

УДК 004.722

# Алгоритмы кластеризации и выбор структуры сети беспроводной связи

Организация сети связи между несколькими подвижными объектами – довольно сложная и распространенная задача, решение которой зависит от множества факторов: используемая технология связи, число объектов, динамика их движения и расположение в пространстве. Однако разнообразие условий и параметров может быть настолько существенным, что в общем виде решение этой задачи не будет иметь практического смысла. Статья посвящена анализу способов организации сети из нескольких подвижных узлов. Авторы предлагают использовать известные методы кластеризации в динамических сетях связи. Получены примеры сетей с различным количеством групп и плотностью узлов в каждой группе. Результаты данной работы показывают возможность определять оптимальный способ организации сети связи с подвижными узлами.

**С.И. ПЛОВЕНЯ,**  
заведующий кафедрой  
телекоммуникационных систем,  
к. т. н., доцент

**Ю.А. ДУЙНОВА,**  
аспирант

**А.Н. СОЛОВЬЕВ,**  
магистрант

Белорусская государственная  
академия связи

**Ключевые слова:** структура сети, динамические узлы сети, кластеризация, сенсорная сеть.

**Введение.** Развитие технологий беспроводной связи определяет необходимость построения динамических сетей связи. Вслед за беспроводными сенсорными сетями и сетями MANET (англ. Mobile Ad Hoc Network – мобильные самоорганизующиеся сети) появился новый вид сетей – летающие сети [1].

Увеличение требуемой пропускной способности абонента и количества самих абонентов, развитие новых сервисов ведут к значительному росту интенсивности передаваемого трафика, что часто приводит к потере качества обслуживания. Для исключения таких явлений необходимо уменьшать зону обслуживания базовой станции и увеличивать их число. Выбор оптимальной топологии и архитектуры динамической сети во многом определяет эффективность связи.

Перспективным направлением является создание динамических сетей связи, действующих в двух- или трехмерном пространстве и состоящих из множества двигающихся объектов. При выполнении общей задачи группа таких объектов будет находиться в некотором пространстве, которое можно описать математически.

Дальность связи используемой технологии может быть меньше радиуса зоны взаимодействия узлов

связи, в этом случае требуется организовать транзиты между узлами сети. Используемая технология связи должна обеспечивать возможность организации связи посредством транзитов. При организации даже одного транзита трафика необходимо назначить наиболее подходящий для этого узел, предварительно определив основные критерии его выбора.

Одним из частных случаев решения этой задачи является выбор головного узла группы или подгруппы. Практическое применение определяется выбором ведущего узла группы. Есть вероятность, что по условиям задачи потребуется использование двух или более узлов. Тогда группу следует разделить на несколько подгрупп и назначить головной узел в каждой из них.

## Архитектуры построения сенсорных сетей для группы динамических узлов

Примером современной беспроводной сети может служить сенсорная сеть (СС). Сенсорная сеть – набор распределенных узлов (сенсоров), взаимодействующих между собой и с другими сетями для передачи, обработки и предоставления информации, полученной от реальных физических объектов [2].

В настоящее время элементами сенсорных сетей можно управлять посредством всевозможных подвижных роботов и других систем. Сбору и анализу подлежат данные мониторинга (данные с сенсоров), данные с удаленных объектов беспроводной сенсорной сети (БСС). Некоторые современные публикации отражают вопросы кластеризации элементов сенсорных сетей и D2D-сетей [3].

При организации сетей беспроводной связи необходимо всегда определять расположение узлов и их зон связи. Подвижность узлов при организации по полносвязной топологии позволяет создавать зоны с наилучшей областью покрытия. Поэтому на первое место выходит задача обеспечения эффективной связи между движущимися узлами. В общем случае подвижные узлы могут двигаться с разной скоростью и по различным траекториям, что ограничивает качество связи между ними. В самоорганизующейся сети топология связей между подвижными узлами может варьироваться при изменении взаимного расположения узлов сети, т. е. актуальной остается задача выбора оптимальной сетевой архитектуры.

Наиболее подходящим для применения в качестве подвижного узла связи является использование

беспилотного летательного аппарата (БПЛА), что отражено в работах [4].

Сформулированная цель достигается решением следующих задач:

- установление и поддержание связи БПЛА с центром управления и другими БПЛА;
- управление группой БПЛА.

Использование группы БПЛА масштабирует территорию охвата выполняемой задачи, что повышает эффективность и сокращает время ее выполнения. Поэтому задача обеспечения надежной связи в группе БПЛА представляет особый интерес. В общем случае БПЛА могут двигаться с разной скоростью и по различным траекториям, что создает очевидные сложности обеспечения непрерывной связи между ними, т. к. меняется топология сети БПЛА с числом узлов и связей, а также относительные положения изменяющихся узлов.

Среди основных архитектур построения сети связи на основе группы БПЛА выделяют централизованную и децентрализованную сети, а также их комбинации. На рисунке 1 изображены архитектуры сетей: централизованная (1а), децентрализованная (1б), комбинированные (1в), (1г).

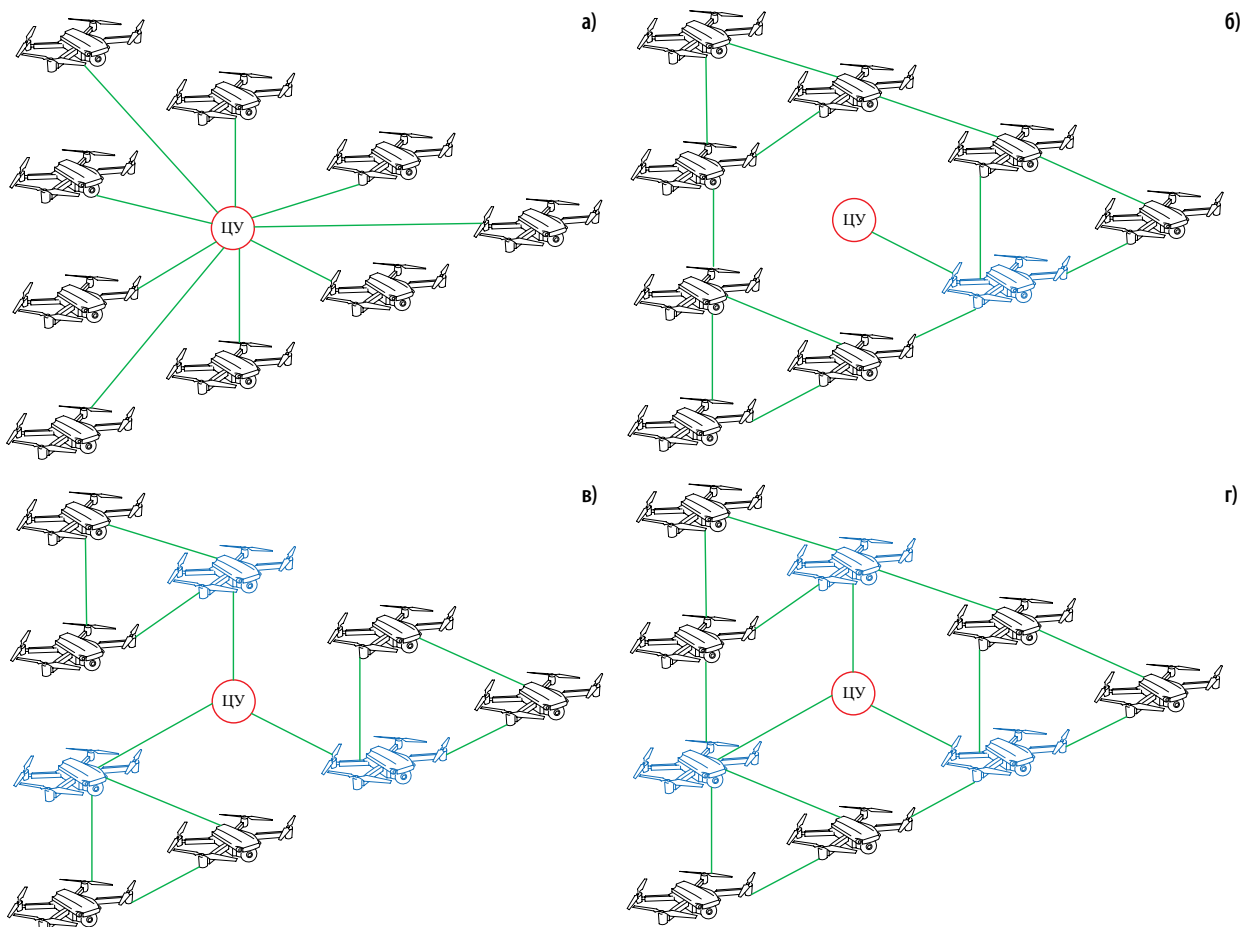


Рисунок 1 – Архитектуры сети на основе группы БПЛА:

а – централизованный, б – децентрализованный (ad-hoc-сеть), в и г – комбинированные (многогрупповой и многослойный) способы



Основным критерием для организации эффективной связи является вероятность связности  $p_{con}$ . При работе группы БПЛА различают связность БПЛА с центром управления  $p_c$  и связность между БПЛА  $p_u$ .

Из всех архитектур выделяется многослойная БПЛА ad-hoc-сеть, которая не имеет связи каждого узла с центром управления при наличии прямых связей между различными группами БПЛА. Верхний слой сети состоит из головных БПЛА каждой группы. Обмен данными двух любых групп БПЛА происходит без участия наземной станции, т. к. на нее отправляется информация, предназначенная исключительно для этой станции. Следовательно, требования к ее пропускной способности могут быть существенно снижены. Многослойная БПЛА ad-hoc-сеть наиболее надежна, т. к. не имеет единого узла, выход из строя которого может привести к отказу всей сети.

Связь между узлами различных групп возможна как через центр управления, так и напрямую. Тогда вероятность связности между БПЛА, находящимися в разных группах, можно представить как

$$p_u^{(xy)} = p_a^{(x)} p_a^{(y)} (1 - (1 - p_{xy}) (1 - (1 - p_{uc})^{n_x - 1} (1 - p_{uc})^{n_y - 1})), \quad (1)$$

где  $p_a^{(x)}$  и  $p_a^{(y)}$  – вероятности связности в группах  $x$  и  $y$ ;

$n_x$  и  $n_y$  – количество БПЛА в группах  $x$  и  $y$ ;

$p_{xy}$  – вероятность связности между группами  $x$  и  $y$ ;

$p_{ua}$  – вероятность связности БПЛА с центром управления.

В сравнении с централизованной структурой очевидными преимуществами децентрализованных сетей являются: автономность, надежность и лучшие эксплуатационные характеристики за счет возможности организации каналов связи как напрямую, так и через транзитные участки.

#### ■ Алгоритмы кластеризации в БСС

БСС включают в себя множество сенсорных узлов, способных фиксировать состояние и характеристики физического мира, хранить и обрабатывать эту информацию, передавать ее по каналам связи. Алгоритмы кластеризации в БСС решают задачи самоорганизации узлов сети, минимизации их энергопотребления и увеличения общего



времени жизни сети, агрегации, повышения скорости передачи и обработки данных, увеличения зоны покрытия сети.

Существует два типа архитектуры сенсорных сетей: однородные и иерархические (кластерные) [2]. При однородной архитектуре все узлы выполняют одинаковые функции.

Другим подходом является иерархическая (древовидная) маршрутизация, которая основана на разделении сети на кластеры. Каждый кластер имеет головной узел, который агрегирует информацию с других узлов и передает ее на шлюз. Периодически головной узел меняется для обеспечения равномерного распределения среди всех сенсорных узлов энергетических затрат.

Правильный выбор архитектуры построения сети повышает эффективность работы БСС. Кластеризация является эффективным способом увеличения жизненного цикла и уменьшения энергопотребления для сенсорных сетей [5].

Диаграммы Вороного или разбиение Дирихле являются основополагающей структурой в вычислительной геометрии. Эти диаграммы используются для кластеризации сенсорных сетей [6].

В разработанном авторами алгоритме [6] формирование кластера осуществляется на основе диаграмм Вороного. В каждом раунде сенсорное поле разделяется в случайном порядке. После выбора головного узла кластера в каждом кластере вычисляется расстояние между сенсорными узлами и головным узлом кластера. Алгоритм использует два параметра для выбора головного узла кластера в БСС: остаточную энергию и центральность по диаграммам Вороного, которые оцениваются на основе методов нечеткой логики.

Расстояние между сенсорными узлами и головным узлом кластера определяется по формуле:

$$\text{Расстояние}(S_i, C_j) = \sum_{i=1}^m \sqrt{(S_i - C_j)^2} \quad , \quad (2)$$

где  $S_i$  – сенсорный узел  $i$  в кластере ( $i = 1 \dots m$ );  
 $C_j$  – головной узел  $j$  кластера ( $j = 1 \dots k$ ).

Иерархический алгоритм адаптивной кластеризации с низким потреблением энергии LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [7] является базовым алгоритмом и предназначен для эффективного расхода энергии. Жизненный цикл сети состоит из этапов формирования кластера и передачи собранной информации в шлюз. При формировании кластера каждый из сенсорных узлов генерирует случайное число от 0 до 1 и вычисляет пороговую величину –  $T(x)$ , которая соответствует заранее заданному числу головных сенсорных узлов в сети. Если полученное случайное число меньше, чем величина порога –  $T(x)$ , то сенсорный узел может стать головным в текущем раунде БСС, иначе этот узел остается в роли члена кластера.

Вычисление пороговой величины  $T(x)$  определяется по формуле:

$$T(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{P}{1 - P \cdot (r \bmod \frac{1}{P})}, & \text{если } n \in G \\ 0, & \text{если } n \notin G \end{array} \right\} \quad , \quad (3)$$

где  $P$  – заданная доля головных узлов среди всех сенсорных узлов сети (5 % от общего числа узлов сети);

$r$  – текущей номер интервала функционирования сети;

$G$  – число сенсорных узлов, которые не были выбраны в качестве головных узлов за последние  $1/P$  интервалов функционирования.

При назначении головного узла остальные узлы присоединяются к кластеру, выбираемому по мощности сигнала, принимаемого от доступных головных узлов. После организации в кластеры головной узел формирует расписание передачи данных на основе метода временного разделения TDMA, исключая коллизии при передаче сообщений.

Алгоритм Fuzzy C-Means [8] также включает этапы формирования кластера и выбора головного узла кластера в БСС. Авторы алгоритма использовали технику Fuzzy C-Means для формирования кластеров и систему нечеткой логики, основанную на двух параметрах – уровне энергии и центральности для выбора головного узла кластера, после чего данные передаются от головного узла кластера к другому головному узлу до достижения базовой станции. Длительность жизненного цикла сети рассматривается как временной интервал до гибели последнего сенсорного узла. В данном методе минимизация происходит на основе функции:

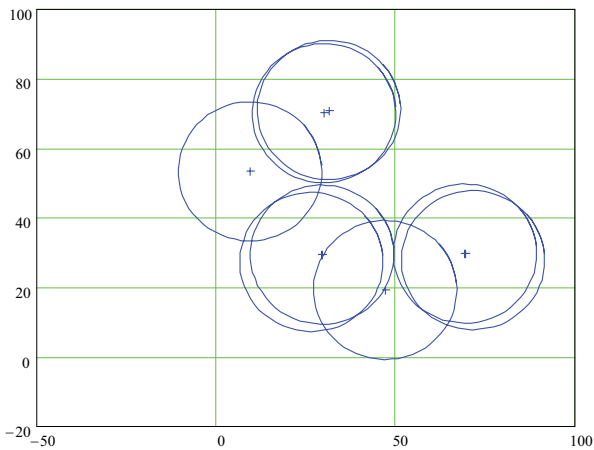


Рисунок 2 – Распределение кластеров на заданной площади и плотность БПЛА ( ρ ) в каждой группе (образовано 8 групп)

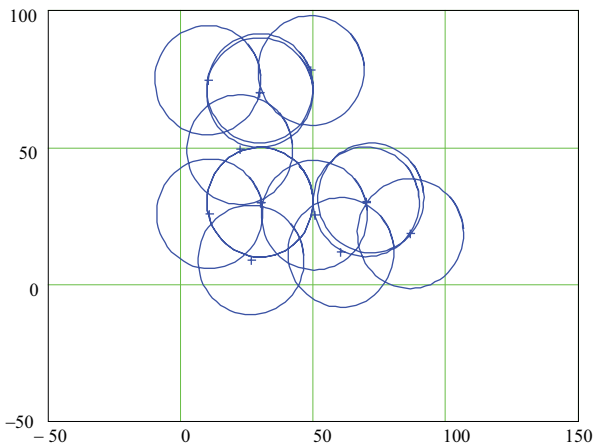
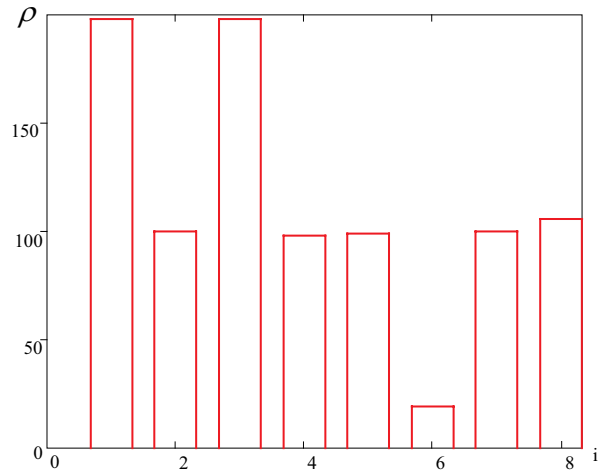
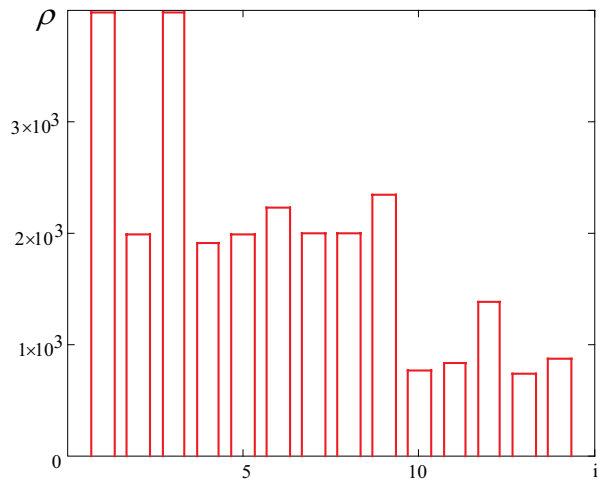


Рисунок 3 – Распределение кластеров на заданной площади и плотность БПЛА ( ρ ) в каждой группе (образовано 14 групп)



$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M u_{ij}^m d(x_i, c_j), \tag{4}$$

где  $x_i \in X$  – объект;  
 $c_j \in C$  – центр кластера;  
 $m$  – мера нечеткости;  
 $|X| = N, |C| = M$ .

Площадь, на которой выполняется задача, определяет количество необходимых БПЛА, которое может меняться во времени для выполнения каждой задачи. Скоординировать действия БПЛА помогает алгоритм кластеризации. Надежность обеспечения непрерывной связи между БПЛА ограничивается их переменной скоростью и различными траекториями движения.

Для выбора требуемой сетевой архитектуры и головного узла группы БПЛА используются алгоритмы кластеризации семейства Forel (Формальный Элемент), основанные на идее объединения в один кластер объектов в областях их наибольшего сгущения [9].

Математическое моделирование позволяет визуализировать задачу кластеризации. При этом должны быть определены количество используемых узлов сети, радиус кластера и задана площадь территории.

Результаты моделирования для разного количества узлов приведены на рис. 2 и 3.

Результаты моделирования показывают, что использование алгоритма позволяет выделить определенное количество групп с разным количеством узлов, выбрать головные узлы кластеров в каждой из групп. В группах с малым количеством узлов можно применить централизованную архитектуру. Тогда все БПЛА образуют канал связи непосредственно с центром управления и все связи между БПЛА организуются маршрутами через наземную станцию.

В группах с большим количеством узлов можно применить децентрализованную архитектуру. В такой сети выделяется головной узел кластера, который служит шлюзом ad-hoc-сети, через него передаются все данные между наземной станцией

и другими БПЛА. Узлы, которые находятся в центре кластера, будут устанавливать связь с головным узлом и иметь возможность транзита трафика других узлов к центру управления по кратчайшему маршруту.

В реальности кратчайший маршрут не всегда оптимальный по причине условий распространения сигнала и нагрузки на каналы связи. В таком случае следует рассматривать варианты из нескольких альтернативных маршрутов. Кратчайший маршрут определяется как маршрут с минимальной суммой длин каналов между образующими его узлами сети, с учетом радиуса связи узла, когда он меньше размера области обслуживания. Иначе все кратчайшие маршруты будут равны расстоянию между узлами.

Алгоритм кластеризации Forel и результаты математической модели дают возможность определять оптимальный способ организации сети динамических узлов.

**Вывод.** Оптимальное использование алгоритмов кластеризации позволяет группировать сеть в небольшие сети, что обеспечивает организацию и повышает управляемость. В структурированной сети улучшается агрегация данных, снижаются затраты на связь, упрощается управляемость, сокращается общее энергопотребление, увеличивается срок службы. Кроме того, кластеризация обеспечивает эффективную динамическую маршрутизацию от сенсора к сенсору, от узла к узлу.

Многослойная архитектура построения сети связи на основе группы БПЛА как разновидность комбинированной архитектуры является наиболее универсальной. Она позволяет обеспечить связность как внутри группы, так и между группами БПЛА. Такую архитектуру следует использовать при большом числе узлов и организации связи между группами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый, А.Е., Владыко, А.Г., Киричек, Р.В., Маколкина, М.А., Парамонов, А.И., Выборнова, А.И., Пирмагомедов, Р.Я. Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017–2020 годы // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Том 4. – № 3. – С. 1–14.
2. Росляков, А.В. Интернет вещей / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешко, М.Ю. Самсонов; под ред. А.В. Рослякова. Самара: ПГУТИ, ООО «Издательство Ас Гард», 2014. – 342 с.
3. Парамонов, А.И. Задачи кластеризации D2D-коммуникаций в сетях пятого поколения / А.И. Парамонов, О.А. Хуссейн // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке

и образовании. VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. научн. ст. в 4 т.; под ред. С.В. Бачевского. – СПб.: СПбГУТ, 2018. – Т. 1. С. 614–618.

4. Gupta, L. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks / G. Lav, R. Jain, G. Vaszkun. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 18, iss. 2. – P. 1123–1152.
5. Koucheryavy, A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks / A. Koucheryavy, A. Salim // International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2010. – Phoenix Park, Korea. – 2010. – PP. 1209–1215.
6. Аль-Наггар, Я.М. Кластеризация для всепроникающих сенсорных сетей с использованием диаграмм Вороного / Я.М. Аль-Наггар // СПБНТОРЭС. 69-я научно-техническая конференция, посвященная дню радио. Труды конференции. – СПб, 17-25 Апрель 2014 г. – С. 160–162.
7. Heinzelman, W.R. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks / Heinzelman W.R., Chandrakasan A.P., Balakrishnan H. // IEEE Transactions on Wireless Communications. – October 2002. – Vol. 1, № 4. – PP. 660–670.
8. Hadjila, M. A Routing Algorithm based on Fuzzy Logic Approach to Prolong the Life-time of Wireless Sensor Networks / Hadjila M., Guyennet H., Feham M // International Journal of Open Scientific Research IJOSR. – Oct. 2013. – Vol.1, № 5. – PP. 24–35.
9. Загоруйко, Н.Г., Ёлкина, В.Н., Лбов, Г.С. Алгоритмы обнаружения эмпирических закономерностей / Н.Г. Загоруйко, В.Н. Ёлкина, Г.С. Лбов. Новосибирск: Наука, 1985. – 999 с.

*The organization of a communication network between several mobile objects is a rather complex and widespread problem, the solution of which depends on many factors: the communication technology used, the number of objects, the dynamics of their movement and their location in space. However, the variety of these conditions and parameters can be so significant that, in general, the solution to this problem will not make any practical sense. The article is devoted to the analysis of methods of organizing a network of several mobile nodes. The authors suggest using well-known clustering methods in dynamic communication networks. Examples of networks with different numbers of groups and density of nodes in each group are obtained. The results of this work show the ability to determine the optimal way of organizing a communication network with mobile nodes.*

Получено 10.08.2020.