитационному моделированию для определения факта установления соединения [9].

Таким образом, время установления соединения $t_{уст}$ определим как случайную величину, которая может быть найдена выражением

$$t_{уст} = \sum_{i=1}^{n_{тр}} t_{тр_i} + \sum_{i=1}^{n_{о.тр}} t_{о.тр_i} + n_{п} t_{п}, \quad (1)$$

где $n_{тр}$ — число транзитов ВК, построенного от источника к адресату; $t_{тр_i}$ — время прохождения i -го транзита; $n_{о.тр}$ — число транзитов, на которые вызов вернулся обратно при поиске альтернативного маршрута; $t_{о.тр_i}$ — время обратного прохождения i -го транзита; $n_{п}$ — число попыток в зафиксированной реализации процесса установления соединения, в общем случае $0 \leq n_{п} < n_{доп}$, где $n_{доп}$ — допустимое число попыток при установлении соединения; $t_{п}$ — время переключения на другой маршрут (на повторную попытку).

Каждый эксперимент на имитационной модели дает реализацию трех случайных величин: $n_{\text{тр}}$, $n_{\text{о.тр}}$ и $n_{\text{п}}$, — что позволяет оценить время доставки вызова $t_{\text{уст}}$ в соответствии с выражением (1). Полученное значение $t_{\text{уст}}$ определяет результат установления соединения:

- если $t_{\text{уст}} \leq t_{\text{доп}}$, то соединение установлено;
- если $t_{\text{уст}} > t_{\text{доп}}$, то соединение установлено, но за время, превышающее допустимое, и для данных срочной доставки это имеет критическое значение, так как они могли потерять свою актуальность [10];

- если $n_{\text{п}} > n_{\text{доп}}$, то соединение не установлено.

Исходными данными для моделирования являются:

1) структурная и потоковая метрики:

- множество альтернативных ВК с характеристикой транзитов, составляющих каждый ВК: время передачи вызова по транзиту в прямом и обратном направлениях;

- значения вероятностей полной занятости транзитов;

2) ограничения, при которых должно выполняться соединение:

- допустимое время установления соединения;
- число попыток установления соединения;
- время, выделенное на повторную попытку, — переключение на другой ВК.

Имитационная модель накапливает статистики, позволяющие оценить вероятность установления соединения за время, не превышающее допустимое, а также средние и среднеквадратические значения $t_{\text{уст}}$, характеризующие процесс установления соединения в mesh-сети.

Особенности реализации имитационной модели установления соединения в mesh-сети

На всем множестве виртуальных каналов, соединяющих источник i и адресата j , производится расслоение по числу занятых транзитов c ($c = c_{\text{min}}, \dots, c_{\text{max}}$). В отдельном эксперименте разыгрывается число c номеров занятых транзитов во множестве ВК_{ij} , и на полученной реализации ВК_{ij} имитируется процесс доставки вызова адресату. По факту доставки вызова фиксируются значения $n_{\text{тр}}$, $n_{\text{о.тр}}$ и $n_{\text{п}}$. Процедура повторяется N раз. По результатам экспериментов вычисляются необходимые статистики.

Реализация количества занятых транзитов c сводится к «выбору наугад» номеров транзитов из d возможных. Очередной номер занятого транзита z определяется по формуле $z = \lceil Ud + 1 \rceil$, где U — случайное число, $U \in [0, 1]$, получаемое путем обращения к датчику случайных чисел. Скобки $\lceil \cdot \rceil$ означают округление в меньшую сторону. Транзиту c номером z присваивается «1»

во множестве альтернативных маршрутов ВК_{ij} . Процедура определения z повторяется s раз.

Задача расчета характеристик установления соединения может быть сведена к задаче оценивания математического ожидания $M\xi$ случайной величины $\xi = f(\alpha)$, причем $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_d)$ имеет закон распределения вероятностей p (т. е. $\alpha \sim p$), который известен. В данной задаче $\xi \in \{0, 1\}$, $\xi = 0$ соответствует установлению соединения, $\xi = 1$ — неустановлению соединения. Значение $M\xi = P\{\xi = 1\}$ имеет смысл вероятности неустановления соединения. Случайная величина ξ невырожденная, т. е. $0 < M\xi < 1$.

Интерпретируем случайную величину α как вектор $\alpha = (\alpha_1^v, \dots, \alpha_d^v)$, отображающий состояние транзитов, входящих в моделируемое множество альтернативных маршрутов в смысле наличия или отсутствия свободных транзитов. Случайная величина $\alpha_i^v \in \{0, 1\}$, $i = \overline{1, d}$, d — число транзитов в моделируемом множестве ВК_{ij} . Значение $\alpha_i^v = 1$ имеет смысл отсутствия свободных каналов со скоростью v в i -м транзите. Случайные величины α_i^v считаются независимыми, α имеет конечное множество значений $\alpha \in X$, $X = \{x_j; j = \overline{1, n}; n = 2^d\}$. Для нее распределение $\rho(x)$, $x \in X$ задается набором вероятностей $p(x_j) = P\{\alpha = x_j\} = p_j \geq 0$, $j = \overline{1, n}$. С учетом расслоения по c оценку $M\xi$ найдем в виде

$$\tilde{M}\xi = \sum_{c_{\text{min}}}^{c_{\text{max}}} M\xi(c), \quad (2)$$

где $\tilde{M}\xi$ — оценка вероятности неустановления соединения при наличии c транзитов, не проводящих вызов.

Оценка $\tilde{M}\xi$ находится методом равнозначного моделирования [2].

Для задания состояний $\text{ВК}_{ij}(c)$ на k -м розыгрыше применяем случайный выбор номеров не проводящих транзитов c . В результате вектор α получает конкретную реализацию x , содержащую c единиц и $(d - c)$ нулей. В соответствии с правилом прохождения вызова по множеству альтернативных путей ВК_{ij} и правилом установления соединения вычисляется значение

$$\xi(x|c)_k = f[\text{ВК}_{ij}^k],$$

где $\xi(x|c)_k$ — исход доставки (недоставки) вызова при k -м испытании (k -й реализации ВК_{ij}), $\xi(x|c)_k \in [0, 1]$, и вероятность полученной реализации

$$p(x) = p[\text{ВК}_{ij}^{(k)}].$$

Значение $\xi(x|c)_k = 1$ имеет место, если вызов не дошел до адресата (все ВК из множества альтернативных маршрутов оказались непродвигавшимися).

ми), либо число попыток превысило допустимое значение, либо вызов дошел до адресата и установлено соединение, но за время $t_{уст} > t_{доп}$.

Оценка вероятности неустановления соединения между парой станций (i, j) при c непроводящих транзитах во множестве всех $ВК_{ij}^{(k)}$ определяется в виде

$$\tilde{M}\xi(c) = \frac{C_d^c}{N_{2c}} \sum_{k=1}^{N_{2c}} p(ВК_{ij}^{(k)} | \xi(x|c) = 1),$$

где N_c — число разыгранных состояний (реализаций) множества $ВК_{ij}$.

Вероятность $p(ВК_{ij}^{(k)})$ рассчитывается по формуле

$$p(ВК_{ij}^{(k)}) = \prod_{i=1}^h p(\alpha_i = 1) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{d-h} [1 - p(\alpha_i = 1)].$$

Вероятности $p(\alpha_i = 1), i = \overline{1, d}$ заданы при решении задачи распределения потоков.

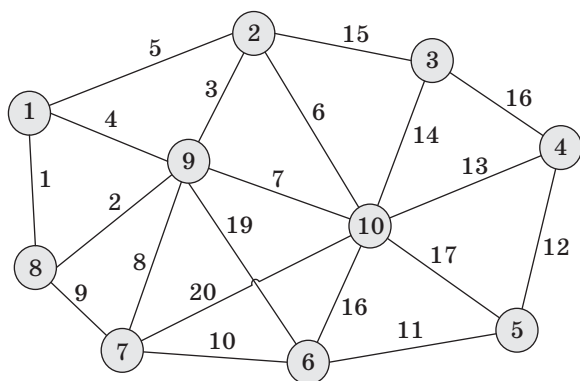
Окончательная оценка вероятности неустановления соединения между парой станций (i, j) примет вид

$$\tilde{M}\xi = \sum_{c=c_{\min}}^{c_{\max}} \frac{C_d^c}{N_c} \sum_{k=1}^{N_c} p(ВК_{ij}^{(k)} | \xi(x|c) = 1). \quad (3)$$

Таким образом, выражение (3) полностью отражает вероятностный подход к определению живучести mesh-сети.

Эксперимент на модели

Представим некоторые результаты проведенного эксперимента на модели, демонстрирующие возможности предлагаемой аналитико-статистической модели оценки живучести сетей с топологией mesh. Эксперимент проведен на сети, топологическая структура которой показана на рис. 2.



■ Рис. 2. Топология mesh-сети

Заданы следующие параметры, характеризующие узловые точки и каналы связи:

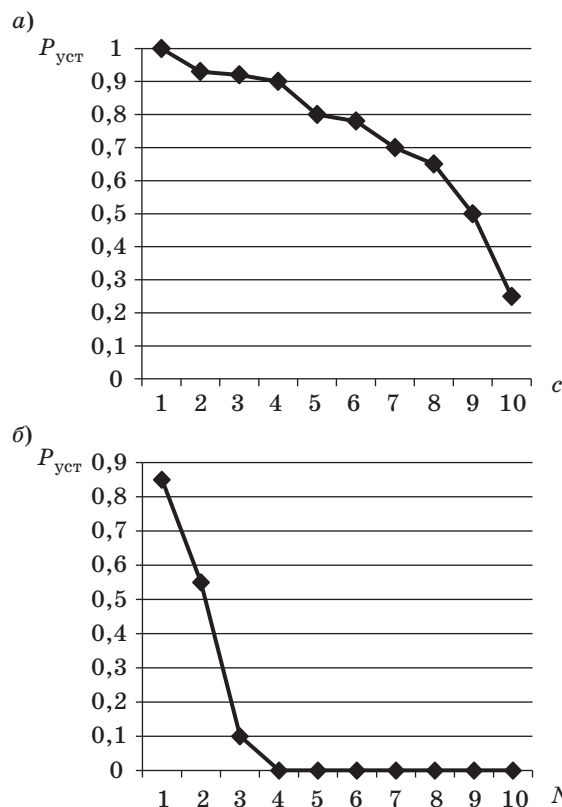
- вероятность отказа узловой точки — 10^{-3} ;
- пропускная способность канала связи — 9600 бод;
- вероятность отказа канала связи — $5 \cdot 10^{-3}$;
- время прохождения i -го транзита $t_{тр_i}$ — 0,5 мс;
- время прохождения i -го транзита в режиме «обратной волны» $t_{о.тр_i}$ — 0,7 мс;
- время переключения на другой маршрут $t_{п}$ — 10^{-2} мс;
- допустимое время на установление соединения $t_{доп}$ — 50 мс;
- количество экспериментов — 100.

Построим зависимости вероятности установления соединения $P_{уст}$ и времени установления соединения $\bar{t}_{уст}$ от количества:

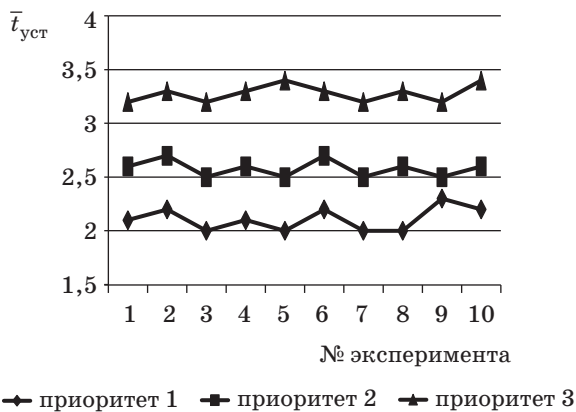
- закрытых транзитов c ;
- закрытых узловых точек N ;
- попыток $n_{п}$.

Собранные в результате моделирования статистики позволяют построить важные зависимости, характеризующие живучесть mesh-сети.

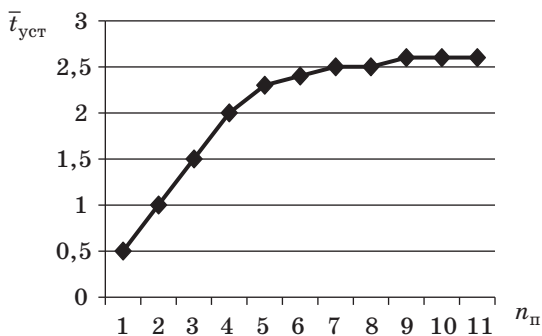
Зависимости вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов и от числа закрытых узловых точек представлены



■ Рис. 3. Зависимость вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов (а) и закрытых узловых точек (б)



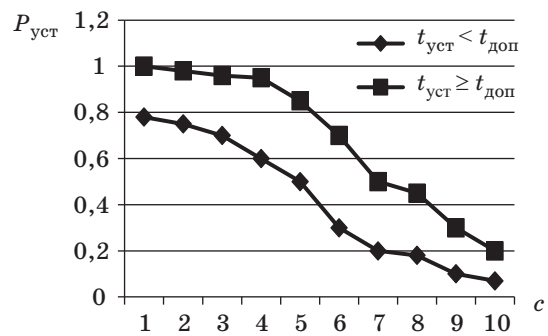
■ Рис. 4. Зависимость времени установления соединения от приоритета отправки вызова



■ Рис. 5. Зависимость времени установления соединения от количества попыток поиска альтернативного маршрута

на рис. 3, а и б соответственно, результаты получены при $n_{п} = 3$ и $c = 3$. Очевидно, что вероятность установления соединения снижается с увеличением количества неработоспособных транзитов и узловых точек. Таким образом, из множества альтернативных маршрутов необходимо выбрать тот, который гарантирует установление соединения за допустимое время. Для этого администратору надо изменить приоритет отправки. В имитационной модели такая возможность предусмотрена. На рис. 4 приведен пример того, что для различных приоритетов отправки время доставки вызова будет разным. Естественно, что при установлении соединения необходимо выстраивать оптимальный маршрут, но если он занят или не работает, то необходимо иметь возможность назначить другой маршрут, может быть, худший по времени, но с гарантией установления соединения.

Зависимость времени установления соединения от количества попыток приведена на рис. 5. Очевидно, что чем больше возможностей на повторный поиск альтернативных маршрутов, тем больше значение $\bar{t}_{уст}$. Однако при количестве



■ Рис. 6. Зависимость вероятности и условной вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов

отказавших транзитов, равном трем, увеличение количества рестартов уже не влияет на время доставки, так как, видимо, такое количество рестартов достаточно, чтобы найти альтернативный путь доставки пакета. Такая возможность, представленная в имитационной модели, позволяет определить количество необходимых попыток при известном количестве потерянных элементов сети.

В модели также предусмотрена возможность менять допустимое время доставки вызова, и по результатам эксперимента рекомендовать его значение при соблюдении требуемой вероятности установления соединения. Для некоторых видов трафика такая характеристика имеет большое значение, и имитационная модель позволяет оценить условную вероятность (вероятность установления соединения при условии, что время доставки меньше допустимого). Графики на рис. 6 показывают зависимость вероятности и условной вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов.

Заключение

Предложенная вероятностная модель установления соединения между источником и адресатом в mesh-сети является инструментом, с помощью которого можно решать задачу оценки живучести сети. Модель позволяет определить время установления соединения при известной топологии сети. Также для обеспечения допустимого времени установления соединения при соблюдении вероятности гарантированной доставки вызова модель дает возможность определить технические параметры mesh-сети. В модели учтены условия, соответствующие реальному процессу установления соединения: наличие неработоспособных каналов и точек доступа, ограниченное количество повторных попыток установления соединений, наличие альтернативных маршрутов.

Литература

1. Вишнеvский В. В., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия Wi-Max. Путь к 4G. — М.: Техносфера, 2009. — 471 с.
2. Осипов И. Е. Mesh-сети: технологии, приложения, оборудование// Технологии и средства связи. 2006. № 4. С. 38–45.
3. Татарникова Т. М. Структурный синтез центра сопряжения корпоративных сетей // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 92–98. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.92
4. Кутузов О. И., Сергеев В. Г., Татарникова Т. М. Коммутаторы в корпоративных сетях. Моделирование и расчет. — СПб.: Судостроение, 2003. — 170 с.
5. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Golubev I. Y. Optimization and the Process of Task Distribution between Computer System Clusters//Automatic Control and Computer Sciences. 2012. N 3. P. 103–111.
6. Татарникова Т. М., Яготинцева Н. В. Оценка функциональной надежности корабельной сети передачи данных//Известия вузов. Приборостроение. Т. 57. 2014. № 9. С. 62–66.
7. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. — СПб.: Питер, 2016. — 992 с.
8. Tanenbaum A., Wetherall D. Computer Networks. 5th ed. — Prentice Hall, 2010. — 960 p.
9. Кутузов О. И., Татарникова Т. М. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций: учеб. пособие. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 134 с.
10. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В. Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени//Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 4. С. 46–48.

UDC 004.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.17

Analytical-Statistical Model of Mesh Network Survivability Evaluation

Tatarnikova T. M.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, tm-tatarn@yandex.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Modeling wireless telecommunication networks with mesh topology in order to assess the quality of their operation is an important problem. Self-organizing architecture provides the survivability of a mesh network, making sure that the basic functions of data delivery are still supported even when individual network elements are lost. **Purpose:** The goal is to develop an analytical-statistical model to assess the survivability of telecommunication networks with mesh topology. **Results:** A simulation model is proposed which implements an analytical-statistical approach to the assessment of survivability of a telecommunications network with mesh topology. The quantitative criterion is the connection establishment probability, and the qualitative criterion is providing the network to the subscribers within a given time interval starting from the moment the call was received. Taking into account the real conditions in a mesh network (dynamic routing, abrupt changes in the network load, loss of individual network elements), the proposed model allows you to estimate the time of connection establishment and, depending on the result, to choose technical parameters in order to provide an acceptable connection establishment time and a certain probability of guaranteed call delivery. **Practical relevance:** The model can be used to build mesh networks with specified characteristics of their functioning quality.

Keywords — Wireless Telecommunication Networks, Mesh Topology, Network Survivability, Network Connection, Transit, Virtual Channel, Statistical Modeling, Simulation Model, Model Experiment.

References

1. Vishnevskij V. V., Portnoj S. L., Shahnovich I. V. *Entsiklopediia Wi-Max. Put' k 4G* [Encyclopedia of Wi-Max. Path to 4G]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009. 471 p. (In Russian).
2. Osipov I. E. Mesh-Networks: Technology, Applications, Equipment. *Tekhnologii i sredstva svyazi*, 2006, no. 4, pp. 38–45 (In Russian).
3. Tatarnikova T. M. Structural Synthesis of an Interface Center for Corporate Networks. *Informatsionno-upravlyayushhie systemy* [Information and Control System], 2015, no. 3, pp. 92–98 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.92
4. Kutuzov O. I., Sergeev V. G., Tatarnikova T. M. *Kommutatory v korporativnykh setiakh. Modelirovanie i raschet* [Switches in Corporate Networks. Modeling and Calculation]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2003. 170 p. (In Russian).
5. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Golubev I. Y. Optimization and the Process of Task Distribution between Computer System Clusters. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2012, no. 3, pp. 103–111.
6. Tatarnikova T. M., Yagotintseva N. V. Evaluation of Functional Reliability of Shipboard Network. *Izvestiia vuzov. Priboroostroenie*, 2014, no. 9, pp. 62–66 (In Russian).
7. Olfier V., Olfier N. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2016. 992 p. (In Russian).
8. Tanenbaum A., Wetherall D. *Computer Networks*. 5th ed. Prentice Hall, 2010. 960 p.
9. Kutuzov O. I., Tatarnikova T. M. *Modelirovanie sistem i setei telekommunikatsii* [Simulation of Systems and Telecommunications Networks]. Saint-Petersburg, RGGMU Publ., 2012. 134 p. (In Russian).
10. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. Evaluation of Reliability Performance Cluster Real-Time Query. *Izvestiia vuzov. Priboroostroenie*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 46–48 (In Russian).