

УДК 621.391

АНАЛИЗ НОВОГО ГИБРИДНОГО ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛА

А. В. Сергеев,
аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предлагаемый в статье комбинированный протокол маршрутизации (CRP) для ad hoc-сетей предназначен для решения задач построения и поддержания маршрута в беспроводной сети без предварительной инфраструктуры. Для оценки эффективности работы нового протокола проводится его сравнение с другими, широко известными схемами маршрутизации (AODV, GPSR). Сравнение выполняется с использованием различных моделей распространения сигнала, учитывающих условия как городской застройки, так и пригородной зоны.

The proposed in the paper combined routing protocol (CRP) for ad hoc networks successfully solves the primary goals connected to the construction and route maintenance in a wireless network without a preliminary infrastructure. For an estimation of the new protocol work quality, it was compared with other, widely known circuits of routing (AODV, GPSR). The comparison is fulfilled with use of different models of signal distribution, taking into account city building conditions and residential areas conditions as well.

Введение

Беспроводные сети передачи данных, появившиеся в 70-х годах прошлого века как приложения для специальных и, главным образом, для военных задач, претерпевают сейчас бурное развитие. Причина этого – мощный рост и широчайшее распространение средств вычислительной техники и связи, позволившие значительно расширить сферу применения таких сетей.

Крупным подклассом беспроводных сетей являются *ad hoc-сети* (MANET – Mobile Ad Hoc NETWORKS) – сети без предварительной инфраструктуры, с изменяющейся из-за подвижности узлов топологией. Каждый узел в *ad hoc-сети* работает одновременно подобно конечной системе и маршрутизатору. Приложениями таких сетей являются различного рода телематические комплексы, системы управления движением, мобильные боевые системы и т. д. Ключевой задачей в *ad hoc-сетях* является задача маршрутизации.

Цель данного исследования – проведение анализа и оценка производительности нового комбинированного протокола (CRP), объединяющего возможности двух различных схем маршрутиза-

ции: 1) схем, использующих географическую информацию (таких, как GPSR); 2) алгоритмов, основанных на топологии сети (AODV). Сравнение проводится с использованием различных моделей распространения радиосигнала (2 Ray Ground, Shadowing, Walfish-Ikegami Pass Loss), имитирующих как открытое пространство, так и городские условия.

Интерес представляют относительно «плохие» условия средней плотности узлов в сети при их высокой подвижности.

Протоколы маршрутизации в ad hoc-сетях

Маршрутизация принадлежит сетевому уровню относительно семиуровневой ISO/OSI модели. В сетях с многократным переприемом, примером которых являются *ad hoc* сети, терминалы могут не иметь возможности для непосредственной связи друг с другом. Протоколы маршрутизации используются для обеспечения узлов информацией, необходимой для отправки пакетов следующему узлу на пути от источника до получателя по всем маршрутам. Согласно принятой классификации [1, 5], схемы маршрутизации в *ad hoc-сетях* делятся на три больших класса.

1. **Преактивные (Proactive).** Все узлы сохраняют представление всей сети. Информация о маршрутизации хранится в таблицах. Именно поэтому данный подход называют также табличным (table-driven).

2. **Реактивные (Reactive).** Известны также как инициализируемые источником по требованию (on demand). Этот тип протоколов устанавливает маршруты связи по запросу, только когда нужен путь до конечного узла. Одним из таких протоколов является AODV [2]. Для каждого объекта в сети таблицы маршрутизации содержат информацию о следующем узле на пути к узлу-получателю, временные метки и служебную информацию. Маршруты поддерживаются только в том случае, если они действительно используются. Во избежание заикливания и для подтверждения того, что маршрут действительно свежий, используются порядковые номера. AODV использует следующие типы пакетов: Приветственные сообщения, Запрос о маршруте связи (RREQ), Ответ о маршруте связи (RREP), Ошибка маршрута связи (RERR). Когда на узле появляется пакет данных для передачи, а путь до адресата не известен, инициируется широкоэвещательная передача сообщений RREQ всем «соседям». Маршруты, по которым следовал запрос, фиксируются на промежуточных узлах. Сообщения RREQ будут размножены через сеть во всех направлениях, пока не достигнут адресата или узла с достаточно свежим маршрутом, после чего по обратному пути от получателя к отправителю высылается сообщение типа RREP, устанавливающее на промежуточных узлах путь для последующей передачи пакетов данных. Основные проблемы протокола AODV заключаются в следующем:

- разрывы в маршруте передачи данных приводят к потере пакетов данных или инициируют комплексную процедуру восстановления маршрута;
- объем контрольного трафика растет с увеличением плотности и размера сети;
- длинные маршруты слишком неустойчивы;
- не поддерживаются множественные маршруты до узла-получателя.

3. **Маршрутизация на основе географической информации.** Предполагается, что все узлы оснащены приемниками системы мобильного позиционирования (GPS, ГЛОНАСС) и могут определить свое географическое положение. Между мобильными объектами в сети происходит постоянный обмен информацией о местоположении друг друга.

Представителем этого подкласса является протокол GPSR [3]. При использовании данного протокола узел-источник включает координаты узла-назначения в каждый передаваемый пакет. Промежуточные узлы принимают решение о дальнейшем направлении передачи (выбирают следующий узел), основываясь на координатах узла-назначения, содержащихся в пакете и координатах своих «соседей» (выбирается ближайший к узлу назначения «сосед» с точки зрения географического расстояния). Такой способ маршрутизации носит название «жадного» (Greedy mode).

В случае отсутствия узлов, более близких к получателю (основная проблема данного протокола), чем текущий узел, используется режим периметра (perimeter mode), основанный на обходе такого пустого пространства (void) по правилу правой руки.

«Проблема обхода периметра» является основной для всех схем, использующих «жадный» алгоритм маршрутизации, усугубляя и без того серьезные недостатки протокола GPSR:

- маршруты становятся еще более неоптимальными и длинными;

- из-за неэффективных маршрутов, непрерывного движения узлов и ограничений на время жизни пакета (TTL) вероятность его сбрасывания и удаления на промежуточных узлах возрастает;

- эффективность протокола зависит от алгоритма планаризации графа сети.

Кроме того, узел-получатель может поменять свое местонахождение за время процесса передачи данных. GPSR не имеет средств для обновления этой информации во время установки маршрута, что, опять же, приводит к еще более длинным маршрутам и удалению пакета из-за ограничений на время его жизни. Таким образом, GPSR, по сути, «промахиывается», полагаясь на данные от системы доставки географической информации, которая не согласована полностью с алгоритмом маршрутизации.

Комбинированный протокол маршрутизации

Создание эффективной комбинации реактивных и преактивных протоколов является одной из открытых проблем беспроводных ad hoc-сетей. Ставится задача на базе описанных выше протоколов (AODV и GPSR) создать новую, более эффективную схему маршрутизации. Основная идея предлагаемой схемы – использование протокола AODV как решение для «проблемы обхода периметра» GPSR. Формальное описание такого комбинированного протокола, названного Combined Routing Protocol (CRP), выглядит следующим образом.

ЕСЛИ возможно – используется GPSR в «жадном» режиме: передача пакетов «на лету» к ближайшему узлу, географически более близкому к получателю.

В ПРОТИВНОМ СЛУЧАЕ – используется упрощенный AODV (без восстановления маршрута в случае разрыва), происходит прокладывание маршрута от текущего узла до получателя (вместо режима обхода периметра) с последующей передачей данных по нему.

Преимущества новой схемы маршрутизации в сравнении с двумя базовыми протоколами (GPSR и AODV):

1. Более стабильные маршруты в AODV-режиме. Это достигается путем уменьшения числа коммутаций и длины маршрутов за счет предварительного использования GPSR-режима. В результате для комбинированной схемы вероятность разрыва проложенного в AODV-режиме маршрута меньше, чем для обычного AODV:

$$P_{rb}(GPSR + AODV) < P_{rb}(AODV).$$

2. Быстрая передача данных между соседними узлами. Во многих случаях пакеты данных могут быть доставлены без использования режима AODV и механизмов установления маршрута (RREQ + RREP).

3. За счет предварительного использования GPSR установление AODV маршрутов происходит гораздо быстрее, так как эффективность широковещательной передачи RREQ пакетов в режиме AODV растет по мере приближения к узлу-получателю.

В отдельных случаях предлагаемая комбинированная схема может показывать худшие результаты по сравнению с базовыми протоколами. Причиной этого, в основном, являются усиленные наследственные «болезни» родительских протоколов. Скрещивание двух различных механизмов маршрутизации позволило получить целый ряд новых преимуществ, однако проблемы и «минусы» базовых схем во многом сохранились.

Ниже перечислены недостатки рассматриваемой гибридной схемы.

1. Маршруты до получателя могут включать циклы, что становится еще одной причиной появления неоптимальных маршрутов. Данная проблема получена в наследство от GPSR, в котором не предусмотрено никаких механизмов, предотвращающих заикливание маршрутов передачи (заиклиненные пакеты просто удаляются).

2. Режим AODV начинает работать только в случае провала «жадной» передачи GPSR; поэтому новой составной схеме требуется больше времени по сравнению со стандартным AODV для накопления информации о маршрутах в сети и заполнения маршрутных таблиц. Таблицы стандартного протокола AODV содержат более полную и актуальную информацию о сети.

3. В случаях, если пустая зона находится рядом с узлом-отправителем и при этом «жадный» GPSR-режим по какой-либо причине отказывает, эффективность составной схемы маршрутизации становится ниже, а вероятность появления цикла – выше.

Описание модели

На данный момент не известно ни одной общепринятой аналитической модели для оценки эффективности протоколов маршрутизации в ad hoc-сети. Поэтому исследования проводятся с помощью имитационного моделирования. Одним из наиболее известных и широко используемых пакетов для моделирования компьютерных сетей является симулятор Network Simulator 2 (ns-2) – дискретный симулятор, предназначенный для моделирования различных видов сетей, в том числе и беспроводных.

Основными параметрами модели ad hoc-сети являются:

параметры среды, в которой распространяется сигнал;

линейные размеры области, на которой находится моделируемая сеть;

■ Основные параметры модели

| Число узлов | Размер сети, м | Время остановки, с | Размер пакета, байт | Трафик | Длительность эксперимента, с |
|-------------|--------------------------|--------------------|---------------------|--------|------------------------------|
| 30 | 1000 × 1000 550 × 550 | 40 | 512 | CBR | 500 |

количество узлов, участвующих в эксперименте; параметры мобильности узлов; параметры трафика; время эксперимента; протокол маршрутизации; протокол доступа к среде.

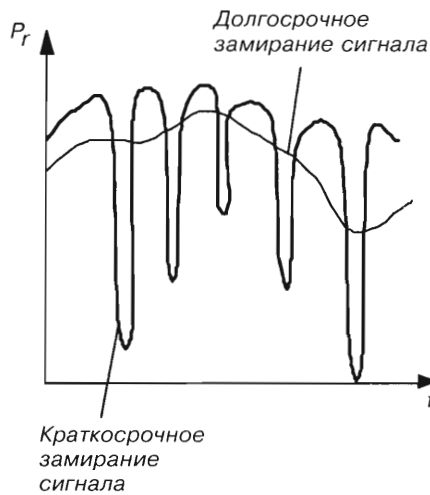
Реализация протокола AODV включена в состав ns-2, протокол GPSR был реализован Е. Линским [4] и А. Комратовым, протокол CRP – автором. Используемая модель (таблица) описывает множество мобильных узлов, передвигающихся по равнине без препятствий. Узлы передвигаются в соответствии с моделью случайных контрольных точек (random waypoint model) [5]: узел случайным образом выбирает конечную точку и скорость из некоторого диапазона и начинает двигаться согласно выбранным параметрам. После достижения конечной точки узел останавливается на заданный период времени и процесс начинается сначала. Время остановки характеризует степень мобильности узлов. Обмен пакетами происходит по протоколу UDP, протокол доступа к среде – 802.11.

Для работы протоколов GPSR и CRP необходимо наличие сервиса географических координат, который снабжал бы узел-отправитель координатами узла-назначения. При моделировании была использована идеальная модель данного сервиса. С учетом данного допущения, можно утверждать, что полученные результаты для GPSR и CRP соответствуют минимально возможному объему служебных сообщений.

Модели распространения радиосигнала

Распространение сигнала от источника до получателя можно представить в виде суммы сигналов, дошедших по разным путям от передающей до приемной антенны. Такое распространение называется многолучевым. Радиоволны приходят в точку приема в результате многократного переотражения от зданий и других объектов. Трасса распространения радиоволн, как правило, нестационарна, что связано как с изменением положения самого передатчика, так и с перемещением окружающих объектов (автомобилей, людей), в результате чего на приемном конце наблюдаются замирания сигнала (рис. 1). Радиоволны в подобных условиях подвергаются воздействию следующих эффектов:

экранирование;
отражение от крупных объектов;



■ Рис. 1. Принимаемая мощность сигнала в зависимости от времени

преломление в зависимости от плотности среды прохождения;
 рассеивание из-за небольших препятствий;
 дифракция на углах;
 фединг и т. д.

Многочуевое распространение приводит к тому, что в точке приема наблюдаться сигналы с различными временными задержками. Накладываясь один на другой, они могут приводить к заметному искажению исходного сигнала и межсимвольной интерференции (рис. 2).

Большая часть указанных эффектов может быть описана на приемной стороне следующими основными характеристиками:

- потери при распространении (pass loss);
- замираниями, связанными с многочуевым распространением (multipath);
- затенением или экранированием (shadowing);
- интерференцией (interference).

Для моделирования условий среды распространения радиоволн были использованы следующие модели.

1. Модель двулучевого отражения от плоской поверхности Земли (Two Ray Ground). Имитирует распространение сигнала в пригородной зоне [1].

2. Модель затенения (Shadowing). Используется для моделирования городских условий [1, 5].

3. Модель затухания (Pass Loss) совместно с моделью Уолфиша-Икегами. Используется для моделирования городских условий [6].

Модель двулучевого отражения от поверхности Земли (Two Ray Ground). При распространении радиоволн в пригородной зоне для расчета радиотрасс на свободных от строений пространствах могут быть использованы так называемые отражательные формулы, согласно которым электромагнитное поле в точке приема может быть представлено в виде суммы прямой волны и волны, отраженной от поверхности Земли. В этом случае уравнение для вычисления принятой мощности сигнала выглядит следующим образом:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} P_t$$

где P_t – мощность передатчика; G_t и G_r – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; d – расстояние между приемником и передатчиком; h_t и h_r – высоты антенн приемника и передатчика.

Однако использование данной формулы на малых расстояниях между узлами дает не очень хорошие результаты. Поэтому используется так называемое *перекрестное расстояние*

$$d_c = (4\pi h_t h_r) / \lambda,$$

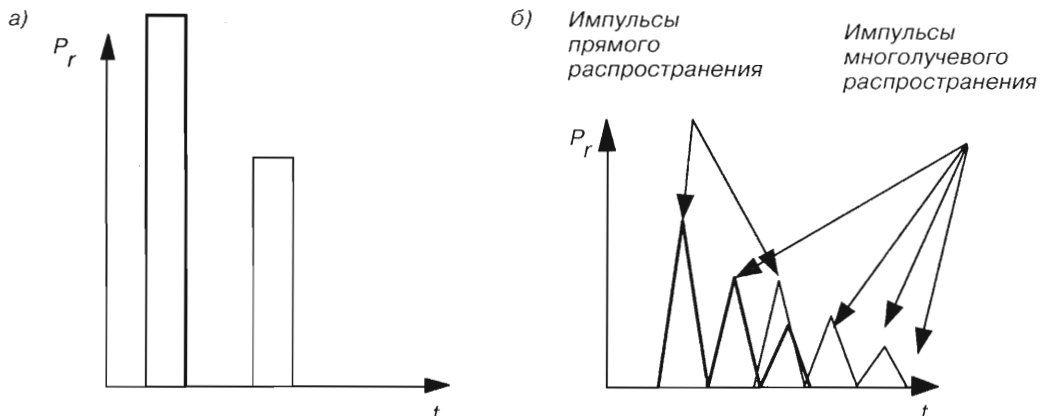
а мощность принятого сигнала в зависимости от расстояния d между узлами выглядит следующим образом.

Если $d > d_c$, то используется уравнение для модели отражения от плоской поверхности Земли:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} P_t.$$

Если $d \leq d_c$, то используется модель распространения сигнала в свободном пространстве, которая предполагает идеальные условия распространения сигнала по единственному пути от передатчика к приемнику:

$$P_r(d) = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d L} \right)^2 P_t, \tag{1}$$



■ Рис. 2. Результат многочуевого распространения: а – сигнал на передатчике; б – сигнал на приемнике

где λ – длина волны.

Модель затенения (Shadowing). Двухлучевая модель вычисляет принимаемую энергию сигнала как детерминистскую функцию от расстояния, а область связи представляется идеальным кругом. В реальных условиях принимаемая мощность сигнала является случайной величиной вследствие эффектов многолучевого распространения и экранирования. Для моделирования городской среды часто используется широко известная модель затенения, состоящая из двух частей.

Первая часть вычисляет среднюю принимаемую энергию $\overline{P_t(d)}$ на расстоянии d , учитывая потери при распространении сигнала. Для этого используется расстояние ближнего радиуса d_0 ; $\overline{P_t(d)}$ вычисляется относительно $P_t(d_0)$ следующим образом:

$$\frac{P_t(d_0)}{P_t(d)} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^\beta, \quad (2)$$

где β – экспонента потерь при распространении, вычисляемая обычно эмпирически путем.

Из уравнения (2) видно, что для случая прямой видимости $\beta = 2$ и $P_t(d_0)$ может быть вычислено из уравнения (1). При пересчете величины потерь сигнала при распространении в децибелах получается следующее уравнение:

$$\left[\frac{P_t(d_0)}{P_t(d)} \right]_{db} = -10\beta \log \left(\frac{d}{d_0} \right). \quad (3)$$

Вторая часть модели затенения описывает колебания принимаемой энергии из-за возможного изменения пространственного положения передатчика или окружающих объектов. Данное явление моделируется с помощью случайной распределенной по логарифмически нормальному закону величины.

В целом, модель затенения задается следующим образом:

$$\left[\frac{P_t(d_0)}{P_t(d)} \right]_{db} = -10\beta \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{db}, \quad (4)$$

где X_{db} – гауссовская случайная величина, со средним, равным нулю и среднеквадратичным отклонением σ_{db} . Последнее носит название *разброс экранирования*. Таким образом, вместо идеально круглой зоны приема используется гораздо более реалистичная для городских условий модель – узлы с некоторой вероятностью могут создавать и поддерживать соединение друг с другом.

Модель трассировки потерь при распространении (Pass Loss Ray Tracing Model). В данной модели для вычисления мощности сигнала, излучаемого из одной точки, а принятого в другой, используются предварительно вычисленные или измеренные значения *потерь при распространении (PL, Pass Loss)*. Карта разбивается на сегменты одинакового размера, а затем в каждой ячейке сохраняется значение *величины потерь* сигнала от этой до всех остальных ячеек карты. Таким образом, эта величина (учитывающая одновременно затухание сигнала и эффект экранирования) известна для любой пары передатчик–приемник, расположенных в любой точке карты.

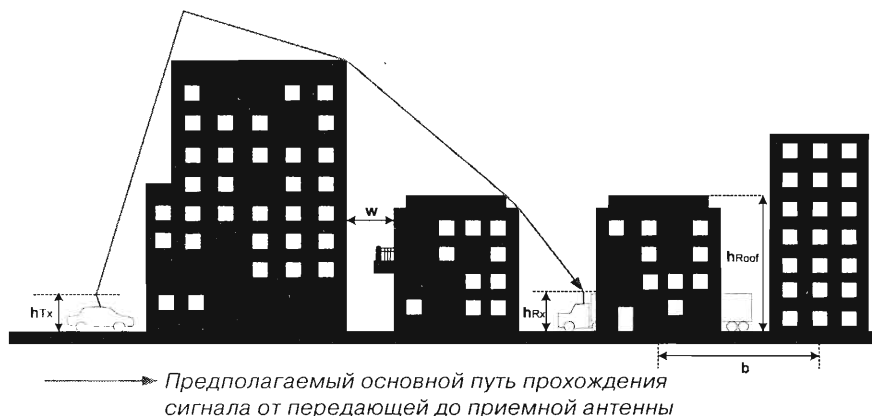
Сами значения предварительно вычислены с помощью любой модели распространения или измерены на реальной местности только один раз, а затем могут быть многократно использованы с любыми сценариями движения и трафика.

Величина принимаемой мощности сигнала в децибелах вычисляется простейшим уравнением

$$P_r = P_t - PL.$$

Вследствие вышесказанного, модель отличается высоким быстродействием, но крайне требовательна к оперативной памяти вычислительной системы. Так как величина затухания сигнала при распространении от передатчика к приемнику равна величине затухания при обратном распространении, то требуемый объем используемой памяти можно оценить как

$$([MapHeight^2 \cdot MapWidth^2] / 2 \cdot [SegmentSize^4]) + MapHeight \cdot MapWidth \text{ Byte.}$$



■ Рис. 3. Основной путь распространения радиосигнала и параметры модели Уолфиша-Икегами

В данной работе значения потерь при распространении для каждого сегмента карты были получены с помощью эмпирической модели Уолфиша-Икегами (Walfisch-Ikegami) [6].

Модель Уолфиша-Икегами. Данная модель относится к классу эмпирических и, по заявлению создателей, обладает достаточно высокой точностью при моделировании радиопередач в городских условиях. Модель утверждает (рис. 3), что в условиях города с относительно невысокой, но плотной застройкой основным путем распространения радиосигнала (в случае отсутствия прямой видимости между узлами) является путь, проходящий через крыши зданий (которые могут быть описаны как серии последовательных экранов), сопровождаемый многократным рассеиванием.

Основные параметры, используемые в модели: частота передачи (f); высота передающей антенны (h_{RX}); высота приемной антенны (h_{TX}); расстояние между приемником и передатчиком (d); средняя высота зданий (h_{Roof}); средняя ширина улиц (w); средний интервал между зданиями (b).

Энергия принимаемого сигнала зависит от того, где находится передатчик по отношению к приемнику.

1. В зоне прямой видимости («line of sight», LOS). Для вычисления величины потерь при распространении используется относительно простая формула

$$PL_p = 42,6 + 26 \cdot \lg\left(\frac{d}{km}\right) + 20 \cdot \lg\left(\frac{f}{MHz}\right).$$

2. Вне зоны прямой видимости («none line of sight», NLOS).

Этот случай более сложен. Значение, на которое уменьшается мощность принимаемого сигнала при прохождении пути от источника к получателю, задается следующей формулой:

$$PL_p = \begin{cases} l_0 + I_{rts} + I_{msd} & I_{rts} + I_{msd} > 0, \\ l_0 & I_{rts} + I_{msd} \leq 0, \end{cases}$$

где l_0 – потери при распространении в свободном пространстве, без препятствий,

$$l_0 = 32,44 + 20 \cdot \lg\left(\frac{f}{MHz}\right) + 20 \cdot \lg\left(\frac{d}{km}\right);$$

I_{rts} – потери на стороне получателя, вызванные рассеиванием радиосигнала при отражении от поверхности «конечной» улицы, на которой находится приемник,

$$I_{rts} = -16,9 - 10 \cdot \lg\left(\frac{w}{m}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{f}{MHz}\right) + 20 \cdot \lg\left(\frac{h_{Roof} - h_{RX}}{m}\right) + I_{Ori};$$

где w – ширина дороги, h_{Roof} – высота зданий, h_{RX} – высота антенны на стороне получателя; параметр

I_{Ori} – по сути, эмпирическая поправка, получаемая путем реальных измерений на местности:

$$I_{Ori} = \begin{cases} -10 + 0,354 \frac{\varphi}{deg} & \text{for } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2,5 + 0,075 \left(\frac{\varphi}{deg} - 35\right) & \text{for } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4,0 + 0,114 \left(\frac{\varphi}{deg} - 35\right) & \text{for } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ, \end{cases}$$

где φ – ориентация дороги по отношению к пути распространения сигнала; I_{msd} – оценка величины потерь, вызываемых многократным переотражением и рассеиванием радиосигнала от крыш домов (впервые опубликована Уолфишем и Бартоном);

$$I_{msd} = I_{bsh} + k_a + k_d \cdot \lg\left(\frac{d}{km}\right) + k_f \cdot \lg\left(\frac{f}{MHz}\right) - 9 \cdot \lg\left(\frac{b}{m}\right),$$

$$\text{где } I_{bsh} = \begin{cases} -18 \cdot \left(1 + \frac{h_{TX} - h_{Roof}}{m}\right), & h_{TX} > h_{Roof}, \\ 0, & h_{TX} < h_{Roof}; \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_{TX} > h_{Roof}, \\ 54 - 0,8 \frac{h_{TX} - h_{Roof}}{m}, & d \geq 0,5km, h_{TX} \leq h_{Roof}, \\ 54 - 0,8 \frac{h_{TX} - h_{Roof}}{m} \cdot \frac{d/km}{0,5}, & d < 0,5km, h_{TX} \leq h_{Roof}; \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_{TX} > h_{Roof}, \\ 18 - 15 \cdot \frac{h_{TX} - h_{Roof}}{h_{Roof} - h_{TX}}, & h_{TX} < h_{Roof}; \end{cases}$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0,7 \cdot \left(\frac{f/MHz}{925} - 1\right) & \text{для пригородных условий,} \\ 1,5 \cdot \left(\frac{f/MHz}{925} - 1\right) & \text{для города с плотной застройкой.} \end{cases}$$

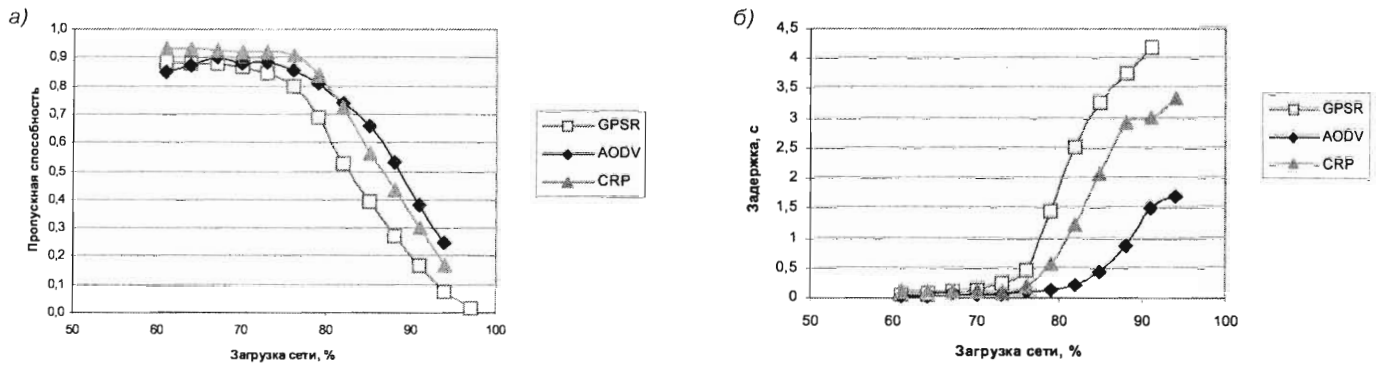
Параметры k_d и k_f определяют зависимость величины потерь при распространении от частоты сигнала и рассеивания при прохождении через последовательные экраны. Увеличение потерь при уменьшении высоты антенны по отношению к средней высоте окружающих зданий задается параметром k_a .

Результаты моделирования

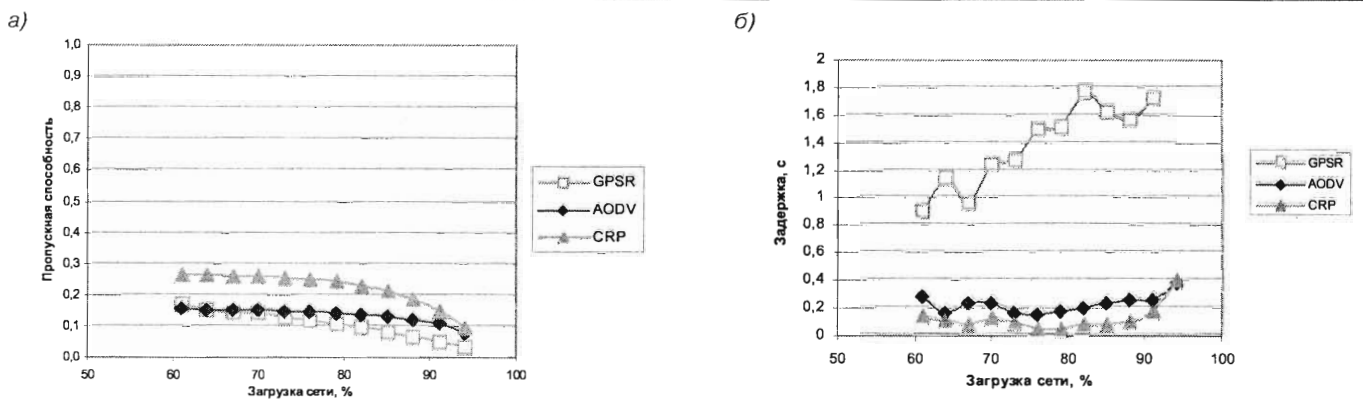
Сравнение производительности протоколов производилось по следующим величинам.

1. Средняя пропускная способность (throughput). Измерялась как отношение количества пакетов с данными, достигших узла назначения, к общему количеству передаваемых пакетов.

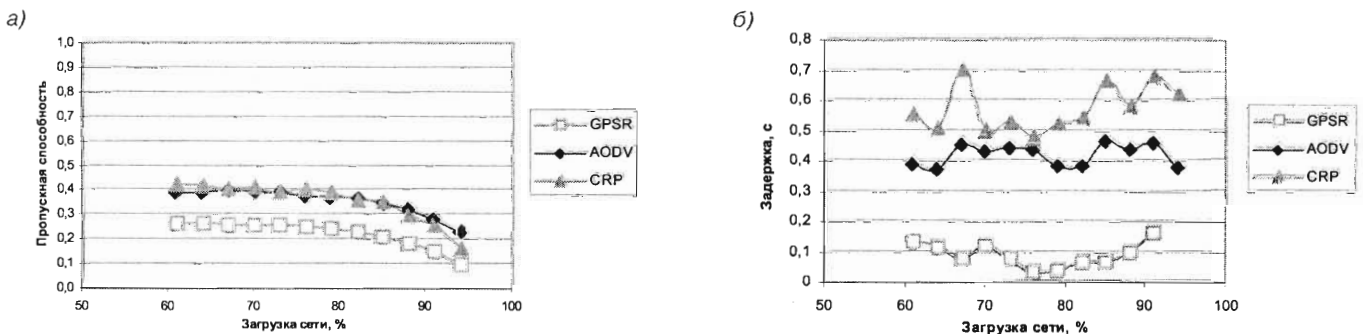
2. Средняя задержка пакета с данными (packet delay). Определяется как промежуток времени, который проходит с момента генерации пакета данных узлом-отправителем до момента его приема узлом-получателем.



■ Рис. 4. Средняя пропускная способность (а) и средняя задержка (б) для сети из 30 узлов в топологии 1000×1000 м: модель двулучевого отражения



■ Рис. 5. Средняя пропускная способность (а) и средняя задержка (б) для сети из 30 узлов в топологии 1000×1000 м: модель Затенения ($\beta = 3, \sigma = 4$)



■ Рис. 6. Средняя пропускная способность (а) и средняя задержка (б) для сети из 30 узлов в топологии 550×550 м (сценарий Манхэттен): модель трассировки совместно с моделью Уолфиша-Икегами

Измерения производились для значений загрузки сети от 97 до 60 % от пропускной способности канала, так как при меньшей загрузке значения оцениваемых параметров различных протоколов выравниваются. Результаты моделирования представлены на рис. 4–6.

Для модели двулучевого распространения лучшие результаты по средней задержке и пропускной способности при высокой загрузке сети демонстрирует протокол AODV. Если путь до адресата существует, то он будет найден, а маршруты, построенные этим протоколом, наиболее оптимальны. Са-

мая большая задержка при большом уровне трафика наблюдается у протокола GPSR. Причина этого – крайне неоптимальные маршруты, создаваемые этим протоколом.

Преимущества гибридной схемы маршрутизации начинают сказываться при малом и среднем (< 85 %) уровне загрузки сети. Такие результаты объясняются наличием двух режимов передачи пакетов данных: в случае большой плотности сети вокруг ретранслирующего узла используется передача «на лету» в GPSR-режиме, а при наличии пустых зон используются маршруты, прокладываемые AODV.

В случае использования модели Затенения, имитирующей «жесткие» городские условия, преимущества комбинированной схемы проявляются сильнее, а протокол CRP показывает наилучший результат для обоих оцениваемых параметров, выигрывая у протокола AODV.

Протокол GPSR в условиях города, когда число возможных маршрутов между узлами очень мало, работает крайне неудовлетворительно. Передача «на лету» не дает возможности определить верный маршрут (часто единственный) между источником и получателем. Ситуация невозможности дальнейшей перепосылки пакетов данных на промежуточных узлах является очень частой. Так как циклы и передача в обратном направлении не поддерживаются, то GPSR вынужден преждевременно удалять эти пакеты, что и объясняет небольшие значения средней задержки для данного протокола.

Моделирование городских условий с использованием предвычисленной (с помощью модели Уолфиша-Икегами) карты потерь при распространении

показывает похожие, в сравнении с приведенными выше, результаты для протоколов AODV и CRP по пропускной способности. При этом среднее время доставки пакетов при маршрутизации по AODV меньше, чем у CRP.

Выводы

Проведенный в работе анализ производительности нового комбинированного протокола маршрутизации в ad hoc-сетях (CRP) показал следующее.

1. Вне зависимости от условий распространения радиосигнала (город, пригород и т. п.) протокол CRP эффективно решает проблему периметра GPSR.

2. Протокол демонстрирует хорошие показатели средних пропускной способности и задержки при передаче пакетов по сравнению с базовыми схемами (AODV, GPSR) при любой степени загрузки сети.

Для некоторых моделей распространения CRP сильно выигрывает по приведенным показателям у этих протоколов.

Литература

1. Perkins C. E. Ad hoc Networks. – Addison-Wesley, 2001. – 384 с.
2. Perkins C. E., Royer E. M. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing // Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, February 1999. – С. 80–100
3. Karp V., Kung H. T. Greedy perimeter stateless routing for wireless networks // In Proc. of the 6th Annual ACM/IEEE Int.

Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000). (<http://www.eecs.harvard.edu/~karp/gpvs-mobicom2000.ps>).

4. Линский Е. М. Сравнение производительности протоколов маршрутизации для ad hoc-сетей // Вторая конференция БИКАМП. – СПб.: СПбГУАП, 2001. – С. 197–200.
5. Tanenbaum A. S. Computer Networks Prentice-Hall 3rd edition, 1996. – 912 с.
6. Ikegami F. et. al. Theoretical Prediction of Mean Field Strength on Urban Streets // IEEE Trans. Ant. and Prop. – Vol. 32, N 8, 1984.

В. Я. Мамаев, А. Н. Синяков, К. К. Петров, Д. А. Горбунов
Воздушная навигация и элементы самолетовождения: Учеб. пособие /
СПб.: СПбГУАП, 2002. – 256 с.: ил. ISBN 5-8088-077-3

Учебное пособие является усеченной бумажной версией электронного учебного пособия и содержит основной теоретический материал предметной области – воздушной навигации. Оно предназначено для самостоятельного изучения дисциплины, снабжено тестовыми заданиями и контрольными задачами, обеспечивающими самоконтроль приобретенных знаний.

Предназначено для студентов и курсантов авиационных специальностей вузов.

