

4. Patent na izobretenie RF № 2791818, Sposob obnaruzheniya vibriruyushchih ob'ektov, osnovannyj na analize interferencionnoj kartiny, poluchaemoj s ispol'zovaniem lazernyh lokacionnyh stancij geterodinnogo tipa / Drynkin D. A., Smyntyna O. V., Petuhov A. G. (RU); opubl. 07.03.2023, Byul. No 3. – M.: FIPS, 2023.
5. Drynkin D. A. Predlozhenie po ispol'zovaniyu lazernoj lokacionnoj stancii gomodinnoogo tipa pri selekcii vibriruyushchih ob'ektov / Kozirackij A. Yu., Petuhov A. G. // Materialy Mezhdun. nauch.-tehn. konf. «Radiolokaciya, navigaciya, svyaz'». – Voronezh: AO «Koncern «Sozvezdie», 2023. – Pp. 209–216.
6. Algoritm raboty lazernoj lokacionnoj stancii gomodinnoogo tipa pri selekcii vibriruyushchih ob'ektov / Kozirackij A. Yu., Smyntyna O. V. // Materialy Mezhdun. nauch.-prakt. konf. «Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem svyazi i RTO v upravlenii aviatsiej. Nauchnye chteniya im. A. S. Popova. – Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2023. – Pp. 54–58.
7. Drynkin D. A. Formirovanie vibracionnogo portreta // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM RU № 2022680198, 28.10.2022. Zayavka ot 24.10.2022.
8. Drynkin D. A. Programma rascheta vibracionnyh harakteristik lociruemyh ob'ektov // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM RU № 2022685469, 23.12.2022. Zayavka ot 12.12.2022
9. Drynkin D. A. Programma ocenki amplitudy bienij signala na vyhode ehlementa matrichnogo fotopriemnogo ustrojstva // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM RU № 2024616090, 15.03.2024. Zayavka ot 01.03.2024.
10. Drynkin D. A. Programma ocenki chastoty bienij signala na vyhode ehlementa matrichnogo fotopriemnogo ustrojstva // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM RU № 2024615704, 12.03.2024. Zayavka ot 01.03.2024.
11. Drynkin D. A. Programma sinteza vibracionnogo izobrazheniya na osnove ocenok amplitud i chastot bienij signalov s ehlementov matrichnogo fotopriemnogo ustrojstva // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM RU № 2024615946, 14.03.2024. Zayavka ot 01.03.2024.



ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Яговитов Д. С.¹, Вдовченко Н. Ю.²

DOI:10.21681/3034-4050-2026-3-57-63

Ключевые слова: искусственный интеллект, децентрализованное управление, оптимизация, искусственные спутники Земли, центр обработки данных.

Аннотация

Цель исследования: состоит в определении возможностей применения технологий роевого интеллекта в процессах функционирования систем связи военного назначения и формулировании выводов о перспективах проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Метод исследования: теоретический (синтез, индукция).

Результат: концепция роевого интеллекта реализуема в комплексах связи и автоматизации управления связью систем связи военного назначения, а также теоретически обоснована для проработки вопросов перспективного развития существующих автоматизированных систем управления, из чего можно заключить, что направление исследований применения роевого интеллекта в интересах обеспечения надежного (устойчивого, помехоустойчивого), доступного, управляемого и безопасного функционирования систем связи военного назначения является актуальным.

Практическая ценность: полученные знания о технологиях роевого интеллекта могут быть использованы при постановке тактико-технических заданий на перспективные образцы вооружения, военной и специальной техники по линии ответственности Главного управления связи Вооруженных сил Российской Федерации.

Введение

Роевой интеллект – это раздел искусственного интеллекта, изучающий коллективное поведение децентрализованных самоорганизующихся систем³. Название происходит из аналогии наблюдения за поведением насекомых (муравьями, пчелами, термитами, рыбами), которые, будучи простыми особями, совместно решают сложные задачи (поиск кратчайшего пути к еде, выбор места основания нового гнезда) без участия в принятии решений единого центра управления [1].

Под технологиями роевого интеллекта (ТРИ), соответственно, можно понимать комплекс технологических решений, направленных на создание информационных систем, в функционирование которых заложены принципы роевого интеллекта.

К основным принципам функционирования ТРИ относятся:

- 1) **децентрализация** – отсутствие единого центра принятия решений, таким образом, любой агент (узел) может выйти из строя без угрозы отказа в функционировании всей колонии (роя);
- 2) **автономность** – каждый агент роя функционирует самостоятельно, но в составе группы (роя);
- 3) **стигмергия** – взаимодействие агентов происходит через изменение состояния окружающей среды и получения от неё реакционного действия (например, муравьи оставляют феромонные следы);
- 4) **простота правил** – стратегия сложного глобального поведения колонии (роя) является следствием реализации простых действий, заложенных в функционирование каждого агента.

Концептуальная схема одной из возможных реализаций ТРИ, построенной на принципах

¹ Яговитов Данила Сергеевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России. Мытищи, Россия. E-mail: daniila.yagovitov@mail.ru

² Вдовченко Наталья Юрьевна, младший научный сотрудник ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России. Мытищи, Россия. E-mail: natashok120391@mail.ru

³ Впервые в нашей стране коллективным поведением занимался Варшавский В. И. (Варшавский В. И. Коллективное поведение автоматов. М.: Наука, 1973. 408 с. ISBN 978-5-0000-0000-0). Были и его более ранние публикации на эту тему, однако в моей памяти они не сохранились, хотя я и был с ним дружен вплоть до его отъезда из страны.

Виктор Ильич Варшавский опередил свое время, и должного внимания эти исследования не получили. В годы перестройки научные исследования в России практически не финансировались, и он вместе со своими сотрудниками и семьей переехал в 1993 г. в Японию по приглашению японской стороны и работал до 2000 г. в Университете Айдзу, Айдзу-Вакамацу – профессор, заведующий лабораторией проектирования компьютерной логики, а с 2002–2003 гг. в компании «Технологии нейронных сетей», Бней-Брак, Израиль (заведующий отделом логического управления). Умер в Израиле 3 января 2005 г. (прим. редактора).

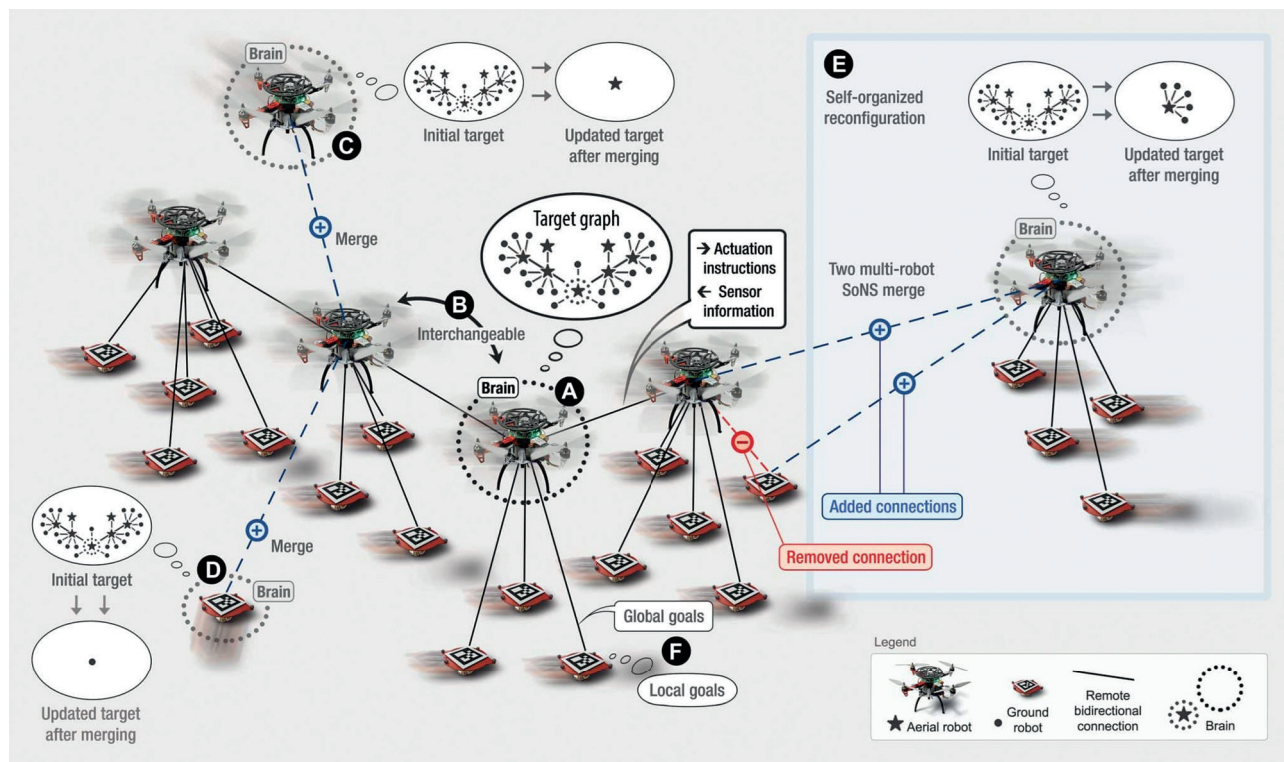


Рис. 1. Схема самоорганизующейся нервной системы

архитектуры нервной системы человека – самоорганизующаяся нервная система – приведена на рисунке 1⁴.

Постановка задачи

Задача исследования состоит в том, чтобы на основе анализа основных направлений применения ТРИ в системах связи (СС) гражданского и (если это осуществимо) военного назначений (ВН) определить степень возможности их практической реализации в последних и на основе полученных знаний сформулировать выводы о перспективности проведения дальнейших исследований в направлении реализации ТРИ в комплексах связи и автоматизации (КСА) ВН.

Направления применения ТРИ в системах связи гражданского и военного назначений

В КСА гражданского и военного назначений ТРИ применимы для решения задач управления, где централизованные алгоритмы обладают низкой скоростью сходимости, потребляют большое количество вычислительных ресурсов или уязвимы для компьютерных атак противника.

К основным направлениям применения ТРИ для решения указанных задач можно отнести следующие варианты использования.

⁴ Ученые построили роевой интеллект на принципах архитектуры нервной системы человека. – URL: <https://naked-science.ru/article/hi-tech/roevoy-intellekt> (дата обращения: 24.03.2026)

1. Динамическая маршрутизация в распределенных пакетных сетях (NGN⁵, MANET⁶, IoT⁷)

В основе функционирования алгоритмов традиционных протоколов маршрутизации в пакетных сетях заложены механизмы рассылки информации о доступных маршрутах (векторов расстояний в протоколе BGP⁸) или проверки состояния линии связи между соседними сетевыми устройствами (технология link-state в протоколе OSPF⁹), что в условиях динамично меняющейся обстановки по связи в территориально и/или иерархически распределенных сетях создает дополнительные накладные расходы пропускной способности каналов связи. Для нивелирования указанных недостатков классических подходов к управлению трафиком может использоваться оптимизация на основе муравьиной колонии

⁵ NGN (англ. Next Generation Networks), сети следующего/нового поколения – мультисервисные сети связи, ядром которых являются опорные IP-сети, поддерживающие полную или частичную интеграцию услуг передачи речи, данных и мультимедиа. Реализуют принцип конвергенции услуг электросвязи.

⁶ MANET (англ. Mobile Ad hoc Network) – беспроводные децентрализованные самоорганизующиеся сети, состоящие из мобильных устройств, способных устанавливать соединения между произвольными узлами. Каждое такое устройство может независимо передвигаться в любых направлениях, и, как следствие, часто разрывать и устанавливать соединения с соседями.

⁷ IoT (англ. Internet of Things) – концепция сети передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой.

⁸ BGP (англ. Border Gateway Protocol) – протокол динамической маршрутизации граничного (внешнего) шлюза (англ. Exterior Gateway Protocol, EGP) между несколькими автономными системами.

⁹ OSPF (англ. Open Shortest Path First) – протокол динамической маршрутизации внутреннего шлюза (англ. Interior Gateway Protocol, IGP), использующий для нахождения кратчайшего пути алгоритм Дейкстры внутри одной автономной системы.

(англ. Ant Colony Optimization, ACO): искусственные агенты-муравьи (зонды-пакеты) блуждают по сети; достигая адресата, они возвращаются к источнику, откладывая виртуальный «феромон» вдоль пройденного пути [2].

Так, на рисунке 2 (1) показано, как первый муравей находит источник пищи (F) любым способом (а), а затем возвращается к гнезду (N), оставив за собой тропу из «феромонов» (b). Затем муравьи выбирают один из четырёх возможных путей, затем укрепляют его следом из «феромонов» и делают «привлекательным» для других особей (рис. 2 (2)). Наконец, муравьи выбирают кратчайший маршрут, так как «феромоны», оставленные вдоль более длинных путей, быстрее исчезают (рис. 2 (3)).

Таким образом, чем лучше сетевые показатели качества отобранного агентами-муравьями маршрута от источника к получателю, тем больше «феромона» вдоль него накапливается. И напротив, если показатели качества маршрута ухудшаются с течением времени (растут задержки прохождения пакетов, деградирует пропускная способность или повышается степень её утилизации), «феромон» испаряется (удаляется), и агенты-муравьи начинают поиск новых, оптимальных с точки зрения обеспечения сетевых показателей качества маршрута. В итоге сеть становится т.н. «самоисцеляющейся» (англ. self-healing) и адаптивной к перегрузкам в автоматическом режиме.

Указанный подход реализован в программно-техническом комплексе (ПТК) управления и обеспечения информационной безопасности транспортной сети ВН, опытный образец которого получен в ходе одной из опытно-конструкторских работ (ОКР) по линии ответственности

Главного управления связи Вооруженных сил Российской Федерации, для решения задачи оптимальной прокладки оптических кабельных линий связи.

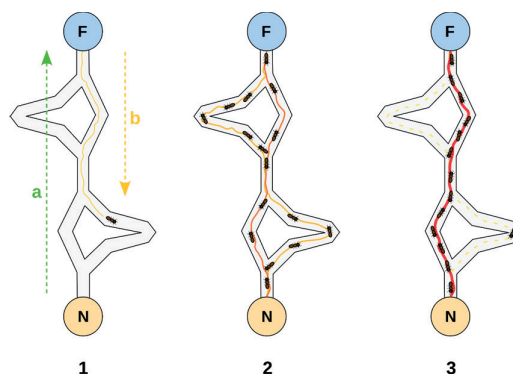


Рис. 2. Иллюстрация шагов оптимизации на основе муравьиной колонии

Эффект от реализации указанной ТРИ для СС ВН: повышение надежности (устойчивости) и пропускной способности.

2. Оптимизация ресурсов в радиосетях 5 и 6 поколений

Концепция открытой архитектуры сети радиодоступа (англ. Open Radio Access Network, O-RAN)¹⁰, предложенная консорциумом O-RAN Alliance¹¹, предполагает создание унифицированной сети радиодоступа 5G/6G со стандартизированными интерфейсами и протоколами взаимодействия между компонентами (рис. 3).

¹⁰ Open RAN (O-RAN) Reference Architecture. — <https://www.techplayon.com/open-ran-o-ran-reference-architecture/> (дата обращения 23.03.2026)

¹¹ Международная организация, основанная в 2018 г. с целью переосмысления архитектуры сетей радиодоступа и объединяющая операторов мобильной связи, производителей оборудования, технологические компании и научно-исследовательские институты.

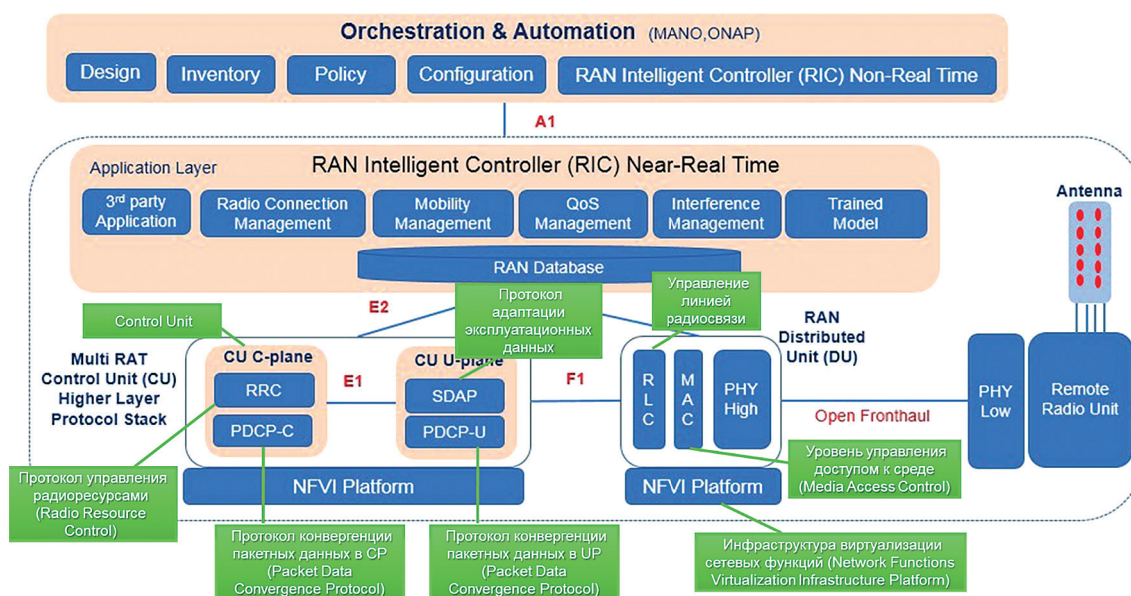


Рис. 3. Архитектура O-RAN

Такие преимущества от реализации концепции O-RAN, как наличие гибкости и масштабируемости развертывания и управления, свободы выбора оператором поставщиков компонентов ввиду стандартизации и унификации интерфейсов и протоколов наделяет оператора возможностью самостоятельного добавления новой специализированной функциональности в части управления сетями радиодоступа, в том числе на основе ТРИ.

Так, каждую базовую станцию (или её логический сегмент) возможно представить как агента. С использованием метода **оптимизации роя частиц** (англ. Particle Swarm Optimization, PSO) [3], моделирующего многоагентную систему, где агенты-частицы перемещаются в направлении оптимальных решений в пространстве поиска, обмениваясь при этом информацией с соседями (рис. 4), станции могут осуществлять согласованную настройку углов наклона антенно-мачтовых устройств, мощность излучения, частотно-территориальное планирование в целях минимизации помех друг для друга и максимизации области радиопокрытия.

Примечательно, что для функционирования PSO не требуется вычисления точного градиента оптимизируемой функции, которая, в свою очередь, может быть выражена нелинейно-многочленным уравнением.

Эффект от реализации указанной ТРИ для СС ВН: повышение надежности (устойчивости), пропускной способности и доступности.

3. Управление лазерной межспутниковой связью в мегасозвездиях искусственных спутников Земли

Такие проекты западных компаний, как Starlink и OneWeb, представляют собой классический

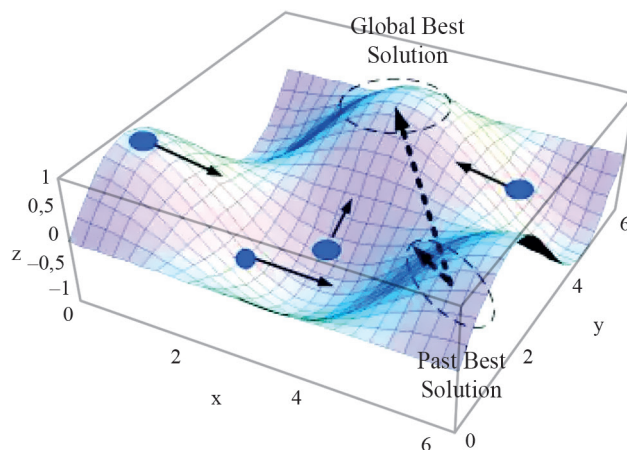


Рис. 4. Фрагмент процесса поиска глобального максимума (global best solution) с использованием оптимизации роя частиц

«рой» из тысяч аппаратов – искусственных спутников Земли (ИСЗ) – на низкой околоземной орбите (НОО) (рис. 5)¹².

Используя принципы ТРИ, ИСЗ способны в автоматическом режиме сформировать динамическую mesh-сеть¹³ на НОО, выбирая оптимальные направления установления лазерной межспутниковой связи, например, обходя при родные атмосферные помехи, зоны функционирования станций радиоэлектронного подавления противника или исключая из информационного обмена ИСЗ, уходящие в тень Земли. Результатом такой автоматизации является обеспечение глобального покрытия ареала

¹² Моделирование возможностей связи комплекса Starlink. – URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/704580/?code=8e75be7e21976ca697a3f3bc63a66c0e&state=te1W5HD3UjJ5KHXMGLi7uZd&hl=en> (дата обращения: 24.03.2026)

¹³ Сетевая топология компьютерной сети, построенная на принципе ячеек, в которой рабочие станции сети соединяются друг с другом и способны принимать на себя роль коммутатора для остальных участников.

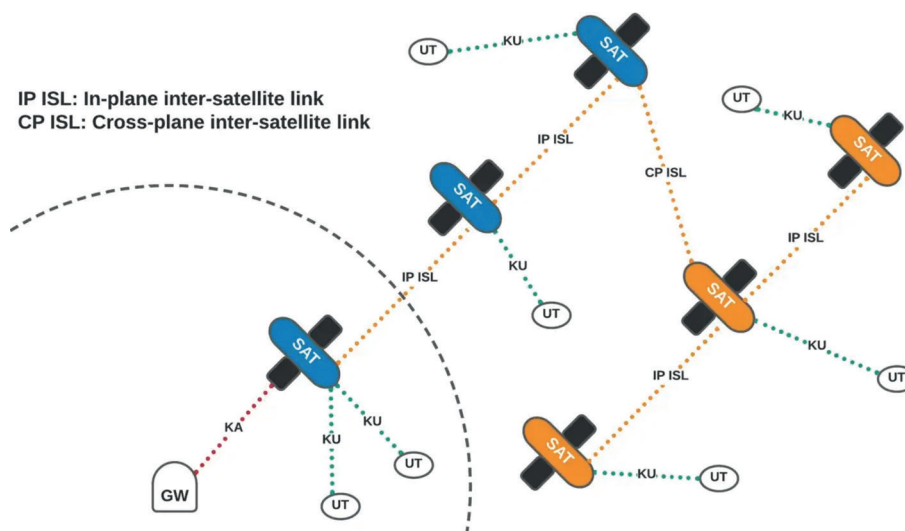


Рис. 5. Схема организации внутриорбитальной (IP ISL) и межорбитальной (CP ISL) лазерной межспутниковой связи группировки ИСЗ Starlink

потребителей инфокоммуникационных услуг с требуемым (заданным) качеством.

Эффект от реализации указанных ТРИ для СС ВН: повышение пропускной способности, надежности (устойчивости) и доступности.

4. Обеспечение безопасности передачи данных в сетях связи

Небольшие программные зонды-агенты (сетевые «пауки») с заданной периодичностью могут осуществлять сканирование сети передачи данных на предмет обнаружения аномальной обстановки по связи. Если один агент обнаруживает аномалию, например, DDoS-атаку¹⁴ или распространение вредоносного программного обеспечения, он меняет свое поведение («метит» среду). Другие агенты, проходя мимо (сканируя те же области сети), «видят» эту метку и начинают локально активировать защитные меры, изолируя зараженный сегмент сети и не дожидаясь команды от администратора.

Эффект от реализации указанных ТРИ для СС ВН: повышение надежности (помехоустойчивости).

5. Управление нагрузкой в центрах обработки данных

В крупных центрах обработки данных (ЦОД), в том числе военного назначения, оператору требуется динамически перемещать виртуальные машины, контейнеры и потоки данных между серверами, решая в каждый момент времени оптимизационную задачу о распределении вычислительных мощностей между границей сети и ядром (облаком). ТРИ позволяют виртуальным агентам находить наименее загруженные сетевые устройства, перемещая вычислительную

нагрузку ближе к потребителю инфокоммуникационных услуг (принцип edge computing) в реальном времени, снижая тем самым энергопотребление ЦОД в целом.

Эффект от реализации указанных ТРИ для СС ВН: повышение надежности (устойчивости) и доступности.

6. Управление нагрузкой в транспортных сетях связи

В ядре транспортных сетей связи применим подход к мультиагентному управлению обслуживаемой сетью нагрузки, когда совокупность управляющих сущностей – интеллектуальных агентов – размещенных в подсистеме автоматизированного управления связью, сканируя сеть в «узких» местах и используя механизмы обучения с подкреплением¹⁵ (рис. 6 [4]), в автоматическом режиме и масштабе времени, близком к реальному, вырабатывают единую оптимальную стратегию по определению маршрутов прохождения трафика и выделения для этого пропускной способности каналов связи. Критерием же указанной оптимизации является обеспечение требуемого (заданного) качества инфокоммуникационных(-ой) услуг(-и).

Концепция ТРИ в части мультиагентного подхода в совокупности с механизмами обучения с подкреплением может быть предложена в тактико-техническом задании на доработку (модернизацию) программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы управления (АСУ) СС ВН.

Эффект от реализации указанных ТРИ для СС ВН: повышение пропускной способности, надежности (устойчивости) и управляемости.

14 DDoS (англ. distributed denial-of-service attack), распределенная атака типа «отказ в обслуживании» – атака на вычислительную систему в целях её отказа, т. е. создания таких условий, при которых авторизованные пользователи системы не смогут получить доступ к предоставляемым системным ресурсам (услугам), либо этот доступ будет затруднен.

15 Англ. Reinforcement Learning, RL – это метод машинного обучения, в котором агент (обучаемая система) учится принимать оптимальные решения через взаимодействие со средой. В отличие от классического обучения с учителем, где модель обучается на готовых примерах, RL осуществляется по принципу совершения агентом проб и ошибок.



Рис. 6. Схема взаимодействия агента и окружения в парадигме обучения с подкреплением

Заключение

Концептуально реализация ТРИ представляет собой переход от централизованного управления связью с единым центром принятия решений на управление к децентрализованному, когда в сети функционирует множество интеллектуальных «агентов», каждый в своей зоне ответственности принимает локальное решение и транслирует его другим участникам процесса управления. Таким образом, формируется распределенная когнитивная сеть, что является особенно актуальным в условиях развития сетей 6 поколения, где предполагается, что сеть будет представлять собой не простую совокупность сетевых устройств, объединенных каналами связи различной природы, а «сенсорным организмом»,

состоящим из миллионов автономных устройств (виртуальных или реальных датчиков), которые обладают способностью автоматической самоорганизации из-за наличия физической невозможности обработать большой объем управляющих сигналов централизованно.

Концепция ТРИ реализуема в КСА СС ВН: некоторые метаэвристики уже применяются в опытных образцах ПТК, а также теоретически обоснована [4] для проработки вопросов перспективного развития существующих АСУ, из чего можно заключить, что направление исследований применения ТРИ в интересах обеспечения надежного (устойчивого, помехоустойчивого), доступного, управляемого и безопасного функционирования СС ВН является актуальным.

Литература

1. Старков И. А. Методы роевого интеллекта / И. А. Старков // Наука молодых: сборник статей Межрегиональной молодежной научной конференции, посвященной памяти Ф. А. Бабушкина, Сыктывкар, 29–30 мая 2025 г. – Сыктывкар: Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, 2025. – С. 9–12. – EDN EPIXIH.
2. A. Coloni, M. Dorigo et V. Maniezzo Distributed Optimization by Ant Colonies, actes de la première conférence européenne sur la vie artificielle, Paris, France, Elsevier Publishing, 1991. – Pp. 134–142.
3. Kennedy J., Eberhart R. (1995). Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995. – Vol. IV. – Pp. 1942–1948.
4. Применение модели марковского процесса принятия решений с целью обеспечения своевременности обслуживания мультисервисного трафика в домене программно-конфигурируемой инфокоммуникационной сети специального назначения / Д. С. Яговитов, М. И. Рафальская, Д. А. Несвит, И. В. Образцов // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей связи специального назначения: Сборник материалов научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23 марта 2023 г. – СПб: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия связи им. маршала Советского Союза С. М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации, 2023. – С. 137–144. – EDN JESIAA.

OPPORTUNITIES AND PROSPECTS FOR THE USE OF SWARM INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN MILITARY COMMUNICATION SYSTEMS

Yagovitov D. S.¹⁶, Vdovchenko N. Yu.¹⁷

Keywords: artificial intelligence, decentralized control, optimization, artificial Earth satellites, data processing center.

Abstract

The purpose of the research is to determine the possibilities of using swarm intelligence technologies in the processes of functioning of military communication systems and to formulate conclusions about the prospects for further research in this direction.

Research method: theoretical (synthesis, induction).

Result: the concept of swarm intelligence is implemented in communication and automation of communication control systems for military purposes, and is also theoretically substantiated for the study of the issues of the future development of existing automated control systems, from which it can be concluded that the direction of research on the use of swarm intelligence in the interests of ensuring reliable (stable, noise-resistant), accessible, controllable and safe operation of military communication systems is relevant.

¹⁶ Danila S. Yagovitov, Ph.D. of Technical Sciences, Head of the Laboratory of the 16th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Mytishchi, Russia. E-mail: danila.yagovitov@mail.ru

¹⁷ Natalia Yu. Vdovchenko, Junior Researcher, 16th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Mytishchi, Russia. E-mail: natashok120391@mail.ru