

МОДЕЛЬ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ P2P СЕТИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

П.П. Шурховецкий

Марийский государственный технический университет
Россия, 424024, Йошкар-Ола, респ. Марий Эл, пл.Ленина, 3
E-mail: petr.shurhovetski@gmail.com

Разработана система моделирования пиринговой сети, узлы которой образуют многомерное информационное пространство. Результаты экспериментов, проведённых на модели, позволяют предположить, что характеристики полученной пиринговой сетевой архитектуры позволяют применять её в системах распределённого сбора и обработки информации.

DECENTRALIZED STRUCTURED P2P NETWORK MODEL FOR A DISTRIBUTED COMPUTING / P.P. Shurhovetski (Mari State Technical University, Lenina sq. 3, Yoshkar-Ola, 424024, Russia). The modeling system for the P2P network which peers are forming the multidimensional information space was developed. The modeling results are suggests that characteristics of the peering network developed allow using it in the distributed data gathering and processing systems.

Введение. В последнее время наблюдается рост числа научных и прикладных исследований в области проектирования больших систем управления, требующих хранения, индексации и организации распределённых вычислений над большими объёмами информации. Поскольку исследования часто выполняются пространственно распределёнными группами исполнителей, то для их организации требуется применение как корпоративных, так и, в большинстве случаев, глобальных сетей. Для обеспечения прозрачного и координированного доступа к распределённым данным, в настоящий момент, широко используются различные GRID системы, основанные на стандарте Open Grid Service Architecture [1, 7]. Несмотря на большой накопленный опыт, построение GRID-систем до сих пор является достаточно сложной инструментальной и технической задачей, требующей совместной работы специалистов из различных областей, а также значительных материальных и административных затрат. Вместе с тем, существует положительный опыт [2, 3] применения для тех же крупномасштабных задач хранения и обработки информации значительно более простых систем, известных как пиринговые сети.

Пиринговые (P2P, peer-to-peer) сети – это одноранговые, преимущественно глобальные сети ЭВМ, отличительной особенностью которых является то, что каждый узел такой сети является одновременно и клиентом и сервером. Пиринговые сети получили широкое распространение в большом числе областей: распределённых вычислениях (Seti@HOME), информационном поиске (Freenet), VoIP и интернет-конференции (Skype) и многих других. Пиринговые сети способны масштабироваться практически неограниченно, но при этом их характеристики, такие как время доставки сообщения и объём порождаемого служебного трафика, ввиду однородной организации P2P сетей, несколько хуже чем у GRID систем.

Пиринговые сети подразделяются на два больших класса – централизованные (есть единый управляющий центр, Seti@HOME, BitTorrent) и децентрализованные (управляющего центра нет, Skype, Freenet, Gnutella). Централизованным сетям присущи многие фундаментальные недостатки централизованных систем в целом, поэтому они, по всей

видимости, являются тупиковой ветвью развития сетей P2P. Децентрализованные сети, в свою очередь делят на структурированные (есть ограничения на соединения между узлами, Skype, Freenet) и неструктурированные (ограничений на соединения нет, Gnutella). При этом неструктурированные пиринговые сети являются наиболее «идеальной» формой существования P2P сети, которая, теоретически, должна реализовать преимущества пиринговых сетей в полной мере. Однако, на практике, неструктурированные пиринговые сети уступают и централизованным и децентрализованным структурированным P2P сетям, что связано с ограничениями, накладываемыми современными средами передачи данных.

Децентрализованные структурированные пиринговые сети являются наиболее перспективным классом пиринговых сетей, т.к. они, среди всех остальных классов P2P, обладают наиболее полным набором преимуществ перед централизованными системами, таких как: дешевизна, масштабируемость, отказоустойчивость, анонимность и ряда других [3]. Ярким представителем это класса сетей является сеть Skype, в которую входит более 100 миллионов узлов, из которых около 10 миллионов узлов активны в каждый момент времени. При этом, в сети Skype всего один сервер, и тот выполняет чисто утилитарные функции и его отказ (правда, не слишком долговременный) не станет критичным для работы сети. Однако, сети Skype в частности и децентрализованным пиринговым сетям в целом присущи два важных недостатка: большая латентность сети L_{cp} (~100 раз, ~10 сек.) и большой объём служебного трафика V_{cp} (~100 раз, ~1-10 Гб), по сравнению с централизованными P2P сетями. Основной причиной возникновения данных недостатков – это проблемы с организацией оптимальной маршрутизации, возникающие в условиях неопределённости, диктуемых современными средами передачи данных (сетью Интернет, в частности). Это значительно затрудняет их внедрение в качестве программной платформы для распределённых систем и в настоящее время представляет существенную проблему [3].

Так как P2P сети используют для передачи данных сеть Интернет, локальные или корпоративные сети, которые в свою очередь, являются сетями протокола IP, который, опять же, с некоторой натяжкой, является частью модели OSI, имеет смысл обозначить то, на каких уровнях OSI функционируют пиринговые сети. Обычно, P2P сети работают на прикладном уровне, над транспортным уровнем модели OSI, который соответствует уровню UDP/TCP стека протоколов TCP/IP. Таким образом, в дальнейшем под связями между узлами сети, если это не оговорено особо, всегда будут пониматься логические связи (транспортный уровень OSI), которые никак не завязаны на структуру физических линий связей между узлами.

Устранение найденных при анализе недостатков децентрализованных сетей возможно с помощью организации особой структуры логических связей между узлами. В частности, в основу предлагаемой архитектуры P2P сети легла идея об организации узлов в информационное пространство, которое представляет собой d -мерное пространство, оси которого соответствуют определённым характеристикам узлов (объём ОЗУ, тактовая частота ЦП и т.д.), и в котором каждый узел имеет, таким образом, свои соответствующие координаты [4]. Затем, узлы выстраивают логические связи друг с другом способом таким, что в информационном пространстве образуется многомерная ячеистая структура. Такой подход к организации P2P сети даёт несколько преимуществ. Во-первых, свойства структуры сети таковы, что соответствующие характеристики узлов линейно изменяются при движении вдоль соответствующим координатным осям информационного пространства, что позволяет значительно оптимизировать процесс маршрутизации. Во-вторых, такая организация сети позволяет применять пассивные алгоритмы обнаружения ошибок в структуре сети (на прикладном уровне OSI), которые, в отличие от активных алгоритмов, не требуют для своей работы дополнительных объёмов трафика. В-третьих, предлагаемая организация узлов в сети способствует равномерной загрузке узлов сети трафиком, что положительным образом сказывается на стабильности работы P2P сети и повышает ей отказоустойчивость.

Для того, чтобы подтвердить целесообразность применения предложенной архитектуры пиринговой сети на практике, нами была разработана модель такой сети и программная

система имитационного моделирования сети (включает прикладной и транспортный уровни OSI).

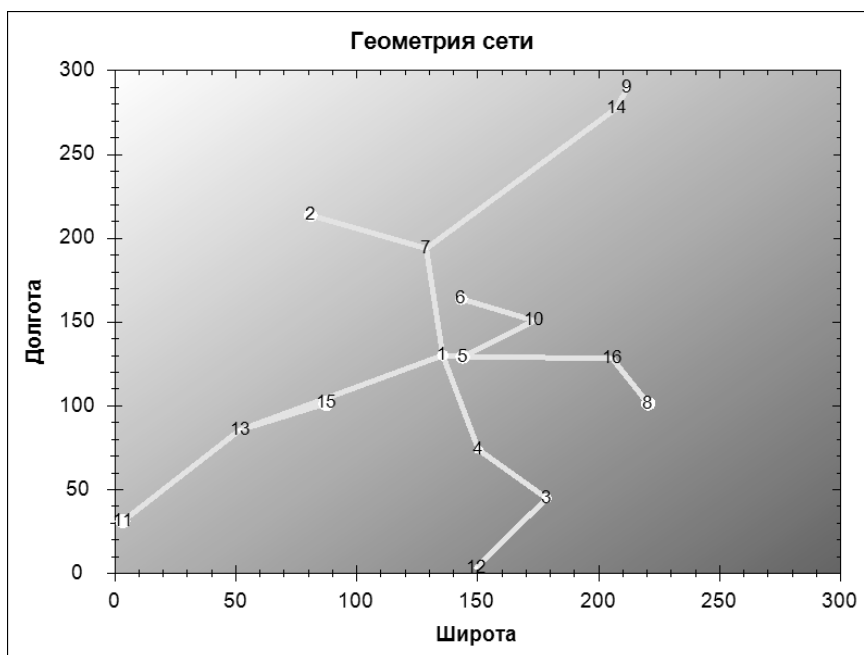


Рис.1. Расположение городов на земной поверхности.

Цель работы. Целью работы является создание и исследование формальной модели децентрализованной структурированной пиринговой сети, которая адекватна предложенной нами архитектуре сети, т.е. с достаточной точностью воплощает те идеи и принципы, которые были заложены нами в основу сети.

Система моделирования P2P сети. На вход системы моделирования подаются параметры инициализации моделируемой P2P сети – число узлов и т.д. (см. описание подсистемы ввода исходных данных). На выходе системы моделирования формируются:

- кривые различных зависимостей (времени доставки сообщения от узла к узлу в зависимости от географического расстояния между узлами, в зависимости от расстояния в информационном пространстве и пр.);
- отображение расположения городов и магистральных линий связи между ними в географическом пространстве;
- отображение расположения узлов в информационном пространстве (2х- или 3х-мерном), связей между узлами и состояния узлов;
- пошаговое отображение процесса передачи пакета внутри информационного пространства сети (2х-мерного);
- снимки состояния информационного пространства (расположение узлов в информационном пространстве, связи между узлами и их состояние в произвольный момент времени).

Обоснование адекватности системы моделирования разработанной архитектуре P2P сети основывается на том, что существенным элементам моделируемых систем реального мира и разработанной архитектуры P2P сети соответствуют соответствующие элементы системы моделирования [8]. С целью оценки достоверности работы данных подсистем, подсистема тестирования реализует набор блочных и комплексных тестов, которые проверяют работу подсистемы моделирования среды передачи данных (погрешность при моделировании временных характеристик среды передачи данных) и подсистемы моделирования работы узла (соответствие поведения модели узла предполагаемому в различных ситуациях).

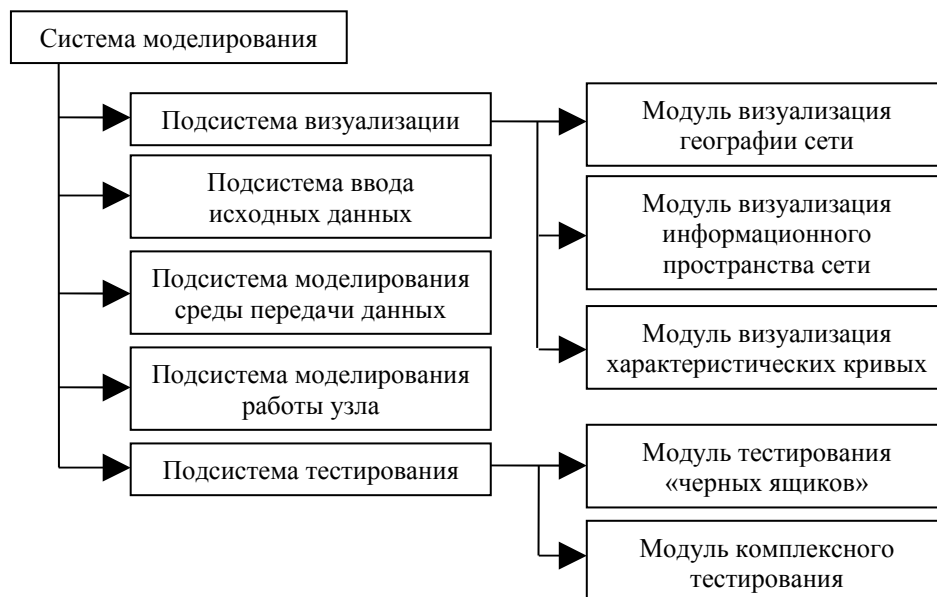


Рис. 2. Структура системы моделирования.

На самом верхнем уровне, разработанная система моделирования состоит из следующих крупных подсистем:

- подсистемы ввода исходных данных,
- подсистемы моделирования среды передачи данных,
- подсистемы моделирования работы узла,
- подсистемы визуализации,
- подсистемы тестирования.

Подсистема ввода исходных данных осуществляет на основе входных данных инициализацию географической модели сети, которая описывает размещение узлов на земной поверхности и инициализацию параметров узлов, таких как пропускная способность, вычислительные ресурсы и прочее. К входным данным относятся:

1. p_n - число узлов сети;
2. d - размерность информационного пространства сети;
3. $I_c = f_d(i)$ - функция распределения координат узлов в информационном пространстве, где I_c является d -мерным вектором координат в информационном пространстве и i номер узла;
4. a_{lat}, a_{lon} - ширина и долгота участка земной поверхности по которой распределены узлы в километрах;
5. c_n - число городов;
6. c_{min}, c_{max} - минимальный и максимальный радиусы городов в километрах;
7. ε - коэффициент простоя, соотношение времени простоя узла в миллисекундах к времени работы узла в миллисекундах (под простоем понимается ситуация, когда узел «выпадает» из сети по каким-либо причинам – отключение питания, обрыв связи и тому подобное); если моделирование простоя узлов не требуется, то $\varepsilon = 0$;
8. t_i - время проведения эксперимента в миллисекундах.

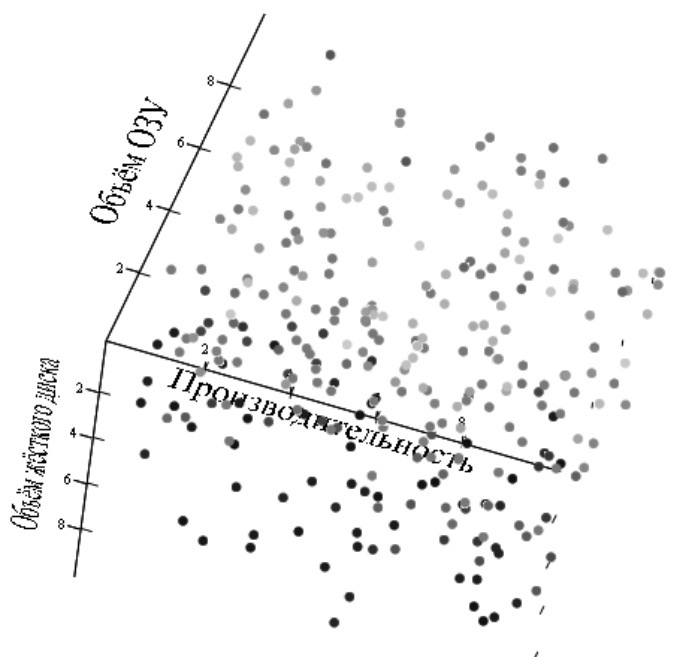


Рис. 3. Расположение узлов в информационном пространстве.

Выходными данными являются модель географического расположения узлов сети и параметры узлов, к которым относятся:

1. $C = (c_0, c_1, \dots, c_{c_n-1})$ - вектор городов, каждый из которых характеризуется широтой c_i^{lat} , долготой c_i^{lon} и радиусом c_i^r в километрах;
2. C_{adj} - таблица смежности городов, отражает расположение междугородних магистральных линий связи;
3. $P = (p_0, p_1, \dots, p_{p_n-1})$ - вектор узлов, каждый из которых характеризуется d -мерным вектором p_i^c координат узла в информационном пространстве и индексом города p_i^{city} , в котором этот узел находится.

На рис. 1 представлена отображение расположения городов сети в географическом пространстве на участке земной поверхности широтой и долготой в 300 км, 16-ю городами радиусом от 1 км до 7 км. Жёлтыми линиями обозначены магистральные линии связи между городами. На рис. 2 представлено информационное пространство P2P сети для распределённых вычислений, видны оси «Объём ОЗУ», «Объём жесткого диска» и «Производительность», видно, что каждый узел сети имеет в данной модели свои координаты, непосредственно определяемые соответствующими его характеристиками.

Подсистема моделирования среды передачи данных воспроизводит работу компонентов локальных и глобальных IP-сетей, таких как роутеры, мосты-концентраторы, оптоволоконные и «медные» линии связи для обеспечения взаимодействия между узлами сети внутри системы моделирования. Входными данными для этой подсистемы являются:

1. географическая модель сети, составленная из вектора городов C и таблицы смежности C_{adj} ;
2. C_m - список таблиц маршрутизации для каждого города со строкой вида (ip, c_{id}, h) , где ip - адрес узла назначения, c_{id} - идентификатор маршрутизатора в направлении которого можно передать пакет для доставки и h - число передач, которое понадобится для доставки пакета узлу с адресом ip , если передать данный пакет в направлении c_{id} ;

3. многокомпонентный вектор пакета $M = (i_f, i_t, s)$, который необходимо доставить, здесь i_f - индекс узла-отправителя, i_t - индекс узла-получателя, s - размер пакета.

К выходным данным для данной подсистемы относятся:

1. время доставки сообщения в миллисекундах t_d от отправителя к получателю, в случае, если пакет не был доставлен, это время равно нулю.

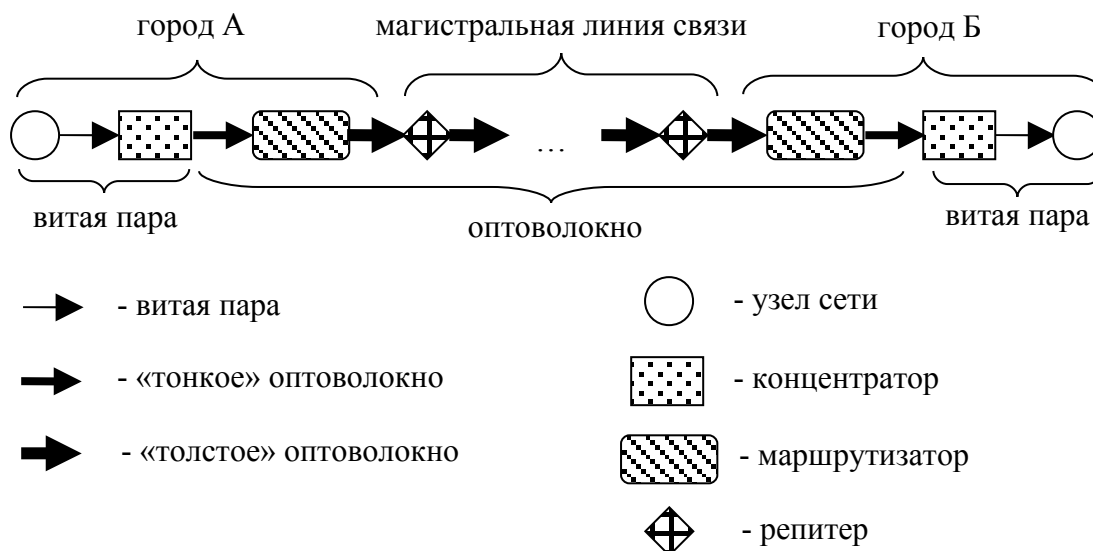


Рис. 4. Модель среды передачи данных.

В процессе работы подсистемы моделирования среды передачи данных, моделируется последовательное перемещение передаваемого пакета данных из моделируемой локальной сети провайдера сначала в оптоволоконную сеть масштаба города, а затем, если это требуется в сеть глобального масштаба. Далее, все эти этапы проходят ещё раз в обратном порядке и пакет в конечном счёте попадает во входящую очередь сообщений узла назначения (рис. 4). При моделировании среды передачи данных учитывается географическое расположение узлов в пространстве – от расстояния между узлами зависит время передачи данных и вероятность искажения передаваемых данных. Помимо этого, при моделировании учитываются временные задержки, возникающие при прохождении пакетов через сетевое оборудование (магистральные маршрутизаторы, репитеры, концентраторы, оптоволоконные и медные кабели). Всё это позволяет моделировать ситуации обрыва или перегрузки линий связи на всех уровнях – от магистральных линий до витой пары отдельного узла сети, также возможно моделирование поведения отдельно взятого маршрутизатора, что может иметь место быть, если провайдер, например, пытается фильтровать P2P трафик, что в последнее время случается довольно часто. Для моделирования характеристик оборудования и линий связи используются данные о задержках и времени распространения сигнала, взятые из соответствующих справочных материалов.

Подсистема моделирования работы узла воспроизводит работу узла P2P сети. На практике, узел сети представлен персональным компьютером, на который установлено сетевое программное обеспечение и который подключён к сети Интернет или корпоративной или локальной сети. В нашей модели, узел сети характеризуется своим положением в информационном пространстве, а также набором входящих и исходящих сетевых соединений, а также внутренним состоянием. Входными данными для подсистемы моделирования работы узла является модель узла, состояние которой может быть описано следующими параметрами:

1. $P_c = (p_c^0, p_c^1, \dots, p_c^{d-1})$ - координаты узла в информационном пространстве (рис. 3);

2. $P_{inc} = (m_{inc}^0, m_{inc}^1, \dots, m_{inc}^{k-1})$ - очередь входящих сообщений узла;
3. $P_{cont} = (R_{cont}^0, R_{cont}^1, \dots, R_{cont}^{d-1})$ - таблица соединений узла (хранит адреса узлов с которыми соединён данный узел) со строкой вида $R_{cont} = (ip, P_c, t_{in}, t_{out})$, где ip - адрес узла с которым установлена связь, P_c - абсолютные координаты узла (в информационном пространстве) с которым установлена связь и t_{in}, t_{out} - временные метки, которые хранят время последнего входящего и исходящего транзита по данному соединению соответственно;
4. $P_{src} = (R_{src}^0, R_{src}^1, \dots, R_{src}^{k-1})$ - список транзитированных поисковых запросов (хранит информацию о поисковых запросах, прошедших через данный узел) с элементом вида $R_{src}^0 = (ip, sr_{id})$, где ip - адрес узла в направлении которого был выслан запрос, sr_{id} - уникальный идентификатор запроса (каждому запросу присваивается свой уникальный идентификатор).
5. $P_{lc} = (ip_{lc}^0, ip_{lc}^1, \dots, ip_{lc}^{k-1})$ - список соседей узла по локальной сети узла.

К выходным данным подсистемы моделирования работы узла относятся:

1. $M_{src} = (t_{sr}, ip_f, sr_{id})$ - многокомпонентный вектор, где t_{sr} - время в миллисекундах удовлетворения поискового запроса, ip_f - адрес узла-отправителя запросов, sr_{id} - уникальный идентификатор поискового запроса.

В процессе своей работы, подсистема моделирования работы узла имитирует поведение узла P2P сети, которое заключается в том, что узел сети принимает и обрабатывает входящие сообщения, отправляет исходящие сообщения и изменяет своё состояние в соответствии с протоколами работы узла. При этом в процессе моделирования замеряются различные параметры узла – такие как относительные координаты узла в информационном пространстве, число переданных поисковых запросов и ряд других параметров, которые далее используются для построения различных характеристических кривых и пр.

Подсистема визуализации предназначена для наглядного отображения происходящих в сети процессов в виде графиков, диаграмм и пр. Входными данными для подсистемы визуализации являются:

1. выходные данные подсистемы начального конфигурирования модели: вектор городов C , таблица смежности городов C_{adj} , вектор состояний узлов P ;
2. выходные данные подсистемы моделирования среды передачи данных – показатели времени доставки пакетов t_d ;
3. выходные данные подсистемы моделирования работы узла – данные M_{src} по обработке поисковых запросов.

В подсистеме визуализации используются программные средства собственной разработки (основанные на технологиях ZedGraph, Microsoft .Net и др.). А также стандартные программные пакеты, такие как Mathcad (система для математического моделирования) и Microsoft Excel (табличный редактор). Данный набор программных средств позволяет решить задачи:

- отображения географической модели сети (города, магистральные линии связи, рис. 1);
- отображения пространственно-информационной модели сети (положение узлов в пространстве, связи между ними, рис. 3);
- отображения различных графиков зависимостей.

Подсистема тестирования предназначена для проверки адекватности разработанной программной подсистемы моделирования среды передачи данных реально существующим средам передачи данных. Проверка производится путём сопоставления экспериментально полученных характеристик компьютерных сетей с известными параметрами с

характеристиками, полученными при моделировании компьютерных сетей с теми же параметрами с помощью разработанной нами программной системы моделирования (рис. 5). Здесь $latency$ - экспериментально полученные данные задержек, $emuLatency$ - данные задержек, полученные с помощью программного эмулятора, $f1(z)$ и $f2(z)$ - аппроксимирующие прямые для этих наборов соответственно, т.е. слева изображены экспериментально полученные данные, справа – данные, полученные с помощью эмулятора. По графикам видно, что данные, полученные с помощью эмулятора отклоняются от данных по реальным сетям всего на ~5-10%, что является хорошим результатом. Также, при помощи подсистемы тестирования проверяется соответствие поведения модели узла сети в определённых ситуациях требуемому поведению.

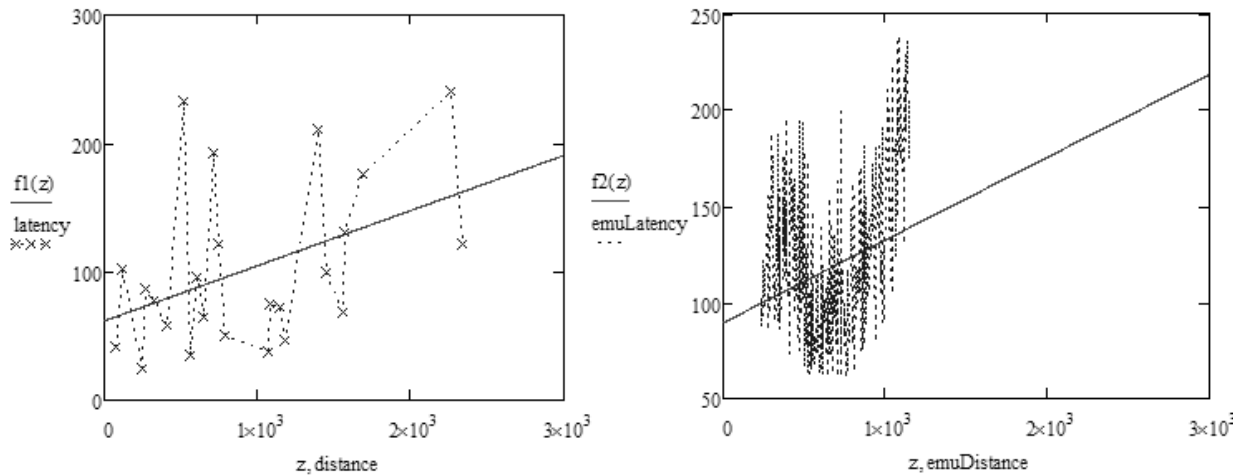


Рис. 5. Зависимость времени доставки сообщения от расстояния.

Входными данными для подсистемы тестирования являются:

1. $R_d = (R_0^d, R_1^d, \dots, R_{k-1}^d)$ - набор эталонных (получены экспериментальным путём) отсчётов $R_i^d = (l, t)$ зависимости времени доставки сообщения в миллисекундах t от расстояния между узлами в километрах l ;
2. $R_d^* = (R_0^{d*}, R_1^{d*}, \dots, R_{k-1}^{d*})$ - набор отсчётов зависимости времени доставки сообщения от расстояния между узлами, полученных в результате моделирования передачи пакетов с помощью разработанной системы моделирования;
3. $R_e = (R_0^e, R_1^e, \dots, R_{k-1}^e)$ - набор эталонных (получены экспериментальным путём) отсчётов $R_i^e = (l, p)$ зависимости вероятности искажения сообщения в процентах p от расстояния между узлами в километрах l ;
4. $R_e^* = (R_0^{e*}, R_1^{e*}, \dots, R_{k-1}^{e*})$ - набор отсчётов зависимости вероятности искажения сообщения от расстояния между узлами, полученных в результате моделирования передачи пакетов с помощью разработанной системы моделирования;
5. $S = (S_0, S_1, \dots, S_{k-1})$ - набор эталонных записей $S = (m_{in}, \Delta, m_{out})$, где m_{in} - входящее сообщение, Δ - предусмотренное протоколом работы узла изменение его внутреннего состояния в ответ на сообщение m_{in} и m_{out} - исходящее сообщение, являющееся реакцией на сообщение m_{in} ;
6. $S^* = (S_0^*, S_1^*, \dots, S_{k-1}^*)$ - набор записей $S^* = (m_{in}, \Delta, m_{out})$, полученных в результате эксперимента над подсистемой моделирования работы узла.

Выходными данными для подсистемы тестирования являются:

1. δ_d - средняя погрешность моделирования зависимости времени доставки сообщения от расстояния между узлами;
2. δ_e - средняя погрешность моделирования вероятности искажения сообщения от расстояния между узлами;
3. $A = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{k-1})$ - вектор булевых значений, α_i равно истине, если соответствующая запись S'_i поведения модели узла сети соответствует записи S_i и равно лжи, если верно обратное.

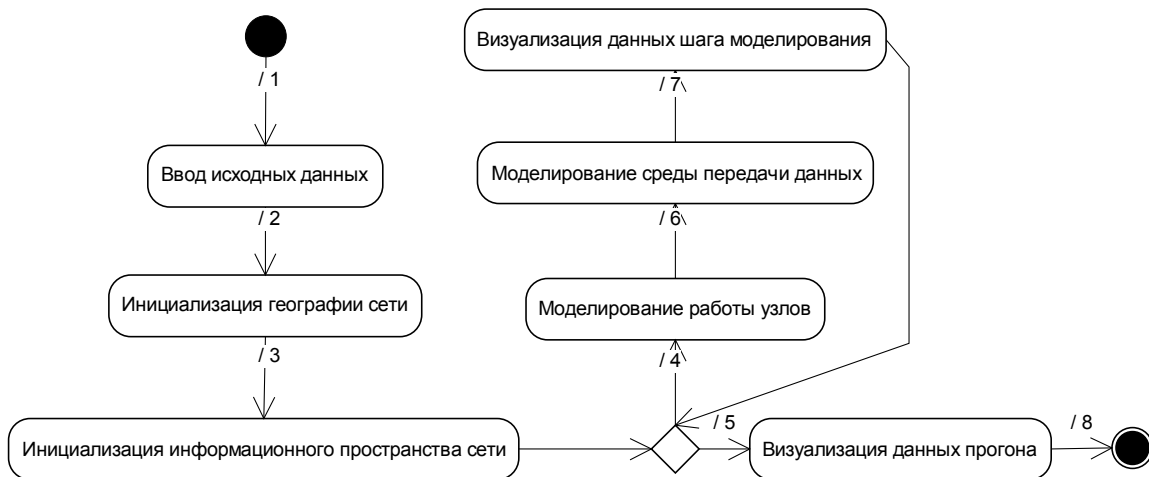


Рис. 6. Общая граф-схема алгоритма работы системы моделирования.

Алгоритмы работы системы моделирования. На рис. 6 представлена общая граф-схема работы системы моделирования, в которой показано взаимодействие всех подсистем эмулятора (кроме подсистемы тестирования). Переход /4, указанный на данной схеме происходит до тех пор, пока не выйдет заданное пользователем системы время эксперимента, затем происходит переход /5.

На рис. 7 изображены шаги инициализации географических параметров элементов сети. На первом шаге координаты городов случайным образом распределяются по моделируемому прямоугольному участку земной поверхности, так, чтобы границы городов не пересекались. На втором шаге формируются магистральные линии связи между городами. На третьем шаге формируются таблицы маршрутизации запросов между городами, которые необходимы для моделирования работы магистрального сетевого оборудования.

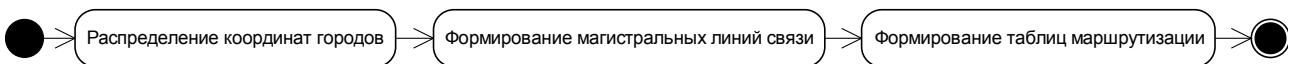


Рис. 7. Граф-схема алгоритма инициализации географических параметров сети.

На рис. 7 изображена схема состояний подсистемы моделирование работы узла. На каждом шаге системы моделирования, данная подсистема совершает следующую последовательность действий: инициализируется счётчик индекса узлов N , затем, пока не будут перебраны все узлы (переход /1), происходит заход в процедуру моделирования запроса узла (переход /2). Узел с соответствующим номером извлекается и до тех пор, пока очередь входящих сообщений узла P_{inc} не опустеет (переход /3), головное сообщение m_{inc}^0 извлекается (переход /4) и обрабатывается. Сообщения обрабатываются в зависимости от их типа:

- уведомление об активности от соседа с адресом ip_i вызывает обновление соответствующей строки R_{cont}^j , где $ip_i = ip_j \in R_{cont}^j$ в таблице соединений узла, обновляется время последнего входящего сообщения $t_j \in R_{cont}^j$ - оно заменяется текущим временем;
- на поисковый запрос узел либо отвечает (если его координаты попадают в область запроса), либо ретранслирует запрос дальше, время последнего входящего сообщения по соответствующему соединению обновляется так же, как и в случае сообщения уведомления об активности.

После обработки входящих сообщений, узел уведомляет своих соседей (тех с которыми уже достаточно давно – время, сравнимое с таймаутом – не было связи) о своей активности путём посылки им сообщения уведомления об активности. Следующим шагом происходит коррекция связей узла – отсоединяются соседние узлы у которых вышел таймаут по входящему трафику, на освободившееся место присоединяются наиболее подходящие узлы. [5] После этого система переходит к следующему узлу ($N := N + 1$) и цикл повторяется заново.

Моделирование параллелизма работы узлов достигается за счёт того, что за один проход системы моделирования обрабатываются все узлы, причём каждому из них на выполнение выдаётся ограниченный квант времени, порядка нескольких миллисекунд, после чего управление передаётся потоку следующего узла. При этом, система моделирования следит за целостностью данных и отвечает за синхронизацию данных между моделируемыми узлами, поддерживая таким образом целостность моделируемой среды. За счёт такого разделения времени достигается отображение параллелизма работы узлов.

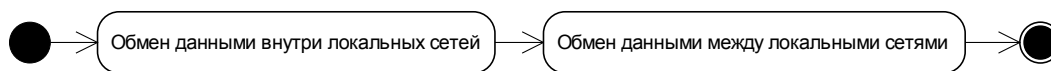


Рис. 9. Граф-схема алгоритма моделирования среды передачи данных.

Подсистема моделирования среды передачи данных начинает работу сразу после моделирования работы узлов. Так как среда передачи данных модели представляет собой ряд локальных сетей масштаба города, объединённых магистральными линиями связи, моделирование этой среды происходит в два этапа. На первом этапе моделируется передача широкоэвещательных и обычных сообщений внутри локальной сети масштаба города. На втором этапе моделируется передача сообщений по магистральным линиям связи между локальными сетями. Для того, чтобы моделирование передачи данных происходило синхронно с моделированием работы узлов, на каждом шаге системы моделирования среды передачи данных моделируется отрезок времени, равный отрезку выделяемому потокам узлов.

Результаты статистических экспериментов. С целью исследования свойств разработанной архитектуры P2P сети, нами был проведён ряд экспериментов над программной моделью данной сети:

1. $L_{\min} = f_1^{\min}(P_n), L_{\max} = f_1^{\max}(P_n), L_{\bar{n}\bar{d}} = f_1^{\bar{n}\bar{d}}(P_n), d = const$ - получение зависимостей f_1^{\min} , f_1^{\max} и $f_1^{\bar{n}\bar{d}}$ - худшего, лучшего и среднего времени поиска узла от числа узлов в сети при постоянном числе измерений информационного пространства и отсутствии сбоев в работе узлов;
2. $L_{\min} = f_2^{\min}(d), L_{\max} = f_2^{\max}(d), L_{cp} = f_2^{cp}(d), P_n = const$ - получение зависимостей f_2^{\min} , f_2^{\max} и f_2^{cp} - худшего, лучшего и среднего времени поиска узла от числа измерений информационного пространства при постоянном числе узлов в сети и отсутствии сбоев в работе узлов;

3. $L_{\min} = f_3^{\min}(d, \varepsilon), L_{\max} = f_3^{\max}(d, \varepsilon), L_{cp} = f_3^{cp}(d, \varepsilon), P_n = const$ - получение зависимостей f_3^{\min} , f_3^{\max} и f_3^{cp} - худшего, лучшего и среднего времени поиска узла от числа измерений информационного пространства и от коэффициента простоя при постоянном числе узлов в сети;
4. $R_{favg}, V_{\dot{n}0} = f_4^{\dot{n}0}(d, \varepsilon), P_n = const$ - получение средней удельной интенсивности потока поисковых запросов R_{favg} и зависимости f_4^{cp} среднего удельного объема служебного трафика от числа измерений информационного пространства и от коэффициента простоя узлов при постоянном числе узлов в сети.

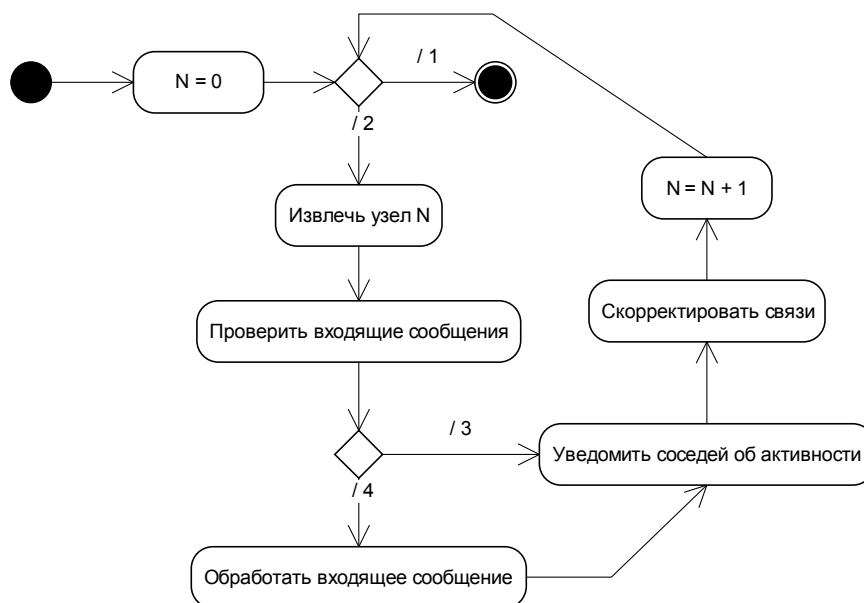


Рис. 8. Граф-схема алгоритма моделирования работы узла.

Порядок проведения экспериментов носит схожий характер для всех зависимостей, поэтому, опишем этот порядок в общих чертах, а затем, если это потребуется, раскроем отдельные особенности индивидуально для каждого эксперимента. Для проведения эксперимента требуется:

1. ввести исходные данные для инициализации модели сети (см. описание подсистемы ввода исходных данных);
2. ввести исходные данные для проведения эксперимента к каковым относятся – время проведения эксперимента;
3. запустить систему моделирования и дождаться пока она не завершит свою работу;
4. извлечь необходимые данные (индивидуальны для каждого эксперимента) из выходных данных системы моделирования и визуализировать их с помощью соответствующих средств подсистемы визуализации.

Для упрощения процесса проведения экспериментов, для каждого из них были написаны отдельные подпрограммы, которые автоматизируют большую часть операций, в том числе ввод необходимых исходных данных, контроль работы системы моделирования, выборка и выгрузка необходимых выходных данных в формат, понятный соответствующим модулям подсистемы визуализации.

Для обеспечения уникальной структуры связей между узлами сети и уникального состояния узлов сети, в системе моделирования используется генератор псевдослучайных чисел. В связи с этим, возможна генерация сетевых структур, маловероятных на практике.

Поэтому, для обеспечения достоверности данных полученных в результате проведения эксперимента и сглаживания влияния фактора случайности на выходные данные, каждый эксперимент проводится по 5 раз и в выходные данные вносятся результаты всех проведённых экспериментов.

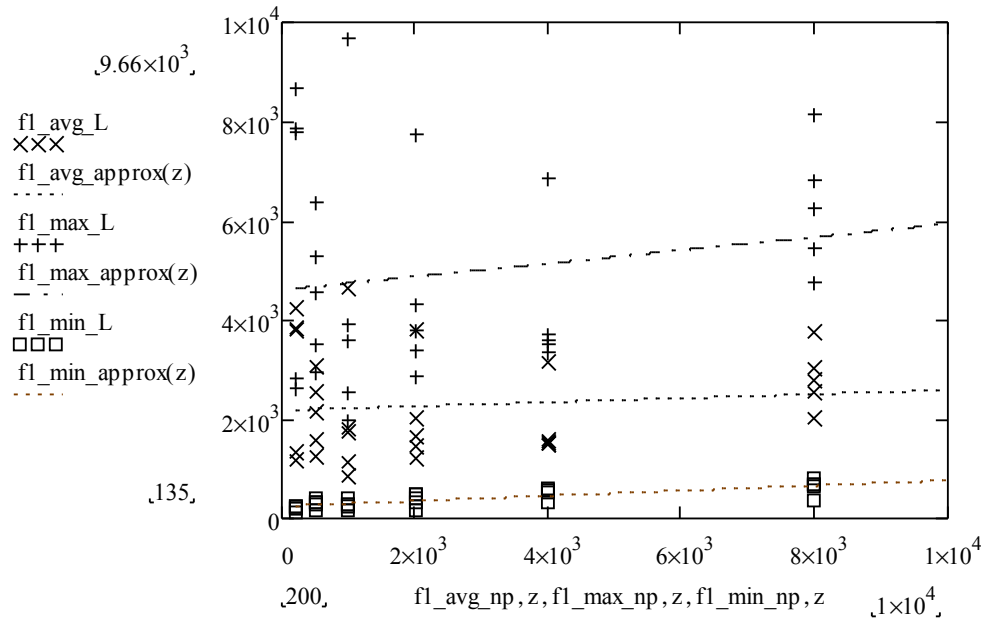


Рис. 10. Зависимость $L = f_1(P_n)$ при $d = \text{const}$.

Для получения зависимостей f_1^{\min} , f_1^{\max} и f_1^{cp} используется следующий порядок проведения эксперимента:

- входные данные: $p_n = (10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6)$, $d = 3$, $f_d(i)$ - вычисляется как случайно распределенное значение на отрезках $([0;10], [0;10], [0;10])$ по каждой из координатных осей, $a_{\text{lat}} = 300$, $a_{\text{lon}} = 300$, $c_n = 10$, $c_{\min} = 1, c_{\max} = 5$, $\varepsilon = +\infty$, $t_i = 60 \cdot 10^3 \cdot \tilde{n}(1 \leq i \leq 5)$;
- выходные данные: 3 вектора пар вида (p_n, O) , где p_n - число узлов и O - вектор значений лучшего, худшего и среднего времени поиска узла.

Для вычисления максимального, минимального и среднего времени поиска узла в сети из всего множества узлов сети случайным образом выбирается 10^2 узлов, после чего они случайным образом разбиваются на 50 уникальных непересекающихся пар и в каждой паре первый узел производит поиск второго узла. Времена поиска замеряются и сортируются – так находятся максимальное и минимальное время поиска узла. Среднее время поиска узла вычисляется путём арифметического усреднения минимального и максимального значений. Такой порядок получения максимальной («худшей»), минимальной («лучшей») и «усреднённой» кривых используется далее во всех экспериментах.

На рис. 10 изображены кривые зависимости времени поиска узла от числа узлов в сети в «лучшем» (нижняя кривая), «среднем» (средняя кривая) и «худшем» (верхняя кривая). В данном эксперименте нас интересуют, преимущественно, усреднённые значения, т.к. они наименее подвержены влиянию случайных искажений. На графике хорошо видно, что при числе узлов в сети порядка 10^3 среднее время поиска узла составляет порядка 2сек, а при числе узлов в сети порядка 10^4 среднее время поиска узла составляет порядка 2,3сек. Таким образом, увеличение числа узлов в 10 раз вызвало увеличение времени поиска на 15%. Отсюда можно сделать следующие выводы:

1. сеть показывает линейную масштабируемость на отрезке $(10^3; 10^4)$ узлов;
2. время поиска узлов мало зависит от числа узлов в сети при размере сети $(10^3; 10^4)$ узлов.

Хотелось бы добавить, что наши вычислительные мощности не позволяют в приемлемые сроки промоделировать сеть размером, скажем, 10^6 узлов. Однако, при условии сохранения линейности зависимости времени поиска от числа узлов, для сети размером 10^6 узлов, экстраполяция даёт величины среднего времени поиска порядка $4сек$. Пусть даже $8сек - 12сек$, если зависимость носит сверхлинейный характер (заметим, что это всего лишь ничем не подтверждённое предположение). И в том и в том случае, этот очень хороший показатель для неструктурированных P2P сетей.

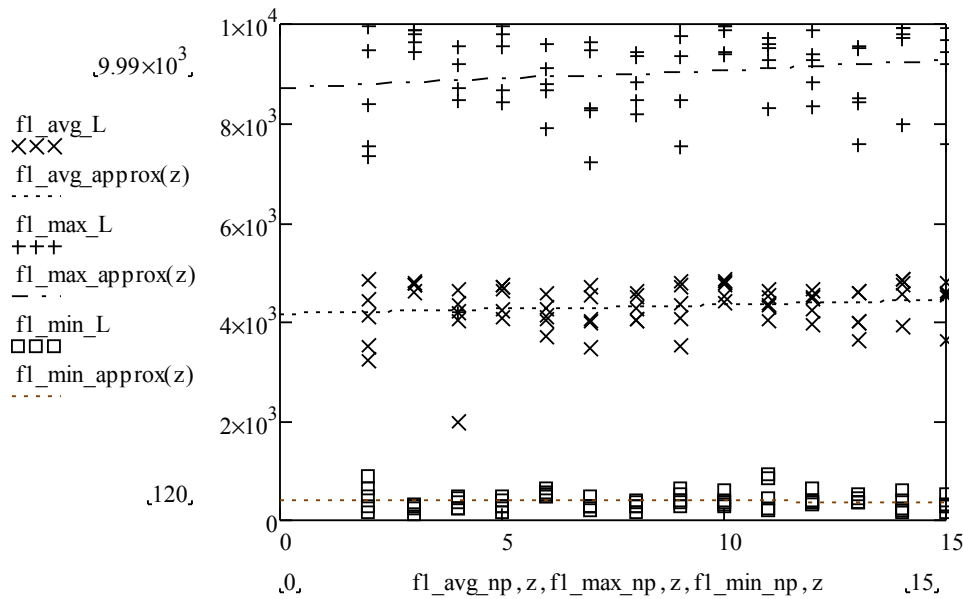


Рис. 11. Зависимость $L = f_2(d)$ при $p_n = const$.

Для получения зависимостей f_2^{\min} , f_2^{\max} и f_2^{cp} используется следующий порядок проведения эксперимента:

- входные данные: $p_n = 10^5$, $d = (2, 3, 8)$, $f_d(i)$ - вычисляется как случайно распределенное значение на отрезках $([0;10], [0;10], [0;10])$ по каждой из координатных осей, $a_{lat} = 300$, $a_{lon} = 300$, $c_n = 10$, $c_{\min} = 1, c_{\max} = 5$, $\varepsilon = +\infty$, $t_{m\in} \in 60 \cdot 10^3$ (1мин);
- выходные данные: 3 вектора пар вида (p_n, O) , где p_n - число узлов и O - вектор значений лучшего, худшего и среднего времени поиска узла.

Так же, как и в предыдущем эксперименте, здесь нас, в первую очередь интересует усреднённое значение времени поиска узла (средняя кривая). По этой кривой видно, что рост числа измерений практически никак не сказывается на времени маршрутизации запроса – при увеличении числа измерений практически в 8 раз, время поиска выросло на величину порядка 1-3%. В данном эксперименте число измерений варьируется от 2 до 15, на практике же применение более чем 3-5 измерений информационного пространства - явление весьма редкое. Отсюда можно сделать выводы, что:

1. время поиска узлов в предлагаемой P2P сети практически не зависит от числа измерений информационного пространства;

2. существует значительный «запас прочности» по числу используемых измерений информационного пространства.

Для получения зависимостей f_3^{\min} , f_3^{\max} и $f_3^{\text{ср}}$ используется следующий порядок проведения эксперимента:

- входные данные: $p_n = 10^5$, $d = (2, 3, \dots, 8)$, $f_d(i)$ - вычисляется как случайно распределенное значение на отрезках $([0;10], [0;10], [0;10])$ по каждой из координатных осей, $a_{lat} = 300$, $a_{lon} = 300$, $c_n = 10$, $c_{\min} = 1$, $c_{\max} = 5$, $\varepsilon = (0.03, 0.1, 0.3)$, $t_{\text{м}} \in 60 \cdot 10^3$ (1 мин);
- выходные данные: 3 вектора пар вида $((d, \varepsilon), O)$, где d - число узлов информационного пространства эксперимента, ε - коэффициенты простоя узлов при эксперименте и O - вектор значений лучшего, худшего и среднего времени поиска узла.

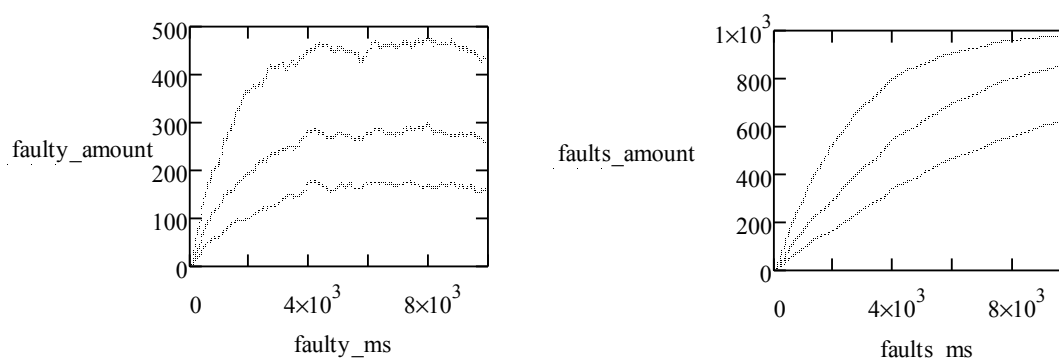


Рис. 12. Динамика активности узлов при $\varepsilon = (0.03, 0.1, 0.3)$.

На рис. 12 изображены моментальное число сбойных узлов в сети в каждый момент времени (слева) и общее число сбоев в сети к определённому моменту времени (справа) для $\varepsilon = (0.03, 0.1, 0.3)$ соответственно. Видно, что данные кривые характеристик соответствуют заявленным в постановке эксперимента коэффициентам простоя узлов.

На рис. 13 отображена зависимость времени поиска от коэффициента простоя узлов сети при числе измерений информационного пространства 2, 3 и 6 - сплошная, штриховая и точечная линии соответственно. Видно, что с уменьшением среднего времени нахождения узла в сети среднее время поиска растёт по-разному, в зависимости от числа измерений информационного пространства:

- при числе измерений 2 время поиска растёт практически линейно (сплошная кривая); уменьшение среднего времени наработки узла на отказ в 5 раз приводит к увеличению времени поиска примерно в 2 раза;
- при числе измерений 3 зависимость становится сверхлинейной и время поиска начинает расти значительно быстрее, относительно первого случая; уменьшение среднего времени наработки узла на отказ в 5 раз приводит к увеличению времени поиска примерно в 2,5 раза;
- при числе измерений 6 наблюдается усиление степени зависимости времени поиска от времени нахождения узла в сети; уменьшение среднего времени наработки узла на отказ в 5 раз приводит к увеличению времени поиска примерно в 5 раз.

Таким образом, на основании полученных при моделировании данных можно сделать следующие выводы:

1. с ростом числа измерений информационного пространства наблюдается рост чувствительности среднего времени доставки сообщения к среднему времени наработки узла на отказ, таким образом, соотношение времени работы узлов к сети к

времени их простоя должно учитываться при выборе числа измерений информационного пространства;

Для получения зависимостей f_4^{\min} , f_4^{\max} и $f_4^{\text{ср}}$ используется следующий порядок проведения эксперимента:

- входные данные: $p_n = 10^5$, $d = (2, 3, 8)$, $f_d(i)$ - вычисляется как случайно распределенное значение на отрезках $([0;10], [0;10], [0;10])$ по каждой из координатных осей, $a_{\text{lat}} = 300$, $a_{\text{lon}} = 300$, $c_n = 10$, $c_{\min} = 1$, $c_{\max} = 5$, $\varepsilon = (0.03, 0.1, 0.3)$, $t_{\text{м}} \in 60 \cdot 10^3$ (1 мин);
- выходные данные: 3 вектора пар вида $((d, \varepsilon), O)$, где d - число узлов информационного пространства эксперимента, ε - коэффициент простоя узлов при эксперименте и O - вектор значений лучшего, худшего и среднего удельного объёмов служебного трафика.

Удельный объём служебного трафика высчитывается как объём всего трафика сети, делённый на число узлов. «Худшая» и «лучшая» кривые в этом эксперименте не рассчитываются, т.к. P2P сеть предложенной нами архитектуры а) по определению распределяет загрузку равномерно и б) если утверждение (а) ложно, то это можно проверить и по значениям, полученным при вычислении «усреднённой» кривой зависимости. В связи с этим, вычисление «лучшей» и «худшей» кривых является в данном случае избыточным.

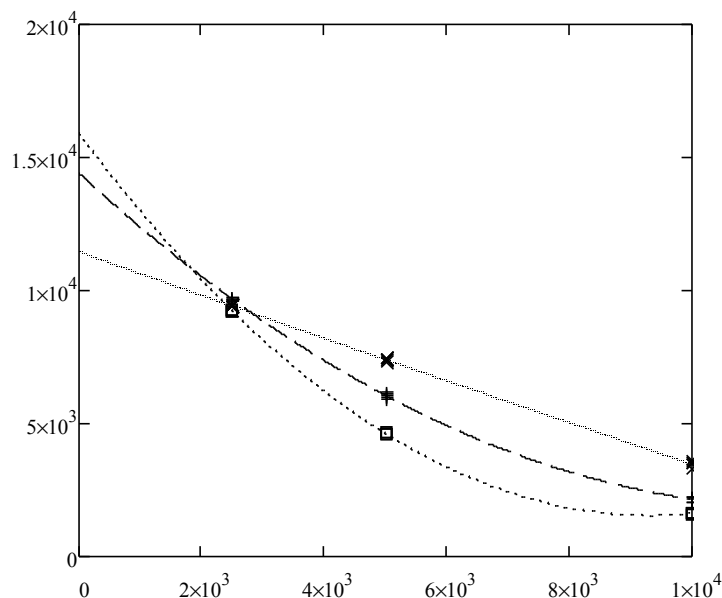


Рис. 13. Зависимость $L = f_3(d, \varepsilon)$ при $d=2, 3$ и 6 и $\varepsilon = 0.03$.

На рис. 14 изображены кривые зависимости объёма совокупного служебного трафика сети в байтах, от времени моделирования в миллисекундах, при числе измерений информационного пространства 2 (сплошная кривая), 4 (прерывистая кривая) и 6 (пунктирная кривая) и коэффициенте простоя 0,1. Удельная средняя интенсивность потока поисковых запросов R_{avg} составила в этом эксперименте порядка 1 Гц. Отсюда несложно подсчитать, что удельный объём служебного трафика V_{cp} при данной интенсивности R_{avg} составит порядка 2-2,4 Кб/с, в зависимости от размерности информационного пространства. Таким образом, по результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. «стоимость» одного запроса, выраженная в величине расходуемого на него трафика составляет порядка 2-2,4 Кб;

2. «стоимость» запроса растёт прямо пропорционально размерности информационно пространства.

Сравнительные оценки основных исследуемых параметров сети. Для составления адекватной оценки характеристик предлагаемой P2P сети необходимо сравнить их с аналогичными характеристиками существующих сетей. Получение точных значений таких характеристик, в силу самой природы P2P сетей – их размера и неустойчивости структуры, является задачей, выходящей за рамки данной работы, поэтому полученные оценки будут основываться на сторонних исследованиях и носить скорее качественный, а не количественный характер. Значительная база статистических исследований к настоящему моменту накопилась по одним из старейших P2P сетей – это Napster и Gnutella, поэтому сравнение будет проводиться по данным сетям.

Удельный объём служебного трафика. Оценочные значения удельного объёма служебного трафика были получены в работе [5] и составляют порядка 10 Кб/с. Моделирование предлагаемой нами сети при средней удельной интенсивности запросов 0,3 Гц (что имеет место быть в сети Gnutella) даёт показатели не более 1 Кб/с, т.е. на порядок меньше.

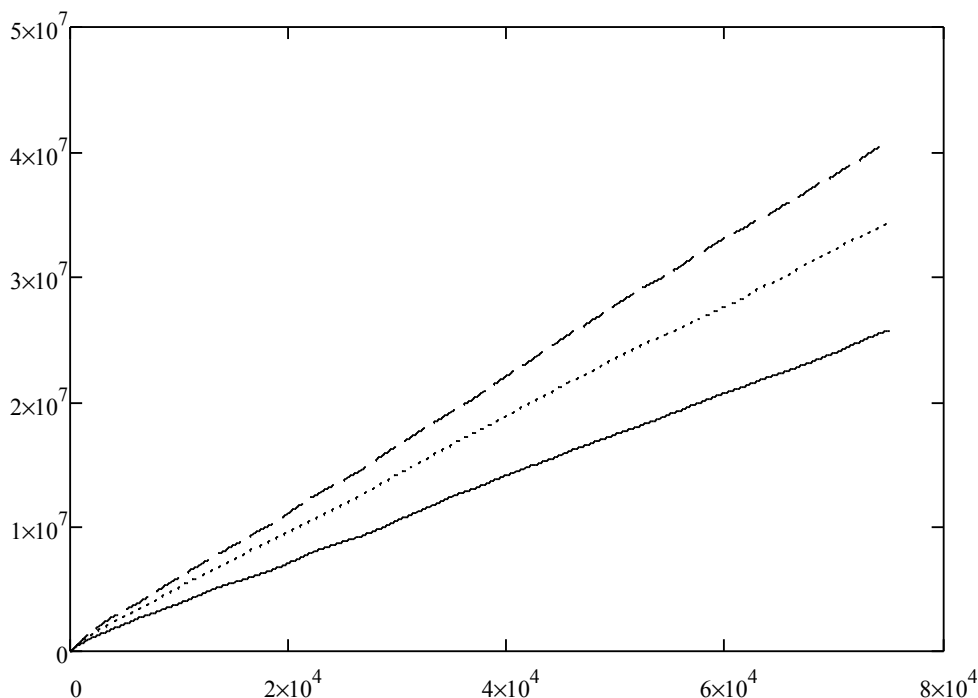


Рис. 14. Зависимость $V = f_4(d, \varepsilon)$ при $d=2,4$ и 6 и $\varepsilon = 0.03$.

Среднее время выполнения поискового запроса. Оценочные значения данного параметра для сети Gnutella составляют порядка 10^2 сек. Моделирование предлагаемой нами сети даёт значения порядка 10 сек, т.е. опять-же на порядок меньше.

Выводы.

В результате моделирования получены данные, позволяющие предположить, что:

1. численные характеристики латентности (порядка 10 сек) и удельного объёма служебного трафика разработанной пиринговой сети (порядка 1 Кб/с) превосходят характеристики ряда существующих пиринговых сетей, в частности, на порядок превосходят аналогичные показатели сетей Napster и Gnutella [5];
2. порядок численных показателей латентности и удельного объёма служебного трафика, полученных на модели разработанной сети позволяют предположить, что

предлагаемая модель сети может быть использована в области распределённого сбора и обработки информации.

Литература.

1. Kojima, I. Implementation of a Service-Based Grid Middleware for Accessing RDF Databases / I. Kojima, M. Kimoto // *On the Move to Meaningful Internet Systems*. – Springer, 2009. PP. 866-876.
2. Folding@HOME. URL: <http://folding.stanford.edu>
3. Hieu Vu, Q. Peer-to-Peer Computing, Principles and Applications / Q. Hieu Vu, M. Lupu, B. Chin Ooi. – Springer, 2009. PP. 18-20.
4. Шурховецкий, П.П. Перспективная технология децентрализованной пиринговой сети / П.П. Шурховецкий, А.А. Власов // *Информационные технологии в профессиональной и научной деятельности*. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. – №1. – С. 81-85.
5. Ding, C. H. Peer-to-Peer Networks for Content Sharing / C.H. Ding, S. Nutanong, R. Buyya // *Peer-to-Peer Computing: The Evolution of Disruptive Technology*. – USA: Idea Group Publishing, 2005. PP. 50-56.
6. Saroiu, S. A Measurement Study of Peer-to-Peer File Sharing Systems / S. Saroiu, P. Krishna Gummadi, Steven D. Gribble. – Univ. of Washington in Seattle, 2005.
7. Жучков, А. В. Грид-сервисы для организации и высокопроизводительной обработки данных маммографического архива в сети СКИФ-ГРИД / А. В. Жучков, Н. В. Твердохлебов // *Труды четвертой международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления»*. – Москва: ИПУ РАН, 2008. С. 838-849.
8. Шурховецкий, П.П. Имитационное моделирование D-мерной децентрализованной пиринговой сети / П.П. Шурховецкий, А.А. Власов // *Наука в условиях современности*. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. С. 142-145