

Е.А. Титенко, И.Е. Чернецкая, Л.А. Лисицын, М.А. Титенко, С.И. Егоров

**АППАРАТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД РЕКОНФИГУРАЦИИ
ГРУППИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Рассматриваются подходы и методы управления группировкой подвижных объектов, отличающихся возможностью автономного принятия решений о своем статусе в составе группировки. Другая проблема управления такой группировкой – слабые прогнозные решения связности пар элементов, их зависимость от единого центра управления. В качестве таких объектов рассматриваются наноспутники, функционирующие в условиях неопределённости внутренней и внешней среды. Цель – обеспечение связности аппаратов группировки за счет децентрализованного изменения структуры. Показано, что методы и алгоритмы динамической реконфигурации группировки подвижных объектов преимущественно используют централизованный подход и единый наземный центр управления, что для малой космонавтики нецелесообразно. Рассматривается класс методов управления с использованием методов и технологии обработки знаний (технологии искусственного интеллекта), позволяющих выделить и использовать дополнительную информацию о конфигурации группировки. Под конфигурацией понимается система-двойка, описывающая состав и связи между соседними элементами с некоторой количественной оценкой. В статье рассматривается конфигурация связности элементов для обеспечения непрерывной передачи данных между парой произвольных элементов группировки. Предлагаемый метод реконфигурации является иерархическим: на верхнем уровне реконфигурация основана на принципах самоорганизации, на нижнем уровне группировка понимается как адаптивная система, изменяющая свое состояние на основе обученной нейронной сети по историческим данным – временным рядам параметров аппаратов и их местоположения. Метод представляет собой двухуровневый цикл опроса каждым элементом группировки своих соседей и составлении карты сети. Эта карта сети отражает имеющиеся связи с учетом текущих параметров каждого аппарата. Второй (вложенный) цикл опроса использует управляющую информацию о будущем состоянии аппарата и связности группировки, в целом. Внесение изменений в экземпляры карты сети каждым аппаратом и обновление экземпляров карты сети позволяет по завершении циклов опроса получить конфигурацию работоспособных аппаратов. Результаты сравнительного анализа показали, что методы управления на принципах самоорганизации и адаптивного изменения структуры являются наиболее подходящими для динамической реконфигурации группировки за счет поддержки шагов прогнозирования.

Матрица связности; рассылка; граф; метрика; поиск значений; карта сети.

E.A. Titenko, I.E. Chernetskaya, L.A. Lisitsyn, M.A. Titenko, S.I. Egorov

**HARDWARE-ORIENTED METHOD FOR RECONFIGURING A GROUP
OF MOBILE OBJECTS**

The article describes approaches and methods for managing a group of moving objects, characterized by the ability to autonomously make decisions about their status within the group. Another problem of managing such a grouping is weak predictive solutions for the connectivity of pairs of elements and their dependence on a single control center. Nanosatellites operating under conditions of uncertainty in the internal and external environment are considered as such objects. The goal is to ensure the coherence of the group's apparatus through a decentralized change in structure. It is shown that methods and algorithms for dynamic reconfiguration of a group of moving objects predominantly use a centralized approach and a single ground control center, which is impractical for small space exploration. A class of management methods using knowledge processing methods and technology (artificial intelligence technology) is considered, allowing for the identification and use of additional information about the configuration of the group. Configuration is understood as a dual system that describes the composition and connections between

neighboring elements with some quantitative assessment. The article checks the connectivity configuration of elements to ensure continuous data transfer between a pair of arbitrary grouping elements. The proposed reconfiguration method is hierarchical: at the upper level, reconfiguration is based on the principles of self-organization; at the lower level, the grouping is understood as an adaptive system that changes its state based on a trained neural network based on historical data - time series of parameters of devices and their locations. The method is a two-level cycle of polling each element for grouping its neighbors and drawing up a network map. This network map shows the available connections, taking into account the current steam numbers of each device. The second (nested) polling cycle uses control information about the future state of the device and the connectivity of the group as a whole. Making changes to the network map instances by each device and updating the network map instances allows, upon completion of the polling cycles, to obtain the configuration of working devices. The results of the comparative analysis showed that management methods based on the principles of self-organization and adaptive change in structure are the most suitable for dynamic reconfiguration of the group. This result is possible due to the support of forecasting steps.

Connectivity matrix; distribution; graph; metric; search for values; network map.

Введение. Новым перспективным направлением развития территориально распределенных измерительно-вычислительных систем являются группировки подвижных взаимодействующих объектов (робототехнические комплексы, летательные аппараты, наноспутники и др.). Стратегический интерес к данным подвижным аппаратам обусловлен применением в них аппаратно-программных средств, позволяющих перейти к коллективному решению поставленной задачи и использованию распределенного измерительного и вычислительного ресурсов группировки для прикладных вычислительных процессов [1, 2]. Данная новая функциональность позволяет решать в кооперации не только исследовательские, но и значимые народно-хозяйственные задачи. Группировки МКА, рои БПЛА способны более эффективно по критерию «производительность/затраты» решать исследовательские и производственные задачи за счет поддержания соединений между аппаратами и, как следствие, вести вычисления в параллельно-конвейерном режиме, оперативно получать или актуализировать информацию об объектах мониторинга, проводить множественные измерения, фото-, видеосъемку, и др. Тем не менее существующие группировки МКА, рои БПЛА реализуют ограниченный набор программных функций в части организации межсетевой кооперации аппаратов [3–4]. Как правило такая кооперация имеет централизованный принцип управления, она конкретизируется указанием общих стартовых координат, времени формирования кластера аппаратов, статическим составом аппаратов, обособленным выполнением ранее назначенных задач (измерения и др.). При этом трансляция данных внутри сети реализуется опосредствованно – через наземные пункты.

Проблемная ситуация состоит в том, что группировки подвижных объектов преимущественно функционируют в условиях неопределённости состояния внешней среды, состояния самих аппаратов, что негативно сказывается на поддержании стабильной работы группировки как единого целого [5–7]. Введение новых аппаратов, выход из строя действующих аппаратов являются типовыми случаями изменения состава и связности аппаратов в группировке. Соответственно вычислительные процессы динамической реконфигурации группировки (сети) аппаратов являются адекватной реакцией на неопределенность внешней и внутренней среды. Среди различных подходов представляется наиболее значимым развитие методов децентрализованной реконфигурации, а также использование технологии искусственного интеллекта (ИИ) [8–13]. Их отличительная особенность – автономное принятие управляющих решений о состоянии группировки самими аппаратами на основе расчетных и прогнозных данных.

Таким образом, вопросы организации и динамической реконфигурации группировки (сети) с изменяемым количеством подвижных объектов в процессе функционирования являются актуальными.

Постановка задачи. Современные наноспутники (малые космические аппараты Cube Sat 3U – МКА) представляют собой высокотехнологичные изделия - автоматизированные подвижные информационно-измерительные станции, имеющие в своем составе служебные подсистемы энергоснабжения, связи, управления, стабилизации/ориентации [14–16]. Они способны обеспечивать эффективное решение значимых производственных задач, связанных с обеспечением/предоставлением услуг космической связи - «космическая шина данных» (услуги спутниковой телефонной связи, широкополостного доступа в интернет, получения данных от датчиков и систем интернета вещей, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), фото- видеосъемки территорий и объектов целевого назначения, контроля воздушной обстановки, и др. Все эти задачи наиболее эффективно решать не одиночными аппаратами, а группировками аппаратов, способными за счет пространственного распределения аппаратов вести множественные процессы съемки/измерения/передачи.

Особенности работы МКА в космическом пространстве заключаются в ограниченности ресурса силовой установки, воздействия радиации, наличия природных и техногенных помех, слабого резервирования критических модулей и узлов, невозможности ремонтно-регламентных работ подсистем МКА. Будучи выведенными на орбиту, МКА функционируют в рамках отведенного временного срока и работоспособности основных подсистем. Вместе с тем, в группировке присутствует некоторая обобщенная информация о состоянии и расположении МКА, она необходима для оценки времени их устойчивого функционирования в качестве узлов сети и для прогнозирования качества связи между парами МКА в пределах прямой видимости.

Информационно каждый МКА в составе группировки описывается через [16]:

- ◆ орбитальные параметры (координаты);
- ◆ вектор состояния подсистем;
- ◆ матрица прямой видимости – квадратная симметричная относительно главной диагонали матрица, каждый элемент которой сигнализирует о наличии прямой видимости между соответствующей парой МКА;
- ◆ матрица фактического качества связи, конфигурация которой аналогична матрице прямой видимости, а каждый элемент описывает эффективность (длительность) передачи сообщений между парами аппаратов.

Теоретико-множественная модель МКА, объединяющая набор параметров, имеет следующий вид

$$MKA_i(t) = \left\langle ID_i, TLE(t)_i, \left\{ \left\langle ID_j, TLE(t)_j \right\rangle \right\}_{i \neq j}, \mathbf{V}_i(t), \langle ID_Ch \rangle, P, UTC \right\rangle, (1)$$

где ID_i – уникальный идентификатор i -го МКА;

$TLE_i(t)$ – кеплеровские координаты в момент времени t ;

$\left\{ \left\langle ID_j, TLE_j \right\rangle \right\}$ – множество пар идентификаторов и параметров орбиты j -ых

МКА, связанных с i -ым МКА;

$\mathbf{V}_i(t) = \left\{ v_{im}(t) \right\}_{m=1}^{N_V}, v_{im}(t) \in \mathbb{R}$ – вектор состояния, описывающий техниче-

ское подсистем МКА в момент времени t ;

P – битовый флаг режима передачи;

$\langle ID_Ch \rangle$ – множество каналов связи;

UTC – единое время для всех элементов сети МКА и абонентов.

Множество пар идентификаторов и параметров орбиты задают пространственное положение и информационную связь аппаратов в группировке, образуя связанную систему, в которой ее каждый элемент служит источником, приемником и ретранслятором в маршрутах передачи данных.

Соответственно двоичная функция $aktiv(MKA_i(t))$ определяет работоспособность i -го аппарата в составе группировки и его способность поддерживать связность аппаратов для построения маршрутов:

$$aktiv_i(MKA_i, \langle MKA_j \rangle_{i \neq j}, V_i(t)) = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ый МКА исправен} \\ 0, & \text{если } i\text{-ый МКА не исправен} \end{cases} \quad (2)$$

Тогда под связностью S группировки будет пониматься актуальное число работоспособных МКА, имеющих соединения с подмножеством аппаратов их группировки

$$S(MKA_1, MKA_2, \dots, MKA_M) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где M – размер группировки.

Метод решения. Для формализации вычислений по реконфигурации сети будет использован матричный подход, позволяющий описать объект управления (группировку МКА) как систему взаимосвязанных элементов.

Необходимость реконфигурации группировки МКА определяется следующими моментами [3]. Во-первых, текущее положение в пространстве набора МКА оценивается собственными зонами видимости аппаратов. Каждый аппарат по отношению к остальным имеет индивидуальные зоны видимости d_{ij} , но в группировке возможны ситуации недоступности цепочек аппаратов между собой, что не позволяет поддерживать связность группировки. Во-вторых, группировка МКА рассматривается как система однородных объектов, имеющих совпадающий состав бортовых подсистем (элементов) без возможности резервирования узлов, блоков, модулей. Как следствие, связность группировки может быть не поддержана по причине неработоспособности МКА, даже при условии его видимости другими аппаратами.

В обоих случаях в группировке МКА необходимо выполнить структурную реконфигурацию, т.е. динамически обновить число аппаратов и связей между ними.

Группировка МКА задается квадратной матрицей, аналогичной классической матрице смежности [17]. Эта матрица далее получила название карте сети. 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 состояние 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

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

где $C_{a_{ij}}$ – количественная оценка наличия или качества связи между (ij) парой аппаратов, например, время передачи.

Столбцы матрицы сети соответствуют МКА-источника данных, а строки МКА-приемникам данных. Главная диагональ матрица состоит из элементов со значением 0. В идеальном случае матрица сети будет симметричной относительно главной диагонали, поскольку метрика передачи данных в канале от i МКА к j МКА будет равна метрике передачи данных от j МКА к i МКА. Однако, в реальных условиях, из-за наличия случайных, неконтролируемых возмущений и помех, особенностей оборудования МКА и особенностей внешней среды, количественные значения метрик передачи данных в канале от i МКА к j МКА могут быть не равны метрикам передачи данных от j МКА к i МКА. Однако в силу наличия естественных помех карта сети не является симметричной относительно главной диагонали.

В начальный момент инициализации сети МКА размер квадратной матрицы сети соответствует количеству МКА, выведенных на орбиту и участвующих в базовом процессе инициализации сети. Главная особенность децентрализованного управления группировкой – наличие и обновление множества экземпляров карты сети по мере образования или актуализации группировки на основе широкоэвещательной рассылки служебных сообщений каждым МКА.

Пусть существует группировка из 5 МКА (рис. 1).

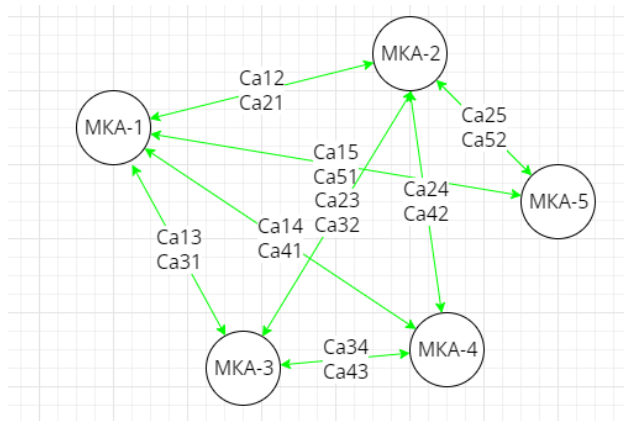


Рис. 1. Группировка взаимодействующих МКА

В начальный момент карта сети пустая, она имеет вид (табл. 1). Значения *NILL* в дальнейшем будут заменены на метрику при взаимодействии i -го и j -го аппаратов.

Таблица 1

Начальная карта сети

		Передатчик				
		МКА-1	МКА-2	МКА-3	МКА-4	МКА-5
Приемник	МКА-1	0	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>
	МКА-2	<i>NILL</i>	0	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>
	МКА-3	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	0	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>
	МКА-4	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	0	<i>NILL</i>
	МКА-5	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	<i>NILL</i>	0

Текущий цикл заполнения карты сети состоит в следующем. Текущий МКА делает широкоэвещательную рассылку, рассчитывает прямые метрики, а также последовательно получает метрики обратной передачи от всех МКА для текущего МКА. Прямые и обратные значения метрик позволяют заполнить i -ю строку и j -й столбец карты сети.

Для МКА-1 заполненная карта сети имеет вид, представленный в табл. 2, а соответствующий ей подграф представлен на рис. 2.

Таблица 2

Карта сети, заполненная для МКА-1

		Передатчик				
		МКА-1	МКА-2	МКА-3	МКА-4	МКА-5
Приемник	МКА-1	0	CA21=0,011	CA31=0,015	CA41=0,013	CA51=0,021
	МКА-2	CA12=0,01	0			
	МКА-3	CA13=0,015		0		
	МКА-4	CA14=0,014			0	
	МКА-5	CA15=0,02				0

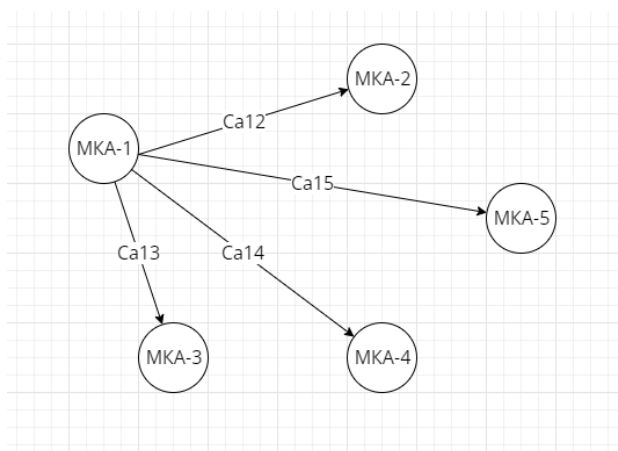


Рис. 2. Подграф для соединений МКА-1

По окончании текущего цикла широковещательной рассылки локальная карта сети тиражируется в память остальным МКА.

Циклы широковещательной рассылки, выполненные для всех МКА, позволяют вычислить для исходного графа (рис. 1) итоговую карту сети (табл. 3). При объединении предыдущей и текущей карт сети выполняется операция поэлементного арифметического сложения, при этом значение *NIL* трактуется как арифметический ноль.

Таблица 3

Итоговая карта сети

		Передатчик				
		МКА-1	МКА-2	МКА-3	МКА-4	МКА-5
Приемник	МКА-1	0	CA21=0,011	CA31=0,015	CA41=0,013	CA51=0,021
	МКА-2	CA12=0,01	0	CA32=0,025	CA42=0,011	CA52=0,021
	МКА-3	CA13=0,015	CA23=0,025	0	CA43=0,015	NIL
	МКА-4	CA14=0,014	CA24=0,010	CA34=0,015	0	NIL
	МКА-5	CA15=0,02	CA25=0,022	NIL	NIL	0

Ограниченность вычислительного ресурса (программируемый контроллер класса TMS32 или аналоги) для операций образования, реконфигурации карты сети обусловила переход к двоичной карте сети (*Bit_A*), в которой значение в каждой ячейке описывает факт наличия/отсутствия связи в (i,j) паре МКА. Соответственно для объединения двоичных матриц сети будет использована логическая операция *or*.

Шаги реконфигурации группировки МКА основаны на сложившейся карте сети, задающей состав и связи между аппаратами. Метод реконфигурации сети МКА включает следующие этапы:

1) проверка внешнего условия реконфигурации сети, если обнаружен специальный код от нового аппарата, то выполняется шаг пополнение сети, при этом карта сети увеличивается на 1 строку и 1 столбец;

2) проверка внутреннего условия реконфигурации сети (синхронный процесс), по заданному для сети временному регламенту каждый аппарат по очереди переходит в режим широковещательной рассылки, остальные аппараты сети – в режим приема, выполняется проверка связности пар МКА и обновляется временная метрика в карте сети;

3) по завершении цикла широковещательных рассылок однократно выполняется проверка изолированных вершин (появление пустой строки или столбца в карте сети), если это обнаруживается выполняется переиндексация аппаратов сети, карте сети уменьшается на выбывшие аппараты;

4) если требуется оптимизация сети МКА, тогда проводятся шаги прогнозирования 5-7, в противном случае – переход на п.8;

5) по внутреннему временному условию прогноза состояния сети МКА осуществляется накопление текущих метрик сети и анализ массивов временных рядов состояния аппаратов и значений прямой видимости пар аппаратов;

6) на основе нейронной сети строится прогноз видимости или работоспособности аппаратов сети в виде бинарной карты признаков с числом ячеек, соответствующих числу ячеек карты сети;

7) на основе карты сети и бинарной карты признаков проводится уточнение видимости пар ячеек сети и последующая проверка изолированных вершин, если это обнаруживается выполняется переиндексация аппаратов сети, карте сети уменьшается на выбывающие по прогнозу аппараты;

8) фиксируется новая конфигурация группировки МКА, аппараты готовы к построению маршрутов.

Базовый шаг метода реконфигурации сети МКА заключается в циклическом переключении каждого МКА сети на режим широковещательной передачи, остальные МКА – режим приема. При построении карты сети используются типовые операции:

- ◆ добавления строки/столбца в матрицу;
- ◆ записи вещественного значения метрики;
- ◆ поиск пустой строки/столбца в матрице;
- ◆ логического сложения двоичных признаков ячеек бинарных карт связности;
- ◆ -логического сложения двоичных признаков ячеек бинарных карт работоспособности.

Данные типовые операции поддерживаются практически любым программируемым микроконтроллером, что позволяет считать метод реконфигурации аппаратно-ориентированным, включая макро операцию построения прогноза работоспособности состояния аппарата на основе нейронной сети.

Результаты и обсуждение. Методы управления группировкой МКА следуют из основных информационно-управляющих обеспечивающих задач:

- ◆ запрос параметров подсистем жизнеобеспечения;
- ◆ запрос или управление ориентацией/стабилизацией;
- ◆ команды изменения циклограммы полёта (регламент передачи маяков);
- ◆ организацию передачи данных полезной нагрузки;
- ◆ ретрансляция служебных квитанций в группировке;
- ◆ команды изменения частотных каналов, скорости передачи данных, видов модуляции и прочих возможных параметров телекоммуникации и др.

В общем случае можно выделить методы управления подвижными многоэлементными системами [18–21] (рис. 2).

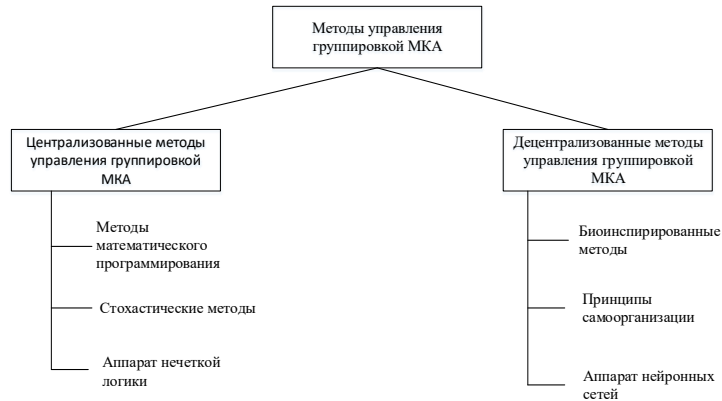


Рис. 2. Классификация методов управления группировкой МКА

В табл. 4 выполнено сравнение рассматриваемых методов для построения квалиметрических диаграмм, ранжирования методов для реконфигурации группировки.

Значения характеристик методов управления заданы в качественной шкале {low, medium, high}. Они служат основой для построения диаграмм и определения «сильных» сторон каждого из методов.

Таблица 4

Сравнение методов управления для группировки МКА

Характеристики	Методы управления					
	Математическое программирование	Стохастические	Аппарат нечеткой логики	На основе принципов самоорганизации	Стадного управления	Аппарат нейронных сетей
Отсутствие выделенного центра реконфигурации	low	low	medium	medium	high	high
Устойчивость решения	low	low	medium	medium	medium	high
Степень параллелизма	medium	low	medium	high	medium	high
Масштабируемость группировки	medium	low	medium	high	high	high
Типовые арифметические и логические операций	medium	low	medium	medium	medium	high
Необходимый объем памяти	low	low	medium	medium	medium	high
Адаптивность системы управления	low	medium	low	high	high	high
Предобработка данных	medium	low	high	low	high	high
Динамика внешней среды	medium	medium	medium	high	high	high
Степень формализации входных данных	high	high	medium	medium	medium	medium

На рис. 3 показаны квалиметрические диаграммы для рассматриваемых методов. Стимулирующая природа характеристик позволяет ранжировать данные методы по занимаемой площади. Анализ рис. 3 показывает, что наиболее приспособленными для проведения реконфигурации группировки можно считать методы

на основе принципов самоорганизации и аппарата нейронных сетей, позволяющие использовать предобработку данных, учитывать динамику внешней среды, типовые операции, распараллеливание вычислений.



Рис. 3. Квалиметрические диаграммы методов управления

Выводы. Среди вычислительно-ориентированных возможностей созданного аппаратно-ориентированного метода реконфигурации можно указать:

- ◆ параллельный анализ состояния группировки на основе формирования и коррекции множества карт сети вещественных и битовых значений о работоспособности аппаратов и поддержании связности аппаратов в группировке;
- ◆ быстрая масштабируемость группировки;
- ◆ обеспечение связности группировки за счет прогнозирования и оценки работоспособности аппаратов;
- ◆ использование базовых логических операций и операций пересылки для модификации карты сети под текущую конфигурацию.

Созданный аппаратно-ориентированный метод служит основой для управления группировкой. Управление группировкой подвижных аппаратов включает вычислительные процессы инициализации, пополнения, событийной или временной актуализации, генерации маршрутов и перерасчета метрик маршрутов, сервисного обслуживания.

Отличительной особенностью метода является возможность построения прогноза состояния аппаратов и обработки битовых данных для перестроения маршрутов между аппаратами и поддержания, в том числе, связности сети.

Нейронная сеть путем анализа собираемых исторических данных о пространственном положении МКА и состояния их бортовых подсистем формирует для прогноза бинарную карту признаков. Наложение карты сети и бинарной карты признаков формирует уточненную конфигурацию сети МКА с упреждающим учетом изменений прямой видимости аппаратов и их состояния.

Таким образом, созданный метод динамической реконфигурации позволяет управлять группировкой с переменным составом, он также может применяться для обработки строковых данных при поиске целевых шаблонов, заданных через вектор параметров при множественных вариантах определения шаблона [22]. Метод использует дополнительную информацию о потенциальной связности вершин в сети, что позволяет упреждающе исключать аппараты до их фактического выхода из строя и обеспечивает перестройку маршрутов и связность сети, в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Клюшников В.Ю.* Построение кластеров малых космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 423-428.
2. *Скрипачев В.О., Жуков А.О., Башкатов А.И.* Особенности построения кластера малых космических аппаратов // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: Сб. материалов III Всероссийской научно-практической конференции. – М.: АО "Особое конструкторское бюро Московского энергетического института", 2023. – С. 351-364.
3. *Атакицев О.И., Шиленьков Е.А., Фролов С.Н. [и др.]*. Автономная интеллектуальная группировка малых космических аппаратов – космический эксперимент "радиоскаф-5" // Известия Института инженерной физики. – 2020. – № 1 (55). – С. 42-48.
4. *Полуян М.М., Наумочкин Д.В., Петухов И.А.* Анализ тенденций развития сверхмалых космических аппаратов // Вооружение и экономика. – 2019. – № 4. – Вып. 50. – С. 23-32.
5. *Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю.* Системный анализ космических аппаратов. – М.: Изд-во МО РФ, 2007. – 331 с.
6. *Палкин М.В.* Концептуальные вопросы создания и применения космических аппаратов группового полета // Наука и образование. – 2015. – № 8. – С. 100-115.
7. *Потюпкин А.Ю., Данилин Н.С., Селиванов А.С.* Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 45-56.
8. *Жданов А.А.* Автономный искусственный интеллект. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 359 с.
9. *Клюшников В.Ю.* Интеллектуальная система автоматического поддержания и восполнения кластера малых космических аппаратов информационного назначения // К.Э. Циолковский. История и современность: Матер. 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 20–22 сентября 2022 года. Том Ч. 1. – Калуга: Индивидуальный предприниматель Стрельцов И.А., 2022. – С. 39-41.
10. *Гриценко А.Е., Слинин С.И., Рубинов В.И.* Проблемные вопросы реализации искусственного интеллекта в комплексах с беспилотными летательными аппаратами // Военно-космические силы. Теория и практика. – 2019. – № 12. – С. 126-134.
11. *Лямкин И.В., Костяшина А.А.* Современные подходы к моделированию интеллектуальных систем управления. Ч. 2. Автономный "Hard" и "Soft" – эволюция компетенций // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 198-216.
12. *Мелехин В.Б., Хачумов М.В.* Пополнение знаний автономного беспилотного квадрокоптера-манипулятора в неопределенной проблемной среде // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2019. – № 2. – С. 72-83.
13. *Матюха С.В.* Искусственный интеллект в беспилотных авиационных системах // Транспортное дело России. – 2022. – № 1. – С. 8-11.
14. *Перлюк В.В., Небылов А.В., Сяо Ян Х.* Опыт разработки бортовых систем макетов микроспутников в рамках международных научно-образовательных программ // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – № 8. – С. 685-691.
15. *Зори А.А., Корнев В.Д.* Критерии оценивания эффективности информационно-измерительных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – С. 40-46.
16. *Пантелеймонов И.Н., Потюпкин А.Ю., Траньков В.М., Пантелеймонова А.В., Филатов В.В., Тодуркин В.В.* Методика расчета показателей эффективности системы управления полетом космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – Вып. 11 (716). – С. 55-65.
17. *Желтов С.Ю., Каляев И.А., Косьянчук В.В. [и др.]*. Реконфигурация систем управления воздушных судов. – М.: Российская академия наук, 2021. – 204 с.
18. *Клименко А.Б., Мельник Э.В.* Методы организации распределенной разметки данных на основе групп пользователей с динамическим составом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 234-245. – EDN SXJVIN.
19. *Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В. и др.* Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования земли // Вестник Самарского ГТУ. – 2012. – № 7 (28). – С. 47-54.

20. Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Тимофеев Ю.А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы: научно-техн. журн. – 2021. – Т. 8. – Вып. 3. – С. 11-19.
21. Волков С.А., Потюпкин А.Ю., Тимофеев Ю.А. Управление системным эффектом многоспутниковой орбитальной группировки // Проблемы создания и применения космических аппаратов и систем средств выведения в интересах решения задач ВС РФ: материалы III Всероссийской научно-практ. конф. – СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2022. – С. 251-257.
22. Тименко Е.А., Добросердов О.Г., Щитов А.Н., Тименко М.А. Аппаратно-ориентированный метод параллельного поиска префикса и суффикса по подстрокам фиксированной длины // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 29-36.

REFERENCES

1. Klyushnikov V.Yu. Postroenie klasterov malykh kosmicheskikh apparatov [Construction of clusters of small spacecraft], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [News of universities. Instrumentation], 2016, Vol. 59, No. 6, pp. 423-428.
2. Skripachev V.O., Zhukov A.O., Bashkatov A.I. Osobennosti postroeniya klastera malykh kosmicheskikh apparatov [Features of constructing a cluster of small spacecraft], *Tekhnologii polucheniya i obrabotki informatsii o dinamicheskikh ob"ektakh i sistemakh: Sb. materialov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies for obtaining and processing information about dynamic objects and systems: Collection of materials of the III All-Russian scientific -practical conference]. Moscow: AO "Osoboe konstruktorskoe byuro Moskovskogo energeticheskogo instituta", 2023, pp. 351-364.
3. Atakishchev O.I., Shilenkov E.A., Frolov S.N. [i dr.]. Avtonomnaya intellektual'naya gruppировка malykh kosmicheskikh apparatov – kosmicheskiiy eksperiment "radioskaf-5" [Autonomous intelligent grouping of small spacecraft - space experiment "Radioscaf-5"], *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2020, No. 1 (55), pp. 42-48.
4. Poluyan M.M., Naumochkin D.V., Petukhov I.A. Analiz tendentsiy razvitiya sverkhmalykh kosmicheskikh apparatov [Analysis of development trends of ultra-small spacecraft], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2019, No. 4, Issue 50, pp. 23-32.
5. Makarenko D.M., Potyupkin A.Yu. Sistemnyy analiz kosmicheskikh apparatov [System analysis of spacecraft]. Moscow: Izd-vo MO RF, 2007, 331 p.
6. Palkin M.V. Kontseptual'nye voprosy sozdaniya i primeneniya kosmicheskikh apparatov gruppovogo poleta [Conceptual issues of the creation and application of group flight spacecraft], *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2015, No. 8, pp. 100-115.
7. Potyupkin A.Yu., Danilin N.S., Selivanov A.S. Klasteriy malorazmernykh kosmicheskikh apparatov kak novyy tip kosmicheskikh ob"ektov [Clusters of small-sized spacecraft as a new type of space objects], *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket and space instrument engineering and information systems], 2017, Vol. 4, No. 4, pp. 45-56.
8. Zhdanov A.A. Avtonomnyy iskusstvennyy intellect [Autonomous artificial intelligence]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2008, 359 p.
9. Klyushnikov V.Yu. Intellektual'naya sistema avtomaticheskogo podderzhaniya i vospolneniya klastera malykh kosmicheskikh apparatov informatsionnogo naznacheniya [Intelligent system for automatic maintenance and replenishment of a cluster of small spacecraft for information purposes], *K.E. Tsiolkovskiy. Istoriya i sovremennost': Mater. 57-kh Nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo, Kaluga, 20–22 sentyabrya 2022 goda* [K.E. Tsiolkovsky. History and modernity: Materials of the 57th Scientific Readings dedicated to the development of the scientific heritage and the development of ideas of K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 20–22, 2022]. Vol. Part 1. Kaluga: Individual'nyy predprinimatel' Strel'tsov I.A., 2022, pp. 39-41.
10. Gritsenko A.E., Slinin S.I., Rubinov V.I. Problemnye voprosy realizatsii iskusstvennyy intellekta v kompleksakh s bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Problematic issues of implementing artificial intelligence in complexes with unmanned aerial vehicles], *Voенно-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Military Space Forces. Theory and practice], 2019, No. 12, pp. 126-134.

11. *Lyamkin I.V., Kostyashina A.A.* Sovremennye podkhody k modelirovaniyu intellektual'nykh sistem upravleniya. Ch. 2. Avtonomnyy "Hard" i "Soft" – evolyutsiya kompetentsiy [Modern approaches to modeling intelligent control systems. Part 2. Autonomous “Hard” and “Soft” - the evolution of competencies], *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov* [Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products], 2022, Vol. 12, No. 2, pp. 198-216.
12. *Melekhin V.B., Khachumov M.V.* Popolnenie znaniy avtonomnogo bespilotnogo kvadrokoptera-manipulyatora v neopredelennoy problemnoy srede [Replenishing the knowledge of an autonomous unmanned quadcopter-manipulator in an uncertain problem environment], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making], 2019, No. 2, pp. 72-83.
13. *Matyukha S.V.* Iskusstvennyy intellekt v bespilotnykh aviatsionnykh sistemakh [Artificial intelligence in unmanned aerial systems], *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], 2022, No. 1, pp. 8-11.
14. *Perlyuk V.V., Nebylov A.V., Syao Yan Kh.* Opyt razrabotki bortovykh sistem maketov mikrosputnikov v ramkakh mezhdunarodnykh nauchno-obrazovatel'nykh programm [Experience in developing on-board systems for microsatellite models within the framework of international scientific and educational programs], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Izvestiya higher textbook establishments. Instrumentation], 2018, No. 8, pp. 685-691.
15. *Zori A.A., Korenev V.D.* Kriterii otsenivaniya effektivnosti informatsionno-izmeritel'nykh sistem [Criteria for assessing the effectiveness of information-measuring systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, pp. 40-46.
16. *Panteleymonov I.N., Potyupkin A.Yu., Tran'kov V.M., Panteleymonova A.V., Filatov V.V., Todurkin V.V.* Metodika rascheta pokazateley effektivnosti sistemy upravleniya poletom kosmicheskikh apparatov [Methodology for calculating the efficiency indicators of the spacecraft flight control system], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2019, Issue 11 (716), pp. 55-65.
17. *Zhelto S.Yu., Kalyaev I.A., Kos'yanchuk V.V. [i dr.]*. Rekonfiguratsiya sistem upravleniya vozdushnykh sudov [Reconfiguration of aircraft control systems]. Moscow: Rossiyskaya akademiya nauk, 2021, 204 p.
18. *Klimenko A.B., Mel'nik E.V.* Metody organizatsii raspredelennoy razmetki dannykh na osnove grupp pol'zovateley s dinamicheskim sostavom [Methods for organizing distributed data marking based on user groups with dynamic composition], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science], 2021, No. 2, pp. 234-245. EDN SXJVIN.
19. *Sollogub A.V., Skobelev P.O., Simonova E.V. i dr.* Intellektual'naya sistema raspredelennogo upravleniya gruppovymi operatsiyami klastera malorazmernykh kosmicheskikh apparatov v zadachakh distantsionnogo zondirovaniya zemli [Intelligent system for distributed control of group operations of a cluster of small-sized spacecraft in tasks of remote sensing of the earth], *Vestnik Samarskogo GTU* [Bulletin of Samara State Technical University], 2012, No. 7 (28), pp. 47-54.
20. *Potyupkin A.Yu., Volkov S.A., Timofeev Yu.A.* Gruppovoe upravlenie mnogosputnikovoy orbital'noy gruppировкой na osnove kontseptsii rezhimov sovmestnogo funktsionirovaniya [Group control of a multi-satellite orbital constellation based on the concept of joint operation modes], *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy: nauchno-tekhn. zhurn* [Rocket and space instrument making and information systems: scientific and technical journal], 2021, Vol. 8, Issue 3, pp. 11-19.
21. *Volkov S.A., Potyupkin A.Yu., Timofeev Yu.A.* Upravlenie sistemnym efektom mnogosputnikovoy orbital'noy gruppировкой [Control of the system effect of a multi-satellite orbital constellation], *Problemy sozdaniya i primeneniya kosmicheskikh apparatov i sistem sredstv vyvedeniya v interesakh resheniya zadach VS RF: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakt. konf.* [Problems of creation and application of spacecraft and launch vehicle systems in the interests of solving problems of the RF Armed Forces: materials of the III All-Russian scientific-practical conference. conf.]. Saint Petersburg: Voenno-kosmicheskaya akademiya imeni A.F. Mozhayskogo, 2022, pp. 251-257.

22. *Titenko E.A., Dobroserdov O.G., Shchitov A.N., Titenko M.A.* Apparato-orientirovannyi metod parallel'nogo poiska prefiksa i suffiksa po podstrokam fiksirovannoy dliny [Hardware-oriented method of parallel search for prefix and suffix using substrings of fixed length], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and Transport], 2022, Vol. 16, No. 4, pp. 29-36.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Титенко Евгений Анатольевич – Юго-Западный государственный университет; e-mail: johntit@mail.ru; г. Курск, Россия; тел.: +79051588904; кафедра программной инженерии; к.т.н.; доцент.

Чернецкая Ирина Евгеньевна – e-mail: white@mail.ru; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой; д.т.н. доцент.

Лисицын Леонид Александрович – e-mail: leo_263@mail.ru; кафедра программной инженерии; к.т.н.; доцент.

Титенко Михаил Андреевич – e-mail: mikhail-titenko@mail.ru; аспирант.

Егоров Сергей Иванович – e-mail: sie58@mail.ru; д.т.н.; доцент; профессор кафедры вычислительной техники.

Titenko Evgeny Anatolievich – South-West State University; e-mail: johntit@mail.ru; Kursk, Russia; phone: +79051588904; the department of computing system. cand. of eng. sc.; associate professor.

Chernetskaya Irina Evgenievna – e-mail: white@mail.ru; the department of computer science; head of department; dr. of eng. sc.; associate professor.

Lisitsyn Leonid Alexandrovich – e-mail: leo_263@mail.ru; the department of computing system cand. of eng. sc., associate professor.

Titenko Mikhail Andreevich – e-mail: mikhail-titenko@mail.ru; postgraduate.

Egorov Sergey Ivanovich – e-mail: sie58@mail.ru; dr. of eng. sc.; associate professor; professor of the department of computer science.

УДК 004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-87-96

М.С. Анферова, А.А. Белевцев, А.М. Белевцев

МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАЗВИТИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФРОНТОВ

Скорость изменений в инновационном развитии экономики постоянно возрастает, особенно в высокотехнологичных областях. В этой связи задача проведения постоянного динамического мониторинга, выделение значимых технологий и стратегического анализа направлений развития науки и технологий приобретает исключительно важное значение. В настоящее время данная работа не автоматизирована и требует значительных финансовых и временных затрат. В работе проведен анализ основных проблем построения процедур мониторинга и выявления зарождающихся технологий, формирования и развития технологических трендов. Решение задач автоматизации процесса определения трендов связано с разработкой и использованием формализованных процедур и статистических методов исследования текстов научных публикаций, патентов и коллекций научно-технологических документов. Однако, в связи с высокой динамикой изменений, библиометрического и лингвистического анализа недостаточно для формирования трендов развития. Осуществление новой технологической разработки может занимать несколько лет. В этой связи необходимо, чтобы к моменту завершения разработки цель проекта оставалась по-прежнему актуальной, а достигнутые параметры имели конкурентные преимуще-