

# Протокол обмена данными в самоорганизующихся вычислительных средах

С.В. Тимофеева<sup>а</sup>, Д.В. Филимонов<sup>б</sup>, А.М. Сухов<sup>а,б</sup>

<sup>а</sup> Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, 295007, пр. Вернадского, 4, Симферополь, Россия

<sup>б</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

---

## Аннотация

Работа посвящена разработке протокола обмена данными для самоорганизующихся вычислительных сред с минимальным временем задержки. Этот протокол предполагается реализовывать для сетей мобильных устройств на базе метода окрестностей. Протокол предусматривает разметку конфигурации и построение маршрута при помощи двух широковещательных запросов. Один из запросов исходит от узла в начале маршрута, другой от конечной точки. Метод окрестностей позволил выбрать типы данных и размеры полей заголовка коммуникационных пакетов. Работа содержит обоснование метрики, применяемой для выбора маршрута.

*Ключевые слова:* самоорганизующиеся сети; MANET; метод окрестностей; протокол маршрутизации.

---

## 1. Введение

В настоящее время сетевые технологии переживают второе рождение, что связано с потребностью новых приложений. Эти технологии должны быть нацелены на развитие таких приложений, как Интернет вещей [1], медицинские сети [2], тактильный интернет [3] и т.д. Общими особенностями новых технологий являются возможности самоорганизации и отказ от иерархической маршрутизации, сверхмалые задержки и т.д.

Для передачи тактильных ощущений требуются задержки порядка одной миллисекунды [4], что на два порядка меньше современных требований к сетям. До недавнего времени самыми чувствительными к задержкам приложениями была передача аудиовизуальной информации [5]. Для того, чтобы не терялась интерактивность во время видеоконференций необходимы задержки не больше 100 миллисекунд.

Данные вызовы приведут к отказу от иерархической структуры связи, так как физическая компонента задержки диктует ограничения на длину каналов связи между абонентами. С учетом требований специальной теории относительности узлы не могут быть разнесены более чем на 100 километров, так как скорость света в оптоволокне составляет 200 километров в миллисекунду.

Это требование ограничивает всю соответствующую инфраструктуру масштабами мегаполиса. То есть все основные поставщики услуг должны размещаться в пределах одного мегаполиса, включая и все вычислительные мощности, требуемые для оказания услуг тактильного интернет и медицинских сетевых услуг. Такое требование обязательно приводит к новым технологиям маршрутизации.

Теоретические и практические основы самоорганизации сетей были созданы в рамках сенсорных сетей. Эти технологии (MANET) [6] активно разрабатываются в последние годы. В качестве средства связи можно использовать массовые потребительские устройства – смартфоны.

В настоящей работе речь пойдет о возможностях организации таких сетей. Основные задачи, которые стоят перед такой сетью – это обмен данными через Wi-Fi между двумя устройствами и организация маршрутизации между устройствами на значительном удалении, ограниченном масштабами города. При организации маршрутизации необходимо наладить обмен данными между соседними узлами, а также установить последовательность узлов для построения и выбора протяженных маршрутов.

Для построения маршрута в MANET сети используется метод жадного продвижения GPSR [7] и другие протоколы маршрутизации MDT [8], GDSTR [9], WEAVE [10] для решения проблемы локального минимума (обход пустот). Нами был предложен метод окрестностей, который вообще не требует координатного подхода и опирается только на знания ближайших соседей [11]. Метод соседей будет кратко изложен во втором разделе данной статьи.

В настоящей работе будет сделана попытка построить метрику маршрутизации и протокол связи на базе метода окрестностей. Для оценки качества маршрутов будет применен кластерный подход. Данный подход имеет множество приложений в физике, их описание можно найти в обзорах [12,13]. Существуют традиционные кластерные методы [14,15], которые применяются для маршрутизации в самоорганизующихся сетях мобильных устройств.

Предположим, что для беспроводных устройств Wi-Fi радиус связи ограничен величиной  $R$ . Под кластерной размерностью  $N$  будем понимать количество узлов, находящихся внутри круга радиуса  $R$  с центром в заданном узле. В нашем подходе кластерная размерность может рассматриваться как плотность размещения узлов и связана с числом ближайших соседей ( $N - 1$ ). Предлагаемый в статье подход будет основан на построении опорной сети и произвольного маршрута с использованием не кластерного разбиения, а кластерной размерности.

## 2. Метод окрестностей

В настоящем разделе статьи кратко изложены основные положения маршрутизации по методу окрестностей. Процесс маршрутизации начинается с построения окрестностей относительно начала маршрута [11]. Под окрестностью понимаем множество всех соседей, которые удалены от центральной точки на фиксированное число переходов. Так, ближайшие соседи организуют первую окрестность, во вторую окрестность войдут соседи соседей. При этом узлы, вошедшие в первую окрестность, не используются при дальнейшем построении окрестностей, как это происходит в стандартном методе поиска в ширину (см. рис. 1). Узлы четвертой окрестности удалены от центрального на четыре перехода, что требует для передачи информации использовать три промежуточных узла. Построение окрестностей следует завершить, когда достигнута конечная точка, узел назначения. Полученное число  $K$  окрестностей задает минимальную длину маршрута.

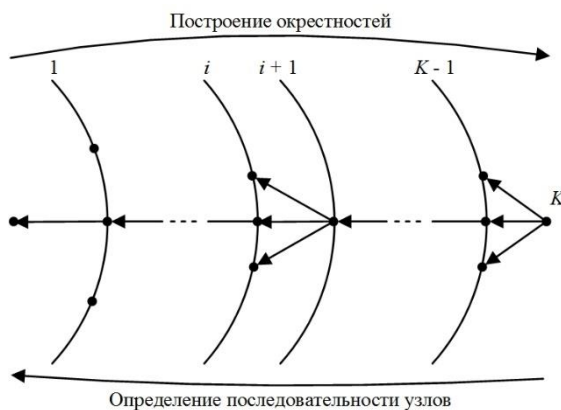


Рис. 1. Построение маршрута методом окрестности.

На втором этапе идет построение маршрута как последовательности узлов, которые необходимо пройти для достижения цели. При этом маршрут строится, начиная с конечного узла. Первая окрестность относительно узла назначения пересекается с предпоследней ( $K - 1$ ) окрестностью узла источника. Результаты пересечений формируют возможные переходы и, соответственно, участки маршрутов. Повторяем описанную процедуру для вновь полученных точек пересечения до того момента, пока не дойдем до источника. Таким образом сформируется множество всех возможных кратчайших маршрутов.

Отличительная особенность метода окрестностей состоит в том, что построение маршрута производится методом обратного прохода. То есть исходной точкой выступает узел назначения. Такой подход позволяет значительно уменьшить вычислительную сложность задачи и распределить вычисления по узлам сети. Такая децентрализация вычислений не только снижает вычислительную сложность задачи, но и позволяет избежать излишней загрузки сети, связанной с пересылкой данных о маршруте в единый вычислительный центр.

Однако, построение множества альтернативных маршрутов ставит проблему выбора лучшего из них, следуя ряду дополнительных ограничений. Кроме того, реальный протокол обмена данными должен опираться на распределенную информацию о маршруте и его особенностях. Поэтому необходимо обоснование дополнительной метрической функции для выбора маршрута, чему будет посвящен следующий раздел.

## 3. Нахождение метрической функции

Предположим, что у нас есть некая территория, на которой находится множество пользователей с мобильными устройствами, которые могут быть объединены в сеть на основе Wi-Fi. Радиус связи устройств примем равным  $R$ , в пределах радиуса связи находится  $N$  устройств, включая центральное. Оценим число  $N$  в крупных городах на примере Симферополя и Самары. Площадь Симферополя составляет порядка  $107 \text{ км}^2$ , число жителей 336 тыс. человек, то есть можно предположить, что число устройств  $M$ , потенциально готовых к работе в самоорганизующихся сетях, будет не меньше 50 тысяч. Площадь Самары составляет порядка  $500 \text{ км}^2$ , число жителей 1,3 миллиона человек, то есть можно предположить, что число устройств  $M$ , готовых к работе в самоорганизующихся сетях, будет не меньше 200 тысяч. Среднее количество устройств в пределах радиуса связи каждого узла:

$$N = \frac{\pi MR^2}{S}. \quad (1)$$

Для указанных городов эта оценка дает  $N_{\text{Симферополь}} \approx 13,5$ ,  $N_{\text{Самара}} \approx 12,6$ , где  $R = 100$  м. На самом деле плотность может быть выше из-за неравномерного распределения пользователей.

Далее сделаем оценку для максимального перемещения на одном шаге маршрутизации методом жадного продвижения (см. рис. 2).

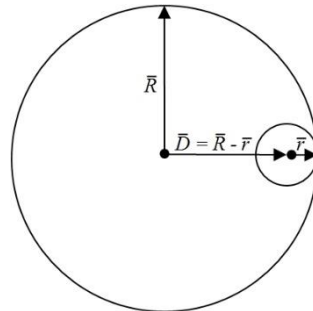


Рис. 2. Оценка максимальной величины перехода.

Для того чтобы оценить максимальное продвижение  $D$ , заметим, что площадь, приходящаяся на каждый узел, не считая центральный:

$$s = \frac{\pi R^2}{N - 1} \quad (2)$$

или

$$s = \pi r^2, \quad (3)$$

где  $r$  – величина, характеризующая среднее расстояние между узлами. Тогда

$$r = \frac{R}{\sqrt{N - 1}}. \quad (4)$$

Продвижение к цели для одного перехода  $D$  можно выразить как

$$D = R \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{N - 1}} \right), \quad (5)$$

где  $(N - 1)$  – число соседей текущего узла.

Построение маршрута методом окрестностей определяет некоторое количество альтернативных маршрутов. Для того чтобы выбрать наилучший из них, можем использовать метрику  $L$  из уравнения (5). То есть тот маршрут, где сумма  $L$  наименьшая, будет выбран как наилучший.

$$L = \sum_{i=1}^K \frac{1}{\sqrt{N_i - 1}}, \quad (6)$$

где  $(N_i - 1)$  – число соседей  $i$ -го узла маршрута,  $K$  – число узлов на маршруте.

Согласно предложенному протоколу обмена данными основной маршрут будет проходить в области наибольшей плотности расположения узлов.

#### 4. Протокол связи на базе метода окрестностей

Для реализации метода окрестностей будем использовать два широковещательных запроса. Первый запрос посылается узлом-источником, он соответствует разбиению множества узлов на окрестности. Второй запрос

формируется узлом-назначения, он соответствует обратному проходу и размечает последовательность узлов на маршруте.

Основная цель первого запроса – присвоение номера окрестности всем узлам заданной конфигурации. Промежуточные узлы сохраняют информацию о запросе с наименьшим количеством переходов, которое соответствует номеру окрестности  $i$ . Запросы, полученные повторно, но с большим числом переходов, игнорируются промежуточными узлами. В структуру запроса (Таблица 1) должен входить адрес источника и адрес назначения, тип запроса (прямой или обратный), идентификатор запроса и количество переходов. Эти данные вместе с адресами промежуточных узлов, от которых получен запрос, должны сохраняться на каждом узле, участвующем в передаче данных. После того, как запрос достигнет узла-назначения, должно быть зафиксировано число  $K$ , соответствующее количеству переходов на маршруте.

После получения конечным узлом первого запроса, узел формирует второй широковещательный запрос. В его структуру входит дополнительное поле с фиксированным числом узлов  $K$  на маршруте. Если  $l + i > K$ , где  $l$  - число переходов от узла-назначения до промежуточного узла, то данные запросов уничтожаются и не хранятся на промежуточном узле.

Каждый узел должен хранить информацию о метрике  $N_i$ . Для каждого узла из  $i$  окрестности она вычисляется как число узлов-соседей  $p$  из следующей  $i + 1$  окрестности. Это число находится при помощи отдельного запроса узла к своим ближайшим соседям, которые имеют соответствующий идентификатор маршрута, где указана принадлежность к  $i + 1$  окрестности. Таким образом, в результате двух широковещательных запросов информация о маршруте останется только на узлах, которые являются его частью.

Процедура двух широковещательных запросов позволит выделить граф связности, а алгоритм Дейкстры поможет найти пройденный путь от источника назначения до источника цели на основе метрики (6). Однако принципиально важно реализовать алгоритм отбора маршрута локально, то есть не передавать всю информацию на управляющий узел, а провести все вычисления распределено, обмениваясь информацией только с соседями.

Вычислить метрическую функцию для всего маршрута достаточно тяжело, поэтому при пересылке пакета мы будем направлять его тому из узлов в следующей окрестности, у кого больше всего число соседей  $p$ .

**Таблица 1.** Структура прямого и обратного запросов

Название поля	Размер (байт)
Адрес узла источника	6
Адрес узла назначения	6
Адрес промежуточного узла	6
Тип запроса	1
Идентификатор запроса	6
Количество переходов	4
Общее число узлов маршрута	4

## 5. Заключение

В работе описывается разработка протокола обмена данными для самоорганизующихся вычислительных сред с малыми временами задержки. В основу протокола положен метод окрестностей. Анализ этого метода позволил найти метрическую функцию, используемую для выбора маршрута. Также обоснованы размеры и назначения полей заголовка коммуникационного пакета. Протокол предусматривает разметку конфигурации мобильных узлов при помощи двух широковещательных запросов. Первый запрос исходит от узла начала маршрута и размечает участников сети по принадлежности к окрестностям. Второй широковещательный запрос исходит от узла назначения. Этот запрос оставляет метки только у узлов, расположенных на кратчайшем маршруте и дополнительно запоминает число ближайших соседей. На основании собранной информации осуществляется процесс маршрутизации. В качестве следующего узла маршрута выбирается узел с наибольшим числом соседей.

Данный протокол связи предполагается реализовывать на смартфонах под управлением операционной системы Android, а также на одноплатных мини-компьютерах Raspberry Pi.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ и при поддержке гранта РФФИ № 16-07-00218а.

## Литература

- [1] Каргин, И.С. Анализ беспроводной многошаговой сети со случайным доступом и низким временем доставки пакетов / Игорь Каргин // Сборник трудов 39-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2015». – 2015. – С. 659-670.
- [2] Pirmagomedov, R. Analysis of delays in medical applications of nanonetworks / R. Pirmagomedov, I. Hudoev, R. Kirichek, A. Koucheryavy, R. Glushakov // Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2016 8th International Congress on. – IEEE, 2016. – С. 49-55.
- [3] Fettweis, G. P. The tactile internet: applications and challenges / Gerhard P. Fettweis // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2014. – Т. 9. – №. 1. – С. 64-70.
- [4] Кучерявый, А.Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Киричек Р.В. // Электросвязь.— 2016.— №1.— С. 45-47.
- [5] Calyam, P. A “GAP-Model” based framework for online VVoIP QoE measurement / Prasad Calyam, Eylem Ekici, Chang-Gun Lee, Mark Haffner, Nathan Howes // Journal of Communications and Networks. – 2007. – Т. 9. – №. 4. – С. 446-456.
- [6] Corson, S. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations / S. Corson, J Macker. – 1998. – RFC 2501.
- [7] Karp, B. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks / Brad Karp and H. T. Kung // Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. – ACM, 2000. – С. 243-254.
- [8] Lam, S. S. Geographic routing in d-dimensional spaces with guaranteed delivery and low stretch / S. S. Lam, C. Qian // Proceedings of the ACM SIGMETRICS joint international conference on Measurement and modeling of computer systems. – ACM, 2011. – С. 257-268.
- [9] Kumar, A. Geographic node-disjoint path routing for wireless sensor networks / A. Kumar, S. Varma //IEEE Sensors journal. – 2010. – Т. 10. – №. 6. – С. 1138-1139.
- [10] Król, M. WEAVE: Efficient Geographical Routing in Large-Scale Networks / M. Krol, E. Schiller, F. Rousseau, and A. Duda // Proc. of EWSN, Graz, Austria. – 2016.
- [11] Sukhov, A. M. The neighborhoods method and routing in sensor networks / A. M.Sukhov, D. Y. Chemodanov // Wireless Sensor (ICWISE), 2013 IEEE Conference on. – IEEE, 2013. – С. 7-12.
- [12] Newman, M. E. J. The structure and function of complex networks / M. E. J. Newman // SIAM review. – 2003. – Т. 45. – №. 2. – С. 167-256.
- [13] Смирнов, Б. М. Фрактальные кластеры / Б. М. Смирнов // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149. – №. 6. – С. 177-219.
- [14] Basagni, S. Distributed clustering for ad hoc networks / S. Basagni // Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, 1999.(I-SPAN'99) Proceedings. Fourth International Symposium on. – IEEE, 1999. – С. 310-315.
- [15] Younis, O. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks / O. Younis, S. Fahmy // IEEE Transactions on mobile computing. – 2004. – Т. 3. – №. 4. – С. 366-379.