

УДК 004.75:004.896

Особенности построения инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств

Кудрявченко И. В.

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
IVKudryavchenko@sevsu.ru

Получено 7 ноября 2019 г.

Отрецензировано 16 декабря 2019 г.

Принято к публикации 20 декабря 2019 г.

Аннотация: *Рассматриваются требования к беспроводным инфокоммуникационным сетям, формируемым на основе роя самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств. Предлагается механизм динамической кластеризации узлов сети на основе барицентрических координат и критерия соседства.*

Ключевые слова: *дискретное пространство, самоорганизующаяся инфокоммуникационная сеть, динамическая кластеризация, барицентрические координаты, протоколы беспроводной связи, рой мобильных интеллектуальных устройств.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Кудрявченко И. В. Особенности построения инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 390—400.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Кудрявченко, И. В. Особенности построения инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств / И. В. Кудрявченко // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 390—400.

Features of infocommunication networks formation based on self-organizing mobile smart devices

I. V. Kudryavchenko

Sevastopol State University,

Institute of Radio Electronics and Information Security

33, University St., Sevastopol, 2990533, Russian Federation

IVKudryavchenko@sevsu.ru

Received: November 7, 2019

Peer-reviewed: December 16, 2019

Accepted: December 20, 2019

Abstract: *The requirements for the formation of wireless infocommunication networks based on the swarm of self-organizing mobile intelligent devices are considered. A mechanism for the dynamic clustering of network nodes based on barycentric coordinates and the neighborhood criterion is proposed.*

Keywords: *discrete space, self-organizing infocommunication network, dynamic clustering, barycentric coordinates, wireless protocols, a swarm of mobile smart devices.*

For citation (IEEE): I. V. Kudryavchenko. "Features of infocommunication networks formation based on self-organizing mobile smart devices," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 390–400, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Развитие малоразмерных мобильных интеллектуальных устройств (МИУ), объединяемых на основе беспроводных сетевых технологий в рой для совместного решения общих задач [1], требует дальнейшего совершенствования старых и создания новых сетевых протоколов. Основные требования к вновь разрабатываемым беспилотным авиа- и автотранспортным средствам, которые можно отнести к МИУ, сформулированы в дорожных картах Национальной технологической инициативы «Аэронет» и «Автонет».¹ В частности, в указанных документах перечислены требования к беспроводной сети роя, которые накладывают определенные ограничения на возможности его организации с помощью известных сетевых протоколов самоорганизующихся сенсорных сетей или сетей мобильной связи [2].

¹ http://nti.one/documents/Normative_road_maps/?sphrase_id=10945#d839 (Дата обращения: 09.10.2019).

Работа посвящена выявлению особенностей инфокоммуникационных сетей, обеспечивающих самоорганизацию роя МИУ и его перемещение по маршруту следования.

2. Анализ роевой организации мобильных интеллектуальных устройств

Организация роя из однотипных МИУ обеспечивается за счет объединения их в инфокоммуникационную сеть, в которой циркулируют информационные потоки, обусловленные решаемой задачей, внешней средой, системным программным обеспечением (ПО), внутренними состояниями МИУ. В процессе функционирования роя системное ПО должно координировать поведение его элементов, например, своевременно выдавать команды на исполнительные устройства с целью корректировки траекторий МИУ. Учитывая, что с течением времени могут происходить отказы отдельных элементов роя, необходимо обеспечить распределенное хранение данных в сети, а также добавление новых и удаление отказавших узлов. Должен быть предусмотрен порядок назначения приоритетных и/или командных узлов. Также должны обеспечиваться инициализация роя, формирование заданных пространственных построений МИУ, защита каналов связи между элементами. В течение всего времени функционирования роя должны решаться задачи навигации, диагностики, идентификации и ряд других. Решение перечисленных задач должно осуществляться на основе протоколов беспроводной сети, объединяющей МИУ.

В данной работе под протоколом понимаются правила взаимодействия МИУ, которые могут быть описаны в виде набора процедур для каждого из уровней OSI (Open System Interconnection) модели. Протокол регламентирует топологию сети, маршрутизацию, адресацию, порядок доступа узлов сети к каналу передачи данных, формат передаваемых пакетов, набор управляющих команд для узлов сети и систему защиты информации [3]. Иными словами, протоколы определяют последовательность и формат сообщений, которыми обмениваются сетевые компоненты одного уровня, находящиеся в разных узлах.

Перечислим некоторые особенности инфокоммуникационной сети, которые задает роевая организация МИУ:

- 1) ограничение времени жизни сети;
- 2) высокая живучесть сети;
- 3) широковещательный характер рассылки пакетов (дейтаграмм);
- 4) применение коммуникационных устройств разных типов;

- 5) динамическая кластеризация узлов сети;
- 6) защищенность информации в сети.

Отметим, что время жизни сети ограничивается решаемой рою задачей и может составлять от нескольких минут до десятков и более часов.

Очевидным условием также является высокая живучесть сети, которая должна обеспечивать выполнение задачи в случае деградации рою вследствие отказов его элементов, а также при неблагоприятных воздействиях внешней среды.

Широковещательный характер рассылки пакетов связан с решением навигационной задачи и необходимостью поддерживать сеть в рабочем состоянии в режиме реального времени.

Применение коммуникационных устройств разных типов связано с условием 2). Предполагается, что МИУ могут использовать каналы связи, основанные на различных физических принципах: радио-, оптические и/или акустические. Следствием чего является возможность наложения сетей, которая может быть реализована в виде оверлейных сетей, обеспечивающих параллельное распределение информационных потоков между элементами рою [5].

Динамическая кластеризация узлов сети является необходимым требованием самоорганизации сети и должна осуществляться в автоматическом режиме или по инициативе оператора рою. Кластеризация предполагает возможность изменения роли отдельных узлов при одно-, двух- или трехуровневой архитектуре сети, которая может изменяться в процессе выполнения поставленной задачи. В автоматическом режиме кластеризация может осуществляться в связи с ограниченными возможностями каналов связи и значениями мощности передатчиков на основании критерия соседства узлов рою [6]. Например, при организации радио- или оптических каналов фронт волны распространяется «по лучу» и сигнал может надежно приниматься соседними элементами, находящимися в пределах прямой видимости. Остальные элементы попадают в область тени. Другим критерием разбиения узлов сети на кластеры является учет барицентрических координат [7].

Защищенность информации в сети обеспечивается шифрованием передаваемых и хранимых данных на основе криптографически стойких алгоритмов [8]. Стойкость алгоритмов должна быть достаточной для обеспечения возможности многократного применения отдельных МИУ в качестве элементов сети. Также высокая защищенность информации достигается благодаря применению направленных антенн и маломощных излучателей.

3. Пример организации инфокоммуникационной сети роя, сформированного в дискретном пространстве на основе циклического кодирования

Рассмотрим модель роя, размещенного в дискретном пространстве, который содержит N_1 узлов (МИУ), соединенных акустическими и радиоканалами [1]. Расстояние между i -м и j -м узлами ($i=0, 1, 2, \dots, N_1$; $j=0, 1, 2, \dots, N_1$) определяется по формуле

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n |x_{ki} - x_{kj}|, \quad (1)$$

где $k \leq 3$ — количество координатных осей дискретного пространства; $x_{ki} \in \mathbb{Z}$ — координаты i -го узла, $x_{kj} \in \mathbb{Z}$ — координаты j -го узла; \mathbb{Z} — множество целых чисел.

Рассмотрим рой из $N_1=8$ узлов, сформированный с помощью циклического кода (6,3), который задан образующим полиномом $P(x)=x^3 \oplus x \oplus 1$. Данный код обеспечивает минимальное кодовое расстояние по Хэммингу $d_{\min}=3$, что позволяет разместить узлы роя на безопасных расстояниях друг от друга, исключая коллизии/столкновения МИУ [9]. Результаты кодирования даны в табл. 1, а соответствующая схема размещения роя на дискретной плоскости изображена на рис. 1.

Табл. 1. Пример кодирования роя циклическим кодом (6, 3): $P(x)=x^3 \oplus x \oplus 1$

Table 1. An example of encoding a swarm with a cyclic code (6, 3): $P(x)=x^3 \oplus x \oplus 1$

Номер узла	Двоичный код $Q(1,0)$	Циклический код $F(1,0)$	Координаты узла (x_i, y_i)
0	000	000 000	0, 0
1	001	000 011	1, 2
2	010	010 110	3, 4
3	011	011 101	2, 6
4	100	100 111	7, 5
5	101	101 100	6, 7
6	110	110 001	4, 1
7	111	111 010	5, 3

		$b_2b_1b_0$						
$b_3b_4b_3$	000	001	110	010	110	111	101	100
000	0							
001			1					
011							3	
010					2			
110		6						
111				7				
101								5
100						4		

a)

		x_2							
x_1	0	1	2	3	4	5	6	7	
0	0								
1			1						
2							3		
3					2				
4		6							
5				7					
6								5	
7						4			

b)

Рис. 1. Пример размещения на дискретной плоскости роя, сформированного на основе циклического кода (6,3).

Разметка координатных осей: а) — коды Грея; б) — десятичные коды.

Fig. 1. An example of placement on a discrete plane of a swarm formed on the basis of code (6,3)
 Marking of coordinate axes: a) – Gray codes; b) – decimal codes

Отметим, что для правильного позиционирования узлов на дискретной плоскости кодовые слова из табл. 1 разбивались на триады, которые затем были использованы для кодирования строк и столбцов карты Карно на рис. 1, а. Полученные таким образом координаты узлов в двоичном коде Грея пересчитывались в десятичные координаты, что хорошо видно на рис. 1, б.

Расчет расстояний между узлами роя (рис. 1, б) осуществлялся по формуле (1). Результаты расчета даны в табл. 2.

Табл. 2. Расстояния между узлами роя, сформированного на основе кода (6,3)

Table 2. Distances between the swarm nodes, which were calculated on the basis of the code (6,3)

Номер узла	Расстояния d_{ij}							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	3	7	8	12	13	5	8
1	3	0	4	5	9	10	4	5
2	7	4	0	3	5	6	4	3
3	8	5	3	0	6	5	7	6
4	12	9	5	6	0	3	7	4
5	13	10	6	5	3	0	8	5
6	5	4	4	7	7	8	0	3
7	8	5	3	6	4	5	3	0

На рис. 2 и рис. 3 изображены графы радиосети и сети на основе акустических каналов для сформированного роя с учетом возможных отказов оборудования радиоканалов МИУ и ограничений на дальность распространения сигналов по радио- и акустическим каналам.

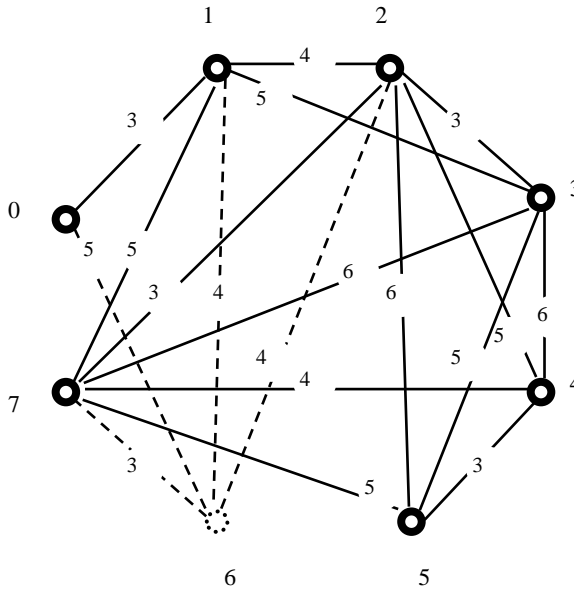


Рис. 2. Граф радиосети роя, сформированного на основе кода (6,3): $D_{R \max} = 6, q_R = 1/8$
Штриховыми линиями обозначены каналы, связанные с отказавшим 6-м узлом.

Fig. 2. The radio network graph of the swarm, based on code (6,3): $D_{R \max} = 6, q_R = 1/8$
The dashed lines indicate the channels associated with the failed 6th node

Для упрощения анализа было принято, что акустические каналы обеспечивают связь между i -м и j -м узлами с вероятностью отказа q_S при условии, что расстояние, определяемое по формуле (1), не превышает значения $D_{S\max}$, а радиоканалы обеспечивают связь между i -м и j -м узлами, находящимися на расстоянии $d_{ij} \leq D_{R\max}$, с вероятностью отказа q_R . Отказ радиоканала, связанного с i -м узлом, интерпретируется как отказ приемопередающего оборудования, размещенного в i -м узле.

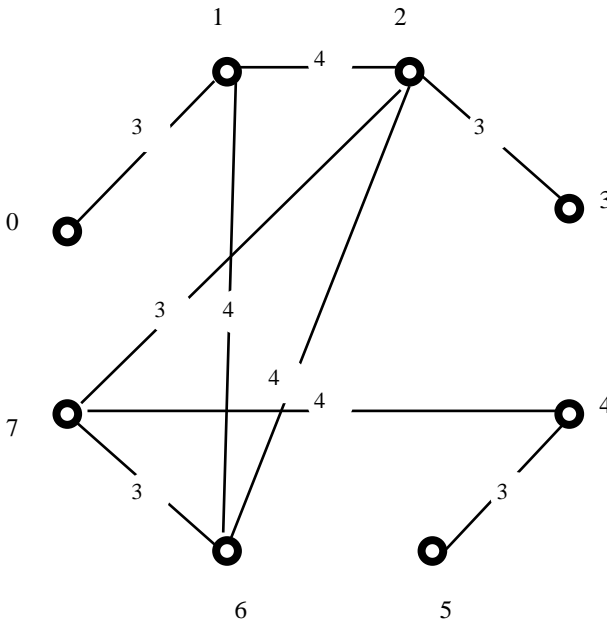


Рис. 3. Граф сети роя на основе акустических каналов: $D_{S\max} = 4, q_S = 0$.

Fig. 3. The graph of the swarm network, based on acoustic channels: $D_{S\max} = 4, q_S = 0$

На рис. 4 изображен граф сети на основе акустических и радиоканалов с параметрами: $D_{S\max} = 4, q_S = 0; D_{R\max} = 6, q_R = 1/8$.

Для каждого узла сети сформированного роя были рассчитаны параметры, сведенные в табл. 3, на основе которых может осуществляться его дальнейшая кластеризация.

Вес узла определяется как сумма расстояний от всех узлов роя до данного узла. Минимальный вес имеет узел, находящийся в центре масс роя [1]. Таким образом, координаты узла с минимальным весом соответствуют барицентрическим координатам роя.

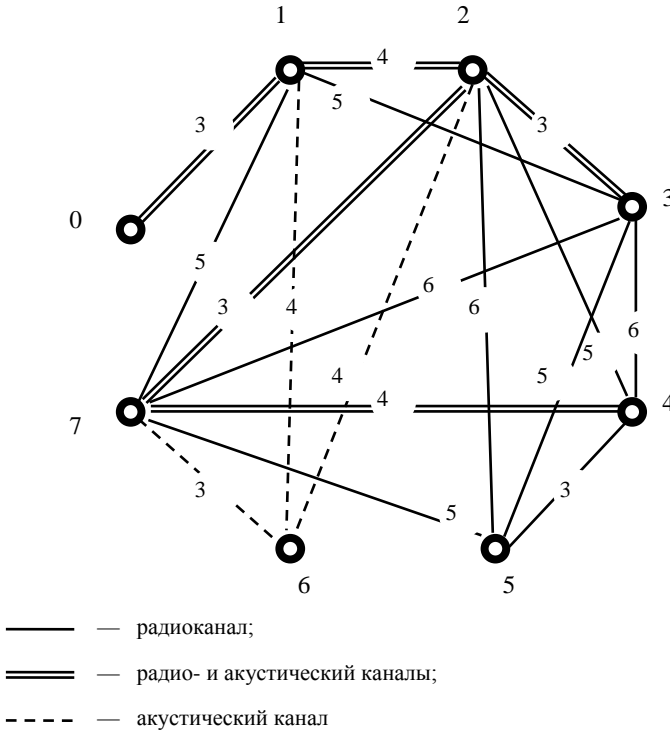


Рис. 4. Граф сети роя на основе радио- и акустических каналов:
 $D_{Smax} = 4, q_S = 0; D_{Rmax} = 6, q_R = 1/8$.

Fig. 4. The graph of the swarm network, based on radio- and acoustic channels:
 $D_{Smax} = 4, q_S = 0; D_{Rmax} = 6, q_R = 1/8$

Табл. 3. Расчетные параметры сети роя
Table 3. The swarm network calculated parameters

Номер узла	Число соседей	Число каналов	Вес узла
0	1	2	56
1	5	7	40
2	6	9	40
3	5	6	30
4	4	5	38
5	4	4	34
6	3	3	50
7	6	8	46

В необходимых случаях рой может быть разделён на кластеры относительно узлов-претендентов с учетом барицентрических координат и

критерия соседства. Должны учитываться следующие расчетные параметры узлов роя:

- максимальное число доступных каналов связи;
- максимальное количество соседних узлов;
- возможность доступа к каналам различной физической природы;
- веса узлов.

В рассмотренном примере узлами-претендентами являются узлы 1, 2, 7 (табл. 3).

Вопрос об учете веса узла, то есть меры близости узла-претендента к центру масс роя, требует дополнительного изучения и является дискуссионным. С одной стороны, разделение роя, осуществляемое по инициативе оператора, предполагает возможность приема управляющих сигналов. В этом случае приоритет следует отдавать внешним узлам роя, имеющим максимальный вес. С другой стороны, внутренние узлы в большей степени скрыты от внешнего наблюдения и могут перемещаться по кратчайшим траекториям с минимальными скоростями, что является дополнительным преимуществом в режиме самоорганизации роя.

4. Заключение

Проведенный анализ роевой организации МИУ и особенностей функционирования самоорганизующейся инфокоммуникационной сети на их основе позволил сформулировать дополнительные требования к сетевым протоколам.

Была рассмотрена модель формирования роя в дискретном пространстве на основе циклического кодирования с кодовым расстоянием по Хэммингу $d_{\min} = 3$. Данная модель позволяет исключить коллизии между узлами роя и выбрать узлы-претенденты, относительно которых должна осуществляться его динамическая кластеризация.

По результатам исследования может быть сделан вывод о недостаточных возможностях известных протоколов беспроводных сенсорных сетей и сетей мобильной связи для решения задач организации и надежного функционирования роя МИУ. Дополнительными свойствами протоколов инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся МИУ должны стать поддержка механизмов создания оверлейных сетей, функционирующих с разными типами каналов связи, а так же динамической кластеризации узлов сети по критериям соседства и барицентрических координат.

Список литературы

- 1 Кудрявченко И. В. Описание двумерного роя частиц как объекта терминального управления // Инновационная наука. 2016. № 1, Ч. 2. С. 64—67.
- 2 Кольбельников А. И. Обзор технологий беспроводных сетей // Труды МФТИ. 2012. Т. 4, № 2. С. 3—29.
- 3 Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. СПб. : Питер. 2012. 960 с.
- 4 Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб. : Питер. 2016. 992 с.
- 5 Ponomarenko A. A., Malkov Yu. A., Logvinov A. A., Krylov V. V. An overlay network for distributed exact and range search in one-dimensional space // Business Informatics. 2016. No. 1 (35). P. 26—36.
- 6 Барсегян А. А. и др. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб. : БХВ-Петербург. 2004. 336 с.
- 7 Кудрявченко И. В., Карлусов В. Ю. Измерение параметров движения мобильных объектов с «коллективным» поведением // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2018. № 3. С. 92—99.
- 8 Фергюсон Н. Практическая криптография. М. : Диалектика. 2005. 424 с.
- 9 Березкин Е. Ф. Основы теории информации и кодирования. СПб. : Лань, 2019. 320 с.

Информация об авторе

Кудрявченко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-1669-5447.

Information about the author

Ivan V. Kudryavchenko, candidate of technical sciences, docent of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-1669-5447.