

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕШ-СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Прядкин А. М.¹, Гришанов И. С.²

DOI:10.24682/3034-4050-2024-2-6-12

Ключевые слова: беспроводные технологии, пропускная способность, управление, меш-сеть, производительность, время реакции, протокол, расширяемость, масштабируемость.

Цель исследования. Разработать (обосновать) предложения, способствующие эффективному применению меш-сетей в системах специального назначения при, на основе технических решений в области управления и связи.

Метод исследования. Аналитический с привлечением математического аппарата для получения зависимости времени передачи сообщений различной длины от пропускной способности канала.

Результатом исследования является анализ основных сетевых характеристик производительности распределенных систем с целью разработки рекомендаций по повышению производительности функционирования меш-сетей. В работе был произведен анализ зависимостей времени передачи сообщений различной длины от пропускной способности канала, времени загрузки файла от его размеров, а также сравнение различных сетевых технологий с точки зрения задержки передачи и джиттера, в результате которых были сделаны выводы об оптимальном размере длины пакета в меш-сети, ее производительности и задержках передачи относительно различных вариантов Ethernet-технологии. Произведен анализ зарубежных и отечественных разработок в области маршрутизации пакетов в меш-сетях, сформулированы основные требования к процессу маршрутизации, обеспечивающие производительную работу сети.

Научная новизна заключается в комплексном анализе и сравнении различных аспектов беспроводных пакетных технологий обмена данными для мобильных устройств, включая WiMAX и Wi-Fi Mesh, а также в детальном рассмотрении протокола 802.11s, который является передовым стандартом в области меш-сетей.

Введение

Беспроводные технологии доступа с пакетной коммутацией предназначены для обмена информацией между мобильными абонентами. Эта задача может быть реализована с использованием двух систем двух стандартов: Wi-Fi Mesh, и WiMAX. WiMAX является централизованной системой, основанной на создании базовых станций, которые концентрируют трафик с определенного сектора в одной точке. Технология меш позволяет полностью децентрализовать архитектуру сети и увеличить зону ее действия. Цель разработки стандарта IEEE 802.11s — обеспечение автоматической маршрутизации между узлами сети Wi-Fi, в которой каждый узел для передачи информации способен задействовать соседние, используя прыжковый механизм перераспределения трафика и не более 5% пропускной способности канала. Стандарт IEEE 802.11s регламентирует протоколы обнаружения, идентификации и установления соединения между соседними устройствами. Совокупность устройств, работающих в сети по стандарту IEEE 802.11s, образует меш-сеть.

Таким образом, реализуется концепция постепенного масштабирования сети. Начав развитие сети в одной точке, в идеале можно неограниченно увеличивать зону ее действия, просто добавляя новые устройства. Прокладки дополнительных коммуникаций не требуется.

Системы WiMAX и Wi-Fi Mesh имеют различный подход к построению городской сети — от глобального охвата до постепенного развития. Обычно они дополняют друг друга, а не конкурируют между собой. WiMAX предназначена обеспечивать передачу данных в районе сосредоточения абонентов, а Wi-Fi Mesh в движении и т. д.

Сетевые характеристики, влияющие на производительность меш-сетей

Потенциально высокая производительность — это одно из основных свойств распределенных систем, к которым относятся меш-сети. Это свойство обеспечивается возможностью параллельной передачи трафика между несколькими узлами сети.

¹Прядкин Андрей Михайлович, адъюнкт кафедры боевого применения войск связи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург. E-mail: tbilnovspb28@mail.ru

²Гришанов Илья Сергеевич, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения имени Александра I, Санкт-Петербург. E-mail: igrishsh@zohomail.com

Существует несколько основных характеристик производительности сети:

- время реакции;
- пропускная способность;
- задержка передачи и вариация задержки передачи.

Пропускная способность отражает объем данных, переданных сетью или ее частью в единицу времени. Пропускная способность не является пользовательской характеристикой, так как она говорит о скорости выполнения внутренних операций сети — передачи пакетов данных между узлами сети через различные коммуникационные устройства. Зато она непосредственно характеризует качество выполнения основной функции сети — передачи сообщений и поэтому чаще используется при анализе производительности сети, чем время реакции.

Пропускная способность измеряется либо в битах в секунду, либо в пакетах в секунду. Пропускная способность может быть мгновенной, максимальной и средней.

Средняя пропускная способность вычисляется путем деления общего объема переданных данных на время их передачи, причем выбирается достаточно длительный промежуток времени — час, день или неделя.

Мгновенная пропускная способность отличается от средней тем, что для усреднения выбирается очень маленький промежуток времени — например, 10 мс или 1 с.

Максимальная пропускная способность — это наибольшая мгновенная пропускная способность, зафиксированная в течение периода наблюдения.

Чаще всего при проектировании, настройке и оптимизации сети используются такие показатели, как средняя и максимальная пропускные способности. Средняя пропускная способность отдельного элемента или всей сети позволяет оценить работу сети на большом промежутке времени, в течение которого в силу закона больших чисел пики и спады интенсивности трафика компенсируют друг друга. Максимальная пропускная способность позволяет оценить возможности сети справляться с пиковыми нагрузками, характерными для особых периодов работы сети, например утренних часов, когда сотрудники предприятия почти одновременно регистрируются в сети и обращаются к разделяемым файлам и базам данных.

Пропускную способность можно измерять между любыми двумя узлами или точками сети, например между узлом сети и сервером, между входным и выходным портами маршрутизатора.

Для анализа и настройки сети важно знать данные о пропускной способности отдельных элементов сети.

Важно отметить, что из-за последовательного характера передачи пакетов различными элементами сети общая пропускная способность сети любого составного пути в сети будет равна минимальной из пропускных способностей составляющих элементов маршрута. Для повышения пропускной способности составного пути необходимо в первую очередь обратить внимание на самые медленные элементы. Следует подчеркнуть, что если передаваемый по составному пути трафик будет иметь среднюю интенсивность, превосходящую среднюю пропускную способность самого медленного элемента пути, то очередь пакетов к этому элементу будет расти теоретически до бесконечности, а практически — до тех пор, пока не заполнится его буферная память, а затем пакеты просто начнут отбрасываться и теряться.

Обычно при определении пропускной способности сегмента или устройства в передаваемых данных не выделяются пакеты какого-то определенного пользователя, приложения или компьютера — подсчитывается общий объем передаваемой информации. Тем не менее, для более точной оценки качества обслуживания такая детализация желательна, и в последнее время системы управления сетями все чаще позволяют ее выполнять.

Время реакции сети является интегральной характеристикой производительности сети с точки зрения пользователя. В общем случае время реакции определяется как интервал времени между возникновением запроса пользователя к какой-либо сетевой службе и получением ответа на этот запрос.

Очевидно, что значение этого показателя зависит от типа службы, к которой обращается пользователь, от того, какой пользователь и к какому серверу обращается, а также от текущего состояния элементов сети — загруженности сегментов, коммутаторов и маршрутизаторов, через которые проходит запрос, загруженности сервера и т. п.

Поэтому целесообразно использовать также и средневзвешенную оценку времени реакции сети, усредняя этот показатель по пользователям, серверам и времени дня (от которого в значительной степени зависит загрузка сети).

Время реакции сети обычно складывается из нескольких составляющих. В общем случае в него входит время подготовки запросов на клиентском компьютере, время передачи запросов между клиентом и сервером через сегменты сети

и промежуточное коммуникационное оборудование, время обработки запросов на сервере, время передачи ответов от сервера клиенту и время обработки получаемых от сервера ответов на клиентском компьютере.

Знание сетевых составляющих времени реакции дает возможность оценить производительность отдельных элементов сети, выявить узкие места и в случае необходимости выполнить модернизацию сети для повышения ее общей производительности.

Задержка передачи определяется как задержка между моментом поступления пакета на вход какого-либо сетевого устройства или части сети и моментом появления его на выходе этого устройства. Этот параметр производительности по смыслу близок ко времени реакции сети, но отличается тем, что всегда характеризует только сетевые этапы обработки данных, без задержек обработки компьютерами сети. Обычно качество сети характеризуют величинами максимальной задержки передачи и вариацией задержки. Не все типы трафика чувствительны к задержкам передачи, во всяком случае, к тем величинам задержек, которые характерны для компьютерных сетей, — обычно задержки не превышают сотен миллисекунд, реже — нескольких секунд. Такого порядка задержки пакетов, порождаемых файловой службой, службой электронной почты или службой печати, мало влияют на качество этих служб с точки зрения пользователя сети. С другой стороны, такие же задержки пакетов, переносящих голосовые данные или видеоизображение, могут приводить к значительному снижению качества предоставляемой пользователю информации — возникновению эффекта «эха», невозможности разобрать некоторые слова, дрожание изображения и т. п.

Пропускная способность и задержки передачи являются независимыми параметрами, так что сеть может обладать, например, высокой пропускной способностью, но вносить значительные задержки при передаче каждого пакета. Пример такой ситуации дает канал связи, образованный геостационарным спутником. Пропускная способность этого канала может быть высокой, например 2 Мбит/с, в то время как задержка передачи всегда составляет не менее 0,24 с, что определяется скоростью распространения сигнала (около 300 000 км/с) и длиной канала (72 000 км).

Стандарт IEEE 802.11s требует, чтобы все устройства в меш-сети поддерживали метрику **времени передачи в канале** (Airtime Link Metric). Эта обязательная метрика необходима для совместимости устройств.

Она задается формулой

$$t = (R + B / r) / (1 - e),$$

где R и B — константы, определенные стандартом для различных физических реализаций (802.11a, 802.11b): B — число битов в тестовом пакете (8192), R — накладные расходы доступа к каналу, которые включают в себя заголовки пакетов, кадры протоколов доступа и т. д.; r — скорость передачи данных в канале (Мбит/с); e — вероятность возникновения ошибки (измеряется экспериментально на пакетах длиной B). Эта метрика представляет собой оценку времени передачи (в секундах) пробного пакета длиной Bt с учетом возможных ретрансляций при потерях в канале. Способ определения параметров r и e в стандарте не приводится, однако можно предположить, что для этого должна использоваться периодическая рассылка пробных пакетов длиной $Bt = 8192$ бит. Рассматривались скорости от 12 до 54 мбит/с. На рисунке 1 приведены графики зависимости времени передачи сообщения по каналу от его пропускной способности при передаче пробных сообщений различной длины.

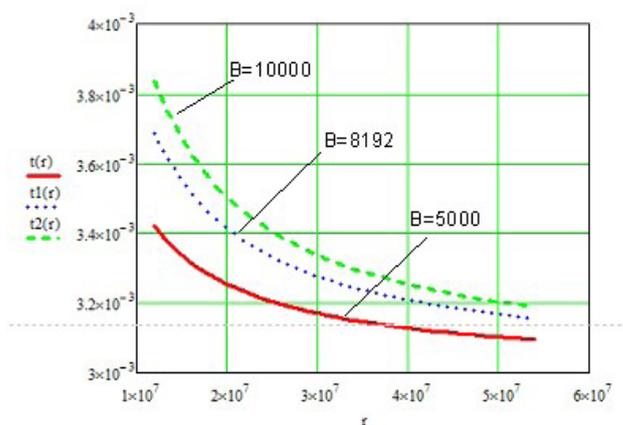


Рис. 1. Графики зависимости времени передачи сообщения по каналу от его пропускной способности при передаче пробных сообщений различной длины

Как следует из приведенных графиков, время задержки при одной и той же пропускной способности канала может изменяться в значительных пределах. При этом наибольший разброс значений наблюдается при меньших значениях пропускной способности. Отсюда следует вывод о целесообразности передачи сообщений в меш-сетях пакетами небольшого размера.

В [4] приведены результаты измерений для проводного Ethernet и для 802.11n для случая, когда к точке доступа подключены 20 пользователей из которых 10 активны. На рисунке 2 приведены графики зависимости среднего времени загрузки файла от его размеров.

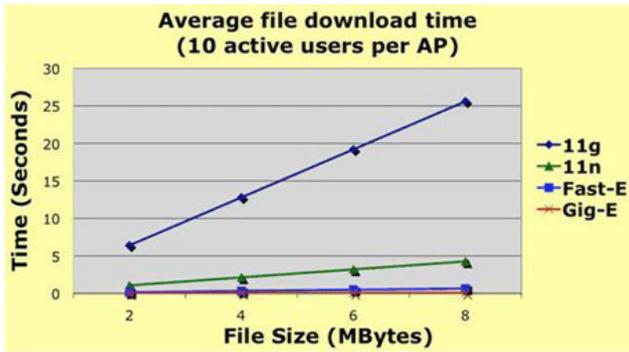


Рис. 2. Среднее время загрузки файла

Из графиков следует, что в зависимости от размеров файла происходит линейное нарастание времени загрузки, которое при размере файла в 8 Мбайт достигает 25 секунд при технологии 802.11g, что в несколько раз больше, чем при использовании технологий семейства Ethernet.

Для задач передачи трафика реального времени критическим параметром является время задержки. Согласно рекомендациям ITU задержка отклика не должна превышать 150 мсек. Результаты сравнения различных сетевых технологий с точки зрения задержки передачи представлено на рисунке 2.

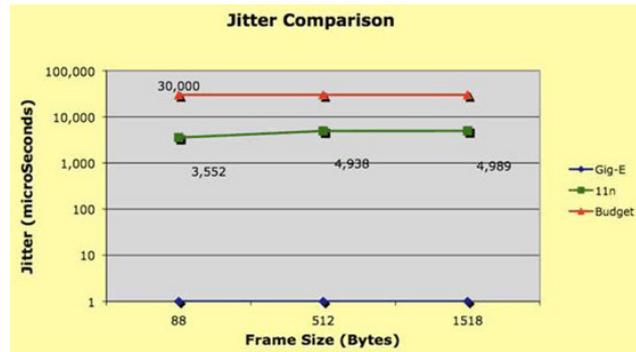


Рис. 4. Временной разброс отклика для Ethernet и 802.11

Термины **расширяемость** и **масштабируемость** иногда используют как синонимы, но это неверно — каждый из них имеет четко определенное самостоятельное значение.

Расширяемость (extensibility) означает возможность сравнительно легкого добавления отдельных элементов сети (пользователей, компьютеров, приложений, служб), наращивания длины сегментов сети и замены существующей аппаратуры более мощной. При этом принципиально важно, что легкость расширения системы иногда может обеспечиваться в некоторых весьма ограниченных пределах. Например, локальная сеть Ethernet, построенная на основе одного сегмента толстого коаксиального кабеля, обладает хорошей расширяемостью, в том смысле, что позволяет легко подключать новые станции. Однако такая сеть имеет ограничение на число станций — их число не должно превышать 30–40. Хотя сеть допускает физическое подключение к сегменту и большего числа станций (до 100), но при этом чаще всего резко снижается производительность сети. Наличие такого ограничения и является признаком плохой масштабируемости системы при хорошей расширяемости.

Масштабируемость (scalability) означает, что сеть позволяет наращивать количество узлов и протяженность связей в очень широких пределах, при этом производительность сети не ухудшается. Для обеспечения масштабируемости сети приходится применять дополнительное коммуникационное оборудование и специальным образом структурировать сеть. Например, хорошей масштабируемостью обладает многосегментная сеть, построенная с использованием коммутаторов и маршрутизаторов и имеющая иерархическую структуру связей. Такая сеть может включать несколько тысяч компьютеров и при этом обеспечивать каждому пользователю сети нужное качество обслуживания.

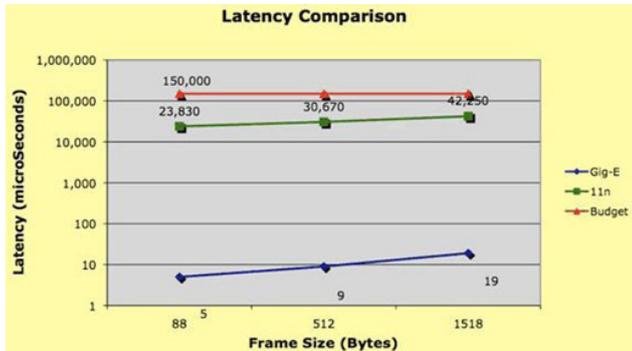


Рис.3. Сравнение задержек для Ethernet и 802.11

По данному параметру технология GigabitEthernet значительно превосходит стандарт 802.11n, что не удивительно с учетом пропускной способности обеих технологий.

Для мультимедийных приложений важным параметром является также вариация времени задержки (или джиттер), который не должен превышать 30мсек. Результаты сравнения разных технологий по временному разбросу представлены на рисунке 3.

Из графика следует, что несмотря на превосходство технологии GigabitEthernet, стандарт 802.11 так же может использоваться для передачи мультимедийных сообщений, поскольку вариация времени задержки не превышает 10 мс.

Анализ существующих протоколов маршрутизации меш-сетей

В связи с тем, что стандарт меш-сетей находится в стадии доработки, многие ведущие фирмы мира предлагают свои собственные протоколы маршрутизации. Известно довольно много различных разработок, в большинстве своем они лишь поверхностно описаны разработчиками. Так, в беспроводной платформе Cisco Aironet 1520 Series фирмы Cisco Systems используется проприетарный протокол маршрутизации Cisco's Adaptive Wireless Path Protocol (AWPP). Логика протокола скрыта, однако по косвенным данным можно предположить, что он базируется на одной из версий HWMP, работающего в проактивном режиме. Управление и мониторинг сети, т. е. функция корневого узла, реализует специальное устройство — контроллер беспроводной сети Cisco Wireless LAN Controller, компания рекомендует использовать в меш-сетях контроллеры серии 4400. Довольно много информации о маршрутизации в своих сетях представила корпорация Microsoft. Компания разработала реактивный протокол маршрутизации, основанный на алгоритме динамической маршрутизации источника DSR (Dynamic Source Routing). Он очень похож на протокол Ad Hoc On Demand Distance Vector (т. е. на HWMP), с той лишь разницей, что для маршрутизации от источника до адресата используется маршрутная таблица источника, а не промежуточных узлов. Компания Microsoft предложила и протокол маршрутизации источника по качеству канала (Link Quality Source Routing, LQSR), который является адаптацией DSR на виртуальной второй с половиной уровень эталонной сетевой модели взаимодействия открытых систем OSI. Введение промежуточного уровня предпринято компанией, чтобы сделать протокол прозрачным для более высокого уровня, но при этом обеспечить его корректную работу при переходе между проводной и беспроводной сетями. К предложенному протоколу прилагается пять различных метрик: количество шагов; время на получение ответа (Round Trip Time, RTT); время на посылку пробного пакета от источника до адресата и обратно (Packet Pair); ожидаемое время передачи (Expected Transmission Time, ETT) и взвешенное совокупное ожидаемое время передачи (Weighted Cumulative ETTs, WCETT). Помимо основного протокола LQSR, есть версия многоинтерфейсного LQSR (MR-LQSR — MultiRadio Link Quality Source Routing), которая, согласно экспериментам, дает существенный прирост производительности сети, узлы которой поддерживают несколько интерфейсов. Компания Tropos Networks также

представила свое решение в области маршрутизации в меш-сетях. Яркий пример внедрения ее разработок — сеть Google WiFi, объединяющая свыше 400 маршрутизаторов в опорной сети, охватывающая более 12 квадратных миль и 15 тыс. домов для обслуживания 25 тыс. пользователей. Данного результата удалось достичь благодаря разработке и использованию протокола Predictive Wireless Routing Protocol (PWRP), способного работать в больших сетях без потери пропускной способности. PWRP является закрытым проприетарным протоколом, поэтому точных данных о его работе нет. Однако из официальных документов разработчика следует, что данный протокол — полностью распределенный и в первую очередь ориентирован на обеспечение связи клиент-сервер, которая динамически оптимизируется и с легкостью масштабируется при расширении сети. Про метрику, используемую в протоколе, известно лишь то, что она основана на измерении действительной производительности беспроводной сети. Группа OLPC team предложила упрощенную версию протокола HWMP. Неоспоримые преимущества этого решения — открытость проекта и исходных кодов и его поддержка крупными компаниями. Специально для меш-сетей в Голландском институте беспроводной и мобильной связи (Twente Institute for Wireless and Mobile Communications) разработан протокол Forwarding Layer for MESHing (FLAME). Он работает на виртуальном втором с половиной уровне модели OSI, аналогично протоколу LQSR. Это наделяет FLAME теми же преимуществами, что и LQSR, т. е. прозрачностью с точки зрения протоколов верхних уровней и независимостью от среды передачи данных. Однако в отличие от LQSR протокол FLAME не использует никаких метрик (первый пришедший от узла пакет считается пришедшим по кратчайшему пути, который и используется в дальнейшем), — любой полученный пакет является основанием для обновления информации о его источнике. При этом в таблицу маршрутизации заносится интерфейс и соседний узел, через которые пролегает путь к источнику пакета. Для этого в сети под управлением FLAME ко всем передаваемым пакетам добавляется FLAME-заголовок.

В отечественном аппаратно-программном комплексе меш-сетей, разработанном коллективом под руководством профессора В. М. Вишневого на базе серийно выпускаемого комплекса РЭС «Рапира», в качестве базового протокола маршрутизации используется HWMP. Кроме того,

в ИППИ РАН разработан оригинальный протокол маршрутизации,

обеспечивающий полностью прозрачный переход между проводной сетью и беспроводной меш-сетью. Разработанный в ИППИ РАН протокол, так же, как и протоколы FLAME и LQSR, использует виртуальный «2,5 уровень» модели OSI, однако в остальном его алгоритмы отличаются от FLAME и LQSR.

В состав комплекса также входит специальная программа — контроллер сети, — которая занимается мониторингом беспроводной сети, а также обеспечивает удобство конфигурирования сети. Эта программа совмещает в себе функции ряда вспомогательных сервисов, таких как NTP- и DHCP-серверы, а также функции сервера безопасности сети. Разработанный отечественный аппаратно-программный комплекс беспроводных меш-сетей будет широко использован при построении распределенных беспроводных городских сетей (как альтернатива WiMAX), в промышленных сенсорных сетях и в других областях.

Во многом требования, предъявляемые к оборудованию меш-сетей, являются аналогичными требованиям к оборудованию других сетей доступа. Особенно это касается требований по противодействию внешним воздействующим факторам. Поскольку основные отличия меш-сетей заключаются в иной организации функций канального уровня и в использовании собственных протоколов маршрутизации, то особые требования предъявляются к протоколам маршрутизации.

В общем случае способ маршрутизации должен удовлетворять следующим основным требованиям [5]:

- гарантированно определять маршрут передачи сообщений, если он существует;
- обеспечивать маршрутизацию одноадресных, многоадресных и циркулярных сообщений;
- обеспечивать оптимизацию выбираемых маршрутов в соответствии с принятым критерием;
- устранить (не допускать) заикливания сообщений;
- адаптироваться к возможным изменениям условий функционирования сети и изменениям параметров информационных потоков;

- требовать незначительного расходования сетевых ресурсов;
- иметь приемлемую сложность реализации и необходимое быстродействие.

Выводы

1. В результате исследования сформулированы ключевые различия между беспроводными пакетными технологиями обмена данными для мобильных устройств — WiMAX и Wi-Fi Mesh. Рассмотрены возможности протокола 802.11s, являющегося наиболее современным и поддерживаемым стандартом в сфере mesh-сетей.
2. Досконально проанализированы такие сетевые характеристики как: пропускная способность, время реакции, задержка передачи, расширяемость и масштабируемость сети. Также приведены сведения о метрике времени передачи в канале, обеспечивающей согласованность устройств в mesh-сети.
3. С помощью методов математического аппарата выявлена тенденция к росту диапазона значений времени задержки пакета данных при его передаче по низкоскоростному каналу, что демонстрирует необходимость применения в mesh-сетях пакетов небольшого размера.
4. Произведенное сравнение среднего времени загрузки файлов разного размера для стандартов 802.11g, 802.11n, Fast- и Gigabit-Ethernet выявило, что наиболее близок к стандартам Ethernet по производительности в ходе исследования оказался протокол 802.11n.
5. Графики 2 и 3 демонстрируют пригодность использования технологии 802.11n для передачи трафика реального времени и мультимедийных приложений, несмотря на значительное отставание по показателям среднего времени задержки и джиттера от технологии Gigabit-Ethernet.
6. Во второй части работы приведен анализ, сравнение и требования к зарубежным и отечественным протоколам маршрутизации распределенных сетей.

Литература

1. Татарин В.И. Введение в самоорганизацию интеллектуально-определяемых сетей / В.И. Татарин // Информатика и Космос. — 2022. — № 2. — С. 119–124.
2. Гусс С.В. Самоорганизующиеся mesh-сети для частного использования / С.В. Гусс // Математические структуры и моделирование. 2016. №4(40). С. 102–115.
3. Чанцис Ф., Стаис И., Кальдерон П., Деирменцоглу Е., Вудс Б. Практический хакинг интернета вещей / пер. с англ. Л. Н. Акулич. — М.: ДМК Пресс, 2022—480 с.

4. Киреев С.А. Оптимизация передачи информации в самоорганизующихся сетях // Процессы управления и устойчивость. 2020 Т. 67, № 1. С.56–78.
5. Миклуш В.А. Оценка показателей качества обслуживания беспроводных сенсорных сетей / В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова, С.В. Рудых // Информация и Космос. 2022. № 4. С.21-27.
6. Афанасьев А.Л. Многокритериальная многопутевая маршрутизация в mesh-сетях / А.Л. Афанасьев, А.В. Гармонов // (<http://www.govrn.ru>).
7. Леонов. А.В. Экспериментальная оценка возможности использования алгоритма муравьиной колонии AntHocNet для решения задачи маршрутизации в FANET / Леонов А. В. // Научно-технические ведомости СПб-ГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Том 10, № 1. С 7–26. DOI:10/18721/JCSTCS.10101
8. Гольдштейн, Б.С. Сети связи пост NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. — СПб.: БХВ Петербург, 2014. 160 с.:

INVESTIGATION OF MESH NETWORK PERFORMANCE ISSUES IN SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION SYSTEMS

Pryadkin A. M.¹, Grishanov I. S.²

Keywords: wireless technologies, bandwidth, management, mesh network, performance, response time, protocol, extensibility, scalability.

Objective. To develop (substantiate) proposals that contribute to the effective use of mesh networks in special-purpose systems in the field of, on the basis of, technical solutions in the field of control and communication.

Research method. Analytical with the use of mathematical apparatus to obtain the dependence of the time of transmission of messages of various lengths on the bandwidth of the channel.

The result of the study is the analysis of the main network characteristics of the performance of distributed systems in order to develop recommendations for improving the performance of mesh networks. In this work, the author analyzes the dependencies of the transmission time of messages of various lengths on the bandwidth of the channel, the file download time on its size, as well as a comparison of various network technologies in terms of transmission latency and jitter, as a result of which conclusions are drawn about the optimal size of the packet length in a mesh network, its performance and transmission delays relative to various variants of Ethernet technology. The analysis of foreign and domestic developments in the field of packet routing in mesh networks is carried out, the basic requirements for the routing process that ensure the performance of the network are formulated.

The scientific novelty lies in the comprehensive analysis and comparison of various aspects of wireless packet data exchange technologies for mobile devices, including WiMAX and Wi-Fi Mesh, as well as in the detailed consideration of the 802.11s protocol, which is the leading standard in the field of mesh networks.

well as in a detailed examination of the 802.11s protocol, which is an advanced standard in the field of mesh networks.

References

1. Tatarinov V. I. Vvedenie v samoorganizaciju intellektual'no-opredeljaemyh setej / V.I. Tatarinov // Informacija i Kosmos. – 2022. – № 2. – С. 119–124.
2. Guss S.V. Samoorganizujushhiesja mesh-seti dlja chastnogo ispol'zovanija / S.V. Guss // Matematicheskie struktury i modelirovanie. 2016. №4(40). С. 102–115.
3. Chancis F., Stais I., Kal'deron P., Deirmencoglu E., Vuds B. Prakticheskij haking interneta veshhej / per. s angl. L. N. Akulich. – М.: DMK Press. 2022.–480 s.
4. Kireev S.A. Optimizacija peredachi informacii v samoorganizujushhihsja setjah // Processy upravlenija i ustojchivost'. 2020 Т. 67, № 1. С.56–78.
5. Miklush V.A. Ocenka pokazatelej kachestva obsluzhivanija besprovodnyh sensoryh setej / V.A. Miklush, T.M. Tatarnikova, S.V. Rudyh // Informacija i Kosmos. 2022. № 4. С.21-27.
6. Afanas'ev A.L. Mnogokriterial'naja mnogoputevaja marshrutizacija v mesh-setjah / A.L. Afanas'ev, A.V. Garmonov // (Afanas'ev A.L., Garmonov A.V. - Mnogokriterial'naja mnogoputevaja marshrutizacija v mesh-setjah, data obrashhenija 30 sentjabrja 2024 g.).
7. Leonov A. V. Jeksperimental'naja ocenka vozmozhnosti ispol'zovanija algoritma murav'inoj kolonii AntHocNet dlja reshenija zadachi marshrutizacii v FANET / Leonov A. V. // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie. 2017. Tom 10, № 1. С. 7–26. DOI:10.18721/JCSTCS.10101
8. Gol'dshtejn, B. S. Seti svjazi post NGN / B. S. Gol'dshtejn, A. E. Kucherjavjy. – SPb.: BHV Peterburg, 2014. 160 s.

¹Andrey M. Pryadkin, adjunct of the Department of Combat Use of Signal Troops of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg. E-mail: tbilnovspb28@mail.ru

²Ilya S. Grishanov, postgraduate student of the Department of Electrical Communications, Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering, St. Petersburg. E-mail: igrishsh@zohomail.com