СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ИНФОКОММУНИКАЦИИ

2025, №1(1)

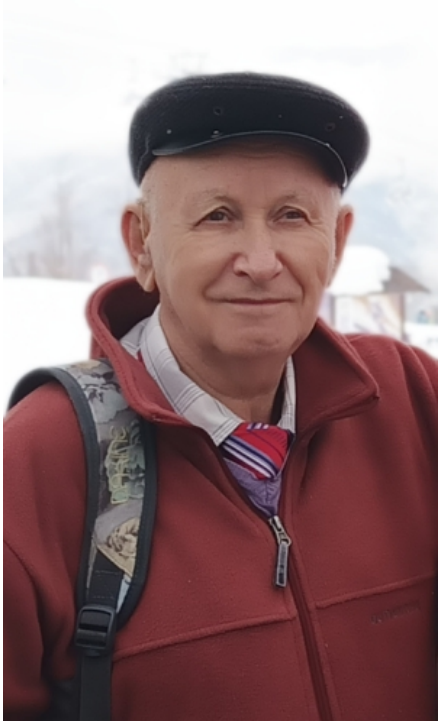
sys-engine.ru

Системная инженерия и инфокоммуникации

№1(1), 2025

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г.
Сетевое издание размещено по адресу: sys-engine.ru

Ко дню рождения профессора М.Г. Дмитриева



Шестого апреля исполняется 78 лет советскому и российскому математику, специалисту в области прикладной математики и информатики, члену Российской Академии естественных наук, доктору физико-математических наук, профессору Михаилу Геннадьевичу Дмитриеву.

Путь Михаила Геннадьевича в стратегическую элиту современного прикладной математики информатики — выпускника механико-математического факультета Днепровского государственного университета, был предопределен исследованиями сингулярных возмущений в задачах оптимального управления.

С 1975 по 1986 год М.Г. Дмитриев работал в Красноярском ВЦ СО АН, затем работал в Туркменской академии наук. С 1992 года — главный научный сотрудник Института программных систем РАН. С 1995 по 1998 год был ректором «Университета города Переславля им. А.К. Айламазяна». С 2003 по 2012 год работал в Российском государственном социальном университете, где заведовал кафедрой прикладной математики, с 2007 по 2017 г. был профессором Национальный исследовательского университета «Высшая школа экономики».

В настоящее время Михаил Геннадьевич является главным научным сотрудником 71 Отдела интеллектуальных динамических систем и когнитивных исследований Института проблем искусственного интеллекта Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской Академии Наук.

Михаил Геннадьевич автор более 250 научных работ и нескольких монографий. Область научных интересов — асимптотические методы в теории оптимального управления, нелинейный синтез, системный анализ, моделирование социально-экономических систем. Михаил Геннадьевич автор ряда математических моделей, имеющих социально-экономическое значение, таких как модель «власть–общество–экономика» для случая слабокоррумпированной дискретной иерархии, макромодель «взаимоотношений бизнеса и власти», модель «власть–общество–инфраструктура–производство». Кроме того, Михаил Геннадьевич проводит исследования социо-эколого-экономических процессов в Арктической зоне, а также влияние миграционных потоков на экономический рост в стране.

Редколлегия журнала «СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ИНФОКОММУНИКАЦИИ» от всей души поздравляет Михаила Геннадьевича с днем рождения! В Вашем лице мы видим яркий пример беззаветного служения науке и Отечеству, высоко оценённый правительством и заслуживший признания Международного научного сообщества и глубокое уважение к Вам как блестящему ученому, воспитателю и созидателю.

Желаем Вам крепкого здоровья, благополучия, новых планов, дальнейших успехов в научной деятельности. Выражаем надежду на установление взаимовыгодного научно-технического сотрудничества с Вами, желаем Вам талантливых учеников, продолжателей Вашего научного направления!

Содержание

Управление складским манипуляционным роботом с применением технологии ассоциативной памяти

С.А.К. Диане [1], Е.А. Аникина [2]

[1]*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия*
[2]*МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия*

***Аннотация* – В статье описана обобщенная структура аппаратно-программного обеспечения роботизированной складской ячейки на базе автономного многозвенного манипуляционного робота. Предложены модели и алгоритмы для системы управления роботом-манипулятором. Для решения обратной задачи кинематики применена технология ассоциативной памяти. Задача формирования маршрута движения робота-манипулятора решается графоаналитическим методом. Отработка движений по перемещению целевого объекта основана на нелинейной интерполяции обобщенных координат робота по матрице Якоби. Приведены результаты экспериментальных исследований с оценкой работоспособности предложенных алгоритмов и выводы о перспективах развития данного подхода.**

Ключевые слова – автоматизированный склад, складская ячейка, хранение товаров, манипуляционный робот, ассоциативная память, поиск пути на графе.

I. ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированные системы хранения (АСХ) с одним или несколькими автономными роботами, выступающими в роли центрального элемента автоматизации, играют все более важную роль в хозяйственной деятельности промышленных предприятий и складов. На рис. 1 представлены фотографии некоторых манипуляционных роботов, способных перемещать объекты в комнате или переставлять их в рабочей зоне.

Транспортно-манипуляционный робот *Mobile Dual-Arm Robot* [1] предназначен для перемещения коробок на небольшом складе. Преимуществом робота является наличие двух взаимодействующих друг с другом манипуляторов, что позволяет осуществлять такие комплексные действия, как захват объекта из выдвигаемой или удерживаемой на весу коробки. Основания манипуляторов могут перемещаться по вертикали, обеспечивая достижимость как нижних, так и верхних полок стеллажей.

а) б)

Рис. 1. Системы хранения на основе манипуляционных роботов а) Mobile Dual-Arm Robot (Hitachi, Япония); б) АРМ Cartman (Australian Centre for Robotic Vision, Австралия)

Определенной популярностью пользуются складские роботы-манипуляторы стационарного типа. Так, автономный робот-манипулятор *Cartman* [2], изображенный на рис. 1, *б*, с декартовой системой координат обладает рабочей зоной 1,4 м^3, имеет 6 степеней подвижности и вакуумный захват.

Существуют также похожие по компоновке роботы с дельта-кинематикой, способные развивать значительно большие скорости движения [3], но уступающие по размерам рабочей зоны.

Отмеченные выше роботы свидетельствуют о возможности модульного подхода к организации АСХ для малых складских помещений. Фактически речь идет о создании роботизированной складской ячейки, где автономный манипуляционный робот закреплен на неподвижном основании или подвесе, а места хранения товаров совпадают с рабочей зоной манипулятора.

Такого рода складские ячейки характеризуется компактностью, простотой наладки и эксплуатации. В числе преимуществ такого способа организации АСХ стоит дополнительно отметить оперативность развертывания, высокую скорость выдачи товаров и постановки их на хранение, а также безопасность, достигаемую за счет разграничения рабочих зон робота-манипулятора и людей-сотрудников склада.

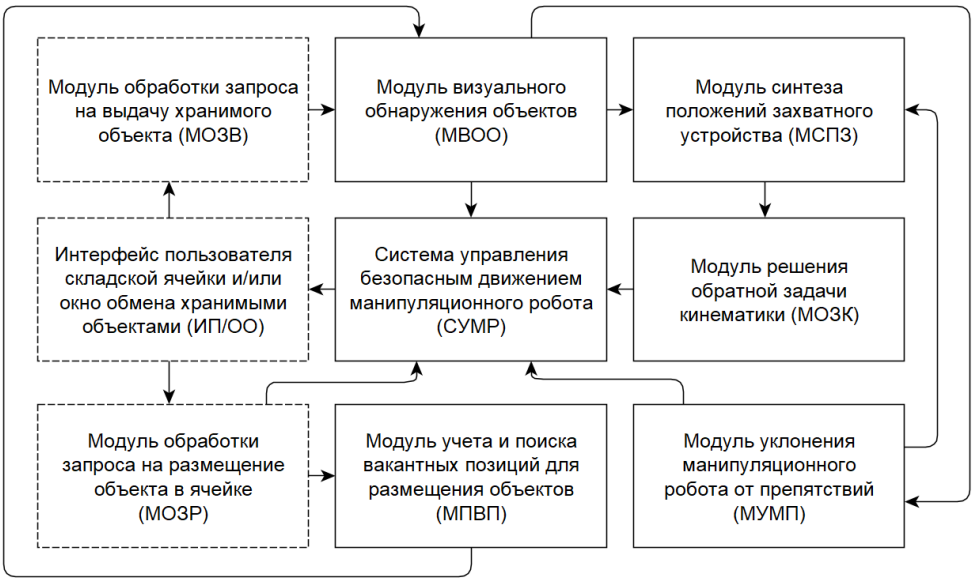


Рис. 2. Обобщенная архитектура аппаратно-программного обеспечения роботизированной складской ячейки

Разработка АСХ на основе манипуляционных роботов не сводится к простой интеграции готовых мехатронных и аппаратно-программных компонент. Для такого рода систем возникает потребность в разработке средств принятия решений и управления, построенных на принципах интеллектуальной обработки информации. Обобщенная архитектура аппаратно-программного обеспечения АСХ с элементами роботизации представлена на рис. 2.

В состав АСХ на базе робота-манипулятора должен входить интерфейс пользователя (в ряде случаев это просто окно приема-выдачи товаров), система управления движением робота, а также ряд модулей, отвечающих за обработку информации и принятие высокоуровневых управляющих решений.

С учетом сокращений, принятых на рис. 2, следует выделить два контура обработки информации:

– нижний контур размещения объекта на хранение, состоящий из последовательно включенных в технологический процесс модулей ИИ/ОП, МОЗР, МПВП, МВОО, МСПЗ, МОЗК, СУМР;

– верхний контур выдачи хранимого объекта, состоящий из последовательно включенных в технологический процесс модулей ИИ/ОП, МОЗВ, МПВП, МВОО, МСПЗ, МОЗК, СУМР.

Несмотря на то, что два контура весьма схожи, значительные отличия заключаются в параметрах, передаваемых в системы визуального обнаружения объектов и управления целенаправленным движением манипулятора. Отметим, что модуль уклонения манипуляционного робота от препятствий (МУМП) активируется параллельно с МСПЗ и МОЗК и выдает корректирующий вектор целеуказания. В системе же управления рассчитывается консенсусная траектория безопасного движения манипулятора.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенный обзор показал, что существуют складские системы, основанные на использовании многозвенных манипуляционных роботов (ММР) – для постановки объектов на хранение и их последующей выдачи.

В ряде случаев ММР неподвижно крепится к опорной раме некоторого контейнера (складской ячейки). Возникает задача планирования движения ММР внутри контейнера с уклонением от расположенных внутри него препятствий (частей корпуса, стеллажей, хранимых объектов).

Иными словами, основной проблемой в организации АСХ на базе ММР является наличие ограничений, прежде всего, геометрического характера. На пути к алгоритмическому решению данной проблемы формализуем геометрию некоторого составного объекта, относящегося к АСХ, в виде:

$$S_\xi = \{s_1, \ldots, s_{N(\xi)}\}, \quad (1)$$

где ξ – рассматриваемый объект; s_i – геометрические примитивы, образующие объект и маркируемые индексом $i = 1,\ldots,N(\xi) \in \mathbb{N}$.

Среди возможных типов составных объектов будем рассматривать контейнер: $\xi = C$; ММР: $\xi = M$; перемещаемый объект: $\xi = O$.

Определим операцию проверки столкновения объектов ξ и χ как поиск геометрического пересечения некоторых из элементов, входящих в их состав:

$$S_\xi \cap S_\chi = \exists i, j : (s_i \epsilon S_\xi, s_j \epsilon S_\chi \Rightarrow s_i \cap s_j). \quad (2)$$

Цель настоящего исследования заключается в разработке алгоритмов управления целенаправленным движением ММР в составе АСХ.

Как известно, управление многозвенными манипуляционными роботами на тактическом уровне информационно-управляющей системы может

осуществляться в двух основных режимах: в режиме решения прямой задачи кинематики (ПЗК) и в режиме решения обратной задачи кинематики (ОЗК).

При решении ПЗК по обобщенным координатам робота определяется конкретная точка в декартовой системе координат, в которую приходит захватное устройство манипулятора.

При решении ОЗК, наоборот, по целевой точке в декартовой системе координат определяются обобщенные координаты, в которые должны прийти звенья манипулятора. Для ангулярного робота под обобщенными координатами понимаются углы поворота сочленений.

Перемещение ММР внутри контейнера еще более усложняется с учетом того, что в захватном устройстве манипулятора может располагаться некоторый груз, подверженный столкновению с объектами рабочей зоны. Кроме того, конфигурация препятствий может меняться по мере заполнения стеллажей объектами хранения. По этой причине вместо аналитических подходов к решению ОЗК и траекторному управлению ММР удобно применять численные методы и, в частности, методы искусственного интеллекта.

В качестве такого интеллектуального метода хорошо подходит ассоциативная память (АП) – технология хранения и обработки знаний, основанная на соотнесении входных данных с эталонными векторами и последующем выполнении продуцирующих операций: фильтрации данных, классификации образов или регрессии выходных переменных.

Удобство технологий АП проявляется, с одной стороны, в лингвистической интерпретируемости логики ее работы, а с другой – в многообразии доступных подходов для ее реализации. Знания об эталонных векторах могут храниться в табличной, нейросетевой, графоаналитической и иных формах.

Задачами настоящего исследования являются:

– разработка алгоритма формирования табличной АП для сопоставления точек рабочей зоны ММР с допустимыми положениями его звеньев;

– разработка графоаналитического алгоритма поиска маршрута перемещения ММР между двумя точками рабочей области и выбор метода отработки данного маршрута в позиционном режиме;

– визуализация упрощенной модели АСХ на базе ММР и имитационное моделирование процесса перемещения целевого объекта.

III. Теория

Рассмотрим подробнее вопрос управления ММР – прежде всего на тактическом уровне при движении в целевую точку (с применением технологии АП). Затем рассмотрим стратегический уровень траекторного управления ММР при перемещении захваченного объекта (с применением графоаналитического метода). И, наконец, поясним работу исполнительного уровня ММР, реализующего позиционное управление (с применением метода нелинейной интерполяции координат).

A. Формирование ассоциативной памяти ММР

Пусть аналитическое решение ПЗК манипулятора с n степенями подвижности (на тактическом уровне управления) задается многомерным отображением следующей формы:

$$(x, y) = A(q_1, ..., q_n). \quad (3)$$

Пусть аналитическое решение ОЗК манипулятора (на тактическом уровне управления) в условиях отсутствия препятствий в рабочей зоне задается многомерным отображением следующей формы:

$$(q_1, ..., q_n) = B(x, y). \quad (4)$$

Пусть ассоциативная память табличного типа хранит аппроксимацию многомерного отображения (4):

$$(q_1, ..., q_n) = B'(x, y), \quad (5)$$

где q_1, q_2 – обобщенные координаты манипулятора; x, y – декартовы координаты концевой точки.

В таком случае выполняется приближенное равенство ассоциативного и аналитического отображений:

$$\begin{cases} B'(x,y) \approx B(x,y), \ \textit{если } D(x,y) = 1, \\ B'(x,y) = B(x^*, y^*), \ \textit{иначе}, \end{cases} \quad (6)$$

где $D(x, y) \in \{0; 1\}$ – вспомогательная логическая функция, подтверждающая принадлежность целевой точки рабочей области W манипуляционного робота, а также отсутствие столкновений ММР с препятствиями через отрицание формулы (2):

$$D(x, y) = \{(x, y) \in W\} \cup \{\neg S_M \cap S_C\}; \quad (7)$$

$(x^*, y^*) \in \mathbb{R}^2 \cap D(x^*, y^*)$ – ближайшая эталонная точка, замещающая точку целеуказания с применением евклидовой нормы:

$$(x^*, y^*) = \operatorname{argmin}_{(x^*, y^*)} \left\| (x - x^*, y - y^*) \right\|. \quad (8)$$

Обучение ассоциативной памяти может быть организовано по результатам многократного решения ПЗК через заполнение таблицы соответствий строками вида:

$$(q_1^{(i)}, ..., q_n^{(i)}) \to (x^{(i)}, y^{(i)}), \quad (9)$$

где $i = 1,\ldots,K \in \mathbb{N}$ – номер записи в таблице АП.

Обобщенные координаты Q тестовых положений манипулятора заносятся в левые (антецедентные) колонки таблицы. Рассчитанные декартовы координаты X концевой точки сохраняются в правых (консеквентных) колонках таблицы.

Взаимная инверсия антецедентных и консеквентных колонок в системе ассоциативно-регрессионного вывода позволяет вычислительно простым способом перейти от решения ПЗК к решению ОЗК по формуле:

$$(x^{(i)}, y^{(i)}) \to (q_1^{(i)}, ..., q_n^{(i)}), \quad (10)$$

которая уточняет выражение (5).

Для равномерного заполнения таблицы применяется дискретизация обобщенных координат манипулятора:

$$q_i(j) = q_i^{(start)} + \frac{j \cdot (q_i^{(end)} - q_i^{(start)})}{J_i - 1},\ j = 0,...,J_i - 1, \quad (11)$$

где $q_i^{(start)}$, $q_i^{(end)}$ – начальное и конечное значение i-й обобщенной координаты; J_i – число шагов разбиения по данной обобщенной координате.

По существу, дискретность записей таблицы, лежащей в основе АП, обуславливает приближенный характер равенств (6).

Верхняя оценка числа записей в таблице АП определяется по формуле:

$$K = \prod_{i=1}^{n} J_i . \quad (12)$$

На практике число записей сокращается, поскольку часть из них отбраковывается на этапе проверки коллизий с учетом формулы (2).

B. Траекторное и позиционное управление ММР

Для поиска маршрута движения манипуляционного робота формируется двунаправленный граф:

$$G = \{V, Q, E\}, \quad (13)$$

где V – вершины графа, совпадающие с декартовыми координатами концевой точки манипулятора, хранимыми в ассоциативной памяти; Q – обобщенные координаты манипулятора, связанные с вершинами графа; E – ребра графа.

При формировании графа вершины соединяются по принципу k ближайших соседей, где число k определяется эмпирически [4].

Входными данными алгоритма планирования пути являются декартовы координаты начальной и конечной точек маршрута $p^{(start)}$, $p^{(end)}$. Данные координаты могут отличаться от записей, хранимых в АП, поэтому применяется формула (8) для их уточнения.

Маршрут между начальной и конечной точками на стратегическом уровне управления определяется по алгоритму Дейкстры [5]:

$$P = F_{Dijkstra}(G,\ p^{(start)},\ p^{(end)}) \quad (14)$$

Отработка построенного маршрута на исполнительном уровне управления выполняется через интерполяцию декартовых и обобщенных координат ММР:

$$q_{t+\Delta t} = q_t + J_t \cdot (p_{t+\Delta t} - p_t), \quad (15)$$

где J_t – матрица Якоби манипулятора в момент времени t; Δt – интервал времени между рассматриваемыми точками траектории [6].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки эффективности разработанных моделей и алгоритмов управления ММР с применением таблично-графоаналитической АП было разработано тестовое программное обеспечение на языке Python.

В рамках виртуальной сцены производился расчет и отрисовка двухмерного контейнера АСХ (шириной: 2м, высотой: 2м), включающего полки для хранения объектов и закрепленный в центре его основания ММР ангулярного типа (длины 3 звеньев: 1 м; 0,65 м; 0,41 м).

A. Отработка механизма формирования АП

На рис. 3 представлена визуализация векторов $(x^{(i)}, y^{(i)})$ ассоциативной памяти для случая перемещения ММР без объекта в захватном устройстве. Пределы вариации улов сочленений установлены одинаковыми и соответствуют диапазону [-π/2; π/2]. Для обеспечения 10-градусного шага приращения угла число дискрет в формуле (11) выбрано равным J_i =18, i=1,2,3. Фактическое число записей в АП составило K*=1598.

По форме облака эталонных точек можно заключить, что кинематические параметры манипулятора позволяют ему свободно перемещаться между окном приема-выдачи хранимых объектов и всеми полками складской ячейки за исключением правой нижней.

На рис. 4 представлена визуализация векторов $(x^{(i)}, y^{(i)})$ ассоциативной памяти для более сложного случая перемещения ММР – при удержании объекта в захватном устройстве. Как и следовало ожидать, размер области достижимости уменьшился ввиду необходимости избегать столкновений объекта с препятствиями, согласно формуле (2). Фактическое число записей в АП составило K* = 1128.

B. Отработка целенаправленных движений ММР

В целях повышения наглядности при исследовании графоаналитического алгоритма планирования маршрута дискретизация положений ММР была укрупнена.

Так, на рис. 5 представлена визуализация векторов $(x^{(i)}, y^{(i)})$ ассоциативной памяти при увеличении шага дискретизации в формуле до 20 градусов. Число дискрет в формуле (11) было выбрано равным J_i =9, i=1,2,3. Фактическое число записей в АП составило K* = 134.

На рис. 6 представлена визуализация графа G потенциальных перемещений ММР. При построении графа использовалось число ближайших соседей $k \geq 3$. Также на рис. 6 отображен маршрут движения манипуляционного робота, сформированный алгоритмом Дейкстры по формуле (14). Начальная и конечная точки маршрута (точки захвата и размещения целевого объекта) выбирались вручную пользователем программы.

Плавность движений робота при отработке маршрута достигается за счет итеративного расчета формулы (15) для последовательных опорных точек маршрута p_t.

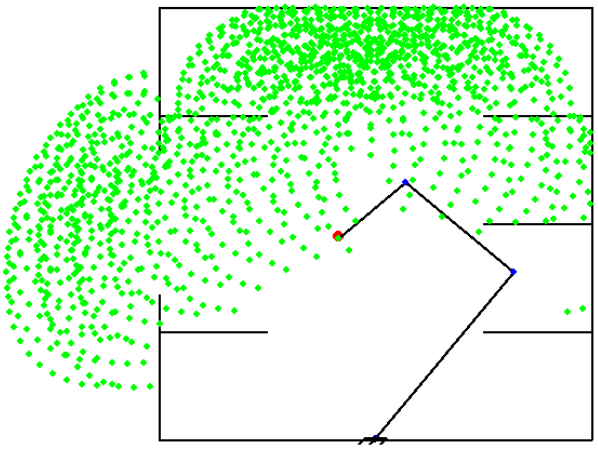


Рис. 3. Эталонные точки рабочей зоны манипулятора (10° шаг приращения углов)

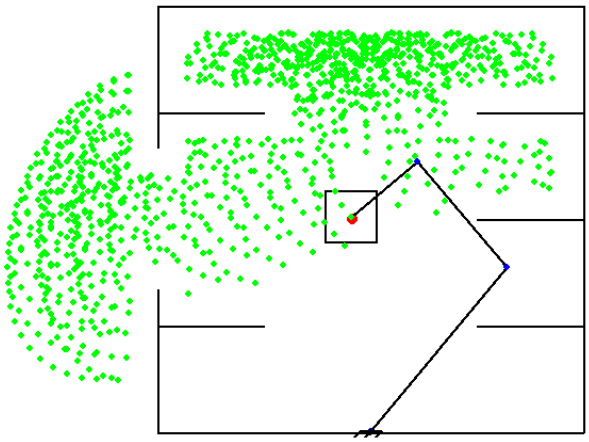


Рис. 4. Эталонные точки рабочей зоны манипулятора с захваченным объектом (10° шаг приращения углов)

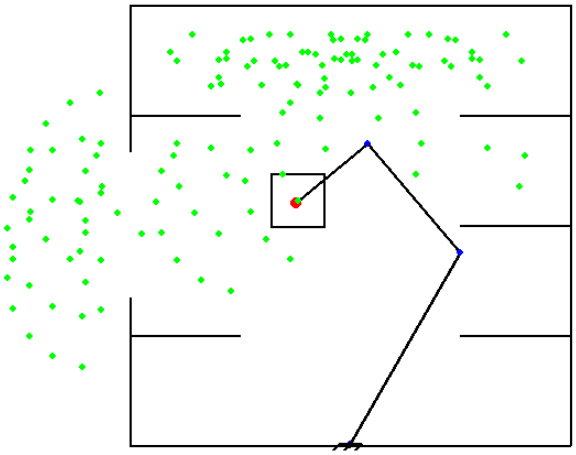


Рис. 5. Эталонные точки рабочей зоны манипулятора с захваченным объектом (20° шаг приращения углов)

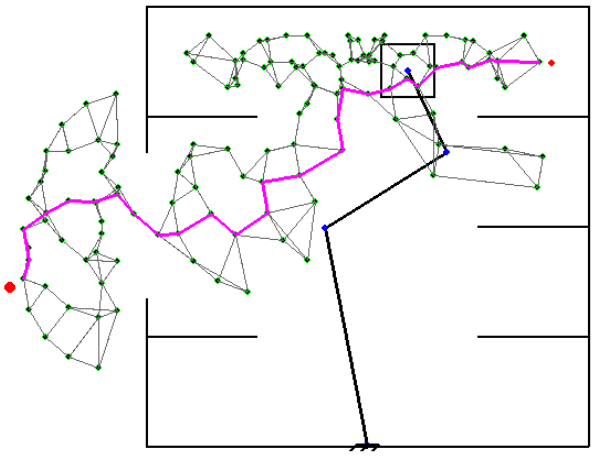


Рис. 6. Граф потенциальных перемещений манипулятора и сформированный на нем маршрут (фиолетовая линия)

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты экспериментов подтверждают, что разработанная модель табличной АП и сопряженный с ней граф G рабочей зоны ММР в действительности позволяют осуществить планирование целенаправленных движений робота с применением формул (14) и (15). Сформированный маршрут (рис. 6) достаточно точно улавливает геометрию складской ячейки. Вместе с тем наблюдаются многочисленные изломы траектории. Плавность маршрута может быть повышена как за счет уменьшения шага дискретизации обобщенных координат ММР при построении графа G, так и за счет применения сплайнов для сглаживания траектории [7].

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформированная обобщенная структура аппаратно-программного обеспечения автоматизированной системы хранения на базе робота-манипулятора отражает наличие двух ее важных функциональных возможностей – постановки объектов на хранение и выдачи объектов по запросу человека-оператора.

В целях обеспечения данного функционала алгоритмическое обеспечение АСХ на базе стационарного ММР должно решать три основных задачи: восприятие сцены, определение целевого положения захватного устройства и планирование движений манипуляционного устройства.

В проведенном исследовании основное внимание было уделено вопросу планирования движений ММР. На пути к данной цели была решена задача формирования табличной ассоциативной памяти в сочетании с графом потенциально достижимых положений для тактического уровня управления ММР. Кроме того, была решена задача планирования маршрута движения ММР за счет применения алгоритма Дейкстры на стратегическом уровне управления. На исполнительном же уровне был применен метод нелинейной интерполяции обобщенных координат ММР по матрице Якоби

Визуализация упрощенной схемы складской ячейки с входящим в ее состав ММР позволила оценить эффективность формируемой траектории и сделать выводы о возможности повышения ее гладкости.

В дополнение к указанным выше соображениям следует отметить, что дальнейшие перспективы развития проведенного исследования включают:

– динамическое перестроение графа потенциальных перемещений при изменении числа или расположения хранимых объектов;

– добавление в алгоритм планирования маршрута эвристики по минимизации изменений обобщенных координат ММР;

– анализ погрешностей ассоциативной регрессии декартовых координат концевой точки ММР в режиме ОЗК при различной дискретизации его опорных положений;

– построение и исследование трехмерных моделей АСХ и ММР с различными конструктивными и кинематическими параметрами.

– автоматизированный выбор параметров расположения и геометрии ММР по критерию минимизации времени приема и выдачи хранимых объектов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] N. Kimura et al., “Mobile dual-arm robot for automated order picking system in warehouse containing various kinds of products,” Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 332–338, 2015.

[2] M. McTaggart et al., “Mechanical design of a cartesian manipulator for warehouse pick and place,” arXiv:1710.00967, pp. 1–7, 2017.

[3] Пат. 201065 РФ, МПК B25J 9/00. Модульная производственная ячейка на основе малогабаритного робота / Романов А. М., Романов М. П., Шютц В. А. Заявл. 15.06.2020. Опубл. 25.11.2020. Бюл. № 33. – 7 с.

[4] W. Dong, C. Moses, K. Li, “Efficient k-nearest neighbor graph construction for generic similarity measures,” Proc. of the 20th international conference on World wide web (WWW '11). Association for Computing Machinery, pp. 577–586, 2011.

[5] Z. Haruna, M. Mu’azu, A. Umar, G. Ufuoma, “Path Planning Algorithms for Mobile Robots: A Survey,” In book: Motion Planning for Dynamic Agents, 2023.

[6] M. Walthe, A. Sewohl, H. Schlegel, R. Neugebauer, M. Walther, “Trajectory planning for kinematically redundant robots using jacobi matrix – an industrial implementation,” Journal of Machine Engineering, pp. 24-35, 2017.

[7] P. E. Koch, K. Wang, “Introduction of b-splines to trajectory planning for robot manipulators,” vol. 9, no. 2, pp. 69-80, 1988.

Информация об авторах:

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории №90 Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422

Аникина Екатерина Александровна, бакалавр МИРЭА – Российского технологического университета, г. Москва, Россия, e-mail: katerina.anikina.04@mail.ru

Control of a warehouse manipulator using associative memory technology

S. A. K. Diane[1], E. A. Anikina[2]

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences[1]

MIREA – Russian Technological University[2]

***Abstract* – The article describes the generalized structure of the hardware and software of a robotic storage cell based on an autonomous multi-link manipulation robot. Models and algorithms for the robot manipulator control system are proposed. Associative memory technology is used to solve the inverse kinematics problem. The task of forming the route of the robot manipulator is solved through graph analysis. Performing movements to reach a target object is based on nonlinear interpolation of generalized robot coordinates using the Jacobi matrix. The results of experimental studies with an assessment of the operability of the proposed algorithms and conclusions about the prospects for the development of this approach are presented.**

***Keywords* – automated warehouse, storage cell, storage of goods, manipulation robot, associative memory, graph pathfinding.**

References

[1] N. Kimura et al., “Mobile dual-arm robot for automated order picking system in warehouse containing various kinds of products,” Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 332–338, 2015.

[2] M. McTaggart et al., “Mechanical design of a cartesian manipulator for warehouse pick and place,” arXiv:1710.00967, pp. 1–7, 2017.

[3] Pat. 201065 RF, MPK B25J 9/00. Modul'naya proizvodstvennaya yacheyka na osnove malogabaritnogo robota (Modular production cell based on a small-sized robot) / Romanov A. M., Romanov M. P., Shyutts V. A. Zayavl. 15.06.2020. Opubl. 25.11.2020. Byul. № 33. – 7 s. (In Russian).

[4] W. Dong, C. Moses, K. Li, “Efficient k-nearest neighbor graph construction for generic similarity measures,” Proc. of the 20th international conference on World wide web (WWW '11). Association for Computing Machinery, pp. 577–586, 2011.

[5] Z. Haruna, M. Mu’azu, A. Umar, G. Ufuoma, “Path Planning Algorithms for Mobile Robots: A Survey,” In book: Motion Planning for Dynamic Agents, 2023.

[6] M. Walthe, A. Sewohl, H. Schlegel, R. Neugebauer, M. Walther, “Trajectory planning for kinematically redundant robots using jacobi matrix – an industrial implementation,” Journal of Machine Engineering, pp. 24-35, 2017.

[7] P. E. Koch, K. Wang, “Introduction of b-splines to trajectory planning for robot manipulators,” vol. 9, no. 2, pp. 69-80, 1988.

Алгоритмы активного восприятия внешней среды для автономного мобильного робота

Д.В. Верхоланцев

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

Аннотация **– Статья посвящена изучению алгоритмов активного восприятия для максимизации получаемой информации о среде функционирования автономного мобильного робота. Наиболее эффективным методом решения поставленной задачи можно считать применение автоматизированной системы управления положением видеокамеры. Для оценки полноты осмотра внешней среды бортовой видеокамерой использован метод конечных элементов. Применение простейшего интеллектуального алгоритма выбора направления осмотра в двухмерной симуляции позволило добиться 12% прироста эффективности для помещений из тестового набора.**

Ключевые слова **– робототехника, алгоритмы, активное восприятие, мобильные роботы.**

I. ВВЕДЕНИЕ

Множество компаний по всему миру ведут активные исследования и разработки в области создания сервисных роботов для решения разнообразных задач, среди которых сопровождение и помощь людям, доставка грузов, патрулирование территории, выполнение работ на складах и заводах и т.д. На первый план при создании таких роботов выходит потребность в развитии технологий технического зрения, обеспечении скорости и точности детекции объектов, достижении полноты формируемой карты внешней среды и повышении степени интерактивности взаимодействия с пользователем.

В связи с повышением потребности в роботизации предлагаются различные варианты решения вышеупомянутых задач. Ведутся активные разработки в области алгоритмов распознавания и трекинга объектов, картографирования и локализации с применением подходов на основе нейронных сетей. Параллельно быстрыми темпами развиваются вычислительные устройства, ориентированные на ускорение обработки нейросетевых моделей. Однако, стоит заметить, что данных улучшений недостаточно, так как их результативность напрямую зависит от получаемой информации. Здесь на передний план выходит усовершенствование алгоритмов восприятия.

Одной из первых работ в этой области принято считать диссертацию Дж. Тененбаума, посвящённую аккомодации в компьютерном зрении [1]. Автор описывает подход отличный от обычных систем обработки изображений тем, что аккомодация сенсора происходит автоматически и рассматривается как неотъемлемая часть процесса распознавания. Под аккомодацией в указанной работе предполагается понимать автоматическое изменение фокусного расстояния и управление фильтром нейтральной плотности для изменения яркости изображения.

Иную методику разрешения неопределённости в своей работе предлагают Х. Барроу и Р. Поппстоун [2]. Исследователи указывают на возможность получения большего количества информации путём изменения точки обзора или положения исследуемого объекта.

Определение концепции активного восприятия появляется в работе Дж. Алаимоноса и других исследователей, посвящённой активному зрению [3]. Учёные предлагают следующую концепцию: “Наблюдатель называется активным, когда он занят какой-либо деятельностью, целью которой является контроль геометрических параметров сенсорного аппарата. Целью деятельности является манипулирование ограничениями, лежащими в основе наблюдаемых явлений, с целью улучшения качества результатов восприятия”.

Эти концепции нашли своё применение в решении многих задач в области робототехники. Отдельным направлением активного восприятия можно считать системы активной одновременной локализации и картографирования (Active SLAM, ASLAM), которым посвящена соответствующая работа [4]. Эти исследования концентрируются на активном расчёте траекторий перемещения мобильных роботов для получения карты местности с минимальной ошибкой.

Иное применение системы активного восприятия нашли в сельском хозяйстве для контроля и сбора урожая [5]. Здесь ведутся активные исследования, направленные на создание алгоритма управления моторизированным взглядом.

Альтернативный вариант понимания активного восприятия в своей работе [6] представили исследователи из университета Васэда. Они указывают на необходимость активного построения взаимосвязей инструмент – объект – действие при взаимодействии агента с окружающей средой.

Также на потребность в активном исследовании указывают авторы работы, посвящённой визуально-языковой навигации [7]. Здесь система целенаправленного изучения окружающего пространства позволяет устранять неопределённости при выполнении поставленных задач.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Важным условием эффективности выполнения задачи робототехнической системой является достаточность объёма информации о среде функционирования. В случае же решения задачи мониторинга внешней среды максимизация информации об области изучения является приоритетным процессом. Отсюда возникает потребность в создании подсистемы, осуществляющей целенаправленные действия, обеспечивающие увеличение доступной для обработки информации.

Пусть положение робота определяется вектором линейных координат и угла ориентации на плоскости $p_r = \{x_r, y_r, \alpha_r\}$, а маршрут робота задан множеством точек $T = \{p_1, \dots, p_N\}$. Положение видеокамеры задается вектором $p_c = \{x_c, y_c, \alpha_c\}$, где угол поворота α_c определяется согласно выбранному закону. Дискрета местности имеет вид $d = \{x, y, v\}$, где v – отметка посещённости. Число дискрет местности составляет $n_x * n_y$, $D = \{d_1, \dots, d_N\}$ – множество всех дискрет, $D^* = \{d_{i1}, \dots, d_{ik}\}$ – множество осмотренных дискрет.

Пусть дополнительно на множестве D задан граф местности $G = \{V, E\}$, где V – множество вершин, E – множество ребер. Причем местоположения вершин совпадают с положением дискрет местности. Граф G может быть использован для поиска первичного (опорного) маршрута движения робота при осмотре внешней среды.

Требуется найти такой закон изменения угла видеокамеры α_c, при котором выполняется $|D^*| \to max$.

III. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ

A. Определение понятия активного восприятия в задачах сервисной робототехники

Восприятие – процесс обработки данных от сенсорного оснащения робота с целью выявления информации необходимой для последующего выполнения поставленной перед робототехнической системой задачи. Стандартное восприятие происходит параллельно основной деятельности сервисного робота и не предполагает целенаправленного осуществления действий, направленных исключительно на расширение имеющейся информации о среде функционирования.

Стандартный вариант реализации системы восприятия подразумевает ограничение получаемой информация следующим набором факторов:

- физическими параметрами сенсоров (угол обзора и фокусное расстояние видеокамеры, система развёртки и дальность действия лидара);
- конструкцией робота (наличие видеокамеры спереди не позволяет получать информацию об объектах, расположенных сзади);
- имеющейся вычислительной мощностью (увеличение числа сенсоров приведёт к увеличению количества ресурсов, требуемых для обработки их данных);
- параметрами сцены (необходимый объект может быть перегорожен другим объектом сцены).

При этом действия робота направлены на достижение поставленной цели на основе имеющейся информации, но не на её расширение. Таким образом возникает вероятность недостижимости поставленной цели из-за неполноты доступной ему информации.

Анализ существующих трактовок [1–3] позволяет сделать обобщение и понимать активное восприятие как процесс осуществления роботом действий, направленных на расширение объёма получаемых данных путём изменения физических параметров сенсоров, собственной конструкции или параметров сцены на основе уже имеющейся информации о среде функционирования и поставленной задачи.

Подход, основанный на использовании системы активного восприятия, позволяет получать более полную и актуальную информацию о среде функционирования робота, что в свою очередь позволяет с большей результативностью выполнять поставленные задачи. Многочисленные исследования предлагают множество методов решения описанной проблемы. Однако, далеко не все подходы к реализации таких систем в равной степени эффективны.

Автоматическое изменение физических параметров сенсоров (фокусного расстояния, угла обзора, дальности функционирования дальнометрических сенсоров, плотности облака точек лидара и др.) зачастую является невозможным при использовании стандартных аппаратных решений, а разработка проприетарных устройств приведёт к удорожанию итоговой системы и снизит её надёжность, усложнив конструкцию и, как следствие, увеличив вероятность ошибки. Изменение параметров сцены так же может быть невозможным из-за её особенностей, таких как неподвижность определённых объектов в ней. Таким образом, этот метод сводится к изменению точки наблюдения путём смещения сенсорного блока (рис. 1).

Добиться этого можно несколькими способами. Первый подразумевает статичную конфигурацию сенсорного оборудования и предполагает перемещение всего робота.

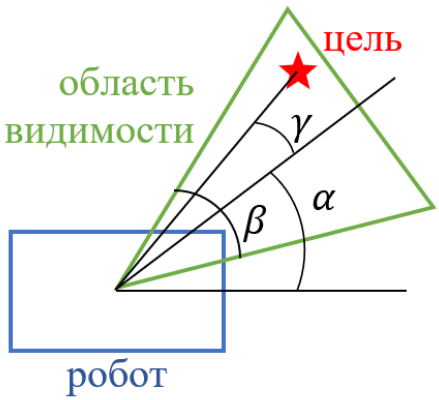


Рис. 1. Геометрическая схема системы активного восприятия на базе поворотной бортовой видеокамеры

Недостатком такого подхода является необходимость перестройки маршрута движения робототехнической системы, осуществление которого потребует дополнительных временных и энергетических затрат. При этом существенные ограничения на систему накладывают конструкционные параметры робота, небольшие размеры не позволят наблюдать объекты, расположенные, например, на столе, а увеличение габаритов приведёт к ухудшению проходимости и сделает невозможным достижение труднодоступных мест. Избежать вышеуказанных проблем позволит конструкция робототехнической системы с автоматически изменяемой конфигурацией сенсорного оснащения. Именно этот подход будет использоваться в дальнейшей работе.

B. Алгоритмы активного восприятия

Поскольку мобильный робот сочетает в себе подвижную платформу и поворотную видеокамеру, то алгоритм активного восприятия, так или иначе, опирается на управление движением обеих подсистем. На уровне подвижной платформы маршрут робота планируется исходя из необходимости посещения всех вершин графа местности. Здесь можно заметить, что поставленную задачу можно рассматривать как частный случай задачи коммивояжёра.

Одним из вариантов решения подобных задач является метод поиска в глубину (Depth-first search, DFS) [8]. Основная идея алгоритма заключается в рекурсивном исследовании ранее не исследованных вершин. Случайный выбор вершин для исследования делает результирующую траекторию, то есть последовательность узлов графа, неоптимальной. Выбор перехода на основании минимальности веса ребра делает исходный алгоритм жадным, то есть локально оптимальным для каждого шага. Необходимо отметить, что в подавляющем большинстве случаев результат работы жадного алгоритма не будет оптимален глобально.

Для оптимизации такого рода задач предлагается развитый набор эволюционных алгоритмов [9]. В этой же работе предлагается сконцентрироваться на управлении направлением взгляда.

Использование автоматической системы поворота видеокамеры даёт возможность сокращать опорный маршрут робота за счет заблаговременного осмотра точек местности. Рассмотрим несколько сценариев поведения бортовой видеокамеры. Может показаться логичным использовать бортовую видекамеру для постоянного сканирования окружения. Отсюда первый вариант реализации системы активного восприятия предполагает равномерное постоянное вращение бортовой видеокамеры в плоскости сцены. Таким образом, закон управления взглядом можно формально описать следующим образом:

$$\frac{\Delta\alpha_c}{\Delta t} = const \qquad (1)$$

Здесь необходимо отметить, что слишком высокая скорость вращения приведёт к снижению качества видеопотока и, следовательно, негативно скажется на качестве работы алгоритмов обработки изображения. Слишком низкая же скорость сделает систему нецелесообразной. Эмпирически была выбрана скорость вращения, равная 0,5 рад/сек. Также нужно заметить, что реализация подобной конструкции при использовании стандартных для индустрии видеокамер представляется затруднительным.

Другой возможный подход предполагает использование интеллектуального алгоритма поиска наиболее результативного направления осмотра бортовой видеокамеры. Как упоминалось ранее для определения осмотренной территории предполагается использовать дискретизированное представление доступного пространства, где каждая дискрета из множества всех дискрет D может также попадать в подмножество исследованных дискрет D^*. Направление осмотра задаётся последовательностью из доступных опорных направлений, представляющих собой набор $A = \{\alpha'_1, \dots, \alpha'_{10}\}$ из десяти значений в диапазоне от -170 до 170 градусов с шагом в 34 градуса. Выбор целевого направления взгляда описывается:

$$\alpha_s = \underset{\alpha'}{\operatorname{argmin}} |D^* \cap F(\alpha')| \qquad (2)$$

где, α_s – опорное направление взгляда на текущем этапе функционирования системы;

$F(\alpha')$ – множество дискрет, попадающих в область видимости бортовой видеокамеры при выбранном направлении.

Скорость перемещения между опорными направлениями, которые являются результатом работы алгоритма, останется неизменной и будет равна 0,5 рад/сек. Таким образом, итоговый закон движения бортовой видеокамеры описывается выражением:

$$\alpha_c^t = \alpha_c^{t-1} + \frac{\alpha_s^t - \alpha_c^{t-1}}{|\alpha_s^t - \alpha_c^{t-1}|} * \frac{0.5 * 180}{\pi} \quad (3)$$

В качестве контрольного метода предлагается использовать классический вариант с фиксированным относительно мобильной платформы положением бортовой видеокамеры. Закон управления в таком случае описывается:

$$\alpha_c = const \quad (4)$$

IV. СИМУЛЯЦИЯ СТРАТЕГИЙ АКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ

Как упоминалось ранее, основной целью подсистемы активного восприятия является максимизация осмотренной в процессе функционирования площади. Именно этот аспект будет исследоваться в процессе симуляции. В качестве навигационной задачи для мобильной платформы было выбрано перемещение по траектории, заданной последовательностью опорных точек. Для ускорения тестирования воспользуемся упрощением в виде двухмерной проекции симулируемой сцены (рис. 2).

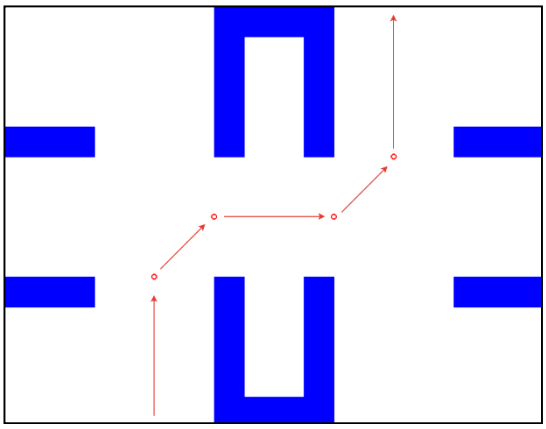


Рис. 2. Схема симулируемой сцены, где синим обозначены стены, а красным направление движения и опорные точки траектории

Для упрощения проводимых исследований предлагается сделать допущение о дискретизации свободного от препятствий пространства сцены. Для определения эффективности осмотра территории будет использоваться следующая формула:

$$Q = \frac{N_1}{N_2} * 100\% \quad (5)$$

где N_1 — число дискрет местности, которые попали в область видимости, принадлежащий бортовой видеокамере робота;

N_2 — общее число дискрет местности.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Использование статичной (рис. 3) видеокамеры позволило исследовать 433 области из 864, то есть $Q \approx 50\%$. Вращающаяся видеокамера (рис. 4) позволила исследовать 456 областей из 864, то есть $Q \approx 53\%$. Применение интеллектуального алгоритма управления видеокамерой (рис. 5) позволило исследовать 538 областей и 864, то есть результативность осмотра составила 62% при неизменных прочих параметрах.

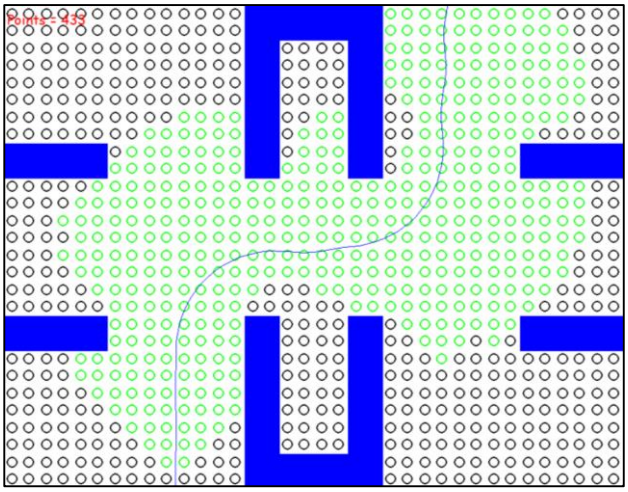


Рис. 3. Результат симуляции со статичной видеокамерой

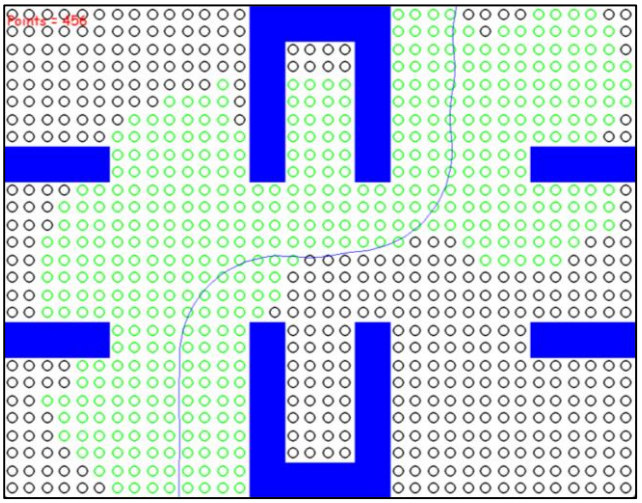


Рис. 4. Результат симуляции с равномерно вращающейся видеокамерой

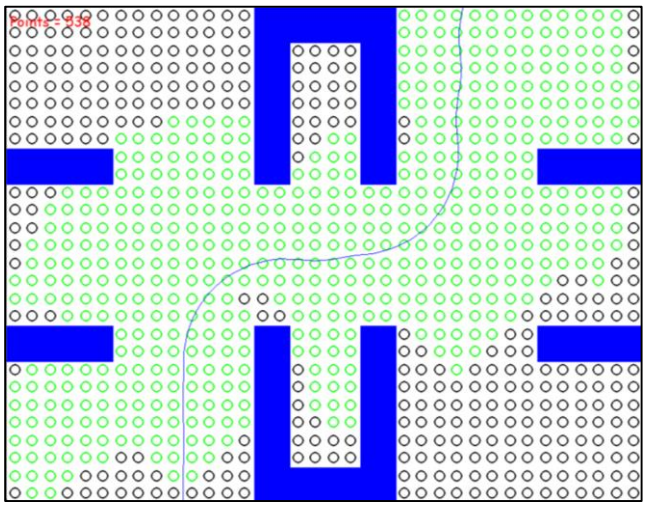


Рис. 5. Результат симуляции с интеллектуальным алгоритмом управления видеокамерой

VI. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов симуляции вышеупомянутых алгоритмов позволяет сделать вывод о превосходстве алгоритмов активного восприятия над пассивными вариантами реализации подобных систем. В задачах максимизации осматриваемой площади результат применения интеллектуального алгоритма осмотра позволил добиться прироста в 12% эффективности, в то время как равномерно вращающаяся видеокамера позволила исследовать лишь на 3% больше территории.

VII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведён анализ существующих исследований в области активного восприятия для решения различных задач, поставленных перед робототехническими системами. В контексте задачи мониторинга местности для мобильной платформы был сделан вывод о необходимости использования активного восприятия как автоматической системы управления направлением взгляда бортовой видеокамеры для максимизации осмотренной площади без необходимости дополнительных изменений в траектории перемещения самой мобильной платформы.

Такой подход позволят сократить временные и энергетические затраты на выполнение поставленной задачи. Результаты, полученные в ходе симуляции, демонстрируют, что простое равномерное вращение бортовой видеокамеры позволяет добиться трёхпроцентного прироста в эффективности, что при упомянутых ранее недостатках такой конструкции можно считать несущественным улучшением.

Применение же интеллектуального алгоритма управления направлением бортовой видеокамеры, основанного на анализе попадающей в область видимости ранее неисследованной площади, С В дальнейшем планируется перейти к трёхмерной модели окружающего пространства и провести испытания итоговой системы на реальном оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Tenenbaum J. M. Accommodation in computer vision // Ph.D. Thesis, Stanford University. 1970.
[2] Barrow H. G., Poppelstone R. J. Relational descriptions in picture processing // Machine Intelligence. 1971, V. 6. P. 377–396.
[3] Aloimonos J., Weiss I., Bandyopadhyay A. Active vision // International journal of computer vision. 1988, V. 1. C. 333–356.
[4] Lluvia I., Lazkano E., Ansuategi A. Active mapping and robot exploration: A survey //Sensors. 2021. T. 21. №. 7. C. 2445.
[5] Magalhães, S. A., Moreira, A. P., Santos, F. N. D., Dias, J. Active perception fruit harvesting robots—A systematic review //Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2022. T. 105. №. 1. C. 14.
[6] Saito, N., Ogata, T., Funabashi, S., Mori, H., Sugano, S. How to select and use tools?: Active perception of target objects using multimodal deep learning //IEEE Robotics and Automation Letters. 2021. T. 6. №. 2. C. 2517-2524.
[7] Wang, H., Wang, W., Liang, W., Hoi, S. C., Shen, J., Gool, L. V. Active perception for visual-language navigation //International Journal of Computer Vision. 2023. T. 131. №. 3. C. 607-625.
[8] Nasirian B., Mehrandezh M., Janabi-Sharifi F. Efficient coverage path planning for mobile disinfecting robots using graph-based representation of environment //Frontiers in Robotics and AI. 2021. T. 8. C. 624333.
[9] Tung W. C., Liu J. S. Solution of an integrated traveling salesman and coverage path planning problem by using a genetic algorithm with modified operators //IADIS Int. J. Comput. Sci. Inf. Syst. 2019. T. 14. №. 2. C. 95-114.

Информация об авторе:

Верхоланцев Дмитрий Витальевич, магистрант кафедры проблем управления Российского технологического университета - МИРЭА, г. Москва, Россия, e-mail: verkhold@gmail.com

Algorithms for active perception of the external environment for an autonomous mobile robot

D. V. Verkholantsev

MIREA – Russian Technological University

***Abstract* – This article is devoted to the study of active perception algorithms for maximizing the information received about the operating environment of an autonomous mobile robot. The most effective method for solving the problem can be considered the use of an automated system for controlling the position of the video camera. The finite element method was used to assess the completeness of the inspection of the external environment by an onboard video camera. The use of the simplest intelligent algorithm for selecting the inspection direction in a two-dimensional simulation allowed us to achieve a 12% increase in efficiency for the premises from the test set.**

***Keywords* – robotics, algorithms, active perception, mobile robots.**

References

[1] Tenenbaum J. M. Accommodation in computer vision // Ph.D. Thesis, Stanford University. 1970.

[2] Barrow H. G., Poppelstone R. J. Relational descriptions in picture processing // Machine Intelligence. 1971, V. 6. P. 377–396.

[3] Aloimonos J., Weiss I., Bandyopadhyay A. Active vision // International journal of computer vision. 1988, V. 1. С. 333–356.

[4] Lluvia I., Lazkano E., Ansuategi A. Active mapping and robot exploration: A survey //Sensors. 2021. Т. 21. №. 7. С. 2445.

[5] Magalhães, S. A., Moreira, A. P., Santos, F. N. D., Dias, J. Active perception fruit harvesting robots—A systematic review //Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2022. Т. 105. №. 1. С. 14.

[6] Saito, N., Ogata, T., Funabashi, S., Mori, H., Sugano, S. How to select and use tools?: Active perception of target objects using multimodal deep learning //IEEE Robotics and Automation Letters. 2021. Т. 6. №. 2. С. 2517-2524.

[7] Wang, H., Wang, W., Liang, W., Hoi, S. C., Shen, J., Gool, L. V. Active perception for visual-language navigation //International Journal of Computer Vision. 2023. Т. 131. №. 3. С. 607-625.

[8] Nasirian B., Mehrandezh M., Janabi-Sharifi F. Efficient coverage path planning for mobile disinfecting robots using graph-based representation of environment //Frontiers in Robotics and AI. 2021. Т. 8. С. 624333.

[9] Tung W. C., Liu J. S. Solution of an integrated traveling salesman and coverage path planning problem by using a genetic algorithm with modified operators //IADIS Int. J. Comput. Sci. Inf. Syst. 2019. Т. 14. №. 2. С. 95-114.

Seismic Field Tests of a Distributed Acoustic Sensor

I.A. Ershov[1], O.V. Stukach[1,2]

[1] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*
[2] *National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*

***Abstract* – This research is some contribution to advancing acoustic sensing, offering long-range monitoring of boreholes. High sensitive distributed acoustic sensor is required in oil and gas exploration, pipeline detection, and various practical applications. In this paper, a high sensitive quasi distributed acoustic sensor was tested in borehole. The waveforms are presented and distributed audio signal and spatial acoustic imaging are demonstrated. The field test results of the sound detection illustrate a good sensitivity within the flat frequency range up to 5 kHz up to 900 m depth. The partial results obtained further developments and applications in various fields.**

***Keywords*–DAS, fading suppression, OTDR, petroleum geophysics, vibration analysis.**

I. INTRODUCTION

The design of distributed fiber-optic sensors has possible to use systems for observation the condition of extended industry facilities such as oil and gas pipelines, railways, subways, production wells and cable routes [1]. A sensing element is optical fiber. In addition, it is used to transmit an information signal, which significantly reduces the size and weight of the system [2–4]. The use of electrical sensors in the systems described above is either economically impractical or physically impossible because the electric sensor is capable of making measurements at a single point. So, a large number of point sensors are required to monitoring of the extended object. At the same time, each fixed sensor will create electromagnetic hindrances. It is invisible with a small number of elements, but impact to operation of compact tools. If the size of the system is limited, for example, for well monitoring, it is impossible to place electrical sensors along the length. Distributed fiber-optic sensors are placed in the well using flexible tubing.

It is the possibility of non-standard placement to cover a certain surface, or wrapping around objects with a circular cross-section, such as pipes due to the flexibility of fiber [5–6]. To obtain advanced information about the condition of an object, a combination of a distributed acoustic sensor and a distributed temperature sensor is usually used [7].

II. STATE-OF-THE-ART

Nowadays distributed fiber-optic acoustic sensors (DAS) have wide fields of application: petroleum industry, railway, cable communications etc. [8–10].

An improved DAS using a waveguide electro-optic phase modulator and a novel phase demodulation on homodyne detection is proposed in [11]. The signal-to-noise ratio (SNR) 20 dB is achieved, and the spatial resolution is about 10 m at 5 km sensing fiber.

Paper [12] devoted to suppress the interference fading effect of OTDR system, a multi-frequency detection fading recognition and suppression method based on SVM classification. This method shows a good performance and simple structure is used to construct the classifier.

Authors [13–15] use DAS Transducer for Enhanced Acoustic Sensitivity. Some papers propose methods for signal processing for DAS. For example, a deep learning approach for the separation of multi-source signals in the UW-FBG DAS system was design in [16]. The effectiveness and robustness of the method were verified by comparing of other methods and different signals. It is providing a valuable solution for the signal separation in complex environments using DAS [17].

III. MEASUREMENTS

We use DAS based on an advanced ϕ-OTDR for the field test results [13–15, 18–20].

A borehole seismic device was used for the first stage of testing. This device generates shocks of a given energy in Joules. The test scheme is shown in Fig. 1. The device was lowered into the 5 m well from the ground surface. Also there were 135 m of fiber in the well.

The seismic device generated an impact with energy of 0.1 kJ, 0.5 kJ, 1.0 kJ, and 1.5 kJ (Fig. 2). The measurement results are shown in Figs. 3–6. The graphs correspond to the part of the fiber and the time where the effect was observed.

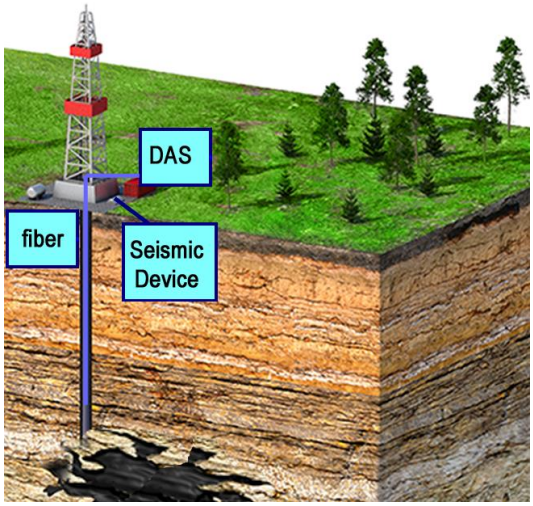


Fig. 1. Measurement chart

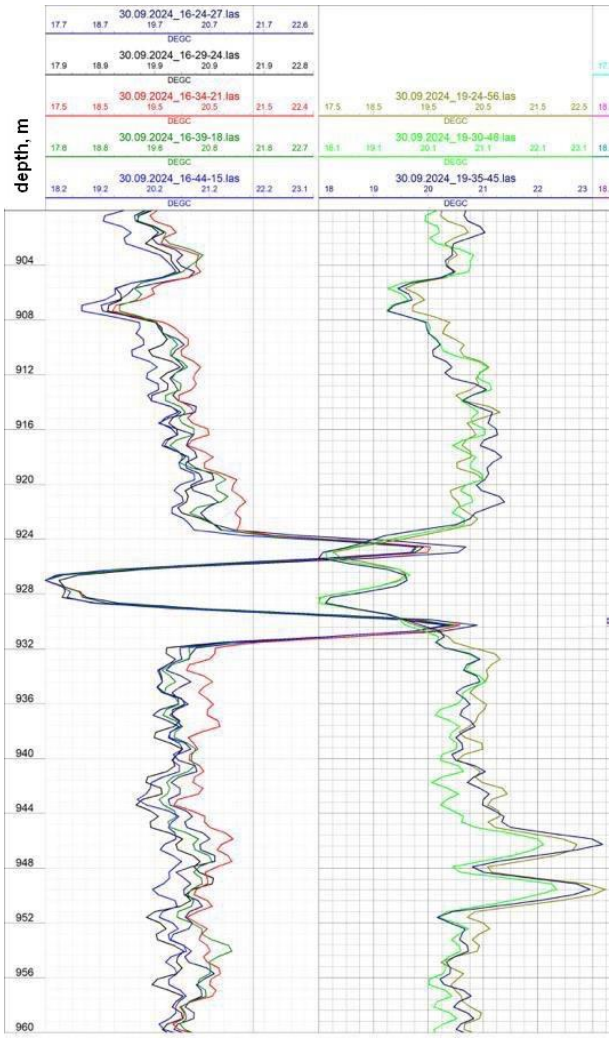


Fig. 2. Detection of signal from fiber.

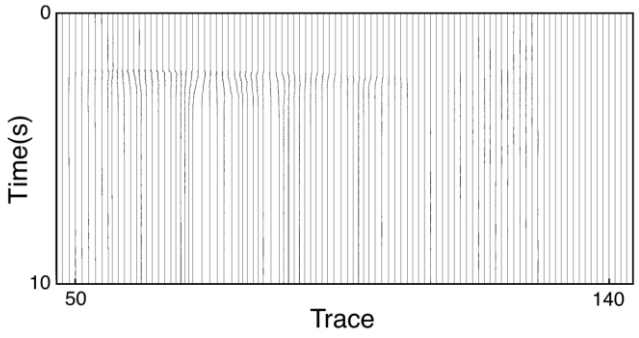


Fig. 3. Acoustic impact with energy of 0.1 kJ.

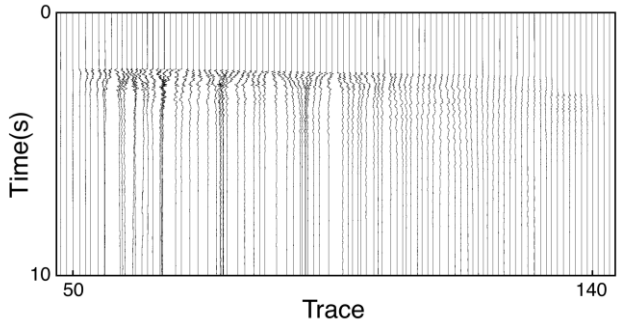


Fig. 4. Acoustic impact with energy of 0.5 kJ.

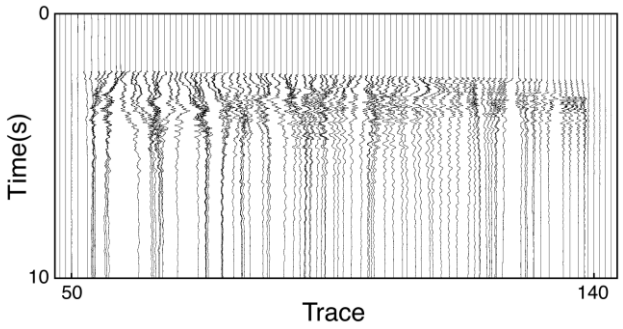


Fig. 5. Acoustic impact with energy of 1.0 kJ.

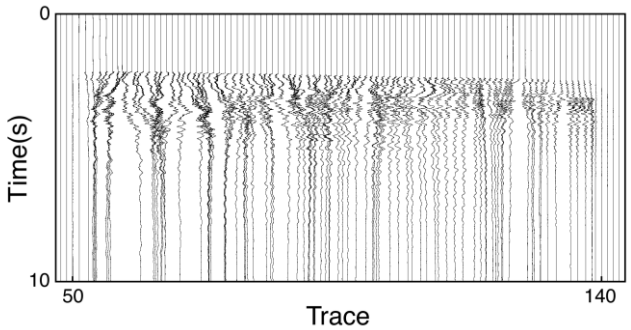


Fig. 6. Acoustic impact with energy of 1.5 kJ.

It is difficult to find exactly where the seismic device is on this diagrams, but from [21] follows that where there is one white stripe in Fig. 3.

IV. DISCUSSION

Each track is a point on the fiber. The distance between the tracks is 0.8 m. the 1.5 kJ. Impact vibration spread to a depth of 62 m from the seismic device in 3 sec from the seismogram data. This corresponds to the expected results. It seems we need some detection of vibration without fading-noise [22]. If we transform the graphs into black and white characterizing the intensity of seismic vibrations, interference is clearly visible when the impact energy increases to 1.0 kJ (Fig. 7).

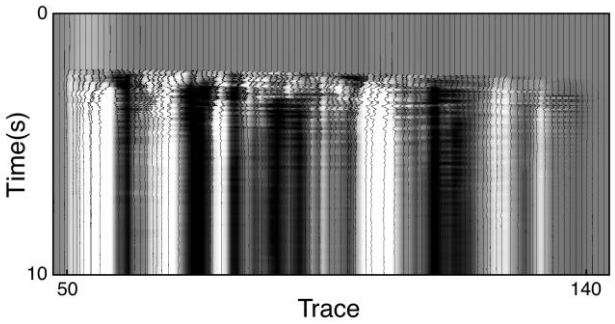


Fig. 7. Interference with acoustic impact with energy of 1.0 kJ.

V. CONCLUSIONS

Fiber-optic DAS can obtain locations and waveforms of vibrations occurring at any section of the optical fiber. In this paper we propose visualization of the acoustic impact for define distance from surface to point of fiber. Nevertheless, field test resulted that fading noise caused by interference makes DAS unable to detect vibrations correctly without fading suppression.

REFERENCES

[1] J.C. Juarez, E.W. Maier et al, "Distributed fiber-optic intrusion sensor system," Journal of Lightwave technology, 2005, no. 23(6), p. 2081.

[2] Q. Liu, X. Fan, and Z. He, "Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range," Opt. Express, 2015, no. 23(20), pp. 25988-25995.

[3] O.V. Stukach, I.A. Ershov, I.V. Sychev, “Towards the Distributed Temperature Sensor with Potential Characteristics of Accuracy”, 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), October 2-6, 2018, Novosibirsk, Russia. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546271.

[4] D. Chen, Q. Liu, X. Fan, and Z. He, "Distributed fiber-optic acoustic sensor with enhanced response bandwidth and high signal-to-noise ratio," Journal of Lightwave technology, 2017, no. 35(10), pp. 2037-2043.

[5] R.Zh. Aimagambetova, A.D. Mekhtiyev, O.V. Stukach, "Experimental Studies of Laboratory Samples of Fiber-Optic Sensors within Reinforced Concrete Building Construction. Part 1: Overview", International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), 2024 October 02-03, Sochi, Russian Federation, Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/SED63331.2024.10741063.

[6] R.Z. Aimagambetova, A.D. Mekhtiyev, O.V. Stukach, "Experimental Studies of Laboratory Samples of Fiber-Optic Sensors within Reinforced Concrete Building Construction. Part 2: The Experiment," Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2024, 12-14 Nov., Omsk, Russian Federation, pp. 1-8, DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838662.

[7] I.A. Ershov, O.V. Stukach and R.Z. Aimagambetova, "The Peculiar Measure Identifying of the Temperature Leap in the Distributed Raman Sensors", Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2021, 9-11 Nov., Omsk, Russian Federation, pp. 1-4, doi: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653721.

[8] Q. Sun, C. Fan, H. Li et al, “Progress of research on optical fiber distributed acoustic sensing technology in petroleum industry”, Geophysical Prospecting for Petroleum. 2022, no. 61(1), pp. 50-59, DOI: 10.3969/j.issn.1000-1441.2022.01.005.

[9] H. Wu, Z. Chen, L. Lv, et al, “Novel pressurized water pipe leak monitoring method based on the distributed optical fiber vibration sensor”, Chin. J. Sci. Instrum. 2017, no. 38(1), pp. 159-165, DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2017.01.0 21.

[10] J. Tejedor, J.M. Guarasa, H.F. Martins, et al, “A contextual GMM-HMM smart fiber optic surveillance system for pipeline integrity threat detection”, Journal of Lightwave Technol., 2019, no. 37(18), pp. 4514-45225, DOI: 10.1109/JLT.2019.2908816.

[11] F. Ma, X. Wang, Y. Wang, R. Zhu, Z. Yuan et al, "An improved device and demodulation method for fiber-optic distributed acoustic sensor based on homodyne detection", Optical Fiber Technology, 71(2022), p. 102925, DOI: 10.1016/j.yofte.2022.102925.

[12] Y. Wang, J. Wang, Y. Fan, Y. Gao et al, "Interference fading suppression for distributed acoustic sensor using frequency-shifted delay loop", Optics & Laser Technology 171(2024), p. 110441, DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110441.

[13] D.F. Gomes, G.H. Weber, D.R. Pipa, M.J. Silva et al., “DAS Transducer for Enhanced Acoustic Sensitivity”, IEEE Sensors Letters, 2023, vol. 7, no. 9, p. 5001204, DOI: 10.1109/LSENS.2023.3309262.

[14] H. Li, Q. Sun, T. Liu, C. Fan, et al, "Ultra-High Sensitive Quasi-Distributed Acoustic Sensor Based on Coherent OTDR and Cylindrical Transducer", Journal of lightwave technology, 2020, vol. 38, no. 4, February 15, pp. 929-938, DOI: 10.1109/JLT.2019.2951624.

[15] D.F. kandamali, X. Cao, M. Tian, Z. Jin, et al, “Machine learning methods for identification and classification of events in phi-OTDR systems: a review”, Appl. Optics, 2022, no. 61(11), pp. 2975-2997., DOI: 10.1364/AO.444811.

[16] Z. Luo, Z. Yang, X. Chen, C. Ran, J. Huang, Y. Ye, "Separating method for multi-source vibration signals in ultra-weak fiber Bragg grating distributed acoustic sensors", Optical Fiber Technology, 2023, no. 81, p. 103501, DOI: 10.1016/j.yofte.2023.103501.

[17] Z. Luo, Z. Yang, B. Lu, B. Xu, J. Huang, “Modular DAS demodulation system based on ultra-weak fibre Bragg grating”, J. Instrum., 2022, no. 17(10), p. 10037, DOI: 10.1088/1748-0221/17/10/P10037.

[18] D. Chen, Q. Liu, and Z. He, "Distributed fiber-optic acoustic sensor with sub-nano strain resolution based on time-gated digital OFDR", Asia Communications and Photonics Conference, Guangzhou(China), 2017, p. S4A.2.

[19] S. Wang, X. Fan, Q. Liu, and Z. He, "Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR," Opt. Express, 2015, no. 23(26), pp. 33301-33309.

[20] L. Macedo, E. Pedruzzi, L. Avellar, et al, “High-resolution sensors for mass deposition and low-frequency vibration based on phase-shifted bragg gratings”, IEEE Sensors Journal, 2023, no. 23 (3), pp. 2228-2235, DOI: 10.1109/JSEN.2022.3231434.

[21] I.A. Ershov, O.V. Stukach, N.V. Myasnikova, "Features of the Implementation of the Extremal Filtration Method in the Distributed Optic-Fiber Temperature Sensor", 2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Czech Republic, Prague, 27-28 April, 2021, IEEE Publisher, 5 p., DOI: 10.1109/SED51197.2021.9444514.

[22] D. Chen, Q. Liu, and Z. He, "Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR," Opt. Express, 2017, no. 25(7), pp. 8315-8325.

Информация об авторах:

Ершов Иван Анатольевич, ассистент кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, e-mail: ershov@corp.nstu.ru, ORCID: 0000-0003-1524-6508.

Стукач Олег Владимирович, д.т.н., профессор кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, профессор департамента Электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н.Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия, e-mail: tomsk@ieee.org , ORCID: 0000-0001-6845-4285.

Полевые испытания распределённого акустического датчика

И.А. Ершов[1], О.В. Стукач[1,2]

[1]Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

***Аннотация* – Это исследование является вкладом в развитие акустического зондирования, предлагая мониторинг скважин на больших расстояниях. Высокочувствительный распределённый акустический датчик необходим при разведке нефти и газа, мониторинге трубопроводов и в других практических приложениях. В этой статье высокочувствительный квазираспределённый акустический датчик был испытан в скважине. Представлены формы волны, продемонстрированы распределённый аудиосигнал и пространственная акустическая визуализация. Результаты полевых испытаний обнаружения звука иллюстрируют хорошую чувствительность в пределах частотного диапазона до 5 кГц на глубине до 900 м. Частичные результаты получили дальнейшее развитие и применение в различных областях.**

Ключевые слова – DAS, подавление затухания, OTDR, нефтяная геофизика, анализ вибраций.

Список литературы

[1] J.C. Juarez, E.W. Maier и др. Distributed fiber-optic intrusion sensor system // Journal of Lightwave technology. – 2005. – № 23(6)? – С. 2081.

[2] Q. Liu, X. Fan, Z. He. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range // Opt. Express. – 2015. – № 23(20). – С. 25988-25995.

[3] Стукач О.В., Ершов И.А., Сычев И.В. О распределенных датчиках температуры с потенциальными характеристиками точности / 14-я Межд. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-2018). Труды конф. 2–6 октября 2018. – Новосибирск, Россия. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546271.

[4] D. Chen, Q. Liu, X. Fan, Z. He. Distributed fiber-optic acoustic sensor with enhanced response bandwidth and high signal-to-noise ratio // Journal of Lightwave technology. – 2017. – № 35(10). - С. 2037-2043.

[5] Аймагамбетова Р.Ж., Мехтиев А.Д., Стукач О.В. Экспериментальные исследования лабораторных образцов волоконно-оптических датчиков в железобетонных конструкциях зданий. Часть 1: Обзор / Международный семинар по проектированию и технологии производства электронных средств (SED), 02-03 октября 2024, Сочи, Россия. – Издатель: IEEE. – DOI: 10.1109/SED63331.2024.10741063.

[6] Аймагамбетова Р.Ж., Мехтиев А.Д., Стукач О.В. Экспериментальные исследования лабораторных образцов волоконно-оптических датчиков в железобетонных конструкциях зданий. Часть 2: Эксперимент" / Конф. Динамика систем, механизмов и машин, 12-14 ноября 2024, Омск, Россия. – С. 1–8. Издатель: IEEE. – DOI: 10.1109/SED63331.2024.10741063.

[7] Ершов И.А., Стукач О.В., Аймагамбетова Р.Ж. Своеобразная мера определения скачка температуры в распределенных рамановских датчиках / Динамика систем, механизмов и машин, 9-11 ноября 2021, Омск, Россия, – С. 1-4. – DOI: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653721.

[8] Q. Sun, C. Fan, H. Li и др. Progress of research on optical fiber distributed acoustic sensing technology in petroleum industry // Geophysical Prospecting for Petroleum. – 2022. – № 61(1). – С. 50-59. – DOI: 10.3969/j.issn.1000-1441.2022.01.005.

[9] H. Wu, Z. Chen, L. Lv и др. Novel pressurized water pipe leak monitoring method based on the distributed optical fiber vibration sensor // Chin. J. Sci. Instrum. – 2017. – № 38(1). – С. 159-165. – DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2017.01.021.

[10] J. Tejedor, J.M. Guarasa, H.F. Martins и др. A contextual GMM-HMM smart fiber optic surveillance system for pipeline integrity threat detection // Journal of Lightwave Technol. – 2019. – № 37(18). – С. 4514-45225. – DOI: 10.1109/JLT.2019.2908816.

[11] F. Ma, X. Wang, Y. Wang, R. Zhu, Z. Yuan и др. An improved device and demodulation method for fiber-optic distributed acoustic sensor based on homodyne detection // Optical Fiber Technology. – 71(2022). – С. 102925. – DOI: 10.1016/j.yofte.2022.102925.

[12] Y. Wang, J. Wang, Y. Fan, Y. Gao и др. Interference fading suppression for distributed acoustic sensor using frequency-shifted delay loop // Optics & Laser Technology. – 171(2024). – С. 110441. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.110441.

[13] D.F. Gomes, G.H. Weber, D.R. Pipa, M.J. Silva и др. DAS Transducer for Enhanced Acoustic Sensitivity // IEEE Sensors Letters. – 2023. Т. 7. – № 9. – p. 5001204. – DOI: 10.1109/LSENS.2023.3309262.

[14] H. Li, Q. Sun, T. Liu, C. Fan и др. Ultra-High Sensitive Quasi-Distributed Acoustic Sensor Based on Coherent OTDR and Cylindrical Transducer // Journal of lightwave technology. – 2020. – Т. 38. – № 4. – С. 929-938. – DOI: 10.1109/JLT.2019.2951624.

[15] D.F. kandamali, X. Cao, M. Tian, Z. Jin и др. Machine learning methods for identification and classification of events in phi-OTDR systems: a review // Appl. Optics. – 2022, no. 61(11), pp. 2975-2997., DOI: 10.1364/AO.444811.

[16] Z. Luo, Z. Yang, X. Chen, C. Ran, J. Huang, Y. Ye. Separating method for multi-source vibration signals in ultra-weak fiber Bragg grating distributed acoustic sensors // Optical Fiber Technology. – 2023. – № 81. – С. 103501. – DOI: 10.1016/j.yofte.2023.103501.

[17] Z. Luo, Z. Yang, B. Lu, B. Xu, J. Huang. Modular DAS demodulation system based on ultra-weak fibre Bragg grating // J. Instrum. – 2022. – № 17(10). – С. 10037. – DOI: 10.1088/1748-0221/17/10/P10037.

[18] D. Chen, Q. Liu, and Z. He. Distributed fiber-optic acoustic sensor with sub-nano strain resolution based on time-gated digital OFDR / Asia Communications and Photonics Conference, Guangzhou(China), 2017. – С. S4A.2.

[19] S. Wang, X. Fan, Q. Liu, and Z. He. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR// Opt. Express. – 2015. – № 23(26). – С. 33301-33309.

[20] L. Macedo, E. Pedruzzi, L. Avellar и др. High-resolution sensors for mass deposition and low-frequency vibration based on phase-shifted

bragg gratings // IEEE Sensors Journal. – 2023. – № 23 (3). – С. 2228-2235. – DOI: 10.1109/JSEN.2022.3231434.

[21] Ершов И.А., Стукач О.В., Мясникова Н.В. Особенности использования метода экстремальной фильтрации в распределённой оптической термометрии / Международный семинар по проектированию и технологии производства электронных средств (SED). – Прага, Чехия, 27-28 апреля 2021. – Издатель: IEEE. – DOI: 10.1109/SED51197.2021.9444514.

[22] D. Chen, Q. Liu, and Z. He. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR // Opt. Express. – 2017. – № 25(7). – С. 8315-8325.

Investigations of Estimates of the Network Traffic Entropy of the IIoT for the Purpose of Early Attack Detection

A.V. Sergeichev

National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia

***Abstract* — The research explores the correlation between the occurrence of an attack and changes in the entropy properties of network traffic. The input data represents a sample of the network communication activity of the IIoT control system, and the attacks that have been realize on it. Network traffic is filtered from service information and digitized by frequency analysis of the content of each recorded packet. This process allows to save the key properties of the traffic. The data is being aggregated by the cumulative function. Then samples can be calculated according to the principle of a sliding window. The window shifts with a set time step, which supports with dynamic monitor changes in network traffic and identify potential threats in real time. Each sample represents a divergence of the distributions. There is no anomaly in traffic if the difference in the distributions is close to zero. The sensitivity of the algorithm to anomaly detection depends on the choice of parameters such as the length of the aggregation time interval, the sliding window dimension, and the offset step. It is expected that the obtained measures of dependence of casual processes allows it resource-efficient and more effective to determine the fact of intrusions into IIoT systems than signature analysis. Such algorithm can potentially increase the level of security and resistance to attack, which is particularly important in the face of growing threats in digital environment.**

Keywords — Information entropy, Communication networks, Anomaly detection, Internet of Things, Computer security

I. INTRODUCTION

Industrial Internet of Things technologies (IIoT) are being actively implemented in the manufacturing processes of various critical industries such as energy, transport, healthcare etc [1]. Such systems provide the ability for autonomous monitoring, reduce production and management costs, and optimize resource utilization. Using control nodes allows operating devices of IIoT remotely [2–3].

Network accessibility of IIoT-components increases the risk of implementation cybersecurity incidents. Unauthorized access causes unavailability of services and creates uncontrollable processes that can lead to economic as well as environmental disasters.

IDS (Intrusion Detection System) and IPS (Intrusion Prevention System) are designed to protect the infrastructure from network attacks. Their mechanisms rely on signature and behavior analysis of all packets in traffic. Their efficiency is highly dependent on a current and comprehensive knowledge base of known threats. However, if the threat is unique and ~~s~~pecific, the detection of such anomalies can be very challenging.

It is possible to get network data from IIoT infrastructure with the development of virtualization technologies. The network record contains various attacks, which are classified according to the tactics and techniques of the attackers. Given that categorization, it is possible to analyze both the general activity and the network activity of its individual components.

This research provides the use of statistical methods to detect specific traffic abnormals. Anomalies can be caused either by malicious activity or by system and service misconfigurations. Nevertheless, if anomalous traffic behavior is detected, we assume that there may be potentially illegal activity that requires further analysis. The method is based on the calculation of entropy divergence. The entropy estimation method uses overlapping intervals, which allows both adaptation and preservation of information about traffic behavior over past time periods. The calculation of divergence allows us to realize the differences between typical and abnormal patterns of network traffic dynamics.

The purpose of the research is to identify anomalies and patterns in network traffic by estimating entropy, which indicates potential threats to the security of Industrial Internet of Things control systems. It is expected to evaluate the expediency of using entropy to analyze suspicious activity, as well as to identify the possible relationship between the divergence parameters and correctness of detection.

II. LITERATURE REVIEW

The security of IIoT network systems is still fraught with fundamental problems due to a number of features, despite significant advances in corporate cyber defense. A sufficient part of recent investigations is devoted to statistical methods for detection network anomalies. It has different approaches to searching for suspicious behavior due to the wide variability in the characteristics of network flow and ways to evaluate randomness. The focus will be on studying and collecting the required parameters and calculation methods to receive consistent characteristics that form the basis for analyzing their origin. This literature review looks at the ways of selecting special data from network packets,

estimation of a state of disorder and metrics indicating an anomaly.

The article [4] analyzes delays in updating signature databases for network intrusion detection systems (NIDS) and highlights their weakness. It indicates the inability to counter threats when the attack is already known in the absence of detection rules. This highlights the limitations of signature-based methods, which makes entropy-based anomaly detection a more effective alternative for identifying new and unknown threats in real time.

The choice of the method and its criteria has been studied in many researches. The uncertainty measure was calculated according to the theorems of Shannon, Renyi, and Tsallis. The results of the calculations showed that Renyi and Tsallis entropy demonstrate more accurate measurements [5]. Moreover, Shannon's entropy illustrates a higher percentage of false positive results than others. The high accuracy is achieved by the choice of *a* parameter. It is assumed that the values in the range [–2, 2] are optimal, but it must be selected for each type of attack.

Abnormal activity detection requires exact metrics. The EWMA model [6] predicts anomaly based on historical activity and considers dynamic threshold by using time fixed window function. This method is better adapted to changes and has higher precision. This is explained by the concept of a time interval selection, which updates every step, allowing to evince changes in activity more sensitively.

It is also important to select certain attributes from network packets. They contain fields of the recipient, sender, transmitted data, and service details. The considered technique of detecting DDoS [7] uses the sender's IP-address, flags, and packet's length. The IP-address of the source node can be spoofed during the attack. Therefore, further analysis showed that using packet's length and flag categorizes illegal network traffic more precisely.

Other researchers suppose that the payload of packets [8] an provide valuable insights into network behavior. In this case, changes in entropy can be caused by encryption session absence. Investigators analyzed large datasets of packet data containing legitimate service activity and came up with the conclusion that their entropy value is approximately equal. However, there are some inaccuracies, characterized by a lack of consideration for traffic directions, flags and other special information.

In the next trial, authors add destination addresses and ports to their methodology [9]. This investigation uses Shannon's entropy, which other researchers do not consider suitable for solving the anomaly search problem. The results revealed that attacks have an ambiguous impact on entropy characteristics, which are heavily influenced by the distribution of normal traffic, the strength of the attack, and other factors.

As the volume of data continues to grow exponentially, algorithm optimization issue is a crucial aspect that directly impacts on the performance of the network analysis tool. A model called DoDGE [10] considers scalability and assumes a reduced number of false positives. The method is based on the analysis of the entropy progression of IP-addresses in network traffic. At each point, the Tsallis entropy of the addresses is calculated. Then, a regression line is constructed from several previous entropy values, and its slope is used for analysis. If it goes sharply negative, it specify a possible DoS attack. However, this suggests an increase in legitimate traffic if the entropy of the sources increases symmetrically.

In the context of this research, the authors explored low-rate DDoS [11] attacks and its influence on entropy characteristics. The computational methods were performed on real network data, which were separated into legitimate and attack traffic. In papers [5, 11], Renyi entropy has shown the highest level of accuracy with $a>1$, where a is some coefficient. Outcomes are different from normal and anomalous traffic during low-speed attacks, but this result was achieved over a narrow range of a. In contrast, Shannon's entropy was found to be less sensitive in detecting anomalies because of its more limited flexibility.

The article [12] focuses on detecting flash changes in the network traffic using Shannon's entropy time series analysis. The technique consists of source and destination IP-addresses, the number of ports, protocols of data transmitting, and packet size. The method involves dividing traffic data into fixed time windows, calculating entropy for each window, and identifying changes by statistical techniques. The snapshot of network traffic includes DDoS-attack, the propagation of network worm and different types of scanning, which is classified as reconnaissance [13]. Thus, it was possible to detect flash events. Unlike the previous work [11], the current algorithm does not allow for the detection of long-term and low-rate attacks.

It is important for classification to detect not only the fact of attack but also its reason. The classification allows to assess the risk and consequences. This is necessary for response measures at the time of occurrence and avoidance of similar events in the future. The correct strategy for implementing defenses against network attacks is primarily based on evaluating the existing weaknesses and the categories of attacks that the infrastructure is vulnerable to. The paper [14] provides the most comprehensive classification of IIoT network attacks by various categories, such as: DDoS, IP spoofing, selective forward attack, etc.

III. METHODS

The aim of this research is detection anomalies and patterns in network traffic to identify potential threats to industrial IoT control systems using entropy evaluation. The source network data is a set of legitimate and attack traffic generated by an internal and external attacker.

The architecture of IIoT infrastructure includes two ubuntu servers with control, MQTT subscriber and publisher roles, two attacker virtual machines and two single-board computers with OpenPLC and Wi-Fi access point roles. There are attacks categorized as discovery, persistence, lateral movement, collection, and exfiltration in the illegitimate part of the traffic [15–16].

The input data needs to be processed for analysis. Entropy evaluation method uses information about packet registration time, source IP address, and packet payload.

We use a window that contains the packets recorded within an input fixed time frame. These packets are aggregated into a single unit by concatenating their payloads and using the timestamp of the first packet during the interval. Then, this window is moved across the entire

dataset in an input specified time interval. An array of aggregated data is generated, objects are taken by pairs, and method calculates their information distance [17].

The information distance formula is based on the Renyi (1) and Tsallis (2) entropies for a discrete set:

$$H_\alpha(X) = \frac{1}{1-\alpha} log \sum_{i=1}^{n} p_i^\alpha \qquad (1)$$

$$S_q(P) = \frac{k}{q-1}\left(1 - \sum_{i=1}^{N} p_i^q\right) \qquad (2)$$

In these formulas, *a* and *q* are independent parameters calibrated for a more accurate result. *Pi* represents the frequency distribution of payload symbols in a single entity from the aggregated data set.

It is more appropriate to use Renyi (3) and Tsallis (4) entropy divergences to observe the dynamics of network traffic:

$$D_\alpha(P||Q) = \frac{1}{\alpha-1}\log \sum_{i=1}^{n} p_i^\alpha q_i^{1-\alpha} \qquad (3)$$

$$D_q(A,B) = \frac{k}{q-1}\left(\sum_{i=1}^{N} a_i^q b_i^{1-q} - 1\right) \qquad (4)$$

Hence, we can calculate the information distance between nearby entities in the aggregated data array.

IV. Results

During the investigation, the sample and full data were processed, and the functions for calculating the Renyi and Tsallis divergences (3), (4) were implemented. Fig. 1 shows the temporal distribution of entropy divergence. Vertical lines show activity from the attacker's IP address to calibrate the method and its parameters.

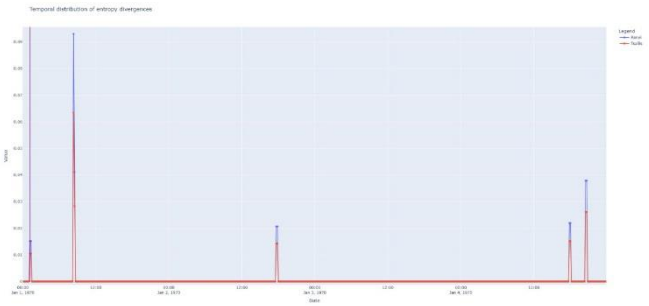


Fig. 1. Temporal distribution of entropy divergences for the test data

In the first case, the attack was detected, but in other cases the activity was legitimate. The calculations were performed on the test data with parameters *a*=0.5 and *q*=0.5, the time step was 5 min, and the aggregation interval was set to be equal to 10 min.

It is planned to continue the investigation and obtain more accurate divergence parameters, as well as optimal time windows and steps.

V. Conclusion

In summary, using entropy estimates with standard parameters allowed to obtain many false positives, but also indicated the real threat.

It becomes clear from a detailed study of numerous examples that the entropy parameters as well as the time interval and the step play an important role in the anomaly detection.

Choosing the exact parameters allow to achieve an increase in the number of true positives. Therefore, the method can be integrated into modern intrusion detection systems, that can mitigate various risks associated with security threats. Technologies are constantly developed, and attacks are becoming more and more complex. This research provides groundwork for a new sight to network security.

References

[1] D. Kutuzov, A. Osovsky, O. Stukach, D. Starov, "Modeling of IIoT Traffic Processing by Intra-Chip NoC Routers of 5G/6G Networks". 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 13-15 May 2021, Kazan, Russia. Publisher: IEEE. Electronic ISBN: 978-1-7281-8504-0, USB ISBN: 978-1-7281-8503-3, Online ISSN: 2380-6516, DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438874.

[2] Denis Kutuzov, Alexey Osovsky, Dmitriy Starov, Oleg Stukach, Ekaterina Motorina. "Processing of the Gaussian Traffic from IoT Sources by Decentralized Routing Devices". 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 18-20 April 2019, Tomsk, Russia. Publisher: IEEE. Electronic ISBN: 978-1-5386-5142-1. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729617.

[3] Kutuzov D.V., Osovsky A.V., Stukach O.V. Model of IoT Trafic Generation and Processing by Parallel Switch Systems // Vestnik SibSUTI, 2019, no. 4, pp. 78-87.

[4] H Gascon, A. Orfila, J. Blasco, "Analysis of update delays in Signature-based Network Intrusion Detection Systems," Computers & Security (2011), DOI: 10.1016/j.cose.2011.08.010.

[5] Bereziński P, Jasiul B, Szpyrka M., "An Entropy-Based Network Anomaly Detection Method. Entropy," 2015; 17(4):2367-2408., DOI: 10.3390/e17042367.

[6] Yu, H., Yang, W., Cui, B. et al., "Renyi entropy-driven network traffic anomaly detection with dynamic threshold," Cybersecurity 7, 64 (2024), DOI: 10.1186/s42400-024-00249-1.

[7] S. Sharma, S. K. Sahu and S. K. Jena, "On selection of attributes for entropy based detection of DDoS," 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Kochi, India, 2015, pp. 1096-1100, DOI: 10.1109/ICACCI.2015.7275756.

[8] Kenyon A, Deka L, Elizondo D., "Characterising Payload Entropy in Packet Flows—Baseline Entropy Analysis for Network Anomaly Detection," Future Internet. 2024; 16(12):470, DOI: 10.3390/fi16120470.

[9] A.Yu. Efimov, "Using the entropy characteristics of network traffic to determine its abnormality," Programmnye Produkty i Sistemy, no. 1, pp. 83–90, 2021. Available: https://swsys.ru/index.php?page=article&id=4783. [Accessed: Jan. 27, 2025].

[10] O. Subasi, J. Manzano and K. Barker, "Denial of Service Attack Detection via Differential Analysis of Generalized Entropy Progressions," 2023 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR), Venice, Italy, 2023, pp. 219-226, DOI: 10.1109/CSR57506.2023.10224957.

[11] M. H. Bhuyan, D. K. Bhattacharyya and J. K. Kalita, "Information metrics for low-rate DDoS attack detection: A comparative evaluation," 2014 Seventh International Conference on Contemporary Computing (IC3), Noida, India, 2014, pp. 80-84, DOI: 10.1109/IC3.2014.6897151.

[12] Winter, P., Lampesberger, H., Zeilinger, M., Hermann E., "On Detecting Abrupt Changes in Network Entropy Time Series," In: De Decker, B., Lapon, J., Naessens, V., Uhl, A. (eds) Communications and Multimedia Security. CMS 2011. Lecture Notes in Computer

Science, vol 7025. Springer, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-24712-5_18.

[13] MITRE, "MITRE ATT&CK: Adversarial Tactics, Techniques, and Common Knowledge," [Online]. Available: https://attack.mitre.org. [Accessed: 27-Jan-2025].

[14] Bhukya Madhu, Sanjib Kumar Nayak, Veerender Aerranagula, E. Srinath, Mamidi Kiran Kumar, Jitendra Kumar Gupta, "IoT Network Attack Severity Classification," E3S Web Conf. 430 01152 (2023), DOI: 10.1051/e3sconf/20234300115.

[15] A. Osovsky, D. Kutuzov, D. Starov, R. Bakalaeva, O. Stukach, "Comparison of Machine Learning Methods for IoT and IIoT Traffic Prediction", International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), 2024 October 02-03, Sochi, Russian Federation, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/SED63331.2024.10741069.

[16] D. Kutuzov, A. Osovsky, O. Stukach, N. Maltseva, D. Starov, "Modeling the Processing of Non-Poissonian IIoT Traffic by Intra-Chip Routers of Network Data Processing Devices", Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2021, 9-11 Nov., Omsk, Russian Federation, pp. 1-4, doi: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653703.

[17] Sergeichev A.V., Stukach O.V. "Entrophy Evaluation of IIoT Trafic for the Anomaly Detection", Electronics, Electrical Engineering and Energetics: 31-th Intern. Sci.-Tech. Conference, MPEI, March 13-15, 2025, 1244 p. ISBN 978-5-907732-36-0, p. 329, https://reepe.mpei.ru/abstracts/Documents/Blok_doklad_2025_fin.pdf

Информация об авторе:

Сергеичев Андрей Викторович, студент департамента Электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия, e-mail: avsergeichev@edu.hse.ru

Исследование оценок энтропии трафика промышленного Интернета вещей с целью раннего обнаружения атак

А.В. Сергеичев

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

Аннотация **– Исследуется зависимость между возникновением атаки и изменениями энтропийных свойств сетевого трафика. Входные данные представляют собой образцы трафика сетевой системы управления промышленного Интернета вещей и реализуемой там атаки. Сетевой трафик отфильтрован от служебной информации и оцифрован путём частотного анализа содержания каждого записанного пакета. Этот процесс позволяет сохранить ключевые свойства трафика. Данные агрегируются кумулятивной функцией. Затем отсчёты обрабатываются методом скользящего окна. Окно перемещается с шагом во времени, что позволяет в режиме реального времени динамически мониторить трафик и идентифицировать потенциальные угрозы. Каждый отсчёт представляет собой дивергенцию распределений. Если различие в распределениях близко к нулю, аномалии считаются отсутствующими. Чувствительность алгоритма к обнаружению аномалии зависит от выбора параметров, таких как длина временного интервала накопления отсчётов, размера скользящего окна и шага перемещения. Ожидается, что полученные меры зависимости случайных процессов позволят быстрее и эффективнее определять факт вторжений в системы промышленного Интернета вещей, чем сигнатурный анализ. Такой алгоритм может потенциально увеличить уровень безопасности и защиты, что особенно важно в условиях нарастающих угроз в цифровой среде.**

Ключевые слова – информационная энтропия, сети связи, обнаружение аномалий, Интернет вещей, компьютерная безопасность.

Список литературы

[1] Кутузов Д.В., Осовский А.В., Стукач О.В., Старов Д.В. Моделирование обработки трафика промышленного Интернета вещей внутричиповыми маршрутизаторами сетей 5-6 поколения / Международная IEEE-Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2021. – 13-15 мая 2021, Казань, Россия. – Публ. IEEE. – DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438874.

[2] Кутузов Д.В., Осовский А.В., Старов Д.В., Стукач О.В., Моторина Е. Обработка гауссовского трафика от источников Интернета вещей децентрализованными устройствами маршрутизации / Международная IEEE-Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2019. – 18-20 апреля 2019, Томск, Россия. – DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729617.

[3] Кутузов Д.В., Осовский А.В., Стукач О.В. Модель генерации и обработки трафика IoT параллельными коммутационными системами // Вестник СибГУТИ. – 2019. – N 4. – С. 78-87.

[4] H Gascon, A. Orfila, J. Blasco Analysis of update delays in Signature-based Network Intrusion Detection Systems // Computers & Security. – 2011. – DOI: 10.1016/j.cose.2011.08.010.

[5] Bereziński P, Jasiul B, Szpyrka M. An Entropy-Based Network Anomaly Detection Method. Entropy. – 2015. – 17(4):2367-2408. – DOI: 10.3390/e17042367.

[6] Yu H., Yang, W., Cui, B. и др. Renyi entropy-driven network traffic anomaly detection with dynamic threshold // Cybersecurity. – 2024. – № 7. – Т. 64, – DOI: 10.1186/s42400-024-00249-1.

[7] S. Sharma, S. K. Sahu and S. K. Jena On selection of attributes for entropy based detection of DDoS / 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Kochi, India, 2015. – С. 1096-1100. – DOI: 10.1109/ICACCI.2015.7275756.

[8] Kenyon A, Deka L, Elizondo D. Characterising Payload Entropy in Packet Flows – Baseline Entropy Analysis for Network Anomaly Detection," Future Internet. – 2024. – 16(12):470. – DOI: 10.3390/fi16120470.

[9] A.Yu. Efimov Using the entropy characteristics of network traffic to determine its abnormality // Programmnye Produkty i Sistemy. – 2021. – № 1. – С. 83–90. Режим доступа: https://swsys.ru/index.php?page=article&id=4783. [Дата обращения: 27 янв 2025].

[10] O. Subasi, J. Manzano, K. Barker. Denial of Service Attack Detection via Differential Analysis of Generalized Entropy Progressions / 2023 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR), Venice, Italy, 2023. – С. 219-226. – DOI: 10.1109/CSR57506.2023.10224957.

[11] M. H. Bhuyan, D. K. Bhattacharyya, J. K. Kalita Information metrics for low-rate DDoS attack detection: A comparative evaluation / 2014 Seventh International Conference on Contemporary Computing (IC3), Noida, India. – 2014. – С. 80-84. – DOI: 10.1109/IC3.2014.6897151.

[12] Winter P., Lampesberger H., Zeilinger M., Hermann E. On Detecting Abrupt Changes in Network Entropy Time Series," In: De Decker, B., Lapon, J., Naessens, V., Uhl, A. (eds) Communications and Multimedia Security. CMS 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 7025. Springer, Berlin, Heidelberg, – DOI: 10.1007/978-3-642-24712-5_18.

[13] MITRE, "MITRE ATT&CK: Adversarial Tactics, Techniques, and Common Knowledge," [Online]. Режим доступа: https://attack.mitre.org. [Дата обращения: 27 января 2025].

[14] B. Madhu, S.K. Nayak, V. Aerranagula, E. Srinath, M.K. Kumar, J. K. Gupta. IoT Network Attack Severity Classification / E3S Web Conf. 430 01152 (2023), – DOI: 10.1051/e3sconf/20234300115.

[15] Осовский А., Кутузов Д., Старов Д., Бакалаева Р., Стукач О. Сравнение методов машинного обучения для Интернета вещей и прогнозирования трафика промышленного Интернета вещей / Международный семинар по проектированию и технологии производства электронных средств (SED), 02-03 октября 2024, Сочи, Россия. Изд. IEEE. DOI: 10.1109/SED63331.2024.10741069.

[16] Кутузов Д., Осовский А., Стукач О., Мальцева Н., Старов Д. Моделирование обработки непуассоновского IIoT-трафика внутрикристальными маршрутизаторами сетевых устройств обработки данных / Динамика систем, механизмов и машин, 9-11 ноября 2021, Омск, Россия, стр. 1-4. – Doi: 10.1109/Dynamics52735.2021.9653703.

[17] Сергеичев А.В., Стукач О.В. Оценка энтропии трафика промышленного интернета вещей с целью обнаружения аномалий / Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 31 междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (13-15 марта 2025 г., Москва): Тез. докл. - М.: ООО “Центр полиграф. услуг "Радуга"”, 2025. - 1244 с. ISBN 978-5-907732-36-0, – С. 329. – https://reepe.mpei.ru/abstracts/Documents/Blok_doklad_2025_fin.pdf

Внедрение облачных вычислений в телекоммуникационные сети

А.Е. Алишева [1], Н.С.Мальцева [1], Т.В.Ведерникова [1], Д.В.Ведерников [1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, Россия*

Аннотация **– в работе рассмотрены варианты внедрения облачного вычисления в телекоммуникационную сеть, приведены основные преимуществ и недостатки. Использование облачных вычислений в сфере телекоммуникаций позволит удовлетворить потребность заказчика, минимизирует затраты на реорганизацию и модернизацию сети. Принцип облачных вычислений базируется на предоставлении вычислительных услуг через сеть Интернет, которые включают в себя инфраструктуру, как услугу, платформу как услугу и платформа как услуга. Так же благодаря внедрению облачных вычислений в организацию телекоммуникационных сетей позволит операторам связи предоставлять больший список услуг.**

Ключевые слова **– облачные вычисления, телекоммуникационные сети, виртуализация сетевых функции, архитектура программно-определяемых сетей.**

I. ВВЕДЕНИЕ

Пандемия COVID-19 способствовала увеличению потребности в облачных услугах, так как множество компаний были вынуждены ускорить свою цифровую трансформацию. В 2024 году расходы на облачную инфраструктуру в глобальном масштабе достигли $192 млрд. Это на 74,3% больше по сравнению с 2023-м, когда объем рассматриваемого рынка оценивался в $110 млрд., а отраслевые аналитики Gartner прогнозируют стремительное обновление систем центров обработки данных, устройств и программного обеспечения. Прогнозируется, что затраты на центры обработки данных увеличатся на 23,2%, достигнув суммы в 405,5 миллиарда долларов. [1].

С развитием новых технологий в сфере телекоммуникационной отрасли и ростом спроса потребителя появляется необходимость в модернизации и оптимизации сети.

Использование облачных технологий стало необходимостью в цифровой сфере, оказывающее большое влияние на телекоммуникационные сети. Внедрение такой технологии вызвано быстрым ростом объема передаваемых данных, необходимых для обработки или хранения информации, а также для удовлетворения скорости и надежности передачи данных.

Облачные вычисления, характеризуются высоким уровень масштабируемости, гибкости и эффективности. Интеграция облачных технологий – это фундаментальный сдвиг, который расширяет возможности отрасли телекоммуникации.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье поставлена задача произвести анализ облачных вычислений в телекоммуникациях, привести преимущества и недостатки, а также рассмотреть основные проблемы внедрения.

III. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Согласно [2] облачные вычисления или облачные технологии представляют собой модель обеспечения удобного сетевого доступа по требованию к некоторому общему фонду конфигурируемых вычислительных ресурсов (например, сетям передачи данных, серверам, устройствам хранения данных, приложениям и сервисам — как вместе, так и по отдельности), которые могут быть оперативно предоставлены и освобождены с минимальными эксплуатационными затратами или обращениями к провайдеру.

Быстрое развитие технологий и растущий спрос на телекоммуникационные услуги сподвигнуло операторов связи интегрировать облачные вычисления, которые способны произвести революцию в телекоммуникационном секторе. Облачные вычисления предоставляют вычислительные услуги через сеть Интернет, предлагаю масштабируемость, гибкость и экономическую эффективность [3].

Рассмотрим каждый критерий отдельно.

Масштабируемость сети подразумевает собой динамическое распределение потока трафика в режиме реального времени, тем самым обеспечивая оптимальное использования сетевого оборудования и расширения возможности эффективного управления пиковой нагрузкой. Данный критерий позволяет

операторам связи поддерживать высокое качество обслуживания и надежность. Необходимость масштабируемости сети продиктовано постоянно растущим объемом трафика, который вызван появлением новых технологий, например Интернет-вещей, искусственным интеллектом и машинным обучением. По итогам 2024 года количество устройств Интернет вещей с поддержкой технологии eSIM (встроенная SIM-карта) в глобальном масштабе превысило 1 млрд [4].

Облачные вычисления обеспечивают гибкость сети, благодаря чему операторы связи беспрепятственно могут внедрять новые услуги. Облачные платформы предоставляют универсальную среду, в которой сервера можно разрабатывать, тестировать и развертывать с минимальным начальными затратами.

Благодаря облачным вычислениям операторы могут расширить свои услуги, предоставляя не только подключение к Интернету, но и комплекс цифровых услуг, таких как:

- *Унифицированные коммуникации как услуга*. Эта модель стремительно становится универсальным решением для компаний со сложными коммуникационными потребностями. В 2021 году объем выручки в сфере UCaaS составил $16,4 млрд (рост на 21,2% по сравнению с 2020 годом). Ожидается, что к 2025 году ежегодный прирост отрасли составит 28-29%. Большую часть доходов вендоры получают за счет предоставления услуг веб- и видео-конференц-связи и контакт-центров. [5]

Как правило, платформа унифицированных коммуникаций предоставляет интуитивно понятный интерфейс для управления всеми компонентами — от видео-конференц-связи до IP-телефонии. Обычно это происходит через приложение или другое программное обеспечение, которое подключается к облаку.

- *Сеть как услуга*. Технология «сеть как услуга» (Network as a Service, NaaS) предусматривает, что сетевое оборудование, ПО и операционные/эксплуатационные услуги вместо традиционных первоначальных затрат относятся на операционные расходы [5]. Решения NaaS позволяют оптимизировать операции за счет автоматизации и инструментов самообслуживания, упростить закупки и ускорить предоставление услуг для повышения качества клиентского опыта.

- *Платформа как услуга*. PaaS (Platform as a Service) — это услуга, которая заключается в предоставлении пользователям готовой облачной платформы для разработки, тестирования и развёртывания приложений, от простых облачных программ до промышленных систем [5]. Разработчик получает полноценную среду разработки, которую может настраивать под свои потребности.

Экономическая эффективность заключается в внедрении модели «оплата по мере поступления», при которой провайдеры могут масштабировать и модернизировать свою сеть в зависимости от спроса, когда в свою очередь традиционная модель телекоммуникационной сети требует крупных инвестиции в оборудования и оптимизацию центров обработки данных.

Помимо всего вышеописанного облачные вычисления уменьшают время аварийного восстановления сети и сводит к минимуму риска потерь данных или перебоев.

IV. Принципы и особенности облачных вычислений

Облачные вычисления предлагают широкий спектр услуг. Зачастую компании покупают физическое оборудование (сервер, блок бесперебойного питания и т.д.) и размещают его у себя. Это оборудование достаточно дорогостоящее, а затраты относятся в статью капитальных затрат. Кроме того, для обслуживания и настройки оборудование необходимы специалисты, работа которых также стоит немалых средств.

Принцип облачных вычислений базируется на предоставлении вычислительных услуг через сеть Интернет, которые включают в себя инфраструктуру, как услугу (IaaS), платформу как услугу (PaaS) и платформа как услуга (SaaS). Данные модели обеспечивают масштабируемые и гибкие системы [6].

IaaS (Infrastructure as a Service) – инфраструктура как услуга, т.е. аренда вычислительных ресурсов (процессор CPU, оперативная память RAM, пространство на диске HDD). Из этих ресурсов собирают «виртуальный сервер», на который можно установить любое необходимое ПО. Это базовый, основной сервис в системе облачных услуг.

Согласно [7] преимущества IaaS:

- гибкие настройки – можно уменьшать или увеличивать ресурсы по мере необходимости в реальном времени;
- сокращение затрат – отпадает необходимость покупать дорогое серверное оборудование и нанимать штат работников для его обслуживания;
- оптимизация затрат – из капитальных затрат они перемещаются в операционные;
- скорость – нет необходимости ждать, настраивать и обслуживать оборудование – можно начать работать в тот же день;
- удобство – можно работать из любой точки мира и не быть привязанным к конкретному месту.

PaaS (Platform as a Service) – платформа как услуга. Простыми словами – это уже готовая платформа с определенными настройками под разные задачи, т.е. это IaaS + настроенное ПО.

В этом варианте провайдер берет на себя всю настройку и конфигурацию оборудования, устанавливает необходимые программы, а пользователь загружаете туда свои данные и можете

приступить к работе. Например, клиенту не нужно строить базу данных с нуля, это предлагается как уже готовый сервис (платформа), который предоставляет провайдер. Клиент просто загружает туда данные и может начать работать.

Преимущества PaaS:

- экономия времени для настройки системы;
- использование оптимального готового решения;
- сокращение времени «от идеи до реализации» - увеличивается скорость тестирования и разработки приложений;
- многопользовательский доступ к системе из разных точек.

SaaS (Software as a Service) – программное обеспечение как сервис. Это полностью готовое решение, которое сразу же можно использовать. Примерами реализации услуг по принципу SaaS являются конструкторы сайтов, почтовые сервисы, различные CRM-системы, 1С в облаке, планировщик Google и т.д.

При реализации услуги SaaS провайдер берет на себя все обязательства по настройке сервисов, клиент не участвует в данных процессах, а лишь пользуется готовым продуктом с имеющимися настройками. Провайдер услуги осуществляет лицензирование, апгрейд, техподдержку и прочие настройки.

IV. БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Внедрение облачных вычислений сопровождается рядом проблем, одной из которых является обеспечение безопасности и конфиденциальности.

Согласно [8] принцип облачной безопасности заключается в модели «Долевой ответственности», в которой провайдер отвечает за обеспечение безопасности облака, за физическую часть системы (центр обработки данных, сетевое оборудования и структурированные кабельные системы), а арендатор отвечает за безопасность самого облака (приложения, данные, которые размещены в облаке).

Безопасность облачных вычислений основывается на управлении идентификацией и доступом (IAM) и предотвращении потери данных (DLP), другими словами, на предотвращении доступа неавторизованных лиц к облачному сервису клиента и клиентским данным [9].

Так же немаловажно не допустить потери или повреждения данных в результате человеческого фактора.

Общераспространенные меры облачной безопасности включают:

- Элементы управления IAM, такие как управление доступом на основе ролей (RBAC) и доступ с наименьшими привилегиями. Это означает, что сотрудники имеют доступ только к тем приложениям и данным, которые им необходимы для выполнения их работы, и не более.
- Инструменты защиты от потери данных, которые идентифицируют конфиденциальные данные, классифицируют их, отслеживают их использование и предотвращают неправомерное использование данных, например, не позволяют конечным пользователям делиться конфиденциальной информацией за пределами корпоративных бизнес-сетей.
- Шифрование данных как при передаче, так и при хранении.
- Безопасная конфигурация и обслуживание системы.

V. ВИРТУАЛИЗАЦИЯ СЕТИ НА ОСНОВЕ ОБЛАЧНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ

Облачные технологии в корне изменили архитектуру телекоммуникационных сетей. Традиционные подходы к проектированию сети, которые основываются на физических устройствах, расположенном в одном месте, проигрывают более гибких облачным технологиям.

С переходом на облачные технологии телекоммуникационные сети стали виртуализированными, что дает возможность перенаправить значительные функции в облачные среды, тем самым не давая нагрузку на физические устройства, что в свою очередь дает разгрузку оборудованию и увеличивает производительность. Данное распределение нагрузки снижает зависимость от физического оборудования и позволяет более эффективно использовать ресурсы сети.

Виртуализация сетевых функции (NFV – Network Functions Virtualization) – это технология, при которой специализированные сетевые устройства заменяются на программное обеспечение, работающее на процессорах общего назначения и программно-определяемые сети (SDN - Software Defined Networks). SDN – это более гибкий и динамичный вид сетевой архитектуры, позволяющий централизованно управлять сетью через программные приложения, являются главными элементами в архитектуре, давая возможность операторам связи гибко управлять сетевыми ресурсами [10]

Виртуализация сетевых функций позволяет устанавливать сервисы где нужно и в том количестве, которое востребовано на текущий момент времени в данном месте.

Преимущества NFV [11]:

- позволяет гибко и динамично предоставлять новые услуги, сократив при этом капитальные и операционные затраты;
- замена оборудования на стандартизованные серверы и сетевые компоненты не привязывает операторов к поставщикам оборудования;
- снижает операционные издержки за счет упрощения мониторинга и администрирования

операций (все сетевые функции переносятся в единую виртуализированную инфраструктуру);

- быстрое подключение новых пользователей к сети;
- окупаемость инфраструктуры телекоммуникационных компаний.

На рис. 1 представлена архитектура технологии виртуализации сетевых функции.

Использование публичных и частных IP-адресов указывают на возможность взаимодействия с Интернетом. Данные IP-адреса предназначены для маршрутизации трафика как в рамках локальной сети, так и для доступа к Интернет-ресурсам.

Центральным элементом является OpenFlow switch, который служит для управления потоками данных в сети, обеспечивая динамическое распределение трафика и возможность программного управления сетевыми функциями.

Виртуальные маршрутизаторы обеспечивают управление сетевым трафиком внутри виртуализированной среды, в то время как, оркестровка данных отвечает за автоматизацию развертывания и управления сетевыми функциями и ресурсами.

Устройство сетевого интерфейса, расположенное в нижней части, играет роль соединительного узла между виртуальной средой и сетью организации. Это устройство необходимо для взаимодействия с физической сетью и предоставляет необходимые интерфейсы для обработки трафика.

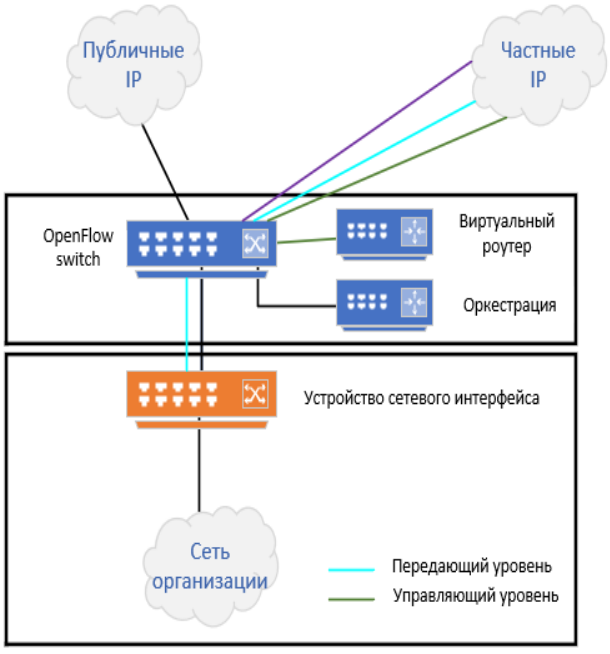


Рис.1 Архитектура технологии виртуализации сетевых функции

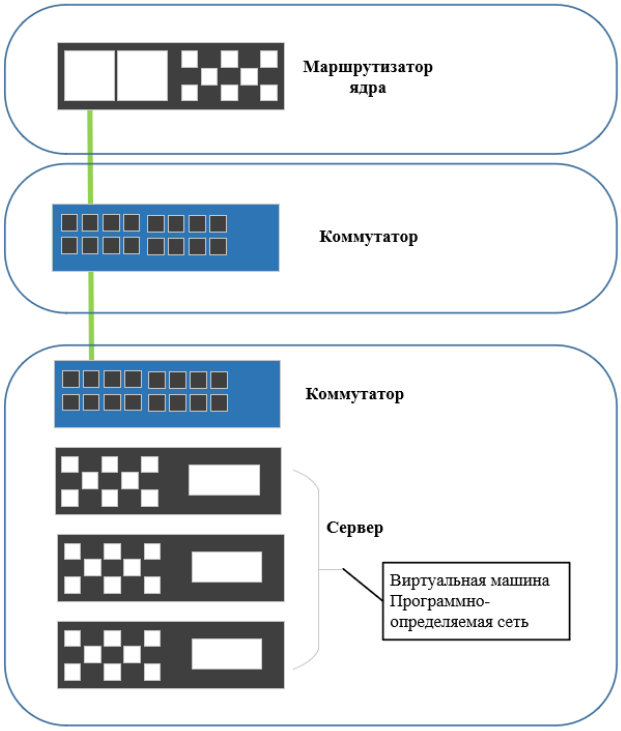


Рис.2 Архитектура технологии виртуализации сетевых функции

С NFV (рис.2) оператор может, используя всего лишь одно сетевое интерфейсное устройство для разграничения трафика, позволить всем остальным функциям располагаться на территории сервис-провайдера, а SDN использовать для упрощения и управления этой сетью для клиента.

Телекоммуникационные компании заинтересованы в SDN и NFV, так как это дает независимость от поставщиков, возможность реализовывать, легко планировать и развертывать сети, используя аппаратное и программное обеспечение, которое компании могут самостоятельно выбрать.

Использование готового стандартного оборудования и средств виртуализации для тестирования и развертывания новых услуги осуществляется за несколько минут, а не за месяцы, как это было раньше.

Технологии виртуализации позволяют рассматривать все ИТ-ресурсы организации, как набор общедоступных сервисов, которые можно группировать и повторно комбинировать для увеличения эффективности и быстрого масштабирования.

Программно-определяемые сети заменяет традиционные сетевые устройства на виртуальные коммутаторы или виртуальные маршрутизаторы.

С помощью SDN можно разделить сетевое соединение между конечным пользователем и центральным оборудованием для настройки безопасности под различные типы сетевого трафика.

Архитектура программно-определяемых сетей содержит следующие компоненты [12]:

- компонент управления;
- компонент данных;
- северный интерфейс;
- южный интерфейс.

Интеграция облачных вычислений в телекоммуникационные сети дает возможность интегрировать в систему обработки данных и аналитики, что позволяет быстро реагировать на изменения в сетевом трафике и модернизировать сеть к новым потребностям пользователей.

V. Проблемы внедрения облачных вычислений

Интеграция облачных вычислений в телекоммуникационные системы дает существенные преимущества, которые были раскрыты выше, но также наряду с преимуществами данной технологии существует ряд проблем при внедрении.

Во-первых, для получения доступа к облачным сервисам необходимо постоянное подключение к сети Интернет, что не всегда может быть обеспечено.

Во-вторых, сохранение конфиденциальности данных, которые хранятся на публичных «облаках», вызывает достаточно много споров. В этой связи многими экспертами не рекомендуется хранить наиболее ценные для компании документы на публичном «облаке», поскольку на сегодняшний день не существует технологий, которые обеспечивали бы полную безопасность хранимой информации.

В-третьих, в случае возникновения нарушений в системе резервного копирования данных, компания рискует полностью лишиться информации, размещенной в «облаке».

В-четвертых, несмотря на надежность облачных хранилищ данных, всегда существует вероятность их взлома со стороны различных злоумышленников, которые сумеют в этом случае получить доступ к огромным объемам информации со всеми вытекающими из этого последствиями.

В-пятых, для создания собственных «облаков» компаниям необходимо выделять на это значительные финансовые средства, что может быть оправдано только лишь при больших масштабах использования данных технологий.

VI. Выводы и заключение

В статье были рассмотрены основные аспекты внедрения облачных вычислений в телекоммуникационную сферу.

1. Внедрение облачных вычислений позволит улучшить качество телекоммуникационных услуг, обеспечивая гибкость и масштабируемости. Это создаст возможность для местных операторов связи предоставить своим пользователям доступ к новым сервисам и приложениям, не требующим значительных затрат на локальную инфраструктуру.
2. Облачные технологии позволяют сократить время внедрения новых решений, адаптируясь к изменяющимся потребностям рынка и потребителей.
3. Облачные вычисления способствуют оптимизации затрат на обслуживание и обновление оборудования, поскольку многие задачи могут быть выполнены удаленно и централизованно. Это, в свою очередь, повысит надежность и устойчивость сетевой инфраструктуры региона, что особенно важно для сельских и удаленных территорий, где доступ к качественным услугам связи зачастую ограничен.
4. Решения, основанные на облачных технологиях, также открывают перспективы для развития новых бизнес-моделей. Компании могут использовать облачные платформы для наращивания аналитических мощностей, обработки больших данных и создания инновационных продуктов.
5. Внедрение облачных вычислений в телекоммуникационную сферу может также повысить уровень безопасности и защиты данных. Современные облачные решения предлагают передовые методы защиты информации и шифрования, что крайне важно в условиях растущих угроз кибербезопасности.

Литература

[1] Сервисы для облачной инфраструктуры (мировой рынок). URL: https://www.tadviser.ru/index (дата обращения: 12.02.2025).

[2] Росляков, А. В. Сеть связи как облачная услуга NAAS / А. В. Росляков, М. В. Марыков // Инфокоммуникационные технологии. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 70-82. – DOI 10.18469/ikt.2022.20.1.09. – EDN TQICMU.

[3] Рубашенков Антон Михайлович, Бобров Андрей Виорелович Облачные вычисления // Academy. 2018. №6 (33). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/oblachnye-vychisleniya (дата обращения: 12.02.2025).

[4] Нефедов, Е. В. Облачные вычисления / Е. В. Нефедов, С. А. Галимжанов, И. Н. Баранов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов X Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию академика М.Ф. Решетнева и Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 08–12 апреля 2024 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2024. – С. 79-80. – EDN SUVXLH.

[5] Слияния и поглощения в сфере интернета вещей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php , свободный (дата обращения: 17.02.2025).

[6] Росляков, А. В. Сеть связи как облачная услуга NAAS / А. В. Росляков, М. В. Марыков // Инфокоммуникационные технологии. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 70-82. – DOI 10.18469/ikt.2022.20.1.09. – EDN TQICMU.

[7] Антипко, А. В. Облачные вычисления. Модели развертывания систем облачных вычислений / А. В. Антипко // Молодой ученый. – 2023. – № 6(453). – С. 9-10. – EDN PHYRFQ.

[8] Кузнецова, Д. А. Инфраструктура безопасности облачных вычислений / Д. А. Кузнецова // Инициативы молодых - науке и производству : Сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 25–26 ноября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. – С. 930-933. – EDN FCXXER.

[9] Батура, Т. В. Облачные технологии: основные понятия, задачи и тенденции развития / Т. В. Батура, Ф. А. Мурзин, Д. Ф. Семич // Программные продукты, системы и алгоритмы. – 2014. – № 1. – С. 22. – EDN VLPCCN.
[10] Кузнецова, Д. А. Инфраструктура безопасности облачных вычислений / Д. А. Кузнецова // Инициативы молодых - науке и производству : Сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 25–26 ноября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. – С. 930-933. – EDN FCXXER.
[11] Unified Communications Унифицированные коммуникации мировой рынок./ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php , свободный (дата обращения: 17.02.2025).
[12] Данешманд Бехруз Мехди СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ 5G/IMT-2020 В РОССИИ, КИТАЕ, США И ЕВРОПЕ // T-Comm. 2021. №6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-kontseptsii-sozdaniya-i-razvitiya-setey-5g-imt-2020-v-rossii-kitae-ssha-i-evrope (дата обращения: 12.03.2025).

Информация об авторах:

Алишева Альбина Ерсаиновна - преподаватель высшей квалификационной категории отделения «Связь и телекоммуникации», Факультета среднего профессионального образования Астраханского государственного технического университета, Астрахань, Россия, Астрахань, Россия, e-mail: Alisheva94@mail.ru

Мальцева Наталия Сергеевна – к.т.н., доц., доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, Астрахань, Россия, e-mail: maltsevans@mail.ru

Ведерникова Татьяна Владимировна – заведующий отделением «Связь и телекоммуникации», факультета среднего профессионального образования Астраханского государственного технического университета, Астрахань, Россия, e-mail: sitfspo@mail.ru

Ведерников Данил Вадимович - магистрант по направлению Инфокоммуникационные технологии и системы связи Астраханского государственного технического университета, Астрахань, e-mail: student-vedernikov@mail.ru

The implementation of cloud computing in telecommunications networks

A.E. Alisheva [1], N.S. Maltseva [1], T.V. Vedernikova [1], D.V. Vedernikov [1]

[1] *Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

Abstract **- This paper analyzes the implementation of cloud computing in the telecommunications network, highlighting the main advantages and disadvantages. The use of cloud computing in the telecommunications sector will meet customer demands and minimize costs associated with the reorganization and modernization of the network. The cloud computing principle is based on providing computing services over the Internet, which include infrastructure as a service, platform as a service, and software as a service. Furthermore, the adoption of cloud computing in the organization of telecommunications networks will enable operators to offer a broader range of services.**

Keywords **– cloud computing, telecommunications networks, network functions virtualization, software-defined networking architecture.**

References

[1] Cloud infrastructure services (global market). URL: https://www.tadviser.ru/index (accessed: 12.02.2025).
[2] Roslyakov, A. V. Communication network as a NAAS cloud service / A. V. Roslyakov, M. V. Marykov // Infocommunication technologies. - 2022. - Vol. 20, No. 1. - Pp. 70-82. - DOI 10.18469/ikt.2022.20.1.09. - EDN TQICMU.
[3] Rubashenkov Anton Mikhailovich, Bobrov Andrey Viorelovich Cloud computing // Academy. 2018. No. 6 (33). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/oblachnye-vychisleniya (date of access: 12.02.2025).
[4] Nefedov, E. V. Cloud computing / E. V. Nefedov, S. A. Galimzhanov, I. N. Baranov // Actual problems of aviation and cosmonautics: Collection of materials of the X International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of academician M. F. Reshetnev and Cosmonautics Day. In 3 volumes, Krasnoyarsk, April 08-12, 2024. - Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after academician. M. F. Reshetnev, 2024. - P. 79-80. - EDN SUVXLH.
[5] Mergers and acquisitions in the field of the Internet of things. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.tadviser.ru/index.php , free (date accessed: 17.02.2025).
[6] Roslyakov, A. V. Communication network as a cloud service NAAS / A. V. Roslyakov, M. V. Marykov // Infocommunication technologies. - 2022. - Vol. 20, No. 1. - Pp. 70-82. - DOI 10.18469/ikt.2022.20.1.09. - EDN TQICMU.
[7] Antipko, A. V. Cloud computing. Models of deployment of cloud computing systems / A. V. Antipko // Young scientist. - 2023. - No. 6 (453). - Pp. 9-10. - EDN PHYRFQ.
[8] Kuznetsova, D. A. Cloud computing security infrastructure / D. A. Kuznetsova // Initiatives of the young - to science and production: Collection of articles of the VIII All-Russian scientific and practical conference of young scientists and students, Penza, November 25-26, 2024. - Penza: Penza State Agrarian University, 2024. - Pp. 930-933. - EDN FCXXER.
[9] Batura, T. V. Cloud technologies: basic concepts, tasks and development trends / T. V. Batura, F. A. Murzin, D. F. Semich // Software products, systems and algorithms. - 2014. - No. 1. - P. 22. - EDN VLPCCN.
[10] Kuznetsova, D. A. Cloud computing security infrastructure / D. A. Kuznetsova // Initiatives of the young - to science and production: Collection of articles of the VIII All-Russian scientific and practical conference of young scientists and students, Penza, November 25-26, 2024. - Penza: Penza State Agrarian University, 2024. - Pp. 930-933. - EDN FCXXER.
[11] Unified Communications Unified communications global market. / [Electronic resource]. - Access mode: https://www.tadviser.ru/index.php , free (date of access: 02/17/2025).
[12] Daneshmand Behrouz Mehdi COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CONCEPT OF CREATION AND DEVELOPMENT OF 5G/IMT-2020 NETWORKS IN RUSSIA, CHINA, USA AND EUROPE // T-Comm. 2021. No. 6. URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-kontseptsii-sozdaniya-i-razvitiya-setey-5g-imt-2020-v-rossii-kitae-ssha-i-evrope (date of access: 12.03.2025).

Особенности маршрутизации на базе протокола LEACH в беспроводных сенсорных сетях

Е.А. Евстифеева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, Россия

Аннотация **– Статья является обзором поколений протоколов маршрутизации на основе протокола иерархической маршрутизации LEACH. Благодаря прогрессу в области беспроводной связи беспроводные сенсорные сети стали широко использоваться в различных областях. Протоколы маршрутизации играют значительную роль в функционировании беспроводных сенсорных сетей. Протоколы маршрутизации позволяют оптимизировать ресурсы беспроводной сенсорной сети, такие как расход энергии, использование памяти и прочие. Энергетически эффективные протоколы маршрутизации являются серьезной проблемой в области сенсорных сетей. Разработка и применение различных энергоэффективных протоколов маршрутизации позволяет увеличить время жизни сенсорной сети.**

Ключевые слова **– головной узел, LEACH, иерархическая маршрутизация, кластеризация, потребление энергии.**

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы отмечено новое направление в области беспроводной связи - беспроводные сенсорные сети (БСС, англ. WSN - Wireless Sensor Networks), привлекшие много внимания со стороны исследователей в академических и промышленных кругах.

БСС состоит из набора сенсорных узлов и базовой станции (БС), соединенных между собой через беспроводные каналы. В связи с одноранговым характером БСС, их можно использовать для многих приложений, таких как военное дело, управление воздушным движением, видеонаблюдение, системы безопасности, промышленная и производственная автоматизация, мониторинг окружающей среды, мониторинг строительства, мониторинг здоровья в медицинских учреждениях [1-3]. Преимуществами БСС являются простота развертывания, низкая стоимость установки, возможность охвата большой зоны покрытия и высокая защита от сбоев. БСС развертывают для сбора данных из окружающей среды в интересуемой области и отправке их на базовую станцию. Средства размещения узлов влияют на производительность протокола маршрутизации с точки зрения потребления энергии. Существует три способа размещения крошечных сенсорных узлов в среде БСС:

- **Обычное размещение** - сенсорные узлы могут быть размещены в фиксированном порядке и данные направляются через заранее определенный путь. Это размещение используется в медицинском, промышленном секторе, при развертывании домашних сетей и т.д.
- **Случайное размещение** - сенсорные узлы размещаются на конечной области с помощью разбрасывания. Это размещение обычно используется в спасательных операциях, при мониторинге окружающей среды и т.д.
- **Подвижное размещение** - узлы могут быть передвинуты для компенсации недостатков размещения; могут быть пассивно перемещены с помощью какой-либо внешней силы (ветер, вода или транспортное средство). Это размещение используется для наблюдения области военных действий, чрезвычайных ситуаций (пожар, извержения вулкана, цунами) и т.д.

В БСС затраты энергии является большой проблемой, поскольку узлы питаются от батарей. Эту энергию довольно дорого, трудно или даже невозможно возобновить. Поэтому вопрос экономии энергии для увеличения срока службы сети является одной из важнейших проблем в БСС.

В БСС узлы расходуют энергию в процессе обработки и передачи/приема сообщений. В дополнение к этому, существует еще большое количество энергии, затрачиваемое датчиками, находящимися в состояниях, бесполезных с точки зрения приложений, таких как: холостое прослушивание, подслушивание, интерференция и коллизия. Другое ограничение, снижающее эффективность развернутых узлов - избыточность данных. Так как узлы в большинстве случаев плотно располагаются в интересуемой области, то это вызывает поступление избыточных данных с соседних узлов. На основании этих энергетических ограничений в беспроводных узлах были разработаны многие энергетически эффективные методы, для того чтобы свести к минимуму потребление энергии и увеличить срок службы сети. Одним из методов,

заслуживающих внимания, является иерархическая маршрутизация, в которой вводится понятие создания кластера и назначение специальных задач в выбранном сенсорном узле внутри кластера, называемым головным узлом (ГУ). Исследователи пришли к выводу, что кластеризация узлов в БСС является эффективной мерой энергосбережения [4]. Кластеризация - процесс деления множества объектов на подмножества (кластеры) по заданному критерию. В БСС она используется для минимизации количества узлов, принимающих участие в передаче данных на большие расстояния к базовой станции, что приводит к снижению общего потребления энергии системой. Кластеризация уменьшает количество передаваемых данных путем группирования аналогичных узлов вместе и выбора одного узла в качестве головного узла, где выполняется агрегация данных, чтобы избежать избыточности и нагрузки соединения, вызванной множественными соседними узлами. Затем агрегированные данные отправляются на следующий ГУ или к БС, где происходит их обработка, хранение и восстановление. Основная цель иерархической маршрутизации или маршрутизации, основанной на кластеризации, является эффективное поддержание использования энергии сенсорных узлов путем вовлечения их в многоскачковую связь в пределах конкретного кластера. Первым иерархическим протоколом является иерархический протокол, адаптированный под низкое энергопотребление (LEACH) [5]. Многие иерархические протоколы были разработаны на базе протокола LEACH.

II. Иерархические протоколы маршрутизации

В беспроводных сенсорных сетях потребление энергии является одним из самых важных вопросов. Традиционные протоколы маршрутизации для БСС не могут быть оптимальны с точки зрения потребления энергии. Иерархические протоколы маршрутизации (ИПМ) являются более энергоэффективными, чем другие протоколы [6]. ИПМ придерживаются механизма кластеризации; методы кластеризации могут быть эффективными с точки зрения потребления энергии и масштабируемости. При использовании методики кластеризации они значительно уменьшают потребление энергии при сборе и распространении данных (слияние и агрегация). ИПМ минимизирует потребление энергии путем деления узлов на различные кластеры. В каждом кластере, более высокие энергетические узлы, т.е. ГУ могут быть использованы для обработки и отправки информации на БС, а низкие энергетические узлы, т.е. узлы кластера могут быть использованы для выполнения зондирования в непосредственной близости от цели и отправке данных на свой ГУ. Это означает, что создание кластеров и присвоение специальных задач головным кластерам может в значительной степени способствовать общей масштабируемости системы, увеличению срока службы и эффективности использования энергии сетью, уменьшению размера таблицы маршрутизации за счет локализации установки маршрута в кластерах, и экономии полосы пропускания сети. Архитектура алгоритма LEACH показана на рис. 1.

Рис. 1. Архитектура алгоритма LEACH

Различные сенсорные узлы сгруппированы в кластеры с ГУ, который ответственен за маршрутизацию от кластера к другим головным узлам или БС. Механизм кластеризации обеспечивает возможности оптимизации, присущие сенсорной (собранной) информации на ГУ. В кластерной иерархической модели данные сначала объединяются в кластере, а затем передаются к ГУ более высокого уровня или на БС. В кластерной иерархической модели только ГУ должны выполнять процесс агрегации данных, но в случае многоскачковой модели каждый промежуточный узел выполняет процесс агрегации данных, что также имеет преимущества и проблемы кластеризации. Кластеризация обеспечивает пространственное повторное использование ресурсов для увеличения пропускной способности системы. Например, если кластеры не являются соседями, они могут использовать одну и ту же частоту для беспроводной связи; во-вторых, информация о маршрутизации кластера используется совместно с другими ГУ. Это ограничение уменьшает число передач, выполняемых для распределения информации о маршрутизации. С помощью этого преимущества кластеризации было реализовано большее количество энергоэффективных протоколов маршрутизации. В БСС, кластеризация сталкивается с рядом проблем развертывания, таких, как гарантированное подключение, выбор ГУ и кластеров в реальном режиме времени, синхронизация, агрегирование данных и качество обслуживания (QoS).

III. Иерархический протокол маршрутизации на основе кластеризации: LEACH

Протокол LEACH, являющийся в настоящее время самым популярным энергоэффективным алгоритмом иерархической маршрутизации, был предложен исследователем Венди Хейнзельманом для БСС с целью снижения энергопотребления [5]. В протоколе LEACH прямая связь используется каждым ГУ для передачи данных к базовой станции. В LEACH сеть разделяется на несколько кластеров. Поскольку затраты энергии датчика зависят от расстояния, протокол LEACH пытается передавать данные на короткие расстояния и уменьшать общее количество операций передачи и приема.

Работа LEACH управляется через циклы. В каждом цикле работа LEACH разделяется на два этапа - этап установки и стационарный этап. На этапе установки выбираются ГУ, создаются кластеры, а затем определяется маршрут соединений между кластерами. В начале, сенсорные узлы выбирают случайное число m между 0 и 1. Если это число m меньше порогового значения $T(n)$, то сенсорный узел становится головным узлом. Поскольку число m выбирается случайным образом, то количество ГУ не может быть постоянным. $T(n)$ рассчитывается по формуле:

$$T(n) = \begin{cases} \dfrac{P}{1 - P(r \bmod \frac{1}{p})} & \text{если } n \in G \\ 0 & \text{в ином случае} \end{cases}$$

где p – желаемый процент головных узлов;

r - текущий номер цикла;

G - набор узлов, которые не были головными узлами в последние 1/p циклов.

Решение изменить ГУ является вероятностным; возможно, что узел с низким зарядом энергии может быть выбран в качестве ГУ. Когда такой узел с низким зарядом энергии «умирает», то весь кластер становится нерабочим. Предполагается, что ГУ имеет большую дальность связи, так чтобы данные непосредственно могли достичь БС. Но это предположение не всегда верно, потому что сеть развертывается в большой области, и поэтому все головные узлы не могут связываться напрямую. После выбора ГУ, каждый головной узел отправляет информацию с помощью множественного доступа с кодовым разделением (CDMA) на другие узлы и рабочие узлы присоединяются к соответствующим головным узлам. Затем ГУ используют множественный доступ с временным разделением (TDMA), чтобы обеспечить время передачи данных для каждого узла, подключенного к ним. Затем происходит этап передачи данных, где рабочие узлы собирают данные и отправляют эти собранные данные к их соответствующим ГУ. Обработка полученных данных (агрегация данных и объединение данных) осуществляется головным узлом и обработанные данные отправляются к БС.

III. Поколения протоколов маршрутизации LEACH

A. LEACH-B (Сбалансированный)

Исследователем Андреа Депедри был предложен новый алгоритм, названный LEACH-B [7]. Протокол LEACH-B основан на децентрализованных алгоритмах формирования кластеров, в которых сенсорный узел знает только о своей собственной позиции и позиции конечного получателя, но не о положении всех остальных сенсорных узлов. LEACH-B работает по следующим этапам: алгоритм выбора ГУ, формирование кластеров и передача данных с множественным доступом. Каждый сенсорный узел выбирает свой ГУ путем оценки энергии, затрачиваемой в пути между конечным получателем и собой. Это обеспечивает более эффективное потребление энергии в сети, чем при использовании протокола LEACH, но таким образом быстро расходуется энергия головных узлов.

B. LEACH- C (Централизованный)

Профессор Венди Хейнзельман представил первый централизованный протокол маршрутизации, названный централизованным протоколом LEACH (LEACH-C) [8]. Основной LEACH использует распределенный алгоритм формирования кластеров и он не дает никакой гарантии относительно размещения и / или количества ГУ. Поскольку кластеры являются адаптивными, получение плохой структуры кластеризации в течение определенного цикла не будет сильно влиять на общую производительность сети. Тем не менее, использование алгоритма центрального управления формирования кластеров поможет формировать более качественные кластеры путем рассредоточения ГУ по всей сети. Это является основой для LEACH-C, протокола, использующего централизованный алгоритм кластеризации и подобного стационарного протокола LEACH. Другими словами можно сказать, что LEACH не имеет представления о местоположениях головных узлов. Тем не менее, централизованный протокол LEACH может обеспечивать лучшую производительность, распределяя ГУ всей сети. Во время фазы настройки, каждый узел посылает информацию об оставшейся энергии и о своем местоположении на БС. Затем БС запускает централизованный алгоритм формирования кластеров, чтобы определить кластеры для данного цикла. Но в связи с тем, что этот протокол требует информацию о местоположении всех датчиков в сети, то он не является надежным. Протокол LEACH-C является более эффективным, чем LEACH. Это объясняется тем,

что БС имеет глобальные сведения о местоположении и энергии всех узлов в сети, так что она может производить лучшие кластеры, которые будут требовать меньше энергии для передачи данных.

C. LEACH- E (Энергетический)

В протоколе LEACH-E улучшен процесс выбора ГУ по сравнению с протоколом LEACH. LEACH-E поделен на разные циклы подобно протоколу LEACH. В первом цикле все сенсорные узлы имеют одинаковую вероятность для того чтобы быть головным узлом кластера. После первого цикла передачи остаточная энергия каждого узла будет иметь разный уровень, и на основе этого узел, имеющий более высокую остаточную энергию, будет выбран в качестве ГУ кластера, а другие узлы в кластере, имеющие меньшую энергию, становятся членами кластера [9].

D. LEACH -F (Фиксированное число кластеров)

Основной принцип формирования кластера в LEACH-F заключается в начале настройки сети и последующем ее закреплении. Положение ГУ изменяется среди узлов в кластере, подобно тому, как это происходит в протоколе LEACH. Преимущество этого процесса по сравнению с LEACH в том что, в начале каждого цикла не задается конечных установок, как это происходит в протоколе LEACH. LEACH-F использует централизованный алгоритм формирования кластеров, подобный LEACH-C. Недостатком данного протокола является то, что фиксированные кластеры протокола LEACH-F не позволяют добавить в себя новые узлы, добавленные к сети и не корректируют свое поведение, когда один из узлов сети выходит из строя [10].

E. K-LEACH (K-medoids)

Рассматриваемый протокол K-LEACH использует K-медоидный (K-medoids) алгоритм кластеризации. Он представляет собой вариант хорошо известного метода k-means (метод к-средних). В отличие от k-means, в k-medoids в качестве центроидов может выступать не любая точка, а только какие-то из имеющихся наблюдений.

Алгоритм кластеризации K-LEACH обеспечивает получение высокооднородной кластеризации узлов и очень хороший выбор ГУ. Хорошо известно, что сохранение энергии в БСС в фазе установки сильно зависит от кластеризации узлов передачи и прима для первого цикла общения.

Протокол K-LEACH считает степень удаленности узлов от центра кластера в качестве основного критерия при выборе ГКУ (со второго раунда и далее). Протокол K-LEACH разделен на множество раундов, в каждом раунде содержит фазу формирования кластеров и фазу устойчивого состояния [11].

F. LEACH-P (Производительность)

Протокол LEACH-P учитывает вероятность выбора EAMR (многопутевая маршрутизация на основе энергии) в алгоритме LEACH и делает лучший выбор при выборе головных кластерных узлов и оптимизирует возможность кластера на восстановление. Результаты моделирования показывают, что LEACH-P улучшает время жизни сети по сравнению с LEACH [12]. Это означает, что LEACH-P обеспечивает большее время жизни сети, чем LEACH.

G. LEACH-S (Централизованная и Распределенная иерархическая кластеризация с адаптивным низким энергопотреблением на основе солнечной энергии)

Протокол LEACH-S на основе солнечной энергии в БСС позволяет увеличивать время жизни сетей. В S-LEACH некоторые узлы приспособлены под солнечную энергию, и эти узлы будут выступать в качестве ГУ при основной зависимости от их солнечного статуса. Как LEACH, так и LEACH-C являются расширением S-LEACH. Понятие схемы солнечной энергии применяется к централизированному и децентрализированному протоколу LEACH. В централизованном LEACH-S, приемный узел выбирает ГУ с помощью улучшенного алгоритма центрального управления. В LEACH-S, солнечный статус наряду с энергией сенсорных узлов передается к приемнику и узлы, имеющие более высокую энергию, выбираются в качестве ГУ. Когда количество узлов на основе солнечной энергии увеличивается, производительность сенсорной сети также увеличивается и от этого так же увеличивается время жизни сети. Продолжительность светового дня увеличивает время жизни сенсорной сети. Переключение головных кластерных узлов осуществляется, если продолжительность светового дня мала. В распределенном LEACH на основе солнечной энергии, преимущество при выборе ГУ отдается узлам, работающим от солнечной энергии. Вероятность стать головными узлами у узлов, работающих от солнечной энергии выше, чем у узлов, работающих от аккумуляторов [13].

H. T-LEACH (LEACH на основе порогового значения)

T-LEACH протокол представляет собой протокол кластеризации БСС со схемой замены головного кластерного узла на основе порогового значения. T-LEACH уменьшает количество выборов ГУ при помощи порогового значения остаточной энергии. Время жизни целых сетей может быть продлено по сравнению с существующими протоколами кластеризации за счет снижения количества выборов ГУ и замены расхода. Результаты моделирования показывают, что T-LEACH превзошел LEACH с точки зрения потребления энергии и времени жизни сети [14].

I. V-LEACH (заместитель)

В протоколе V-LEACH кластер содержит ГУ (ответственный только за отправку данных, полученных от членов кластера к БС), ГУ-заместитель (узел, который станет головным узлом кластера в случае выхода из строя ГУ), узлы кластера (собирающие данные из среды и направляющие их к ГУ). В протоколе V-LEACH, помимо существования в кластере ГУ, есть и ГУ-заместитель, который берет на себя роль ГУ, когда первоначальный головной узел выходит из строя. При использовании этого, данные, собираемые узлами кластера, всегда достигнут базовой станции. Поэтому нет необходимости избирать новый ГУ каждый раз при выходе из строя ГУ. Это позволит увеличить общее время жизни сети. Протокол V-LEACH затрачивает меньше энергии по сравнению с LEACH, в результате чего увеличивается время жизни сети [15].

J. W-LEACH (Иерархическая кластеризация с адаптивным низким энергопотреблением в взвешенной агрегацией)

W-LEACH представляет собой централизованный алгоритм агрегации данных. W-LEACH состоит из фазы установки и фазы устойчивого состояния аналогично традиционному LEACH. В фазе установки, W-LEACH сначала вычисляет значение веса, Wi и присваивает его каждому сенсору Si. Авторы модифицировали определение p как процент от максимального количества ГУ вместо фактического количества ГУ, как это определено в исходном протоколе LEACH. Максимум p% работоспособных сенсоров выбирается для того, чтобы быть ГУ на основе вычисленных весов, таким образом, что чем больше веса, тем выше вероятность для них стать ГУ. В отличие от LEACH, W-LEACH не принимает во внимание, был ли этот узел в качестве ГУ в предыдущие несколько этапов. После того как выбраны ГУ, кластеры формируются таким образом, что каждый сенсор назначается к его ближайшему ГУ. Эта концепция делает W-LEACH общим алгоритмом агрегации, который может быть использован с любым методом маршрутизации. Результаты моделирования показывают, что протокол W-LEACH увеличивает время жизни сети [16].

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены протоколы маршрутизации беспроводных сенсорных сетей, основанные на протоколе LECAH. Протокол LEACH направлен на увеличение времени жизни беспроводной сенсорной сети и на сохранение энергии путем случайного выбора головного узла. Выбор ГУ является случайным. Хотя протокол LEACH и улучшает энергоэффективность, но он очень хорошо работает лишь в большой зоне покрытия, которая нуждается в множественных ретрансляционных передачах, не поддерживает мобильность, надежность и т.д. Для решения этих недостатков, были предложены различные протоколы, разработанные на базе протокола LEACH для того, что сделать беспроводные сенсорные сети более эффективными и продлить срок их службы. Рассмотренные в статье протоколы призваны к решению многих недостатков, присущих протоколу LEACH. Тем не менее, многое еще предстоит сделать, и необходимо найти более эффективную, масштабируемую и надежную схему кластеризации для повышения энергопотребления и повышения срока эксплуатации малых и больших беспроводных сенсорных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Akyildiz.I. F., Weilian S, Sankarasubramaniam:A Survey on Sensor Networks.In: IEEE Communications Magazine, 40(8), pp. 102-114, 2002.

[2] Mainwaring.A, Polastre.J, Szewczyk.J, Culler.D,J:Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring., pp. 90-95, 2002.

[3] Tubaishat.M, Madria.S: Sensor Networks: An Overview. IEEE Potentials, pp. 20-23, May 2003.

[4] Eleburuike.I.O, Dekunle.S.S: Energy Efficient Wireless Sensor Network Using Hierarchical Routing Technique: Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Blekinge, Sweden, 2010.

[5] Heinzelman. W.R.,Chandrakasan: A, “Energy efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: IEEE ComputerSociety Proceedings, Vol. 8, pp. 10-20, 2000.

[6] Neetika, Kaur.S: Review on Hierarchical Routing in Wireless Sensor Networks.In: International Journal of Smart Sensors and Ad- Hoc Networks (IJSSAN), Vol. 2, Issue 3, pp. 85-90, 2012.

[7] Depedri. A, Zanella. A, Verdone.:An Energy Efficient Protocol for Wireless Sensor Networks. In: Proc. AINS, 2003, pp. 1-6, 2003.

[8] Heinzelman.W,Chandrakasan.A, Balakrishnan.H: An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks: IEEE Transaction on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660–670, 2002.

[9] Fan. X. N, Song. Y. L: Improvement on LEACH protocol of wireless sensor network. In: Proc. International Conference on Sensor Technologies and Applications, Sensor Comm., pp. 260-264, 2007.

[10] Manimala.P, Senthamil.R: A Survey on Leach-Energy Based Routing Protocol. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE), Vol.3, Issue 12, pp. 657-660, December,2013.

[11] Bakaraniya.P, Sheetal. M: K-LEACH: An improved LEACH Protocol for Lifetime Improvement in WSN. In: International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol-4, Issue 5, pp. 1521-1526, May, 2013

[12] Zhu.D,Cai.D:Research and simulation of energy efficient protocol for wireless sensor network. International Journal of Computer Engineering and Technology, Quanzhou, China, , pp.56-63, 2010.

[13] Thiemo .V, Hartmut R, Jochen. S, Adam .D, Juan .A: Solar-aware clustering in Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the Ninth IEEE Symposium on Computers and Communications, pp.15-21 June, 2004.

[14] Jiman .H and Joongjin .K: T-LEACH: The method of threshold-based cluster head replacement for wireless sensor networks,” published in springer Inf Syst Front, pp.101-109, 2008.

[15] Bani. R.M.,Abdalraheem A.: A Survey on LEACH-Based Energy Aware Protocols for Wireless Sensor Networks. Published in: Journal of Communications, Vol. 8, No. 3, pp.192-206, March, 2013.

[16] Hanady. M., Bader.A.:W-LEACH Based Dynamic Adaptive Data Aggregation Algorithm for Wireless Sensor Networks. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2013, pp.1-11, 2013.

Информация об авторе:

Евстифеева Екатерина Андреевна, старший преподаватель кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, e-mail: el_solitario@bk.ru

Features of LEACH-based routing protocols in wireless sensor networks

E.A. Evstifeeva

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract **– The article is a review of generations of routing protocols based on the hierarchical routing protocol LEACH. With the progress in wireless communication, wireless sensor networks have become widely used in various fields. Routing protocols play a significant role in the functioning of wireless sensor networks. Routing protocols can optimize the resources of a wireless sensor network, such as energy consumption, memory usage, and others. Energy-efficient routing protocols are a serious problem in the field of sensor networks. The development and application of various energy-efficient routing protocols can increase the lifetime of a sensor network.**

Keywords **– head node, LEACH, hierarchical routing, clustering, energy consumption**

References

[1] Akyildiz.I. F., Weilian S, Sankarasubramaniam:A Survey on Sensor Networks.In: IEEE Communications Magazine, 40(8), pp. 102-114, 2002.
[2] Mainwaring.A, Polastre.J, Szewczyk.J, Culler.D,J:Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring., pp. 90-95, 2002.
[3] Tubaishat.M, Madria.S: Sensor Networks: An Overview. IEEE Potentials, pp. 20-23, May 2003.
[4] Eleburuike.I.O, Dekunle.S.S: Energy Efficient Wireless Sensor Network Using Hierarchical Routing Technique: Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Blekinge, Sweden, 2010.
[5] Heinzelman. W.R.,Chandrakasan: A, "Energy efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: IEEE ComputerSociety Proceedings, Vol. 8, pp. 10-20, 2000.
[6] Neetika, Kaur.S: Review on Hierarchical Routing in Wireless Sensor Networks.In: International Journal of Smart Sensors and Ad- Hoc Networks (IJSSAN), Vol. 2, Issue 3, pp. 85-90, 2012.
[7] Depedri. A, Zanella. A, Verdone.:An Energy Efficient Protocol for Wireless Sensor Networks. In: Proc. AINS, 2003, pp. 1-6, 2003.
[8] Heinzelman.W,Chandrakasan.A, Balakrishnan.H: An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks: IEEE Transaction on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660–670, 2002.
[9] Fan. X. N, Song. Y. L: Improvement on LEACH protocol of wireless sensor network. In: Proc. International Conference on Sensor Technologies and Applications, Sensor Comm., pp. 260-264, 2007.
[10] Manimala.P, Senthamil.R: A Survey on Leach-Energy Based Routing Protocol. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE), Vol.3, Issue 12, pp. 657-660, December,2013.
[11] Bakaraniya.P, Sheetal. M: K-LEACH: An improved LEACH Protocol for Lifetime Improvement in WSN. In: International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol-4, Issue 5, pp. 1521-1526, May, 2013
[12] Zhu.D,Cai.D:Research and simulation of energy efficient protocol for wireless sensor network. International Journal of Computer Engineering and Technology, Quanzhou, China, , pp.56-63, 2010.
[13] Thiemo .V, Hartmut R, Jochen. S, Adam .D, Juan .A: Solar-aware clustering in Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the Ninth IEEE Symposium on Computers and Communications, pp.15-21 June, 2004.
[14] Jiman .H and Joongjin .K: T-LEACH: The method of threshold-based cluster head replacement for wireless sensor networks," published in springer Inf Syst Front, pp.101-109, 2008.
[15] Bani. R.M.,Abdalraheem A.: A Survey on LEACH-Based Energy Aware Protocols for Wireless Sensor Networks. Published in: Journal of Communications, Vol. 8, No. 3, pp.192-206, March, 2013.
[16] Hanady. M., Bader.A.:W-LEACH Based Dynamic Adaptive Data Aggregation Algorithm for Wireless Sensor Networks. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2013, pp.1-11, 2013.

Анализ особенностей внедрения систем поддержки принятия решений при управлении инфраструктурой сети оператора связи

Н.С. Мальцева [1], Л.Р. Тенешев [1]

[1] *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Россия*

***Аннотация*: Статья посвящена анализу систем поддержки принятия решений для управления инфраструктурой сети оператора связи. В работе проводится анализ различных элементов OSS/BSS (англ. Operation Support System/Business Support System – система поддержки операций/система поддержки бизнеса) систем. Рассматриваются преимущества и сложность поддержки принятия решений в информационных системах в работе операторов связи.**

***Ключевые слова* – оператор связи, система поддержки принятия, эксплуатация, телекоммуникационная система.**

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительного развития технологий и увеличения сложности телекоммуникационной инфраструктуры, системы поддержки принятия решений (ППР) становятся обязательным элементом успешного управления сетями, серверами и приложениями. Системы ППР является ключевым элементом в непрерывном процессе предоставления качественных услуг пользователям, обеспечении бесперебойной работы сети, управлении ресурсами и автоматизации других процессов, связанных с эксплуатацией телекоммуникационной системы. Централизованная система управления сети обеспечивает оптимизацию использования сетевой инфраструктуры операторами связи. Поддерживается широкий спектр услуг, включая передачу голоса, данных, интернет и мобильную связь. Анализ больших данных формирует детализированные отчеты, предоставляющие операторам информацию для планирования мероприятий в области эксплуатации телекоммуникационной системы. Однако, несмотря на значительные достижения в этой области, существующие системы ППР сталкиваются с ограничениями которые затрудняют их использование при управлении сетевой инфраструктурой и ограничивают возможности операторов связи.

Согласно исследованию, Telecoms.com, более 60% операторов сталкиваются с трудностями при интеграции новых и использовании существующих систем ППР. В отчете под названием "The State of OSS/BSS 2020" от Analysys Mason подчеркивается, что многие операторы испытывают проблемы с совместимостью между старыми и новыми системами [1].

В опросе, проведенном Omdia, около 40% респондентов сообщили, что безопасность данных при управлении инфраструктурой сети оператора связи является их главным опасением. Отчет "2021 Cybersecurity Threats and Trends in Telecom" уведомляет о возрастании кибератак на телекоммуникационные компании [2].

Исследование, проведенное Bain & Company, показало, что 55% компаний сталкиваются со сложностями обеспечения эффективности при обработке больших объемов данных при использовании систем ППР в управлении инфраструктурой сети. В отчете "Big Data in Telecom" указывается, что неэффективное управление данными приводит к снижению точности прогнозов и аналитики [3].

По данным Gartner, около 45% управляемых процессов при работе все сети оператора мобильной связи все еще требуют ручного вмешательства. В отчете "Automation in Telecommunications" отмечается, что автоматизация может значительно снизить операционные расходы [4].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основная задача заключается в необходимости выявить проблемы, связанные с использованием комплексных систем ППР, с целью оптимизации их внедрения и повышения эффективности работы предприятий связи. Необходимо определить точки слабого воздействия при внедрении систем ППР для управления инфраструктурой сети оператора связи.

III. ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

В исследовании, представленном Кокаревым А.А. [5] рассмотрены современные системы поддержки эксплуатационной деятельности оператора российских телекоммуникационных сетей, проведен анализ и их сравнение. Рассмотрены современные OSS, применяемые российскими операторами для автоматизации процессов эксплуатации сетей связи. Основными практическими результатами являются широкий анализ рынка OSS решений, функционирующих на сетях операторов связи в России, а также разработаны модели различных подходов к организации систем класса OSS, учитывающие специфические особенности российских телекоммуникационных сетей и сделаны выводы об эффективности этих подходов.

В работе [6] был рассмотрен подход, предусматривающий постепенное преобразование инфраструктуры OSS-решений. Основой будущей комплексной OSS должна стать единая система учета ресурсов сети — Inventory. Функции OSS-системы представлены на рис.1

Рис. 1. Функции OSS-систем

В нее можно перемещать данные из существующих систем управления, однако, первоочередной задачей является внесение информации о тех технологических областях, где автоматизация процессов эксплуатации развита слабо. Кроме того, в Inventory необходимо включить сведения о ресурсах фиксированной сети доступа, развертывание которой в настоящее время осуществляет большинство операторов мобильной связи в рамках тенденции конвергенции сетей. Для поддержания актуального состояния информации, хранящейся в Inventory, необходима универсальная система, обеспечивающая взаимодействие с оборудованием, способная получать данные непосредственно с сетевых устройств или из систем управления, предоставляемых производителями оборудования, и автоматически обновлять информацию в базе данных. Однако, несмотря на преимущества, такие системы имеют определенные ограничения, которые необходимо учитывать при принятии решения о внедрении.

Внедрение комплексной OSS требует интеграции с существующими системами и инструментами. Это может быть сложным процессом, который требует значительных временных и финансовых затрат, а также наличия технических специалистов. Разработка или приобретение комплексной системы учета ресурсов сети может потребовать значительных финансовых вложений. Переход на новую систему требует обучения сотрудников, что может отвлекать их от выполнения основных функций.

При этом в работе [7] проводится анализ систем управления неисправностями (FMS, Fault Management System), задачей которого является выбор метода, который в наибольшей степени удовлетворяет задачам по взаимодействию с оборудованием на сети, стоящим перед оператором связи. В работе приведен перечень систем, входящих в состав разрабатываемого комплекса, и даны их краткие описания. Указано, что оператор применял две системы, приобретенные ранее: систему, предназначенную для управления заказами (OMS, Order Management System) и систему, обеспечивающую управление взаимоотношениями с клиентами (CRM, Customer Relationship Management). Настройка FMS для работы с разнообразным оборудованием и инфраструктурой может требовать значительных временных и трудозатрат. Необходимость индивидуальной адаптации под каждую систему может увеличить время внедрения. FMS могут иметь ограничения в поддержке различных стандартов и технологий оборудования. Это может привести к несовместимости с новыми устройствами или сетевыми топологиями, тем самым ограничивая возможности оператора. Эффективность использования FMS зависит от качества вводимых данных. Неполные или неактуальные данные могут привести к неверной диагностике неисправностей и, как следствие, к расплывчатым решениям.

Если OSS-комплекс реализован одним разработчиком, то его преимуществом является возможность "сквозного" протоколирования изменений в различных модулях, входящих в состав комплекса, а также отсутствие проблем при интеграции модулей друг с другом. Подобное решение позволяет создавать и сохранять историю изменений, внесенных в любой модуль комплекса, с указанием учетных записей сотрудников или клиентов, выполнивших эти изменения. Кроме того, оно может оказаться полезным при разрешении нештатных ситуаций или конфликтов, периодически возникающих между сотрудниками.

Комплексное решение для автоматизации процессов центра обработки данных (ЦОД) в "коробочном" исполнении представлено системой OSS Prime [8]. Функциональное назначение данного комплекса состоит в автоматизации основных бизнес-процессов, связанных с работой ЦОДа, технического учета,

автоматизации взаимодействия с клиентами, организации документооборота (включая создание, редактирование и хранение основных документов), а также в интеграции с системой 1С. OSS Prime является программным продуктом, разработанным компанией "АтлантСистемс", входящей в группу компаний "ЭКРАН". Компания "Атлант-Системс" использует многолетний опыт разработки и сотрудничества с ведущими компаниями телекоммуникационного рынка, создавая системы в соответствии со стандартами TM Forum.

В большинстве случаев сеть оператора связи состоит из нескольких отдельных компонентов: независимо организованной сети доступа и обособленно построенной транспортной сети. Каждый из этих компонентов требует индивидуального подхода к эксплуатации, а увеличение сложности и распределенности ресурсов, находящихся в распоряжении оператора, приводит к усложнению и, соответственно, удорожанию решения рассматриваемых задач.

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопрос реализации эффективного функционирования OSS/BSS систем является сложной задачей, требующей комплексного решения с учетом особенностей топологии сети, используемого оборудования, оказываемых услуг и абонентской базы оператора связи. Наличие подобной многофакторности обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований в области адаптации OSS/BSS систем с учетом специфики оператора связи.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Analysys Mason "The State of OSS/BSS 2020". URL: https://www.telecoms.com/
[2] Omdia "2021 Cybersecurity Threats and Trends in Telecom". URL: https://omdia.tech.informa.com/
[3] Bain & Company "Big Data in Telecom 2021" URL: https://www.bain.com/
[4] Gartner "2022 Automation in Telecommunications" URL: https://www.gartner.com/en
[5] Кокарев А.А. «Анализ и сравнение подходов к организации OSS систем на сетях российских операторов связи». Вестник телекоммуникационных технологий, 2023, № 2, с. 45-52 URL: https://argustelecom.ru/nauchnayadeyatelnost.html?ysclid=m87o3sxfxj3900429
[6] М. Феноменов, И. Садовский «OSS-Mobile и проблемы поддержки эксплуатации сетей мобильной связи» М.: Аргус, 2010. С. 42-44 URL: https://argustelecom.ru/files/Stat'i/oss_mobile_i_problemy_podderzshki.pdf?ysclid=m87o8fgkm5723885663
[7] В. Савич «Выбор метода обнаружения сбоев на сети для расширения OSS-комплекса крупного оператора связи функциональностью Fault Management» "Научный форум. Сибирь" Том 2, №3 2016. С. 17-20
[8] «BOSS Forum: OSS/BSS для операторов связи, корпораций и госсектора» "Connect", №11-12, 2016 С. 14-16

Информация об авторах:

Мальцева Наталия Сергеевна – к.т.н., доц., доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, Астрахань, Россия, e-mail: maltsevans@mail.ru

Тенешев Лерон Раилевич – аспирант направления «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», Астраханского государственного технического университета, Астрахань, Россия, e-mail: super.teneshev@mail.ru

Analysis of the features of the implementation of decision support systems in the management of the network infrastructure of a telecom operator

N.S. Maltseva[1], L.R. Teneshev[1]

[1] *Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

***Abstract* - The article is devoted to the analysis of decision support systems for managing the network infrastructure of a mobile operator. The work analyzes various elements of OSS/BSS (**Operation Support System/Business Support System**). The advantages and complexity of decision support in information systems in the work of telecom operators are considered.**

Keywords – **telecom operator, decision support system, operation, telecommunication system**.

References

[1] Analysys Mason "The State of OSS/BSS 2020". URL: https://www.telecoms.com/
[2] Omdia "2021 Cybersecurity Threats and Trends in Telecom". URL: https://omdia.tech.informa.com/
[3] Bain & Company "Big Data in Telecom 2021" URL: https://www.bain.com/
[4] Gartner "2022 Automation in Telecommunications" URL: https://www.gartner.com/en
[5] Kokarev A.A. "Analysis and comparison of approaches to the organization of OSS systems on the networks of Russian telecom operators" Moscow: Argus, 2023. 190C URL: https://argustelecom.ru/nauchnayadeyatelnost.html?ysclid=m87o3sxfxj3900429
[6] M. Fenomenov, I. Sadovsky "OSS-Mobile and problems of supporting the operation of mobile networks" Moscow: Argus, 2010. Pp. 42-44 URL: https://argustelecom.ru/files/Stat'i/oss_mobile_i_problemy_podderzshki.pdf?ysclid=m87o8fgkm5723885663
[7] V. Savich "Choosing a method for detecting network failures to expand the OSS complex of a large telecom operator with Fault Management functionality" "Scientific Forum. Siberia" Vol. 2, No. 3 2016. Pp. 17-20
[8] "BOSS Forum: OSS/BSS for telecom operators, corporations and public sector" "Connect", No. 11-12, 2016 P. 14-16

Применение лабораторного комплекса «Телекоммуникационные линии связи» для подготовки специалистов в области инфокоммуникационных технологий

А.Д. Призенцов[1], А.С. Логинов [1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Астраханский государственный технический университет" Астрахань, Россия*

Аннотация – Лабораторный комплекс «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02 это многофункциональное лабораторное оборудование для изучения кабельных линий связи, применяется в учебном процессе на кафедре «Связь» Астраханского государственного технического университета в рамках изучения дисциплины «Направляющие системы электросвязи» для подготовки бакалавров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Лабораторный комплекс позволяет проводить диагностику неисправностей и обслуживание волоконно-оптических, коаксиальных и витых пар, оценивать их характеристики (затухание, пропускную способность) и исследовать устойчивость к внешним воздействиям (электромагнитные помехи, обрывы). Лабораторный комплекс позволяет сочетает теорию с практикой: студенты отрабатывают навыки тестирования, устранения неисправностей и работы с оборудованием, формируя знания для обслуживания телекоммуникационной инфраструктуры.

Ключевые слова **– волоконно-оптические кабели, коаксиальные кабели, затухание, пропускная способность, отражённые сигналы.**

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительного развития телекоммуникационных технологий подготовка высококвалифицированных специалистов требует внедрения инновационных образовательных решений. Современные линии связи, включая волоконно-оптические, коаксиальные и симметричные кабельные системы, обладают сложными характеристиками, которые невозможно изучить исключительно теоретически. Для освоения принципов их работы, диагностики и эксплуатации необходимы практические навыки, формируемые на основе лабораторных исследований.

Лабораторный комплекс «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02, предназначен для изучения процессов передачи сигналов в телекоммуникационных линиях связи, а также формирования у студентов практических навыков тестирования и диагностики кабельных систем.

Многие учебные заведения сталкиваются с дефицитом оборудования, адаптированного к реальным сценариям и отвечающего современным стандартам. В 2024 г на кафедре «Связь» Астраханского государственного технического университета в рамках изучения дисциплины «Направляющие системы электросвязи» был внедрен в учебный процесс лабораторный комплекс «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02 для подготовки бакалавров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Лабораторный комплекс «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02 - это многофункциональное лабораторное оборудование, предназначенное для изучения принципов диагностики и обслуживания кабельных линий связи в рамках образовательных программ технических вузов, колледжей и специализированных курсов. Лабораторный комплекс ТЛС-02 позволяет проводить лабораторные и практические работы по тестированию и устранению неисправностей в телекоммуникационных системах, способствуя подготовке квалифицированных специалистов в области связи. Он предоставляет студентам и специалистам возможность глубоко изучить процессы передачи сигналов, обслуживания кабельной инфраструктуры, а также исследовать характеристики и особенности различных типов кабелей: волоконно-оптических (включая анализ затухания, дисперсии и пропускной способности), коаксиальных и симметричных. Лабораторный комплекс ТЛС-02 также позволяет оценивать устойчивость кабельных систем к внешним

воздействиям, таким как электромагнитные помехи, температурные перепады и механические нагрузки, что формирует комплексное понимание их применения в реальных условиях [1].

Лабораторный комплекс «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02 при изучении дисциплины «Направляющие системы электросвязи» позволяет сочетать теоретическую подготовку студентов с выработкой практических навыков, закрепляя знания через работу с оборудованием диагностики неисправностей кабельных линий [1].

II. АКТУАЛЬНОСТЬ

В современных системах связи ключевым элементом являются направляющие системы, такие как коаксиальные кабели, витые пары и оптоволоконные линии. Эффективность передачи сигналов в этих системах напрямую зависит от их физических характеристик, условий эксплуатации и внешних воздействий. Несмотря на широкое применение цифровых анализаторов, остаются актуальными вопросы, связанные:

- с влиянием неоднородностей (обрывы, короткие замыкания, волновые сопротивления) на распространение сигналов в коаксиальных кабелях;
- определением полосы пропускания и затухания сигнала в линиях связи при изменении частотных характеристик;
- минимизацией потерь в оптоволоконных стыках, вызванных погрешностями монтажа или механическими повреждениями;
- оптимизацией методов диагностики кабельных линий с использованием осциллографов и генераторов сигналов;
- снижение потерь, дисперсии и шумовых эффектов в витых парах при изменении условий экранирования [1].

Внедрение лабораторного комплекса ТЛС-02 в учебный процесс и разработка к нему методического обеспечения не только улучшит качество образования, но и будет способствовать подготовке специалистов с востребованными для рынка телекоммуникаций навыками.

III. ОПИСАНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Лабораторный комплекс ТЛС-02 предназначен для комплексного изучения процессов передачи сигналов в коаксиальных, витых парах и волоконно-оптических линиях связи. В состав лабораторного комплекса входят следующие элементы: лабораторный стенд ТЛС-02, генератор сигналов АКИП-3407/3А, цифровой осциллограф GDS-71072B. Для выполнения практических работ в лабораторном комплексе используются различные типы кабелей. В частности, применяются витая пара категорий (Cat.5e) и (Cat.6), коаксиальные кабели (RG-58), а также оптические волокна многомодовые и одномодовые с коннекторами типа ST/ST [1].

Лабораторный стенд ТЛС-02 представлен на рис.1.

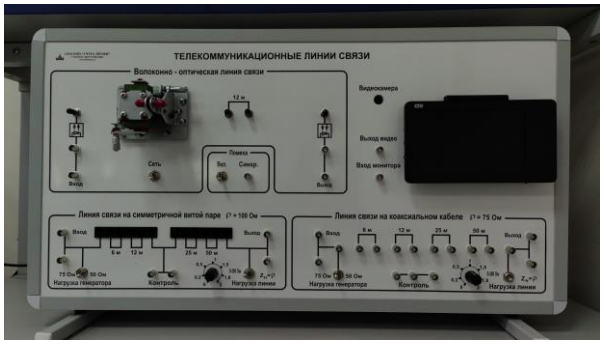


Рис. 1. Лабораторный стенд ТЛС-02

Стенд разделён на четыре рабочие области. Рассмотрим область для исследования коаксиальных кабелей, представленной на рис. 2.

Рис. 2. Область для исследования коаксиальных кабелей на стенде ТЛС-02

Лабораторный стенд ТЛС-02 позволяет исследовать сигналы в коаксиальной линии связи длиной до ста метров с выходами на контроль. В этой зоне также расположены тумблеры для переключения нагрузки генератора на 50 и 75 Ом (для согласования выхода генератора со входом линии связи), а также линия нагрузки от 0 до 200 Ом (для согласования волнового сопротивления). Кроме того, в этой зоне имеется регулятор, который позволяет плавно изменять нагрузку линий.

В следующей рабочей области проводятся исследования симметричный кабелей, как показано на рис. 3.

Рис. 3. Область для исследования симметричных кабелей на стенде ТЛС-02

В данной области лабораторный стенд ТЛС-02 позволяет исследовать сигналы, проходящие через симметричную витую пару, на расстояние до ста метров. В стенде также имеет выходы для контроля и нагрузки от генератора и линий.

В третьей области проводятся исследования оптоволоконных кабелей, как показано на рис 4.

Рис. 4. Область для исследования оптоволоконных кабелей на стенде ТЛС-02

В данной области исследуются процессы в волоконно-оптической линии связи на расстояние до 12 метров. В приборе имеются устройства для смещения поперечного и продольного световодов, предназначенные для имитации зазоров в оптическом волокне.

В последней области стенда располагается экран для воспроизведения видеоизображения, полученного с видеокамеры, как показано на рис. 5.

Рис. 5. Правая верхняя область стенда ТЛС-02

В комплект лабораторного входит генератор АКИП-3407/3А, представленный на рис. 6.

Рис. 6. Генератор АКИП-3407/3А

Генератор АКИП-3407/3А служит для формирования тестовых сигналов, имитирующих реальные условия передачи данных. В практических работах в составе лабораторного комплекса он используется, для:

- исследования отражений в коаксиальных кабелях;
- анализа затухания в витых и оптических линиях;
- тестирования устойчивости систем к электромагнитным помехам.

Генератор формирует сигналы различной формы (синусоидальные, прямоугольные, импульсные) с регулируемыми параметрами:

- частотный диапазон от 1 мкГц до 30 МГц;
- амплитуда от 10 мВ до 10В;
- модуляция - амплитудная (АМ), частотная (ЧМ), фазовая (ФМ), широтно-импульсная (ШИМ) [2].

Еще одним основным элементом лабораторного комплекса является осциллограф, представленный на рис. 7.

Рис. 7. Осциллограф GDS-71072B

Осциллограф используется для визуализации, анализа и документирования параметров сигналов, проходящих через линии связи. Ключевые функции осциллографа заключаются в измерении амплитуды, частоты, времени нарастания сигналов, а также сохранения данных на внешние носители.

Осциллограф преобразует аналоговый сигнал в цифровой формат с помощью 8-битного АЦП, с частотой дискретизации 250 МГц, полосой пропускания 70 МГц и временной разверткой, X-Y [3].

IV. Пример практических работ

Методическое обеспечение дисциплины «Направляющие системы электросвязи» содержит 5 лабораторных работ. Лабораторные работы были разработаны авторами статьи на кафедре «Связь» под руководством - к.т.н., доц. Осовского А.В.

В лабораторной работе №1 "Ознакомление с работой генератора и осциллографа" студенты изучат принципы работы генератора сигналов (серии АКИП-3407А) и цифрового осциллографа (серии GDS-71072B). В ходе работы проводится настройка генератора для генерации

сигналов различной формы: импульсный сигнал, синусоидальный сигнал, прямоугольный и треугольный сигналы. Осваиваются основные органы управления осциллографа, включая режимы синхронизации, курсорные измерения и масштабирование. На практике студенты могут наблюдать сигналы на экране осциллографа и анализировать их параметры, такие как амплитуда и частота.

В лабораторной работе №2 "Определение характера распространения сигналов в коаксиальных кабелях при неоднородностях" студенты изучат искажения сигналов в коаксиальных кабелях (типа RG-58) при внесении неоднородностей (обрыв, короткое замыкание). В ходе работы проводится моделирование неоднородности в линии связи, анализируются отражённые сигналы с помощью осциллографа и рассчитываются волновое сопротивление кабеля по его геометрическим параметрам. Это позволяет выявлять дефекты в кабельных системах, такие как обрывы и короткие замыкания, а также понять как происходит влияние согласования волнового сопротивления на качество передачи данных.

В лабораторной работе №3 "Определение полосы пропускания коаксиальной линии и затухания сигнала" студенты изучат затухание сигнала на разных частотах. В ходе работы для изучения коаксиальных кабелей и их пропускной способности моделируются ситуации с повышением частоты. После проведенных измерений студенты строят графики зависимости затухания от частоты, анализируют полосу пропускания коаксиальных кабелей и изучают зависимость затухания от частоты.

В лабораторной работе №4 "Определение характера распространения сигналов в витой паре" студенты исследуют особенность передачи сигналов по витой паре, (категории CAT5E). В ходе работы исследуется влияние экранирования на помехозащищенность, проводятся измерения параметров кабеля, такие как волновое сопротивление и задержка сигнала, а также анализируют искажения при передаче высокочастотных сигналов.

В лабораторной работе №5 "Исследование влияния неоднородностей в стыках оптоволоконных кабелей на затухание" студенты изучат оптические кабели (одномодовые и многомодовые). В ходе работы проводится моделирование различных неоднородностей в стыках, такие как поперечное смещение и зазор, измеряется затухание сигнала при различных параметрах этих неоднородностей и анализируются методы минимизации потерь, такие как полировка торцов и центрирование.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторный комплекс «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02 - это комплексное решение для подготовки специалистов в области телекоммуникаций. Освоение теории и практики по дисциплине «Направляющие системы электросвязи» для бакалавров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» достигается посредством 5 лабораторных работ, сочетающих в себе расчеты с экспериментами и формирующих глубокое понимание физических процессов, происходящих в кабельных линиях связи.

Лабораторный комплекс «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02 успешно решает задачи диагностики неоднородностей с помощью осциллографа, оценки влияния электромагнитных помех и механических повреждений на качество кабельных линий связи, а также способствует подготовке к работе с технологиями, такими как GPON и 10G Ethernet.

Таким образом, внедрение лабораторного комплекса «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02 совместно с разработанным к нему методическим обеспечением в учебный процесс не только улучшает качество образования, но и способствует формированию кадрового резерва для экономики, посредством подготовки специалистов с востребованными для рынка телекоммуникаций навыками.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность к.т.н., доц. Осовскому А.В. за помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Типовой комплект учебного оборудования «Телекоммуникационные линии связи» ТЛС-02 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://labstand.ru/catalog/telekommunikaczii/tipovoj-komplekt-uchebnogo-oborudovaniya-telekommunikaczionnye-linii-svyazi-tls-02

[2] Генератор сигналов специальной формы АКИП-3407/3А-ПриСТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://prist.ru/catalog/generatory_signalov_spetsialnoy_formy/akip_3407_3a/?ysclid=m85nk66tcu992214016

[3] Осциллограф GDS-71102B [Электронный ресурс]. – Режим доступа:https://www.pribor-x.ru/catalog/radio_i_elektroizmeritelnye_pribory/ostsillografy/ostsillograf_gds_71102b/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=YA_Tovarnaya_Vse&utm_term=---autotargeting&yclid=6952556449956364287

Информация об авторах:

Призенцов Андрей Дмитриевич, бакалавр по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», техник лаборатории «Сети связи» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, e-mail: prizentsov.andrey@mail.ru

Логинов Алексей Сергеевич бакалавр по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», техник лаборатории «Сети связи» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, e-mail: aleksej.loginov.03@bk.ru

Application of the laboratory complex "Telecommunication communication lines" for training specialists in the field of information and communication technologies

A.D. Prizentsov[1], A.S. Loginov[1]

[1]*Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia*

Abstract **– The laboratory complex "Telecommunication lines" TLS02 is a multifunctional laboratory equipment for studying cable communication lines, used in the educational process at the Department of Communications of the Astrakhan State Technical University as part of studying the discipline "Cable communication lines" for the bachelor's degree programs in the direction of "Information and communication technologies and communication systems". The laboratory complex allows you to search for and eliminate faults and maintain fiber-optic, coaxial and twisted pairs, evaluate their characteristics (attenuation, bandwidth) and study resistance to external influences (electromagnetic interference, interruptions). The laboratory complex combines theory with practice: students practice testing skills, searching for and eliminating faults and working with equipment, forming knowledge on servicing telecommunications infrastructure.**

Keywords **– fiber optic cables, coaxial cables, attenuation, bandwidth, reflected signals.**

REFERENCES

[1] Standard set of educational equipment "Telecommunication communication lines" TLS02[Electronic resource]. – Access mode: https://labstand.ru/catalog/telekommunikaczii/tipovoj-komplekt-uchebnogo-oborudovaniya-telekommunikaczionnye-linii-svyazi-tls-02

[2] AKIP-3407/3A-Priest special form signal generator [Electronic resource]. –Access mode : https://prist.ru/catalog/generatory_signalov_spetsialnoy_formy/akip_3407_3a/?ysclid=m85nk66tcu992214016

[3] GDS-71102B Oscilloscope [Electronic resource]. –Access mode: https://www.pribor-x.ru/catalog/radio_i_elektroizmeritelnye_pribory/ostsillografy/ostsillograf_gds_71102b/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=YA_Tovarnaya_Vse&utm_term=---autotargeting&yclid=6952556449956364287

Системная инженерия и инфокоммуникации

Научный сетевой журнал «Системная инженерия и инфокоммуникации» (свид. о регистрации СМИ Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г.) — это некоммерческое рецензируемое сетевое издание со свободным доступом. Сайт журнала: https://sys-engine.ru

Журнал ориентирован в первую очередь на молодых специалистов в области информационных технологий, робототехники, автоматики, электроники и телекоммуникаций. Аспиранты, магистранты и студенты могут опубликовать в журнале результаты своих исследований, собственный опыт разработки проектов, обзорные статьи.

Журнал выходит четыре раза в год, и принимает к публикации оригинальные статьи, соответствующие тематике журнала. Публикация в журнале бесплатна.

Журнал не преследует коммерческой выгоды, не выплачивает вознаграждения авторам, редакция и рецензенты не получают оплату за свою работу. Публикуя статью в сетевом издании «Системная инженерия и инфокоммуникации», авторы присоединяются к цели журнала — свободному распространению научного знания.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г.
Учредитель: Кутузов Денис Валерьевич
Сетевое издание размещено по адресу: sys-engine.ru
Электронная почта: d_kutuzov@mail.ru
Телефон: +7(964)88-22-445