УДК 621.391

УСТОЙЧИВОСТЬ СВЯЗИ В МНОГОПРОЛЕТНЫХ МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ С НАПРАВЛЕННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ СИГНАЛОВ

Ю.В. Невзоров, генеральный директор ОАО «МНИРТИ», к.т.н.
А.С. Султанов, начальник группы системных исследований ОАО «МНИРТИ», к.т.н.; a.sultanov@mnirti.ru

Ключевые слова: *многопролетные системы связи, динамическая топология, направленные антенны, маршрутизация, проблема «невосприимчивости».*

Введение. Сегодня направленная передача сигналов на базе технологии «интеллектуальных» или «адаптивных» антенн все шире применяется в распределенных радиосистемах передачи информации (РРСПИ) с динамической сетевой топологией, известных в англоязычной литературе как wireless mobile ad hoc networks [1]. Хотя применение направленной передачи сигналов потенциально позволяет повысить дальность, скрытность, помехозащищенность, пропускную способность и ЭМС системы, оно так же может вызывать и новые проблемы.

В частности, направленная антенна в определенный момент времени может поддерживать связь только в одном или нескольких направлениях, что делает мобильный узел временно «невосприимчивым» и невидимым для всех других направлений (рис. 1). «Невосприимчивость» (deafness – глухота) [2] вызывает нестабильную работу динамической маршрутизации, поскольку любой установленный маршрут может быть легко разрушен, если один из узлов ориентирован в другом направлении.

В статье исследуется качество выполнения маршрутизации в распределенных РРСПИ с динамической топологией при использовании направленной передачи.

Модель системы связи. Движение узлов имеет случайный характер и поэтому не поддается точному моделированию. Воспользуемся предложенной в [3] моделью подвижности в виде «случайных маршрутных точек». Для этого предположим, что размер сети составляет $a \times b$ [м^2], и в сети имеется N узлов. Каждый узел случайным образом выбирает в поле точку и перемещается в этот пункт со скоростью V, выбранной случайным образом из диапазона [0, V_{max}]. Когда пункт достигнут, узел делает остановку на θ [с], а затем перемещается аналогичным образом в другой пункт. Переменные V_{max} и θ могут использоваться для корректировки подвижности сети.

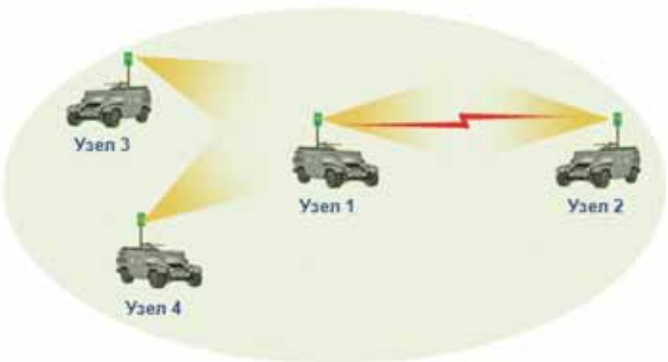

Рис. 1. **Иллюстрация «невосприимчивости» узла 1 к сигналам, передаваемым с узлов 3 и 4**

Пусть дальность действия узла с ненаправленной антенной составляет R [м], тогда среднее число соседей для каждого узла:

$$a_n = \frac{n}{ab}\pi R^2. \quad (1)$$

Поскольку одной из задач работы является сравнение результатов расчета с результатами моделирования, числовой анализ будет основан на параметрах моделирования. Для моделирования приняты следующие параметры модели:

- размер покрываемого сетью поля $a \times b = 3000 \times 700$ м^2;
- дальность передачи $R = 300$ м;
- максимальная скорость перемещения узла $V_{max} = 6$ м/с;
- количество мобильных узлов $N = 50$;
- время эксперимента $\tau = 100$ с.

При равномерном законе распределения скорости в диапазоне [0, V_{max}] среднее значение составит приблизительно 3 м/с. Тогда, в случае самого динамичного сценария, когда время паузы равняется нулю (т.е. узел всегда двигается), среднее расстояние, на которое перемещается каждый узел за время моделирования, составит 300 м. Так как дальность перемещения и максимальная дальность передачи оказываются сопоставимыми, есть основания полагать, что средняя частота разрыва соединения в течение времени моделирования для каждого узла будет близка к единице. Основываясь на этом предположении, найдем верхнюю границу общего числа отказов канала связи для случая ненаправленных антенн.

Предположим, что все узлы являются активными и у каждого есть активный канал, сообщающийся с половиной его соседних узлов. Тогда общее количество отказов канала связи будет меньше, чем

$$K_b = \frac{n}{2}\frac{\pi n R^2}{ab}. \quad (2)$$

Для некоторых направлений перемещения соседний узел останется в зоне действия исходного узла, даже если он переместится на 300 м. В этом случае активная связь не будет нарушаться в течение всего процесса моделирования. С учетом того, что множество связей не установлено с самого начала моделирования, фактическое число отказов канала связи может быть гораздо меньше K_b.

Рассмотрим пример, представленный на рис. 2, где узлы X и Z хотят послать пакеты в узел Y. Узел X начинает передачу пакета. Узел Z находится за пределами зоны действия узла X и, следовательно, не может принимать передачу узла X. Если узел Z предполагает, что канал не занят и начинает передавать свой пакет, то может создаться конфликт с незавершенной передачей между X и Y. Такую ситуацию часто называют проблемой «скрытого узла».

Следовательно, основная схема предотвращения коллизий с обнаружением несущей CSMA/CA будет работать неудовлетворительно. Для того чтобы это преодолеть, была предложена схема «виртуального контроля несущей» [4]. За-

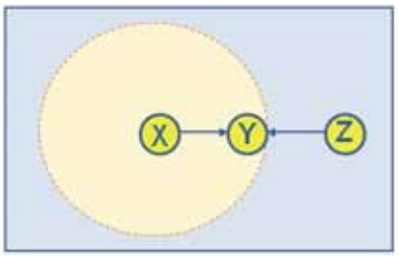

Рис. 2. **Иллюстрация проблемы «скрытого узла»**

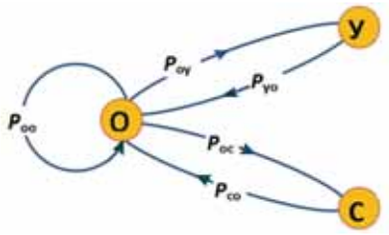

Рис. 3. **Модель марковской цепи для оценки вероятности срыва маршрутизации**

дача этой схемы – обеспечение узлов (соседних для отправителя и получателя) информацией о продолжающейся передаче. Реализуется это путем посылки коротких управляющих пакетов до начала передачи данных.

Когда отправитель хочет передать пакет и канал опознается как свободный, он посылает в приемник получателя пакет под названием «запрос на передачу» (RTS). После получения сигнала RTS, если физический канал не занят, получатель посылает обратно к отправителю сигнал готовности к приему (CTS). Тогда отправитель передает адресату информационный пакет (DATA). На правильный прием пакета DATA адресат посылает отправителю пакет с подтверждением (ACK). Этот вид сообщения помогает предотвратить описанную выше проблему «скрытого узла».

Количество отказов канала связи определяется как число раз, которое протокол доступа к среде передачи (MAC) не получает сигнал готовности к передаче (RTS) или отказ на передачу информации (DATA). Отказ на передачу информации обычно является следствием неполучения сигнала квитирования (ACK) или готовности к приему (CTS).

В системах с ненаправленными антеннами нарушение связи вызывается, главным образом, движением мобильных узлов. Когда узел *D* перемещается из зоны действия соседнего узла *S*, а узел *S* хочет передать пакеты *D*, то *S* получит множество отказов на сигнал запроса на передачу (RTS). Если число отказов достигнет предела, узел *S* предполагает, что *D* выходит из зоны действия, и выдает управляющее сообщение на разрыв соединения.

Однако в сетях с направленными антеннами главной причиной нарушения связи является «невосприимчивость» узлов к сигналам, приходящих с направлений, не совпадающих с ориентацией главного лепестка диаграммы направленности антенны. «Невосприимчивость» является специфической и существенной проблемой для направленных протоколов доступа к среде передачи (MAC-протоколов), например DMAC (Directional MAC) [5]. Полагаем, что все группы пакетов, включающие пакеты данных, пакеты RTS/CTS и ACK, передаются направленно. При этом для анализа используется сетевая модель системы [3]. В этой модели пространственное распределение мобильных узлов описывается двумерным законом Пуассона со средней плотностью λ, т.е. вероятность $p(i,S)$ обнаружения i узлов в области S может быть определена как:

$$P(i,S)=\frac{(\lambda S)^i}{i!}\mathrm{e}^{-\lambda S}. \qquad (3)$$

Предполагается, что все узлы работают в режиме дискретного времени при условии, что длительность дискрета (кванта) времени намного меньше длительности пакета. Время передачи всех пакетов RTS, CTS, DATA, ACK нормируется относительно длительности кванта и обозначается, соответственно, как T_{rts}, T_{cts}, T_{data}, T_{ack}. В начале каждого кванта времени каждый узел начинает свою передачу с вероятностью w, определяемой протоколом и зависящей от рабочего режима предотвращения конфликтов.

Анализ частоты срывов связи. Для анализа воспользуемся математическим аппаратом теории марковских цепей [6], которые моделируют вероятностный процесс, протекающий в дискретном времени. Обычно марковская цепь изображается в виде графа переходов, вершины которого соответствуют состояниям цепи, а дуги – переходам между ними. На рис. 3. приведен граф переходов для рассмотренной выше модели.

Как показано на рисунке, узел может быть только в трех различных состояниях: *О* – «ожидание» (задерживает или прекращает попытки передачи); *У* – «успех» (может завершить успешную передачу с другими узлами); *С* – «срыв» (инициализировал установление связи, которое оказалось неудачным).

Введем следующие обозначения для основных параметров марковской цепи на рис. 3:

$$\begin{gathered} T_y = T_{ns} + T_{ets} + T_{data} + T_{ack} + 4; \\ T_o = 1; \\ P_{oy} = P_{co} = 1; \\ P_{co} = (1-p)\mathrm{e}^{-\tilde{p}N}, \text{ где } \tilde{p} = p\frac{\theta}{2\pi}. \end{gathered} \qquad (4)$$

Пусть P_y, P_o, P_c обозначают стационарную вероятность состояний «успех», «ожидание» и «срыв», соответственно. Используя модель марковской цепи на рис. 3, можно получить:

$$P_o = P_o P_{oo} + P_y + P_c. \qquad (5)$$

Отсюда, с учетом (4), для стационарных значений вероятности состояний имеем:

$$\begin{gathered} P_o = 1/(2-P_{oo});\ P_y = P_{oy}/(2-P_{oo}); \\ P_c = 1 - P_o - P_y. \end{gathered} \qquad (6)$$

Когда узел имеет пакет для передачи и канал не занят, то этот узел может инициализировать успешное установление связи с соседним узлом при условии, что сосед находится в состоянии ожидания. С учетом времени пребывания в каждом состоянии T_o, T_y и T_c, вероятность нахождения соседнего узла в состоянии ожидания будет равна:

$$P_o = \frac{P_o T_o}{P_o T_o + P_y T_y + P_c T_c}. \qquad (7)$$

Появление «невосприимчивости» зависит от двух условий: соседний узел не находится в состоянии ожидания или он занят в одном из направлений, кроме направления на антенну передающего узла (см. рис. 1). Таким образом, вероятность неудачной попытки узла, пытающегося установить связь с «невосприимчивым» узлом, будет равна

$$P_a = \left(1 - \frac{\theta}{2\pi}\right)(1 - P_o). \qquad (8)$$

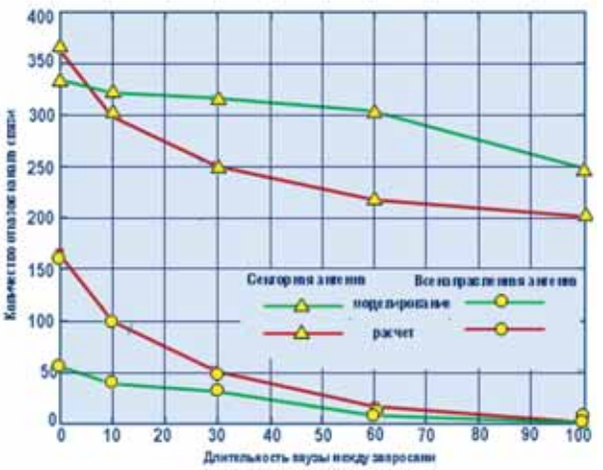

Рис. 4. **Зависимость количества отказов канала связи от длительности паузы между запросами**

После определенного числа срывов инициализаций установления связи канал связи должен отключаться. Вероятность разрыва канала связи может быть вычислена путем оценки вероятности неудачных k последовательных попыток Бернулли. Общее количество отказов канала может быть оценено как среднее значение. Опустив вывод, приведем конечное выражение для нижней границы $N_н$ этого среднего значения в виде:

$$N_н = N_0 \frac{N_n}{k} (P_a)^k, \qquad (9)$$

где N_0 и N_n – общее количество узлов и попыток, соответственно; k – порог отключения канала.

На рис. 4 показаны основанные на приведенных выше соотношениях результаты численных расчетов для всенаправленной (в горизонтальной плоскости) антенны и направленной секторной антенны, формирующей круговую диаграмму направленности, состоящую из шести независимых секторов по 60°. Для сравнения на графике приведены также результаты моделирования при тех же условиях отказов канала связи в РРСПИ.

В данном исследовании в качестве MAC-протокола использовался направленный протокол управления доступом к среде передачи (DiMAC) [5]. Протокол DiMAC основан на функции распределенной координации (DCF) IEEE 802.11 [7] и использует сигналы RTS и CTS для канального резервирования. В DiMAC пакеты RTS и CTS передаются и принимаются направленными антеннами через один определенный секторный элемент антенны. Согласно спецификации DiMAC, разработаны три модуля, основанные на DCF 802.11 и реализующие механизм канального резервирования для каждого элемента секторной антенны, функцию свипирования для широковещательной рассылки пакетов и таблицу соседних узлов.

Моделирование и оценки. При моделировании для всего трафика в системе устанавливался режим постоянной битовой скорости. В каждом узле для пакетов, ожидающих свободные маршруты, предусмотрен буфер передатчика на 64 пакета. Пары источник-адресат выбирались случайным образом из всего набора узлов. При этом для каждого потока скорость передачи составляла четыре пакета в секунду с размером пакета 512 байтов. Стартовое время передачи пакетов для каждого узла-источника выбиралось в диапазоне 0–30 с. Чтобы сравнение результатов было корректным, каждый протокол моделировался при одинаковом трафике и сценарии подвижности, а каждая точка на графике (рис. 4) была получена путем усреднения результатов десяти циклов моделирования.

Как можно видеть из графиков, в случае направленных антенн отказ канала наступает почти в десять раз чаще, чем для ненаправленных. Это совпадает с приведенными выше результатами аналитического исследования, подтверждающего, что система с направленными антеннами имеет намного более динамичную топологию за счет «невосприимчивости» узлов.

Для доставки пакета наиболее распространенные протоколы маршрутизации в РРСПИ с динамической топологией обычно выбирают единственный маршрут по критерию наименьшего количества переприемов. Главная проблема таких протоколов для направленных антенн – высокая вероятность отказов канала связи из-за «невосприимчивости» промежуточных узлов. В [7] сделано предположение о возможности уменьшения негативного влияния направленности антенн на качество маршрутизации за счет использования многопутевой маршрутизации.

Такая маршрутизация базируется на принципе динамической маршрутизации от источника Dynamic Source Routing (DSR) [7] и обозначается как DSMDR (зависимая от задержки многопутевая направленная маршрутизация). В DSMDR [8] каждый узел поддерживает таблицу маршрутизации, в которой перечисляются пути от отправителя к каждому потенциальному адресату. Каждый узел обновляет таблицу маршрутизации в соответствии с любым принятым пакетом независимо от адресата. DSMDR использует такой же алгоритм поиска маршрута и схему обслуживания, как и DSR, но, в отличие от DSR, в DSMDR предусмотрена возможность записи в таблицу маршрутизации множества маршрутов к каждому адресату. Тогда, если какой-либо маршрут попадает на занятый канал, немедленно может быть выбран альтернативный маршрут.

Для сравнения на рис. 5 представлены полученные путем моделирования оценки рабочих характеристик протоколов маршрутизации DSR и DSMDR для различной сетевой топологии и разной подвижности узлов. Для оценки эффективности маршрутизации используются два показателя: количество доставленных пакетов и полная задержка пакета.

Количество доставленных пакетов оценивается отношением числа полученных пакетов к числу пакетов, передан-

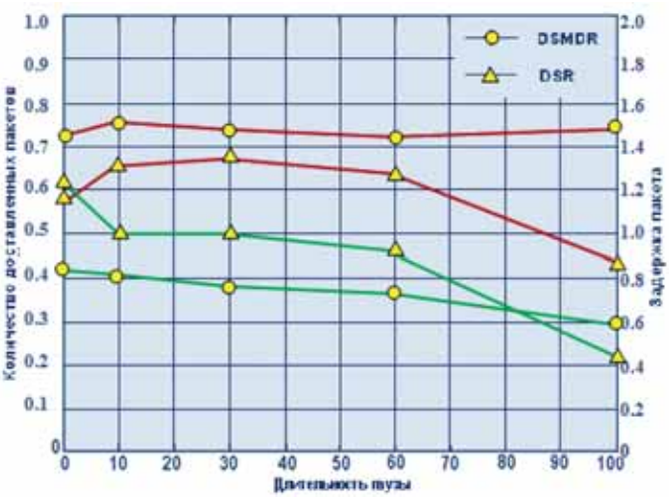

Рис. 5. **Зависимости количества доставленных пакетов (красный цвет) и полной задержки пакета (зеленый цвет) от длительности паузы**

ных узлом-источником. Полная задержка пакета вычисляется только по пакетам, переданным успешно. Она включает время на поиск маршрута: задержку в очереди в каждом промежуточном узле, задержку получения доступа к среде передачи и задержку передачи через каждый пролет. Эти два параметра связаны друг с другом. Поскольку полная задержка оценивается только по успешно переданным пакетам, то в некоторых ситуациях низкая частота доставки может быть обусловлена большой полной задержкой.

Из анализа графиков на рис. 5 следует, что в целом DSMDR существенно превосходит по быстродействию DSR по следующим причинам:

- за счет большей дальности передачи DSMDR может находить более короткие маршруты, а также перекрывать разрывы в сети;
- пропускная способность канала связи увеличивается благодаря использованию пространственной многоканальности;
- за счет использования многопутевой маршрутизации уменьшается влияние «невосприимчивости» промежуточных узлов.

Заключение. Исследование эффективности применения направленных антенн в РРСПИ с динамической топологией показало, что частота срывов связи, обусловленых «невосприимчивостью» узлов, в системах с направленными антеннами выше, чем в системах с ненаправленными. Моделирование выявило, что направленные антенны с надлежащей структурой MAC-протоколов и протоколов маршрутизации в некоторых ситуациях могут улучшить рабочие характеристики распределенных систем с динамической топологией.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Winters J.H.** Smart antenna techniques and their application to wireless ad hoc networks // IEEE Wireless Communications. – August 2006. – Vol. 13. – P. 77–83.
2. **Choudhury R.R., Vaidya N.H.** Deafness: A MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas // in Proceeding of the 2th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), 2004.
3. **Trivedi M., Shriwastava S.K., Purohit P.K**. Topology and Routing in Computational Capacity Evaluation of Ad hoc Networks // International Journal of Computer Science and Network Security. – September 2009. – Vol.9, №9. – P. 50–58.
4. **Takai M., Martin J., Ren A., Bagrodia R.** Directional Virtual Carrier Sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks / in ACM MobiHoc 2002, Lausanne, Switzerland. – June 2002.
5. **Choudhury R.R., Yang X., Ramanathan R., Vaidya N.H.** On designing mac protocols for wireless networks using directional antennas // IEEE Trans. Mobile Comput. – 2006. – №5 (5). – P. 477– 491.
6. **Чжун Кай-лай.** Однородные цепи Маркова: Пер. с англ. — М.: Мир, 1964. – 425 с.
7. **Ramanathan R., Redi J., Santivanez C. et al.** Ad Hoc Networking With Directional Antennas: A Complete System Solution // IEEE journal on selected areas in communications. – March 2005. –Vol. 23, № 3. – P.496–505.
8. **Zhang Z.** DTRA: Directional Transmission and Reception Algorithms in WLANs with Directional Antennas for QoS Support // IEEE Network. – May-June 2005. –Vol. 19, №3. – P. 27–32.

Получено 25.03.13