На правах рукописи

НИКОЛАЕВ Дмитрий Александрович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОУЗЛОВЫМ МОНИТОРИНГОМ ОБЪЕКТОВ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Специальность 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации.

Научный руководитель: **Лебеденко Евгений Викторович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Абрамов Геннадий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», зав. кафедрой математического обеспечения ЭВМ
Еськов Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, ГБПОУ РО «Ростовский-на-Дону колледж связи и информатики», преподаватель

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится «17» декабря 2021 года в 14^{00} часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский пр-т, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» www.cchgeu.ru.

Автореферат разослан «25» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Гусев Константин Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многоканальные программные системы применяются во многих сферах жизнедеятельности человека. Так, одним из актуальных направлений являются многоканальные системы видеомониторинга. Развитие и совершенствование программного обеспечения (ПО) этого направления обусловлено необходимостью решения ряда проблем, связанных с функциями аналитической обработки информации видеомониторинга, в общем случае именуемых видеоаналитикой. В рамках традиционной архитектуры ПО таких систем лежит модель «клиент-сервер», применение которой имеет существенные ограничения при решении задачи их масштабирования, что также является «узким местом» по показателю отказоустойчивости.

Развитие компонентной базы привело к появлению функциональных узлов многоканальных систем видеомониторинга, комбинирующих функции формирования видеокадров и видеоаналитики – интеллектуальных узлов мониторинга. Наличие в них программной реализации стека телекоммуникационных протоколов обеспечивает возможность создания сети, являющейся хорошо масштабируемой многоканальной системой видеомониторинга. Применение интеллектуальных узлов мониторинга позволяет в качестве базового выбрать агентный подход к построению архитектуры ПО видеоаналитики многоканальных систем видеомониторинга.

Одной из наиболее трудоемких задач видеоаналитики, зависящей от высоконадежного и скоординированного функционирования всех компонентов системы, является многоузловой мониторинг объектов, задача такого мониторинга в системах с агентной архитектурой ПО видеоаналитики может быть решена за счет ее переноса в интеллектуальные узлы мониторинга и разработки ПО параллельного и распределенного управления ею.

Большой вклад в разработку математического и программного обеспечения подсистемы видеоаналитики многоканальных систем видеомониторинга, в том числе и с децентрализованной структурой, внесли P. Fu, B. Song, C. Soto, M. Taj, A. Cavallaro, M. Quaritsch, M. Kreuzthaler, А.Ю. Кручинин, Д.В. Колмыков, Р.Р. Галимов. Однако в настоящее время практически отсутствуют подходы к формальному решению задачи многоузлового мониторинга объектов, а имеющиеся исследования в области математического и программного обеспечения носят узконаправленный характер и, как правило, отражают частные аспекты ее решения.

Таким образом, повышение масштабируемости и отказоустойчивости ПО многоузлового мониторинга объектов в системах видеомониторинга на основе интеллектуальных узлов путем разработки математического и программного обеспечения для параллельного и распределенного управлением им является актуальной исследовательской задачей.

Тематика диссертационной работы соответствует перспективной тематике научных исследований ФГКВОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации».

Целью работы является повышение масштабируемости и отказоустойчивости программного обеспечения многоузлового мониторинга объектов на основе разработки математической модели и алгоритма управления, реализующих агентный подход.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ состояния проблемы обеспечения масштабируемости и отказоустойчивости программного обеспечения многоузлового мониторинга объектов в многоканальной системе видеомониторинга.

2. Разработать теоретико-множественную модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга, выполняющих функцию многоузлового мониторинга объектов.

3. Разработать алгоритм децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов в подсистеме видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга на основе сети интеллектуальных узлов мониторинга.

4. Разработать имитационную модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга, выполняющих функцию многоузлового мониторинга объектов.

5. Разработать структурную модель взаимодействия программных модулей многоузлового мониторинга объектов для подсистемы видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга с децентрализованной структурой.

6. Провести численные эксперименты по оцениванию предложенных решений по показателям масштабируемости и отказоустойчивости.

Объект исследования: подсистема видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга на основе сети интеллектуальных узлов мониторинга.

Предмет исследования: математическое и программное обеспечение процесса децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертации задач использовались методы системного анализа и синтеза, построения распределенных вычислительных систем, управления в многоагентных системах, теории множеств, теории конечных автоматов, имитационного моделирования, математической статистики и планирования проведения эксперимента.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки): п. 3 «Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем»; п. 8 «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования».

Научная новизна работы. В диссертационном исследовании получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

– теоретико-множественная модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга, отличающаяся представлением периметра наблюдения за объектом мониторинга в виде виртуального пространства, разделяемого между множеством интеллектуальных узлов мониторинга, используемого для распределенного хранения их координатно-адресных параметров, обеспечивающая формирование логической сетевой инфраструктуры для многоузлового мониторинга объектов;

– алгоритм децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов, отличающийся учетом траектории перемещения объекта мониторинга и сформированной логической сетевой инфраструктуры многоканальной системы видеомониторинга, и обеспечивающий решение интеллектуальным узлом мониторинга задачи выбора узла – получателя данных об объекте с целью продолжения его мониторинга;

– имитационная модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга, отличающаяся использованием *d*-мерного виртуального пространства координат одноранговой пиринговой сети CAN и обеспечивающая реализацию протокола взаимодействия агентов в процессе многоузлового мониторинга объектов;

– структурная модель взаимодействия программных модулей многоузлового мониторинга объектов для подсистемы видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга с децентрализованной структурой, отличающаяся реализацией протокола взаимодействия агентов на основе наложения уровня одноранговой пиринговой сети CAN на уровень сетевой инфраструктуры Controller Area Network, обеспечивающая функционирование одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга в условиях масштабирования и отказов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретико-множественная модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга обеспечивает формирование логической сетевой инфраструктуры для многоузлового мониторинга объектов.

2. Алгоритм децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов обеспечивает решение интеллектуальным узлом мониторинга задачи выбора узла – получателя данных об объекте с целью продолжения его мониторинга.

3. Имитационная модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга обеспечивает реализацию протокола взаимодействия агентов в процессе многоузлового мониторинга объектов.

4. Структурная модель взаимодействия программных модулей многоузлового мониторинга объектов для подсистемы видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга с децентрализованной структурой обеспечивает функционирование одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга в условиях масштабирования и отказов.

Практическая значимость заключается в разработке математического и программного обеспечения для децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов многоканальной системы видеомониторинга на базе интеллектуальных узлов на основе агентного подхода и технологии одноранговых сетей, обеспечивающих повышение масштабируемости и отказоустойчивости ПО многоузлового мониторинга объектов.

Результаты внедрения. Основные положения и результаты диссертационной работы реализованы в виде специального программного модуля для прототипа интеллектуального узла мониторинга и нашли практическое применение в работе ООО «Автоматические системы» для совершенствования программного обеспечения подсистемы видеоаналитики опытного участка многоканальной системы видеомониторинга. Результаты также внедрены в образовательный процесс Академии ФСО России (г. Орёл).

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XX International Open Conference «Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis» (Yelm, WA, USA, 2015), XI Всероссийской межведомственной научной конференции «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд органов государственной власти Российской Федерации» (Академия ФСО России, Орёл, 2019 г.), XXIV-th International Open Science Conference «Modern informatization problems in economics and safety» (Yelm, WA, USA, 2019), XXV-th International Open Science Conference «Modern informatization problems in simulation and social technologies» (Yelm, WA, USA, 2020).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, патент на полезную модель, свидетельство о государственной регистрации программы, а также статья в издании, индексируемом в Scopus. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [8] – анализ подходов к построению одноранговых сетей; [2] – алгоритм децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов, модель многоагентной системы для одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга; [10] – анализ существующих подходов к моделированию одноранговых сетей; [1, 11] – модель децентрализованного процесса многоузлового мониторинга объектов с распределенным хранением данных в одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга; [4] – метод расчета параметров децентрализованного процесса многоузлового мониторинга объектов с распределенным хранением данных в одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга; [5] – реализация программного модуля децентрализованного управления для многоузлового мониторинга объектов интеллектуальными узлами мониторинга.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, включая 58 рисунков, 17 таблиц и список литературы из 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные научные результаты, а также приведены сведения об их апробации и внедрении.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы обеспечения масштабируемости и отказоустойчивости программного обеспечения многоузлового мониторинга объектов в многоканальной системе видеомониторинга.

Исследование свойств существующих многоканальных систем видеомониторинга показало, что их «узким местом» является централизованная архитектура ПО многоузлового мониторинга объектов. Рассмотрены теоретические принципы, направленные на решение проблемы реализации процесса многоузлового мониторинга объектов в условиях отказа узлов многоканальной системы видеомониторинга или предъявления требований к ее масштабированию: децентрализация функции управления многоузловым мониторингом объектов и структурная модификация многоканальной системы видеомониторинга с использованием интеллектуальных узлов мониторинга. Проведен анализ архитектурных решений ПО распределенных вычислительных систем. Определено, что в качестве прототипа логической сетевой инфраструктуры для ПО децентрализованной подсистемы видеоаналитики может быть выбрана одна из существующих инфраструктур структурированных одноранговых файлообменных сетей.

Таким образом, рассмотрены подходы к построению архитектуры ПО децентрализованной подсистемы видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга, обеспечивающие решение проблемы масштабируемости и отказоустойчивости программного обеспечения многоузлового мониторинга объектов. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке теоретико-множественной модели одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга, выполняющих функцию многоузлового мониторинга объектов.

Проведен анализ существующих инфраструктур структурированных одноранговых файлообменных сетей, обеспечивающих решение задачи маршрутизации идентификационной информации об объекте мониторинга между множеством взаимодействующих интеллектуальных узлов мониторинга, и сделан обоснованный выбор одноранговой сети CAN.

Многоузловой мониторинг объектов – это процесс, целью которого является определение местонахождения объекта мониторинга o во время его перемещения в пределах полей зрения F узлов мониторинга и фиксация траектории его перемещения p_o.

Под траекторией перемещения p_o объекта мониторинга o будем понимать упорядоченное множество пар:

$$p_o = \{((x_i, y_i), t_i) : \forall i = 1....n, (x_i, y_i) \in F\}, \quad (1)$$

где (x_i, y_i) – координаты объекта мониторинга o; t_i – момент времени наблюдения объекта мониторинга o; i – номер наблюдения объекта мониторинга o.

Пусть с целью обеспечения децентрализованного выполнения функции многоузлового мониторинга объектов подсистема видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга имеет архитектуру одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга, формирующих множество C, в качестве сетевой адресации которых используется бесклассовая IP-адресация. Тогда отображение $R^{C-C}: C \to C$ определяет структуру логических связей элементов множества C, а назначение им IP-адресов из множеством A задается биективным отображением $R^{C-A}: C \to A$. Кроме того, сюрьективное отображение $R^{C-F}: C \to F$ определяет связь элементов множества C с элементами множества их полей зрения F, размещенных в пределах проекции периметра объекта наблюдения Z на плоскость.

Тогда для выполнения вышеуказанной системой функции элементы C должны реализовывать механизмы распределенного хранения и доступа к данным, представляющих собой множество пар (f_c, a_c): $f_c \in F, a_c \in A, c \in C$. С целью их формального описания вводится отношение:

$$RW : \{(f_c, a_c)\} \overset{ON}{\to} C. \tag{2}$$

Определим, что $\forall c_i \in C$, используя логические связи, заданные отображением R^{C-C}, имеет возможность добавлять (f_{c_i}, a_{c_i}) в отношение (2) и осуществлять поиск $a_{c_j} : (x, y) \in f_{c_j}, ((f_{c_j}, a_{c_j}), c_k) \in RW$, где (x, y) – аргумент поискового запроса.

Порядок выполнения функции многоузлового мониторинга объектов определяется распределенным алгоритмом, задаваемым отношением:

$$\begin{aligned} ALG^{MTR} = \{ \bigcup_{i=1...|C|} ALG^{MTR}_{c_i} : ALG^{MTR}_{c_1} = ... = \\ = ALG^{MTR}_{c_{|C|}} \} : \{(STMS, IDS_o, ON)\} \to P, \end{aligned} \tag{3}$$

где $ALG^{MTR}_{c_i}$ – алгоритм функции многоузлового мониторинга объектов интеллектуальных узлов мониторинга c_i; $STMS$ – видеопотоки интеллектуальных узлов мониторинга из множества C, представляющие собой последовательности изображений, полученных в различные моменты времени t; IDS_o – множество идентификационных признаков объекта мониторинга o; ON – одноранговая сеть интеллектуальных узлов мониторинга, построенная по принципу CAN; P – множество всех возможных траекторий перемещения объекта мониторинга o.

Установим порядок распределенного хранения данных элементами C. Для этого введем множество их зон ответственности $\bigcup_{i=1...|C|} z_{c_i} \equiv Z$, задаваемое биективным отображением $R^{C-Z}: C \to Z$. Определим правило закрепления

(f_{c_i}, a_{c_i}) за элементами множества Z: если координаты центра поля зрения $\forall(x_{f_{c_i}}, y_{f_{c_i}}) \in z_{c_j}$, то $\{(f_{c_i}, a_{c_i})\} \overset{ON}{\rightarrow} \{c_j\}$.

Все элементы C должны иметь возможность осуществлять информационное взаимодействие между собой. С целью снижения нагрузки на каналы связи, возникающей во время работы сети интеллектуальных узлов мониторинга, отображение R^{C-C} должно быть инъективным. Очевидно, что это условие может быть достигнуто транзитивно – посредством композиции отображений логических связей, т. е. $\forall\{c_i, c_j\}$ должно выполняться условие:

$$\exists R^{c_i - c_j} = (R^{c_i - C} \circ ... \circ R^{C - c_j}) : \{c_i\} \rightarrow \{c_j\}, \tag{4}$$

где $R^{c_i - C}, ..., R^{C - c_j} \subset R^{C-C}$.

Допустим, структура R^{C-C} определяется наличием у элементов Z общих сторон. Отношение между такими интеллектуальными узлами мониторинга, называемыми «соседними» (ИУМ-С), имеет следующий вид:

$$R^{C-C} = \bigcup_{i=1...|C|} R^{c_i - C} = \{(c_i, c_j) : z_{c_i} \cap z_{c_j}\} : C \rightarrow C, \tag{5}$$

где $R^{c_i - C}$ – локальная информация c_i о своих ИУМ-С. Интеллектуальные узлы мониторинга, находящиеся в таком отношении, знают IP-адреса и зоны ответственности друг друга.

Тогда отношение, определяющее связь интеллектуальных узлов мониторинга, называемых «родительскими» (ИУМ-Р), с интеллектуальными узлами мониторинга, называемыми «дочерними» (ИУМ-Д), информация о полях зрения которых хранится у ИУМ-Р, может быть записано в следующем виде:

$$R_{data}^{C-C} = \bigcup_{i=1...|C|} R_{data}^{c_i - C} = \{(c_i, c_j) : z_{c_i} \cap f_{c_i}\} : C \rightarrow C, \tag{6}$$

где $R_{data}^{c_i - C}$ – локальная информация интеллектуального узла мониторинга c_i о своих ИУМ-Д. Участники таких отношений имеют данные об адресной информации друг друга.

На рисунке 1 представлен пример структуры одноранговой сети, сформированной на основе связанности зон ответственности интеллектуальных узлов мониторинга.

Маршрутизация в ON – это процесс определения маршрута данных от c_i до $c_j : (x, y) \in z_{c_j}$, где (x, y) – аргумент поискового запроса. Она осуществляется динамически за счет итеративной пересылки запроса $\forall c_k$ удовлетворяющему условию:

$$dist((x_{ctr}^{z_{c_k}}, y_{ctr}^{z_{c_k}}), (x, y)) < dist((x_{ctr}^{z_{c_s}}, y_{ctr}^{z_{c_s}}), (x, y)) : \forall (c_i, c_j) \in R^{c_i - C}, \tag{7}$$

где $dist((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$.

Пересылка осуществляется до тех пор, пока не будет выполнено условие:

$$(x, y) \in z_{c_k} \Rightarrow c_k = c_j \quad (8)$$

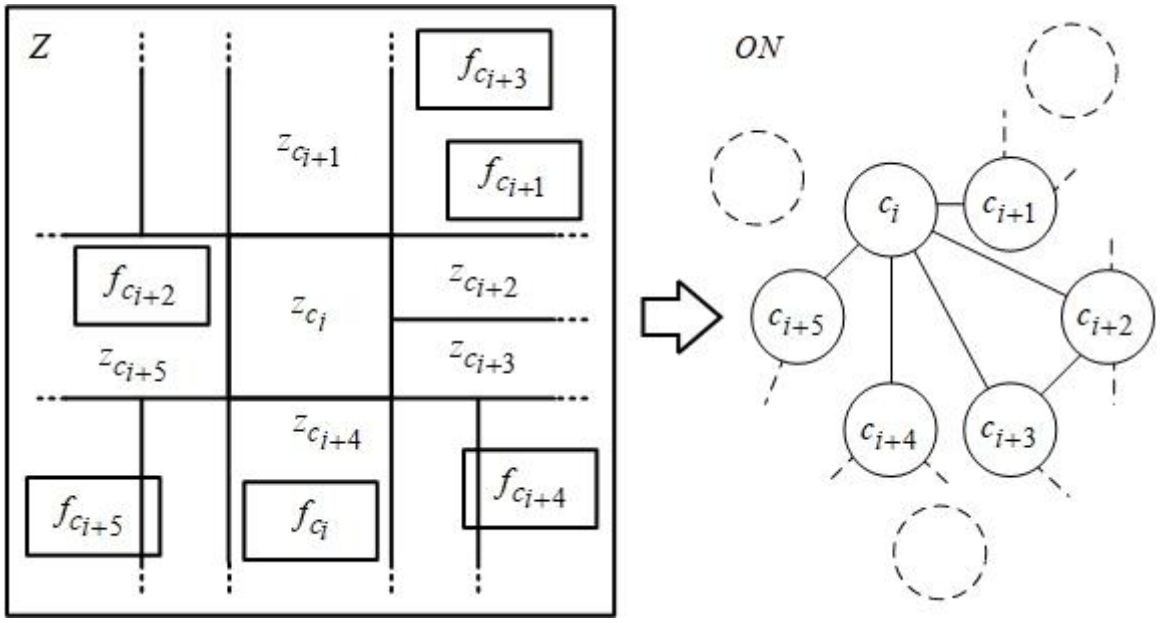

Рис. 1. Пример структуры одноранговой сети, сформированной на основе связанности зон ответственности интеллектуальных узлов мониторинга

В качестве программной основы реализации функции многоузлового мониторинга объектов предлагается использовать концепцию мобильных агентов. Множество интеллектуальных узлов мониторинга рассматриваются как многоагентная система, в которой каждый узел представлен объектом-агентом, имеющим функции, связанные достижением локальной цели – сопровождением заданных объектов мониторинга из имеющегося множества объектов в пределах своего поля зрения и передача информации об этом объекте мониторинга подмножеству объектов-агентов при выходе объекта мониторинга за границы его поля зрения. При этом с целью достижения достаточного уровня автономности объектов-агентов и децентрализации многоагентной системы при выполнении функции многоузлового мониторинга объектов она построена на основе логической сетевой инфраструктуры, представленной на рисунке 1.

Многоагентная система состоит из объектов-агентов двух типов (рисунок 2): *agent-team* – мобильный агент, обеспечивающий реализацию функции мониторинга объекта в пределах поля зрения узла и передачу идентификационной информации об объекте мониторинга требуемому узлу или узлам; *trigger-team* – мобильный агент, инициирующий формирование подмножества интеллектуальных узлов мониторинга (команды 1 – *team1*), последовательно участвующих в процессе многоузлового мониторинга объектов. В частном случае объекты-агенты такого типа могут отсутствовать, а их функции выполняют *agent-team*.

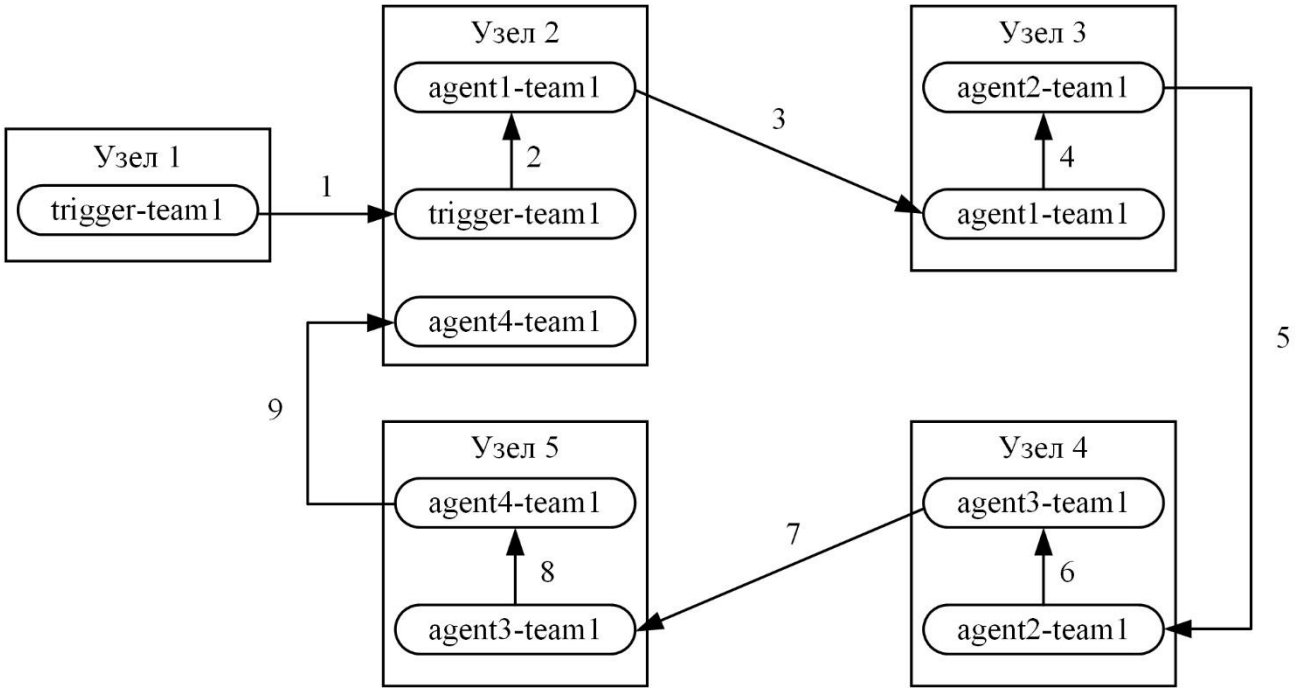

Рис. 2. Пример процесса взаимодействия объектов-агентов
в многоагентной сети

Третья глава посвящена разработке алгоритма децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов и имитационной модели одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга.

Предложена декомпозиция этапов реализации распределенной функции многоузлового мониторинга объектов:

Этап 1. Узел оператора ws инициирует мониторинг объекта o, находящегося в поле зрения интеллектуального узла мониторинга f_{c_i}, отправляя команду, содержащую идентификационные признаки IDS_o объекта мониторинга o интеллектуальному узлу мониторинга c_i.

Этап 2. Интеллектуальный узел мониторинга c_i фиксирует траекторию перемещения p_o и отправляет ее на узел оператора ws.

Этап 3. В момент перехода объекта мониторинга o за пределы поля зрения f_{c_i} интеллектуальный узел мониторинга c_i инициирует передачу информации другим узлам сети интеллектуальных узлов мониторинга для продолжения его мониторинга (функция многоузлового мониторинга объектов):

$$C_T = \{c_j : c_j \in C, P((x_{n+1}, y_{n+1}) \in f_{c_j}) \neq 0\}, \quad (9)$$

где $n+1$ – номер следующего наблюдения объекта мониторинга o после его перехода за пределы поля зрения f_{c_i}. Передаваемая информация содержит следующие сведения: идентификационные признаки IDS_o объекта o, траекторию перемещения p_o, адресную информацию узла оператора a_{ws}. При этом вво-

дится ограничение: c_j – интеллектуальный узел мониторинга, чье поле зрения f_{c_j} является ближайшим к началу луча, проведенного из начала и по направлению вектора перемещения объекта мониторинга o в пределах f_{c_i}.

Указанную функцию с учетом введенного ограничения можно записать в следующем виде:

$$\{(p_o, R^{\{c_i\}-C}, R_{data}^{\{c_i\}-C})\} \to \{c_j : ((\exists c_c, d^{P-C}(f_{c_c}, ON, v) = 1) \to c_j = c_c) \vee \\ \vee((\neg\exists c_c, d^{P-C}(f_{c_c}, ON, v) = 1) \to c_j = c_n, d^{N-N}(z_{c_n}, ON, v) = 1)\}, \quad (10)$$

где $d^{P-C}(f_{c_c}, ON, v)$, $d^{N-N}(z_{c_n}, ON, v)$ – логические функции, определяющие, является ли f_{c_c} и z_{c_n} ближайшими к началу вектора $v = h(p_0)$, из начала и по направлению которого проведен луч l, среди $\{f_{c_k} : (c_i, c_k) \in R_{data}^{\{c_i\}-C}, l \cap f_{c_k}\}$ и $\{z_{c_k} : (c_i, c_k) \in R^{\{c_i\}-C}, l \cap z_{c_k}\}$ соответственно.

Этап 4. Интеллектуальные узлы мониторинга C_T на протяжении установленного времени t_w выделяют IDS_o объектов мониторинга O_{C_T}, появляющихся в пределах $F_{C_T} \subseteq F$, и сопоставляют их с полученными идентификационными признаками IDS_o. В случае совпадения признаков соответствующий интеллектуальный узел мониторинга $c_j \in C_T$ переходит к выполнению этапа 2.

В общем случае алгоритм функции многоузлового мониторинга объектов, реализуемый интеллектуальным узлов мониторинга c_i, можно представить в виде композиции следующих алгоритмов:

$$ALG_{c_i}^{MTR} = ALG_{c_i}^{TR} \circ ALG_{c_i}^{CRL}, \quad (11)$$

где $ALG_{c_i}^{TR}$ – алгоритм, реализующий этапы 2 и 4; $ALG_{c_i}^{CRL}$ – алгоритм, реализующий этап 3.

На рисунке 3 представлен псевдокод разработанного алгоритма децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов $ALG_{c_i}^{CRL}$ интеллектуального узла мониторинга.

Особенностью предложенного алгоритма является отсутствие у множества интеллектуальных узлов мониторинга априорной информации о всей структуре одноранговой сети и решении задачи передачи информации для продолжения сопровождения объекта за счет ее маршрутизации между узлами одноранговой сети в соответствии с заданными правилами (выражение (10)).

На основе разработанного алгоритма в работе представлен обобщенный алгоритм $ALG_{c_i}^{MTR}$ (выражение (11)) для реализации в узле объекта-агента предложенной многоагентной системы (рисунок 2).

Для разработанного алгоритма выполнены проверки свойств корректности, детерминированности и результативности, проведена оценка вычислительной сложности, определившая его линейную трудоемкость, что удовлетворяет требованию применения в системе реального времени с ограниченными вычислительными ресурсами.

Входные данные	*msgToParentCam* – логическая переменная, определяющая, покинул ли объект поле зрения ИУМ; *trData* – информация для продолжения мониторинга; *parentCams* – множество ИУМ-Р; *childCams* – множество ИУМ-Д; *neighborCams* – множество ИУМ-С.
Результат выполнения	передача информации для продолжения мониторинга или завершение этого процесса.

```
1  if msgToParentCam = true then
2     trData.cmd ← «route»
3     for parentCam in parentCams
4        if IsPointInsideZone(trData.lastXY, parentCam.zone) = true then
5           SendMsgToCam(trData, parentCam)
6           break
7  else
8     trData.cmd ← «track»
9     msgToCam ← SelectChildCam(trData, childCams)
10    if msgToCam != null
11       SendMsgToCam(trData, msgToCam)
12    else
13       trData.cmd ← «route»
14       msgToCam ← SelectNeighborCam(trData, neighborCams)
15       if msgToCam != null
16          SendMsgToCam(trData, msgToCam)
17 return 0
```

Рис. 3. Алгоритм децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов

Для моделирования отдельного узла – агента $c_i \in C$ представленной в работе одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга предлагается использование автомата Мура (рисунок 4), заданного пятеркой:

$$DFA = (S, X, Y, \lambda, \mu), \quad (12)$$

где S – алфавит состояний, содержащий все возможные состояния c_i; X – входной алфавит, описывающий возможные воздействия на c_i элементов множества C, приводящие к смене ее состояния; Y – выходной алфавит, описывающий воздействие c_i на элементы множества C; $\lambda: S \times X \to S$ – функция переходов; $\mu: S \to Y$ – функция выходов.

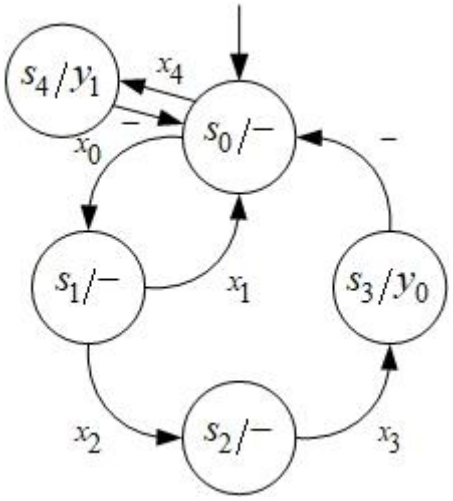

Рис. 4. Конечный автомат интеллектуального узла мониторинга - агента

Для исследования сети интеллектуальных узлов мониторинга, выполняющих функцию многоузлового мониторинга объектов, в среде имитационного моделирования AnyLogic была разработана модель, реализующая агентный подход. В рамках этапа испытания и исследования свойств разработанной имитационной модели спланирован и проведен вычислительный эксперимент анализа чувствительности отклика модели (количество шагов маршрутизации запроса N_h) к изменению уровня управляемого фактора (количества узлов сети N_c). Как видно из таблицы 1, изменение компоненты вектора параметров модели в центральных точках на 10% приводит к отклику, не превышающему 5%. Это указывает на то, что точность представления этой компоненты в имитационной модели важна. Кроме того, сравнение полученных результатов для разных центральных точек указывает на достаточную однородность чувствительности модели к изменению количества интеллектуальных узлов мониторинга на 10% для сетей с разными порядками параметра N_c.

Таблица 1. Результат анализа чувствительности модели

	$N_c^{y1}=100$				$N_c^{y2}=1000$				$N_c^{y3}=10000$			
	N_c	δN_c	$\bar{N}_h$	$\delta\bar{N}_h$	N_c	δN_c	$\bar{N}_h$	$\delta\bar{N}_h$	N_c	δN_c	$\bar{N}_h$	$\delta\bar{N}_h$
Ед.изм. / № п/п	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1	95	10	14	4,8	950	10	46,725	3,9	9500	10	150,975	4,5
2	105		14,6875		1050		48,575		10500		157,85	

Таким образом, разработаны алгоритм децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов и имитационная модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга. Спланирован и проведен вычислительный эксперимент, подтверждающий чувствительность отклика модели одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга – количество шагов маршрутизации запроса, к изменению фактора – количество узлов в составе сети.

В четвертой главе предложена структурная модель взаимодействия программных модулей многоузлового мониторинга объектов для подсистемы видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга с децентрализованной структурой.

На основе анализа существующих программно-аппаратных решений интеллектуальных узлов мониторинга была разработана многоуровневая архитектура ПО интеллектуальных узлов мониторинга, для которой были определены: место программных модулей поддержки децентрализованного процесса многоузлового мониторинга объектов, интерфейсы взаимодействия указанных модулей с другими компонентами ПО интеллектуальных узлов мониторинга.

В качестве инфраструктуры, поддерживающей взаимодействие узлов сети интеллектуальных узлов мониторинга, на основе проведенного анализа обоснованно выбрана инфраструктура CAN-HLP (Controller Area Network Higher Level Protocol) с транспортными классами протокола DeviceNet. На основе этого разработана обобщенная схема двухуровневой C2C (Content Addressable Network to Controller Area Network) архитектуры ПО узла сети интеллектуальных узлов мониторинга (рисунок 5).

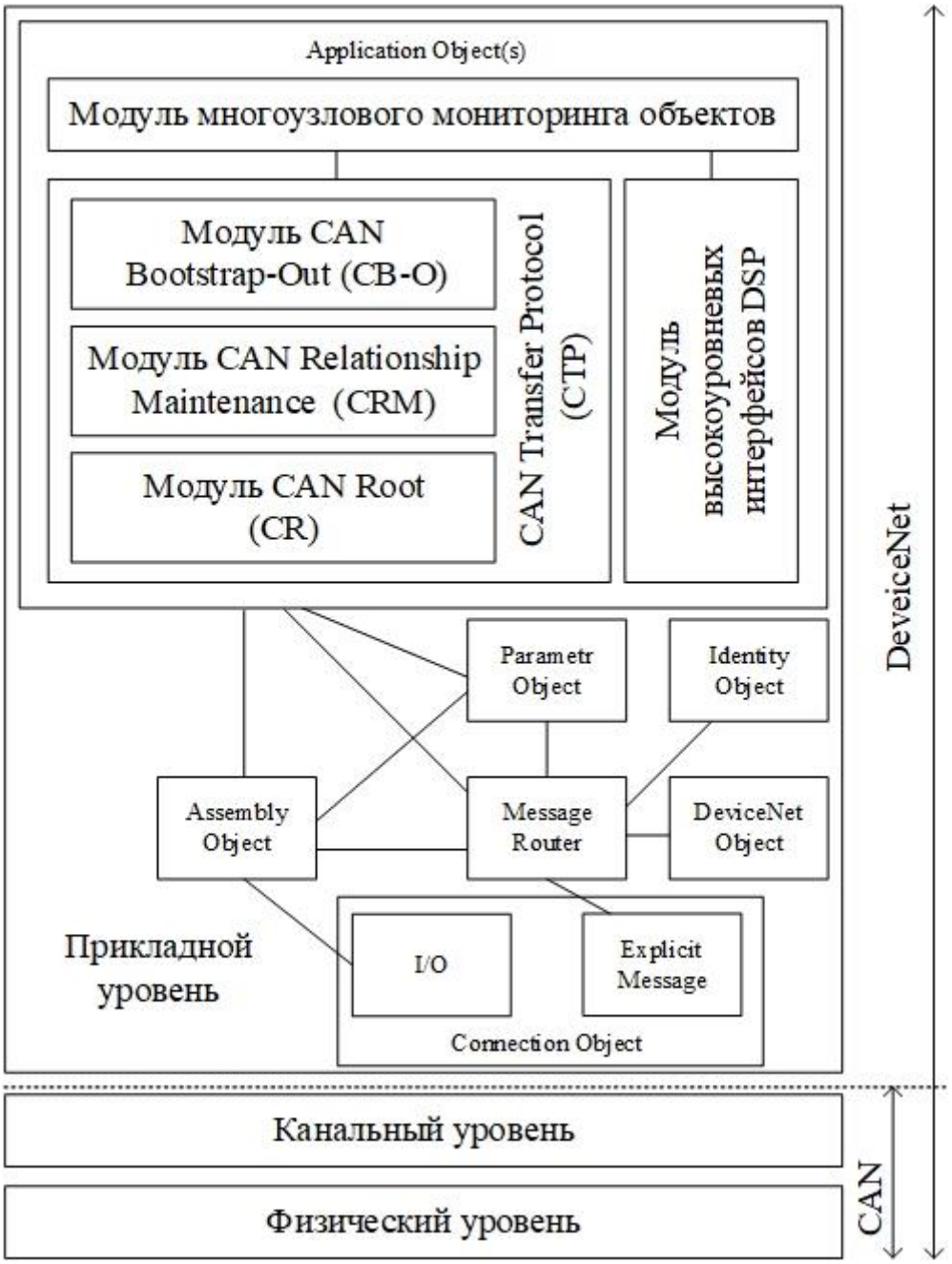

Рис. 5 Схема двухуровневой архитектуры C2C

Для предложенной архитектуры, на основе обоснованно выбранного фреймворка разработки ПО AnyLogic Java, были определены: java-классы *Camera*, *Node*, *Zone* и *Location*, задающие координаты точек в зонах ответственности узлов сети интеллектуальных узлов мониторинга и метод *splitZoneWith()*, обеспечивающий разделение зон ответственности узлов с учетом ближайших соседей.

Была разработана и программно реализована спецификация протокола взаимодействия программных модулей функции многоузлового мониторинга объектов в сети интеллектуальных узлов мониторинга, основанная на расширении безопасных сокетов клиент/серверного взаимодействия JSSE (Java

Secure Socket Extension) и обеспечивающая взаимодействие множества объектов-агентов по протоколу SSL (рисунок 6).

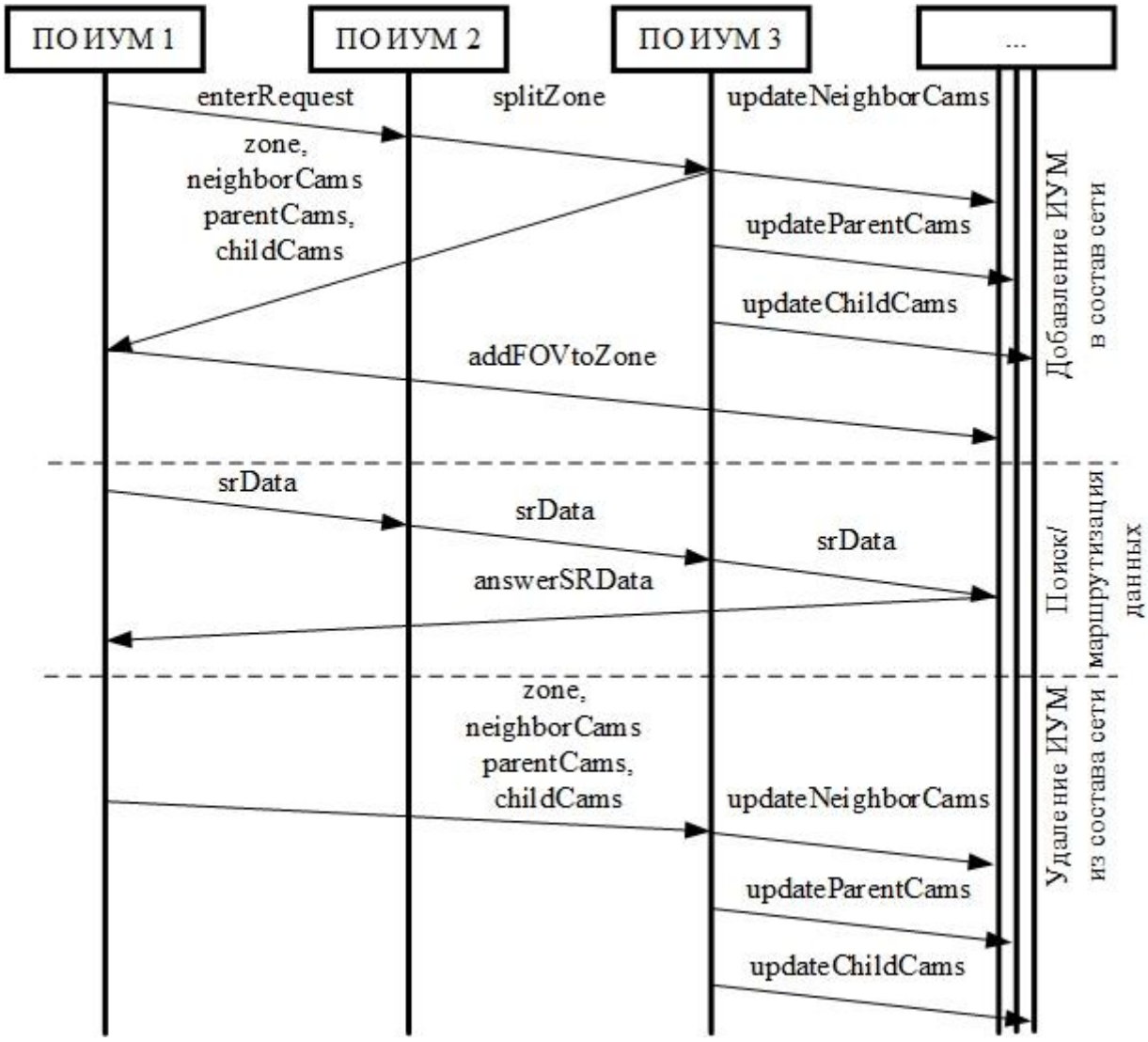

Рис. 6. Разработанная спецификация протокола взаимодействия программных модулей функции многоузлового мониторинга объектов в сети интеллектуальных узлов мониторинга

В качестве синтаксической базы протокольных блоков данных разработанного протокола предложено использование спецификации формата обмена данными JSON, а класс *JSONObject* – в качестве объектной основы метода их кодирования/декодирования.

Предлагаемая программная реализация является кроссплатформенной и выполняется на уровне трансляции байт-кода Java, поскольку фреймворк прикладного уровня (рисунок 5) предложенной многоуровневой структуры ПО функции многоузлового мониторинга объектов сети интеллектуальных узлов мониторинга опционально поддерживает виртуальную Java-машину (Virtual Java Machine – VJM).

Разработанные архитектурные решения, спецификация протокола и ПО модулей многоузлового мониторинга объектов реализованы в виде подгружаемого модуля для образа ПО прототипа интеллектуальных узлов мониторинга. Их эффективность была исследована при проведении натурного эксперимента на опытном участке многоканальной системы видеомониторинга ООО «Автоматические системы». В его рамках были реализованы процессы имитации каскадного отказа интеллектуальных узлов мониторинга (отказ 5 из 10 узлов сети с интервалом 1 минута и периодом восстановления связи 5 минут) и масштабирования структуры опытного участка (удвоение количества интеллектуальных узлов мониторинга). Профилем нагрузки опытного участка была реализация мониторинга объекта с траекторией прохождения в пределах полей зрения всех узлов участка, а также реализация поочередного одновременного многоузлового мониторинга 1, 5 и 10 объектов. Сравнение производилось с контрольным участком многоканальной системы видеомониторинга, имеющим аналогичные параметры и централизованную функцию многоузлового мониторинга объектов. Результаты экспериментов показали преимущества децентрализованной архитектуры программного обеспечения по свойствам отказоустойчивости и масштабируемости. Имитация указанных ситуаций отказа и масштабируемости узлов на экспериментальном участке также показала снижение нагрузки на сервер видеоаналитики от 18 до 42% в зависимости от условий многоузлового мониторинга объектов. При этом было выявлено, что в условиях реализации отказов узлов и/или масштабирования структуры сети интеллектуальных узлов мониторинга из-за неравномерности распределения профиля нагрузки в период эксплуатации на экспериментальном участке латентность отображения информации многоузлового мониторинга на узле оператора, в сравнении с работой контрольного участка, в среднем возросла на 8–12%, что связано с децентрализацией функций управления.

Таким образом, разработана структурная модель взаимодействия программных модулей многоузлового мониторинга объектов для подсистемы видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга с децентрализованной структурой. На реализованные элементы специального ПО процесса многоузлового мониторинга объектов в одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в реестре ФИПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы являлась разработка математического и программного обеспечения децентрализованного управления многоузловым мониторингом объектов для повышения отказоустойчивости подсистемы видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга.

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ состояния проблемы обеспечения масштабируемости и отказоустойчивости программного обеспечения многоузлового мониторинга объектов в многоканальной системе видеомониторинга.

2. Разработана теоретико-множественная модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга, отличающаяся представлением периметра наблюдения за объектом мониторинга в виде виртуального пространства, разделяемого между множеством интеллектуальных узлов мониторинга, используемого для распределенного хранения их координатно-адресных параметров, обеспечивающая формирование логической сетевой инфраструктуры для многоузлового мониторинга объектов.

3. Разработан алгоритм децентрализованного управления функцией многоузлового мониторинга объектов, отличающийся учетом траектории перемещения объекта мониторинга и сформированной логической сетевой инфраструктуры многоканальной системы видеомониторинга, и обеспечивающий решение интеллектуальным узлом мониторинга задачи выбора узла – получателя данных об объекте с целью продолжения его мониторинга.

4. Разработана имитационная модель одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга, отличающаяся использованием *d*-мерного виртуального пространства координат одноранговой пиринговой сети CAN и обеспечивающая реализацию протокола взаимодействия агентов в процессе многоузлового мониторинга объектов.

5. Разработана структурная модель взаимодействия программных модулей многоузлового мониторинга объектов для подсистемы видеоаналитики многоканальной системы видеомониторинга с децентрализованной структурой, отличающаяся реализацией протокола взаимодействия агентов на основе наложения уровня одноранговой пиринговой сети CAN на уровень сетевой инфраструктуры Controller Area Network, обеспечивающая функционирование одноранговой сети интеллектуальных узлов мониторинга в условиях масштабирования и отказов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях списка ВАК:

1. Николаев, Д. А., Лебеденко, Е. В. Моделирование процесса децентрализованного управления многокамерным сопровождением объектов в подсистеме видеоаналитики системы видеонаблюдения //Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 4 (78). – С. 41–46.

2. Николаев, Д. А., Лебеденко, Е. В., Пимонов, Р. В. Подходы к имитационному моделированию системы видеонаблюдения с децентрализованной структурой и подсистемой видеоаналитики реализующей функцию многокамерного сопровождения объектов //Системы управления и информационные технологии. – 2020. – № 2. – С. 9–14.

3. Николаев, Д. А., Архитектура программного обеспечения для многокамерного сопровождения в системах видеонаблюдения с децентрализованной структурой //Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. № 4 (31). – С. 6–7.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:

4. Nikolaev, D. Construction of a parametric model of competitive access in relational databases by using a random forest method / D. Gromey, E. Lebedenko, D.

Nikolaev, T. Rozhkova //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control system. – 2019. – Vol. 3, №2 (99). – p. 15–24.

Свидетельства о государственной регистрации программ и патенты:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021612135. Модуль децентрализованного управления функцией многокамерного сопровождения «CAN_MCT_Control» / Д.А. Николаев, Э.А. Яндашевская заявители и правообладатели: Д.А. Николаев, Э.А. Яндашевская; заявл. 04.02.2021; опубл. 11.02.2021.

6. Патент на полезную модель RU 205 471 U1, Российская Федерация. Интеллектуальная камера децентрализованной системы видеонаблюдения / Д.А. Николаев; заявитель и патентообладатель Д.А. Николаев; заяв. – №2020126993 от 11.08.2020; опубл. 15.07.2021 бюл. №20: Роспатент, 2021.

Статьи и материалы конференций:

7. Nikolaev, D. A. Detecting, tracking and identification of objects by multi-chamber system of video surveillance with predictive positioning of objects //Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis. Proceedings of the XX-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA. – 2015. p. 316–320.

8. Николаев, Д. А., Лебеденко, Е. В. Алгоритмы децентрализованного управления многокамерным сопровождением в телевизионных охранных системах //Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд органов государственной власти Российской Федерации: XI Всероссийская межведомственная научная конференция: материалы и доклады. В 10 ч. Ч. 9. – Орёл: Академия ФСО России, 2019. – С. 16–19.

9. Nikolaev, D. A. To the question of multi-camera support in video surveillance systems //Modern informatization problems in economics and safety. Proceedings of the XXIV-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA. – 2019. p.101–107.

10. Николаев, Д. А., Лебеденко, Е. В. К вопросу о моделировании систем с децентрализованным управлением при многокамерном сопровождении объектов //Информационные технологии моделирования и управления. – 2019. – Т. 116. – № 2. – С. 90–100.

11. Nikolaev, D. A., Lebedenko E. V. Modeling of decentralized systems on the example of a CCTV system with a sub-system of video analytics //Modern informatization problems in simulation and social technologies. Proceedings of the XXV-th International Open Science Conference, Yelm, WA, USA. – 2020. p. 173–178.

Подписано в печать 14.10.2021.
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № 170
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14