

Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Факультет радиотехники и кибернетики
Кафедра проблем передачи и обработки информации

Работа допущена к защите
зав. кафедрой

_____ акад. РАН Кулешов А.П.

«_____» _____ 2012 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ
РАБОТА
на соискание ученой степени
БАКАЛАВРА**

Тема: **Аналитическое исследование протокола управления
соединениями NHDP**

Направление: 010600 – Прикладные математика и физика

Выполнил студент гр. 811 _____ Островский Д.М.

Научный руководитель,

к. т. н.

_____ Сафонов А.А.

Москва – 2012

Содержание

Введение	3
Глава 1. Постановка задачи	6
1.1. Краткое описание протокола NHDP	6
1.2. Обзор существующих методов исследования	8
1.3. Показатели эффективности протокола NHDP и постановка задачи	11
Глава 2. Аналитическая модель	16
2.1. Принятые допущения	16
2.2. Определение вероятности нахождения соединения в состоянии <i>SYM</i>	17
2.3. Определение средней длительности состояния <i>SYM</i>	20
2.4. Оценка точности модели	23
Глава 3. Применение модели	25
3.1. Настройка протокола NHDP	25
3.2. Сравнение протоколов NHDP и MPM	26
3.2.1. Описание протокола MPM	26
3.2.2. Сравнительный анализ NHDP и MPM	29
Заключение	35
Литература	36

Введение

Одним из направлений развития беспроводных сетей передачи данных, привлекающим значительный интерес как исследователей, так и разработчиков, является создание многошаговых беспроводных самоорганизующихся сетей (МБСС) на базе семейства стандартов IEEE 802.11 [1]. Одной из главных задач, возникающих при построении такого рода сетей, является задача маршрутизации. На момент написания работы решение данной задачи при построении МБСС на базе семейства стандартов IEEE 802.11 возможно в рамках двух альтернативных парадигм. Первая из них предполагает маршрутизацию на MAC-уровне и может быть реализована в рамках стандарта IEEE 802.11s [2]. Альтернативный вариант – маршрутизация на сетевом уровне с использованием технологии MANET (англ.: Mobile Ad-hoc NETWORKS) [3].

Передача данных по беспроводному каналу имеет ряд особенностей, усложняющих маршрутизацию. В первую очередь это высокий уровень помех, характерный для беспроводной среды. Кроме того, для сетей, построенных на базе технологии IEEE 802.11, использующей метод случайного доступа к среде CSMA/CA (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), характерны коллизии – одновременные передачи пакетов разными станциями, в результате которых принимающая станция не может декодировать эти пакеты. В многошаговых сетях вероятность коллизий многократно возрастает из-за эффекта «скрытых станций» [4], в результате чего в таких сетях вероятность p успешной передачи пакета между парой станций может быть существенно меньше единицы, в отличие от проводных сетей, где она близка к 1. Наконец, изменение уровня шума в канале и движение станций приводит к тому, что p меняется со временем.

Одним из проактивных протоколов маршрутизации, широко используемых в сетях MANET, является протокол OLSR (англ.: Optimized Link-State Routing) [5]. Работая в рамках данного протокола, станции сети регулярно производят ши-

роковещательную рассылку информации о соединениях с соседними станциями. На основании данной информации каждая станция сети получает представление о сети в виде ориентированного графа, вершины которого являются станциями, а дуги представляют собой соединения, которые могут использоваться для передачи пользовательского трафика. После этого на каждой из станций производится расчет кратчайших маршрутов до остальных станций на основании текущего состояния графа.

Для представления сети в виде графа необходимо на каждой станции сети поддерживать список соседних с ней станций, а также список соединений, которые могут быть использованы при передаче пользовательских данных. Решение данной задачи может требоваться, в частности, в условиях постоянно меняющихся вероятностей успешной передачи сообщения p между парами станций сети. Протокол OLSR включает в себя механизм управления соединениями (МУС), решающий поставленную задачу. МУС, входящий в состав протокола OLSR, в ходе своего развития воплотился в отдельный протокол управления соединениями NHDP (англ.: NeighborHood Discovery Protocol) [6]. МУС также используются рядом других протоколов. В частности, собственным механизмом управления соединениями обладает протокол маршрутизации TBRPF (англ.: Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding) [7], предложенный в рамках технологии MANET, а в сетях стандарта IEEE 802.11s [2] функции МУС возложены на протокол Mesh Peering Management protocol (MPM).

В данной работе проведено исследование протокола NHDP. Основной целью исследования является построение аналитических моделей данного протокола, пригодных для таких приложений, как настройка протокола по ряду показателей эффективности, а также сравнительный анализ данного протокола и других МУС.

Работа имеет следующую структуру.

В главе 1 приведено описание протокола NHDP, сформулированы задачи ис-

следования, сделан обзор существующей литературы, введены показатели эффективности для исследуемого протокола.

В главе 2 с помощью аппарата теории вероятностей построена аналитическая модель протокола NHDP. В этой же главе продемонстрированы результаты валидации построенной модели с помощью имитационного моделирования в среде ns-3 [8].

В главе 3 приведены примеры применения аналитической модели. Продемонстрирована процедура настройки протокола, позволяющая значительно повысить эффективность его работы при заданных требованиях на характеристики открываемых соединений, а также проведен сравнительный анализ протоколов NHDP и MPM. Отметим, что для данного сравнительного анализа использовались математические модели протокола MPM, описанные в работе [9].

На защиту в данной работе вынесены следующие положения.

- Разработана аналитическая модель протокола NHDP для оценки его эффективности.
- С помощью разработанной модели проведен сравнительный анализ протоколов NHDP и MPM.

Постановка задачи

1.1. Краткое описание протокола NHDP

Для обнаружения соседей и управления соединениями бóльшая часть известных МУС использует рассылку специальных служебных сообщений. В случае протокола NHDP такие сообщения носят название HELLO-сообщений. Каждая станция генерирует и рассылает HELLO-сообщения периодически, с периодом HELLO_INTERVAL. Рассылка производится широковещательно на 1 шаг (то есть HELLO-сообщения не ретранслируются). Как уже упоминалось выше, в беспроводной среде сообщение может быть потеряно не только из-за низкого уровня сигнала и шума, но и из-за коллизий – одновременной передачи пакетов разными станциями. При строгой периодичности рассылки HELLO-сообщений может наблюдаться ситуация, когда HELLO-сообщения станций постоянно попадают в коллизию с другими HELLO-сообщениями. Чтобы избежать таких коллизий и повысить надежность передачи HELLO-сообщений, они посылаются с небольшой случайной задержкой, называемой джиттером.

Каждая станция использует статистику HELLO-сообщений, принятых от соседних станций, а также содержащуюся в этих HELLO-сообщениях информацию для принятия решений о смене состояний соединения с этими станциями. Согласно спецификации NHDP [6], соединение между парой образующих его соседних станций может, с точки зрения каждой из них, находиться в одном из трех состояний, которые мы будем обозначать следующим образом:

- *L* (LOST) – соединение закрыто или отсутствует;
- *H* (HEARD) – однонаправленное соединение;

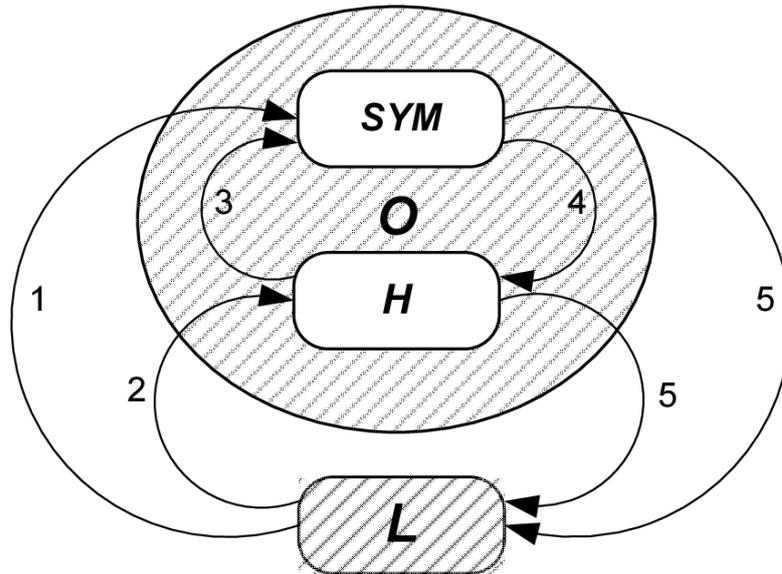


Рис. 1.1. Диаграмма состояний протокола NHDp

- *SYM* (SYMMETRIC) – двунаправленное соединение; только такие соединения используются протоколом маршрутизации OLSR.

Отметим, что протокол NHDp *не синхронизирует состояние соединения*, то есть в один и тот же момент времени состояния соединения с точки зрения образующих его станций могут быть различными. Для удобства будем, говоря о соединении между парой станций, называть состояние соединения с точки зрения одной из станций *состоянием этой станции*, при этом подразумевая, что термин «состояние станции» относится только к рассматриваемому соединению.

Рассмотрим соединение между двумя станциями сети *A* и *B* и опишем правила, по которым станция, для определенности *A*, принимает решения об изменении своего состояния (соответствующая диаграмма состояний протокола изображена на рис. 1.1).

0. Если станция *A* находится в любом из состояний *H*, *SYM*, то она указывает в своих HELLO-сообщениях адрес станции *B*. Находясь в состоянии *L*, станция *A* не указывает в своих HELLO-сообщениях адрес станции *B*.

1. Если станция A , находясь в состоянии L , получила от станции B r HELLO-сообщений подряд, причем последнее из этих HELLO-сообщений содержало адрес станции A , то A переходит в состояние SYM .
2. Если станция A , находясь в состоянии L , получила от станции B r HELLO-сообщений подряд, причем последнее из этих HELLO-сообщений не содержало адреса станции A , то A переходит в состояние H .
3. Если станция A , находясь в состоянии H , получает от станции B HELLO-сообщение, содержащее адрес A , то станция A переходит в состояние SYM .
4. Если станция A , находясь в состоянии SYM , получает от станции B HELLO-сообщение, не содержащее адреса A , то станция A переходит в состояние H .
5. Если станция A , находясь в любом из состояний H , SYM , не получает HELLO-сообщений от станции B в течение $NEIGH_HOLD_TIME$ (фактически это означает, что $s = \lfloor \frac{NEIGH_HOLD_TIME}{HELLO_INTERVAL} \rfloor$ HELLO-сообщений от станции B подряд потеряно), то A переходит в состояние L .

Отметим, что в текущей версии протокола NHDP принято $r = 1$, однако в данной работе рассмотрен общий случай произвольного r , что позволяет наилучшим образом настроить протокол.

1.2. Обзор существующих методов исследования

Среди множества работ, посвященных проблеме маршрутизации в беспроводных сетях, лишь относительно небольшое количество затрагивает тему управления соединениями. Следует выделить несколько работ, посвященных оценке эффективности протокола NHDP, а также других МУС.

В работе [10] изучается влияние значения интервала $HELLO_INTERVAL$ на пропускную способность сети. Уменьшение этого интервала влечет более быстрое

обнаружение соседей, но также и резкий рост объема служебного трафика из-за большего числа генерируемых HELLO-сообщений (HELLO-сообщения могут иметь значительный размер, так как содержат список всех станций, с которыми у станции-отправителя установлено соединение).

В работе [11] для сетей с высокой мобильностью станций предложено использовать, наряду с обычными, укороченные HELLO-сообщения и передавать такие сообщения с большей частотой, чем сообщения стандартной длины. Станциям сети предоставляется возможность открывать соединения, обмениваясь коротким HELLO-сообщением. Такие соединения предложено закрывать при потере одного короткого HELLO-сообщения, чтобы повысить скорость реакции протокола на изменение топологии сети, вызванное мобильностью станций. Однако принятие решения о закрытии соединения при потере одного HELLO-сообщения (в сочетании с открытием соединения по одному HELLO-сообщению, как это принято в текущей версии спецификации NHDP [6]) приводит к частым изменениям состояния соединения, что негативно сказывается на возможности его использования для маршрутизации пакетов.

В большинстве работ, посвященных МУС, эффективность механизма управления соединениями оценивается с помощью имитационного моделирования на основе таких интегральных показателей, как емкость сети, среднее время доставки пакета от источника до получателя и др. В этом случае эффективность собственно МУС оценивается лишь косвенно, так как, например, на емкость сети сильное влияние оказывает работа всего протокола маршрутизации, а не только используемый МУС.

Одна из первых попыток разработки аналитической модели МУС и оценки эффективности собственно МУС предпринята в работе [12], посвященной управлению соединениями в сетях, построенных по технологии IEEE 802.11s [2], в которых за управление соединениями отвечает уже упоминавшийся выше протокол Mesh Peering Management (MPM). В данной работе вводятся такие понятия, как за-

держка при открытии соединения (интервал времени между попаданием станции в область уверенного приема другой станции и моментом установления соединения между ними), задержка при обнаружении разрыва соединения (интервал времени между моментом физического разрыва соединения и логическим закрытием соединения обеими станциями), время жизни соединения (интервал времени между открытием и закрытием соединения), и исследуются различные схемы передачи биконов (кадров, аналогичных HELLO-сообщениям). Рассмотрены схемы, когда интервал передачи биконов фиксирован и когда он имеет экспоненциальное распределение. Показано, что схема с фиксированным интервалом эффективнее с точки зрения предложенных показателей. Недостатком разработанной в [12] модели является принятая в ней грубая модель распространения сигнала в среде: когда станции сближаются на заданное расстояние, вероятность p успешного приема сообщения скачкообразно изменяется от нуля до единицы. В реальной беспроводной среде вероятность p зависит от сообщения сигнал-шум, плавно уменьшается с увеличением расстояния между станциями и всегда меньше единицы. Кроме того, в работе [12] не учтены возможные коллизии биконов.

Указанного недостатка лишена работа [9], также посвященная анализу протокола MPM. В ней предполагается, что p может принимать произвольные значения в диапазоне $[0, 1]$. В этой работе вводятся показатели эффективности для протокола MPM, а также предлагается аналитическая модель протокола MPM и ряда оригинальных МУС на его основе. Важную роль играет следующий факт: введенные в работе [9] показатели эффективности, фактически, могут быть применены для любого МУС, в основе которого лежит периодическая рассылка сигнальных сообщений, а также принятие решений об изменении состояния соединения по некоторому числу потерянных/пропущенных сигнальных сообщений (и на основе некоторой содержащейся в них информации).

В следующем разделе описаны использованные в данной работе показатели эффективности для протокола NHDP, полученные по аналогии с показателями,

предложенными для протокола MPM в работе [9]. Аргументация применения данных показателей, по существу, повторяет приведенную в работе [9].

1.3. Показатели эффективности протокола NHDP и постановка задачи

Вне зависимости от способа реализации МУС к нему предъявляются требования относительно качества открытых соединений.

Во-первых, открытые соединения должны быть надежными, то есть обеспечивать высокую вероятность p успешной попытки передачи пакета по ним¹. Это требование обусловлено наличием в стандарте IEEE 802.11 ограничения сверху на число неудачных попыток передач, что не позволяет передавать полезные данные с требуемым качеством обслуживания по соединениям с малыми значениями p . Кроме того, использование соединений с низкой вероятностью успешной попытки передачи пакета приводит к большим расходам ресурсов канала и задержкам при передаче пакета в результате большого числа неудачных передач соответствующего пакету кадра (кадров) на MAC-уровне.

Во-вторых, открываемые соединения должны быть стабильными: не должно происходить постоянных открытий и закрытий соединения между одной и той же парой станций. Приведем два обоснования данного требования. Первое из них заключается в том, что частые открытия и закрытия соединения приводят к неизбежному увеличению доли служебного трафика и, как следствие, к росту загруженности канала. Второе обоснование: если состояние соединения меняется быстрее, чем информация о графе сети успевает дойти до всех ее станций, то часть станций сети неизбежно обладает неверной информацией о ее топологии, что снижает эффективность маршрутизации.

¹ В данной работе принято допущение о том, что вероятность успешной попытки передачи одинакова для всех пакетов, в том числе и HELLO-сообщений, и не зависит от длины пакета.

В третьих, решение об открытии соединения должно приниматься как можно быстрее после того, как соответствующие станции попали в область уверенного приема друг друга, чтобы успеть передать друг другу как можно больше полезной информации.

Использование соединений, не удовлетворяющих данным требованиям, приводит к росту вероятности ошибок маршрутизации, а также к более частым потерям потеря пакетов, что, как показано в работе [13], значительно снижает эффективность сети.

Вероятность π обнаружить соединение в открытом состоянии определяется как

$$\pi = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} T_{open}^{(i)}}{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} T_{open}^{(i)} + \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} T_{close}^{(i)}}, \quad (1.1)$$

где t – время наблюдения за состоянием соединения, N_1, N_2 – число промежутков, в течение которых соединение за время наблюдения было, соответственно, открыто и закрыто, а $T_{open}^{(i)}, T_{close}^{(i)}$ – длительности интервалов времени, в течение которых на i -ых промежутках соединение было, соответственно, открыто и закрыто. Так как за промежутком, на протяжении которого соединение открыто, следует промежуток, на протяжении которого соединение закрыто, и наоборот, то при достаточно большом времени наблюдения можно положить $N_1 = N_2 = N$ и, следовательно,

$$\pi = \frac{\langle T_{open} \rangle}{\langle T_{open} \rangle + \langle T_{close} \rangle}, \quad (1.2)$$

где $\langle T_{open} \rangle$ – среднее время жизни соединения, то есть среднее время, в течение которого соединение остается открытым после того, как оно было открыто, $\langle T_{close} \rangle$ – среднее время, в течение которого соединение остается в закрытом состоянии после того, как было закрыто. Заметим, что величины $\langle T_{open} \rangle, \langle T_{close} \rangle$ и, соответственно, π являются функциями p , однако для упрощения записи мы часто

будет опускать символ “р”, помня, что $\langle T_{open} \rangle \equiv \langle T_{open} \rangle(p)$, $\langle T_{close} \rangle \equiv \langle T_{close} \rangle(p)$ и $\pi \equiv \pi(p)$.

Формализуем требования, предъявляемые к механизму управления соединениями, и введем на их основании параметры, характеризующие его эффективность.

Надежность соединений. Открываемые соединения должны быть надежными: МУС должен открывать те и только те соединения, которые обеспечивают вероятность p успешной передачи пакета не ниже заранее заданного порогового значения p_0 . Вероятность π того, что соединение открыто, также является средней долей времени, которую соединение проводит в открытом состоянии. Процесс изменения состояния соединения является случайным, так как решения об изменениях состояния соединения происходит на основании случайных событий – удачных либо неудачных передач HELLO-сообщений. Поэтому требование надежности МУС с учетом принципиальной случайности процесса открытия соединения должно быть переформулировано на вероятностном языке:

$$\pi(p) > \frac{1}{2} \Leftrightarrow p > p_0, \quad (1.3)$$

Данное требование опирается также на тот факт, что при $\pi > \frac{1}{2}$ соединение с большей вероятностью открыто, при $\pi < \frac{1}{2}$ соединение с большей вероятностью закрыто. Если для некоторого МУС установлено, что функция $\pi(p)$ является непрерывной и строго монотонно возрастающей, то, очевидно, (1.3) эквивалентно

$$\pi(p_0) = \frac{1}{2}. \quad (1.4)$$

Оценка надежности открытых соединений возможна, если при фиксированных значениях настраиваемых параметров протокола найти функцию $\pi(p)$, после чего (по крайней мере, численно) решить неравенство 1.3 (либо уравнение 1.4).

Работая в рамках протокола NHDP, станция использует для маршрутизации только двунаправленные соединения, т. е. соединения, которым на данной

станции присвоено состояние SYM . Следовательно, для оценки надежности открытых соединений следует найти вероятность P_{SYM} того, что соединение находится в состоянии SYM , как функцию параметров протокола r , s и вероятности успешной передачи HELLO-сообщения p . В главе 2 обоснован тот факт, что в рамках принятых допущений величина $P_{SYM}(p)$ является монотонно возрастающей непрерывной функцией p , поэтому уравнение $P_{SYM}(p_0) = \frac{1}{2}$ имеет единственное решение.

Для дальнейших рассуждений понадобится следующее определение. Будем говорить, что станция находится в состоянии \overline{SYM} , если она находится в каком-либо из состояний L или H , т. е. в состоянии, отличном от SYM . Пусть $\langle T_{SYM} \rangle$ и $\langle T_{\overline{SYM}} \rangle$ – средние длительности состояний SYM и \overline{SYM} соответственно. Тогда вероятность нахождения станции в состоянии SYM определяется выражением

$$P_{SYM} = \frac{\langle T_{SYM} \rangle}{\langle T_{SYM} \rangle + \langle T_{\overline{SYM}} \rangle}, \quad (1.5)$$

полученным из тех же соображений, что и выражение (1.2).

Стабильность соединений. Не должно быть частых смен состояния соединения с активного (при котором соединение может использоваться для маршрутизации пользовательского трафика) на неактивное и наоборот. Только в таком случае информация о том, пригодно ли данное соединение для маршрутизации пакетов, будет актуальной. Для протокола NHDP данное требование означает отсутствие частых переходов между состояниями SYM и \overline{SYM} .

Назовем флуктуацией состояния частоту переходов между состояниями SYM и \overline{SYM} :

$$g = \frac{1}{\langle T_{SYM} \rangle + \langle T_{\overline{SYM}} \rangle}. \quad (1.6)$$

Чем меньше g , тем стабильнее соединение, так как малые значения одновременно $\langle T_{SYM} \rangle$ и $\langle T_{\overline{SYM}} \rangle$ означают частые переходы между состояниями SYM и \overline{SYM} , т.е. нестабильность данного соединения. Величина $\frac{1}{g}$ представляет собой средний

промежуток времени между последовательными переходами соединения в состояние *SYM*. Для того чтобы сетевая информация о соединениях была актуальна и соединение могло использоваться для маршрутизации пакетов, требуется выполнение условия:

$$\frac{1}{g} > T_{Update} + T_{NetTraversal},$$

где T_{Update} – период генерации каждой из станций сообщений

TOPOLOGY_CONTROL, посредством которых в рамках использующего данный МУС протокола маршрутизации OLSR по сети распространяется информация о соединениях, а $T_{NetTraversal}$ – время распространения этих сообщений.

Быстрота открытия соединений. МУС открывает соединения как можно быстрее после того, как вероятность p успешной попытки передачи пакета превысит пороговое значение p_0 . Для этого решение об открытии соединений должно приниматься по минимальному числу r полученных HELLO-сообщений:

$$r \longrightarrow \min. \quad (1.7)$$

Для определения значений введенных показателей эффективности в зависимости от параметров протокола r , s и вероятности успешной передачи пакета p в следующих двух главах разработаны аналитические модели.

TODO: дописать саму постановку задачи!!!

Глава 2

Аналитическая модель

В данной главе приведена оригинальная аналитическая модель процесса принятия решений об изменении состояния соединения, находящегося под управлением протокола NHDP. Модель была описана автором настоящего исследования в работе [14]. С ее помощью может быть найдена вероятность P_{SYM} того, что соединение в произвольно выбранный момент времени находится в состоянии SYM , а также средняя длительность $\langle T_{SYM} \rangle$ состояния SYM . При известных значениях P_{SYM} и $\langle T_{SYM} \rangle$, учитывая (1.5) и (1.6), значение g определяется по формуле

$$g = \frac{P_{SYM}}{\langle T_{SYM} \rangle}. \quad (2.1)$$

План изложения следующий.

В разделе 2.1 приведены допущения модели. В следующих двух разделах найдены величины P_{SYM} и $\langle T_{SYM} \rangle$. Наконец, в разделе 2.4 продемонстрированы результаты валидации модели, выполненной с помощью имитационного моделирования в среде ns-3 [8].

2.1. Принятые допущения

При разработке аналитической модели будем считать, что каждая станция генерирует HELLO-сообщения с нулевым джиттером, то есть строго периодически, через равные интервалы времени, длительность которых принимается равной единице.

Также будем считать, что успешные передачи HELLO-сообщений участвующими в фиксированном соединении станциями – независимые в совокупности события, каждое из которых происходит с вероятностью p , одинаковой для обеих

станций и не зависящей от длины HELLO-сообщения.

2.2. Определение вероятности нахождения соединения в состоянии SYM

Рассмотрим соединение между двумя фиксированными станциями A и B . Объединим состояния H и SYM каждой станции в состояние O . Вначале мы найдем вероятность P_O того, что станция, для определенности – A , находится в состоянии O , а затем найдем вероятность P_{SYM} того, что A находится в состоянии SYM .

При нахождении P_O обратим внимание на то, что обе станции совершают переходы между состояниями L и O независимо друг от друга, так как эти переходы зависят только от получения или потери HELLO-сообщения, а не от его содержимого: станция переходит из L в O при последовательном получении r HELLO-сообщений; станция совершает обратный переход при потере подряд s HELLO-сообщений.

Эволюцию состояния каждой из станций (A и B) удобно представить процессом с дискретным временем. Процесс $J_{OL}(t)$ перехода между состояниями O и L является On/Off-процессом [15], для которого справедливо соотношение:

$$P_O = \frac{\langle T_O \rangle}{\langle T_O \rangle + \langle T_L \rangle}, \quad (2.2)$$

поэтому определить P_O можно, зная средние длительности $\langle T_O \rangle$ и $\langle T_L \rangle$ состояний O и L соответственно. Вначале найдем $\langle T_O \rangle$.

Утверждение 1: *Длительность $\langle T_O \rangle$ состояния O определяется выражением:*

$$\langle T_O \rangle = \frac{1 - (1 - p)^s}{p(1 - p)^s}. \quad (2.3)$$

◦ **Доказательство.** Пусть в начальный момент $t_0 = 0$ времени станция A

принимает HELLO-сообщение от станции B и переходит в состояние O . Изменение состояния станции удобно представить в виде марковского процесса $J_O(t)$, с поглощающим состоянием L и непоглощающими состояниями $O^{(j)}$, где индекс j принимает неотрицательные целые значения $0, \dots, s - 1$ и указывает, сколько последних HELLO-сообщений было потеряно подряд. Средняя длительность этого процесса равна $\langle T_O \rangle$.

Назовем **циклом** процесса $J_O(t)$ подпроцесс, начинающийся с состояния $O^{(0)}$, заканчивающийся первым приходом либо в состояние $O^{(0)}$, либо в поглощающее состояние. Будем говорить, что цикл **удачный**, если он оканчивается состоянием $O^{(0)}$. В противном случае, т.е. когда цикл оканчивается поглощающим состоянием, он **неудачный**.

Так как внутри цикла HELLO-сообщения не принимаются, то удачный цикл может иметь длительность от 1 до s , а длительность неудачного цикла всегда равна s . Чтобы цикл был неудачным, s HELLO-сообщений должны быть потеряны. Это происходит с вероятностью $(1 - p)^s$. С вероятностью $1 - (1 - p)^s$ цикл оказывается удачным. Цикл имеет длительность $k, k = \overline{1, s}$, при условии, что он удачный, с вероятностью:

$$p_k = \frac{(1 - p)^{k-1} p}{1 - (1 - p)^s}.$$

Для определения средней длительности процесса $J_O(t)$ применим аппарат производящих функций. Вначале запишем производящие функции, соответствующие длительностям удачного и неудачного циклов, а также числу циклов в процессе. Затем запишем производящую функцию для длительности процесса и найдем значение $\langle T_O \rangle$.

Производящая функция $f(z)$ для распределения длительности удачного цикла, равна:

$$f(z) = \sum_{k=1}^s p_k z^k = \sum_{k=1}^s \frac{p(1 - p)^{k-1} z^k}{1 - (1 - p)^s} = \frac{pz(1 - z^s(1 - p)^s)}{(1 - (1 - p)^s)(1 - z(1 - p))}.$$

Производящая функция $g(z)$ для длительности неудачного цикла равна:

$$g(z) = z^s.$$

Процесс $J_O(t)$ состоит из нескольких удачных циклов и одного неудачного. Так как вероятность того, что произвольный цикл оказался неудачным, равна $\pi = (1 - p)^s$, то вероятность того, что число удачных циклов в процессе $J_O(t)$ равно m , определяется выражением $\pi(1 - \pi)^m$, то есть число удачных циклов имеет геометрическое распределение с вероятностью успеха π и производящую функцию:

$$F(z) = \frac{\pi}{1 - (1 - \pi)z} = \frac{(1 - p)^s}{1 - (1 - (1 - p)^s)z}.$$

Производящая функция суммарной длительности всех удачных циклов равна $F(f(z))$, так как число m удачных циклов – случайная величина, независимая в совокупности с длительностями этих циклов [16]. Следовательно, производящая функция длительности всего процесса определяется выражением:

$$\Omega_0(z) = F(f(z)) \cdot g(z) = \frac{(1 - p)^s(1 - z(1 - p))z^s}{1 - z + z^{s+1}p(1 - p)^s}.$$

Так как математическое ожидание $\langle T_O \rangle$ длительности процесса $J_O(t)$ равно производной ее производящей функции в единице, то, дифференцируя последнее равенство, получаем (2.3). Доказательство завершено. •

Заменяя в приведенном выше доказательстве O на L , p на $1 - p$ и s на r , получаем следующее утверждение.

Утверждение 2: Длительность $\langle T_L \rangle$ состояния L определяется выражением:

$$\langle T_L \rangle = \frac{1 - p^r}{(1 - p)p^r}. \quad (2.4)$$

Зная $\langle T_O \rangle$ и $\langle T_L \rangle$, определяем P_O по формуле (2.2), а затем P_{SYM} с помощью следующего утверждения.

Утверждение 3: Вероятность P_{SYM} нахождения станции в состоянии SYM определяется формулой:

$$P_{SYM} = P_O^2. \quad (2.5)$$

○ **Доказательство.** Станция A находится в состоянии SYM тогда и только тогда, когда выполняются оба условия:

1. станция A находится в состоянии O ;
2. станция B находилась в состоянии O в момент, когда станция A последний раз успешно приняла HELLO-сообщение от B .

Вероятность каждого из этих событий равна P_O . Из независимости событий 1 и 2 следует справедливость доказываемого утверждения. •

2.3. Определение средней длительности состояния SYM

Рассмотрим независимые On/Off-процессы $J_O^{(A)}(t)$ и $J_O^{(B)}(t)$ изменения состояния соответственно станций A и B и построим процесс $J_{SYM^*}(t)$ переходов между состояниями SYM^* и $\overline{SYM^*}$. Процесс $J_{SYM^*}(t)$ находится в состоянии SYM^* тогда и только тогда, когда оба процесса $J_O^{(A)}(t)$ и $J_O^{(B)}(t)$ находятся в состоянии O ; в остальных случаях он находится в состоянии $\overline{SYM^*}$.

$J_{SYM^*}(t)$ примерно соответствует процессу $J_{SYM}(t)$ переходов станции A между состояниями SYM и \overline{SYM} . Расхождение происходит в следующих случаях. При переходе станции B в состояние O станция A узнает об этом только тогда, когда получает очередное HELLO-сообщение от B . Другими словами, станция A переходит в состояние SYM с некоторой задержкой, причем средняя длительность

этой задержки будет тем больше, чем меньше p . С аналогичной задержкой происходит выход станции A из состояния SYM , если он вызван выходом станции B из состояния O . Как показано в ходе численного моделирования в разделе 2.4, эти задержки в значительной степени компенсируют друг друга, и оценить среднюю длительность $\langle T_{SYM} \rangle$ состояния SYM с высокой точностью можно по средней длительности $\langle T_{SYM^*} \rangle$ состояния SYM^* процесса $J_{SYM^*}(t)$. Другими словами, в рамках данной модели мы пренебрежем описанными выше «краевыми эффектами» – задержками перехода соединения в состояние SYM и из этого состояния на одной из образующих соединение станций относительно другой.

Следующее утверждение дает среднюю длительность состояния SYM^* процесса $J_{SYM^*}(t)$.

Утверждение 4: Пусть $J_O^{(A)}(t)$ и $J_O^{(B)}(t)$ – 2 независимых On/Off-процесса с одной и той же функцией распределения $F_O(t) = Pr\{T_O \leq t\}$ и математическим ожиданием $\langle T_O \rangle$ длительности состояния O , $J_{SYM^*}(t)$ – процесс, построенный описанным выше способом. Тогда математическое ожидание длительности $\langle T_{SYM^*} \rangle$ состояния SYM^* определяется выражением

$$\langle T_{SYM^*} \rangle = \frac{\langle T_O \rangle}{2}.$$

◦ **Доказательство.** Пусть функция распределения $F(t)$ соответствует дискретному распределению f_t длительности T_O интервалов, в которые процесс $J_O^{(B)}(t)$ находится в состоянии O .

Пусть в момент t_0 процесс $J_{SYM^*}(t)$ перешел в состояние SYM^* . Не нарушая общности, предположим, что в этот момент процесс $J_O^{(A)}(t)$ перешел в состояние O , а процесс $J_O^{(B)}(t)$ уже находился в состоянии O . Рассмотрим интервал времени, который включает t_0 , и в течение которого процесс $J_O^{(B)}(t)$ находится в состоянии O . Условная вероятность того, что этот интервал имеет длительность τ , при условии, что t_0 принадлежит этому интервалу, равна $\frac{\tau f_\tau}{\langle T_O \rangle}$.

Так как процессы $J_O^{(A)}(t)$ и $J_O^{(B)}(t)$ независимы, t_0 равновероятно соответствует любой точке этого интервала, поэтому плотность $g(t)$ вероятности того, что оставшаяся часть интервала имеет длительность t , равна:

$$g(t) = \sum_{\tau \leq t} \frac{\tau f_\tau}{\langle T_O \rangle} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{(1 - F(t))}{\langle T_O \rangle}.$$

Плотности распределения $g(t)$ соответствует функция распределения

$$G(t) = \frac{1}{\langle T_O \rangle} \int_0^t (1 - F(x)) dx.$$

Выход процесса $J_{SYM^*}(t)$ из состояния SYM^* произойдет по первому выходу из состояния O хотя бы одного из процессов $J_O^{(A)}(t)$ и $J_O^{(B)}(t)$. Следовательно, вероятность того, что длительность состояния SYM^* будет больше x , равна:

$$(1 - F(x)) \cdot (1 - G(x)),$$

откуда по свойствам неотрицательных случайных величин [16] имеем:

$$\langle T_{SYM^*} \rangle = \int_0^\infty (1 - F(x)) (1 - G(x)) dx.$$

Так как $\frac{d}{dx} (1 - G(x)) = -\frac{1 - F(x)}{\langle T_O \rangle}$, получаем:

$$\langle T_{SYM^*} \rangle = -\frac{\langle T_O \rangle}{2} \cdot (1 - G(x))^2 \Big|_0^\infty = \frac{\langle T_O \rangle}{2},$$

что и требовалось доказать. •

Таким образом,

$$\langle T_{SYM^*} \rangle = \frac{\langle T_O \rangle}{2} = \frac{1 - (1 - p)^s}{2p(1 - p)^s}. \quad (2.6)$$

Простая модель построена: применяя (2.1)–(2.6), находим значения искомых показателей эффективности протокола NHDP.

2.4. Оценка точности модели

Чтобы оценить точность разработанной аналитической модели, проведено сравнение ее результатов с результатами, полученными при имитационном моделировании в среде ns-3 [8]. В ходе имитационного моделирования рассматривалась пара Wi-Fi-станций со значениями параметров протокола канального уровня, соответствующими стандарту IEEE 802.11a [1]. Станции находились на таком расстоянии друг от друга, что вероятность успешной попытки передачи пакета была равна p . Состояние соединения наблюдалось в течение 20000 секунд, что соответствует 10^4 HELLO_INTERVAL. Для получения статистически значимых результатов было проведено 50 прогонов, в ходе которых получены значения $\langle T_{SYM} \rangle$ и P_{SYM} . На рис. 2.1 изображена зависимость $\langle T_{SYM} \rangle(p)$. Видно, что при $p > 0,5$ результаты аналитического моделирования (линии) с высокой точностью соответствуют результатам имитационного моделирования (точки). Вызвано это, во-первых, малостью «краевых эффектов» (средние времена задержек открытия и закрытия соединения при достаточно больших p весьма малы), а, во-вторых, слабостью предположения об отсутствии джиттера при рассылке HELLO-сообщений (фактические интервалы между посылкой последовательных HELLO-сообщений являются одинаково распределенными случайными величинами с малой дисперсией).

Значительные расхождения результатов имитационного и аналитического моделирования, связанные с неучтенными в рамках данной модели «краевыми эффектами», наблюдаются для $\langle T_{SYM} \rangle(p)$ в области низких значений вероятности p успешной передачи пакета (порядка $p < 0,5$). Впрочем, данная область значений p не представляет интереса при настройке МУС, так как при низких p соединения открываются с малой вероятностью.

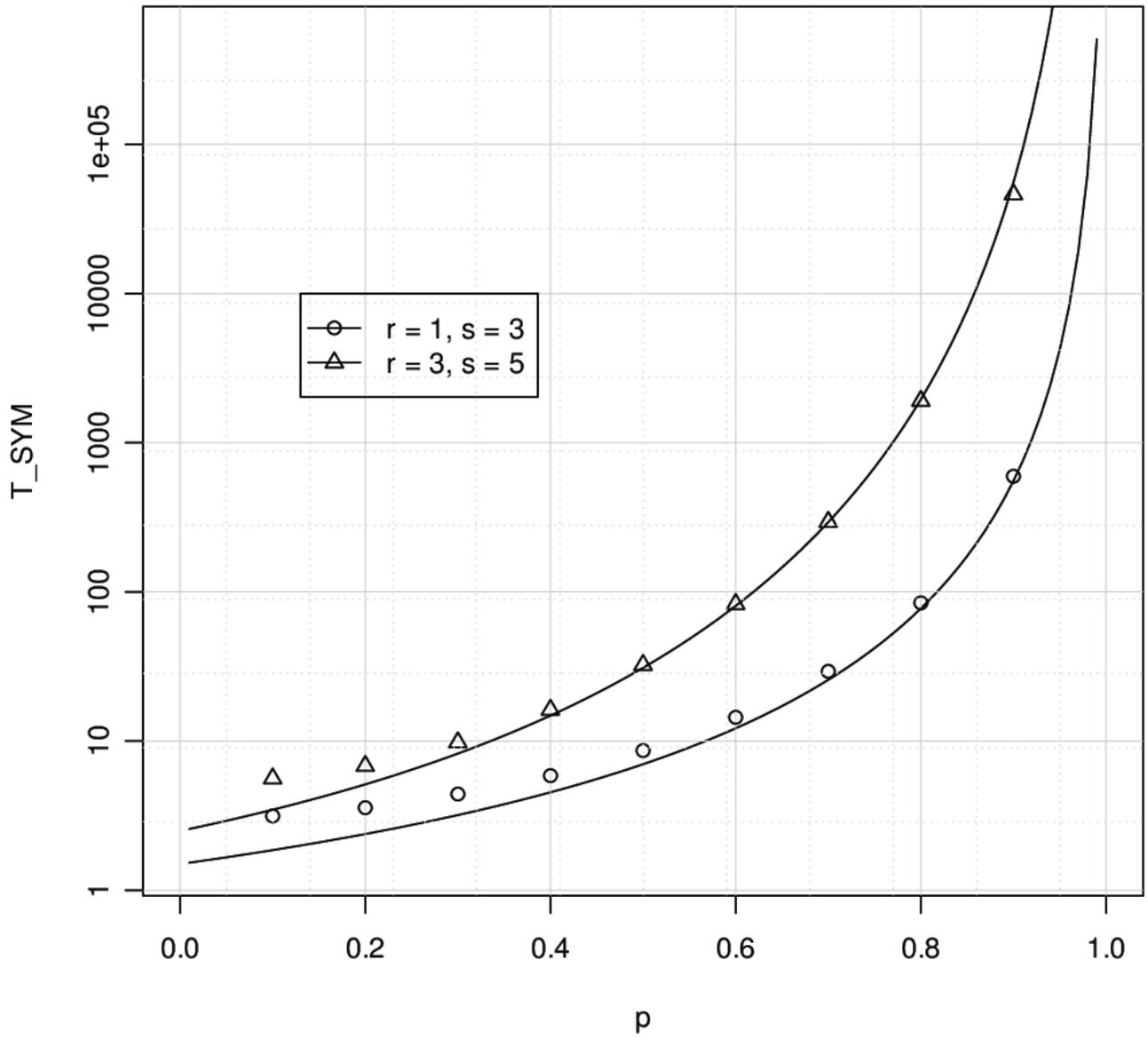


Рис. 2.1. Сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования $\langle T_{SYM} \rangle(p)$ при различных значениях параметров протокола

Глава 3

Применение модели

В данной главе приведены примеры применения разработанной аналитической модели протокола NHDP. Вначале продемонстрирована процедура настройки протокола NHDP. Затем осуществлено сравнение эффективности NHDP и двух МУС на основе протокола MPM.

3.1. Настройка протокола NHDP

Задавшись значениями периода T_{Update} рассылки информации о соединениях и времени $T_{NetTraversal}$, необходимого для распространения этой информации по всей сети, а также пороговой вероятностью p_0 успешной попытки передачи пакета, воспользуемся описанной в главе 2 аналитической моделью для настройки протокола NHDP. На первом шаге определим множество наборов значений параметров протокола, которые обеспечивают заданный порог открытия соединения p_0 , согласно требованию (1.4). Вообще говоря, это множество бесконечно, но, как будет показано ниже, его можно ограничить. На втором шаге в полученном множестве найдем подмножество, гарантирующее выполнение требования (1.3) стабильности соединений. Наконец, на третьем шаге из полученного подмножества выберем единственное решение согласно требованию (1.7). Поскольку выбранное решение соответствует минимальному значению r , то на первом шаге не имеет смысла рассматривать сколь угодно большие значения r , поэтому с самого начала введем разумное ограничение сверху на область допустимых параметров.

Проиллюстрируем описанный выше способ на конкретном примере. Пусть $p_0 = 0,5$, $T_{Update} = 4$, а $T_{NetTraversal} = 16$ периодов рассылки HELLO-сообщений. На первом шаге с помощью построенной модели по формулам (2.1), (2.2),

(2.3)–(2.6) найдем для различных пар значений (r, s) значения p_0 , после чего выберем те пары значений (r, s) , для которых значение p , при котором $P_{SYM}(p) = \frac{1}{2}$, равно p_0 с небольшой погрешностью δ :

$$|p - p_0| \leq \delta.$$

Требовать выполнения точного равенства $p = p_0$ не имеет смысла, так как r и s принимают натуральные значения. Ограничимся значениями $r, s \leq 10$. Результаты для $\delta = 0.01$ приведены в табл. 3.1, из которой видно, что для обеспечения $p_0 = 0,5 \pm 0.01$ следует выбрать следующие пары параметров (r, s) : (2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 6), (6, 7), (7, 8), (8, 9), (9, 10).

На втором шаге, учитывая значения T_{Update} и $T_{NetTraversal}$, из (1.3) получаем $g < 0,05$.

Пользуясь простой моделью, построим графики $g(P_{SYM})$ для различных значений параметров r, s (см рис. 3.1). Согласно (1.3), кривые, соответствующие допустимым значениям параметров МУС, должны находиться ниже прямой $g = 0,05$.

На третьем шаге, выбирая из допустимых наборов значений параметров набор с минимальным r , получаем $r = 3, s = 4$. Этот набор значений параметров обеспечивает наивысшую эффективность протокола, определенную согласно разделу 1.3.

3.2. Сравнение протоколов NHDP и MPM

3.2.1. Описание протокола MPM

Согласно стандарту IEEE 802.11s за установление соединения между станциями отвечает протокол MAC-уровня Mesh Peering Management (MPM). Данный протокол для открытия соединений использует процедуру тройного рукопожатия. Решение о запуске этой процедуры, согласно спецификации, основывается на результате анализа последовательности принятых биконов (англ.: beacon) – специ-

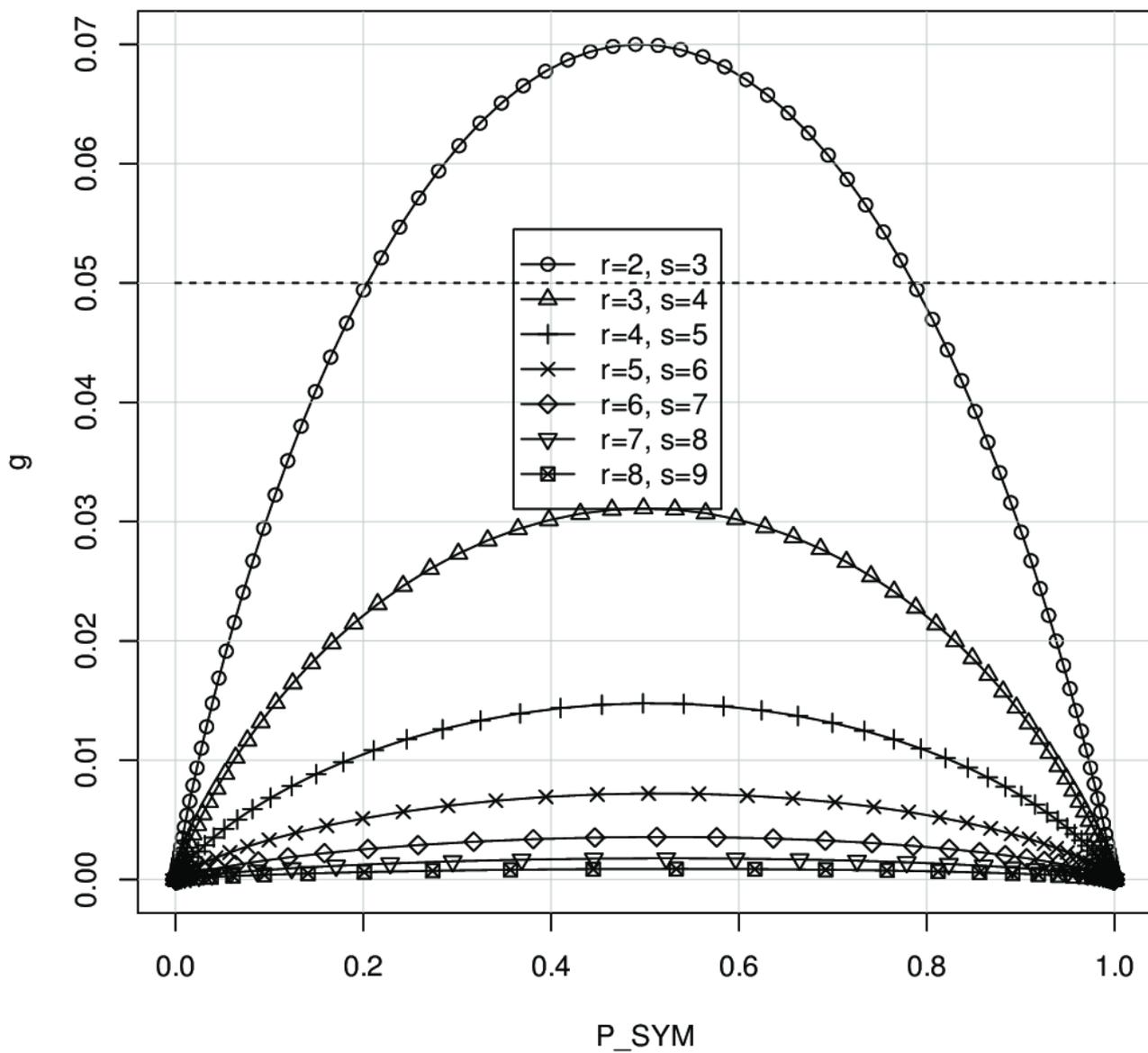


Рис. 3.1. $g(p)$ для различных r, s

альных кадров синхронизации, периодически генерируемых каждой станцией сети. Роль биконов аналогична роли HELLO-сообщений в протоколе NHDP. Вопрос о том, как именно проводить такой анализ и, соответственно, в какой момент принимать решение об открытии или закрытии соединения, в стандарте IEEE 802.11s оставлен открытым. Для решения данной проблемы в работе [9] предлагаются две возможных стратегии управления соединениями.

- В стратегии с безусловным подтверждением открытие соединения происходит по следующему правилу: станция A инициирует процедуру рукопожатия для открытия соединения, получив от станции B подряд заданное число r биконов. В ходе рукопожатия станция B всегда соглашается на запрос открытия соединения.
- В стратегии с условным подтверждением станция B соглашается на открытие соединения только в том случае, если на данный момент она получила l последних биконов подряд от станции A . По соображениям, изложенным в работе [9], l принимается равным $r - 1$.

Правило закрытия соединения одинаково для обеих стратегий: соединение закрывается в одностороннем порядке первой из станций A , B , не получившей s биконов подряд от станции-соседа.

Обе описанных стратегии на основе MPM напоминают принцип действия протокола NHDP. Главное отличие состоит в наличии процедуры «рукопожатия», что приводит к тому, что состояния соединения с точки зрения участвующих в нем станций оказываются *синхронизованными*. В связи с этим интересно сравнить эффективность протоколов NHDP и MPM (фактически, трех различных стратегий управления соединениями). Важно отметить, что поскольку NHDP и MPM предложены в рамках различных технологий, и даже более того, соответствуют разным уровням сетевой модели, сравнительный анализ эффективности данных

МУС на основе предварительно выработанных общих показателей не может быть выполнен с помощью имитационного моделирования: на полученные результаты будут в значительной мере влиять другие протоколы соответствующей технологии. В то же время сравнительный анализ МУС, проведенный в данной работе, опирается на математическое моделирование (аналитическая модель протокола МРМ описана в работе [9] и здесь не приводится).

3.2.2. Сравнительный анализ NHDP и МРМ

Еще раз обратим внимание на то, что сравниваются, фактически, три различных МУС: NHDP, МРМ с безусловным подтверждением и МРМ с условным подтверждением. Опишем процедуру сравнения МУС.

1. Зададим пороговое значение p_0 вероятности успешной передачи сообщения.
2. Для каждого из рассматриваемых МУС для каждого натурального значения параметра r , используя известные из аналитических моделей зависимости $\pi(p, r, s)$, найдем то значение s , при котором вероятность того, что при $p = p_0$ соединение открыто, равна:

$$\pi(p_0) \in \left(\frac{1}{2} - \delta, \frac{1}{2} + \delta\right),$$

где δ – некоторое заданное значение. Если подходит более одного значения s , выберем то из них, при котором приближенное равенство $\pi(p_0) \simeq \frac{1}{2}$ выполнено с наибольшей точностью.

3. Для каждой полученной пары (r, s) далее вычислим максимальное по p значение g_{max} показателя g нестабильности соединения. Этот шаг выполняется с использованием зависимостей $g_{max}(p, r, s)$, известных из аналитических моделей. Сравнивая полученные зависимости $g_{max}(r)$ для разных МУС при

одинаковых значениях r и p_0 , можно сделать вывод, что один из механизмов открывает более стабильные соединения, чем другой, являясь, таким образом, более эффективным.

Приведем численные результаты выполнения описанной процедуры для трех значений пороговой вероятности $p_0 \in \{0, 4; 0, 5; 0, 6\}$, а также набора значений параметра r от 1 до 5. Значения параметра s для каждого значения r (для каждого из трех рассматриваемых МУС) приведены в таблице 3.2. Полученные зависимости $g_{max}(r)$ изображены на рис. 3.2, 3.3, 3.4.

Взаиморасположение графиков $g_{max}(r)$ для различных МУС позволяет сделать следующий вывод.

И протокол NHDP, и протокол MPM с условным подтверждением являются более эффективными, чем MPM с безусловным подтверждением, так как открываемые ими соединения, при прочих равных, обладают меньшими значениями показателя нестабильности g . Приведем качественное обоснование данного эффекта.

Показатель нестабильности соединений g зависит от двух величин: $\langle T_{open} \rangle$ и $\langle T_{close} \rangle$. При фиксированных r, s, p_0 значения $\langle T_{open} \rangle$ – среднего времени жизни соединения – одинаковы для обоих механизмов на основе MPM и незначительно отличаются от таковых для NHDP. Поэтому различие величин g для разных МУС должно быть вызвано, преимущественно, различием величин T_{close} – среднего промежутка времени между закрытием соединения и его последующим открытием. Открытие соединений происходит, в среднем, *реже* для МУС с условным подтверждением, чем для МУС с безусловным подтверждением. Действительно, пусть станция A инициирует открытие соединения между собой и станцией B . При действии механизма с условным подтверждением, открытие соединения будет подтверждено станцией B , только если станция B приняла достаточное количество последних кадров от станции A . Теперь рассмотрим протокол NHDP.

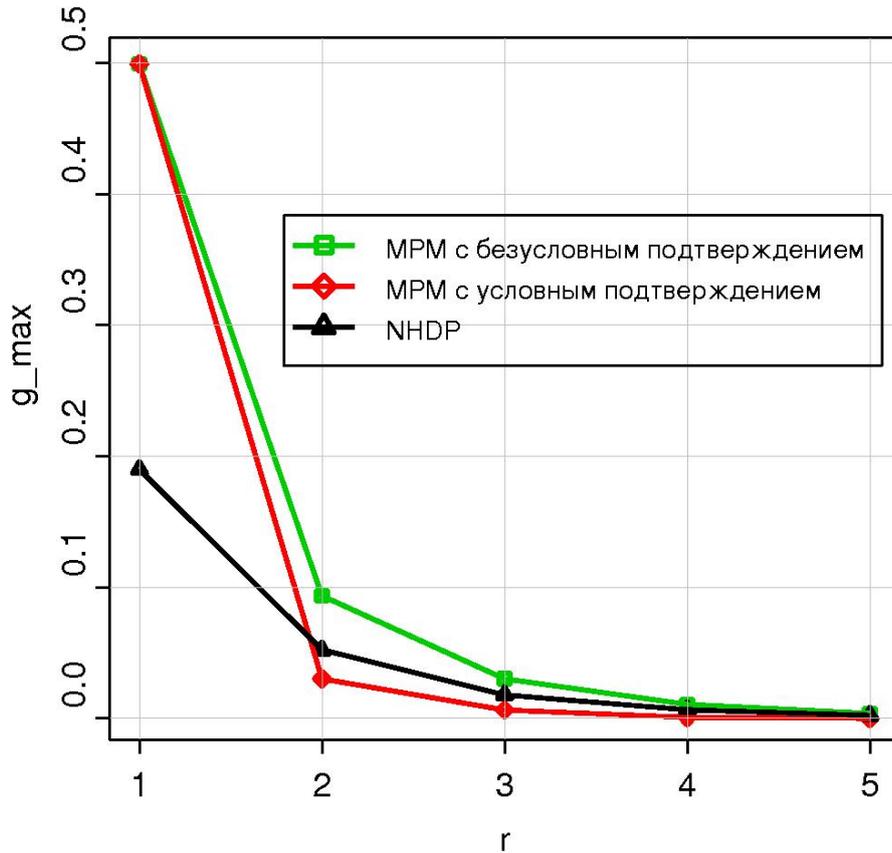


Рис. 3.2. Зависимость $g_{max}(r)$ для сравниваемых МУС при $p_0 = 0,4$

Действуя в его рамках, станция A открывает двустороннее соединение со станцией B только если из последних s HELLO-сообщений от станции A станцией B принято хотя бы одно. Данное правило весьма похоже на правило открытия соединения, принятое в стратегии с условным подтверждением.

Отметим, что при $r = 1$ нестабильность соединений для обоих МУС на основе МРМ больше, чем для протокола NHDP. Это связано с тем, что при значении параметра $r = 1$ и при выборе $l = r - 1$ МУС с условным и безусловным подтверждением тождественны, то есть эффект условного подтверждения не проявляется.

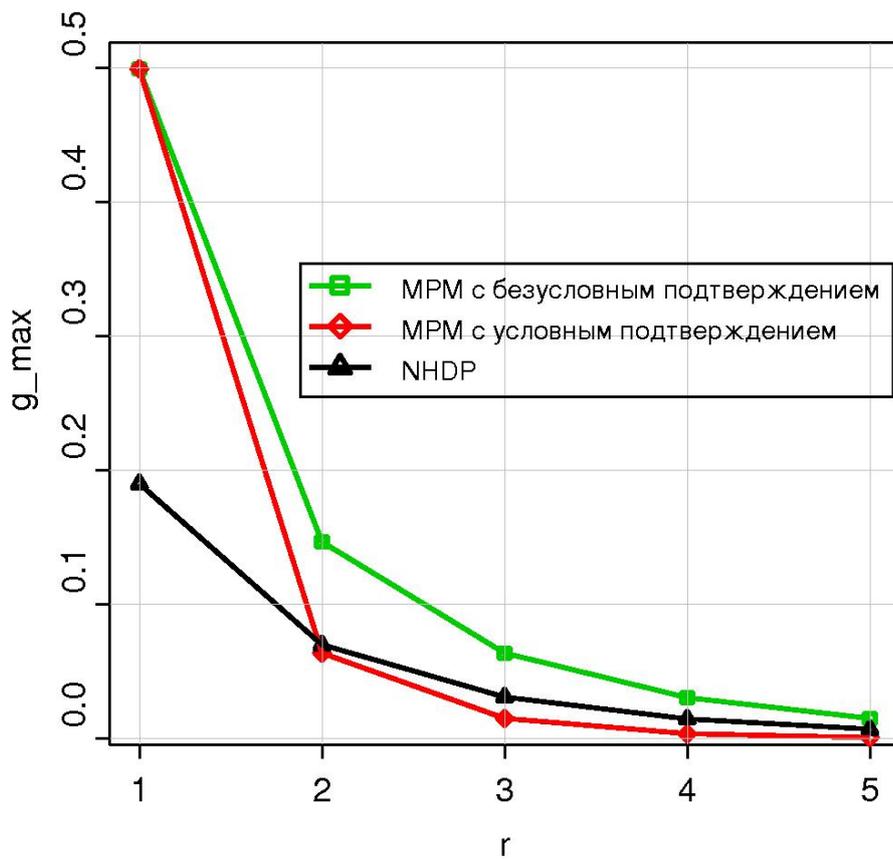


Рис. 3.3. Зависимость $g_{max}(r)$ для сравниваемых МУС при $p_0 = 0,5$

$r \setminus s$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,71	0,46	0,34	0,26	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12
2	0,84	0,63	0,50	0,42	0,37	0,33	0,30	0,27	0,25	0,23
3	0,89	0,71	0,59	0,51	0,45	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30
4	0,92	0,75	0,64	0,57	0,51	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36
5	0,93	0,79	0,68	0,61	0,55	0,51	0,47	0,44	0,42	0,40
6	0,94	0,81	0,71	0,64	0,59	0,54	0,51	0,48	0,45	0,43
7	0,95	0,83	0,73	0,67	0,61	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46
8	0,96	0,84	0,75	0,69	0,64	0,59	0,56	0,53	0,51	0,48
9	0,96	0,85	0,77	0,70	0,65	0,61	0,58	0,55	0,53	0,51
10	0,97	0,86	0,78	0,72	0,67	0,63	0,60	0,57	0,55	0,52

Таблица 3.1. p_0 для различных r, s

r	1	2	3	4	5
$p_0 = 0.4$					
NHDP	2	4	6	8	10
МРМ без подтверждения	1	3	5	7	9
МРМ с подтверждением	1	5	8	12	16
$p_0 = 0.5$					
NHDP	2	3	4	5	6
МРМ без подтверждения	1	2	3	4	5
МРМ с подтверждением	1	3	5	7	9
$p_0 = 0.6$					
NHDP	1	2	3	4	4
МРМ без подтверждения	1	1	2	3	3
МРМ с подтверждением	1	2	3	4	6

Таблица 3.2. Значения $s(r, p_0)$ для сравниваемых МУС

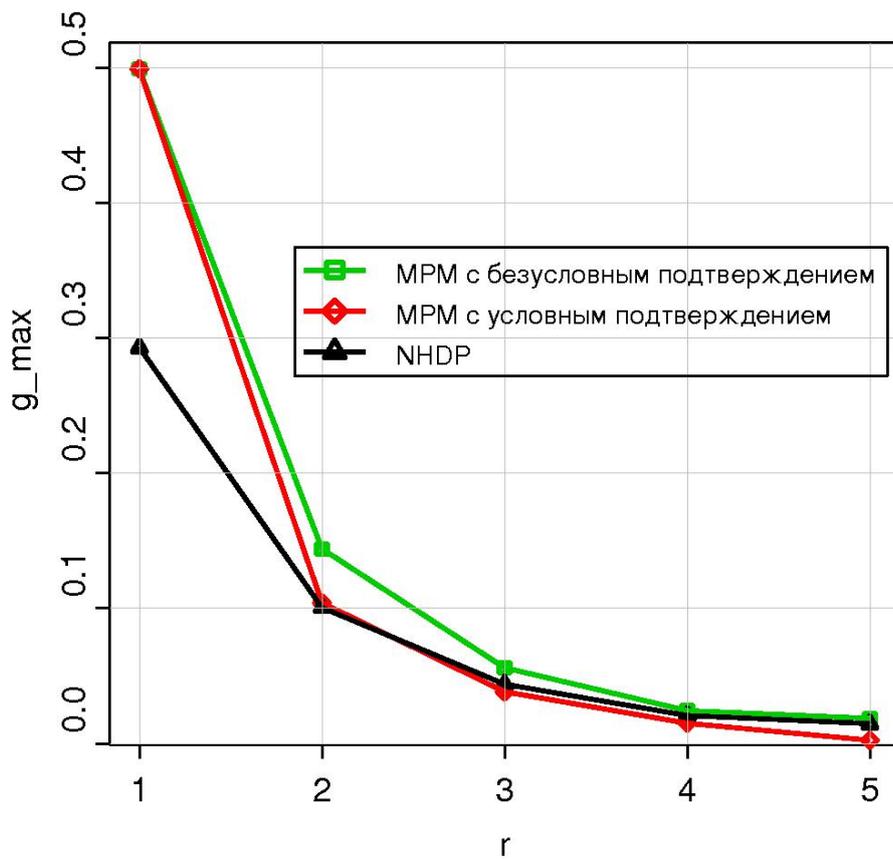


Рис. 3.4. Зависимость $g_{max}(r)$ для сравниваемых МУС при $p_0 = 0,6$

Заключение

Литература

1. IEEE 802.11 Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 2007.
2. IEEE 802.11 Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment: Mesh Networking, 2011.
3. Corson S., Macker J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. IETF, 1999. — January. URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt>.
4. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.Л. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005.
5. Jacquet Philippe, Clausen Thomas. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). IETF, 2003. — October. URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>.
6. Clausen T., Dearlove C., Dean J. Mobile Ad Hoc Network (MANET) Neighborhood Discovery Protocol (NHDP). IETF, 2011. — April. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc6130>.
7. Ogier R., Templin F., Lewis M. Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF), 2004. — February. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc3684>.
8. The ns-3 network simulator. URL: <http://www.nsnam.org>.

9. Кирьянов А.Г., Ляхов А.И., Сафонов А.А., Хоров Е.М. Метод оценки эффективности механизмов управления соединениями в беспроводных самоорганизующихся сетях // Автоматика и телемеханика. 2012. №5. Сс. 39–56.
10. Huang Yang Cheng, Bhatti Saleem, Parker Daryl. Tuning OLSR // The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC'06. 2006.
11. Voorhaen M., Blondia C. Analyzing the Impact of Neighbor Sensing on the Performance of the OLSR protocol // Proceedings of 4th Intl. Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt06). 2006. — APRIL. URL: content/publications/2006/mvhaen06wiopt.pdf.
12. Nayebi Abbas, Karlsson Gunnar, Sarbazi-Azad Hamid. Evaluation and design of beaconing in mobile wireless networks // Ad Hoc Netw. 2011. — May. Vol. 9. Pp. 368–386.
13. Кирьянов А.Г., Сафонов А.А., Хоров Е.М. Методы исследования переходных характеристик протокола OLSR при включении/выключении узла сети // Информационные Технологии и Системы (ИТиС'10). 2010. — Сентябрь. URL: <http://www.itas2010.iitp.ru/pdf/1569342383.pdf>.
14. Ляхов А.И., Островский Д.М., Хоров Е.М. Аналитическое исследование качества соединений, открытых протоколом NHDP // Информационные процессы. 2012. т. 12. №5. Сс. 105–116.
15. Jelencovic P., Momcilovic P. Asymptotic loss probability in a finite buffer fluid queue with heterogeneous heavy-tailed On-Off processes // Annals of Applied Probability. Vol. 13. Pp. 576–603.

16. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения, т. 2. М.: Мир, 1984.