

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕПЛИКАЦИИ ДАННЫХ В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ MANET

Сомов С.К.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д.65
ssomov2016@ipu.ru

Аннотация: В работе предлагается метод и новый эвристический алгоритм репликации данных в мобильных сетях произвольной структуры MANET, основанный на анализе трафика запросов в узлах сети. Представлена формальная модель мобильной сети MANET. Предложен метод репликации данных, который учитывает особенности сетей MANET. Метод использует несколько эвристик для эффективного перераспределения реплик в узлах сети. Цель перераспределения реплик заключается в поддержке высокой степени доступности и сохранности данных.

Ключевые слова: беспроводные сети, сети MANET, перераспределение реплик данных в узлах сети.

Введение

В течение последних двадцати лет этого столетия бурно развивались технологии мобильной связи, находящей широкое применения для построения беспроводной сотовой связи и мобильных вычислений. За это время мобильное устройство преобразилось из простого пейджера в мобильный смартфон, планшет или ноутбук, обладающий разнообразным функционалом. Мобильные устройства, объединенные в беспроводную сеть, предоставляют их владельцам сервисы навигационного устройства GPS и ГЛОНАСС, возможности использования различных веб-браузеров, средств обмена мгновенными текстовыми, аудио и видео сообщениями, средства для онлайн связи с банком, портативную игровую консоль или музыкальный центр, и даже компьютер с различными установленными приложениями и многое другое.

Глобальное распространение сетей мобильной связи предъявляет к ним несколько важных требований. Мобильные сети должны обладать высокой степенью надежности и производительности, чтобы предоставлять пользователю постоянный качественный доступ к сетевым ресурсам и обеспечивать высокий уровень сохранности информации.

Одним из наиболее эффективных средств удовлетворения этих требований являются методы репликации данных в узлах мобильной сети.

1. Особенности сетей MANET

Беспроводные сети принято относить к одному из двух типов: инфраструктурные сети и сети ad-hoc [1]:

Инфраструктурные сети (Wi-Fi Hotspot), которые используют ресурсы проводных сетей, и предоставляет различным мобильным устройствам пользователей точки Wi-Fi доступа к ресурсам Всемирной паутины (интернет).

Беспроводные ad-hoc сети обладают существенным отличием от инфраструктурных сетей, которое состоит в том, узлы (мобильные устройства) в таких сетях соединяются между собой случайным образом.

Наиболее функционально развитым вариантом беспроводных ad-hoc сетей являются одноранговые мобильные сети с произвольной структурой MANET. Сети MANET образуются из множества мобильных устройств (узлов), которые перемещающихся в пространстве и могут работать изолированно или иметь интерфейсы или шлюзы для выхода в стационарные сети.

Мобильные сети MANET имеют следующие наиболее важные особенности:

- Сеть не имеет инфраструктуры, у нее отсутствует централизованное управление.
- В сети нет базовых станций и маршрутизаторов.
- У мобильных устройств ограниченная емкость батарей.
- Топология сети меняется в произвольные моменты времени из-за мобильности узлов сети.
- Частое отключение узлов от сети и подключение новых мобильных узлов.
- Нарушения связности сети (разделение сети на фрагменты).

2. Метод репликации данных в сети MANET

Особенности организации и функционирования мобильных сетей не позволяют эффективно применять для них традиционные методы репликации, используемые, например, в распределенных системах [2-5].

В данной работе предлагается новый метод и эвристический алгоритм распределения реплик элементов данных в узлах беспроводной сети MANET. Цель метода заключается в обеспечении максимальной сохранности данных, их доступности и производительности мобильной сети MANET.

В предлагаемом методе и алгоритме учитываются такие параметры сети MANET, как:

- топология сети,
- частота обращений узлов сети к каждому элементу данных,
- вероятность отказа каналов связи между узлами сети,
- объем памяти каждого узла, выделенный для хранения элементов данных и их реплик

Вычислительная сложность предлагаемого метода велика, поэтому в алгоритме распределения реплик используются следующие эвристики:

- Реплики элементов данных перемещаются между узлами через интервалы времени переменной длительности (интервалы передислокации реплик).
- Длительность данного интервала рассчитывается автономно в каждом узле сети:
 - Для каждого нового узла начальное значение интервала принимается равным значению параметра, величина которого задается администратором сети.
 - Длительность интервала рассчитывается в каждом узле по окончании работы алгоритма передислокации. Длительность интервала умножается на коэффициент $K1$, если изменился состав элементов данных в этом узле. Иначе значение интервала уменьшается умножением на коэффициент $K2$, меньший единицы. Значения $K1$, $K2$ устанавливается администратором.
- В каждом узле сети в начале каждого интервала происходит передислокация реплик.
- Новое расположение реплик определяется с учетом перечисленных выше параметров мобильной сети.
- Алгоритм расчета передислокации реплик работает автономно в каждом узле сети.

Предполагается, что маршрутизация сообщений в сети основывается на использовании проактивного протокола (например, OSPF MANET[2]). Протокол использует локальные таблицы маршрутизации, размещенные в узлах сети. Маршруты регулярно перестраиваются при изменениях в топологии сети.

3. Формальная модель беспроводной сети MANET

Топология сети MANET представлена неориентированным взвешенным графом $G = (N, X)$. Здесь N это множество из K вершин, а X – множество взвешенных ребер графа. Для каждого ребра графа задан его вес - расстояние между двумя инцидентными вершинами графа. Так как вершины сети мобильны и перемещаются в разных направлениях на произвольное расстояние, то топология сети изменяется соответствующим образом. Кроме того, узлы сети могут, как добавляться в сеть, так и «исчезать».

Каналы связи сети ненадежны и с вероятностью P_{kn} могут отказать при передаче сообщения ($P_{kn} = P_{nk}$). Если значение вероятности P_{kn} превышает значение параметра LP , то связь между узлами N_k и N_n не возможна.

Если в узле N_k должен быть размещен некоторый элемент данных, то этот элемент реплицируется из ближайшего узла N_n , имеющего необходимый элемент данных и соседнего по отношению к узлу N_k .

Для каждого узла сети определяется его подмножество соседних (смежных) узлов. Узел n включается в подмножество соседних для узла k узлов при выполнении двух условий:

- 1). Узел n расположен в зоне видимости узла k .
- 2). Значение вероятности r отказа радиоканала связи между узлами не превышает LP .

В предлагаемой модели используются обозначения:

$N = \{N_k\}, k = \overline{1, K}$ множество всех узлов беспроводной сети.

RR радиус зоны радиовидимости. Предполагаем, что он одинаков для всех узлов.

$D = \{d_i\}, i = \overline{1, I}$ –кортеж номеров элементов данных, хранящихся в узлах сети.

$S = \{S_i\}$ – кортеж с размерами соответствующих элементов данных из кортежа D .

\bar{S} – максимальный объем памяти всех узлов сети, который можно использовать для хранения элементов данных и их реплик.

$F^k = \|f_{ji}^k\|$ – матрица размерности $2 \times I$, состоящая из двух строк. Элементы первой строки (1,i)-номера d_i элементов данных. Во второй строке (2,i) хранится количество запросов к элементу d_i , сгенерированных в узле k в течение предыдущего интервала передислокации реплик.

$X_k = \|x_{ki}\|$ – матрица размерности $K \times I \times 1$ в которой хранятся сведения о размещении в узлах сети элементов данных, к которым в узле k возникают запросы. Экземпляры данной матрицы хранятся в каждом узле сети.

$AM = \{am_1, \dots, am_k, \dots, am_K\}$ – кортеж с текущими объемами свободной памяти узлов сети.

$XY = \|x_k, y_k\|, k = \overline{1, K}$ – матрица размерности $K \times 2$, элементы которой это текущие координаты узлов сети. Аналогичные матрицы хранятся во всех узлах сети. Элементы матриц обновляются по завершении каждого интервала передислокации реплик. Узлы, изменившие свое местоположение, рассылают по сети соответствующие широкоэвещательные сообщения.

GAM – матрица смежности взвешенного графа $G = (N, X)$. Каждая дуга графа «раскрашена» расстоянием между смежными вершинами графа. Расстояние $dist_{kn}$ между вершинами графа N_k, N_n рассчитывается по формуле:

$$dist_{kn} = \sqrt{(x_n - x_k)^2 + (y_n - y_k)^2} \quad (1)$$

В этой формуле координаты вершин графа (x_n, y_n) и (x_k, y_k) это элементы таблицы XY .

SP^k – матрица размерности $K \times 3$, которая для каждого узла k описывает кратчайшие пути от узла от этого узла до других узлов сети. Каждый узел сети хранит свой экземпляр матрицы SP^k .

8 Эвристический алгоритм репликации элементов данных в сети MANET

Предложенный в работе эвристический алгоритм предназначен для решения двух основных задач. За счет передислокации реплик элементов данных по узлам сети необходимо:

- Уменьшить количество генерируемых в сети глобальных запросов, которые маршрутизируются для обработки в узлы сети, находящиеся вне зоны радиовидимости узлов-источников запросов.
- Максимально увеличить количество локальных запросов, которые могут обрабатываться в самих узлах-источниках запросов или в одном из соседних узлов, находящихся в зоне радиовидимости узла-источника запроса.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1.

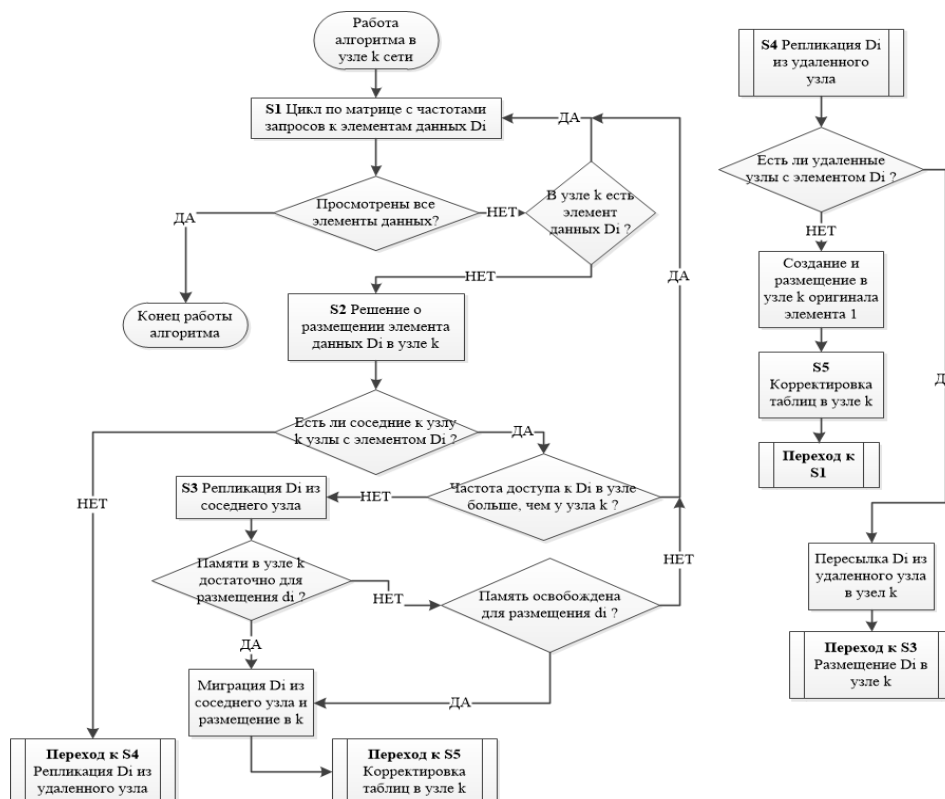


Рис. 1. Блок-схема алгоритма репликации в узлах сети MANET

Эвристический алгоритм передислокации реплик элементов данных работает в узлах сети автономно и не зависимо от других узлов. Момент запуска алгоритма в каждом узле сети совпадает с окончанием текущего интервала передислокации реплик для данного узла. Подсчет времени передислокации реплик осуществляется каждым узлом автономно.

9 Пример работы алгоритма передислокации реплик в произвольном узле сети.

Рассмотрим то, как работает предложенный в работе алгоритм фрагменте мобильной сети, состоящей из $K=16$ узлов, представленной ниже на рисунке.

Предположим, что наступил момент времени, когда алгоритм передислокации должен запуститься одновременно в трех узлах сети с номерами 1, 8 и 12.

На момент начала работы алгоритма мобильная сеть имеет топологию, показанную на рисунке 2. В узлах сети размещены реплики и оригиналы элементов данных.

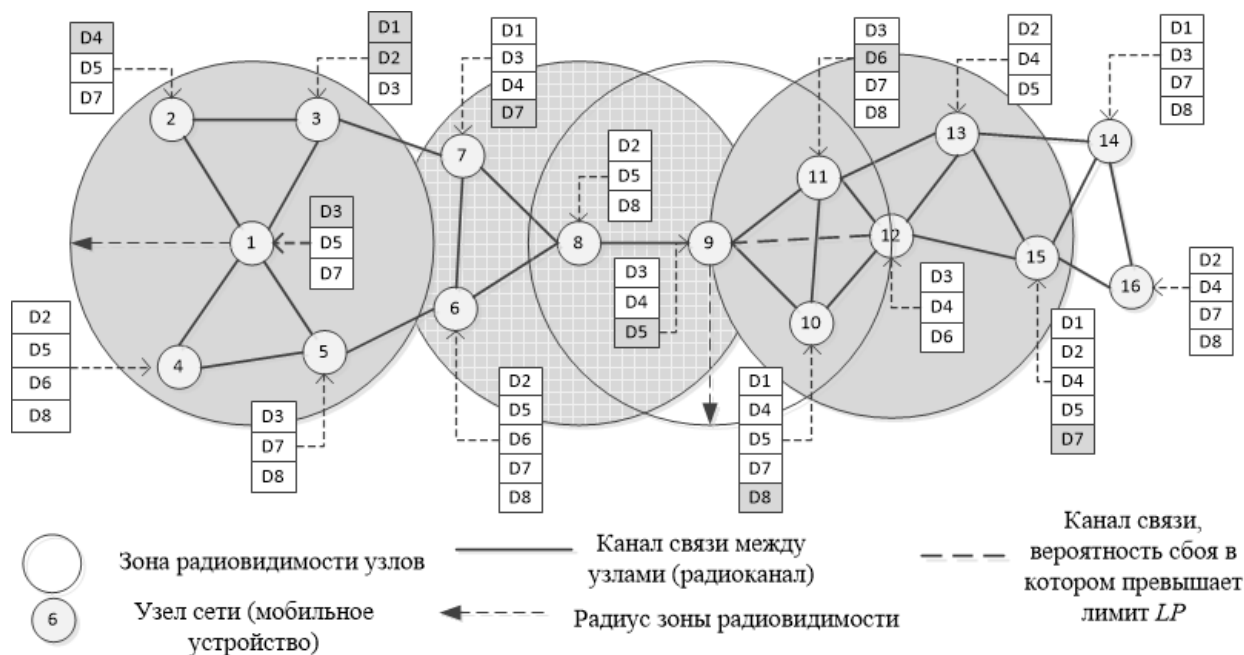


Рис. 2. Топология мобильной сети с размещенными в узлах репликами

На рисунке показаны зоны радиовидимости для узлов 1, 8 и 12. Рядом с каждым узлом показаны столбцы с номерами размещенных в них элементов данных (на сером фоне) и их реплик.

Известны значения следующих параметров сети, которые используются в алгоритме репликации:

$I = 8$ – количество используемых в сети оригинальных элементов данных.

$S = \{S_i\}$ – кортеж с размерами d_i оригинальных элементов данных и их реплик.

$\bar{S} = 100$ – объем памяти, доступный для хранения в узлах сети элементов данных и реплик.

$RR = 15$ – радиус зоны радиовидимости узлов сети.

$LP = 0,05$ – минимально допустимое значение вероятности P_{kn} отказа каналов связи между любыми смежными узлами сети.

Таблица 1. Кортеж S с размерами элементов данных и их реплик

Элемент данных	1	2	3	4	5	6	7	8
Размер элемента	20	20	30	20	10	30	20	20

Ниже представлены две таблицы, которые соответствуют топологии мобильной сети.

SP^k - матрица с описанием кратчайших путей для рассматриваемых трех узлов сети $k \in \{1,8,12\}$.

GAM - симметричная матрица смежности графа $G = (N, X)$.

Таблица 2. Матрица SP^k кратчайших путей для узлов 1,8,12

Список путей узла 1			Список путей узла 8			Список путей узла 12		
Узел	Длина	Список узлов	Узел	Длина	Список узлов	Узел	Длина	Список узлов
1	0		1	34	8,6,5,1	1	56	12,11,9,8,6,5,1
2	12	1,2	2	46	8, 6,5,1,2	2	54	12,11,9,8,7,3,2
3	12	1,3	3	22	8,1,3	3	44	12,11,9,8,7,3
4	10	1,4	4	32	8,6,5,4	4	56	12,11,9,8,6,5,4
5	12	1,5	5	22	8,6,5	5	46	12,11,9,8,6,5
6	24	1,5,6	6	10	8,6	6	34	12,11,9,8,6
7	24	1,3,7	7	10	8,7	7	32	12,11,9,8,7
8	34	1,5,6,8	8	0		8	22	12,11,9,8
9	42	1,5,6,8,9	9	8	8,9	9	14	12,11,9
10	50	1,5,6,8,9,10	10	16	8,9,10	10	8	12,10
11	50	1,5,6,8,9,11	11	16	8,9,11	11	6	12,11
12	56	1,5,6,8,9,11,12	12	22	8,9,11,12	12	0	
13	64	1,5,6,8,9,11,13	13	24	8,9,11,13	13	8	12,13
14	74	1,5,6,8,9,11,13,14	14	34	8,9,11,13,14	14	18	12,13,14
15	66	1,5,6,8,9,11,12,15	15	32	8,9,11,12,15	15	10	12,15
16	72	1,5,6,8,9,11,12,15,6	16	38	8,9,11,12,15,16	16	16	12,15,16

Таблица 3. Матрица GAM смежности взвешенного графа

Узел сети	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	12	12	10	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	12	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	12	10	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	12	0	0	10	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	12	0	12	10	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	12	0	0	12	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	10	10	0	8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8	8	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	10	8	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	8	10	0	6	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	6	0	8	0	10	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	0	10	12	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10	12
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	12	10	0	6
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	6	0

В таблице 4 представлены размеры памяти узлов, которая использована репликами элементов данных, размещенных в этих узлах. Размеры использованной памяти узлов определяются с использованием данных матриц X_k и кортежа S с размерами элементов данных и их реплик.

Таблица 4. Объем памяти узлов, занятой размещенными в узлах репликами элементов данных

Узел сети	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Объем памяти	60	50	70	80	70	100	90	50	60	90	100	80	50	90	90	80

Частоты запросов к элементам данных (элементы матрицы F_{jk}), сгенерированных в узлах сети на момент начала работы алгоритма, представлены в таблице 5.

Таблица 5. Частоты запросов к элементам данных.

k/d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
d1	0	20	40	0	0	15	50	10	5	55	0	0	0	40	40	0
d2	0	12	40	30	15	50	15	60	10	0	5	0	30	0	35	30
d3	50	20	50	15	50	15	60	14	45	15	40	40	0	50	50	0
d4	100	20	40	25	30	20	20	150	25	20	10	15	40	0	30	35
d5	20	40	12	40	15	60	15	50	60	20	0	90	10	0	40	5
d6	15	15	15	45	15	55	17	15	12	5	56	45	10	0	0	7
d7	60	20	10	30	60	50	55	17	14	30	60	0	0	45	40	45
d8	20	12	10	30	60	15	20	60	15	45	65	10	0	50	0	54

На основе приведенных выше данных можно точно спрогнозировать работу алгоритма в рассматриваемых узлах 1, 8 и 12.

1). Работа алгоритма. Узел номер 1.

В этом узле наблюдается большая частота (100) генерации запросов к элементу d4. В узле этот элемент данных не имеется. Среди соседних для узла 1 узлов элемент данных d4 имеется только в узле 2. Поэтому все многочисленные запросы, генерируемые в узле 1 к элементу d4, адресуются по радиоканалу в узел 2. Это приводит к существенным затратам на использование радиоканала между узлом 1 и узлом 2. Для повышения эффективности обработки этих запросов было бы целесообразно скопировать элемент данных d4 из узла 2 в узел 1 и потом удалить его в узле 2. Но узел 2 содержит оригинал элемента d4, и удалять его нельзя. Работа алгоритма в узле 1 окончена до следующего периода передислокации реплик.

2). Работа алгоритма. Узел номер 8.

В узле 8 с большой частотой генерируются запросы к элементам данных: d4 (150 запросов за предыдущий интервал передислокации), d2 (60 запросов), d8 (60) и d5 (50). В узле 8 есть реплики элементов данных d2, d5 и d8, запросы к которым обрабатываются в самом узле 8.

Элемента d4 в узле 8 нет. В зоне радиовидимости узла 8 есть несколько узлов с элементом d4. Это узел 7 (20 запросов к d4) и узел 9 (25 запросов). Так как в узле 8 генерируется намного большее количество запросов к элементу d4 по сравнению с соседними узлами, то для повышения эффективности работы сети алгоритм переместит из узла 9 в узел 8 реплику элемента d4. Узел 9 выбран среди других узлов, так как он расположен ближе других узлов к узлу 8 (расстояние равно 8, см. элементы матрицы GAM). А между узлом 8 и узлом 7 расстояние равно 10. В узле 9 будет освобождена часть памяти, использовавшаяся для хранения реплики элемента d4. Работа алгоритма в узле 8 окончена до следующего периода передислокации реплик.

3). Работа алгоритма. Узел номер 12.

Запросы к элементам данных d3, d4 и d6, генерируемые в узле 12, обрабатываются локально, в этом же узле, так как в самом узле 12 размещены реплики этих элементов данных.

В узле 12 также генерируется большой трафик запросов (90 запросов за предыдущий интервал передислокации) к элементу данных d5. Элемент d5 в узле 12 не хранится. Поэтому запросы к элементу d5 адресуются в соседний узел 13. В узле 13 запросов к d5 генерируется значительно меньше (10), чем в узле 12.

Кроме того, элемент данных d5 имеется так же и в узлах 9 и 10. Из узла 9 элемент d5 перемещать нельзя, так как это оригинал элемента d5. Более того, вероятность сбоя в радиоканале между узлами 9 и 12 нарушает ограничение LP на минимально допустимую вероятность сбоя в канале.

В узле 10 генерируется значительное количество запросов к элементу d5, поэтому перемещать из узла 10 в узел 12 реплику d5 нецелесообразно.

В итоге алгоритм переместит в узел 12 реплику элемента данных d5 из узла 13. В узле 13 реплика элемента d5 удаляется. Работа алгоритма в узле 12 окончена до следующего периода передислокации реплик.

Результат работы алгоритма по перераспределению реплик в узлах 1, 8 и 12 показан на рисунке 3.

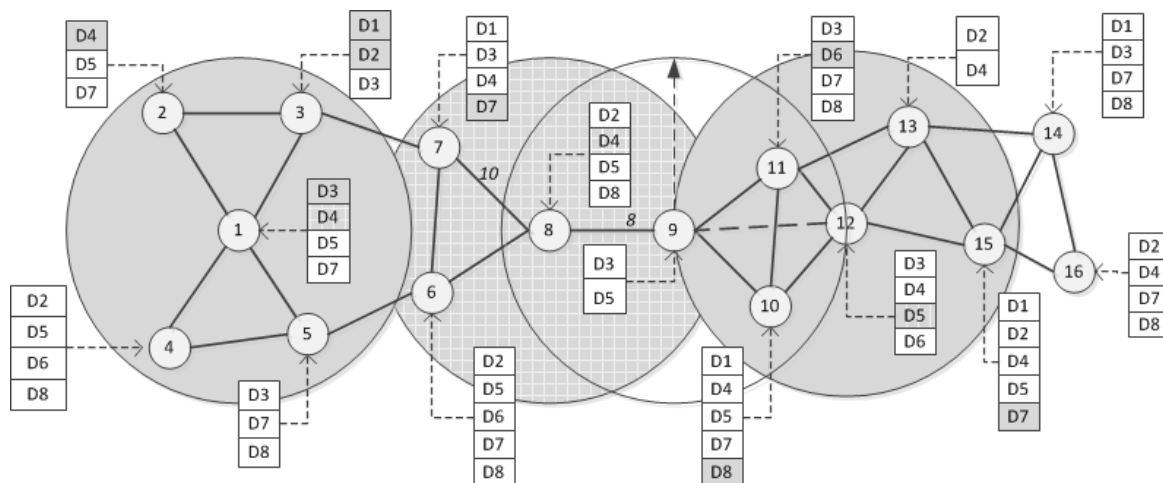


Рис.3. Состояние мобильной сети после работы алгоритма в узлах 1,8,12

Заключение

В работе предложена формальная модель механизма репликации данных в мобильной беспроводной сети MANET, а так же эвристический алгоритм, реализующий репликацию элементов данных, используемых в мобильной сети. В модели и в алгоритме используется несколько эвристик. Эвристики позволяют эффективно в необходимые моменты времени с учетом текущего состояния сети перераспределять реплики между узлами сети и удалять неиспользуемые реплики. Реплики элементов данных перераспределяются между узлами сети через интервалы времени переменной длительности, индивидуальные для каждого узла сети. Интервал времени передислокации увеличивается или уменьшается в зависимости от частоты изменений в расположении реплик в узлах сети.

Предложенный метод обеспечивает приоритет репликации данных узлов сети в соответствии с потребностями каждого отдельного узла. Таким образом, приоритет для репликации получают элементы данных, которые наиболее часто используются. Данная особенность метода, реализованная в алгоритме, позволяет существенно снизить загрузку каналов связи мобильной сети, повышает степень доступности данных и увеличивает эффективность работы всей мобильной сети MANET.

Особенности предложенной модели, использующей ряд эвристик, обеспечивают высокую эффективность самой модели и алгоритма передислокации реплик, разработанного на основе этой модели.

Работа выполнена в рамках фундаментального исследования № 0052-2019-0011 ИПУ РАН

Литература

1. IEEE Standard for Information technology. 802.11. – 1997. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // URL: http://hccc.ee.ccu.edu.tw/standards/802_11-1997.pdf (дата обращения 2021-03-18).
2. Винокуров В. М. и др. Маршрутизация в беспроводных мобильных Ad hoc-сетях. – Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2(22). – Ч. 1. – С. 288 – 292.
3. Датьев И.О., Павлов А.А., Шишаев М.Г. Моделирование беспроводных многошаговых самоорганизующихся мобильных сетей. – Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – 1(24). – С. 116-126.
4. Вишневецкий В.М. и др. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
5. Sun X., et al. Dynamic data replication based on access cost in distributed systems // Proceeding of the 4th IEEE International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology. – 2009. – P: 829–834.