

Метод и алгоритмы управления группировкой наноспутников

Е. А. Титенко¹ ✉, Е. А. Шиленков¹, С. Н. Фролов¹, В. П. Соглаев¹,
Д. П. Тетерин¹, О. И. Атакищев²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Институт инженерной физики
Большой Ударный пер., д. 1А/1, Московская область, г. Серпухов 142210, Российская Федерация

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Abstract

Целью исследования является поиск путей повышения эффективности работы группировки (сети) наноспутников в условиях пополнения и выбывания космических аппаратов в процессе эксплуатации на орбите на основе самоорганизующейся mesh-сети, в которых маршрутизация осуществляется динамически на основе связанности элементов сети.

Методы исследования основаны на методах системного анализа, принятия решений и принципах децентрализованного управления, предназначенных для сети наноспутников самостоятельно менять свою конфигурацию под изменяющиеся условия работы и требования решаемой задачи. Используя свойства методов самоорганизации и адаптивного управления (распределенность и восприимчивость к изменениям), группировка наноспутников поддерживает конфигурацию аппаратов, способных обмениваться между собой данными и служебной информацией. Разработан двухуровневый метод реконфигурации сети, позволяющий упреждающе изменять состав наноспутников на основе ретроспективных данных оценки качества и уровня передаваемых сигналов. Разработаны алгоритмы формирования списка маршрутов и анализа маршрутов, отличающиеся возможностью автономного выполнения на каждом наноспутнике в составе группировки.

Результаты. Созданный метод реконфигурации позволяет асинхронно выполнять процессы пополнения и исключения аппаратов из сети на основе полученной или выявленной информации об их состоянии и связях между аппаратами. Показано, что децентрализованный подход отличается линейной временной сложностью для наиболее критичных алгоритмов актуализации и построения маршрутов сети.

Заключение. Созданные метод реконфигурации и алгоритмы для управления группировкой наноспутников являются основой для создания сетевого программного обеспечения, позволяющего автономно каждому аппарату принимать решения о модификации своего статуса и списка маршрутов.

Ключевые слова: mesh-сеть; самоорганизация; маршрутизация; ретроспективные данные; граф.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Метод и алгоритмы управления группировкой наноспутников / Е. А. Титенко, Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов, В. П. Сogleaев, Д. П. Тетерин, О. И. Атакищев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 67–88. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-67-88>

Поступила в редакцию 07.10.2025

Подписана в печать 05.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Method and algorithms for control of a construction of nano-satellites

Evgeny A. Titenko¹ ✉, Egor A. Schilenkov¹, Sergey N. Frolov¹,
Vladislav P. Sogleaev¹, Dmitry P. Teterin¹, Oleg I. Atakishchev²

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Institute of Engineering Physics
1A/1 Bolshoy Udamy side-street, Moscow region, Serpukhov 142210, Russian Federation

✉ e-mail: johnstit@mail.ru

Резюме

The purpose of the research is to find ways to increase the efficiency of the nanosatellite constellation (network) in the conditions of replenishment and retirement of spacecraft during operation in orbit based on a self-organizing mesh network, in which routing is carried out dynamically based on the connectivity of network elements.

Methods are based on decision-making techniques, systems analysis, and decentralized control principles, enabling a nanosatellite network to independently reconfigure itself to meet changing operating conditions and task requirements. Using the properties of self-organization and adaptive control methods (distribution and responsiveness to change), the nanosatellite constellation maintains a configuration of satellites capable of exchanging data and service information. A two-level network reconfiguration method has been developed, enabling proactive changes to the composition of nanosatellites based on historical assessments of the quality and strength of transmitted signals. Algorithms for route list generation and route analysis have been developed, which can be executed autonomously on each nanosatellite in the constellation.

Results. The developed reconfiguration method enables asynchronous addition and deletion of satellites from the network based on received or discovered information about their status and connections between satellites. It is shown that the decentralized approach has linear time complexity for the most critical algorithms for updating and constructing network routes.

Conclusion. The developed reconfiguration method and algorithms for managing a nanosatellite constellation form the basis for developing network software that allows each satellite to autonomously make decisions about modifying its status and route list.

Keywords: mesh network; self-organization; routing; historical data; graph.

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Titenko E.A., Schilenkov E.A., Frolov S.N., Sogleaev V.P., Teterin D.P., Atakishchev O.I. Method and algorithms for control of a construction of nano-satellites. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest*

Received 07.10.2025

Accepted 05.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Одним перспективных путей развития современной космонавтики в XXI в. стало создание группировок взаимодействующих наноспутников, совместно решающих прикладные и исследовательские задачи [1]. Наиболее известные задачи – дистанционное зондирование космического пространства [2], радиобмен между наземными центрами и космическими аппаратами, измерение физических и энергетических характеристик ближнего космоса и др. Качество и эффективность решения таких задач зачастую определяется количеством экспериментов, одновременно проводимых на орбите [3]. Соответственно наиболее естественный путь – формирование и поддержка группировки (сети) космических аппаратов, имеющих необходимую полезную нагрузку для коллективного решения прикладных или исследовательских задач [4].

Область малой космонавтики включает наиболее массовый сегмент – малые космические аппараты (МКА) формата CubeSat 3U (наноспутники), которые проектируются и изготавливаются силами ведущих университетов и научно-технических центров [5]. Сегодня современный МКА CubeSat 3U – это автономная измерительно-исследовательская лаборатория, функционирующая на основе полетного задания и подаваемых с наземного центра управления команд на выполнение работ с помощью различных модулей полезной нагрузки и

технологии искусственного интеллекта [6]. Тем не менее риски отказа или поломки отдельных МКА в процессе эксплуатации по-прежнему остаются значимыми, поэтому сетевая структура рассматривается как инструмент их нейтрализации и одновременно повышения готовности использования группировки наноспутников [7]. Под готовностью понимается количество работоспособных спутников к общему их числу в составе группировке (сети).

Современные системы управления, особенно для однородных многоэлементных систем [8], остро нуждаются не только в централизованных механизмах и алгоритмических принципах поддержки приема-передачи, но и в средствах адаптивного прогнозирования системы и, соответственно, проведения адаптивной реконфигурации. Применение известных методов оптимизации и принятия решений для таких систем сталкивается с высокой неопределенностью и частотой изменения состояния элементов в пространстве и времени [9]. В результате формируемые правила имеют представительный набор ограничений и условий применения, время проверки которых зачастую превышает период их изменений, особенно для сети наноспутников, имеющих различные положения на орбите.

Таким образом, актуальной является задача децентрализованного управления с использованием технологии искусственного интеллекта [10] для автономного и адаптивного изменения

структуры сети под меняющиеся состояния отдельных аппаратов. Вместе с тем вопросы реконфигурации сети ограничено рассмотрены при совмещении процессов пополнения и исключения аппаратов из сети.

В настоящее время в рамках теории принятия решений [11] можно использовать методы управления группировкой подвижных объектов (МКА):

1. Метод группового управления на основе коллективной оптимизации.
2. Метод поведенческого управления.
3. Метод группового управления на основе нечеткой логики.
4. Метод самоорганизующегося управления.
5. Метод стайного управления.

В таблице 1 показаны характеристики данных методов и их статус в каждом методе.

Таблица 1. Характеристики методов управления группировкой МКА

Table 1. Characteristics of methods for controlling a group of small spacecraft

Характеристики	Методы управления				
	Метод группового управления на основе коллективной оптимизации	Метод поведенческого управления	Метод группового управления на основе нечеткой логики	Метод самоорганизующегося управления	Метод стайного управления
1. Наличие выделенного центра управления	—	—	+	—	—
2. Устойчивость к потере одного или нескольких членов группировки	+	+	—	+	+
3. Равнозначность и взаимозаменяемость объектов	+	+	—	+	—
4. Масштабируемость группировки за счет новых членов	+	+	+	+	+
5. Иерархическая структура управления	—	—	+	—	+
6. Поддержка режима передачи данных master-slave	+	—	+	—	—
7. Наличие связи с соседними членами группировки	+	—	+	+	—
8. Прогнозный характер планирования	+	+	—	+	+

Сравнение данных методов показывает, что работоспособность сети взаимодействующих МКА основывается на комбинации детерминированных и адаптивных шагов для оценки и прогнозе состояния отдельных аппаратов [12]. Формируемая по отдельности каждым аппаратом сети данная информация является основой для реконфигурации сети, проводимой на основе принципов коллективной работы и самоорганизации [13].

С системной точки зрения каждый аппарат проявляет свойства интеллектуального агента, получающего опосредствованную информации о сети и выдающего в сеть собственное состояние, что позволяет на основе волновых итерационных процессов получить устойчивое состояние сети и удерживать его при выполнении пороговых условий [14].

Целевая миссия поддержания сети в работоспособном состоянии – поддержание необходимого размера сети наноспутников, зависящего от:

- n_{fact} – имеющиеся в сети наноспутники;
- $map[n_{fact}, n_{fact}]$ – карта сети;
- n_{new} – новые наноспутники (вне сети);
- h – пороговое значение.

Тогда работа сети наноспутников определяется функцией готовности сети в виде

$$E(n_{fact}, n_{new}, map[n_{fact}, n_{new}], h) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Материалы и методы

Рассматриваемая группировка взаимодействующих МКА представляет собой единую систему (сеть) объектов (интеллектуальных агентов), которые совместно используют расчетно-логические

и прогнозно-адаптивные подходы для своей оценки и децентрализованной реконфигурации сети [15]. Новое качество коллективной работы наноспутников проявляется за счет смешанного иерархического принципа управления:

- на верхнем уровне принцип самоорганизации проявляется в процедурах автоматического пополнения и исключения МКА из сети на основе автономных процессов обмена служебной и контекстной информацией между объектами сети;

- на нижнем уровне интеллектуальные агенты способны вести анализ состояния и генерацию прогноза, что позволяет заранее менять конфигурацию сети на основе обработки ретроспективных данных (временных рядов) качества связи и уровня сигнала.

Комплексирование расчетных и адаптивных подходов позволяет, с одной стороны, вести циклический опрос качества и уровня связи между аппаратами и служит для выявленной негативной тенденции, с другой – вновь появившиеся наноспутники на основе широко-вещательной рассылки и приема сообщений о своем положении и статусе инициируют процессы пополнения сети с переиндексацией аппаратов и связей между ними в сети. Тогда сеть наноспутников описывается как динамическая система, децентрализованно меняющая свой состав и связи между аппаратами в регламентные моменты времени.

Информационной основой для выполнения обменных процессов между аппаратами сети служат такие ресурсы, как:

- mesh-сеть;
- распределенная карта сети.

Mesh-сеть – это самоорганизующая сеть объектов, наделенных способностью периодически обмениваться информацией и менять свою конфигурацию на основе выполнения широковещательных рассылок и обработки множества принятых сообщений, что исключает необходимость назначения единого управляющего центра [16]. Для управления работой группировкой подвижных объектов с возможностями самостоятельного принятия решений на борту широкое распространение получили циклические опросно-управляющие сеансы связи. Они предполагают ячеистую (однородную) структуру сети и используют принципы децентрализации и автономной работы. В mesh-сетях, имеющих ячеистое строение, элементы сети объединяются многочисленными и зачастую избыточными связями. Однако такая избыточность необходима участ-

никам сети для прокладки множества маршрутов и реконфигурации сети [17].

Архитектура mesh-сетей основана на децентрализованном управлении, в ней каждый элемент сети (интеллектуальный агент) выполняет функции ретрансляции и маршрутизации, что позволяет двояко использовать их для работы с переменным составом сети [18]. С одной стороны, элемент сети входит в цепочку маршрута, обеспечивая передачу контекстной информации при решении прикладной задачи группировкой, с другой – элемент сети – активный организатор процессов реконфигурации сети, основанной на сборе данных о состоянии и переиндексации элементов сети (пополнение или удаление). Сетевая организация сети основана на формировании общих зон и задании «мостовых» элементов, через которые идет маршрутизация (рис. 1).

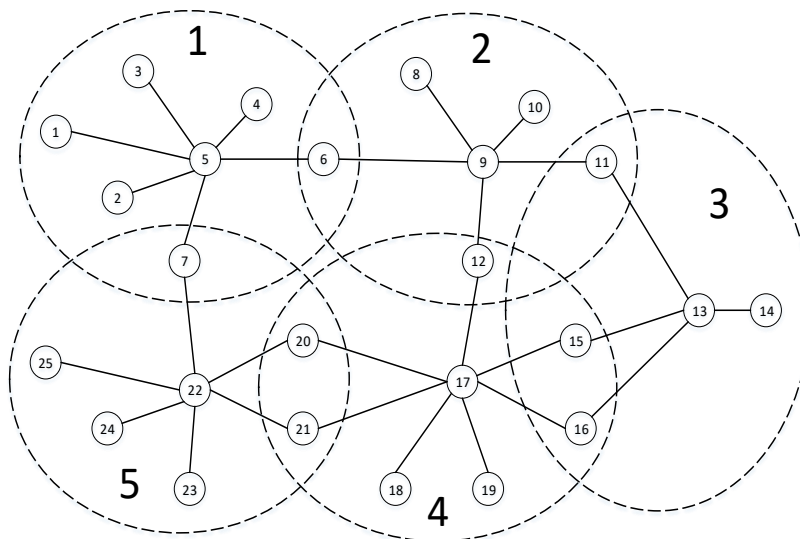


Рис. 1. Иерархическая конфигурация mesh-сети

Fig. 1. Hierarchical mesh network configuration

В mesh-сетях маршрутизация осуществляется динамически на основе данных о связанности элементов сети. Объекты (элементы) сети могут подклю-

чаться и выходить из состава сети с относительно высокой частотой. При этом пополнение сети МКА не является исключительным процессом, добавление

элемента реализуется как процесс актуализации элементов сети на основе распределенной структуры данных и выполнения широковещательной рассылки сообщений объектом-инициатором [18].

Особенностью mesh-сетей является то, что новый элемент при подключении к сети может быть [19]:

- элементом-коммутатором;
- корневым узлом;
- конечным (терминальным) элементом.

Карта сети подвижных МКА – базовый информационно-управляющий ресурс сети, который описывает текущее состояние связей между аппаратами сети и является основой для ее реконфигурации силами самих аппаратов. Основанием для инициализации процесса исключения аппарата из сети и последующей реконфигурации служит анализ качества и активности связи между

аппаратами [20]. Если ретроспектива временных данных, хранящихся в базе самого аппарата, имеет негативную тенденцию и монотонно приближается к нижнему порогу уровня связи, то такой аппарат будет исключен силами остальных участников сети в регламентные моменты времени опроса сети.

Структура сети МКА задается квадратной матрицей [21]. Каждая строка матрицы смежности по отдельности описывает текущие связи i -го МКА с остальными аппаратами ($i = 1 \dots M$). Соответственно графовое представление группировки и обработка матрицы смежности позволяют оценивать связность сети и управлять ее структурой.

Карта сети представляет из себя квадратную матрицу $A = (a_{ij})$ размерности $M \times M$, элементы которой a_{ij} определяются как

$$a_{ij} = \begin{cases} C_{a_{ij}} > 0, & \text{если между } i \text{ и } j \text{ МКА имеется связь;} \\ \text{NIL}, & \text{если между } i \text{ и } j \text{ МКА не установлено связи;} \\ 0, & \text{если } i = j, \end{cases} \quad (2)$$

где $C_{a_{ij}}$ – количественная оценка связи между ij -й парой аппаратов.

Метод реконфигурации сети МКА является иерархическим, он имеет 2 уровня управления:

1) на верхнем уровне реконфигурация основана на принципах самоорганизации, т. е. коллективного выполнения элементами сети набора базовых процедур автоматического объединения, актуализации (опрос и исключение МКА), пополнения сети, что позволяет поддерживать необходимое количество работоспособных МКА в сети;

2) на нижнем уровне сеть МКА понимается как адаптивная система, имеющая доступную для всех участников предысторию их состояний, что позволяет осуществлять прогноз будущего состояния сети на основе анализа временных данных состояния связи между парами МКА в сети и прогнозировать будущие состояния каждого из МКА, входящих в сеть.

В качестве базовых операций сети МКА на верхнем уровне выполняются следующие операции:

- инициализация (образование) сети МКА;

- актуализация (опрос) МКА;
- пополнение сети МКА;
- построение списка маршрутов между аппаратами сети.

Под операцией инициализации понимается процесс информационно-физического объединения отдельных аппаратов в единую связанную систему.

Под операцией актуализации сети понимается процесс циклического адресного опроса элементов аппаратов на предмет подтверждения уровня и/или качества связи. Циклические перебор и проверка связи между парами аппаратов позволяют выявить фактические отказы и запустить алгоритм переиндексации работоспособных аппаратов с целью исключения вышедших из строя аппаратов.

Под операцией пополнения понимается процесс расширения состава группировки и изменения связей между аппаратами. Вновь прибывший аппарат осуществляет ширококвещательную рассылку и устанавливает связь с ответившими ему аппаратами сети. Как следствие, выполняется расширение карты сети и обновление связей между аппаратами. При этом все аппараты сети переходят в режим приема сообщений и коррекции своей карты сети по факту установления связи.

Операция построения списка маршрутов между аппаратами сети заключается в следующем. Организуется сетевая эстафета трансляции системного кода между узлами связи сети в прямом и обратном направлениях. В процессе эстафеты проверяется качество и уровень сигнала между источниками и приемником системного кода. Полученные при прямом и обратном ходе по маршруту временные задержки сравниваются со

значениями в карте сети и модифицируют значения в экземплярах карты сети. В завершение всех построений текущий корневой узел выполняет одноразовую ширококвещательную рассылку списка построенных маршрутов.

Метод реконфигурации сети МКА включает следующие этапы:

1) проверка внешнего условия реконфигурации сети (асинхронный процесс) – обнаружение системного кода от нового аппарата, автоматическая индексация количества строк и столбцов карты сети;

2) проверка внутреннего условия реконфигурации сети (синхронный процесс) – циклическая ширококвещательная рассылка служебного сообщения и его прием остальными аппаратами сети, проверка связности пар МКА и обновление временных задержек в экземплярах карты сети;

3) обработка карт сети и удаление аппаратов, не принявших участия в обмене, карта сети уменьшается на число выбывших аппаратов;

4) переиндексация аппаратов сети и логическое исключение выбывших аппаратов.

Для повышения живучести сети метод реконфигурации опционально дополняется следующими шагами прогнозной реконфигурации:

1) прием аппаратами допустимого нижнего порога уровня связи h ;

2) накопление временных рядов изменения уровня и качества связи между парами аппаратов и анализ ретроспективных данных;

3) составление прогнозных правил оценки радиовидимости аппаратов и составление списка «подозрительных» на отказ аппаратов;

4) оценка внешних условий работы сети и утверждение списка аппаратов, рекомендуемых к исключению;

5) выполнение пп. 3–4 и переход к п. 10;

6) фиксация новой конфигурации сети аппаратов, обновление экземпляров карты сети и списка маршрутов МКА.

Новизна метода реконфигурации определяется децентрализованными процессами модификации сети на основе локальных данных у каждого аппарата и выполнении обменных синхронизирующих процессов, что позволяет исключить единый центр управления. При пополнении сети МКА-новичок осуществляет широковещательную рассылку не только служебного пакета, но и данных о себе

(идентификатор, координаты и др.), а аппараты сети, которые получили эти данные, самостоятельно выполняют модификацию экземпляров карты сети. После модификации аппараты сети по очереди отсылают МКА-новичку свои пакеты, что позволяет вновь вошедшему в сеть аппарату построить свою карту сети.

Интеграция двух подходов реконфигурации также позволяет повысить живучесть сети МКА за счет опроса состояния сети, обновления конфигурации сети и прогнозирования новой конфигурации сети МКА в условиях неопределенности внешней среды и будущих состояний аппаратов.

Пусть в начальный момент времени на орбиту выведено $M = 5$ МКА (рис. 2).

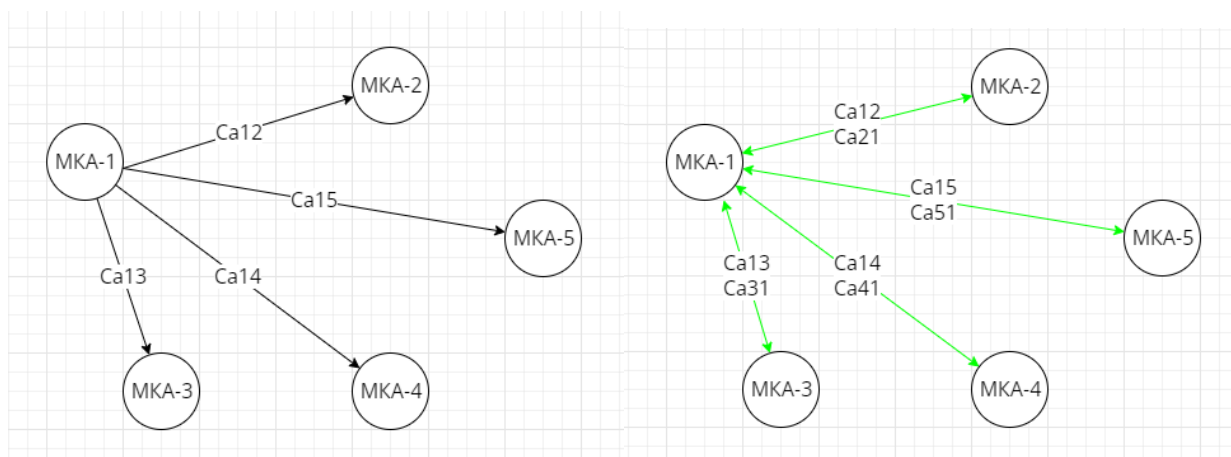


Рис. 2. Начальная рассылка и установление связей аппаратов

Fig. 2. Begin broadcast and establishment of device connections

Для инициализации сети МКА выполняется циклическая широковещательная рассылка сообщений (от МКА-1, МКА-2, МКА-3 и т. д.) и их прием (рис. 2). По факту обменных процессов построено заполняется карта сети на основе рассчитанных задержек. Прием и передача выполняются заданное количество раз, по

итогу – в карту сети записываются средние или фиксируется отсутствие связи между парами аппаратов. Например, на рисунке 3 для широковещательной рассылки из МКА-4 не подтверждена связь МКА-4 – МКА-5, что отражается в карте сети МКА-4 значениями для $Ca_{45} = NILL$ и $Ca_{54} = NILL$ (табл. 2).

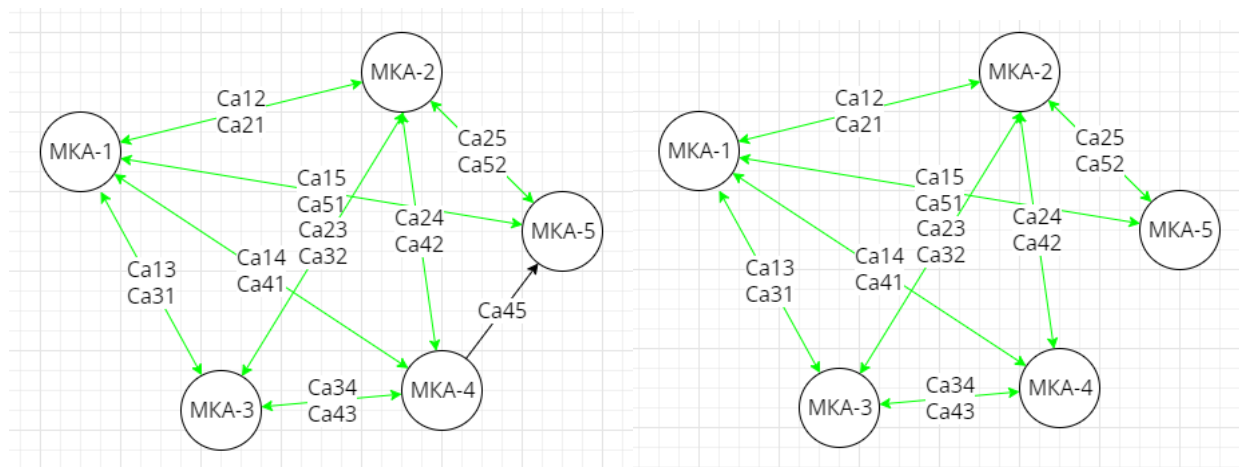


Рис. 3. Широковещательная рассылка и установление связей МКА-4

Fig. 3. Broadcast and establishment of communications between small satellites-4

Таблица 2. Карта сети МКА

Table 2. Small spacecraft network map

		Передатчик				
		МКА-1	МКА-2	МКА-3	МКА-4	МКА-5
Приемник	МКА-1	0	CA ₂₁ = 0,011	CA ₃₁ = 0,015	CA ₄₁ = 0,013	CA ₅₁ = 0,021
	МКА-2	CA ₁₂ = 0,01	0	CA ₃₂ = 0,025	CA ₄₂ = 0,011	CA ₅₂ = 0,021
	МКА-3	CA ₁₃ = 0,015	CA ₂₃ = 0,025	0	CA ₄₃ = 0,015	NIL
	МКА-4	CA ₁₄ = 0,014	CA ₂₄ = 0,010	CA ₃₄ = 0,015	0	NIL
	МКА-5	CA ₁₅ = 0,02	CA ₂₅ = 0,022	NIL	NIL	0

После инициализации, создания распределенной карты сети и списка маршрутов сеть МКА выполняет целевую работу, используя маршруты для передачи служебной и контекстной информации между МКА и наземным центром (оконечный пункт приема).

Общий алгоритм маршрутизации в сети МКА имеет достаточно сложную и разветвленную структуру. Он учитывает множество структурных и количественных параметров сети. На их основе формируется множество альтернативных участков маршрутов и зависимых вершин в них. В большинстве случаев для текущей конфигурации сети возможно

построение набора различных маршрутов, что позволяет поддерживать некоторую избыточную связность аппаратов в сети.

Собственно говоря, маршрутизация состоит из 3-х рабочих алгоритмов:

- 1) алгоритм подготовки маршрутов на стартовом узле – StartRoute;
- 2) алгоритм формирования и анализа маршрутов на трансляционных (промежуточных) узлах – WorkRoute;
- 3) алгоритм сохранения построенных маршрутов – EndRoute.

Работа алгоритма StartRoute начинается с ввода (передачи) идентификатора начального и конечного узлов –

IDSource, *IDGoal*. Далее выполняется подготовка структур данных для формирования списка *ID* узлов в составе маршрутов количеством *K*. Для этого в динамической памяти выделяется место для структур данных – списков *Temp1* ... *TempK*. Размер списка *Temp* задается максимальное число переходов – *TTL*. Каждый элемент списка *Temp* содержит 2 значения:

- 1) *ID* узла в составе маршрута;
- 2) накапливаемое значение метрики для текущего пути.

StartRoute на стартовом узле стартуется с выполнения подпрограмм (*Count*) подсчета количества узлов, смежных с узлом *IDSource*, проведения широковещательной рассылки от узла *IDSource*. Из *No* возможных направлений получают сообщения *K* узлов, идентификаторы которых будут записаны в массив *ID[K]* – массив текущих узлов, смежных узлу-источнику. Для дальнейшей работы индексы узлов по столбцу с ненулевой метрикой из *Arr[i, No]* перезаписываются в список пройденных элементов сети *NSL[No]*.

В теле цикла осуществляется перебор элементов *NSL[No]*. Для непустых *NSL* [114] осуществляется запись текущего *ID* в список маршрутов *Temp*.

Алгоритм *StartRoute* завершается циклом проверки последних элементов списка временных маршрутов *Temp* на предмет достижения конечного узла (*IDGoal*) и предельной длины маршрута *TTL_{max}*. При выполнении этого условия формируется список конечных маршрутов количеством *t*. В завершение

выполняется переиндексация массива *ID[k]* и количества сформированных маршрутов *K* с учетом исключения неоптимальных по метрике маршрутов для алгоритма *WorkRoute*.

Работа алгоритма формирования и анализа маршрутов на трансляционных (промежуточных) узлах – *WorkRoute* – во многом схожа с работой алгоритма *StartRoute*.

Алгоритм *WorkRoute* (рис. 4) имеет несколько стартовых точек продолжения маршрута. Они хранятся во входном массиве *ID* [1 ... *K*]. Каждый элемент *ID[w]* является точкой продолжения маршрута, и в его отношении выполняется общий набор шагов и циклов по формированию и анализу маршрута.

Для текущего узла с *ID[w]* выполняется процедура *Count* подсчета количества элементов, смежных с элементом *ID[w]*, проводится широковещательная рассылка от текущего узла *ID[w]*. Из *No* возможных направлений получают сообщения только *K* узлов (*K* < *No*). Для дальнейшей работы индексы узлов по столбцу с ненулевой метрикой из *Arr[i, No]* перезаписываются в *NSL[No]*.

В теле цикла осуществляется перебор элементов *NSL[No]*. Для непустых *NSL* осуществляется запись текущего *ID* в список маршрутов *Temp*. В отличие от алгоритма *StartRoute* значение метрики после добавления нового элемента в конец маршрут накапливается. Это необходимо для последующего анализа и выбора маршрутов в узле *ID[w]* с наименьшей метрикой (один лучший, два лучших и т. д.).

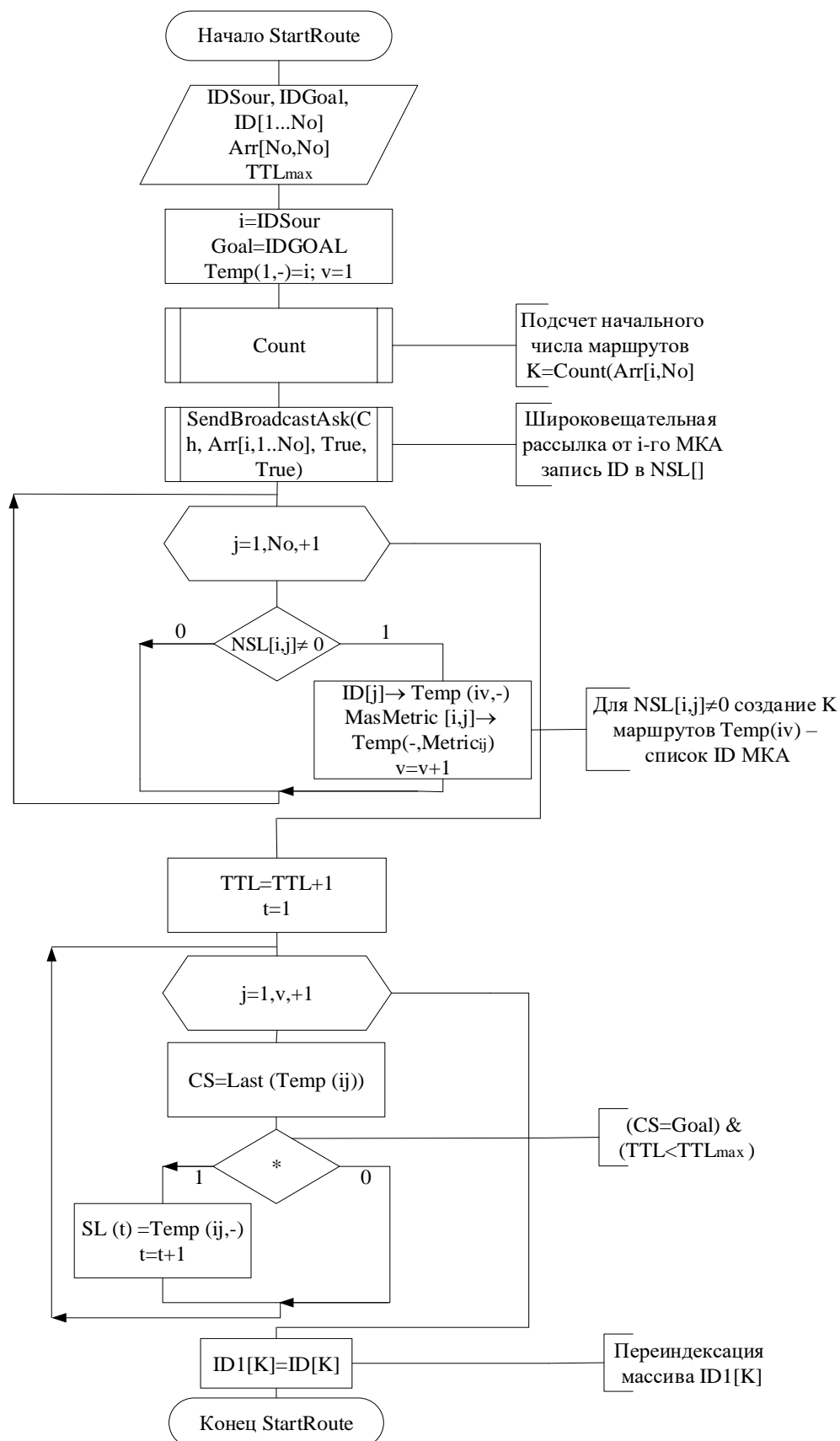


Рис. 4. Блок-схема алгоритма подготовки маршрутов

Fig. 4. Route preparation algorithm flowchart

Для текущего узла с $ID[w]$ выполняется процедура *Count* подсчета количества элементов, смежных с элементом $ID[w]$, проводится широковещательная рассылка от текущего узла $ID[w]$. Из No возможных направлений получают сообщения только K узлов ($K < No$). Для дальнейшей работы индексы узлов по столбцу с ненулевой метрикой из $Arr[i, No]$ перезаписывается в $NSL[No]$.

В теле цикла осуществляется перебор элементов $NSL[No]$. Для непустых NSL осуществляется запись текущего ID в список маршрутов $Temp$. В отличие от алгоритма *StartRoute* значение метрики после добавления нового элемента в конец маршрут накапливается. Это необходимо для последующего анализа и выбора маршрутов в узле $ID[w]$ с наименьшей метрикой (один лучший, два лучших и т. д.).

После проверки длины маршрута на предельное значение создается массив последних элементов для построенных маршрутов $MasCS()$, и на его основе выполняется процедура поиска и выбора маршрута с наименьшей метрикой – $MasCS()$ при совпадающих последних элементах. Текущий узел $ID[w]$ самостоятельно принимает решение, оставляя из множества конкурирующих маршрутов только один. Сокращенное

число маршрутов перезаписывается в списках $Temp\ 1 \dots Temp\ K$.

Алгоритм *WorkRoute* (рис. 5) также завершается циклом проверки элементов списка временных маршрутов $Temp$ на предмет достижения конечного узла ($IDGoal$) и предельной длины маршрута.

Работа алгоритма *EndRoute* запускается при условии достижения конечного узла $IDGoal$ или при достижении предельного числа переходов TTL , далее которого маршрут не строится. Задача алгоритма *EndRoute* – переслать построенный маршрут из списка вершин $SL(t)$, формирующих маршрут.

Результаты и их обсуждение

Созданные метод и алгоритмы маршрутизации позволяют автономно реконфигурировать сеть при возникновении отказов одного из аппаратов.

Пусть для сети с наноспутниками количеством $M = 6$ сформирована сеть (рис. 6). Пусть в режиме циклического опроса МКА-4 является опрашивающим аппаратом. Для него в соответствии с процедурой образования сети получен список маршрутов. Каждый маршрут без повторов соединяет пары аппаратов, обеспечивая связность сети и возможность альтернативных путей.

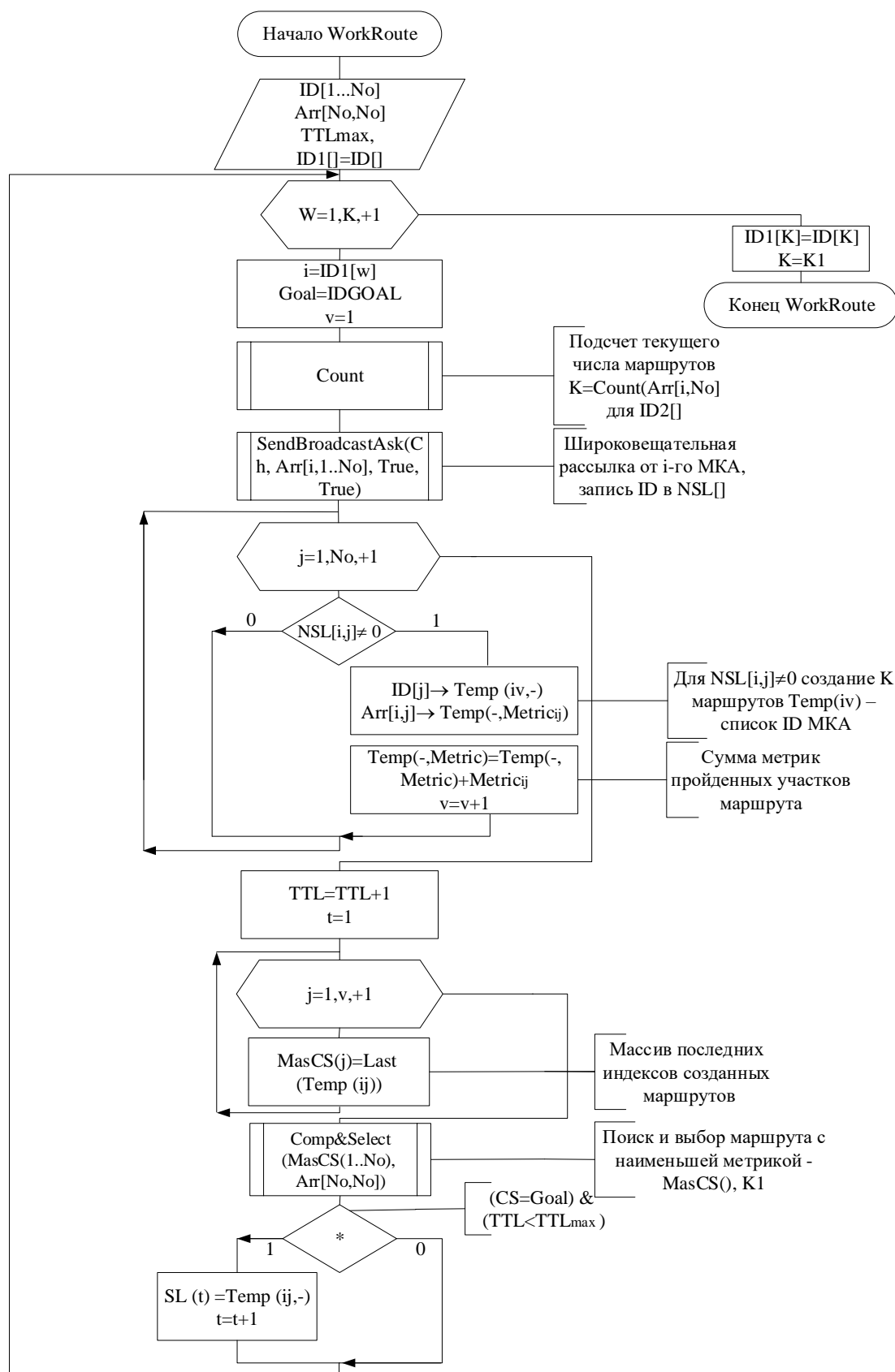


Рис. 5. Блок-схема алгоритма построения и анализа маршрутов

Fig. 5. Route construction and analysis algorithm flowchart

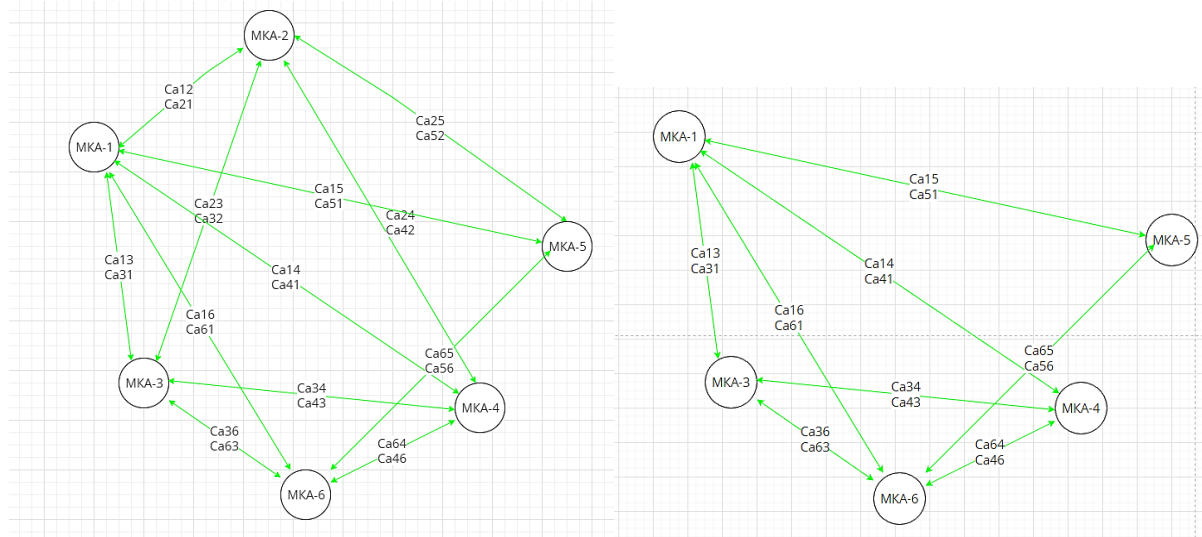


Рис. 6. Расширенная и сокращенная сети наноспутников

Fig. 6. Extended and reduced nanosatellite networks

Множество маршрутов для пары (МКА-4, МАКА-5) содержит:

МКА-4 → МКА-2 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-3 → МКА-2 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-3 → МКА-1 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-1 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-1 → МКА-2 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-3 → МКА-1 → МКА-2 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-2 → МКА-1 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-3 → МКА-2 → МКА-1 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-2 → МКА-3 → МКА-1 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-6 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-6 → МКА-1 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-6 → МКА-3 → МКА-2 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-6 → МКА-5;
 МКА-4 → МКА-6 → МКА-1 → МКА-2 → МКА-5.

Попутно по карте сети МКА-4 вычисляет оценки маршрутов, что выбрать минимальный маршрут и значения временных задержек отдельных частей маршрута (при необходимости):

$$0,011 + 0,022 = 0,033;$$

$$0,015 + 0,025 + 0,022 = 0,062;$$

$$0,015 + 0,015 + 0,02 = 0,032;$$

$$0,013 + 0,02 = 0,033;$$

$$0,013 + 0,01 + 0,022 = 0,045;$$

$$0,015 + 0,015 + 0,01 + 0,022 = 0,062;$$

$$0,011 + 0,011 + 0,02 = 0,042;$$

$$0,015 + 0,025 + 0,011 + 0,02 = 0,071;$$

$$0,011 + 0,025 + 0,015 + 0,02 = 0,071;$$

$$0,014 + 0,015 = 0,029;$$

$$0,014 + 0,025 + 0,02 = 0,059;$$

$$0,014 + 0,019 + 0,025 + 0,022 = 0,08;$$

$$0,014 + 0,015 = 0,029;$$

$$0,014 + 0,025 + 0,01 + 0,022 = 0,071.$$

Пусть МКА-2 перестал отвечать на запросы при актуализации сети. Тогда в отношении МКА-2 проводится децентрализованная реконфигурация сети и обновление списка маршрутов другими аппаратами. Маршруты, содержащие выбывший из карты сети аппарат – МКА-2, исключаются из списка маршрутов. Тем не менее наличие общих участков маршрутов по-прежнему обеспечивает связность сети и возможность передачи сообщений между МКА-4 и остальными аппаратами сети.

Децентрализованная реконфигурация основана на автономном пересчете экземпляров карты сети, что определяет линейные временные затраты. При одновременном отказе нескольких аппаратов в сети процедура согласования экземпляров карты сети исключает полный перебор строк в матрице, так как учитывается резервирование участков маршрутов сети. По аналогии с вычислительными системами частичная дешифрация адреса обеспечивает быстрый доступ к блоку памяти и последующий переход к обработке [22].

Централизованный метод управления сетью имеет квадратичные затраты, поскольку осуществляется последовательный перебор всех аппаратов в сети и для каждого аппарата, – все строки карты сети равноправны. Как следствие, метод централизованной реконфигурации имеет избыточную временную сложность и дополнительные затраты на полный перебор всех строк матрицы.

Анализ методов управления группировкой МКА показал, что наиболее

эффективным является метод децентрализованного управления, позволяющий автономно принимать решения на основе распределенной информационной структуры – карты сети, что обеспечивает возможность прогнозирования будущих состояний на основе анализа и обработки текущих и ретроспективных данных [23].

Выводы

Разработанный метод реконфигурации имеет двухуровневую организацию, что позволяет повысить живучесть сети взаимодействующих МКА за счет упреждающего перераспределения связей между аппаратами в процессе служебных сеансов реконфигурации, а также поддерживать необходимое количество аппаратов в сети.

В качестве базовых операций в сети МКА определены операции: инициализация сети МКА, пополнение и актуализации сети МКА на основе приема-передающих процессов между парами аппаратов. Реализация динамически поддерживаемых соединений и прогнозных оценок позволяет вести реконфигурацию сети спутников при динамическом изменении ее состава.

Децентрализованное управление сетью с использованием распределённой карты сети имеет линейные оценки временных затрат на реконфигурацию или актуализацию сети, тогда как централизованный подход, использующий неделимый информационный ресурс для учета всех перебираемых пар аппаратов, имеет квадратичную оценку.

Список литературы

1. Горячева Е. П., Куйшибаев Т. З., Прошин А. А. Наноспутники Cubesat // NovaInfo.Ru. 2015. Т. 1, № 36. С. 51–55.
2. Глазкова И. А. Анализ опыта создания космических систем дистанционного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и тенденции развития российской космической промышленности в этой области // Космонавтика и ракетостроение. 2010. № 2(59). С. 70–77.
3. Сергеева А. Е. Развитие перспективных космических технологий и систем как основа технологического суверенитета России // Мир новой экономики. 2025. Т. 19, № 1. С. 17–26. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2025-19-1-17-26>
4. Балухто А. Н., Матвеев С. А., Хартов В. В. Основные принципы построения и организации функционирования интеллектуальных многоспутниковых систем на базе малых космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 6(105). С. 127–140.
5. Клименко А. Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 3. С. 136–151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>
6. Автономная интеллектуальная группировка малых космических аппаратов – космический эксперимент «Радиоскаф-5» / О. И. Атакищев, Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов [и др.] // Известия Института инженерной физики. 2020. № 1 (55). С. 42–48.
7. Устюгов Е. В., Шафран С. В., Соболев А. А. Новая архитектура наноспутника стандарта CubeSat без использования бортовой кабельной сети // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 423–429. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-5-423-429>
8. Групповое управление подвижными объектами в неопределённых средах / под ред. В. Х. Пшихопова. М.: Физматлит, 2015. 305 с.
9. Кенина Д. С., Звягинцева О. С., Хрипкова Л. Н. Принятие управленческих решений в условиях риска и неопределенности // Kant. 2020. № 4 (37). С. 106–109. <https://doi.org/10.24923/2222-243X.2020-37.23>
10. Подход к построению интеллектуальной распределенной системы поддержки принятия решений при управлении группой самоуправляемых роботизированных средств в условиях воздействия дестабилизирующих факторов / Н. А. Михеев, С. А. Поляков, Е. А. Ряхова, В. А. Тимофеев // Динамика сложных систем – XXI век. 2023. Т. 17, № 1. С. 30–37.

11. Рачков Т. И., Кузьмина И. А. Мета-эвристический алгоритм децентрализованного управления группой // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 3. С. 96–99.
12. Свиридов В. В. Формализованный подход к синтезу архитектуры системы адаптивного группового управления робототехническими комплексами в условиях недетерминированной динамической среды // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 2 (226). С. 78–88. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-2-78-88>
13. Лаврова Д. С., Соловей Р. С. Обеспечение информационной безопасности беспроводных динамических сетей на основе теоретико-игрового подхода // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2020. № 2. С. 16–22.
14. Птицына Л. К., Лебедева А. А. Модельно-аналитическое обеспечение информационных интеллектуальных агентов с динамической синхронизацией их действий // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2014. Т. 6, № 6. С. 68–71.
15. Стецюра Г. Г. Децентрализованная автономная синхронизация процессов взаимодействия мобильных объектов // Проблемы управления. 2020. № 6. С. 46–56.
16. Татарникова Т. М., Миклуш В. А. Имитационная модель одноранговой беспроводной сенсорной сети // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 3. С. 20–26. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-3-20-26>
17. Клименко А. Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 3. С. 136–151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>
18. Аганесов А. В. Анализ качества обслуживания в воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 92–121.
19. Гаркуша, С. В., Гаркуша Е. В. Комплексное решение задач распределения частотных каналов и потоковой маршрутизации в MESH-сетях стандарта IEEE 802.11, представленных в виде гиперграфа // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2015. № 1. С. 96–100.
20. Аппаратно-программные средства динамической реконфигурации группировки малых космических аппаратов / С. Г. Емельянов, С. Н. Фролов, Е. А. Титенко [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 3 (239). С. 18–32. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-18-32>
21. Разработка формата карты сети малых космических аппаратов и алгоритмов функционирования сетевого программного обеспечения / О. И. Атакищев, Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов [и др.] // Известия Института инженерной физики. 2024. № 4 (74). С. 61–73.

22. Выбор архитектуры нейронной сети для реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов / Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов, Е. А. Титенко, С. Ю. Мирошниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 8–26. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-8-26>

23. Ходукин Р. А., Томакова Р. А., Малышев А. В. Методы анализа телематических данных для систем поддержки принятия решений оптимального беспилотного управления автомобилями // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 108–118. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-108-118>

References

1. Goryacheva E.P., Kuishibaev T.Z., Proshin A.A. Cubesat nanosatellites. *NovaInfo.Ru*. 2015;1(36):51–5. (In Russ.)

2. Glazkova I.A. Analysis of the experience of creating space systems for remote sensing of the Earth based on small spacecraft and trends in the development of the Russian space industry in this area. *Kosmonavtika i raketostroenie = Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2010;2(59):70–77. (In Russ.)

3. Sergeeva A.E. Development of promising space technologies and systems as the basis of Russia's technological sovereignty. *Mir novoi ekonomiki = The World of the New Economy*. 2025;19(1):17–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2025-19-1-17-26>

4. Balukhto A.N., Matveyev S.A., Khartov V.V. Basic principles of construction and organization of functioning of intelligent multi-satellite systems based on small spacecraft. *Kosmonavtika i raketostroenie = Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2018;(6):127–140. (In Russ.)

5. Klimenko A.B. Methodology for selecting a method for managing distributed information systems in conditions of highly dynamic network infrastructure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(3):136–151. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>

6. Atakishchev O.I., Shilenkov E.A., Frolov S.N., et al. Autonomous intelligent constellation of small spacecraft – the Radioskaf-5 space experiment. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = Proceedings of the Institute of Engineering Physics*. 2020;(1):42–48. (In Russ.)

7. Ustyugov E.V., Shafran S.V., Sobolev A.A. New architecture of a CubeSat nanosatellite without using an on-board cable network. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pribo-rostroenie = Proceedings of higher Educational Institutions. Instrument Making*. 2018;61(5):423–429. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-5-423-429>

8. Pshikhov V.Kh. (ed.) Group control of moving objects in uncertain environments. Moscow: Fizmatlit; 2015. 305 p. (In Russ.)

9. Kenina D.S., Zvyagintseva O.S., Khripkova L.N. Making management decisions under conditions of risk and uncertainty. *Kant*. 2020;(4):106–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.24923/2222-243X.2020-37.23>

10. Mikheev N.A., Polyakov S.A., Ryakhova E.A., Timofeev V.A. An Approach to Building an Intelligent Distributed Decision Support System for Managing a Group of Self-Driving Robotic Vehicles Under the Influence of Destabilizing Factors. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek = Dynamics of Complex Systems – XXI Century*. 2023;17(1):30–37. (In Russ.)
11. Rachkov T.I., Kuzmina I.A. Meta-heuristic algorithm for decentralized group control. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike = Mathematical Methods in Technology and Engineering*. 2021;(3):96–99. (In Russ.)
12. Sviridov V. V. Formalized approach to the synthesis of the architecture of an adaptive group control system for robotic complexes in a non-deterministic dynamic environment. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of SFedU. Technical sciences*. 2022;2(226):78–88. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-2-78-88>
13. Lavrova D.S., Solovey R.S. Ensuring information security of wireless dynamic networks based on a game-theoretical approach. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy = Problems of Information Security. Computer Systems*. 2020;(2):16–22. (In Russ.)
14. Ptitsyna L.K., Lebedeva A.A. Modeling and analytical support for intelligent information agents with dynamic synchronization of their actions. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = Science-Intensive Technologies in Space Research of the Earth*. 2014;6(6):68–71. (In Russ.)
15. Stetsyura G.G. Decentralized autonomous synchronization of interaction processes of mobile objects. *Problemy upravleniya = Problems of Control*. 2020;(6):46–56. (In Russ.)
16. Tatarnikova T.M., Miklush V.A. Simulation model of a peer-to-peer wireless sensor network. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2023;17(3):20–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-3-20-26>
17. Klimenko A.B. Methodology for choosing a method for managing distributed information systems in conditions of highly dynamic network infrastructure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(3):136–151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>
18. Aganesov A.V. Analysis of the quality of service in the aerospace communication network based on the hierarchical and decentralized principles of relaying information flows. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, Communication and Security Systems*. 2015;(3):92–121. (In Russ.)
19. Garkusha S.V., Garkusha E.V. Complex solution of problems of frequency channel distribution and stream routing in IEEE 802.11 standard MESH networks presented in the form of a hypergraph. *Trudy Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki = Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics*. 2015;(1):96–100. (In Russ.)
20. Emelianov S.G., Frolov S.N., Titenko E.A., et al. Hardware and software tools for dynamic reconfiguration of a group of small spacecraft. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie*

nauki = Bulletin of the Southern Federal University. Technical sciences. 2024;(3):18–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-18-32>

21. Atakishchev O.I., Shilenkov E.A., Frolov S.N., et al. Development of a small spacecraft network map format and network software functioning algorithms. *Bulletin of the Institute of Engineering Physics.* 2024;(4):61–73.

22. Shilenkov E.A., Frolov S.N., Titenko E.A., Miroschnichenko S.Yu. Selection of neural network architecture for the implementation of cognitive functions of network software for controlling a group of interacting small spacecraft. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroeni = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023;13(4):8–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-8-26>

23. Khodukin R.A., Tomakova R.A., Malyshev A.V. Methods of telematics data analysis for decision support systems for optimal unmanned vehicle control. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroeni = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;5(2):108–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-108-118>

Информация об авторах / Information about the Authors

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru, Researcher ID: P-3380-2015, ORCID: 0000-0002-5659-4747

Шиленков Егор Андреевич, кандидат технических наук, директор, Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ub3wc@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6464-2462

Фролов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, заместитель директора

Evgeny A. Titenko, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of the Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru, Researcher ID: P-3380-2015, ORCID: 0000-0002-5659-4747

Egor A. Shilenkov, Candidate of Sciences (Engineering), Director of the Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ub3wc@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6464-2462

Sergey N. Frolov, Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Director of Konstantin

Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: snfrolov@bk.ru, ORCID: 0000-0001-5855-4717

Соглаев Владислав Павлович, инженер Научно-исследовательского института космического приборостроения /и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: svp1998@mail.ru, ORCID: 0009-0008-7775-1562

Тетерин Дмитрий Павлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tetelv@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9596-2939

Атакищев Олег Игоревич, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по специальным проектам, Институт инженерной физики, Московская область, г. Серпухов, Российская Федерация, e-mail: aoi007@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2280-673

Eduardovich Tsiolkovsky Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwestern State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: snfrolov@bk.ru, ORCID: 0000-0001-5855-4717

Vladislav P. Soglaev, Engineer of the Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research of the Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: svp1998@mail.ru, ORCID: 0009-0008-7775-1562

Dmitry P. Telegin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Chief Researcher of the Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tetelv@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9596-2939

Oleg I. Atakishchev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Deputy Director General for Special Projects, Institute of Engineering Physics, Moscow region Serpukhov, Russian Federation, e-mail: aoi007@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2280-673