

# Адаптивная проактивная маршрутизация с минимальной служебной нагрузкой в беспроводных самоорганизующихся сетях

## Adaptive proactive routing with minimum control traffic in wireless ad hoc networks

**Ключевые слова:** Ad hoc-сети – Ad hoc networks; адаптивная маршрутизация – adaptive routing; снижение служебной нагрузки – control traffic lowering.

В статье рассматриваются основные алгоритмы маршрутизации, применяемые в беспроводных самоорганизующихся сетях (Ad hoc-сетях). Даётся краткое описание зондового метода оперативного управления потоками данных. Подробно описывается алгоритм безадресного зондирования, и приводится пример работы алгоритма на небольшом фрагменте сети. Приводятся расчеты нагрузки на сеть служебной информации.

This article deals with main routing algorithms used in wireless ad hoc networks. A brief description of the probe method for prompt management of data flows is given. The addressless probing algorithm is described in detail and provided with an example for a small network segment. Network load calculations for internal data are shown.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество алгоритмов маршрутизации, реализующих различные методы динамического управления потоками данных, обеспечивающих сбор и актуализацию маршрутной информации на каждом узле при децентрализованном управлении и на центре управления сетью при централизованном управлении. В беспроводных самоорганизующихся сетях (также часто встречается наименование Ad hoc-сети) применяется принцип децентрализованного управления, обеспечивающий более высокую устойчивость сети, и нижеследующие основные типы алгоритмов [1].

1. Проактивные дистанционно-векторные алгоритмы (например, протокол DSDV), осуществляя-

**АВАНЕСОВ / AVANESOV M.**

**Михаил Юрьевич**

(avanesov@itain.spb.ru)  
кандидат технических наук.  
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,  
научный секретарь.  
г. Санкт-Петербург

ющие выбор маршрута по принципу наименьшего количества ретрансляций.

2. Реактивные алгоритмы состояния канала (например, протокол OLSR), основанные на широковещательной рассылке информации о состоянии всех подключенных каналов, на основе которой осуществляется построение маршрутных таблиц.

3. Реактивные поисково-волновые алгоритмы (например, протокол AODV), осуществляющие поиск маршрута только по требованию путем широковещательной рассылки поисковых запросов.

Выбор типа применяемого в сети алгоритма маршрутизации осуществляется исходя из особенностей ее функционирования. Преимущества и недостатки, а также особенности применения указанных алгоритмов широко освещены в литературе [2–3], поэтому в данной статье не ставится цель проведения сравнительного анализа применяемых алгоритмов маршрутизации. Однако необходимо отметить, что выбор между проактивной и реактивной маршрутизацией – это всегда поиск компромисса между готовностью сетью к передаче данных и вынужденной служебной нагрузкой на сеть. Это обуславливает необходимость поиска новых алгоритмических решений в области проактивной маршрутизации, позволяющих минимизировать служебную нагрузку и отвечающих всем требованиям маршрутизации в беспроводных Ad hoc-сетях (живучесть, надежность, оперативность, полнота контроля и др.).

### ЗОНДОВЫЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ДАННЫХ

Для решения задачи снижения служебной нагрузки на сеть предлагается использовать алгоритм марш-

рутизации на основе зондового метода управления потоками данных [4]. Суть метода заключается в следующем: с любого узла сеть зондируется небольшими пакетами, называемыми зондами, осуществляющими накопление в себе информации о состоянии сети. При получении зонда узел анализирует информацию о пути прохождения зонда, на основе которой добавляет записи в собственные матрицы, в которых содержится маршрутная информация, после чего проверяет ряд условий и рассыпает зонд по всем исходящим ветвям.

Если зонд прибыл в узел  $k$  первым, то на узле принимается решение о начале нового цикла зондирования, в зонд заносится информация о прохождении узла  $k$ , дополненный зонд рассыпается по всем исходящим ветвям, каналу, по которому принят зонд, приписывается маршрут первого выбора ко всем узлам, адреса которых вписаны в зонд, на узле сохраняется вся необходимая информация, содержащаяся в зонде.

Если зонд прибыл в узел  $k$   $i$ -м, номер ребра, по которому принят зонд, дополняется в свободное место в матрице маршрутов для каждого узла, адрес которого вписан в зонд. Далее, если информация, содержащаяся в зонде, присутствовала на узле до получения зонда, зонд уничтожается. В противном случае, если зонд не содержит циклов, он дополняется адресом узла  $k$  и рассыпается по всем исходящим ветвям. Если зонд содержит циклы, он дополняется адресом узла  $k$  и рассыпается по всем исходящим ветвям кроме той, по которой был принят.

Матрица маршрутов  $V$ -го узла представляет собой прямоугольную матрицу, в которой столбцы соответствуют узлам, до которых проложен

маршрут, строки – номерам приоритета выбора выходного канала (порта) для передачи данных по маршруту, а элементы содержат номера выходных каналов (портов):

$$M_v = \|m_{gs}^v\|_{Q^v \times N},$$

$$v \in N, s \in N, v \neq s, g \in Q^v, m \in Q$$

где  $N$  – множество узлов в сети;

$Q^v$  – множество выходных каналов (портов) узла  $v$ ;

$m_{gs}^v$  – элемент матрицы маршрутов узла  $v$ , соответствующий номеру выходного канала (порта), через который проходит маршрут  $g$ -го выбора к вершине  $s$ .

Моделирование функционирования сети с реализацией предлагаемого метода показали [5], что при выполнении на каждом узле данных операций обеспечивается построение полных матриц маршрутов на каждом узле сети.

На рис. 1 изображен граф сети: номер вершины соответствует порядковому номеру узла, каждое ребро характеризуется временем передачи зонда, инцидентные ребра у каждой вершины пронумерованы и соответствуют номерам каналов (портов) узла.

#### АЛГОРИТМ БЕЗАДРЕСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

На базе зондового метода может быть реализовано множество различных алгоритмов, позволяющих, в зависимости от допустимого уровня служебной нагрузки, осуществить построение матрицы смежности или матрицы весов графа сети на каждом узле. Ниже описан алгоритм безадрес-

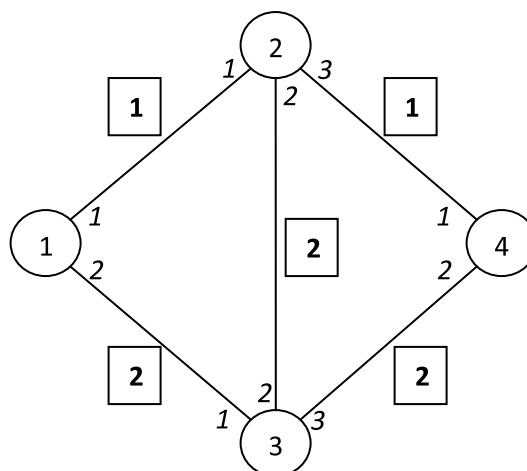


Рис. 1. Фрагмент сети

# ИНФОКОММУНИКАЦИИ

ного зондирования, обладающий наименьшей служебной нагрузкой и наибольшим быстродействием.

С целью уменьшения служебной нагрузки при безадресном зондировании используются не адреса узлов, а их порядковые номера. Зонд представляет собой набор флагов, общее количество которых совпадает с количеством узлов. Установка флага в позиции, соответствующей порядковому номеру узла, соответствует прохождению зондом данного узла. Пример зонда, прошедшего через узлы 1, 3 и 4, приведен на рис. 2:

Очевидно, что размер зонда при безадресном зондировании зависит от количества узлов. Для фрагмента, приведенного на рис. 1, каждый зонд будет иметь размер 4 бита (полбайта).

Селекция зондов при безадресном зондировании осуществляется по принципу наличия информации о каждом узле, флаг которого установлен в зонде. Так зонд, пример которого приведен на

рис. 2, пройдет селекцию, если информация об узлах 1, 3 и 4 отсутствовала в матрице маршрутов на узле, принявшем данный зонд.

В табл. 1 проиллюстрирован пример безадресного зондирования сети, изображенной на рис. 1, с узла 1.

Столбцы таблицы обозначают номера узлов, принявших зонд. Содержимое зонда указано в ячейках таблицы. В скобках указывается номер ветви (порта), по которой принят зонд. Желтым цветом выделены зонды, которые не имеют циклов и рассылаются по всем инцидентным ветвям. Без выделения указаны зонды, которые содержат циклы и рассылаются по всем инцидентным ветвям кроме той, по которой зонд был доставлен в узел. Перечеркнуты зонды, которые не прошли селекцию.

Матрицы маршрутов, полученные в результате безадресного зондирования фрагмента сети, приведены на рис. 3.

1	2	3	4
1	0	1	1

Рис. 2. Пример зонда, прошедшего через узлы 1, 3 и 4

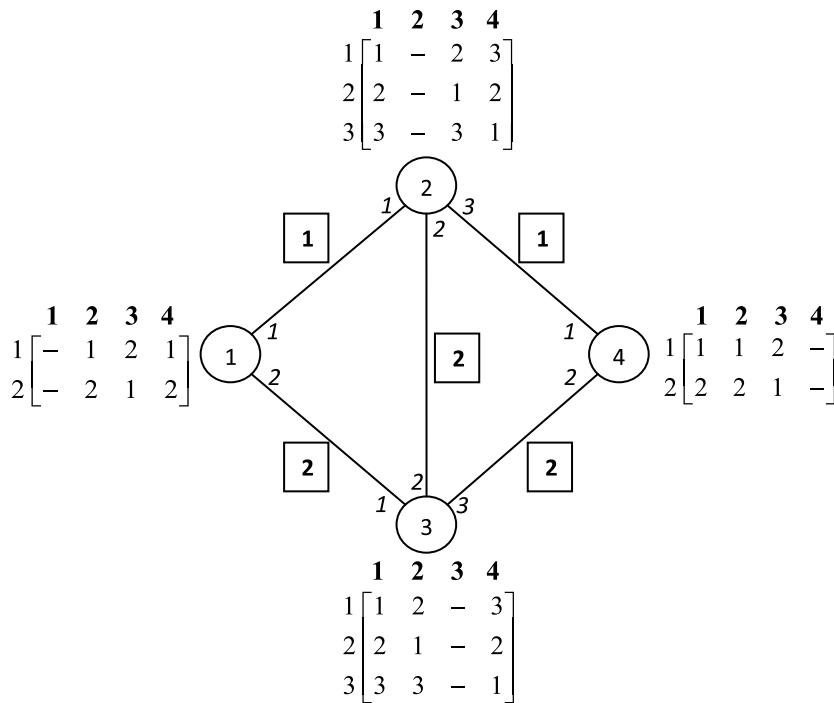


Рис. 3. Матрицы маршрутов, полученные в результате безадресного зондирования фрагмента сети

Таблица 1

## Пример безадресного зондирования

Шаг	1	2	3	4
1		1000(1)		
2	1100(1)		1000(1)	1100(1)
3		1101(3)	1100(2)	
4	1010(2) 1101(1)	1010(2)	1100(1) 1101(3)	1010(2)
5	1110(2) 1110(1)	1110(2) 1010(1) 1011(3)	1101(2)	1110(2) 1110(1)
6	1111(1) 1111(2)	1110(1) 1111(2)	1101(1) 1110(2) 1011(3)	1111(1) 1111(2)
7		1111(1)	1110(2) 1111(2)	
8			1111(1)	

Как видно из рис. 3, в результате безадресного зондирования с одного узла на каждом узле сети сформированы полные матрицы маршрутов, учитывающие все возможные обходные маршруты.

Максимальное количество зондов, которое может быть в сети при безадресном зондировании можно оценить следующим образом. Обозначим  $N$  – количество узлов,  $d_{cp}$  – среднее количество инцидентных каждому узлу ветвей. Зонды генерируются в двух случаях:

1) если зонд не имеет циклов и содержит информацию о новом узле: таких зондов может быть не более

$$Z_1 \leq N(N-1) \cdot d_{cp}$$

2) если зонд имеет циклы и содержит информацию о новом маршруте: таких зондов может быть не более

$$Z_2 \leq N(N-1) \cdot d_{cp} (d_{cp} - 1) - N(N-1) \cdot d_{cp}$$

Тогда общее количество зондов, передаваемых за один цикл безадресного зондирования, не может превышать

$$Z \leq Z_1 + Z_2 \leq N(N-1) \cdot d_{cp} (d_{cp} - 1)$$

Среднее количество зондов, которые необходимо передать по одному каналу за один цикл безадресного зондирования не может превышать

$$z \leq \frac{Z}{Nd_{cp}} \leq 2(N-1)(d_{cp} - 1)$$

Количество бит одного зонда равно количеству узлов в сети. Тогда общее количество служебного трафика, приходящегося на один канал:

$$Tr_{cl} \leq 2N(N-1)(d_{cp} - 1) \text{ бит}$$

Время, затрачиваемое на передачу служебного трафика при безадресном зондировании, рассчитывается исходя из канальной скорости  $Br$ :

$$T_{\text{безадр. зонд}} \leq \frac{2N(N-1)(d_{cp} - 1)}{Br} \text{ сек.}$$

# ИНФОКОММУНИКАЦИИ

Если принять, что в сети  $N = 16$ ,  $d_{\text{ср}} = 4$  (всего 16 узлов, каждый узел имеет по 4 порта), а средняя канальная скорость  $Br = 64$  кбит/с, то время, затрачиваемое на безадресное зондирование, не будет превышать значения  $T_{\text{безадр. зонд}} \leq 22$  мс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

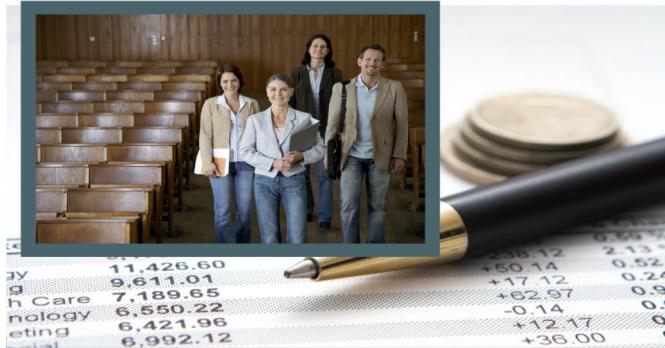
Таким образом, применение алгоритма безадресного зондирования на базе зондового метода оперативного управления потоками данных позволяет обеспечить построение полных матриц маршрутов на каждом узле сети при минимальной нагрузке на сеть служебной информацией. Расчеты, приведенные в статье, показывают что максимальное время построения всех матриц маршрутов для сети из 16 узлов составляет десятки миллисекунд при относительно невысокой канальной скорости (64 кбит/с).

## Литература

1. Azzedine Boukerche. Algorithms and protocols for wireless, mobile ad hoc networks. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 495 p.
2. Орлов, В.Г. Протоколы маршрутизации в мобильных Ad hoc-сетях / В.Г. Орлов, А.Н. Фадеев // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC–2012. – М.:МИРЭА. – С. 208–212.
3. Протоколы маршрутизации в мобильных Ad hoc-сетях / В.М. Винокуров [и др.] // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2 (22). – С. 288–292.
4. Аванесов, М.Ю. Оперативное управление потоками данных в мультисервисных сетях связи / М.Ю. Аванесов, С.П. Присяжнюк; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2007. – 81 с.
5. Аванесов, М.Ю. Модель оценки динамических характеристик работы зондового протокола адаптивной маршрутизации / М.Ю. Аванесов, Н.Е. Бойков // Информация и Космос. – 2006. – №2. – С. 44–49.

Готовитесь к защите?  
Наш журнал приглашает авторов,  
соискателей научных степеней  
опубликовать статьи.

# ИНФОРМАЦИЯ КОСМОС



Дополнительная информация:  
Тел. +7 (812) 740-77-07  
отдел маркетинга