

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ

УДК 621.396

МНОГОАГЕНТНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НАЗЕМНО-ВОЗДУШНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА¹

© 2023 г. В. В. Бородин^{a,*}, Д. А. Клецков^{b,**},
А. В. Тимошенко^{c,***}, В. А. Щевцов^{a,****}

^a МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

^b Ярославское высшее военное училище ПВО, Ярославль, Россия

^c АО «РТИ имени академика А.Л. Минца», Москва, Россия

*e-mail: doc_bor1@mail.ru

**e-mail: major7786@mail.ru

***e-mail: u567ku78@gmail.com

****e-mail: vs@mai.ru

Поступила в редакцию 25.04.2022 г.

После доработки 31.05.2022 г.

Принята к публикации 01.08.2022 г.

Представлена аналитическая модель информационного взаимодействия структурных элементов системы мониторинга, учитывающая динамику информационного обмена при ее децентрализованном функционировании на основе многоагентного подхода в рамках формирования коалиции абонентских терминалов. Актуальность разработки данной модели обусловлена сложностью и пространственной распределенностью современных информационных систем. Научная новизна рассмотренной модели заключается в изучении множества стратегий управления абонентскими терминалами (агентами) децентрализованной сети передачи, приведенных в логико-лингвистическом и теоретико-множественном виде, аналитических выражений показателей взаимной полезности и когнитивного диссонанса, возникающего при воздействии деструктивных факторов на структурные элементы многоуровневой сети передачи данных. Применение разработанной модели в отличие от существующих позволяет исследовать сети передачи данного вида по показателю устойчивости информационного взаимодействия между структурными элементами на различных временных интервалах в отсутствие единого центра управления.

DOI: 10.31857/S0002338822060051, EDN: BHTCFQ

Введение. Новые системы мониторинга, применяемые на различных промышленных магистралях (газо- и нефтепроводы), в оборонной промышленности при создании систем специального назначения, в настоящее время вызывают значительный научный интерес. Так, одной из важнейших проблем трубопроводного транспорта является сохранение нормального состояния линейных участков (ЛУ) промысловых и магистральных газопроводов (МГ). Подземные газопроводы, эксплуатируемые при нормальных режимах, могут сохраняться несколько десятков лет в рабочем состоянии. Этому способствует большое внимание, которое уделяется систематическому контролю технического состояния (ТС) подземных и надземных МГ и своевременная ликвидация возникающих дефектов [1]. Дефекты на МГ появляются в результате коррозии и реже — из-за механических воздействий. Определение места коррозии и повреждений всегда связано с большими трудностями и материальными затратами. Вскрытие газопровода для его непосредственного визуального обследования экономически невыгодно. Кроме того, обследование

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-19-00481). <https://rscf.ru/project/21-19-00481/>.

только внешней поверхности трубы, как правило, ничего не дает. Поэтому актуальна проблема мониторинга технического состояния подземных и надземных промысловых, магистральных продуктопроводов без их вскрытия. Эта проблема связана с большими техническими трудностями, однако бурно развивающиеся современные методы и средства измерительной техники позволяют ее решить. Данные технические средства в свою очередь отличаются заложенными в методы исследования физическими явлениями, принципом действия устройств, чувствительностью, областью применения, локальностью или глобальностью диагностирования, масштабом охвата географической территории прокладки газотранспортной сети и другими характеристиками. Именно огромная протяженность и разветвленность газопроводов в Российской Федерации (РФ), прохождение их по сложным территориям и различным климатическим зонам, а также отсутствие развитой системы коммуникаций существенно ограничивают применение многих из этих методов при диагностировании технического состояния магистралей [1]. Решение данной проблемы возможно при использовании в системе мониторинга распределенной беспроводной сенсорной сети передачи данных дополнительных устройств которые, в режиме реального времени позволили бы контролировать утечки газа (КУГ) из объектов газотранспортной сети (ГТС) и передавать данную информацию посредством беспроводных телекоммуникационных технологий. С целью приема и передачи информационных потоков с соответствующих средств мониторинга (СМ), т.е. сенсоров, установленных на МГ, особенно в труднодоступных территориальных районах, необходимо применять как наземные, так и воздушные СМ (например, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), квадрокоптеры и т.д.) [1–4].

В настоящее время использование сенсорных сетей, представляющих собой распределенные самоорганизующиеся сети, которые устойчивы к отказу отдельных устройств и передают информацию с помощью технологии беспроводной связи, является актуальной областью исследований. Каждый элемент данной сети имеет автономный источник энергии, приемно-передающее устройство, микрокомпьютер и составляет область покрытия от нескольких метров до десятков и сотен километров в зависимости от типа беспроводного модуля и антенны, а также за счет ретрансляции пакета данных от одного элемента к другому с учетом топологии сети. Для расширения радиуса действия сенсорной сети между конечными устройствами используются ретрансляторы, позволяющие увеличить дальность работы и качество принимаемого сигнала. Исследованию характеристик беспроводных сенсорных сетей, в первую очередь алгоритмов функционирования и информационного взаимодействия, посвящены работы зарубежных и отечественных ученых [1, 5]. Актуальным решением задачи устойчивого и своевременного обеспечения информационного взаимодействия множества разнородных СМ является разработка многоагентной динамической модели сети передачи данных системы мониторинга на основе самоорганизации и децентрализованного управления элементами сети в различные моменты времени (динамика) в условиях воздействия различных деструктивных факторов. Известный научно-методический аппарат моделирования информационного взаимодействия между структурными элементами такого рода систем в полной мере не позволяет аналитически описать процесс информационного взаимодействия и оценить эффективность функционирования сети в части устойчивости и своевременности информационного обмена в виду сложного глобального поведения системы в результате деятельности большого количества структурных элементов. Многоагентные модели дают возможность исследовать достаточно широкий круг задач и проблем, для которых строгие аналитические методы оказываются неэффективными. Вариант многоуровневой распределенной децентрализованной сети передачи данных системы мониторинга МГ с применением БПЛА и с пунктами управления (ПУ) представлен на рис. 1.

Функционирование беспроводной самоорганизующейся сенсорной сети с целью обеспечения устойчивости и своевременности информационного взаимодействия между ее структурными элементами основано на децентрализованном информационном обмене данными. Следовательно, на отдельных участках МГ применяется децентрализованное управление, достоинства которого заключаются в следующем [6–8]:

адаптация топологии и параметров сети передачи данных системы мониторинга к внешним деструктивным воздействиям;

устойчивость функционирования и информационного взаимодействия (обмена) между структурными элементами сети передачи данных системы мониторинга;

своевременность доставки информационной нагрузки от СМ системы мониторинга до центров обработки информации (ЦОИ);

масштабируемость сети передачи данных при установке новых СМ на всей протяженности МГ;

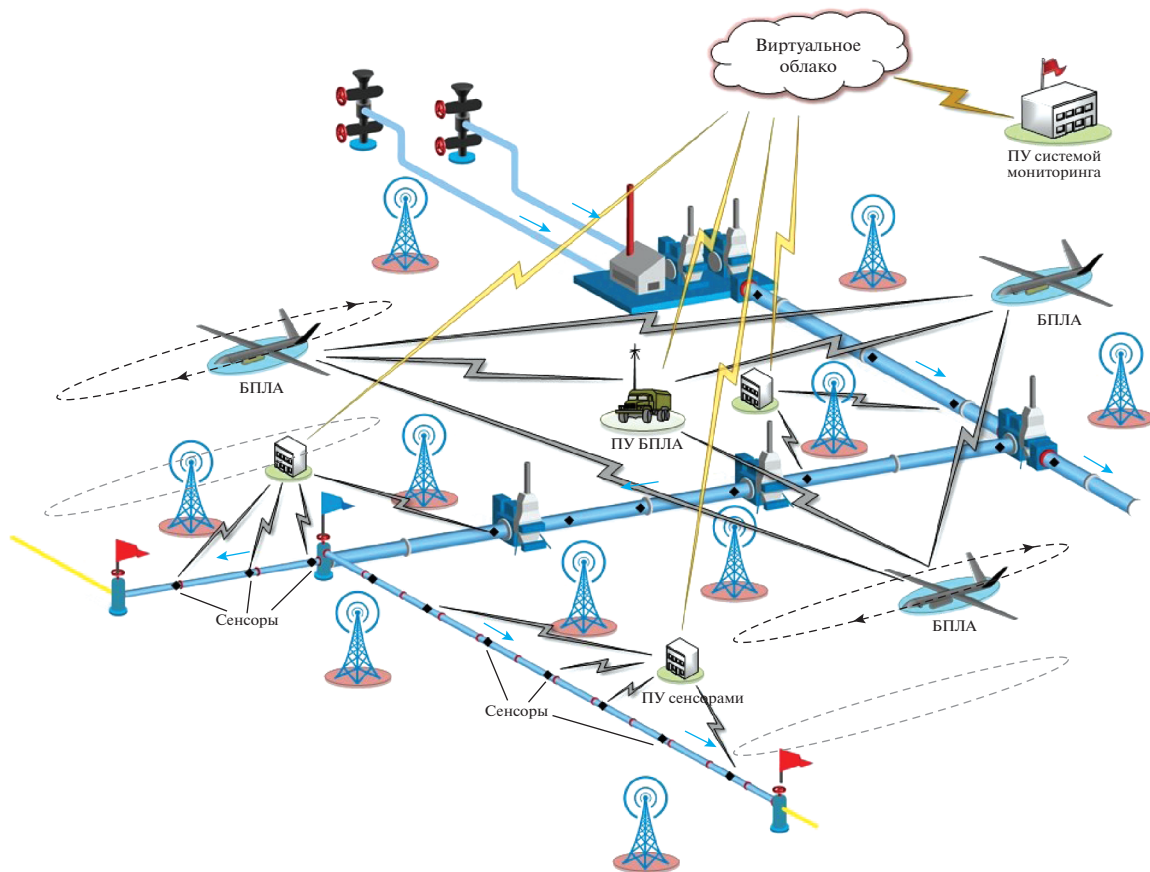


Рис. 1. Вариант многоуровневой распределенной децентрализованной сети передачи данных системы мониторинга МГ

перераспределение информационной нагрузки между структурными элементами сети передачи данных системы мониторинга.

Для реализации самоорганизующейся сети передачи данных беспроводной сенсорной системы мониторинга необходимо разработать модель информационного взаимодействия, учитывающую показатели устойчивости информационного обмена между сенсорами-агентами по критерию взаимной полезности и когнитивного диссонанса, применение которой позволит разработать стратегии управления и правила информационного взаимодействия СМ, выявить закономерности информационного обмена между ними.

Целью статьи является изучение модели информационного взаимодействия структурных элементов сети передачи данных системы мониторинга МГ, отличающейся от существующих моделей самоорганизующихся сетей передачи данных новыми стратегиями управления информационным взаимодействием между структурными элементами сети, применяемыми критериями устойчивости сети передачи данных на основе показателей взаимной полезности агентов и их когнитивного диссонанса при воздействии деструктивных факторов.

Использование данной аналитической модели дает возможность разработать имитационную модель информационного взаимодействия структурных элементов самоорганизующейся сети передачи данных в среде агентного моделирования “AnyLogic”. Исследование модели в “Anylogic” позволит выявить закономерности передачи данных между узлами сети, адаптировать алгоритмы маршрутизации под функционирование в децентрализованной среде, а также оценить показатели устойчивости и своевременность доставки сообщений в условиях воздействия деструктивных факторов.

1. Многоагентная динамическая модель сети передачи данных наземно-воздушной системы мониторинга. Применение БПЛА в составе многоуровневой распределенной децентрализованной сети передачи данных системы мониторинга МГ с расположенными на них техническими сред-

ствами контроля и радиосвязи позволяет внести ряд допущений и представить совокупность структурных элементов наземно-воздушной системы мониторинга как совокупность разнотипных СМ с интегрированными абонентскими терминалами (АТ), обеспечивающими информационное взаимодействие в части передачи служебных сообщений канала управления, телеметрии и информационных сообщений с данными о техническом состоянии элементов МГ. Информационное взаимодействие между СМ, установленными на элементах МГ, осуществляется на основе беспроводной сенсорной сети передачи данных [1, 2].

Для исследования вопросов информационного взаимодействия между структурными элементами рассматриваемой сети передачи данных в части устойчивости и своевременности информационного обмена необходимо разработать аналитическую модель многокритериального информационного взаимодействия с учетом использования децентрализованного управления с элементами самоорганизации.

Существующие модели функционирования и информационного взаимодействия структурных элементов беспроводных сетей передачи данных многоуровневых систем мониторинга и связи основаны на применении научно-методического аппарата теории вероятности, системной динамики, систем массового обслуживания, динамических графов [9–11]. Использование моделей сетей передачи данных на базе указанного научно-методического аппарата дает возможность оценить устойчивость и своевременность функционирования сети в целом на основе показателей связности, готовности и важности информационных направлений между узлами сети, коэффициентов кластеризации и посредничества, при этом в полной мере не описывают в различных масштабах и интервалах времени процессы поведения отдельного структурного элемента сети передачи данных, их коллективного информационного взаимодействия и управления.

Данные модели не учитывают условия кооперации структурных элементов сети передачи данных как агентов для достижения цели функционирования соответствующей системы, не позволяют оценить устойчивость и своевременность информационного обмена между узлами сети при децентрализованном управлении [12–14]. Основные недостатки существующих моделей представлены в табл. 1.

В научных исследованиях [15–17] представлена система оценки показателей устойчивости и своевременности сети связи. При этом в данной системе оценки не учитываются особенности взаимодействия и поведения элементов сети, их влияние друг на друга при информационном обмене в условиях децентрализованного управления. Моделирование информационного взаимодействия между структурными элементами беспроводной сенсорной сети передачи данных в условиях децентрализованного управления с целью оценки устойчивости и своевременности информационного обмена возможно с помощью применения научно-методического аппарата теории многоагентных систем в части формирования кооперации агентов, т.е. коалиции АТ по критериям взаимной полезности и когнитивного диссонанса.

Использование данного научно-методического аппарата позволяет формировать [18–21] открытые динамических коалиций АТ, состав которых может меняться в процессе решения задачи. АТ могут входить в состав коалиции или выходить из нее в процессе функционирования сети передачи данных системы мониторинга, обеспечивая концепцию самоорганизующейся сети передачи данных (ССПД). Когнитивную карту СПД $Net^{(ССПД)}$ [18, 22] представим множеством АТ и СМ следующего вида

$$N^{(AT)} = \{n_1^{(AT)}, n_2^{(AT)}, \dots, n_{k-1}^{(AT)}, n_k^{(AT)}\}, \quad (1.1)$$

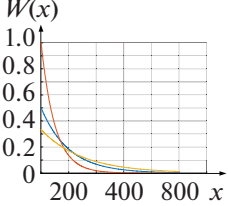
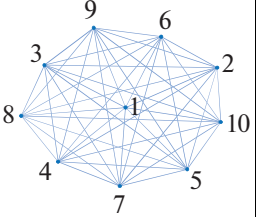
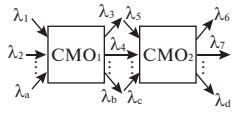
$$N^{(CM)} = \{n_1^{(CM)}, n_2^{(CM)}, \dots, n_{k-1}^{(CM)}, n_k^{(CM)}\}, \quad (1.2)$$

где $n_k^{(AT)}$ – АТ k -го структурного элемента наземно-воздушного сегмента многоуровневой системы мониторинга; $n_k^{(CM)}$ – k -е СМ наземно-воздушного сегмента многоуровневой системы мониторинга.

Динамика информационного взаимодействия между АТ задается системой конечно-разностных логико-лингвистических уравнений, представляемых следующим выражением

$$Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})} = (Sp Y_{t_{x-1}}^{(n_u^{(AT)})}) \cup (Sp Y_{t_{x-2}}^{(n_u^{(AT)})}) \cup \dots \cup (Sp Y_{t_2}^{(n_u^{(AT)})}) \cup (Sp Y_{t_1}^{(n_u^{(AT)})}), \quad u = \overline{1, k}, \quad (1.3)$$

Таблица 1. Обобщенный анализ существующего научно-методического аппарата моделирования информационного взаимодействия в сетях передачи данных

Название класса моделей	Вид математической модели	Название теории	Недостатки
Статистическо-вероятностные модели 	Аналитическая имитационная	Теория вероятностей и математической статистики	Не обеспечивается возможность описания сложного индивидуального и группового поведения элементов системы их взаимодействия в соответствии с заданной целью функционирования Не обеспечивается возможность описания информационного взаимодействия при децентрализованном управлении Сложность аналитического описания процесса информационного взаимодействия между элементами системы Требуются вычислительные затраты при значительном росте числа элементов системы
Графовые модели 	Аналитическая имитационная	Теория графов	Не в полной мере обеспечивается возможность формализации информационного взаимодействия между структурными элементами системы при децентрализованном управлении Требуется дополнение моделей логико-лингвистическим описанием информационного взаимодействия элементов системы Требуются значительная ресурсоемкость вычислительных затрат при росте числа элементов системы
Модели систем массового обслуживания 	Аналитическая имитационная	Теория массового обслуживания	Не обеспечивается возможность описания сложного индивидуального и группового поведения элементов системы их взаимодействия в соответствии с заданной целью функционирования Не обеспечивается возможность описания информационного взаимодействия при децентрализованном управлении

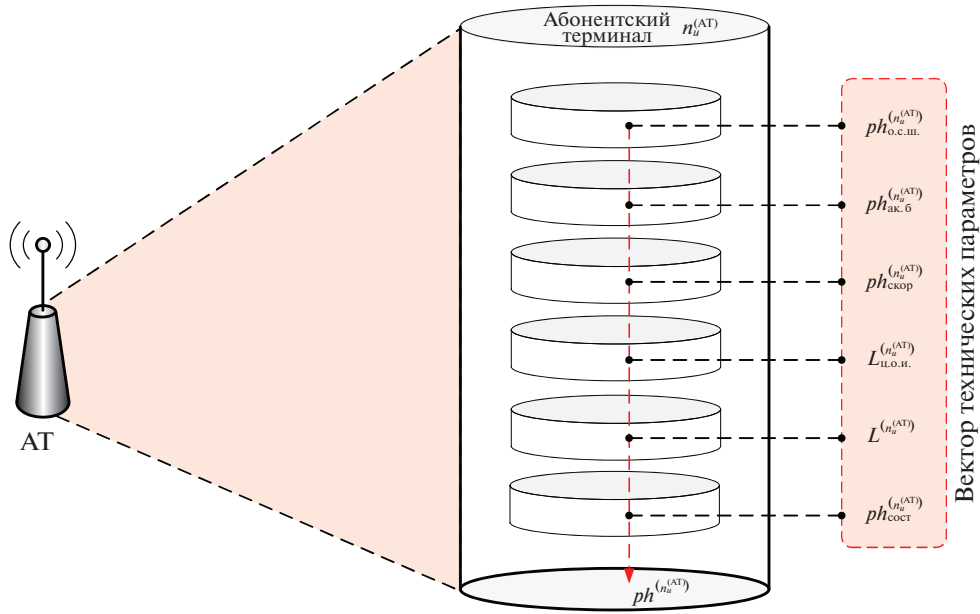


Рис. 2. Графическое представление вектора технических параметров $n_u^{(AT)}$ АТ

где Sp – причинно-следственное отношение вида “Если условие, то действие”, применяемое при переходе $n_u^{(AT)}$ АТ в соответствующее состояние функционирования при определенных условиях; $Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}$ – состояние $n_u^{(AT)}$ АТ в момент времени t_x .

Каждый АТ характеризуется совокупностью параметров, представленных кортежем:

$$Pr^{(n_u^{(AT)})} = (G^{(n_u^{(AT)})}, S^{(n_u^{(AT)})}, E^{(n_u^{(AT)})}, \mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}, g_\beta^{(n_u^{(AT)})}), ph^{(n_u^{(AT)})}), \quad (1.4)$$

где $G^{(n_u^{(AT)})}$ – множество целей и их лингвистических значений для $n_u^{(AT)}$ АТ:

$$G^{(n_u^{(AT)})} = (g_1^{(n_u^{(AT)})}, g_2^{(n_u^{(AT)})}, \dots, g_{h-1}^{(n_u^{(AT)})}, g_h^{(n_u^{(AT)})}); \quad (1.5)$$

$S^{(n_u^{(AT)})}$ – множество стратегий управления (действия) $n_u^{(AT)}$ АТ для достижения цели $g_\beta^{(n_u^{(AT)})}$:

$$S^{(n_u^{(AT)})} = (s_1^{(n_u^{(AT)})}, s_2^{(n_u^{(AT)})}, \dots, s_{l-1}^{(n_u^{(AT)})}, s_l^{(n_u^{(AT)})}); \quad (1.6)$$

$E^{(n_u^{(AT)})}$ – значение эффективности достижения $n_u^{(AT)}$ АТ цели из множества $G^{(n_u^{(AT)})}$, которое определяется затратами $v(s_\chi^{(n_u^{(AT)})})$ АТ для достижения цели и значимостью факта достижения цели $u(g_\beta^{(n_u^{(AT)})})$; $\mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}, g_\beta^{(n_u^{(AT)})})$ – значение возможности достижения $n_u^{(AT)}$ АТ $g_\beta^{(n_u^{(AT)})}$ цели за счет собственных ресурсов за x шагов; $ph^{(n_u^{(AT)})}$ – вектор технических параметров $n_u^{(AT)}$ АТ, представленных выражением

$$ph^{(n_u^{(AT)})} = \langle ph_{о.с.ш.}^{(n_u^{(AT)})}, ph_{ак.б.}^{(n_u^{(AT)})}, ph_{скор}^{(n_u^{(AT)})}, L_{ц.о.и.}^{(n_u^{(AT)})}, L^{(n_u^{(AT)})}, ph_{сост}^{(n_u^{(AT)})} \rangle, \quad (1.7)$$

где $ph_{о.с.ш.}^{(n_u^{(AT)})}$ – значение отношения уровня полезного сигнала к уровню помехи (шума) радиоприемного устройства $n_u^{(AT)}$ АТ; $ph_{ак.б.}^{(n_u^{(AT)})}$ – значение уровня заряда источника электропитания $n_u^{(AT)}$ АТ по типу аккумуляторной батареи; $ph_{скор}^{(n_u^{(AT)})}$ – значение скорости передачи информации радиопередающего устройства $n_u^{(AT)}$ АТ; $L_{ц.о.и.}^{(n_u^{(AT)})}$ – значение дальности радиотрассы от $n_u^{(AT)}$ АТ до $n_\alpha^{(AT)}$ АТ

центра обработки информации сети передачи данных; $L^{(n_u^{(AT)})}$ — вектор значений дальностей радиотрасс от $n_u^{(AT)}$ АТ до соответствующих АТ сети передачи данных

$$L^{(n_u^{(AT)})} = \langle L_{n_1^{(AT)}}^{(n_u^{(AT)})}, L_{n_2^{(AT)}}^{(n_u^{(AT)})}, L_{n_3^{(AT)}}^{(n_u^{(AT)})}, \dots, L_{n_{e-1}^{(AT)}}^{(n_u^{(AT)})}, L_{n_e^{(AT)}}^{(n_u^{(AT)})} \rangle; \quad (1.8)$$

$ph_{\text{сост}}^{(n_u^{(AT)})}$ — состояние функционирования $n_u^{(AT)}$ АТ (готов или не готов к приему и передаче пакетов с информационными или служебными сообщениями).

При выборе $n_u^{(AT)}$ АТ $s_{\chi}^{(n_u^{(AT)})}$ стратегии управления для достижения $g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}$ цели, прогнозирование процесса информационного обмена на интервале времени $[t_0, t_x]$ можно представить выражением (1.3) при условии $Y_{t_0}^{(n_u^{(AT)})} = s_{\chi, t_0}^{(n_u^{(AT)})}$.

Графически вектор технических параметров $n_u^{(AT)}$ АТ представлен на рис. 2.

Одно из основных требований, определяющих эффективность функционирования сети передачи данных, является устойчивость информационного взаимодействия между АТ. В теории многоагентных систем для оценки устойчивости информационного взаимодействия коалиции АТ применяются показатели взаимной полезности и когнитивного диссонанса. Перейдем к рассмотрению данных показателей.

2. Оценка устойчивости информационного взаимодействия коалиции абонентских терминалов системы мониторинга. Целью каждого АТ сети передачи данных при информационном взаимодействии является доставка сообщения (пакета данных) заданному абоненту. Для определения возможности достижения $n_u^{(AT)}$ АТ $g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}$ цели задается метрика $M_{\text{д.ц}}$. Тогда возможность достижения цели $n_u^{(AT)}$ АТ определяется как близость значения прогнозного состояния $Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}$ и значения цели $g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}$

$$\mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}) = M_{\text{д.ц}}(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}). \quad (2.1)$$

Совокупность АТ сети передачи данных формирует коалицию на основе критерия близости их целей $K^{(6.ц)}$, т.е. $M_{\text{д.ц}}(g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_d^{(AT)})}) \leq K^{(6.ц)}$.

Информационное взаимодействие коалиции АТ в сети передачи данных основано на принципе взаимной полезности, при этом $n_u^{(AT)}$ и $n_d^{(AT)}$ АТ являются взаимно полезными при условии, что объединение их стратегий управления $s^{(n_u^{(AT)})}$ и $s^{(n_d^{(AT)})}$ увеличивает возможность достижения их собственных целей, т.е. доставки сообщения заданному абоненту. Показатель $S_{u,d}^{(n)}$ степени взаимной полезности $n_d^{(AT)}$ АТ для $n_u^{(AT)}$ АТ определяется выражением

$$S_{u,d}^{(n)} = 1 - \frac{\mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})} \cup Y_{t_x}^{(n_d^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})})}{\mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})})}, \quad (2.2)$$

при этом область значений показателя степени взаимной полезности $n_d^{(AT)}$ АТ для $n_u^{(AT)}$ АТ задается как

$$S_{u,d}^{(n)} = \begin{cases} 1 & \text{при } M_{\text{д.ц}}(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})} \cup Y_{t_x}^{(n_d^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}) = 0, \quad g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})} \in G^{(n_u^{(AT)})}, \\ 0 & \text{при } \mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})} \cup Y_{t_x}^{(n_d^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}) = \mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}), \quad g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})} \in G^{(n_u^{(AT)})}, \\ -1 & \text{при } \mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})} \cup Y_{t_x}^{(n_d^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}) > \mu(Y_{t_x}^{(n_u^{(AT)})}, g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})}), \quad g_{\beta}^{(n_u^{(AT)})} \in G^{(n_u^{(AT)})}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Значение показателя степени полезности $S_{k,d}^{(n)} = 1$ соответствует максимальной степени полезности $n_d^{(AT)}$ АТ для $n_u^{(AT)}$ АТ. При значении показателя степени полезности $S_{u,d}^{(n)} = -1$ $n_d^{(AT)}$ АТ оказывает отрицательное воздействие на $n_u^{(AT)}$ АТ. В соответствии с критерием взаимной полезности

устойчивая коалиция АТ в самоорганизующейся сети передачи данных формируется при $S^{(n)} \rightarrow 1$ и равных значениях эффективности достижения цели $E^{(n(AT))}$ для каждой пары АТ.

С целью оценки устойчивости коалиции АТ сети передачи данных в части непрерывного информационного взаимодействия требуется оценивать обобщенную взаимную полезность сети в целом. Обобщенный показатель взаимной полезности $N^{(AT)}$ сети передачи данных $Net^{(CCPD)}$ определяется выражением

$$S_{Net^{(CCPD)}}^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^{N^{(AT)}} \sum_{j=1}^{N^{(AT)}} S_{i,j}^{(n)} S_{j,i}^{(n)}}{2N^{(AT)}}, \quad i \neq j. \quad (2.4)$$

Функционирование совокупности АТ сети передачи данных в условиях преднамеренных и непреднамеренных деструктивных воздействий в соответствии с критерием когнитивного диссонанса снижает устойчивость коалиции. Значение показателя когнитивного диссонанса $D_{u,d}^{(к.д.п)}$ по показателю степени взаимной полезности $n_d^{(AT)}$ АТ для $n_u^{(AT)}$ АТ задается как

$$D_{u,d}^{(к.д.п)} = \frac{|S_{u,d}^{(n)} - S_{d,u}^{(n)}|}{S_{u,d}^{(n)} + S_{d,u}^{(n)}}. \quad (2.5)$$

Значение показателя когнитивного диссонанса $D_{u,d}^{(к.д.э)}$ по показателю эффективности $n_d^{(AT)}$ АТ для $n_u^{(AT)}$ АТ определяется отношением вида

$$D_{u,d}^{(к.д.э)} = \frac{|E^{(n_d^{(AT)})} - E^{(n_u^{(AT)})}|}{E^{(n_d^{(AT)})} + E^{(n_u^{(AT)})}}. \quad (2.6)$$

С целью оценки устойчивости коалиции АТ сети передачи данных в части непрерывного информационного взаимодействия требуется оценивать обобщенный когнитивный диссонанс сети по показателю степени взаимной полезности $D_{Net^{(CCPD)}}^{(к.д.п)}$ и показателю эффективности $D_{Net^{(CCPD)}}^{(к.д.э)}$ в целом. Обобщенный когнитивный диссонанс сети по показателю степени взаимной полезности $D_{Net^{(CCPD)}}^{(к.д.п)}$ и показателю эффективности $D_{Net^{(CCPD)}}^{(к.д.э)}$ сети передачи данных $Net^{(CCPD)}$ задается как

$$D_{Net^{(CCPD)}}^{(к.д.п)} = \frac{\sum_{i=1}^{N^{(AT)}} \sum_{j=1}^{N^{(AT)}} D_{i,j}^{(к.д.п)}}{2N^{(AT)}}, \quad i \neq j, \quad (2.7)$$

$$D_{Net^{(CCPD)}}^{(к.д.э)} = \frac{\sum_{i=1}^{N^{(AT)}} \sum_{j=1}^{N^{(AT)}} D_{i,j}^{(к.д.э)}}{2N^{(AT)}}, \quad i \neq j. \quad (2.8)$$

Коалиция АТ сети передачи данных устойчива, если значения показателей когнитивного диссонанса по критерию взаимной полезности и по показателю эффективности для всех АТ из множества $N^{(AT)}$ стремятся к нулю, т.е. выполняются следующие условия

$$\forall (n_u^{(AT)} \wedge n_d^{(AT)}): \quad D_{u,d}^{(к.д.п)} \rightarrow 0, \quad \text{при} \quad S_{u,d}^{(n)} = S_{d,u}^{(n)}, \quad n_u^{(AT)} \in N^{(AT)}, \quad n_d^{(AT)} \in N^{(AT)}, \quad u \neq d, \quad (2.9)$$

$$\forall (n_u^{(AT)} \wedge n_d^{(AT)}): \quad D_{u,d}^{(к.д.э)} \rightarrow 0, \quad \text{при} \quad E^{(n_d^{(AT)})} = E^{(n_u^{(AT)})}, \quad n_u^{(AT)} \in N^{(AT)}, \quad n_d^{(AT)} \in N^{(AT)}, \quad u \neq d. \quad (2.10)$$

3. Формирование состояний функционирования и стратегий управления коалиции абонентских терминалов при их информационном взаимодействии. Основной целью информационного взаимодействия множества АТ в сети передачи данных является прием и передача множества

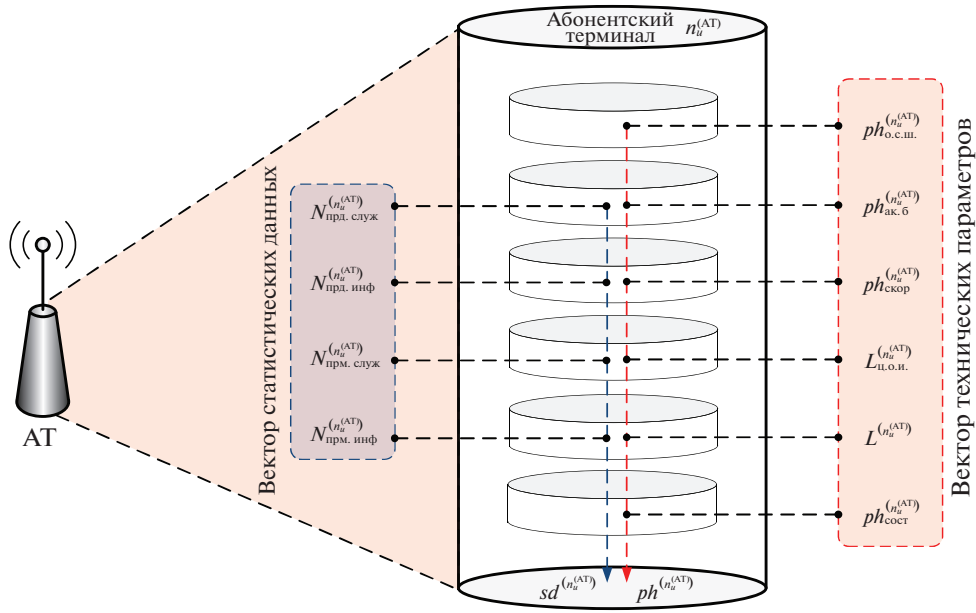


Рис. 3. Графическое представление вектора статистических данных $n_u^{(AT)}$ АТ

сообщений $M^{(сообщ)}$, представляющих собой объединение множества информационных $M^{(инф)}$ и множества служебных $M^{(служ)}$ сообщений:

$$M^{(инф)} = \{m_1^{(инф)}, m_2^{(инф)}, m_3^{(инф)}, \dots, m_z^{(инф)}\}, \quad (3.1)$$

$$M^{(служ)} = \{m_1^{(служ)}, m_2^{(служ)}, m_3^{(служ)}, \dots, m_v^{(служ)}\}, \quad (3.2)$$

$$M^{(сообщ)} = M^{(инф)} \cup M^{(служ)}. \quad (3.3)$$

Учет числа принятых и переданных сообщений $n_u^{(AT)}$ АТ осуществляется за счет формирования вектора статистических данных $sd^{(n_u^{(AT)})}$:

$$sd^{(n_u^{(AT)})} = \langle N_{\text{прд.служ}}^{(n_u^{(AT)})}, N_{\text{прд.инф}}^{(n_u^{(AT)})}, N_{\text{прм.служ}}^{(n_u^{(AT)})}, N_{\text{прм.инф}}^{(n_u^{(AT)})} \rangle, \quad (3.4)$$

где $N_{\text{прд.служ}}^{(n_u^{(AT)})}$ – число переданных служебных сообщений $n_u^{(AT)}$ АТ; $N_{\text{прд.инф}}^{(n_u^{(AT)})}$ – число переданных информационных сообщений $n_u^{(AT)}$ АТ; $N_{\text{прм.служ}}^{(n_u^{(AT)})}$ – число принятых служебных сообщений $n_u^{(AT)}$ АТ; $N_{\text{прм.инф}}^{(n_u^{(AT)})}$ – число принятых информационных сообщений $n_u^{(AT)}$ АТ.

Графически вектор статистических данных $n_u^{(AT)}$ АТ представлен на рис. 3.

Состояние функционирования сети передачи данных $Y_i^{(сост)}$ в части передачи информационного $m_i^{(инф)}$ или $m_j^{(служ)}$ служебного сообщения можно представить в пространстве $\mathbb{R}^2$ вектором с координатами положения $St_{t_i}^{(n_u^{(AT)})}$ для всех АТ и соответствующего сообщения в последовательные моменты времени $t_i \in [t_0, t_x]$:

$$Y_{t_i}^{(сост)} = (St_{t_i}^{(n_1^{(AT)})}, St_{t_i}^{(n_2^{(AT)})}, St_{t_i}^{(n_3^{(AT)})}, \dots, St_{t_i}^{(n_u^{(AT)})}, St_{t_i}^{(m_i)}), \quad u = \overline{1, k}, \quad m_i \in M^{(сообщ)}, \quad (3.5)$$

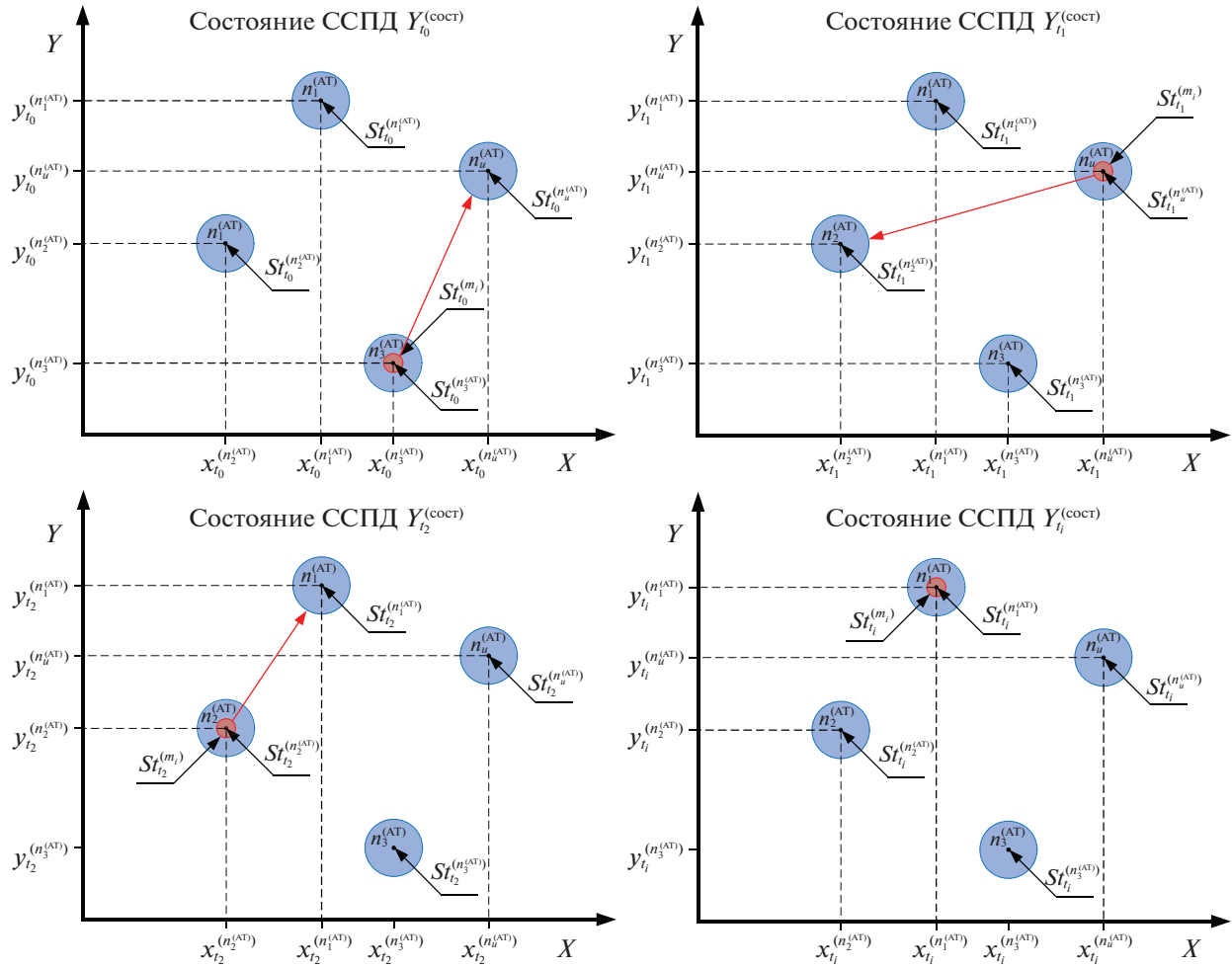


Рис. 4. Состояния функционирования сети передачи данных

где $St_{t_i}^{(n_u^{(AT)})}$ – координаты $n_u^{(AT)}$ АТ в пространстве $\mathbb{R}^2$ в момент времени t_i , причем

$$St_{t_i}^{(n_u^{(AT)})} = (x_{t_i}^{(n_u^{(AT)})}, y_{t_i}^{(n_u^{(AT)})}), \quad u = \overline{1, k}, \quad (3.6)$$

$St_{t_i}^{(m_i)}$ – координаты m_i сообщения в пространстве $\mathbb{R}^2$ в момент времени t_i , причем

$$St_{t_i}^{(m_i)} = (x_{t_i}^{(m_i)}, y_{t_i}^{(m_i)}), \quad m_i \in M^{(\text{сообщ})}. \quad (3.7)$$

Последовательность состояний функционирования сети передачи данных $Y_{t_i}^{(\text{софт})}$, представлена на рис. 4.

Информация о координатах воздушных объектов в зоне ответственности многоуровневой системы мониторинга от наземных и воздушных бортовых радиолокационных комплексов посредством использования множества $N^{(AT)}$ АТ сети передачи данных поступает в центр обработки информации, где также установлен АТ.

Тогда основной целью $g^{(n_u^{(AT)})}$ АТ является передача сообщения $n_\alpha^{(AT)}$ АТ центра обработки информации, т.е.

$$\forall n_u^{(AT)} \in N^{(AT)}, \quad g_i^{(n_u^{(AT)})} = ((x_{t_i}^{(m_i)}, y_{t_i}^{(m_i)}) \mid (x_{t_i}^{(m_i)}, y_{t_i}^{(m_i)}) \in St_{t_i}^{(n_\alpha^{(AT)})}), \quad m_i \in M^{(\text{сообщ})}. \quad (3.8)$$

Таблица 2. Стратегии управления $n_u^{(AT)}$ АТ в момент времени t_i

Формализованное представление стратегии управления	Логико-лингвистическое представление стратегии управления	Теоретико-множественное представление стратегии управления
$s_{1,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	Прием информационного сообщения $m_i^{(инф)} \in M^{(инф)}$ от $n_d^{(AT)}$ АТ в момент времени t_i	$s_{1,t_i}^{(n_u^{(AT)})} : St_{t_i}^{(m_i^{(инф)})} \rightarrow St_{t_i}^{(n_u^{(AT)})}$ $m_i^{(инф)} \in M^{(инф)}, St_{t_{i-1}}^{(m_i^{(инф)})} = St_{t_{i-1}}^{(n_d^{(AT)})}$, $u = \overline{1, k}$
$s_{2,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	Передача информационного сообщения $m_i^{(инф)} \in M^{(инф)}$ на $n_d^{(AT)}$ АТ в момент времени t_i	$s_{2,t_i}^{(n_u^{(AT)})} : St_{t_i}^{(m_i^{(инф)})} \rightarrow St_{t_i}^{(n_d^{(AT)})}$ $m_i^{(инф)} \in M^{(инф)}, St_{t_{i-1}}^{(m_i^{(инф)})} = St_{t_{i-1}}^{(n_u^{(AT)})}$, $u = \overline{1, k}$
$s_{3,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	Прием служебного сообщения $m_i^{(служ)} \in M^{(служ)}$ от $n_d^{(AT)}$ АТ в момент времени t_i	$s_{3,t_i}^{(n_u^{(AT)})} : St_{t_i}^{(m_i^{(служ)})} \rightarrow St_{t_i}^{(n_u^{(AT)})}$, $m_i^{(служ)} \in M^{(служ)}, St_{t_{i-1}}^{(m_i^{(служ)})} = St_{t_{i-1}}^{(n_d^{(AT)})}$, $u = \overline{1, k}$
$s_{4,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	Передача служебного сообщения $m_i^{(служ)} \in M^{(служ)}$ на $n_d^{(AT)}$ АТ в момент времени t_i	$s_{4,t_i}^{(n_u^{(AT)})} : St_{t_i}^{(m_i^{(служ)})} \rightarrow St_{t_i}^{(n_d^{(AT)})}$, $m_i^{(служ)} \in M^{(служ)}, St_{t_{i-1}}^{(m_i^{(служ)})} = St_{t_{i-1}}^{(n_u^{(AT)})}$, $u = \overline{1, k}$
$s_{5,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	Передача информационного сообщения $m_i^{(инф)} \in M^{(инф)}$ на $n_\alpha^{(AT)}$ АТ центра обработки информации в момент времени t_i	$s_{5,t_i}^{(n_u^{(AT)})} : St_{t_i}^{(m_i^{(инф)})} \rightarrow St_{t_i}^{(n_\alpha^{(AT)})}$, $m_i^{(инф)} \in M^{(инф)}, St_{t_{i-1}}^{(m_i^{(инф)})} = St_{t_{i-1}}^{(n_u^{(AT)})}$, $u = \overline{1, k}$

Таблица 3. Возможные состояния функционирования $n_u^{(AT)}$ АТ в момент времени t_i

Формализованное представление состояния функционирования АТ	Описание состояния функционирования АТ	Значение состояния функционирования АТ
$sf_{0,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	“Работоспособное” состояние $n_u^{(AT)}$ АТ сети передачи данных системы мониторинга	1
$sf_{1,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	“Состояние отказа” $n_u^{(AT)}$ АТ сети передачи данных системы мониторинга, когда АТ отказ не диагностировал и продолжает использовать канал связи и приемо-передающую аппаратуру как работоспособные	0
$sf_{2,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	“Состояние ожидания” $n_u^{(AT)}$ АТ сети передачи данных системы мониторинга, когда АТ диагностировал отказ приемо-передающей аппаратуры и канала связи, но ожидает их восстановления	0.25
$sf_{3,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$	“Состояние реконфигурации” $n_u^{(AT)}$ АТ, когда АТ диагностировал, что восстановления приемо-передающей аппаратуры и канала связи не произошло, и был запущен процесс изменения собственных параметров в интересах восстановления работоспособности	0.5

Для достижения основной цели взаимодействия между АТ необходимо определить стратегии управления АТ, т.е. действия над множеством сообщений в процессе функционирования сети передачи данных в заданные моменты времени $t_i \in [t_0, t_x]$. При этом любое действие соответствующего АТ над информационным или служебным сообщениями приводит к изменению состояния функционирования сети передачи данных $Y_i^{(сост)}$. Действия над множеством сообщений, циркулирующих в сети передачи данных в момент времени t_i , представлены в табл. 2.

4. Интегральная оценка возможности достижения цели абонентским терминалом на основе вектора технических параметров. Полезность каждого АТ сети передачи данных определяется интегральной оценкой его результативных действий. Результативными действиями $n_u^{(AT)}$ АТ в момент времени t_i являются передача информационного сообщения $m_i^{(инф)}$ на соответствующий $n_d^{(AT)}$ или $n_\alpha^{(AT)}$ АТ центра обработки информации, т.е. стратегии управления $s_{2,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$ и $s_{5,t_i}^{(n_u^{(AT)})}$.

Возможность достижения цели $n_u^{(AT)}$ АТ определяется ресурсными параметрами, т.е. индивидуальными техническими характеристиками — вектором технических параметров $ph^{(n_u^{(AT)})}$ АТ и особенностями расположения соответствующего терминала на соответствующем уровне системы мониторинга. При кооперации АТ сети передачи данных необходимо найти правило вычисления собственной полезности $n_u^{(AT)}$ АТ на основе элементов соответствующего вектора технических параметров $ph^{(n_u^{(AT)})}$, т.е. через составляющие возможности достижения цели соответствующим АТ. Сформулируем ряд критериев, применение которых обеспечивает формализацию показателя $S_{n_u}^{(с.п.)}$ оценки собственной полезности $n_u^{(AT)}$ АТ сети передачи данных системы мониторинга.

Критерий оценки состояния функционирования $Kr_{n_u^{(AT)}, t_i}^{(сост)}$ $n_u^{(AT)}$ АТ представляет собой состояние или режим функционирования $n_u^{(AT)}$ АТ в момент времени $t_i \in [t_0, t_x]$. Возможные состояния функционирования $n_u^{(AT)}$ АТ рассмотрены в табл. 3.

На состояние функционирования АТ влияют различные факторы, основные из которых это преднамеренные или не преднамеренные деструктивные воздействия.

Критерий близости $Kr^{(бл)}$ $n_u^{(AT)}$ АТ представляет собой расстояние $L_{n_u^{(AT)}, n_d^{(AT)}}^{(n_u^{(AT)})}$ радиотрассы между $n_u^{(AT)}$ АТ и соседними АТ сети передачи данных, которые находятся в зоне энергетической доступности $n_u^{(AT)}$ АТ. При этом $n_u^{(AT)}$ АТ является более полезным для $n_d^{(AT)}$ АТ, чем другие АТ сети передачи данных, если выполняется условие

$$Kr_{n_u^{(AT)}, n_d^{(AT)}, t_i}^{(бл)} : L_{n_u^{(AT)}, n_d^{(AT)}}^{(n_u^{(AT)})} < L_{n_d^{(AT)}, n_i^{(AT)}}^{(n_d^{(AT)})}, \quad \forall n_u^{(AT)}, n_d^{(AT)}, n_i^{(AT)} \in N^{(AT)}, \quad u \neq i, \quad i = \overline{1, (k-1)}, \quad t_i \in [t_0, t_x]. \quad (4.1)$$

При функционировании сети передачи данных системы мониторинга в условиях воздействия деструктивных факторов необходимо оценивать уровень полезного сигнала на входе радиоприемного устройства АТ. Следовательно, использовать критерий значения уровня полезного сигнала к уровню помехи (шума) $Kr^{(о.с.ш)}$ на входе радиоприемного устройства $n_u^{(AT)}$ АТ, т.е. $n_d^{(AT)}$ АТ более полезен для $n_u^{(AT)}$ АТ, чем другие АТ сети передачи данных, если верно условие

$$Kr_{n_u^{(AT)}, n_d^{(AT)}}^{(о.с.ш)} : ph_{о.с.ш}^{(n_u^{(AT)})} < ph_{о.с.ш}^{(n_d^{(AT)})}, \quad \forall n_d^{(AT)}, n_i^{(AT)} \in N^{(AT)}, \quad d \neq i, \quad i = \overline{1, (k-1)}. \quad (4.2)$$

Одним из основных технических параметров АТ сети передачи данных является значение скорости передачи информации $ph_{скор}^{(n_u^{(AT)})}$ радиопередающего устройства $n_u^{(AT)}$ АТ от СМ системы мониторинга. На основе данного параметра сформулируем критерий скорости передачи информации $Kr^{(скор)}$ $n_u^{(AT)}$ АТ, т.е. $n_u^{(AT)}$ АТ более полезен для $n_d^{(AT)}$ АТ, чем другие АТ сети передачи данных, если выполняется условие

$$Kr_{n_u^{(AT)}, n_d^{(AT)}}^{(скор)} : ph_{скор}^{(n_u^{(AT)})} > ph_{скор}^{(n_d^{(AT)})}, \quad \forall n_u^{(AT)}, n_i^{(AT)} \in N^{(AT)}, \quad u \neq i, \quad i = \overline{1, (k-1)}. \quad (4.3)$$

Предложенные критерии охватывают все основные аспекты функционирования $n_{i(AT)}^{(AT)}$ АТ сети передачи данных системы мониторинга и позволяют формализовать показатель оценки собственной полезности $S_{n_{i(AT)}}^{(с.п)}$ выражением вида

$$S_{n_{i(AT)}}^{(с.п)} = \{Kr^{(сост)} Kr^{(бл)} Kr^{(скор)} Kr^{(о.с.ш)}\}. \quad (4.4)$$

Значения вектора технических параметров могут иметь различную размерность, следовательно, необходимо выполнить процедуру нормализации рассматриваемых параметров.

Предложенные аналитические выражения дают возможность оценить эффективность информационного взаимодействия структурных элементов самоорганизующейся сети передачи данных наземно-воздушной системы мониторинга с учетом устойчивости информационного обмена. При этом учитываются особенности взаимодействия АТ, определяется их состояние и особенности функционирования с помощью показателя полезности и диссонанса АТ для соответствующих узлов сети.

Заключение. Применение разработанной аналитической модели информационного взаимодействия структурных элементов самоорганизующейся сети передачи данных многоуровневой системы мониторинга на базе многоагентного подхода позволяет провести оценку функционирования множества АТ в части показателя устойчивости информационного взаимодействия. Для оценки устойчивости функционирования абонентских терминалов при воздействии разнотипных деструктивных факторов в модели использованы критерии взаимной надежности и когнитивного диссонанса. Получены аналитические выражения для оценки устойчивости сети в целом с помощью обобщения показателей взаимной полезности и когнитивного диссонанса.

На основании полученных аналитических выражений планируется разработка имитационной модели информационного взаимодействия структурных элементов системы мониторинга. Модель будет учитывать динамику информационного обмена при децентрализованном управлении многоуровневой сетью передачи данных, организованной на базе многоагентного подхода в рамках формирования коалиции абонентских терминалов в среде агентного моделирования “Anylogic”. Цель моделирования — получение многокритериальной оценки показателей качества, зависимости данных показателей от технических параметров АТ в функции времени, определения компонент связности при динамическом изменении топологии сети передачи данных, центров кластеризации и оценка устойчивости и своевременности информационного взаимодействия между структурными элементами сети. При изучении имитационной модели сети в отсутствие единого центра управления будут использованы представленные в статье стратегии управления и правила поведения АТ в соответствующие моменты времени в зависимости от оценки показателей взаимной полезности, когнитивного диссонанса и состояния терминалов сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушмелев П.Е. Беспроводная сенсорная телекоммуникационная система контроля утечек метана из магистралей газотранспортной сети: Дис. ... канд. техн. наук. М.: ВШЭ, 2014. 225 с.
2. 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.
3. Ананьев А.В., Ерзин И.Х., Стафеев М.А. Обоснование рационального выбора беспилотного летательного аппарата для построения аэромобильной сети связи // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 251–255.
4. Ванг Л., Жу Д., Жу Ю., Матвеев И.А. Многоаспектная кластеризация подпространств методом адаптивной оптимизации глобального графа сродства // Изв. РАН. ТиСУ. 2022. № 1. С. 41–55.
5. Кычкин А.В., Артемов С.А., Власов В.А. Модульная организация сенсорной и управляющей систем мобильной интеллектуальной платформы // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-10. С. 2147–2152. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32725>.
6. Теория управления (дополнительные главы): учебное пособие / Под ред. Д.А. Новикова. М.: ЛЕНАНД, 2019. 552 с.
7. Теория управления: учебное пособие / Под ред. О.В. Симагина. Новосибирск: СибАГС, 2014. 135 с.
8. Жирабок А.Н., Ким Чхун Ир Виртуальные датчики в задаче функционального диагностирования нелинейных систем // Изв. РАН. ТиСУ. 2022. № 1. С. 67–75.
9. Рыжиков Ю.И. Численные методы теории очередей: учебное пособие. СПб.: Лань, 2019. 512 с.

10. Прикладная теория графов и сетевые модели: учебное пособие / Под ред. А.А. Кочкарова. М.: КноРус, 2021. 209 с.
11. Замарин А.И., Тавалинский Д.А., Цыганов А.С. Метод анализа и обработки цифровых информационных последовательностей в условиях структурной и параметрической неопределенности // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 9. С. 8–13.
12. Городецкий В.И., Карасев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. Прикладные многоагентные системы группового управления // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 3–24.
13. Городецкий В.И. Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов. Обзор. Ч. 1 // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 2. С. 19–30.
14. Кулинич А.А. Модель командного поведения агентов (роботов): когнитивный подход // Управление большими системами. 2014. Вып. 51. С. 174–196.
15. Михайлов Р.Л., Макаренко С.И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4(12). С. 69–79.
16. Боговик А.В., Игнатов В.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. СПб.: ВАС, 2006. 183 с.
17. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Поликом, 2010. 389 с.
18. Кулинич А.А. Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 2. С. 95–106.
19. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желанное и действительное // Современная мехатроника. Сб. научн. тр. Всероссийской научной школы. Орехово-Зуево, 2011. С. 35–51.
20. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
21. Yildirim E., Yucelen T. Control of Multiagent Networks with Misbehaving Nodes // Intern. J. Systems. Science. 2021. V. 52. № 13. P. 2858–2874.
<https://doi.org/10.1080/00207721.2021.1910875>
22. Olfati-Saber R., Richard M. Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time-delays // IEEE Trans. Automat. Control. 2004. № 9. P. 1520–1533.