

Network Working Group  
Request for Comments: 2501  
Category: Informational

S. Corson  
University of Maryland  
J. Macker  
Naval Research Laboratory  
January 1999

## Сети MANET — проблемы протоколов маршрутизации и вопросы развития

### Mobile Ad hoc Networking (MANET):

### Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations

#### Статус документа

В этом документе представлена информация для сообщества Internet. Документ не задает каких либо стандартов Internet и может распространяться без ограничений.

#### Авторские права

Copyright (C) The Internet Society (1999). All Rights Reserved.

#### Тезисы

В этом документе впервые описываются сети MANET<sup>1</sup> и их особенности по сравнению с традиционными проводными сетями передачи пакетов. Рассматривается также влияние этих различий на устройство и развитие протоколов управления сетями с акцентом на вопросах работы системы маршрутизации.

## 1. Введение

С учетом недавних достижений в технологиях компьютеров и беспроводных коммуникаций представляется вероятным широкое распространение мобильных беспроводных систем, использующих стек протоколов IP. Представляется, что специализированные (ad hoc) мобильные сети будут обеспечивать отказоустойчивую и эффективную инфраструктуру за счет встраивания функций маршрутизации в мобильные узлы. Предполагается, что такие сети будут иметь динамическую, иногда быстро изменяющуюся, случайную многоинтервальную (multihop) топологию, которая будет включать множество в той или иной мере ограниченных по пропускной способности беспроводных соединений.

В сообществе Internet поддержка маршрутизации для мобильных хостов разрабатывается в рамках технологии mobile IP. Эта технология предназначена для поддержки роуминга (roaming) перемещающихся в пространстве хостов, которые могут разными способами подключаться к сети Internet с возможностью изменения при этом используемого блока адресов. Хост может напрямую подключиться к стационарной сети (чужой), а также использовать для подключения беспроводное соединение, телефонную линию и т. п. Поддержка этих форм мобильности хостов («блуждания») требует управления адресами, расширения интероперабельности протоколов и поддержки функция типа поэтапной (hop-by-hop) маршрутизации на основе имеющихся протоколов маршрутизации, работающих в стационарных сетях. В отличие от этого задачей специализированных мобильных сетей (mobile ad hoc network) является расширение мобильности на область автономных мобильных беспроводных доменов, где множество узлов, способных объединять в себе функции хостов и маршрутизаторов, сами по себе формируют инфраструктуру сетевой маршрутизации.

## 2. Применение

Термин «специализированная мобильная сеть» (Mobile Ad hoc Networking) в какой-то мере является синонимом термина «мобильные пакетные радиосети» (Mobile Packet Radio Networking), пришедшего из ранних военных исследований 70-80-х годов, термина «мобильные меш-сети» (Mobile Mesh Networking), введенного журналом The Economist для обозначения военных сетей будущего), а также термина «мобильные многоинтервальные беспроводные сети» (Mobile, Multihop, Wireless Networking), который более точен, хотя и выглядит громоздким.

Имеется и сохранится потребность в технологиях для динамических специализированных сетей. Расширение использования мобильных компьютеров и других устройств с потребностью в функциональности сетей IP требует разработки адаптивной технологии для мобильных сетей, обеспечивающей эффективное управление специализированными сетевыми кластерами, которые могут работать автономно и (более, чем вероятно) иметь подключение к стационарной сети Internet.

Технологии MANET иногда применяются в промышленных и коммерческих приложениях, включающих обмен данными с мобильными устройствами. Кроме того, мобильные меш-сети могут служить недорогой отказоустойчивой альтернативой сетям сотовой связи. Имеются и будут появляться потребности военных в отказоустойчивых, совместимых с IP службах для мобильных беспроводных коммуникационных сетей [1], многие из которых состоят из весьма динамичных автономных топологических сегментов. Кроме того, применение технологий MANET, весьма вероятно в развивающихся системах «переносных» вычислений и коммуникаций. Продуманное объединение со спутниковыми системами передачи данных позволяет создать на базе технологии MANET гибкие коммуникационные системы для служб спасения, пожарных и т. п., обеспечивающие быстро развертываемые, жизнестойкие и эффективные динамические сети. Очевидны и другие применения технологии MANET, которые в настоящее время не

<sup>1</sup>Mobile Ad hoc Network — мобильная сеть специального назначения.

реализованы и не видны авторам документа. Попросту говоря, эта технология обеспечивает распространение сетевых технологий IP на динамические, автономные беспроводные сети.

### 3. Характеристики сетей MANET

Сеть MANET состоит из мобильных платформ (например, маршрутизатор с множеством хостов и беспроводных коммуникационных устройств), называемых далее «узлами» (node), которые могут произвольно перемещаться. Узлы могут размещаться на самолетах, кораблях, грузовиках и даже у людей и на каждый маршрутизатор может приходиться множество хостов. MANET представляет собой автономную систему мобильных узлов. Система может работать изолированно или иметь шлюзы или интерфейсы в стационарные сети. В последнем случае такая сеть обычно рассматривается как оконечная (stub) сеть, подключенная к фиксированной сети. Оконечные сети передают трафик своих узлов, но не допускают передачу через себя «транзитного» трафика.

Узлы MANET оснащаются беспроводными передатчиками и приемниками, использующими антенны, которые могут быть всенаправленными (omnidirectional) для широковещания, направленными для соединений «точка-точка», возможно, управляемыми. Могут применяться и комбинации указанных антенн. В каждый момент в зависимости от местоположения узлов, зон покрытия их приемников и передатчиков, уровня мощности передатчиков и уровня взаимодействия между каналами картина беспроводной связности имеет форму случайного многоплечевого (multihop) или сети ad hoc. Топология такой сети может меняться с течением времени в результате перемещения узлов или изменения их параметров приема и передачи.

Ниже перечислены отличительные характеристики сетей MANET.

- 1) Динамическая топология. Узлы сети могут произвольно перемещаться и топология сети (обычно включает множество интервалов маршрутизации) может быстро меняться случайным образом в непредсказуемые моменты, а также может включать двухсторонние и односторонние соединения.
- 2) Ограниченные по пропускной способности соединения с разной «емкостью». Беспроводные соединения существенно проигрывают в пропускной способности кабельным линиям. Кроме того, пропускная способность беспроводных соединений, с учетом эффектов множественного доступа, затухания, шумов, интерференции и т. п., зачастую существенно ниже максимальной скорости в радиоканале.

Сравнительно низкая пропускная способность делает перегрузки в сети скорее правилом, нежели исключением — суммарные потребности приложений зачастую близки или превышают пропускную способность сети. Поскольку мобильные сети часто являются просто расширением существующей стационарной инфраструктуры, пользователи этих сетей обычно желают получать такие же услуги, как при фиксированном подключении. Запросы пользователей будут расти по мере роста числа приложений multimedia и расширения совместной работы через сеть.

- 3) Энергетические ограничения. Часть или все узлы сети MANET могут работать от батарей или других источников с ограниченной емкостью. Для таких узлов важную роль играют вопросы экономии энергии.
- 4) Ограниченная защита на физическом уровне. Мобильные беспроводные сети в общем случае менее защищены от физических угроз безопасности, нежели кабельные сети. Следует принимать во внимание более высокую вероятность перехвата и подмены данных, а также атак на отказ служб. Зачастую в беспроводных сетях используются разные методы защиты каналов. Преимуществом является то, что децентрализованное по своей природе управления сетями MANET обеспечивает дополнительную отказоустойчивость по сравнению с централизованными системами.

Кроме того, можно представить некоторые сети (например, мобильные сети военных или автомагистралей), которые будут достаточно велики (например, десятки или сотни узлов на область маршрутизации). Потребность в масштабировании не является уникальной особенностью сетей MANET. Однако, с учетом отмеченных выше особенностей, потребность в механизмах масштабирования становится явной.

Эти характеристики задают набор базовых предположений и задач производительности для устройства протокола, которые выходят за пределы спектра задач, решаемых протоколами маршрутизации в высокоскоростных стационарных сетях с квазистатической топологией.

### 4. Цели рабочей группы IETF Mobile Ad Hoc Network (manet)

Целью недавно организованной рабочей группы IETF manet является разработка средств одноранговой мобильной маршрутизации (peer-to-peer mobile routing) в полностью мобильных беспроводных доменах. Эти средства будут использоваться вне стационарных сетей, где предполагается обычная маршрутизация IP и на расстояниях более одного интервала (hop) от стационарных сетей.

Ближайшей задачей рабочей группы manet является стандартизация одного или нескольких протоколов внутридоменной индивидуальной маршрутизации (unicast) и связанной с этим технологии сетевого уровня, которая:

- обеспечит эффективную работу в контексте различных мобильных сетей (контекст представляет собой набор характеристик мобильной сети и ее окружения);
- поддерживает традиционный сервис IP без организации явных соединений (connectionless);
- эффективно реагирует на изменения топологии и потребности в трафике, сохраняя эффективную маршрутизацию в контексте мобильной сети.

Рабочая группа также будет заниматься вопросами адресации, безопасности и взаимодействия (интерфейсы) с протоколами вышележащих и нижележащих уровней. В долгосрочной перспективе группа может также рассмотреть вопросы реализации мобильных служб на основе разработанной модели маршрутизации. Эти вопросы очевидно будут включать исследование расширений для групповой маршрутизации и качества обслуживания (QoS) в динамических мобильных средах.

## 5. Мобильная маршрутизация на уровне IP

Усовершенствование мобильной маршрутизации на уровне IP может обеспечивать преимущества, похожие на свойства стационарных сетей Internet, а именно, «интероперабельность в неоднородной сетевой инфраструктуре». В данном случае инфраструктура является беспроводной и использует множество разных технологий беспроводной связи, протоколов доступа к каналам и т. п. Усовершенствованная маршрутизация IP и связанные с этим сетевые службы являются связующими для обеспечения целостности мобильных межсетевых сегментов в этой более динамичной среде.

Иными словами, реальное преимущество использования маршрутизации на уровне IP в MANET заключается в обеспечении согласованности на сетевом уровне для сетей с множеством интервалов пересылки (multihop network), состоящих из узлов, на которых применяется «мешанина» из физических сред (т. е. смесь того, что обычно называют подсетями технологии). Узел MANET включает маршрутизатор, который может быть физически подключен к множеству хостов IP (или устройств с адресами IP) и потенциально имеет «множество» беспроводных интерфейсов, на каждом из которых применяется своя беспроводная технология. Таким образом, узел MANET с интерфейсами, использующими технологии A и B, может взаимодействовать с любым другим узлом MANET, имеющим интерфейс с технологией A или B. Многоинтервальная связность технологии A формирует многоинтервальную топологию физического уровня, а многоинтервальная связность технологии B формирует **другую** топологию физического уровня (она может отличаться от топологии для A) и **объединение** этих топологий формирует новую топологию (в терминах теории графов - мультиграф), завершающей «машину маршрутизации IP» сети MANET. Узлы MANET, принимающие решения о маршрутизации с использованием этой «машины», могут обмениваться данными с использованием любой или обеих упомянутых топологий физического уровня. По мере разработки новых технологий физического уровня будут создаваться новые драйверы устройств и к «машине маршрутизации IP» могут добавляться другие многоинтервальные топологии физического уровня. Некоторые старые технологии могут выводиться из обращения. Функциональная и архитектурная гибкость, обеспечиваемая маршрутизацией на уровне IP, будет существенно снижать аппаратные издержки при масштабировании.

Концепция идентификатора узла (node identifier) (не путайте с идентификатором интерфейса) имеет решающее значение для поддержки мультиграфовой топологии машины маршрутизации. Это позволяет **унифицировать** наборы беспроводных интерфейсов и идентифицировать их, как относящиеся к одной мобильной платформе. Идентификаторы узлов используются на уровне IP для маршрутных расчетов.

### 5.1. Взаимодействие со стандартной маршрутизацией IP

На ближайшую перспективу сети MANET сейчас считаются **тупиковыми** (stub) — это означает что весь трафик через узлы MANET адресован в сеть MANET или исходит из нее. Ограниченная пропускная способность и возможные ограничения по питанию не позволяют рассматривать сети MANET в качестве **транзитных** (хотя это ограничение может быть снято по мере развития технологий). Данное ограничение существенно снижает число маршрутов, которые требуется анонсировать для взаимодействия со стационарными сетями Internet. Для оконечной сети маршрутное взаимодействие может в ближайшей перспективе обеспечиваться той или иной комбинацией механизмов типа anycast-передач в масштабе сети MANET и mobile IP. В будущем для такого взаимодействия могут послужить и отличные от mobile IP механизмы.

Взаимодействие со стандартной маршрутизацией IP может быть существенно улучшено за счет использования общей модели адресации MANET во всех протоколах маршрутизации MANET. Разработка такой модели позволит организовать маршрутизацию через среды с множеством технологий, обеспечит возможность поддержки множества хостов на каждом маршрутизаторе, а также гарантирует долгосрочную совместимость за счет присоединения к архитектуре адресации IP. Для поддержки этих функций потребуется лишь идентификация интерфейсов хостов и маршрутизаторов по адресам IP, идентификация маршрутизаторов по отдельному Router ID и возможность поддерживать на маршрутизаторах множество проводных и беспроводных интерфейсов.

## 6. Проблемы протоколов маршрутизации MANET

Для оценки достоинств протокола маршрутизации нужна метрика - как количественная, так и качественная, - которая позволит измерить устойчивость и производительность. Метрика не должна зависеть от какого-либо конкретного протокола маршрутизации.

Ниже приведен список качественных показателей протоколов маршрутизации MANET.

- 1) **Распределенные возможности.** Существенное свойство, которое следует отметить.
- 2) **Отсутствие петель.** Само по себе с учетом некоторых количественных параметров (например, производительности) не требуется, однако весьма желательно для предотвращения таких проблем, как «феномен худшего» (worst-case phenomena), когда, например, небольшая часть пакетов может неограниченно долго перемещаться по сети «кругами». Для решения этой проблемы существуют специальные механизмы (например, TTL), но желательны более структурированные и хорошо сформированные модели, которые обычно обеспечивают более высокую общую производительность.
- 3) **Работа по запросам.** Вместо допущения об однородном распределении трафика по сети (и постоянной поддержки маршрутов ко всем узлам сети) используется адаптация алгоритма маршрутизации к изменению картины трафика по запросам и потребности. Если такая адаптация выполняется достаточно интеллектуально, она позволяет снижать энергопотребление и расход пропускной способности за счет некоторого увеличения времени на поиск маршрутов.
- 4) **Упреждающие действия.** Организация маршрутов по запросам связана с дополнительными задержками, которые могут оказаться в некоторых случаях не приемлемыми. При достаточности энергии для питания и пропускной способности в таких средах могут применяться упреждающие действия по организации маршрутов.
- 5) **Безопасность.** Без тех или иных средств защиты на сетевом и канальном уровне протокол маршрутизации MANET уязвим для многих типов атак. Сравнительно просто можно организовать перехват сетевого трафика, повторное использование сообщения, изменение заголовков пакетов и перенаправление маршрутных сообщений в беспроводных сетях без подходящих мер защиты. Хотя упомянутые проблемы возникают и в

кабельных сетях, а также самих протоколах маршрутизации, поддержка «физической» защиты среды передачи на практике с сетях MANET оказывается сложнее. Желательно обеспечивать защиту, препятствующую нарушению протокольных операций. Это можно в той или иной мере реализовать для любого протокола маршрутизации с помощью внешних средств (например, методов IP Security).

- 6) Работа с «периодами сна». В целях энергосбережения или по иным причинам быть неактивными, узлы MANET могут прекращать передачу и/или прием (на это также расходуется энергия) на произвольные интервалы времени. Протоколу маршрутизации следует приспосабливаться к таким обстоятельствам без возникновения нежелательных последствий. Для этого может потребоваться тесное взаимодействие с канальным уровнем через стандартизованный интерфейс.
- 7) Поддержка односторонних соединений. При разработке алгоритмов маршрутизации обычно предполагается наличие двухсторонних соединений и многие алгоритмы не способны корректно работать через односторонние соединения. Однако в беспроводных сетях односторонние соединения встречаются достаточно часто. При этом обычно имеется достаточно число двухсторонних соединений и односторонние служат лишь дополнением. Однако в ситуациях, когда две части специализированной сети соединяет лишь пара односторонних (с противоположными направлениями) соединений, способность работать по одностороннему каналу становится жизненно важной.

Ниже приведен список количественных параметров, которые могут использоваться для оценки производительности любого протокола маршрутизации.

- 1) Сквозная пропускная способность и задержка. Статистические параметры производительности маршрутизации данных (например, среднее значение, вариации, распределение) достаточно важны. Имеются также характеристики эффективности маршрутной политики (насколько хорошо выполняется работа), оцениваемые с «внешней» точки зрения других правил, которые могут использовать маршрутизацию.
- 2) Время нахождения маршрута. Одна из форм «внешнего» измерения сквозной задержки (особенно важная для алгоритмов маршрутизации «по потребности») - время, требуемое для организации маршрута после его запроса.
- 3) Доля пакетов с нарушением порядка доставки. Внешняя характеристика производительности маршрутизации без организации явных соединений (connectionless routing) особенно интересная для протоколов транспортного уровня типа TCP, которые предпочитают упорядоченную доставку.
- 4) Эффективность. Если эффективность маршрутизации данных является внешним показателем производительности политики, то продуктивность (efficiency) является **внутренней** мерой ее эффективности. Для достижения заданного уровня производительности маршрутизации данных две разных политики могут затрачивать разные количества ресурсов в зависимости от их внутренней эффективности. Эффективность протокола может оказывать прямое или косвенное влияние на производительность маршрутизации данных. Если для данных и управления используется общий канал с ограниченной пропускной способностью, избыточных трафик управления часто оказывает влияние на производительность маршрутизации данных.

Полезно отслеживать несколько коэффициентов которые показывают **внутреннюю** эффективность протокола в части выполнения им своей работы (здесь могут быть и другие коэффициенты, не рассмотренные авторами).

- Среднее отношение переданных/доставленных битов данных может служить мерой эффективности доставки данных в сети. Опосредованно это значение также характеризует среднее число этапов пересылки пакетов данных.
- Среднее отношение переданных битов управления/доставленных битов данных может служить мерой эффективности протокола в части связанных с управлением издержек. Отметим, что в расчет следует включать не только биты пакетов управления маршрутизацией, но и биты заголовков пакетов данных. Иными словами, в числителе дроби учитываются все биты, не относящиеся непосредственно к данным в пакетах.
- Среднее отношение переданных битов данных и управления/доставленных пакетов данных может служить мерой чистой алгоритмической эффективности в плане учета битов. Это отношение служит попыткой охарактеризовать для протокола эффективность доступа к каналу, как стоимость такого доступа на канальном уровне с состязательным доступом к среде передачи.

Требуется также принимать во внимание сетевой **контекст**, в котором оценивается производительность протокола. Ниже перечислены параметры, изменения которых имеют существенное значение.

- 1) Размер сети, определяемый числом узлов.
- 2) Связность - среднее число соседей узла сети.
- 3) Topological rate of change--the speed with which a network's topology is changing
- 4) Емкость каналов - эффективная скорость канала в бит/с с учетом потерь от множественного доступа, кадрирования, кодирования и т. п.
- 5) Влияние односторонних соединений - насколько эффективно протокол работает при наличии односторонних соединений в сети.
- 6) Картина трафика - насколько эффективно протокол адаптируется к неоднородностям и всплескам трафика.
- 7) Мобильность - влияние долгосрочных и краткосрочных изменений топологии сети на производительность протокола маршрутизации.
- 8) Доля «спящих» узлов и продолжительность «сна» - влияние присутствия засыпающих и просыпающихся узлов на работу протокола.

Протокол MANET должен эффективно работать в широком диапазоне сетей — от небольших групп до крупных распределенных систем с множеством интервалов пересылки. В предшествующем обсуждении характеристик и



параметров отмечалось, что сети MANET отличаются от традиционных кабельных сетей с множеством интервалов пересылки. Беспроводные сетевые среды являются скорей дефицитными, чем избыточными в плане пропускной способности и энергии для питания устройств.

В целом возможности сетей MANET являются привлекательными, но требуют поиска технических компромиссов и непростых решений. Множество разных проблем производительности требует разработки новых протоколов для управления сетями.

Возникает вопрос о способах оценки доброкачественности политики. Для решения этого вопроса здесь предложен план вопросов по оценке протокола, позволяющих определить параметры производительности, которые могут помочь при сравнении и оценке работы разных протоколов. Следует отметить, что протокол маршрутизации может хорошо работать в конкретном сетевом контексте, но оказаться неподходящим для другого контекста. При рассмотрении протоколов следует принимать во внимание как преимущества, так и ограничения, которые будут проявляться в конкретном контексте использования протокола. Такие атрибуты протоколов, как правило, могут быть выражены качественно - например, способность протокола поддерживать маршрутизацию по кратчайшему пути. Качественные описания такого типа позволяют квалифицировать множество протоколов и сформировать основу для более детальной количественной оценки производительности протоколов. В будущих документах рабочая группа может по выбору протоколов для сетей MANET. Предполагается, что предложенные в этом документе параметры и методология оценки будут способствовать дальнейшему развитию MANET и решению связанных с этим задач.

## 7. Вопросы безопасности

Мобильные сети в общем случае более подвержены физическим угрозам, нежели стационарные сети с кабельными соединениями. Для снижения уровня угроз в беспроводных сетях часто применяются имеющиеся методы защиты канального уровня (например, шифрование). При отсутствии шифрования на канальном уровне одним из важнейших вопросов становится аутентификация маршрутизаторов до начала обмена управляющей информацией. Рабочая группа исследовала несколько уровней аутентификации, начиная от ее полного отсутствия и до использования полнофункциональной инфраструктуры управления открытыми ключами. В качестве дополнительного результата работы группы могут быть стандартизованы несколько необязательных режимов аутентификации для применения в сетях MANET.

## 8. Литература

[1] Adamson, B., "Tactical Radio Frequency Communication Requirements for IPng", RFC 1677, August 1994.

### Адреса авторов

#### M. Scott Corson

Institute for Systems Research

University of Maryland

College Park, MD 20742

Phone: (301) 405-6630

E-Mail: [corson@isr.umd.edu](mailto:corson@isr.umd.edu)

#### Joseph Macker

Information Technology Division

Naval Research Laboratory

Washington, DC 20375

Phone: (202) 767-2001

E-Mail: [macker@itd.nrl.navy.mil](mailto:macker@itd.nrl.navy.mil)

### Перевод на русский язык

#### Николай Малых

[nmalykh@gmail.com](mailto:nmalykh@gmail.com)

### Полное заявление авторских прав

Copyright (C) The Internet Society (1999). All Rights Reserved.

This document and translations of it may be copied and furnished to others, and derivative works that comment on or otherwise explain it or assist in its implementation may be prepared, copied, published and distributed, in whole or in part, without restriction of any kind, provided that the above copyright notice and this paragraph are included on all such copies and derivative works. However, this document itself may not be modified in any way, such as by removing the copyright notice or references to the Internet Society or other Internet organizations, except as needed for the purpose of developing Internet standards in which case the procedures for copyrights defined in the Internet Standards process must be followed, or as required to translate it into languages other than English.

The limited permissions granted above are perpetual and will not be revoked by the Internet Society or its successors or assigns.

This document and the information contained herein is provided on an "AS IS" basis and THE INTERNET SOCIETY AND THE INTERNET ENGINEERING TASK FORCE DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY THAT THE USE OF THE INFORMATION HEREIN WILL NOT INFRINGE ANY RIGHTS OR ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.