

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СЕТЕВЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ GRID-СИСТЕМ

ТИМОФЕЕВ А.В., ДИМИТРИЧЕНКО Д.П.

УДК 004.896, 519.716.325

Тимофеев А.В., Димитриченко Д.П. Многокритериальная оценка сетевых топологических структур для моделирования и проектирования GRID-систем.

Аннотация. Для многокритериальной оценки базовых топологических структур и фрактальных архитектур интегрированных GRID-систем и телекоммуникационных сетей обоснованы и формализованы основные показатели качества. Описаны результаты сравнительного анализа фрактальных и мультифрактальных архитектур распределенных GRID-систем по критериям надежности, стоимости и пропускной способности.

Ключевые слова: GRID-система, критерий качества, сетевые топологические структуры, фрактальные архитектуры, многокритериальная оценка, сравнительный анализ.

Timofeev A.V., Dimitrichenko D.P. Multi-criteria evaluation for network topological structures for GRID-systems modeling and design.

Abstract. For multi-criteria evaluation for basic topological structures and fractal structures of GRID-systems and telecommunication networks of new generation basic quality predicates have been proved and formalized. The results of comparative analysis for fractal and multi-fractal architectures of distributed GRID-systems by criteria of reliability, cost and bandwidth have been described.

Keywords: GRID-system, quality criterion, network topological structures, fractal architectures, multi-criteria evaluation, comparative analysis.

Введение. В настоящее время в мире происходит бурное развитие новой компьютерной технологии, называемой GRID (Грид). Суть этой технологии заключается в объединении географически распределенных и гетерогенных по составу компьютерных кластеров и локальных сетей в единую глобальную GRID-инфраструктуру, обеспечивающую вместе со связанной с ней глобальной телекоммуникационной сетью (ТКС) простой, надежный, совместимый по программному обеспечению, быстрый и безопасный доступ к этим распределенным информационно-вычислительным ресурсам [1–3].

Уже сегодня GRID-технологии применяются для решения задач в самых разных фундаментальных и прикладных направлениях развития науки — в физике высоких энергий и космофизике, в генетике, микробиологии и медицине, в метеорологии и океанографии, в робототехнике и авиастроении, а также в целом ряде других наукоемких и инновационных областей [2]. В ближайшей перспективе развитие этой GRID-технологии позволит создать принципиально новый интегрированный информационный, вычислительный и телекоммуникационный инст-

румент для применения в самых разных сферах человеческой деятельности. Специалисты считают [1–3], что GRID-технологии и ТКС нового поколения способны произвести такую же революцию в области распределенной вычислительной обработки и удаленного доступа к большим объемам данных, какую мировая сеть Internet произвела в информационной и в вычислительной сфере и в области развития телекоммуникаций в последние десятилетия.

Отличительной чертой GRID-технологии является тот факт, что географически распределенные и разрозненные ресурсы не имеют общего централизованного управления, а их скоординированное использование организует сама GRID-система. Поэтому GRID-системы строятся на базе стандартных и открытых протоколов, сервисов и интерфейсов [3]. Однако существуют значительные различия между понятием «технология GRID» и конкретными подходами к ее реализации и развитию.

GRID-технология включает в себя лишь наиболее общие и универсальные аспекты, одинаковые для любой подобной системы, характеризующейся своей архитектурой, протоколами, интерфейсами и сервисами. Используя эту технологию и наполняя ее конкретным содержанием, можно реализовать GRID-систему, предназначенную для решения того или иного класса научных и прикладных задач.

Однако хорошо известно, что информационная инфраструктура крупных государственных учреждений (таких, как РАН и РАМН, корпорации и предприятия) включает в себя десятки и сотни серверов, компьютерных кластеров и локальных сетей. Сегодня, несмотря на то, что производительность компьютерных систем удваивается каждые полтора года, по мере усложнения решаемых вычислительных задач и возрастания объемов обрабатываемых данных, все острее ощущается дефицит вычислительных, информационных и телекоммуникационных ресурсов [3–6].

Перегруженность сетевых ресурсов нередко связана с неравномерным распределением нагрузки: в то время, когда часть компьютеров простаивает в течение длительного периода времени, другая часть функционирует в пиковом режиме [6]. Поэтому возникает необходимость в разработке современных ТКС, обеспечивающих эффективный доступ внешних агентов-пользователей к распределенным информационным и вычислительным ресурсам GRID-среды.

1. Развитие GRID-технологий и уточнение термина GRID-система. Концепция GRID-технологий появилась еще в конце 1960-х гг. Ее рождение и развитие, как и огромное число других информа-

ционных технологий и интеллектуальных инноваций, многие годы было связано с фундаментальными научными исследованиями.

Проблема рационального использования свободных ресурсов компьютеров была особенно актуальна 20–40 лет назад, когда для построения и исследования сложных математических моделей и вычислительных методов были нужны мощности суперкомпьютерных центров, которых тогда в мире было совсем немного. На начальном этапе эта задача технически решалась довольно просто, поскольку речь шла о разовых вычислительных заданиях большой сложности без очень жестких требований по срокам их реализации.

Термин «GRID» возник еще в середине 1990-х гг. и стал обозначать распределенную вычислительную инфраструктуру для сложных инженерных и научных расчетов. Постоянный прогресс в этой области, а также настойчивый поиск решений все новых классов задач привели к расширению этого понятия. В настоящее время концепция GRID (название предложено по аналогии с электрическими сетями — electric power grid) состоит прежде всего в глобальной интеграции (агрегации) распределенных вычислительных и информационных ресурсов. Примерами таких ресурсов в GRID-средах являются:

- 1) вычислительные ресурсы;
- 2) системы хранения данных (БД, БЗ, нейронные сети и т. п.);
- 3) электронные каталоги информационных ресурсов.

Важную роль для предоставления пользователям этих распределенных GRID-ресурсов играют ТКС нового поколения.

Все ресурсы в GRID-системах и ТКС могут быть разделены на физические и логические.

К физическим распределенным ресурсам в GRID-системах и ТКС прежде всего относятся:

- 1) оперативная память,
- 2) память на долговременных носителях,
- 3) количество процессоров,
- 4) количество коммутаторов и маршрутизаторов.

Примерами логических ресурсов в распределенных GRID-системах и глобальных ТКС являются:

- 1) распределенная файловая система;
- 2) компьютерные кластеры;
- 3) распределенные пулы (временная интеграция по договору) компьютеров;
- 4) локальные компьютерные сети.

Одно из ранних определений понятия GRID дано в 1998 г. К. Кессельманом и Я. Фостером (считающимися отцами GRID-технологии). Согласно этому определению, «вычислительный GRID является программно-аппаратной инфраструктурой, которая обеспечивает надежный, совместимый, повсеместный и недорогой доступ к вычислительным ресурсам большой мощности». В 2000 г. к этому определению добавилось следующий принцип GRID-систем: «координированное распределение ресурсов и решение проблем в динамических виртуальных организациях».

По предложению Я. Фостера, систему можно называть GRID, если она реализует следующие функции (операции):

— координирует распределенные ресурсы, которые не контролируются централизованно. Необходимость в такой координации возникает, например, в тех случаях, когда объединяются компьютерные системы, находящиеся в разных организациях или в разных административных единицах одной компании. При этом GRID-система должна решать вопросы политики доступа, безопасности, оплаты услуг и т. д., которые возникают в гетерогенных компьютерных сетях. (В ином случае можно рассматривать централизованные иерархические или локально управляемые компьютерные системы);

— задействует открытые или стандартные протоколы и интерфейсы общего назначения. Обычно эти протоколы и интерфейсы используются для решения таких базовых вопросов, как аутентификация, авторизация, поиск ресурсов и доступ к ним. Если протоколы не являются стандартными или открытыми, компьютерная система является специализированной в отношении приложения;

— предоставляет новое качество услуг.

Объединяя различные ресурсы, GRID позволяет предоставить новый уровень сервиса с точки зрения времени отклика, пропускной способности, доступности, безопасности и т. д. Иными словами, польза от всей GRID-системы существенно больше, чем от простой суммы составляющих ее частей.

Исходя из этих признаков и функций, под определение GRID-систем не включают компьютерные кластерные системы (кластеры). Дело в том, что эти кластеры (после их инсталляции) обеспечивают заданный уровень безопасности, качества обслуживания и т. п. Однако они не являются GRID-системами из-за полного контроля над индивидуальными компонентами и скорее подходят под определение локальных сетей с централизованным управлением. Кроме того, мировая сеть Internet, в которой доступ к распределенным системам обеспечивается

с помощью стандартизованных и открытых протоколов, не может называться GRID-системой, так как ресурсы в ней не используются координированно.

Таким образом, GRID-технология воплощает в себе идею включения компьютеров (а также подсетей и кластеров) разного типа в единую распределенную информационно-вычислительную систему с современными средствами телекоммуникаций для удаленного использования ресурсов с целью повышения общей производительности и масштабируемости и предоставления внешним агентам-пользователям возможности коллективной работы с распределенными программными системами и данными.

В GRID-среде пользователи и приложения работают не с множеством компьютеров, а с единой интегрированной GRID-системой и ТКС, не с набором дисков, на которых хранятся файлы и базы данных, а с единой виртуальной областью хранения информации, которая образуется из отдельных носителей распределенных программ и массивов данных [6].

Разработка и внедрение GRID-систем совместно с обслуживающими их ТКС позволяют реализовать распределенные вычисления и параллельную обработку данных. GRID-технология вместе с ТКС нового поколения обеспечивают достижение принципиально новых результатов и позволяют:

- 1) оптимизировать (минимизировать) нагрузку на серверы;
- 2) создать отказоустойчивую информационно-вычислительную и телекоммуникационную среду;
- 3) обеспечить высокую степень доступности предлагаемых сервисов;
- 4) реализовать принцип предоставления ресурсов «по требованию» или по «интересам».

Сейчас интерес к GRID-системам очень высок практически во всех странах мира. Это выражается в большом количестве национальных и международных проектов, исследовательских работ и публикаций по этой тематике. Дело в том, что различные учреждения и крупные организации (такие, например, как учреждения РАН, банки, службы организационного управления и мониторинга, торговые и производственные предприятия) сами по себе имеют распределенную корпоративную структуру и нуждаются в GRID-инфраструктуре, позволяющей организовать корпоративное и межкорпоративное взаимодействие на основе современных телекоммуникаций и распределенных программных и информационных приложений.

До последнего времени ТКС и GRID-технологии опирались и развивали традиционные технологии Internet и использовали IP-протоколы. Однако сегодня в GRID-системах впервые открыто ставится задача о гарантированном качестве обслуживания внешних агентов-пользователей. В этом случае можно говорить о GRID-системах как о части Internet следующего поколения. Такие GRID-системы (в которых время взаимодействия между компьютерными узлами обычно измеряется миллисекундами и секундами), обычно не предназначены для параллельного решения задач, а нацелены по большей части на выполнение пакетных заданий, когда каждая отдельная задача выполняется целиком на одном компьютерном узле. При этом система сетевого управления GRID-системой занимается в основном диспетчеризацией (планированием операций, распределением ресурсов и т. п.) отдельных заданий, а не взаимосвязью между отдельными блоками (модулями) решаемой задачи.

Широкое применение GRID-систем стало возможным благодаря повсеместному распространению персональных компьютеров и рабочих станций, развитию мировой сети Internet и технологий пакетной передачи данных с использованием каналов связи на основе оптического волокна (SONET, SDH, ATM и т. п.), а также интеграции кластеров и локальных компьютерных сетей. Например, в локальной сети Gigabit Ethernet полоса пропускания коммуникационных средств сегодня стала достаточной для того, чтобы при необходимости привлечь ресурсы других компьютеров или кластеров.

Таким образом, основными характерными особенностями GRID-систем являются следующие признаки и свойства:

1) значительные масштабы вычислительных или информационных ресурсов. Обычно объем памяти и количество процессоров в GRID-системах многократно превосходят ресурсы отдельного компьютера, кластера или локального вычислительного комплекса;

2) гетерогенность компьютерной среды. В состав GRID-среды могут входить компьютеры, рабочие станции (PC) и серверы различной мощности, работающие под управлением различных операционных систем и собранные на различной элементной базе;

3) географически пространственное распределение информационных вычислительных ресурсов;

4) объединение (интеграция) информационных и вычислительных ресурсов, которые не могут управляться централизованно (в случае, если эти ресурсы не принадлежат одной организации);

5) использование стандартных, открытых, общедоступных протоколов и интерфейсов;

6) обеспечение информационной безопасности.

В дальнейшем под термином «GRID-система» или «GRID-среда» будем подразумевать распределенную компьютерную систему, обладающую перечисленными выше свойствами 1–6 и представляющую внешним агентам-пользователям распределенные в ней информационные и вычислительные ресурсы через ТКС.

2. Классификация и назначение GRID-систем. По своему назначению GRID-системы принято делить на вычислительные (computational GRID) и системы, ориентированные на хранение больших массивов информации (data GRID).

GRID-системы целесообразно использовать прежде всего для решения следующих научных и прикладных задач высокой сложности:

1) математическое и имитационное моделирование сложных систем и процессов;

2) совместная визуализация и динамическая анимация больших массивов и быстрых потоков научных данных;

3) распределенная обработка в целях системного анализа и кластеризации данных;

4) комплексирование научного инструментария с удаленными компьютерами и архивами данных и знаний;

5) распределенная обработка баз данных и знаний с использованием современных технологий «Data Mining» и «Knowledge Discovery».

Как показывает практика, GRID-системы наиболее эффективно используются в следующих областях:

1) распределенные высокопроизводительные вычисления;

2) решение сверхсложных задач, требующих максимальных процессорных ресурсов, памяти и быстродействия;

3) «многопоточная» обработка информации, позволяющая организовать эффективное использование основных информационно-вычислительных ресурсов с утилизацией временно простаивающих компьютеров;

4) проведение крупных разовых оптимизационных расчетов;

5) вычисления с привлечением больших объемов распределенных данных (например, в метеорологии, генетике, астрономии, физике высоких энергий);

б) распределенные коллективные вычисления, координирующие одновременное решение нескольких взаимодействующих вычислительных задач разных пользователей.

3. Базовые фрактальные архитектуры GRID-систем и глобальных ТКС нового поколения. Специфика GRID-систем и обслуживающих их ТКС нового поколения определяются прежде всего архитектурой (структурой и функциями) самой вычислительной сетевой среды, на которой они строятся. В общем случае эта среда представляет собой глобальную динамическую сеть с изменяющейся (в течение некоторого периода времени) архитектурой, т. е. с изменяющимся количеством активных вычислительных узлов (узловых компьютеров) и каналов связи между ними [5, 6].

Изменения архитектуры GRID-среды или связанной с ней глобальной ТКС происходят за счет нештатного отказа, планового выключения компьютеров или подключения новых вычислительных мощностей. Кроме того, часто возникают измерения качественных характеристик и количественных параметров интегрированной сети (изменение вычислительной нагрузки узлов или пропускной способности каналов связи и т. п.) [5].

Архитектура интегрированной вычислительной, информационной и телекоммуникационной среды определяется характеристиками сетевых топологических структур, образующих саму эту среду в виде архитектуры (топологической структуры) узловых компьютеров и каналов связи между ними. Важно отметить, что именно топологические структуры (архитектуры) компонентов GRID-систем и ТКС имеют решающее значение при системном анализе и моделировании существующих GRID-систем и ТКС, особенно при проектировании и оптимизации архитектур вновь создаваемых GRID-систем и ТКС нового поколения.

В соответствии с перечисленными выше требованиями к компьютерным и телекоммуникационным сетям как к основе для построения интегрированных GRID-систем и современных ТКС, наиболее существенными являются следующие показатели (критерии качества) [5, 6, 12]:

- 1) надежность,
- 2) стоимость,
- 3) пропускная способность.

Эти показатели (критерии) отражают наиболее важные аспекты функционирования GRID-систем и ТКС любого масштаба. Они соответственно обеспечивают:

- 1) устойчивую работоспособность GRID-систем и ТКС в целом;
- 2) экономический фактор, актуальный для заказчика или проектировщика GRID-системы и ТКС с точки зрения стоимости;
- 3) качество и быстроту обслуживания внешних агентов-абонентов существующей или вновь создаваемой GRID-системы и ТКС.

Под базовыми топологиями (архитектурами) GRID-систем и ТКС будем понимать следующие самоподобные топологические структуры (фракталы):

- 1) полную ячеистую;
- 2) кольцевую;
- 3) «Звезду»;
- 4) линейную,
- 5) смешанную структуру (мультифрактал), включающую в себя в различных сочетаниях базовые топологии 1–4.

При моделировании и прогнозировании GRID-систем и связанных с ними ТКС нового поколения важную роль играет оценка основных показателей базовых топологических структур 1–5 (фрактальных и мультифрактальных архитектур), а также их многокритериальная оптимизация.

4. Оценка надежности базовых фрактальных архитектур GRID-систем. Пусть топология сети описана неориентированным связным графом $G = G(A, R, W)$ без петель и кратных ребер. В этом графе узлам $a \in A$ соответствуют компьютеры или рабочие станции (PC), ребрам $r \in R$ — каналы связи, а их параметрам $w \in W$ — веса каналов связи.

Требуется оценить базовые топологические структуры (масштабируемые фрактальные архитектуры) графа G по показателю (критерию) надежности.

Сетевой граф G называется однофрактальным или фрактальным, если состоит из топологических структур только одного из четырех указанных типов, различающихся масштабом, т. е. значениями параметров (весов) каналов связи. Аналогично, сетевой граф G называется мультифрактальным, если он имеет смешанную топологическую структуру (архитектуру) и составлен из базовых топологических структур различного масштаба.

Под надежностью сети будем понимать сохранение связности графа (работоспособности GRID-сети или ТКС) при удалении (выходе из строя) какого-либо ребра или узла. По критерию надежности могут оцениваться и сети в целом, и их физические компоненты: компьюте-

ры или рабочие станции (РС), каналы связи, маршрутизаторы или коммуникационные устройства (КУ).

Очевидно, что самыми «ненадежными» в этом смысле следует считать те узлы, которые являются точками сочленения графа G , т. е. узлы графа (РС или КУ сети), удаление (выход из строя) которых (со всеми соответствующими им ребрами) приведет к нарушению связности графа G , т. е. к «падению» сети.

Аналогично, самыми «ненадежными» следует считать те ребра графа G , которые являются «мостами» графа G , т. е. ребрами, удаление которых также приведет к нарушению связности графа G .

Важно отметить, что одной из вершин «моста» (для количества узлов графа больше двух) всегда является точка сочленения (но не наоборот). Поэтому, если исключить из рассмотрения точки сочленения со всеми соответствующими им ребрами, то можно исключить и «мосты».

Простой алгоритм нахождения точек сочленения графа G , основанный на методе «поиска в глубину» описан, например, в работе [7].

Пусть $N = |A|$ — количество узлов графа G , соответствующих только отдельным персональным компьютерам или РС, p_i — степень i -го узла, i — номер узла графа G .

Рассмотрим следующий аддитивный функционал, определяющий интегральную характеристику графа G :

$$\sigma = \sum_{i=1}^N k_i, \text{ где } \begin{cases} k_i = 0, & \text{если } i \text{ — точка сочленения,} \\ k_i = p_i, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Очевидно, что чем больше точек сочленения («мостов»), тем меньше σ , и, наоборот, чем больше степени вершин p_i , тем больше σ .

Максимальная степень p_{\max} , которую может иметь узел графа G определяется по формуле $p_{\max} = N - 1$ (в силу заявленных свойств графа G). Следовательно, значение функционала (1) будет максимальным, когда в графе G отсутствуют точки сочленения и $k_i = p_i = N - 1$ для всех i , т. е.

$$\sigma = \sum_{i=1}^N k_i = \sum_{i=1}^N (N - 1) = N(N - 1). \quad (2)$$

В этом случае сетевой граф G является полносвязным.

Топология, описываемая таким графом, называется полной ячеистой топологией. Ей соответствует масштабируемый полный ячеистый фрактал GRID-сети или ТКС.

GRID-сети или ТКС, основанные на такой топологии, характеризуются высокой надежностью и чрезвычайно устойчивы к сбоям и отказам (выходу из строя) узловых компьютеров или каналов связи.

Для данного числа N узлов графа G введем следующий критерий (показатель) надежности сети:

$$B = \frac{\sigma}{N(N-1)}. \quad (3)$$

Поскольку $p_i > 0$, для всех i , $S > 0$ и $\sigma \leq N(N-1)$, то $B \in (0,1]$.

Оценим показатель (критерий) надежности для фрактальных GRID-сетей или ТКС, основанных на одной из следующих четырех базовых топологий (фрактальных архитектур):

1. *Полная ячеистая топология.* Поскольку $\sigma = \sum_{i=1}^N k_i = N(N-1)$, то

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N(N-1)} = \frac{N(N-1)}{N(N-1)} = 1. \quad (4)$$

2. *Кольцевая топология.* Поскольку $p_i = 2$ и $k_i \neq 0$ для всех i , то

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N(N-1)} = \frac{\sum_{i=1}^N 2}{N(N-1)} = \frac{2N}{N(N-1)} = \frac{2}{N-1}. \quad (5)$$

3. *Топология «Звезда».* Поскольку существует j , такой, что $k_j = 0$ и $p_i = 1$, $i = 1, \dots, j-1, j+1, \dots, N+1$, то

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{N+1} k_i}{N(N+1)} = \frac{\sum_{i=1}^N 1}{N(N+1)} = \frac{N}{N(N+1)} = \frac{1}{N+1}. \quad (6)$$

Здесь «лишний» узел играет роль центрального концентратора.

4. *Линейная топология.* Поскольку $k_i = 0$, $i = 2, \dots, N-1$, $p_1 = p_N = 1$, то

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N(N-1)} = \frac{2}{N(N-1)}. \quad (7)$$

Сравнивая критерии (показатели) надежности (4)–(7) для базовых топологий 1–4, приходим к выводу, что для данного N сеть, основанная на линейной топологии, является самой ненадежной. Действительно, если последовательно соединить между собой N компьютеров, то разрыв одного из соединяющих каналов связи (например, кабеля) приведет к «падению» (отказу) всей сети.

Полученные оценки надежности фрактальных сетей, основанных на любой из базовых топологий, кроме полноячейистой, свидетельствуют о том, что архитектуры таких сетей становятся все менее надежными при увеличении числа РС в сети. Действительно, для показателей надежности (5)–(7) имеем

$$B \rightarrow 0 \text{ при } N \rightarrow \infty.$$

Особенно характерен этот вывод для одноранговых сетей, когда уже для сравнительно небольших N (порядка 30–40 РС) сеть становится практически неработоспособной.

5. Оценка стоимости базовых фрактальных архитектур. Для оценки стоимости типовых топологических структур GRID-сетей или ТКС нужно знать ценовые соотношения между различными составляющими сети (РС, КУ и каналами связи). При этом стоимость базовых архитектур сети существенно зависит от общей протяженности каналов связи, т. е. от масштаба сети.

Для оценки стоимости базовых топологий сети полезно ввести следующие дополнительные данные (хотя бы в относительном виде):

— координаты сети (возможен ввод любых относительных числовых координат в плоской прямоугольной декартовой системе координат);

— стоимости ребер (пропорциональные длине каналов связи) и узлов (РС или КУ).

При этом достаточно, чтобы значения стоимостей ребер и узлов в сетевом графе отражали их реальные соотношения в GRID-сети или ТКС. Заметим также, что в дальнейшем стоимости узлов (РС или КУ) не потребуются, поскольку интегральная оценка стоимости производится для заданного количества N сетевых узлов (РС или КУ).

Зная координаты узлов сети, легко определить расстояния между ними. Будем считать, что длины соответствующих линий связи совпадают с этими расстояниями, т. е. длина линии связи между любыми двумя узлами u и v равна кратчайшему расстоянию между ними и в этом смысле совпадает с длиной линии связи (u, v) .

Если же геометрия распределения узлов сети такова, что узлы сети невозможно разместить в прямоугольной системе координат с совпадением всех расстояний (в смысле длин ребер между ними), то достаточно будет просто «взвесить» ребра соответствующими значениями их «длин».

Теперь можно сказать, что минимальной по стоимости для данного количества N узлов (РС или КУ) будет та сетевая топология, суммарная длина линий связи (сумма длин ребер на графе G) которой будет минимальна. Граф, описывающий такую топологию, несложно построить, воспользовавшись известным в теории графов методом определения «остова минимального веса» Прима-Краскала [8].

Введем следующие обозначения и соотношения:

C_{\min} — минимальная стоимость базовой топологии (из четырех рассматриваемых топологических структур), описываемой графом, построенным по методу Прима-Краскала для данного количества узлов (РС или КУ);

C_e — стоимость оцениваемой топологии для данного количества N узлов (РС или КУ).

Очевидно, что

$$C_{\min} \leq C_e \quad (8)$$

для любой базовой топологии.

Стоимость C_e будем вычислять по простой и очевидной формуле:

$$C_e = \sum_{j=1}^M c_{l_j} + \sum_{k=1}^N c_{h_k} . \quad (9)$$

Здесь $M = |R|$ — количество каналов связи, $N = |A|$ — количество узлов (РС или КУ) в сети, c_{l_j} и c_{h_k} — стоимость j -й линии связи и k -го узла в сетевом графе G соответственно.

Тогда относительная (относительно минимальной по стоимости C_{\min} топологии) оценка стоимости сети, основанная на исследуемой топологии для данного количества N узлов (РС или КУ) с учетом введенных выше дополнительных данных, будет иметь вид:

$$C = \frac{C_{\min}}{C_e} . \quad (10)$$

Так как $0 < C_{\min} \leq C_e$, то $C \in (0,1]$. При этом чем больше C , тем меньше стоимость сети и ее топология по данному критерию более предпочтительна (оптимальна).

6. Оценка пропускной способности базовых фрактальных архитектур. Пусть топология сети описывается неориентированным графом G без петель и кратных ребер. Требуется получить относительную (относительно других базовых топологий) оценку пропускной способности сети.

Прежде всего следует заметить, что пропускная способность сети во многом определяется характеристиками используемого коммуникационного оборудования. Так, например, в локальных сетях (особенно в одноранговых) на компьютерах абонентов, через которых пытаются выйти на другие ресурсы, наблюдается падение производительности. Однако действительно существенным это падение является в том случае, когда РС и/или соответствующий ей канал связи лежат на единственном пути, по ту и другую сторону от которого находятся другие РС, т. е. применительно к графовому представлению являются точкой сочленения и «мостом» соответственно. Понятно, что на РС в этом случае ложится серьезная нагрузка, и она, не справляясь с потоком данных, вынуждена перераспределять ресурсы в пользу обеспечения собственной работоспособности. Поэтому пропускная способность на этом участке существенно снижается.

Если в качестве узла рассматривается не РС, а КУ (например, концентратор), то этот узел ведет себя несколько иначе. Он ограничивает пропускную способность на заранее определенное значение, практически не меняющееся с ростом количества N РС. Однако концентратор имеет ограничение на это количество РС.

Таким образом, для оценки пропускной способности сети требуются следующие дополнительные данные:

— максимальное количество РС, которые могут быть подключены к концентратору;

— ограничение на пропускную способность концентратора (максимальное значение пропускной способности, которую он в состоянии обеспечить);

— пропускная способность каналов связи.

(Будем далее исходить из предположения об однородности передающей среды, в которой используется один и тот же тип кабеля с заданными физическими характеристиками.)

Оценим значения нагрузок на РС, являющиеся точками сочленения. Предположим, что каждое такое значение пропорционально ко-

личеству всевозможных пар РС, единственные пути которых друг к другу проходят через данную точку сочленения. Зная точки сочленения, определенные при оценке надежности сети, и немного иначе задавая начальную матрицу в алгоритме Флойда поиска кратчайших путей [9], нетрудно определить все эти пары и их общее количество.

Предположим также, что нагрузка ограничивает пропускную способность сети на данном участке, т. е. пропускные способности соответствующих точке сочленения ребер уменьшаются в d раз, где d — нагрузка точки сочленения. Тогда получаем равномерное распределение нагрузки на участке каждой точки сочленения. В случае, когда эти участки соприкасаются (а это имеет место, когда две точки сочленения соединены «мостом»), то общая нагрузка на «мост» возрастает. Полученная картина характеризует пропускную способность фрактальной сети, основанной на рассматриваемой базовой топологии в предположении, что пропускные способности всех каналов связи были одинаковы.

Теперь решим следующую вспомогательную задачу: найдем путь между каждой парой узлов графа G , такой, что пропускная способность ребра с наименьшей пропускной способностью максимальна. Такая задача в теории графов называется задачей об «узких местах». Она может быть решена методом Флойда или методом Данцига [9]. При этом для каждой пары узлов находится наиболее быстрый (а значит, оптимальный) с точки зрения передачи информации в сети путь (маршрут). Определяющей на этом пути будет именно наименьшая пропускная способность, ограничивающая остальные.

Отношение минимальной пропускной способности на пути между узлами i и j и количества каналов связи, лежащих между этими узлами, назовем задержкой для данной пары узлов. Среднеарифметическое задержек всех пар узлов (РС) назовем задержкой сети.

Очевидно, что наименьшей задержкой сети обладает архитектура сети G , основанная на полной ячеистой топологии. При этом чем меньше задержка сети, тем больше ее пропускная способность.

Тогда относительная (относительно полной ячеистой топологии) оценка пропускной способности Ω сети G при сделанных допущениях и для данного количества узловых РС будет определяться по следующей формуле:

$$\Omega = \frac{\Omega_e}{\Omega_{fc}}. \quad (11)$$

Здесь Ω_e — пропускная способность исследуемой базовой топологии (фрактальной архитектуры), вычисляемая по следующей формуле

$$\Omega_e = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\Omega_{\min_{ij}}}{D_{ij}}. \quad (12)$$

Здесь Ω_{fc} — пропускная способность полной ячеистой топологии, вычисляемая аналогичным образом, N — количество узловых РС в сети; $\Omega_{\min_{ij}}$ — минимальная пропускная способность пути из i в j ; D_{ij} — количество промежуточных каналов связи кратчайшего пути (оптимального маршрута) между узлами i и j .

7. Сравнительный анализ базовых и смешанных фрактальных архитектур по трем критериям. Поскольку топологическая структура (фрактальная архитектура) сети не всегда соответствует одной из рассмотренных выше четырех базовых структур, то определим еще один класс топологических структур, а именно: «смешанную сетевую топологическую структуру». Этому классу соответствует мультифрактальная архитектура интегрированной GRID-системы и ТКС нового поколения

Оценки трех показателей (критериев качества) для пяти основных сетевых архитектур получены и представлены в таблице. Они получены по формулам (1)–(12) при следующих предположениях: для сравнительного анализа четырех базовых и одной смешанной топологии сетевого графа G число узлов (РС или КУ) $N = 6$, а ребра (каналы связи) имеют одинаковую пропускную способность и совпадают по длине.

Оценки трех показателей для пяти основных сетевых архитектур

| Топология | Надежность | Стоимость | Пропускная способность |
|---------------|------------|-----------|------------------------|
| Полноячеистая | 1.0000 | 0.3333 | 1.0000 |
| Звезда | 0.2000 | 0.8333 | 0.5000 |
| Кольцо | 0.0000 | 0.8333 | 0.4567 |
| Линейная | 0.0667 | 1.0000 | 0.5800 |
| Смешанная | 0.2000 | 0.8333 | 0.7222 |

Таким образом, для сравнительного анализа были выделены пять основных сетевых топологических структур, определяющих фрактальные и мультифрактальные архитектуры интегрированных GRID-

систем и ТКС нового поколения. При этом были рассмотрены наиболее актуальные сетевые показатели (критерии) надежности, стоимости и пропускной способности.

Высокая надежность архитектур (топологических структур) позволит GRID-системе и ТКС сохранять устойчивую работоспособность.

Максимальная пропускная способность сравниваемых архитектур обеспечит GRID-системе и ТКС наилучшую передачу пакетов данных, актуальных для каждого из активных узлов (PC или КУ).

Критерий стоимости в ряде случаев является менее важным показателем, поскольку GRID-системы и ТКС обычно строятся на основе уже функционирующих (ранее построенных или приобретенных) сетей. Однако если речь идет о стоимости телекоммуникационного обслуживания сетевой GRID-системы в целом или же о покупке нового сетевого оборудования для построения GRID-системы, то этот критерий окажется полезным и значимым.

Заключение. Таким образом, проведенный сравнительный анализ базовых фрактальных и мульти-фрактальных архитектур интегрированных GRID-системы и ТКС нового поколения позволяет дать их многокритериальную оценку по показателям надежности, стоимости и пропускной способности. Для многокритериальной оптимизации этих архитектур можно использовать методы, описанные в работах [7–12].

Литература

1. *Foster I.* The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure. Morgan Kaufmann Publishers.
2. *Isard M., Budiу M., Yu Y., Birrell A. et al.* Dryad: Distributed Data-Parallel Programs from Sequential Building Blocks // European Conf. on Computer Systems (EuroSys), Lisbon, Portugal, March 21–23, 2007.
3. *Foster I.* Service-Oriented Science // Science. 2005, 308(5723). P. 814–817.
4. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
5. *Тимофеев А.В.* Мульти-агентные системы управления региональными телекоммуникационными сетями // Материалы Междунар. конф. «Моделирование устойчивого регионального развития (МУРР–2007)». Нальчик, 2007. С. 45–50.
6. *Сырцев А.В., Тимофеев А.В.* Модели и методы маршрутизации потоков данных в телекоммуникационных системах с изменяющейся динамикой. М.: Новые технологии, 2006, 85 с.
7. *Горбатов В.А.* Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика. М.: Наука. Физматлит, 2000, 554 с.
8. *Асанов М.О., Баранский В. А., Расин В.В.* Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001, 288 с.
9. *Майника Э.* Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. Мир, 1981. 323 с.

10. *Лютикова Л.А., Тимофеев А.В., Сзурев В.В., Йоцов В.И.* Развитие и применение многозначных логик и сетевых потоков в интеллектуальных системах // Тр. СПИИРАН. 2005. Вып. 2. С. 114–126.
11. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981. 208 с.
12. *Тимофеев А.В., Димитриченко Д.П.* Модели и методы многокритериальной оптимизации альтернатив // Тр. СПИИРАН. 2008. Вып. 7. С. 182–194.

Тимофеев Адиль Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией информационных технологий в управлении и робототехники Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: теория оптимального, робастного, адаптивного, интеллектуального и нейронного управления роботами, мехатронными и аэрокосмическими системами; модели виртуальной реальности и оптимизация баз знаний; теория полиномиальных и гетерогенных нейронных сетей с самоорганизующейся архитектурой; методы синтеза многозначных решающих правил минимальной сложности для распознавания образов и диагностики состояний; модели генетического кода и генно-нейронных сетей; мульти-агентные системы и технологии навигации, управления и интеллектуального анализа потоков информации в робототехнических, компьютерных, телекоммуникационных и GRID-сетях. Число научных публикаций — 570. tav@iias.spb.su, <http://www.spiiras.nw.ru/files/litur/index.html>; СПИИРАН, 14-я линия, д.39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-0421, факс +7(812)328-4450.

Timofeev Adil Vasilievich — Dr.Sc., Prof., the Head of the Laboratory for Information Technologies in Control and Robotics of Institution of Russian Academy of Sciences Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS). Research interests: theory of optimal, robust, adaptive, intelligent and neural control for robots, mechatronic and aerospace systems; virtual reality models and knowledge base optimization; theory for polynomial and heterogeneous neural networks with self-organizing architecture; methods for synthesis of multi-value decision rules of minimal complexity for pattern recognition and state diagnostics; models of genetic code and gene-neural networks; multi-agent systems and technologies for navigation, control and intelligent analysis for information flows in robotic, computer, telecommunication and GRID-networks. The number of publications — 570. tav@iias.spb.su, <http://www.spiiras.nw.ru/files/litur/index.html>; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., Saint-Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0421, fax +7(812)328-4450.

Димитриченко Дмитрий Павлович — научный сотрудник НИИ прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра РАН, соискатель Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: оптимизация моделей телекоммуникационных и GRID-сетей, структура и архитектура телекоммуникационных и GRID-сетей нового поколения. Число научных публикаций — 20. dimdp@rambler.ru, <http://www.kbsu.ru>. ул. Шортанова, д.89-А, г. Нальчик, 360000, Кабардино-Балкарская Республика, Россия. Тел. (8662)42-3062. Факс: (8662)42-2387.

Dimitrichenko Dmitry Pavlovich — scientist of Research Institute for Applied Mathematics and Automation of Kabardian-Balkarian Scientific Centre of RAS, applicant for Ph.D. of Institution of Russian Academy of Sciences Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS). Research interest: optimization for models of telecommunication and GRID-networks, structure and architecture for telecommunication and GRID-

networks of new generation. The number of publications — 20. dimdp@rambler.ru, <http://www.kbsu.ru>; 89-A, Shortanova str., Nachik, 360000, Republic of Kabardino-Balkaria, Russia; office phone +7(8662)42-3062, fax +7(8662)42-2387.

Поддержка исследований. Работа выполнена при частичной поддержке Программы № 1 Президиума РАН и грантов РФФИ № 08-08-12183-офи и № 09-08-00767-а.

Рекомендовано лабораторией информационных технологий в управлении и робототехнике, зав. Лаб. А.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

Статья поступила в редакцию 8.12.2009.

РЕФЕРАТ

Тимофеев А.В., Дмитриченко Д.П. **Многокритериальная оценка сетевых топологических структур для моделирования и проектирования GRID-систем.**

Для многокритериальной оценки базовых топологических структур и фрактальных архитектур интегрированных GRID-систем и телекоммуникационных сетей обоснованы и формализованы основные показатели качества. Описаны результаты сравнительного анализа фрактальных и мультифрактальных архитектур распределенных GRID-систем по критериям надежности, стоимости и пропускной способности. Рассмотрены тенденции развития GRID-технологий и их интеграции с современными телекоммуникационными сетями (ТКС). Описаны базовые фрактальные архитектуры интегрированных GRID-систем и глобальных ТКС нового поколения. Получены оценки надежности, стоимости и пропускной способности базовых фрактальных архитектур GRID-систем. Проведенный сравнительный анализ базовых фрактальных и смешанных мульти-фрактальных архитектур интегрированных GRID-системы и ТКС нового поколения позволяет поставить и решить задачи многокритериальной оптимизации этих архитектур.

ISUMMARY

Timofeev A.V., Dimitrichenko D.P. **Multi-criteria evaluation for network topological structures for GRID-systems modeling and design.**

For multi-criteria evaluation for basic topological structures and fractal structures of GRID-systems and telecommunication networks of new generation basic quality predicates have been proved and formalized. The results of comparative analysis for fractal and multi-fractal architectures of distributed GRID-systems by criteria of reliability, cost and bandwidth have been described. Tendencies for development of GRID-technologies and their integration into modern telecommunication networks (TCN) have been shown. Basic fractal architectures of integrated GRID-systems and global TCN of new generation have been described. Evaluations of reliability, cost and bandwidth of basic fractal architectures of GRID-systems have been obtained. Elaborated comparative analysis of basic fractal and mixed multi-fractal architectures of integrated GRID-systems and TCN of new generation enables to set and solve problem for multi-criteria optimization of their architectures.