

ЮГО–ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Ахмад Али Айед Ахмад

МЕТОД И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СООБЩЕНИЙ В
БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Таныгин Максим Олегович

Курск – 2024

Содержание

Введение.....	6
1 Проблемы предобработки сообщений в системах управления на базе беспроводных сенсорных сетей.....	15
1.1 Общая характеристика процессов передачи и обработки сообщений в беспроводных сенсорных сетях.....	15
1.1.1 Описание структуры системы управления, реализованной с использованием энергоэффективных протоколов связи.....	15
1.1.2 Особенности передачи данных в системах, реализованных по технологии сенсорных сетей	16
1.2 Анализ влияния подходов к передаче информации в беспроводных сенсорных сетях на качественные и количественные характеристики реализуемого процесса управления	19
1.3 Способы снижения энергопотребления элементов и устройств распределённых информационно-управляющих систем в режиме передачи данных	22
1.3.1 Общие подходы к снижению энергопотребления элементов информационно-управляющих систем, которые реализованы по технологии беспроводных сенсорных сетей.....	22
1.3.2 Снижение энергопотребления элементов информационно-управляющих систем за счёт кластеризации сенсоров.....	23
1.3.3 Снижение энергопотребления элементов информационно-управляющих систем за уменьшения числа циклов передачи сообщений.	25
1.3.4 Снижение энергопотребления элементов информационно-управляющих систем за уменьшения объёма передаваемых метаданных и служебной информации	27

1.3.5	Показатели обработки служебных данных в распределённых информационно-управляющих системах, реализованных на базе протоколов связи с низкой пропускной способностью.	28
1.4	Особенности предобработки служебных данных сообщений ограниченного размера, передаваемым по беспроводным сенсорным сетям.	31
1.4.1	Формулировка задачи определения источника сообщений	31
1.4.2	Методы и технические решения предобработки сообщений ограниченного размера с целью выделения метаданных и определения источника	34
1.5	Особенности использования методов предобработки групп сообщений для определения источников сообщений ограниченной длины	36
1.5.1	Повышение достоверности обработки метаданных за счёт обработки множеств сообщений	36
1.5.2	Известные решения выделения и обработки служебной информации из множеств сообщений	37
1.5.3	Особенности формирования метаданных групп сообщений для рассматриваемого класса информационных систем	39
1.5.4	Проблемы вычислительных и ресурсных затрат при использовании методов определения источников групп сообщений	41
1.6	Предпосылки к ограничению числа обрабатываемых блоков при определении их источника	43
1.7	Выводы по разделу	46
2	Разработка методов и алгоритмов обработки сообщений сенсора беспроводной сенсорной сети для повышения их энергоэффективности.	48
2.1	Теоретические предпосылки к снижению числа обрабатываемых сообщений при определении их источника.	48

2.2	Реализация основных процедур предобработки групп сообщений при определении их источника	50
2.2.1	Реализация этапа получения и буферизации сообщений	50
2.2.2	Реализация ограничения числа обрабатываемых блоков сообщений для улучшения характеристик обмена информацией между компонентами беспроводной сенсорной сети	52
2.2.3	Реализация процедур формирования динамических структур	55
2.3	Формализация метода определения последовательности сообщений от элемента беспроводной сенсорной сети	58
2.4	Алгоритмы обработки групп сообщений	60
2.4.1	Алгоритм формирования динамических структур	60
2.4.2	Алгоритм обработки сформированной динамической структуры. 63	
2.4.3	Модификация алгоритма формирования динамических структур для увеличения числа сенсоров, описатели которых могут храниться в памяти центрального модуля системы управления.	65
2.5	Выводы по разделу	67
3	Исследование характеристик метода обработки сообщений беспроводной сенсорной сети для определения их источника	69
3.1	Оценка влияния параметров формирования и обработки сообщений на результирующую достоверность определения источника	69
3.1.1	Математическая модель оценки вероятности ошибки определения сенсора, сформировавшего сообщение	69
3.1.2	Полученные оценки вероятности исключения из обработки сообщения, сформированного целевым сенсором	73
3.1.3	Снижение вероятности ошибочной обработки данных из-за снижения числа обрабатываемых блоков данных	78

3.1.4	Итоговая оценка изменения вероятности ошибочной обработки метаданных сообщения сенсорной сети.....	82
3.1.5	Определение диапазона применимости методов и выбор целесообразных параметров обработки данных.....	84
3.2	Исследование функционирования модуля сбора и обработки данных распределённой системы при определении источника сообщений	87
3.2.1	Оценка ресурсных затрат модуля сбора и обработки данных	87
3.2.2	Оценка числа элементарных операций, выполняемых модулем сбора и обработки данных при определении источника сообщений	92
3.3	Оценка снижения объёма передаваемых сенсором беспроводной сети данных	99
3.3.1	Оценка увеличения доли полезной информации в сообщении сенсора беспроводной сенсорной сети	99
3.3.2	Сравнение с известными решениями	102
3.4	Выводы по разделу	105
	Заключение	108
	Список литературы	111
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	131
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	132

Введение

Актуальность темы исследования. Системы контроля и управления, реализованные с использованием беспроводных сенсорных сетей (БСС) находят всё более широкое применение в медицине, жилищно-коммунальном хозяйстве, сельском хозяйстве, на транспорте. Основной причиной распространения данной технологической платформы является возможность автоматизированного сбора информации об окружающей среде и управляемых объектах с помощью компактных устройств, снабжённых сенсором, микроконтроллером и радиомодулем, работающими от автономного источника питания и передающими данные по энергоэффективным протоколам с большим радиусом действия. Всё это обуславливает низкую стоимость аппаратной части, простоту развертывания, возможности использования на разнообразных объектах и территориях.

В то же время разнообразие систем контроля и управления, реализованных по технологии БСС порождает большое количество научных и технических проблем, зачастую концептуально нового типа. Отдельные аспекты функционирования БСС оказывают существенное влияние на работоспособность проектируемых систем. В силу функционального назначения каждой конкретной БСС и ограниченного функционала сенсоров (невозможность, в частности, реализовывать предобработку получаемой от объекта управления информации), составляющих распределённую систему управления, у последней возникают новые параметры: принципы организации, зона покрытия, энергопотребление и срок службы. Реализация работоспособной системы требует решения ряда задач проектного типа (выбор аппаратного и программного обеспечения, позиционирование сенсоров в окружающей среде, обеспечение требуемого ареала сбора данных, определение срока службы сенсоров и частоты технического обслуживания), задач обработки и передачи информации (определение топологии БСС, правил маршрутизации потоков сообщений в ней, разработка алгоритмов

управления и обработки информации в сети, синхронизация работы узлов сети, масштабируемость сети при сохранении её рабочих параметров; восстановление после сбоев; защита информации, передаваемой в БСС), задач эксплуатации (поддержание работоспособности сети, модификация состава сети; удаленное управление сетью).

Если говорить о частной задаче разработке методов и алгоритмов управления и обработки информации в сети, то основными параметрами при оценке их эффективности являются скорость передачи данных и срок эксплуатации БСС. Так как типовое устройство-сенсор БСС содержит автономный источник питания с лимитированным энергоресурсом без возможности из внешней среды, то время его работы определяется сроком службы такого источника. Выбор более ёмких элементов питания или реализация механизмов получения энергии из окружающей среды применительно к технологии БСС нецелесообразны, так как зачастую стоимость подобных узлов превышает стоимость сенсора со стандартной батареей питания. Срок службы элемента питания в таком случае определяет срок службы сенсора и срок эксплуатации всей сети в целом. С учётом того, что до 70% энергии сенсор тратит на передачу информации центральному модулю сбора и обработки информации и выработки управляющих воздействий, то для построения систем контроля и управления на базе БСС актуален выбор энергоэффективных методов и алгоритмов передачи информации между узлами сети.

Степень разработанности темы исследования. Рассматриваемой проблеме снижения энергопотребления сенсоров беспроводной сенсорной сети посвящено большое количество научных работ. В основе части из них лежит подход, основанный на кластеризации сенсоров (Y. Xu, J. Heidemann, Y. Chen, А. Е. Кучерявый), позволяющий за счёт выбора наиболее близкого узла для трансляции данных снизить мощность сигнала сенсора и его энергозатраты.

В основе другого множества методов лежит принцип минимизации числа циклов передачи данных (Т. М. Татарникова, М. Н. Юлдашев, М.Н. Терентьев, Е. А. Бакин,). К общему недостатку указанных двух групп методов можно отнести необходимость реализации модуля анализа некоторой дополнительной информации о состоянии элементов системы с целью принятия решения отдельным сенсором о начале цикла передачи и выборе мощности сигнала, а также необходимость передачи мониторинговой информации в центральный модуль анализа конфигурации БСС.

В то же время снижения числа циклов передачи данных и снижение энергозатрат на один такой цикл обходит вниманием факт того, что значительную часть информации в сообщении от сенсора занимают метаданные, т. е. идентификатор сенсора, его сформировавшего, идентификатор сообщения в потоке данных от конкретного сенсора, а также коды контроля ошибок этой значительной по объёму информации. Соответственно, уменьшение заголовочной части пакета данных БСС позволит сократить длительность передачи данных в эфир, что дополнительно к вышеозначенным методам снизит энергопотребление сенсора. Методам формирования и обработки метаинформации сообщений посвящены работы Гурина О. Д. Ёкокава Т. Маллади Д. Бухарина В. В. Горохова А., Таныгина М.О., М. Белла (M.Bellare), В. Сталлингса (W. Stallings), (M. Dworkin), Д. Блэка (J. Black), Р. Мишры (R. Mishra), С. Шарма (S. Sharma), Б. Отмана (B. Othman). Анализ литературы показал, что существующие алгоритмы обработки данных от сенсоров сети на основе метаданных, размещённых в соответствующих полях сетевых пакетов обладают либо недостаточной достоверностью, которая требует избыточных сеансов связи и дополнительных энергозатрат, либо требуют большого объёма передаваемой метаинформации, что требует более длительных сеансов связи и также ведёт к дополнительным энергозатратам Устранение выявленного противоречия требует решения **научно-технической задачи** разработки методов и алгоритмов формирования и обработки служебной

информации в беспроводных сенсорных сетях, которые, с одной стороны сократят объём передаваемых служебных данных, тем самым повысив энергоэффективность узлов беспроводной сенсорной сети, их автономность и срок службы, а с другой – обеспечат требуемую достоверность опознавания источника сообщения со стороны главного модуля сбора информации и управления.

Объект исследования: распределённые информационно-управляющие системы на базе беспроводных сенсорных сетей.

Предмет исследования: методы и алгоритмы формирования и обработки дополнительных служебных данных в сообщениях сенсорных сетей.

Цель работы. Целью диссертационной работы является снижение ресурсных затрат на передачу служебной информации в сообщениях, формируемых сенсорами системы управления, при сохранении достоверности обработки служебных данных отдельного сенсора.

Задачи исследований:

1. Проведение аналитического обзора методов и алгоритмов повышения энергоэффективности сенсоров беспроводных сенсорных сетей.

2. Создание метода определения сообщений, формируемых элементами беспроводных сенсорных сетей, ориентированного на снижение объёма передаваемой в сообщении служебной информации снижения энергопотребления сенсора.

3. Разработка алгоритмов обработки служебной информации сообщений сенсора распределённой информационно-управляющей системы по результатам анализа служебной информации в составе таких сообщений.

4. Разработка математических моделей обработки служебной информации, содержащейся в сообщениях сенсора беспроводной сенсорной сети для определения целесообразных параметров обработки сообщений.

Новыми научными результатами являются:

1. Метод определения источника сообщений ограниченного размера в беспроводных сенсорных сетях, отличающийся исключением из обработки

сообщений по результатам анализа позиции сообщения в последовательности и кодограммы, сформированной из данных предыдущих сообщений, позволяющий уменьшить размер служебных данных в каждом сообщении, повысив энергоэффективность узлов беспроводной сенсорной сети, формирующих сообщения.

2. Алгоритм обработки служебной информации в сообщениях от узла беспроводной сенсорной сети, отличающийся параллельным выполнением операций формирования и обработки динамической списочной структуры, содержащей указатели на буферизированные данные сообщений, позволяющий за счёт изменения параметров обработки достигать требуемых показателей достоверности при снижении размеров памяти, требуемой для хранения динамической списочной структуры.

3. Математическая модель обработки множества сообщений элементом распределённой информационно-управляющей системы, созданная на основе аппарата теории вероятности и теории случайных процессов, отличающаяся представлением результата декодирования позиции сообщения в последовательности как дискретного случайного процесса, позволившая определить целесообразные параметры обработки служебной информации в сообщениях узла беспроводной сенсорной сети.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректным и обоснованным применением методов системного анализа, аппарата математической логики, положений и методов теории вероятностей, теории случайных процессов и математической статистики, а также подтверждается имитационным моделированием с использованием разработанного программного обеспечения.

Практическая ценность результатов исследований:

1. Разработанные метод и алгоритм определения источника сообщений позволяют при неизменном размере полей метаданных в сообщениях сенсора беспроводной сенсорной сети снизить вероятность

определения источника сообщения о 0.2... 0.6 до 0.1...0.15 на последовательность 10 - 25 сообщений без увеличения размеров таких полей, что) происходит в области максимального значения частной производной функции вероятности ошибки по длине дополнительного поля метаданных каждого сообщения БСС, используемого для определения его источника

2. Предложено изменение форматов сообщений сенсоров беспроводных сенсорных сетей, в основе которого лежит кодирование в режиме сцепления блоков и обработка метаданных сообщения в центральном модуле сбора и обработки информации распределённой информационно-управляющей системы, реализованной по технологии беспроводной сенсорной сети, которое обеспечивает итоговое снижение доли служебной информации в каждом передаваемом сообщении на 2.5% до 9 % по сравнению с используемыми протоколами и известными решениями для определения источника сообщения.

3. Созданные модели обработки информации от множества сенсоров в центральном модуле сбора и информации беспроводной сенсорной сети дали оценки потребности в регистровой памяти и требуемом числе элементарных операций, которые показали, что для реализации обработки данных от более чем ста сенсоров пригодны современные микросхемы ПЛИС без использования дополнительных блоков оперативной памяти.

4. Исключение из обработки части сообщений в центральном модуле сбора и обработки информации беспроводной сенсорной сети при определении источников сообщений от множества сенсоров позволило дополнительно к известным методам повышения энергоэффективности сенсора снизить объём передаваемых каждым сенсором данных на 5 – 12 %, и за счёт сокращения времени передачи данных снизить энергопотребление узлов беспроводной сенсорной сети на 4 – 10%.

Результаты полученных в диссертации теоретических и прикладных и экспериментальных исследований используются в ООО «ВТИ-Сервис» и учебном процессе Юго-Западного государственного университета при

обучении по направлениям 10.04.01 «Информационная безопасность» (дисциплина «Математическое моделирование технических объектов и систем управления») и 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» (дисциплина «Проектирование защищённых телекоммуникационных систем»).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

В соответствии с п. 11 формулы научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика в диссертации содержатся результаты разработки математических моделей оценки достоверности работы, быстродействия и аппаратной сложности элементов и устройств информационно-управляющих систем, построенных по технологии беспроводных сенсорных сетей.

В соответствии с п. 15 формулы научной специальности в диссертации проводились теоретический анализ и экспериментальные исследования достоверности процедур определения источников сообщений, передаваемых в беспроводных сенсорных сетях, с целью снижения объема передаваемых служебных данных в каждом сообщении сенсора информационно-управляющих системы и снижения его энергопотребления.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения источника сообщения, передаваемого от одного элемента распределённой информационно-управляющей системы к другому по беспроводной сенсорной сети, позволяющий за счёт исключения из обработки части сообщений снизить размер данных, содержащихся в сообщениях и используемых для определения их источника, и энергозатраты сенсора на передачу таких сообщений.

2. Алгоритм обработки служебных полей сообщений, передаваемых в распределённых информационно-управляющих системах, реализованных на базе сенсорных сетей для принятия решения об источнике группы сообщений, позволяющий динамически изменять параметры обработки

сообщений в зависимости от числа сенсоров в сети для обеспечения требуемой достоверности определения источника сообщений.

3. Математическая модель обработки множества сообщений элементом распределённой информационно-управляющей системы, позволяющая установить зависимости между параметрами обработки сообщений, размером кодовых последовательностей в служебных полях сообщений, числом сенсоров в системе и достигаемыми достоверностью определения источника.

Методология и методы исследования. Исследования проведены с применением теории вероятностей и математической статистики, теории случайных процессов, конструирования средств вычислительной техники, аналитического конструирования. Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов математического и имитационного моделирования, технологий объектно-ориентированного программирования.

Результаты и научные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных научных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения» (г. Курск, 2021, 2022); Всероссийская «Проблемы проектирования, применения и безопасности информационных систем в условиях цифровой экономики» (г. Ростов-наДону, 2022); Всероссийская научно-техническая конференция для молодых ученых и студентов с международным участием (г. Пенза, 2021); Всероссийская научно-техническая конференция «Современные информационные технологии и информационная безопасность» (г. Курск, 2022, 2023), Международной научно-технической конференции «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений»(г. Курск, 2021).

Публикации. Результаты работ по теме диссертации отражены в 18 научных публикациях, в том числе 5 статьях, входящих в перечень ВАК и одном патенте

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертационной работе. Все результаты диссертационной работы, в том числе постановка задач, разработка и исследование защищаемых метода, моделей и алгоритмов, основные научные результаты, выводы и рекомендации, принадлежат автору лично. В научных работах, выполненных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем: разработаны метод определения источника сообщений в сенсорных сетях, основанный на исключении из обработки части сообщений [101, 106, 135, 149], подходы к снижению энергопотребления элементов распределённых систем, построенных по технологии беспроводных сенсорных сетей [94], модели оценки достоверности определения источника сообщений при управлении обработкой поступающих данных [129, 130, 136, 148], принципы обработки сообщений узлов сенсорной сети [105, 107, 141, 142, 146, 147]

Структура диссертации. Диссертация общим объемом 133 страницы состоит из введения, трёх глав и заключения, содержит 107 страниц основного текста, перечень используемой научно-технической литературы из 151 наименования на 23 страницах, приложений на 3 страницах, 23 рисунков и 1 таблицы.

1 Проблемы предобработки сообщений в системах управления на базе беспроводных сенсорных сетей.

1.1 Общая характеристика процессов передачи и обработки сообщений в беспроводных сенсорных сетях

1.1.1 Описание структуры системы управления, реализованной с использованием энергоэффективных протоколов связи

Одной из наиболее распространённых технологий контроля и управления извлечением, агрегированием, обработкой, передачей и хранением больших объемов разнородных данных, циркулирующих в различных областях человеческой деятельности, является технология интернета вещей (Internet of Things – IoT) [1]. В качестве одного из применений данной технологии можно отметить реализуемые её помощью беспроводные сенсорные сети (БСС), которые представляют собой сложные технические системы, в которой основными элементами являются сенсоры или датчики, осуществляющих сбор первичной информации о состоянии контролируемых объектов, и модуль управления, обеспечивающий агрегацию собираемых датчиками данных и выработку управляющего воздействия в автоматическом, автоматизированной режимах или при участии оператора, либо несколько модулей управления в случае децентрализованного механизма управления [2, 3]. В основе обеспечения коммуникации между компонентами системы лежит беспроводное взаимодействие, реализованное с помощью специализированных протоколов связи [4, 5], функционирующих, для снижения энергозатрат в режиме разделения времени. Такие протоколы позволяют использовать в качестве устройств сбора информации энергоэффективные устройства с низким энергопотреблением, позволяющим автономному устройству работать до 10 лет при использовании стандартного элемента питания при большом радиусе покрытия радиосвязи (до нескольких километров) [4, 5]. Это обеспечивает

лёгкость развёртывания систем управления за счёт простоты размещения сенсоров на объектах управления, простоту реконфигурации системы и большую площадь покрытия без необходимости соблюдения технологических ограничений на развёртывания системы управления [6 – 8].

Типовая схема распределенной информационно-управляющей системы (РИУС), построенной по технологии беспроводной сенсорной сети, приведена на рисунке 1.1.

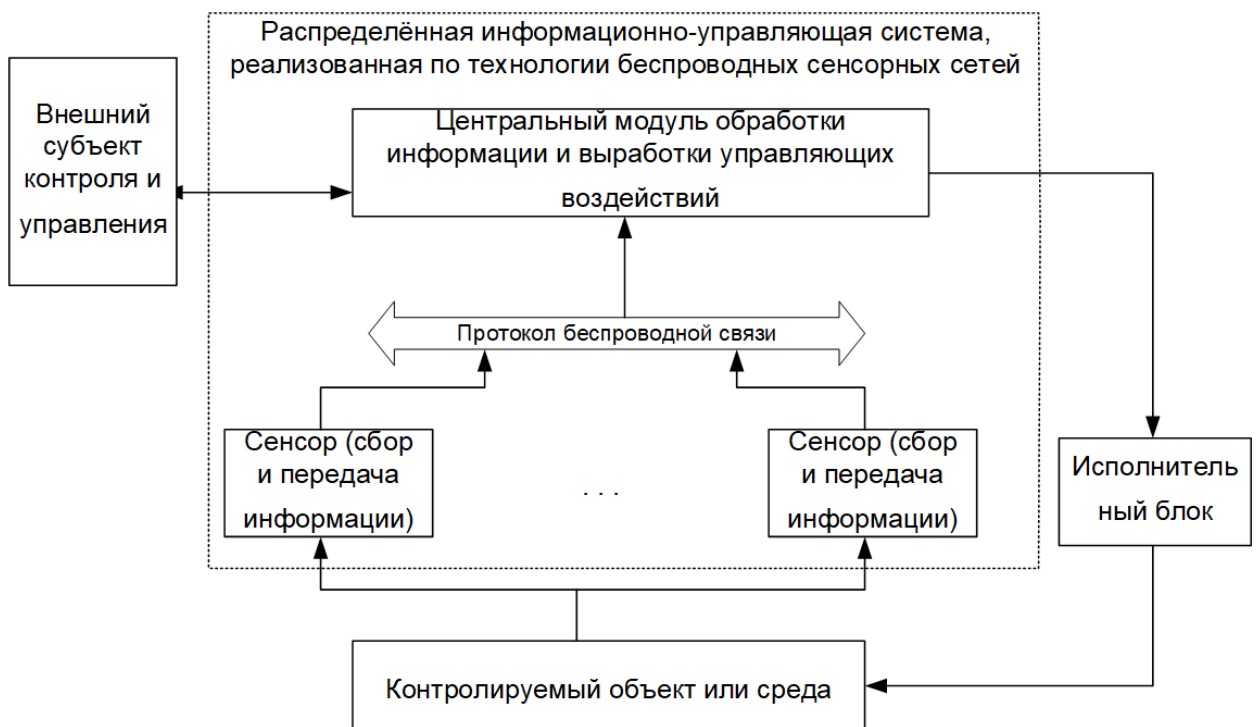


Рисунок 1.1 – Распределенная информационно-управляющая система, построенная по технологии беспроводной сенсорной сети [9].

1.1.2 Особенности передачи данных в системах, реализованных по технологии сенсорных сетей

Приоритетным подходом к управлению потоками информации в центральном модуле обработки информации и выработки управляющих воздействий (рис. 1.1) является сегментация данных в сенсоре на отдельные структуры-сообщения, передаваемые и обрабатываемые неделимыми, и добавление в них некоторой дополнительной информации об элементе

системы (сенсоре), сформировавшем сообщение, об элементе системы (центральном модуле конкретной системы, так как в общем случае при использовании беспроводных протоколов связи принимающие узлы одной системы могут получать данные от элементов других систем), которому данное сообщение предназначается, о месте текущего сообщения в общем информационном потоке между компонентами распределённой системы интернета вещей [11, 12]. В зависимости от используемого протокола каждое сообщение, передаваемое и обрабатываемое в системах может до 20 параметров, используемых для организации сетевого взаимодействия отдельных устройств [9]. Эта необходимая для маршрутизации и оптимизации нагрузки на сетевое оборудование информация, с точки зрения основного назначения каждой конкретной РИУС является метаданными, то есть информацией, не являющейся необходимой для реализации основной задачи управления, а являющейся служебной, требуемой для выстраивания процессов функционирования РИУС.

Для обработки такой метаинформации в состав каждого сенсора РИУС (рис. 1.1) интегрирован модуль передачи данных, реализуемый, обычно как компонент сетевого интерфейса и осуществляющий внедрение в битовый поток сообщения, указанную метаинформацию [13]. В модуле обработки информации перед принимающим модулем стоит обратная задача выделения из битового потока служебной информации и выполнение задач классификации основных данных, в числе которых является определение источника (сенсора), их сформировавшего. Характер информации, собираемой, передаваемой и обрабатываемой в распределённой системе, определяется функционалом исполнительных моделей (сенсоров, исполнительных блоков), его реализацией (подвижное – стационарное, автономное – с внешним питанием) тогда как блоки приёма-передачи подчинены требованиям по унификации и типизации, а также алгоритмов их работы и используемых протоколов и архитектур [14]. Это позволяет упростить процесс развёртывания систем, что особенно важно при

использовании технологии БСС, эксплуатации, поиска неисправностей и их устранения [15].

Таким образом, мы можем говорить о выделении совокупности таких приёмо-передающих модулей формирования и обработки метаданных в единую систему обработки метаданных, являющуюся подсистемой основной РИУС (рис. 1.2). На неё ложится функция получения структурированной информации от множества сенсоров, вычисления на основе определяемых правилами передачи сообщений в информационной системе метаинформации для каждого сообщения, после передачи по каналу связи и получению – извлечение метаинформации из сообщения: определение адресата и источника сообщения, позиции сообщения в информационном потоке, и передачи этой информации в исполнительный модуль.

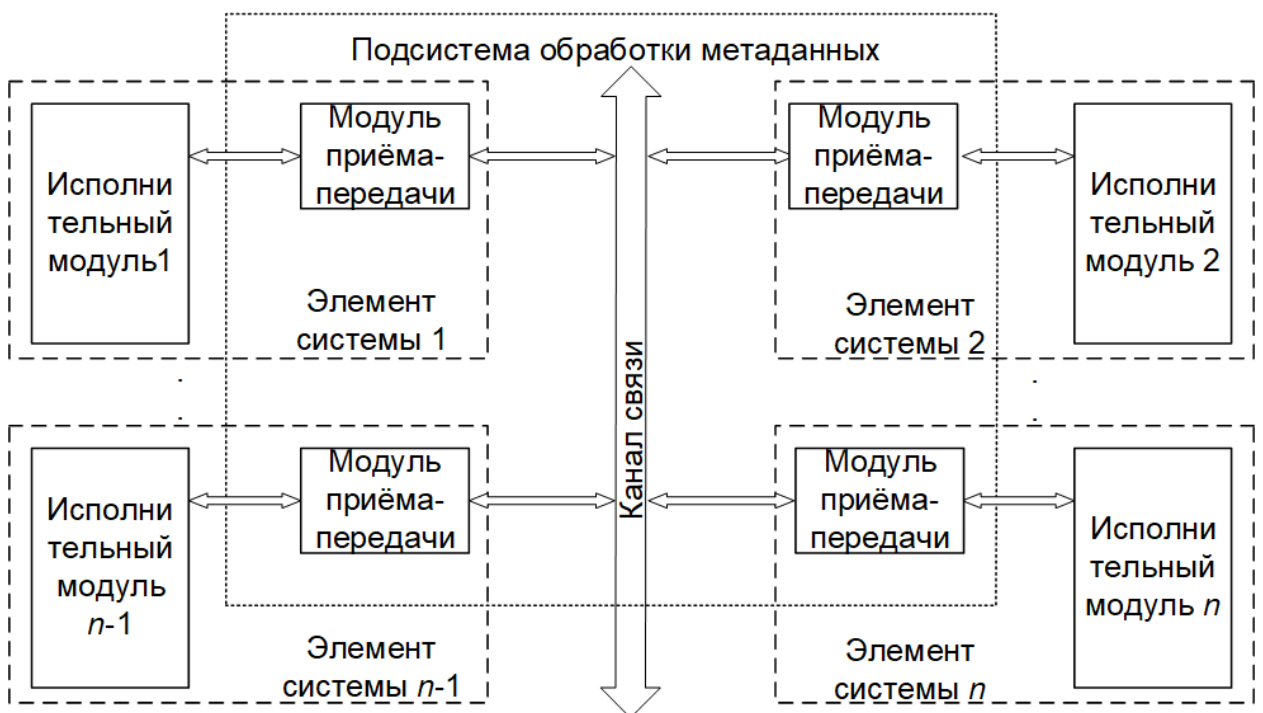


Рисунок 1.2 – Подсистема обработки метаданных как часть распределённой информационной системы.

Если говорить об особенностях реального функционирования описанной выше распределённой информационно-управляющей системы, реализованной по технологии беспроводных сенсорных сетей, то отмечаем

большое число источников и приёмников передаваемых сообщений, когда канал связи разделяется по времени и является общей средой передачи данных между отдельными компонентами вычислительной системы [16]. В общем случае сообщения от целевого источника могут чередоваться друг с другом, но большинство протоколов поддерживает контроль очередности блоков данных [17].

1.2 Анализ влияния подходов к передаче информации в беспроводных сенсорных сетях на качественные и количественные характеристики реализуемого процесса управления

Важнейшей характеристикой любой проектируемой системы управления является срок службы. Последний напрямую зависит от сроков эксплуатации отдельных её компонентов. Если мы рассматриваем выбранный класс РИУС, то из-за особенностей технической реализации сенсоров срок их работ и определяется длительностью автономной работы. Обуславливается это, прежде всего невысокой ценой самого сенсора, по сравнению с которой затраты на смену элемента питания в нём являются неприемлемыми. Второй аспект – физическая доступность сенсоров для сервисных операций. Реальные условия, в которых развёртываются такие сети, допускают лишь однократную установку и последующий мониторинг их состояния лишь в удалённом режиме [18]. Замена элементов питания или их подзарядка [19] представляются достаточно трудозатратным и экономически нецелесообразным процессом.

С учётом вышесказанного, основным способом повышения эксплуатационных характеристик РИУС, в частности, срока эксплуатации и длительности бессервисного интервала, является снижение энергопотребления сенсора. Для выявления факторов, обеспечивающих указанное снижение, необходим анализ потребления электроэнергии типовым элементом сенсорной сети, в основе которой лежат экспериментальные данные. Создание теоретической модели потребления

энергии устройством БСС [20] достаточно трудоёмко, так как разнообразие типов устройств подразумевает разнообразие режимов работы. На энергопотребление непосредственно влияет характер передаваемой сенсором информации, расстояние между сенсором и центральным узлом управления, требования по оперативности передачи информации, требования по доли успешно переданных, используемые для передачи алгоритмы кодирования [21 – 23]. На Рисунке 1.3 представлен пример осциллограммы силы тока в узле питания элемента БСС в режиме непрерывного функционирования [24, 25].

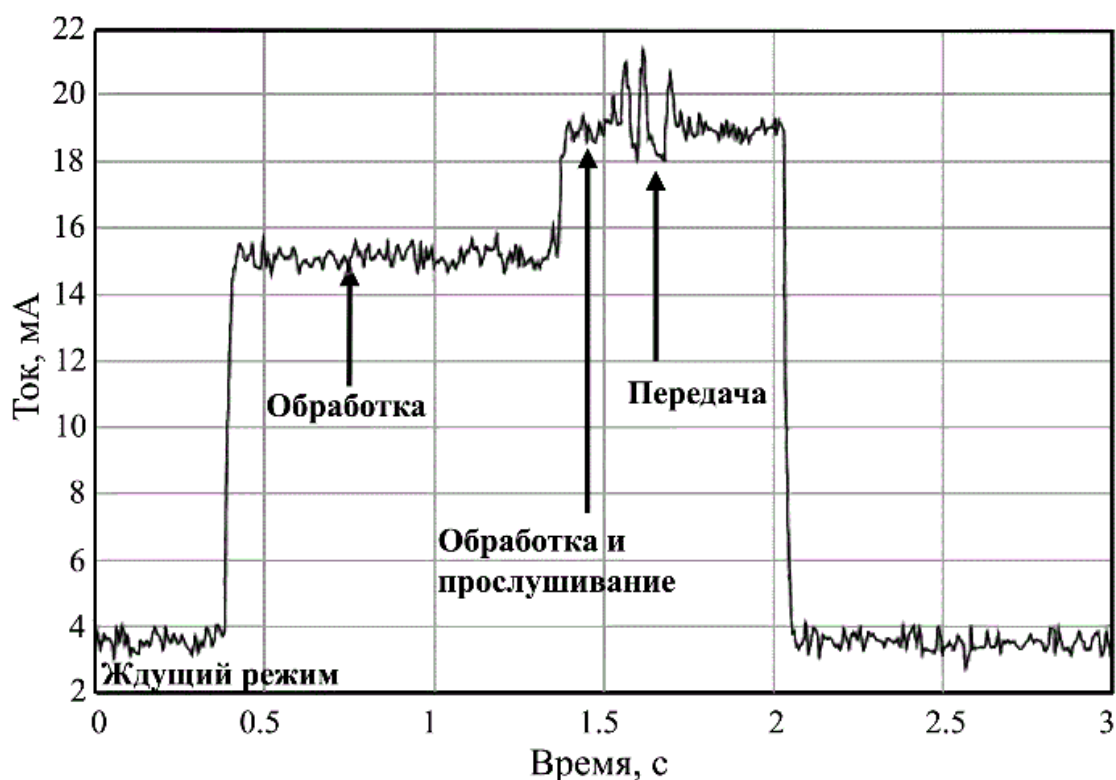


Рисунок 1.3 – Пример изменения потребления питания сенсора в зависимости от этапа процедуры обработки пакетов данных [25].

Из анализа полученного экспериментально графика видно, что основные затраты энергии для узла сбора и передачи информации в БСС приходятся на фазу передачи данных в центральный модуль обработки информации (ЦМОИ). При этом соотношение длительности этапов

процедуры обработки пакетов данных может быть отличным от изображённых на рисунке. При использовании в качестве сенсоров устройств с ограниченным набором функций RFD (Reduced Function Device), которые имеют возможность лишь поддержания связи с полнофункциональными устройствами. К ним относятся устройства так называемого класса А, который основан на методе доступа к каналу связи «асинхронная Алоха» и обязателен для поддержки всеми устройствами БСС. Такие устройства периодически формируют и посылают в канал связи собранные с датчиков данные, дожидаются квитирования передачи и переходят в режим ожидания. При этом они обладают меньшим энергопотреблением по сравнению с устройствами класса В и С, которые предполагают двусторонний обмен данными с центральным модулем [26]. Класс А является основным и трафик именно таких устройств составляет основу трафика БСС и трафика устройств интернета вещей [27, 28]. Соответственно, основным направлением снижения энергопотребления является снижение длительности передачи данных в эфир модулем приёма-передачи. В исследуемых сетях сенсор должен прослушивать канал только в течение двух интервалов времени после передачи кадра при существенных ограничениях на долю времени занятости среды, определяемую локальными стандартами связи [29]. В России в диапазоне частот БСС устройства и сенсоры могут занимать канал не более чем на 1% времени работ, выключая на оставшееся время приёмник [30], что увеличивает долю энергопотребления в режиме передачи данных (при пренебрежении длительностью этапом обработки) до 60–90% от общих энергозатрат сенсора.

1.3 Способы снижения энергопотребления элементов и устройств распределённых информационно-управляющих систем в режиме передачи данных

1.3.1 Общие подходы к снижению энергопотребления элементов информационно-управляющих систем, которые реализованы по технологии беспроводных сенсорных сетей

Физические особенности среды передачи данных, используемой в системах, реализованных по технологии БСС характеризуются низким энергопотреблением, что и является основным фактором, влияющим на срок эксплуатации сенсора в качестве элемента РИУС [6], вытекающая из первого фактора, низкая скорость передачи информации (до 300 бит/с). При использовании временного разделения канала следствием вышесказанного является небольшой, по сравнению с используемыми в распространённых протоколах сетевого обмена, размер кадра передаваемого сообщения. Он может достигать 18 байтов с учётом передаваемых вместе с полезной информацией метаданных, заметную долю в которых занимает идентификатор устройства, имеющий размер 64 бита, уменьшающийся в случае ограниченной размерами сети до 16 битов [11, 31]. В результате трафик в беспроводной сети РИУС, выполненной по технологии БСС представляет собой множество небольших (несколько байтов или десятков байтов) пакетов данных, передаваемых от множества источников одному или нескольким получателям, значительную долю которого составляют метаданные и данные, необходимые для корректной обработки поступающих от сенсоров данных центральным модулем. Анализ проблемы, заключающейся в необходимости снижения энергопотребления элемента РИУС в режиме передачи данных для повышения сроков эксплуатации самой системы, как частной задаче системного анализа, привёл в выработку ряда подходов, направленных на их разрешение. Их условно можно разделить 3 типа.

В качестве основы снижения энергопотребления для подходов первого типа используется повышение энергоэффективности стандартов связи. стандартов взаимодействия (например, IEEE 802.15 и его протокольной реализацией – ZigBee), управление маршрутизацией и конфигурацией сенсорной сети

1.3.2 Снижение энергопотребления элементов информационно-управляющих систем за счёт кластеризации сенсоров

В работе Ксю и Хайдемана (Y. Xu, J. Heidemann) [32] уменьшение числа для снижения количества циклов передачи данных в сети предлагается разделять ареал покрытия БСС на квадратные зоны, в которых в каждый момент времени в режиме отправления сообщений работает лишь один узел, тогда как все остальные узлы зоны находятся в режиме сна. Подобное разделение функций сенсоров разрешает проблему коллизий и необходимости прослушивания канала связи сенсором перед началом фазы передачи данных. Полученные авторами результаты показали, что такая организация обмена информацией снижает потребление энергии всеми узлами сети в совокупности на 40% до 60%. Необходимое условие для успешности функционирования метода, заключается в необходимости для каждого сенсора в автоматическом режиме фиксировать принадлежность той или иной области и является основным его недостатком. Для этого потребуется либо внедрение модуля системы глобального позиционирования, либо реализация в системе управления подсистемы контроля физического расположения сенсора, примером которого может служить метод, описанный в [33]. И то, и другое в конечном счёте ведёт к увеличению стоимости самой системы, делая бессмысленной использование технологии БСС, основным преимуществом которой является дешевизна и автономность сенсора.

Похожий метод предложен Татарниковой и Дзюбенко в работе [34] предложили увеличивать жизненный цикл устройств интернета вещей за

счёт кластеризации сенсорного поля и перераспределения задач организации взаимодействия в сети с отдельного устройства на головной узел сформированного кластера. В основе метода лежит равновероятное чередование центральных узлов в кластере, которое осуществляется с учётом уровня заряда аккумуляторной батареи сенсора и расстояния до центрального узла кластера. Вероятность коллизии, как и в предыдущем методе снижается ограничением времени активности сенсора, реализованном при временном разделении канала связи при взаимодействии сенсорных устройств.

Подход, заключающийся в экономии энергии при передаче сообщения от сенсора за счёт выбора наиболее близкого к сенсору ретранслятора, лежит в основе предлагаемого Yunfeng Chen решения [35]. Передача сообщений предполагается по различным маршрутам, оптимизированным не с точки зрения количества ретрансляторов на маршруте, а с точки зрения минимизации затрат на такую передачу сети. Это решает проблему связанную с повышенным энергопотреблением элементов распределённой системы, расположенных, наиболее близко к устройству-шлюзу. Исследования показали, что предлагаемое решение позволяет экономить до 50% электроэнергии.

Все вышеописанные подходы, а также другие исследования в этой сфере [36 – 38] требуют для своей реализации постоянного решения задач оптимальной маршрутизации, аналогичных задачи поиска минимальных маршрутов в ориентированных графах [39]. В то же время, для формирования исходных данных для решения подобных задач, помимо дополнительной нагрузки на процессорные модули сенсоров, требуется специализированные устройства формирования исходных данных (включающие в себя соотношения между расстоянием от приёмника до передатчика и энергией, затрачиваемой на передачу). В реальных условиях это реализуемо только в статичных системах управления, в которых сенсоры не меняют своего положения в пространстве и расстояния до других

сенсоров. Что само по себе является дополнительным ограничивающим условием их применения

1.3.3 Снижение энергопотребления элементов информационно-управляющих систем за уменьшения числа циклов передачи сообщений

Вторая группа методов имеет общую черту, заключающуюся в структуризации данных таким образом, чтобы на уровне системной организации РИУС уменьшить количество передаваемых сообщений от средств сбора данных (сенсоров) в ЦМОИ. В работе [40] рассмотрено функционирование сети сенсоров в условиях внешних воздействий, которые могут приводить в предельном случае, к потере связи между сенсором и центральным модулем. Авторами предлагается внедрение в состав каждого сенсора подсистемы анализа результатов квитирования доставки сообщения сенсора, чтобы в специальных условиях атаки (внешнего воздействия), обнаруживать такое состояние системы, снижать количество сообщений между компонентами и, соответственно, энергопотребление сенсоров.

Снижение числа передач сообщений предлагается Юлдашевым в работах [41, 42]. В них состояние контролируемого объекта описывается некоторой дискретной числовой характеристикой. Изменение данной характеристики требует получения модулем управления новых данных от сенсора, что позволяет реализовать алгоритм управления передачей, который исключает неинформативные сообщения от сенсоров в случае, когда числовая характеристика контролируемого объекта не изменяется

Подобный подход лежит в основе предложенного Терентьевым М. Н. дискретного режима работы сенсора [43, 44], суть которого состоит в том, чтобы обеспечить большую часть времени работы как элемента-сенсора, так и элемента ретранслятора в режиме с пониженным потреблением энергии. Формируется расписание работы сенсоров-отправителей и устройств-приёмников, чтобы, во-первых, обеспечить временное разделение сеансов

передачи данных, а во-вторых, синхронизировать этапы работы отправителя и получателя мониторинговой информации.

Отмеченной выше проблеме коллизий в работе сенсоров, когда два передающих информацию устройства работают одновременно, создавая помехи друг другу, посвящена работа [45]. Подобные коллизии вызывают необходимость повторной передачи данных, что ведёт к увеличению циклов передач данных и повышенному энергопотреблению. Периоды активности каждого сенсора лежат в основе оригинального для каждой распределённой системы расписания передачи данных. Хотя основной целью рассматриваемого исследования являлось составление бесконфликтного расписания работы узлов сети сбора информации, одним из его непосредственных практических результатов явилось снижение энергопотребления отдельного элемента сбора и передачи мониторинговой информации. В тоже время переконфигурирование системы, добавление новых элементов или выход из строя работающих потребуют пересмотра всего расписания. Тогда как в реальных мониторинговых системах проблема одновременной передачи данных решается с помощью модуляции сигналов сенсора [46]. Для этого вводится такой параметр, как показатель расширения, который позволяет передавать данные не только в одно время, но и на одной несущей частоте.

Отмеченная трудность реализации методов формирования очереди передачи данных для различных мониторинговых узлов системы управления рассмотрена в работе. [47]. Для её преодоления предложен метод формирования информационных каналов связи между элементами системы для снижения энергопотребления при сохранении актуальности представленной информации об объектах мониторинга.

Если говорить об общих недостатках методов снижения потребления энергии узлом РИУС, выполненной с использованием технологии БСС за счёт ограничения числа передач, то это необходимость реализации модуля анализа некоторой дополнительной информации о состоянии элементов

системы с целью принятия решения отдельным сенсором о необходимости передачи мониторинговой информации в центральный модуль управления или пребывания в состоянии сна. На практике это приводит к реализации в системе управления дополнительной подсистемы управления обменом данным на основании информации о состоянии узлов основной системы, что повышает стоимость реализуемого управления и неконтролируемым и заранее не оцениваемым образом сказывается на надёжности основной системы. Тогда как снижение объёма передаваемых данных за счёт применения в сенсорах уникальных операций сохраняет отличительные свойства БСС, заключающихся в большом разнообразии вариантов конфигурации РИУС.

1.3.4 Снижение энергопотребления элементов информационно-управляющих систем за уменьшения объёма передаваемых метаданных и служебной информации

В основе третьей группы методов, нацеленных на снижение энергопотребления сенсора, лежит снижение объёма передаваемых служебных данных. При этом уменьшение размера достигается несколькими способами. В качестве примера можно привести метод сжатия заголовков протоколов TCP/IP Ван Якобсона, который изначально был ориентированного на работу с заголовками большого размера [48, 49]. В нём происходит отказ от передачи неизменяемой или редко модифицируемой информации, а результирующий эффект, заключающийся в снижении нагрузки на сеть, компенсирует возникающие ошибки передачи пакетов. Аналогичный отказ от передачи старшей части адреса приёмника и источника уже используется непосредственно в протоколах связи, так как подразумевается, что коллизии в младших частях адресов элементов РИУС маловероятны при реальном размере одноранговой сети или её сегмента, связанного с центральным коммутатором [50].

В то же время, указанные решения не позволяют семантически связывать метаинформацию, по которой центральный модуль определяет сенсор, сформировавший пакет, с самими данными, что снижает устойчивость всей РИУС к возможным внешним воздействиям со стороны как источников случайных помех, так и со стороны субъектов, осуществляющих навязывание ложных данных. Целесообразно служебную информацию кодировать вместе с передаваемыми данными, используя при этом простые алгоритмы преобразования данных, что обеспечивало выполнение сформулированного выше условия: возможности реализации метода на низкопроизводительном вычислителе с невысокой аппаратной сложностью и энергопотреблением [51]. То есть, с учётом конфигурации сети, в которой имеется много низкопроизводительных источников и один приёмник. Для которого в общем случае не существует проблемы энергоэффективности и который априори предполагает реализацию более сложных вычислительных процессов при обработке поступающих сообщений предлагается отказаться от передачи идентификаторов отправителя и источника, а реализовывать функции разделения информационных потоков в приёмнике за счёт использования различных алгоритмов кодирования и структуризации поступающих информационных пакетов [52].

1.3.5 Показатели обработки служебных данных в распределённых информационно-управляющих системах, реализованных на базе протоколов связи с низкой пропускной способностью.

Выделенный для отдельного рассмотрения подход, направленный на снижение энергопотребления сенсоров БСС и повышения времени их автономной работы, заключающийся в снижении объёма передаваемой и обрабатываемой является приоритетным, так как его внедрение требует минимальных изменений в логике работы сенсора, а лишь изменения алгоритмов работы центрального модуля управления, осуществляющего обработку таких метаданных. При этом качественные характеристики

процедур обработки метаданных и идентификации сенсора вступают в противоречие с реальными требованиями практики, так как их достоверность напрямую определяется размером полей такой дополнительной служебной информации. При этом зачастую показатели производительности не имеют прямой зависимости от размеров обрабатываемых слов, а достоверность обработки значительно уменьшается при указанном ограничении [53, 54].

Кроме вышесказанного, ограниченность набора преамбул отдельных пакетов данных является важным фактором, влияющим непосредственно на энергопотребление сенсора. В случае коллизий или совпадений преамбул (а при ограниченном размере полей метаданных и большом числе сенсорных устройств, формирующих сообщения для центрального модуля РИУС, вероятность этого достигает значимых величин) необходимо формировать ошибку передачи данных. Для того, чтобы такие ошибки не влияли на результаты работы управляющих алгоритмов центрального модуля, и, как следствие, на такие характеристики истсема, как достоверность и оперативность управления, необходим перепосыл данных от сенсора. Реализуется это в соществующи протоколах путём отсутствия пакета, подтверждающего успешность передачи, передаваемого от элемента-получателя элементу-отправителю в строго определённые временные интервалы [30]. Таким образом, процедура установки соединения будет повторяться и сенсор повторно отправит переданную ранее информацию. Это повлечёт дополнительные временные затраты, дополнительную загруженность канала связи и дополнительные расходы энергии. Числовая характеристика работы модулей обработки метаданных сформулирована в [52] как отношение длительности полного цикла обработки сообщения к длительности передачи T_{tr}^L полезных данных, включающих также их заголовки и их контрольные разряды. Применительно к рассматриваемой системе полным циклом может являться цикл передачи данных от сенсора в модуль управления от момента начала передачи до момента успешного определения модулем управления источника поступившего в него

сообщения. В оригинальной формуле указанный полный цикл обработки включает также время T_{tr}^H , время T_{pr}^{met} затрачиваемое вычислителем на обработку получаемых данных, время, затрачиваемое на переспрос всего сообщения, необходимость в котором возникает после обнаружения ошибки обработки метаданных и определения источника сообщений. С учётом того, что вероятность некорректно определённого источника равна p_{err} – вероятность ошибочного выделения и обработки метаданных, а T_{tr}^L и T_{tr}^H пропорциональны, соответственно, длинам полей полезной информации L и метаданных H , целевая характеристика имеет вид:

$$Q = \left(\frac{H + L}{L} + \frac{T_{pr}^{met}}{T_{tr}^L} \right) (1 - p_{err})^{-1}. \quad (1.1)$$

С учётом того, что параметр T_{pr}^{met} есть величина, зависящая от архитектуры центрального модуля и никак не влияющая на рассматриваемое нами энергопотребление сенсора, а энергопотреблением сенсора в режимах ожидания мы пренебрегаем [25], следует, что фактором, повышающим характеристики подсистемы обработки метаданных РИУС является доля полезной информации в формируемом сенсором пакете (отношение $H/(H+L)$) при сохранении достоверности обработки (неизменности или уменьшении параметра p_{err}). Таким образом, целевым критерием для методов снижения размеров передаваемых сенсором данных может быть показатель

$$Q^{pow} = \left(\frac{H + L}{L} \right) (1 - p_{err})^{-1}. \quad (1.2)$$

При этом производительность центрального модуля управления, от которой зависит параметр T_{pr}^{met} , должна быть такой, чтобы создаваемые при обработке метаданных задержки не сказывались на способность центрального модуля получать информацию от других сенсоров. Фактически, данный параметр является качественным показателем метода и алгоритма формирования и обработки служебных данных элемента БСС.

Основная проблема, возникающая при подобном подходе к обработке метаинформации сообщений, формируемых множеством источников – это противоречие между высокой сложностью сетей ИВ, объединяющих такие устройства, и требованиями к их быстродействию (время получения ответа, при требуемой пропускной способности каналов связи), безотказности и защищённости (способности определять метаинформацию с достоверностью, не ниже, чем определённая стандартами связи достоверность передачи данных), жёсткими ресурсными (низкая производительность контроллеров, скорость передачи данных, энергопотребление). Решаться данная проблема не может только изменением схемотехнической базы приёмо-передающих модулей, обрабатывающих метаинформацию, изменением их вычислительной мощности или аппаратной сложности, а требует разработки специальных форматов сообщений, методов и алгоритмов их обработки, ориентированных на реализацию в аппаратных модулях взаимодействующих по каналам связи с низкой пропускной способностью. При этом данный аспект непосредственно не затрагивает заявленную задачу снижения энергопотребления сенсора БСС как компонента РИУС, но является ограничивающим фактором при выборе направления исследования, так как задержки, создаваемые при обработке метаинформации в центральном модуле не должны существенно влиять на скорость передачи сообщения в БСС для сохранения оперативности управления, реализуемого целевой РИУС.

1.4 Особенности предобработки служебных данных сообщений ограниченного размера, передаваемым по беспроводным сенсорным сетям

1.4.1 Формулировка задачи определения источника сообщений

Как было отмечено выше, результатом обработки метаданных является идентификация сенсора (определение источника), сформировавшего

сообщение и его порядкового номера в последовательности сообщений от данного источника в рассматриваемое устройство. Поэтому далее мы будем рассматривать именно задачу определения центральным модулем управления РИУС источника некоторой последовательности сообщений, выделенной им из всего множества сообщений, переданных в него по каналу связи. Ниже приведём формальное описание данной задачи.

Пусть приёмник получает некоторое множество U сообщений от неопределённого априори числа источников (рис 1.4), из которого ему необходимо выделить блоки, сформированные и переданные целевым источником (на рисунке выделены штриховкой), при этом восстанавливая порядок их следования.

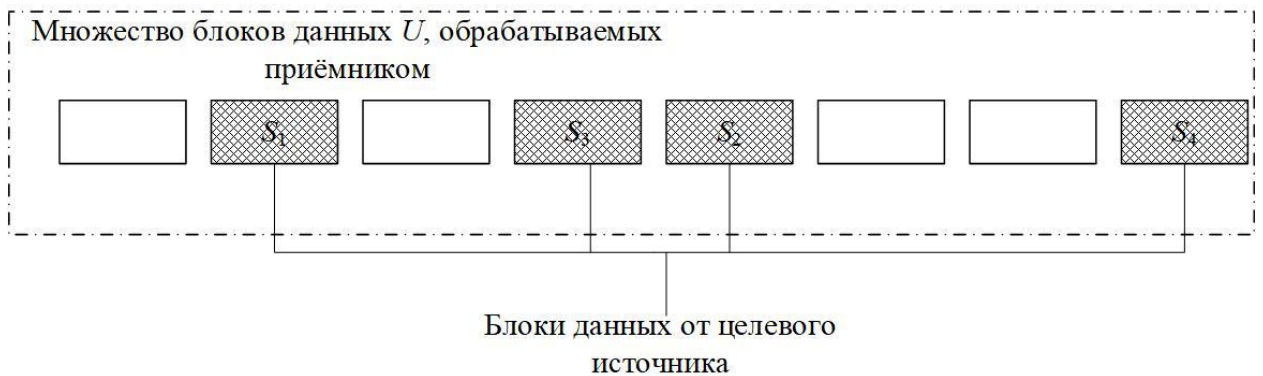


Рисунок 1.4 – Структуры множества сообщений, обрабатываемых центральным модулем управления, осуществляющим приём данных от сенсоров.

В основе всех известных методов определения источника лежит добавление к полезным обрабатываемым данным некоторой кодовой последовательности, формируемой из самих полезных данных блока u^{inf} и априори известной кодовой последовательности Ω , соотнесённой с целевыми источником [55 – 60]. Приёмник данных, осуществляющий предобработку поступающего в него множества сообщений U . Результат обработки в общем случае – отнесение каждого сообщения к некоторому множеству с определёнными для данного множества правилами последующей обработки.

В реальных системах блоки данных поступают от нескольких источников с идентификаторами $\Omega_I, \Omega_{II}, \Omega_{III} \dots$. Из множества сообщений U необходимо сформировать такие непересекающиеся подмножества $U_I, U_{II}, U_{III} \dots$, которые были отправлены в приёмник источниками с соответствующими идентификаторами.

Результат кодирования $F(u^{\text{inf}}, \Omega)$ вводится в состав блока данных u , передаётся и предобрабатывается вместе с полезными данными: $u = \{u^{\text{inf}}, F(u^{\text{inf}}, \Omega)\}$ [60, 61]. В приёмнике происходит проверка содержимого сообщения и отнесение его к одному из множеств $U_I, U_{II}, U_{III} \dots$:

$$\begin{aligned} G(u, \Omega_I) = 1 &\Rightarrow u \in U_I, \\ G(u, \Omega_I) = 0 &\Rightarrow u \notin U_I; \\ G(u, \Omega_{II}) = 1 &\Rightarrow u \in U_{II}, \\ G(u, \Omega_{II}) = 0 &\Rightarrow u \notin U_{II}; \\ &\dots \end{aligned} \tag{1.3}$$

где G – некоторое решающее правило, применяемое к каждому блоку данных $u \in U$ и каждой известной кодовой последовательности $\Omega_I, \Omega_{II}, \Omega_{III} \dots$ соотнесённой с соответствующими источниками, которое позволяет выделить подмножества $U_I, U_{II}, U_{III} \dots$ из множества U .

Так как реализующий правило G вычислитель не содержит поле u^{inf} , то принятие решение происходит лишь по результатам анализа слова $F(u^{\text{inf}}, \Omega)$. Условие возникновения ошибки предобработки, связанной с невозможностью отнесения сообщения к одному из подмножеств $U_I, U_{II}, U_{III} \dots$ можно записать в виде:

$$\begin{aligned} u \notin U_A \wedge G(u, \Omega_A) = 1, \\ u = \{u^{\text{inf}}, F(u^{\text{inf}}, \Omega)\}. \end{aligned} \tag{1.4}$$

где U_A – множество полученных вычислителем сообщений, которые были сформированных устройством A в рассматриваемой информационной системе.

Соответственно, достоверность предобработки в части вероятности корректного определения источника блоков данных определяется некоторым соотношением между двумя числами: мощностью множества U и мощностью выходного алфавита преобразования $F(u^{\text{inf}}, \Omega)$. Последнее число, при условии использования кодеров, удовлетворяющих по требованию равномерности и высокой энтропии выходных слов [62, 63], определяется разрядностью H поля, которое содержит кодовую последовательность, по которой принимается решение об источнике данных [64]. Соответственно, вероятность корректной предобработки блоков данных определится как вероятность невыполнения условия (1.4) для всех слов множества U , которые были сформированы отличными от A устройствами:

$$P_{\text{err}} = (1 - 2^{-H})^{|U|}. \quad (1.5)$$

Таким образом, предметное противоречие в РИУС, реализованной с использованием технологии БСС, при изменении объёма передаваемых служебных данных можно представить как снижение вероятности ошибки P_{err} при увеличении размера передаваемых метаданных и наоборот.

1.4.2 Методы и технические решения предобработки сообщений ограниченного размера с целью выделения метаданных и определения источника

В настоящее время задача выделения и обработки метаданных для управления режимами обработки сообщений решается не только в рассматриваемом классе вычислительных систем, но и в большом числе разнородных информационно-управляющих систем [65].

Известно техническое решение для организации сбора, передачи и обработки данных обмена данными между динамически изменяющимся количеством устройств, объединённых рассматриваемой технологией ИВ [66]. Каждая пара взаимодействующих конечных устройств ассоциируется с уникальной кодовой последовательностью. Отправитель пары кодирует, а

получатель декодирует сообщение на основании данной последовательности. Корректность декодирования позволяет отнести сообщение, являющееся элементом всего множества кодируемых передаваемых в вычислительной системе сообщений, к данной паре, определяя тем самым его отправителя и получателя. Проверка корректности декодирования должна осуществляться путём сравнения результата декодирования с некоторым эталоном, которым должны быть кодовые последовательности, ассоциированные с конкретным сообщением. Современная организация сетей позволяет это сделать только путём размещения таких эталонов в служебных полях передаваемых пакетов данных, которые при этом выступают в роли метаданных. Соответственно, вероятность безошибочного декодирования и определения источника сообщения определяется формулой (1.5).

Различные методы и алгоритмы кодирования, которые в рассматриваемом изобретении является инструментом формирования некоторой числовой характеристики, сравниваемой с эталоном, не могут повысить достоверность выделения и обработки метаданных и разделения множества поступающих сообщений на подмножества, сформированные отдельными источниками. Тогда как в способе выделения и обработки метаданных в полосе телевизионного сигнала [67] использование кодов с низкой плотностью и контролем чётности позволяет достичь достоверности сегментации потока информации на отдельные кадры, близкой к границе Шенона для каналов связи с помехами [68]. В то же время отмечается противоречие между достоверностью современных кодов для каналов связи с ошибками и аппаратной сложностью вычислителей, решающих задачи кодирования и декодирования информации, в том числе и метаданных [69], что выходит за рамки принятых нами ограничений по производительности и энергопотреблению для вычислителей, составляющих вычислительную систему обработки метаданных.

1.5 Особенности использования методов предобработки групп сообщений для определения источников сообщений ограниченной длины

1.5.1 Повышение достоверности обработки метаданных за счёт обработки множеств сообщений

Подходом, позволяющим в случае обработки метаданных сообщений, размер которых составляет несколько байтов, существенно повысить достоверность, является совместная обработка метаданных некоторой последовательности или некоторого множества сообщений [72]:

$$\begin{aligned} G(\{u_1, \dots, u_M\}, \Omega_1) = 1 &\Rightarrow u_1 \in U_1, \dots, u_M \in U, \\ G(\{u_1, \dots, u_M\}, \Omega_1) = 0 &\Rightarrow u \notin U_1, \dots, u_M \notin U, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где M – размер группы сообщений, для которой выполняется совместная обработка метаданных с целью определения источника, сформировавшего данную группу.

Причиной, по которой подобный подход даёт большую достоверность, является то, что вероятность случайного выполнения условия (1.4) для одного сообщения больше, чем для группы из M сообщений:

$$p_{\text{err}} = (1 - 2^{-H \cdot M})^{A_{|U|}^M} > (p_{\text{err}}^1)^M. \quad (1.7)$$

где $A_{|U|}^M$ – число сочетаний M по $|U|$, которое определяет число вариантов формирования группы M сообщений из множества U .

При этом мы считаем, что порядок следования сообщений в множестве $\{u_1, \dots, u_M\}$ (1.6) важен для результата применения правила G , так как обработка метаданных подразумевает не только определения источника множества сообщений, но и взаимное расположение сообщений в потоке сообщений от него.

1.5.2 Известные решения выделения и обработки служебной информации из множеств сообщений

Метод определения источника сообщений, описанный в [73] ориентирован на определение и подтверждение подлинности источника сообщения, часть которого или некоторым образом изменённое сообщение передано в приёмник. Для этого на основании некоторого кодового слова вычисляются с использованием алгоритма Диффи-Хеллмана [74] вычисляется служебное слово, передаваемое в вычислитель–приёмник. Последний функционирует в условиях возможности получения как случайно сформированных, так и статистически связанных с сообщением целевого источника слов. Для последовательности сообщений формируется совокупность векторов вычисленных на стороне приёмника кодовых слов и по кодовому расстоянию между вычисленным вектором и хранящимся в памяти определяется принадлежность полученной последовательности сообщений источнику. Метод позволяет адаптировать размер дополнительных полей служебных данных, по которым осуществляется определение источника, к характеристикам канала связи и числу формируемых в распределённой системе сообщений, добиваясь требуемой достоверности при минимизации объёма дополнительно передаваемых данных. В то же время в чистом виде метод трудно применим при определении источников сообщений в системах, построенных по технологии ИВ, так как требует накопления последовательностей для всех взаимодействующих в рамках такой системы источников сообщений в памяти каждого приёмника. Это условие вступает в противоречие с требованиями по минимизации вычислительных затрат и архитектурной сложности самих вычислителей, обусловленной автономностью большинства устройств рассматриваемого класса [75].

В основе управления потоками данных, реализуемого изобретением [76] является ассоциирование метаданных отдельных сетевых пакетов

(сетевых адресов узлов) и способов их обработки (порты подключения к сети) на стороне приёмника. При этом формирование и обработка метаданных основывается на динамически конфигурируемой таблице, описывающей структуру распределенной информационной системы. Каждое выявленное несоответствие результатов обработки метаданных отдельных единиц обмена информацией требует формирования сообщения-запроса к источнику для передачи дополнительной информации о зафиксированных изменениях в конфигурации системы. При этом ответ на переспрос содержит не посылаемую ещё раз ошибочно отработанную информацию, а набор дополнительных данных для перестроения динамически конфигурируемой таблицы в приёмнике. Последняя особенность является ограничивающим фактором использования рассматриваемого подхода для формирования и обработки метаданных информационной системы, реализованной по технологии ИВ, так как нагружает канал связи с низкой пропускной способностью дополнительной служебной информацией.

В то же время использованный в изобретении подход к сокращению размеров передаваемой и обрабатываемой служебной информации дополнительной служебной информации, заключающийся в переносе части информации о информационной системе, об информационном потоке между её компонентами на уровень априорной информации [77] является основополагающим для повышения характеристик системы обработки метаданных (см. формулу (1.1)), который позволяет не только сократить размер H слова $F(u^{\text{inf}}, \Omega)$ (см. формулу (1.4)), обеспечивая при этом уменьшение вероятности параметра P_{err} , но и уменьшить число вариантов формирования группы M сообщений из множества всех поступающих сообщений U .

1.5.3 Особенности формирования метаданных групп сообщений для рассматриваемого класса информационных систем

Недостатком методов выделения метаданных групп сообщений в условиях необходимости их предобработки является высокая вычислительная сложность используемых алгоритмов. Это является следствием проблемы взаимодействия удалённых элементов информационной системы в условиях неоднозначности результатов обработки метаданных [78, 79]. В общем случае приёмник должен перебрать все возможные варианты содержимого полей метаданных и известных априорных свойств информационного потока между компонентами системы. Иными словами, необходимо сформировать $A_{|U|}^M$ структурированных множеств сообщений, выделить и проверить их метаданные и принять решение об истинности только одного из вариантов множества. Поэтому для практической реализации целесообразно использовать методы не полного перебора всех вариантов формирования группы $\{u_1, \dots, u_M\}$ проверяемых сообщений, а методы направленного поиска тех вариантов расположения сообщений в группе, которые бы соответствовали тому перечню порядку сообщений, который был сформирован целевым источником.

В работе [80] рассматривался метод формирования сообщений, $u = \{u^{\text{inf}}, F(u^{\text{inf}}, \Omega)\}$, ориентированный на применение в протоколах связи с гарантированной доставкой (когда сохраняется очерёдность сообщений при передаче от источника в приёмник). Анализ вычислительной сложности данного метода который при определённых условиях давал квадратичную вычислительную сложность $O(V^2)$, где V – некоторый параметр обработки потока поступающих сообщений, обеспечивая достоверность определения источника не ниже, чем в (1.7). В то же время метод ориентирован именно на поток сообщений, что в условиях БСС, когда внешние помехи могут оказывать существенное влияние на возможность доставки конкретного

пакета [23, 81], возможна ситуация пропуска одного сообщения, приводящая к невозможности опознавания центральным модулем всех последующих сообщений от сенсора.

Поэтому для рассматриваемых РИУС предпочтительны подходы, основанные на использовании фиксированного размера последовательности сообщений, при котором последовательность сообщений имеет строгую, известную сенсору и модулю управления длину [82]. В таком случае существует возможность введения в состав u^{inf} слова μ закодированного номера i^p сообщения в текущей группе. Содержимое сообщения в таком случае представляет собой конкатенацию трёх слов:

$$u = \left\{ u_{i^{p-1}}^{inf} \mid F_1(\Omega, u_{i^{p-1}}^{inf}, i^p) \mid F_2(\Omega, i^p) \right\} \quad (1.8)$$

где F_1 – функция формирования хеш-последовательности из слова $u_{i^{p-1}}^{inf}$

на основе ключа Ω (необратимое преобразование) [83];

F_2 – выполненное сенсором кодирования числа i^p на основе слова Ω (обратимое преобразование).

Для отнесения сообщения к множеству сообщений сенсора с идентификатором Ω и определение его как i -го сообщения в текущей группе, необходимо выполнение следующих равенств:

$$\left[F_2^{-1}(\Omega, \mu) = i^p \right] \wedge \left[u / \mu = F_1(\Omega, u_{i-1}^{inf}, i^p) \right] \quad (1.9)$$

где F_2^{-1} – выполняемое центральным модулем декодирование слова μ

по идентификатору соответствующего сенсора Ω .

Вышеуказанные преобразования должны выполняться в центральном модуле управления РИУС для всего множества идентификаторов сенсоров, с которых происходит приём мониторинговой информации. Результат преобразований по одному идентификатору не должен оказывать влияние на результат проверки условия (1.9) по любому идентификатору из оставшихся.

Так как результат обработки метаданных, передаваемых вместе с сообщениями БСС, формируется для группы сообщений, то при подобной

организации необходима буферизация всех поступающих сообщений. При этом повышение достоверности обработки метаданных достигается за счёт накопления результатов анализа поступающих сообщений в момент их приёма, а не после буферизации всего множества, как было предложено в [84].

С учётом того, что мощности подмножеств сообщений, которые при проверке условия (1.9) формируются из всего множества U по содержимому поля μ , есть случайные величины, которые зависят от разрядности данного поля, то и трудоёмкость алгоритма определения источника сообщения есть не детерминированная, а случайная величина, оценка которой может быть получена с использованием математического аппарата теории вероятностей и теории случайных процессов.

Преимуществом подхода, который обуславливает выбор его в качестве основы разработки метода снижения энергопотребления сенсора БСС, является то, достоверность его определяется размером группы сообщений M (см. 1.7) изменить который можно просто изменив параметр обработки сообщения при отправке. При этом можно достигать целевых значений вероятности ошибочной обработки метаинформации в сообщении [85].

1.5.4 Проблемы вычислительных и ресурсных затрат при использовании методов определения источников групп сообщений

Рассмотренные методы и средства обработки метаинформации сообщениях ограниченной длины, передаваемых в БСС, позволяют обобщить основные этапы процедуры обработки метаданных. Она состоит из трёх основных этапов [71]:

- этапа декодирования содержимого поступающего сообщения в соответствии с множеством хранящихся в памяти приёмника идентификаторов сенсоров ;
- размещение получаемых при декодировании промежуточных результатов в специализированной области памяти обработчика метаданных;

– анализ вариантов размещения промежуточных результатов с целью определения финального расположения сообщений в группы $\{u_1, \dots, u_M\}$.

Анализ схемотехнических реализаций вычислителей, которые реализуют указанные процедуры, показал, что максимальный вклад в значение параметра T_{pr}^{met} (1.1) вносит второй этап, при котором происходят множественные операции проверки хеш-последовательностей поступившего сообщения и сравнение их с хеш-последовательностями, сформированными из данных, уже размещённых в памяти промежуточных результатов

Если не учитывать взаимное влияние работы блоков, отвечающих за декодирование сообщений и анализ полученных результатов вычислений, друг на друга [86], то мощность множества U сообщений, обрабатываемых центральным модулем управления РИУС можно принять равной произведению числа K сенсоров РИУС (рис. 1.1) на средний размер группы сообщений M формируемой каждым сенсором. Тогда время T_{pr}^{met} обработки метаданных, с учётом того, что каждое сообщение декодируется только число раз, равное числу сенсоров, можно определить по формуле [71]:

$$T_{pr}^{met} = T_{dec} \cdot K + T_{comp} \cdot N_{comp}(K \cdot M), \quad (1.10)$$

где: T_{dec} – длительность этапа декодирования сообщения и его метаданных,

T_{comp} – длительность одной операции размещения результатов декодирования в памяти промежуточных результатов,

$N_{comp}(|U|)$ – число операций размещения результатов декодирования в памяти промежуточных результатов

Стоит отметить, что последний параметр $N_{comp}(|U|)$ является функцией от мощности множества U , поступающих в ЦМОИ.

Из полученных соотношений вытекают основные подходы к контролю производительности элемента РИУС, отвечающего за обработку метаданных сообщений, поступающий в модуль управления:

- увеличение соотношения $T_{\text{dec}} / T_{\text{comp}}$ за счёт разработки методов, алгоритмов обработки сообщений и структурно-функциональной организации приёмника, ориентированных на ускорение операций размещения данных в памяти промежуточных результатов, так как длительность декодирования обычно определяется только схемотехникой приёмника;

- использование параллельно работающих модулей обработки метаданных, что позволяет кратно уменьшить величину слагаемого $N_{\text{comp}}(|U|)$ [87].

- использование таких алгоритмов обработки сообщений, сложность которых (характер функции $N_{\text{comp}}(|U|)$) обеспечит увеличение производительности приёмника.

1.6 Предпосылки к ограничению числа обрабатываемых блоков при определении их источника

Как указано в работах [66, 80], для снижения объёма передаваемой метаинформации в сообщении БСС, объём заголовочной части должен быть минимизирован. При этом, в случае, если метаинформация не содержит в явном виде информацию об отправителе и получателе, а является исходными данными для её получения в результате преобразований на стороне получателя, то основным методом повышения достоверности идентификации сенсора БСС, является уменьшение размеров множества обрабатываемых центральным модулем управления U обрабатываемых сообщений. То есть, необходимо сформулировать правило выделения из такого множества U сообщений, поступивших в ЦМОИ в течение некоторого времени, подмножества U' , меньшего по мощности, которое и будет

участвовать в обработке и определении источника для группы из M сообщений. Что и даст в формуле (1.7) снижение вероятности ошибки p_{err} :

$$(1 - 2^{-H \cdot M})^{|U|} > (1 - 2^{-H \cdot M})^{|U'|}, \quad (1.11)$$

при $|U| > |U'|$.

С учётом того, что для определения источника групп сообщений в любом случае необходима буферизация поступающих блоков данных и их хранения до момента передачи группы блоков на последующую обработку, а также, для экономии внутренней памяти вычислителя необходимо использовать косвенную адресацию, то можно сформулировать основные процедуры, выполняемые при предобработке блоков [88]:

- получение блока данных и запись его во внутреннюю память вычислителя;
- выделение кодовой последовательности, зависящей от данных предыдущего блока (КПДПБ);
- проверка КПДПБ и добавления во внутреннюю динамическую структуру указателя на данные блока во внутренней памяти;
- проверка динамической структуры и определения последовательности тех её элементов, которые содержат указатели на данные блоков, полученных от целевого источника.

Соответственно, основные затраты вычислительных ресурсов в случае использования методов группового кодирования, приходятся на этап проверки служебных данных (индекса, КПДПБ) на предмет возможности добавления описателя в динамическую структуру. Применение простого решающего правила на этапе выделения индекса и кодовой последовательности позволяет отказаться от трудоёмких операций их проверки, что, во-первых, снижает вычислительную сложность всей процедуры определения источника сообщений., во-вторых, снижает количество добавляемых в динамическую списочную структуру элементов, что снижает вероятность возникновения ошибки, а в-третьих, из-за снижения

числа добавляемых элементов снижается требования к объёму памяти, требуемому для хранения такой динамической структуры.

Последний аспект базируется на результатах, полученных в работе [89], где рассмотрена модель возникновения ошибок определения источника при обработке групп сообщений. Если не рассматривать возможность сбоя и аппаратных ошибок, то ошибка в определении источника возникает при формировании двух и более подмножеств, которые удовлетворяют решающему правилу G (см. формулу (1.3)). В данном случае алгоритм определения источника выдаёт ошибку и требуется переспрос всей группы блоков. При этом вероятность возникновения такой ошибки P^{err} есть функция числа анализируемых блоков (мощности множества U), длины H поля, содержащего КПДПБ, определяющую взаимное расположение блока относительно остальных блоков групп (значение хеша, сформированного из данных предыдущих блоков) и длины группы M .

Функция P^{err} зависимости вероятности ошибки от размера множества обрабатываемых блоков данных является монотонно возрастающей от 0 до 1 функция на всей области определения при фиксированных параметрах передачи группы блоков (длина группы блоков, размер). Соответственно, подходом к повышению достоверности формирования группы блоков данных, полученных от целевого источника, является формирование такой группы не из всего множества, поступивших в вычислитель, а только из их некоторой её части, подмножества $U' \subset U$, $|U'| < |U|$. Что определяет необходимость формирования некоторых решающих правил для отказа от обработки части блоков данных, имеющих целью повышение быстродействия вычислителя, повышение достоверности предобработки и определения источника и снижения аппаратной сложности самого устройства.

1.7 Выводы по разделу

1. Рассмотрен класс распределённых информационно-управляющих систем, которые реализованы по технологии беспроводных сенсорных сетей. Для реализации функций мониторинга, контроля, и выработки управляющих воздействий центральным модулем управления, в последний по беспроводному каналу связи с низкой пропускной способностью и большим радиусом действия должны поступать сообщения с узлов-сенсоров сети. Отличительной особенностью узлов является их реализации в виде автономных датчиков физических параметров, снабжённых радиомодулем.

2. Показано, что на эксплуатационные характеристики распределённых информационно-управляющих систем оказывает время автономной работы узла-сенсора. Проанализировано энергопотребление такого типового узла в составе беспроводной сенсорной сети и установлено, что до 70% заряда батареи сенсор расходует в режиме передачи информационного сообщения центральному модулю управления. Отмечено основное направление повышение автономности узла-сенсора, влияющее на срок службы всей системы управления – снижение длительности фазы передачи данных по беспроводному каналу связи

3. Рассмотрены методы снижения энергопотребления узла-сенсора системы управления, выделен основной недостаток существующих решений – необходимость реализации в составе распределённой информационно-управляющей системы подсистемы контроля состояния составляющих её узлов для минимизации числа циклов передач данных или снижения затрат энергии на выполнение одного такого цикла.

4. Отмечено, что для используемых для коммуникации с беспроводных сенсорных сетях протоколов связи характерен небольшой (до нескольких байтов) размер передаваемого пакета данных, при котором доля метаинформации, то есть информации об отправителе, получателе, порядковом номере пакета данных составляет до 40% от общего размера

передаваемой информации. С учётом низкой скорости передачи данных (до нескольких килобитов в секунду) определено направление снижения длительности этапа передачи данных, заключающееся в снижении объёма передаваемой метаинформации

5. Рассмотрены методы снижения размеров заголовочной части пакетов данных (сообщений), передаваемых в беспроводных сенсорных сетях. Показана перспективность подхода, при котором метаинформация не содержит в явном виде адреса и служебные данные, а является информацией, из которой эти данные вычисляются в центральном модуле управления и выработки управляющих команд. При такой организации не требуется выполнение дополнительных операций узлом-сенсором, что не увеличивает сложность системы управления и энергопотребление самого сенсора.

6. Выведена целевая характеристика методов снижения размера передаваемых метаданных в сообщениях сенсорной сети: произведение вероятности безошибочного определения источника сообщения и его порядкового номера в потоке таких сообщений на отношение общего размера сообщения к размеру поля полезной информации. Показано, что наибольшую достоверность при одинаковом размере метаданных имеют методы выделения метаданных, основанные на кодировании в режиме сцепления блоков, позволяющие определять источник не одиночного сообщения а целой группы сообщений.

7. Для методов определения источника сообщений, основанных на кодировании данных в режиме сцепления блоков, обоснована возможность повышения достоверности за счёт редукции множества обрабатываемых сообщений на основе времени поступления их в центральном модуле управления распределённой информационно-управляющей системы.

2 Разработка методов и алгоритмов обработки сообщений сенсора беспроводной сенсорной сети для повышения их энергоэффективности.

2.1 Теоретические предпосылки к снижению числа обрабатываемых сообщений при определении их источника.

Все поступающие в центральный модуль обработки информации сообщения от сенсоров образуют множество U , и буферизируются в его внутренней памяти, так как при использовании кодирования в режиме сцепления блоков принять решения об источнике группы сообщений можно только по результатам обработки всех её элементов. Из буферизированных сообщений в результате выполнения алгоритмов определения источника формируется последовательность сообщений U_A , сформированных целевым сенсором. Каждое сообщение, которое проходит предобработку при добавлении в группу, во время которой проверяется не только по значению кодовой последовательности, но и, в случае, если в заголовок сообщения введён код, определяющий позицию (индекс) сообщения в группе. Соответственно, при проверке возможности добавления сообщения на определённую позицию в группе, проверяются не все блоки, а лишь обладающие требуемым кодом в соответствующем поле [90]. Это снижает вычислительную сложность такого метода по сравнению с методами, в которых индекс не присутствует в явном или закодированном виде в составе обрабатываемого блока данных [91]. Таким образом происходит сегментация множества U на непересекающиеся подмножества U_1, U_2, \dots, U_M , при этом каждый элемент множества U_A , принадлежит ровно одному из вышеозначенных подмножеств

$$U_A = \left\{ U_1^{(x_1)}, U_1^{(x_1)}, \dots, U_M^{(x_M)} \right\}, \quad (2.1)$$

где x_i – позиция элемента подмножества U_i , принадлежащего множеству U_A ,

В то же время, количество операций анализа сообщений, формируемых элементами распределённой информационно-управляющей системы, можно дополнительно снизить, если учитывать не априорное содержимое заголовков сообщений, но и текущее состояние центрального модуля: количество обработанных им к текущему моменту сообщений от конкретного сенсора, структуру уже сформированных групп сообщений [92]. В качестве теоретического базиса для определения правила, ограничивающего мощность множества обрабатываемых сообщений U и формирующего из него подмножество U' выступает порядок формирования и выдачи сенсором беспроводной сенсорной сети. Как было отмечено выше, модель передачи данных, используемая в большинстве современных протоколов, в том числе и протоколов беспроводных сенсорных сетей, подразумевает, во-первых, синхронную отправку, когда очерёдность отправки блока данных определяется его позицией в группе, а, во-вторых, квити́рованием доставки, когда перед отправкой последующего блока проверяется его доставка [93 – 95]. И хотя в современных системах связи используются протоколы, допускающие изменение очерёдности передаваемых пакетов данных, заданной при отправке [96, 97], они не используются в БСС. Таким образом, в общем виде процедура передачи данных в БСС может быть представлена в следующем виде.

Имеем последовательность сетевых пакетов или сообщений $U_A = \{u_1, u_2, \dots, u_M\}$. Время поступления в приёмник (в нашем случае – в центральный модуль сбора и обработки информации РИУС), выполняющий функцию определения источника данных, каждого блока данных является случайной величиной: $p_1(t), p_2(t), \dots, p_M(t)$. При этом считается, что данные функции распределения одномодальны [98, 99] из-за используемой в протоколах с низкой пропускной способностью модели Аллоха [100], подразумевающей квити́рование каждого поступающего блока данных. Тогда модальные значения $t_1^{\max}, t_2^{\max}, \dots, t_M^{\max}$ функций $p_1(t), p_2(t), \dots, p_M(t)$ подчинены соотношению:

$$t_1^{\max} < t_2^{\max} < \dots < t_M^{\max} \quad (2.2)$$

Из этого можно предположить, что некоторые варианты поступления сообщений в ЦМОИ невозможны. Например, первый пакет с некоторой вероятностью может поступить после того, как был обработан второй, но в случае обработки второго и третьего блоков это уже невозможно.

С учётом того, что в наиболее вероятной ситуации отсутствия ошибок и сбоев сообщения целевого сенсора БСС источника поступают в ЦМОИ последовательно, то есть их индексы последовательны, а содержимое поля индекса блоков других сенсоров при декодировании будет случайным, можно формировать временные ограничения для поступления сообщений с определённым индексом [101]. Отказ от обработки сообщений с индексом, не соответствующим правилам обработки, как было показано в первом разделе, уменьшает число элементарных операций сравнения, выполняемых центральным модулем при определении источников данных.

2.2 Реализация основных процедур предобработки групп сообщений при определении их источника

2.2.1 Реализация этапа получения и буферизации сообщений

Формализовать задачу предобработки обработки групп сообщений с целью определения сенсора БСС, их сформировавшего, можно следующим образом. Определён сеанс получения ЦМОИ сообщений от определённого сенсора. В течение данного сеанса в центральный модуль передаётся множество U_A сообщений данного сенсора. Помимо вышеназванного множества, в ЦМОИ поступают сообщения и от других сенсоров, так как нет возможности разделить временные интервалы получения групп сообщений для множества сенсоров. Вместе с сообщениями множества U_A множество U , которое должно после выполненной модулем предобработки быть обработано способом, отличным от способа обработки сообщений множества U_A

Реализуется предобработка и выделение подмножества U_A из множества U путём декодирования каждого элемента, который в источнике был закодирован в режиме сцепления блоков. Как было отмечено в разделе 1 при рассмотрении методов определения источников сообщений, что на количество элементарных операций предобработки данных и сравнения влияет информация о позиции сообщения данных в группе [66]. Поэтому, как и в [102, 103], в составе каждого блока данных вводится ещё и поле, содержащее индекс (позицию) J сообщения данных в группе сообщений.

Для проверки принадлежности поступающего в ЦМОИ блока данных (сообщения, сетевого пакета) u множеству U_A в составе такого блока, помимо поля данных u^{inf} входит ещё и КПДПБ $u^{\text{aut}} = F(u_{\text{prev}}^{\text{inf}}, \Omega)$ [104], формируемый из идентификатора сеанса связи или идентификатором сенсора БСС Ω и содержимого поля данных предыдущего сформированного источником блока $u_{\text{prev}}^{\text{inf}}$, обеспечивая тем самым сцепление блоков. Каждое сообщение, которое проходит предобработку, при добавлении в группу проверяется не только по значению кодовой последовательности, но и по значению индекса J . С учётом того, что данный индекс принимает значения от 1 до M , его введение дополнительно увеличивает длину блока на $\lceil \log_2 M \rceil$. На основе изложенного в [66], формальное правило сформированности группы блоков данных источником с идентификатором Ω будет выглядеть следующим образом:

$$\forall u_J \in U_A, J=1..M, \quad u_J^{\text{aut}} = F(u_{J-1}^{\text{inf}}, \Omega). \quad (2.3)$$

При этом нулевым блоком u_0 , для которого высчитывается проверочное кодовое слово $F(u_0^{\text{inf}}, \Omega)$ первого блока группы, в общем случае может быть последний блок предыдущей группы или специализированный стартовый блок. Следует отметить, что в первом случае сообщений в группе позволяет отказаться от использования ограничивающих стартовых и стоповых блоков, что повышает скорость обработки группы, снижает объём дополнительной

обрабатываемой и хранимой в памяти вычислителя информации при выполнении процедуры определения источника блоков данных [105].

2.2.2 Реализация ограничения числа обрабатываемых блоков сообщений для улучшения характеристик обмена информацией между компонентами беспроводной сенсорной сети

Формализуем правило предобработки пакетов данных сенсора БСС в центральном модуле РИУС, которое позволит выделить из всех буферизированных в его внутренней памяти сообщений меньшее по мощности множество U' , но при этом содержащее с высокой вероятностью все блоки множества U_A . При декодировании служебных данных сообщения БСС выделяется его индекс (порядковый номер в группе) J и определяется его принадлежность к одному из множеств $U_1 - U_M$ [106]:

$$f^{\text{ind}}(u, \Omega) = J \Rightarrow u \in U_J. \quad (2.4)$$

где: f^{ind} – операция декодирования содержимого сообщения, в котором содержится индекс.

Рассмотрим некоторый момент времени, к которому были обработаны сообщения подмножества U^t множества U . Для этого подмножества можно определить J'_{max} – максимальный индекс всех сообщений подмножества, вычисленный с помощью идентификатора Ω :

$$J'_{\text{max}} = \max(f^{\text{ind}}(u, \Omega)), u \in U^t. \quad (2.5)$$

Введём два параметра обработки сообщений ЦМОИ. Первый – J_f – параметр, показывающий, на какое максимальное число индекс поступающего сообщения от какого-либо сенсора может превышать J'_{max} , чтобы быть добавленным в подмножество U^t , или, иными словами, быть обработанным по правилам обработки КПДПБ u^{aut} и, в случае успеха проверки КПДПБ, быть добавленным в множество U^A . Параметр J_f может

принимать значение от 1 до максимального размера группы сообщений, формируемых рассматриваемым сенсором M .

Второй параметр, определяющий порядок обработки сообщения J_b определяет, на какое максимальное число индекс поступающего на обработку сообщения может быть меньше J_{\max}^t . Диапазон значений, которые он может принимать такой же, как и у первого параметра: от 1 до M .

Соответственно, формируется условие для проведения трудоёмкой и ресурснозатратной процедуры проверки КПДПБ, которое требует попадания декодированного индекса сообщения u , поступающего в центральный модуль обработки информации, в диапазон от $J_{\max}^t - J_b$ до $J_{\max}^t + J_f$:

$$\max(1, J_{\max}^t - J_b) \leq f^{\text{ind}}(u, \Omega) \leq \min(M, J_{\max}^t + J_f) \quad (2.6)$$

В случае, если индекс пакета данных, сформированного сенсором БСС, не удовлетворяет условию (2.6), то такое сообщение игнорируется, сохраняясь только в памяти приёмника как блок, потенциально сформированный другим сенсором [71]. Введение указанного условия обработки блока делает возможным за счёт манипуляции параметрами J_b и J_f достигать уменьшения числа операций обработки блоков, повышая тем самым быстродействие ЦМОИ, которое значительно снижается при использовании методов, ориентированных на уменьшение размеров полей служебных данных пакетов с длиной до нескольких байтов.

Указанное уменьшение числа обрабатываемых блоков, помимо снижения вычислительных затрат, позволяет, за счёт уменьшения числа анализируемых блоков, снизить вероятность условия (1.4) для более чем одной группы блоков. Подобное уменьшение вероятности ошибки оказывает комплексное влияние на параметры обработки сообщений сенсорной сети, так как при снижении размеров передаваемых служебных данных неизбежно повышается вероятность коллизий таких данных у разных пакетов и, как следствие, вероятность ошибки определения источника пакета. Следствием этого является снижение частоты переспросов в случаях обнаружения

ошибки обработки и снижение целевого показателя – объёма передаваемого отдельным сенсором данных. Кроме того, уменьшение числа обрабатываемых блоков данных снижает вероятность формирования групп блоков, заведомо содержащих сообщения от иных источников данных, что дополнительно снижает число выполняемых операций сравнения КПДПБ при выполнении условия (2.6) [107, 108].

Следует отметить, что при $J_b = J_f = M$, обрабатываются все буферизированные во внутренней памяти блоки данных, что необходимо при использовании в распределенных вычислительных системах протоколов, допускающих порядка следования передаваемых между отдельными устройствами команд и данных или при возникновении длительных задержек при их передаче в гетерогенных системах связи [109, 110]. Последнее свойство характерно для систем связи с несколькими вариантами доставки данных между парой взаимодействующих устройств [111, 112].

Если протоколами взаимодействия гарантируется очерёдность доставки, что реализовано в модели Аллоха для БСС [111, 112], то при обработке блоков можно использовать параметр J_f , равный единице. Это увеличивает вероятность возникновения ошибки обработки группы блоков. Для исключения этого в вычислителе потребуются дополнительно реализовать подсистему контроля очерёдности буферизируемых сообщений, что приведёт к снижению его производительности и росту аппаратной сложности.

Таким образом формулируется требование к принципам обработки содержимого полей служебных данных в пакетах БСС при определении сенсора, их сформировавшего. Центральный модуль обработки информации и выработки управляющих воздействий что вычислитель должен хранить, помимо кодовых слов $\Omega_A, \Omega_B, \Omega_C, \dots$, ассоциированных с источниками сообщений, переменные $J_{\max}^A, J_{\max}^B, J_{\max}^C, \dots$, которые были вычислены на основе данных поступивших в вычислитель сообщений и вышеуказанных

слов, а также пары параметров $\{J_b^A, J_f^A\}$, $\{J_b^B, J_f^B\}$, $\{J_b^C, J_f^C\}, \dots$, определяющие порядок обработки сообщений для формирования последовательностей каждого источника.

2.2.3 Реализация процедур формирования динамических структур

Обработка блоков данных в ЦМОИ, имеющая своей целью определение конкретного сенсора БСС, их сформировавшего, реализуется путём предварительной буферизации поступающих блоков данных. Модуль обработки информации формирует структурированную последовательность информационных блоков, буферизируя их содержимое в собственной внутренней памяти. Подобные задачи, как было отмечено в [107] являются достаточно сложными и ресурсоёмкими. Соответственно, для целевого класса устройств, представляющих собой модули обработки информации автономных мобильных устройств, их реализация требует повышения скорости выполнения операций сравнения КПДПБ и снижение затрат внутренней оперативной памяти. Рациональным подходом является косвенная адресация всех временно хранящихся данных. Данные поступающих блоков хранятся в произвольном порядке в буферной оперативной памяти вычислителя, а промежуточные данные, необходимые для формирования и обработки динамических списочных структур – в его регистровой памяти, обеспечивая тем самым высокую скорость доступа к ним со стороны вычислительных элементов. Под данными, необходимыми для формирования списочных структур в настоящей работе понимается набор внутренних адресов регистровой памяти, обеспечивающий логическую связь между соседними элементами группы информационных блоков. Пример списочной структуры, элементы которой ссылаются на линейное пространство буферной памяти вычислителя, приведён на рис. 2.1.

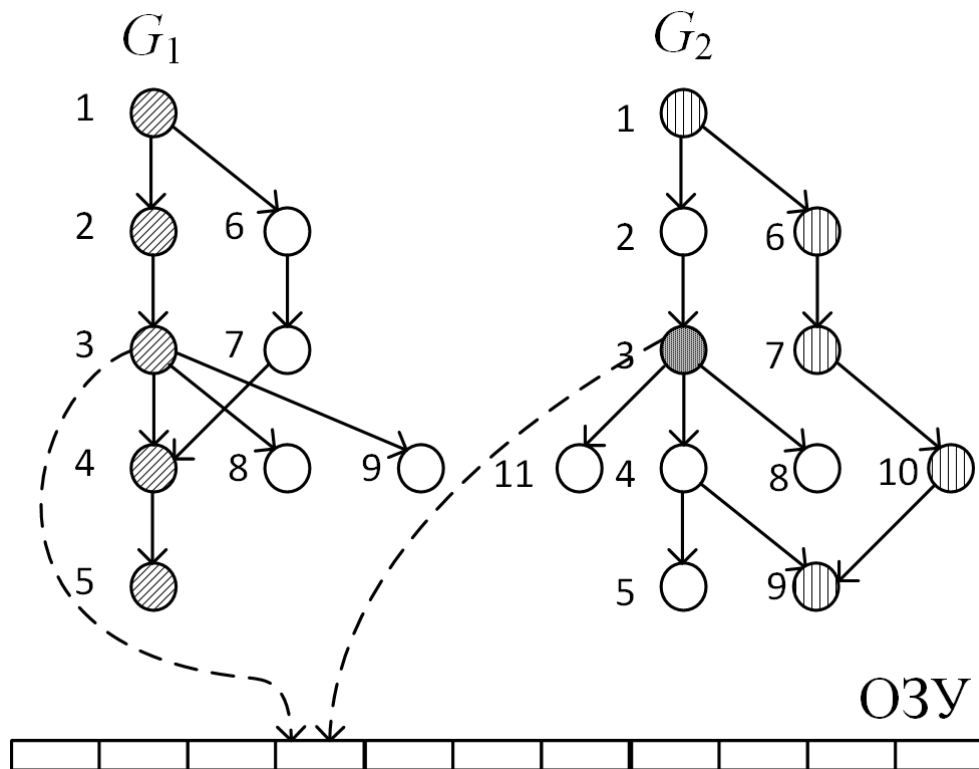


Рисунок 2.1 – Пример списочных структур и косвенной адресации буферизированных сообщений сенсора БСС

Для двух источников сформированы независимые списочные структуры G_1 и G_2 , элементы которых содержат указатели на данные, размещенные в буферном ОЗУ. В общем случае разные элементы независимых структур могут ссылаться на один и тот же элемент в линейной памяти блоков данных [113].

В то же время алгоритмы работы со списочными структурами, применительно к задачам определения источника групп блоков требуют реализации рекурсивного вызова подпрограмм [114, 115], что усложняет аппаратную сложность принимающего оборудования. Более простые с точки зрения аппаратной реализации итерационные алгоритмы, работающие с элементами списочной структуры как с совокупностью векторов данных [116 – 118], требуют отдельных разделов памяти для каждой ветви графа (рис. 2.1). При этом размер каждого такого раздела должен быть таковым, чтобы хранить самую длинную ветвь графа вне зависимости от фактической длины

ветви, хранящейся в ней. При такой организации регистровая память описателей превращается в набор векторов данных.

С учётом особенностей реализации рекурсивного и итерационного подходов к обработке списочных структур разработана комбинированная модель хранения описателей, основанная на обработке кода позиции блока в цепочке. Это позволяет в каждом элементе матрицы регистров хранить не ссылки не на произвольные регистры памяти, а лишь на те, которые находятся в следующем столбце относительно текущего элемента матрицы регистров (рис.2.2). На рисунке число столбцов матричной памяти равно максимальному размеру группы блоков данных M , а число строк N определяется, исходя из особенностей работы вычислителя, ёмкости его буферного ОЗУ [119].

Таким образом, каждый описатель блока $B_{i,j}$, хранящийся в регистровой памяти, будет представлять собой конкатенацию следующих слов:

– $B_{i,j}^{\text{adr}}$ – адрес блока в буферной памяти;

– $B_{i,j}^{\text{next}}$ – результат кодирования поля u_j^{inf} : $F(u_j^{\text{inf}}, \Omega)$ для J -го сообщения для сравнения КПДПБ u_{j+1}^{aut} следующего блока в последовательности, что позволяет избежать повторения операций кодирования при многократном сравнении $F(u_j^{\text{inf}}, \Omega)$ и КПДПБ каждого поступающего блока;

– $B_{i,j}^{\text{aut}}$ – слово u_j^{aut} для сравнения с результатом кодирования содержимого предыдущего блока в последовательности

– множество указателей (номеров регистров в соответствующем столбце регистровой матрицы) $G_{i,j} = \{g_1, g_2, \dots, g_t\}$ на последующие элементы последовательности

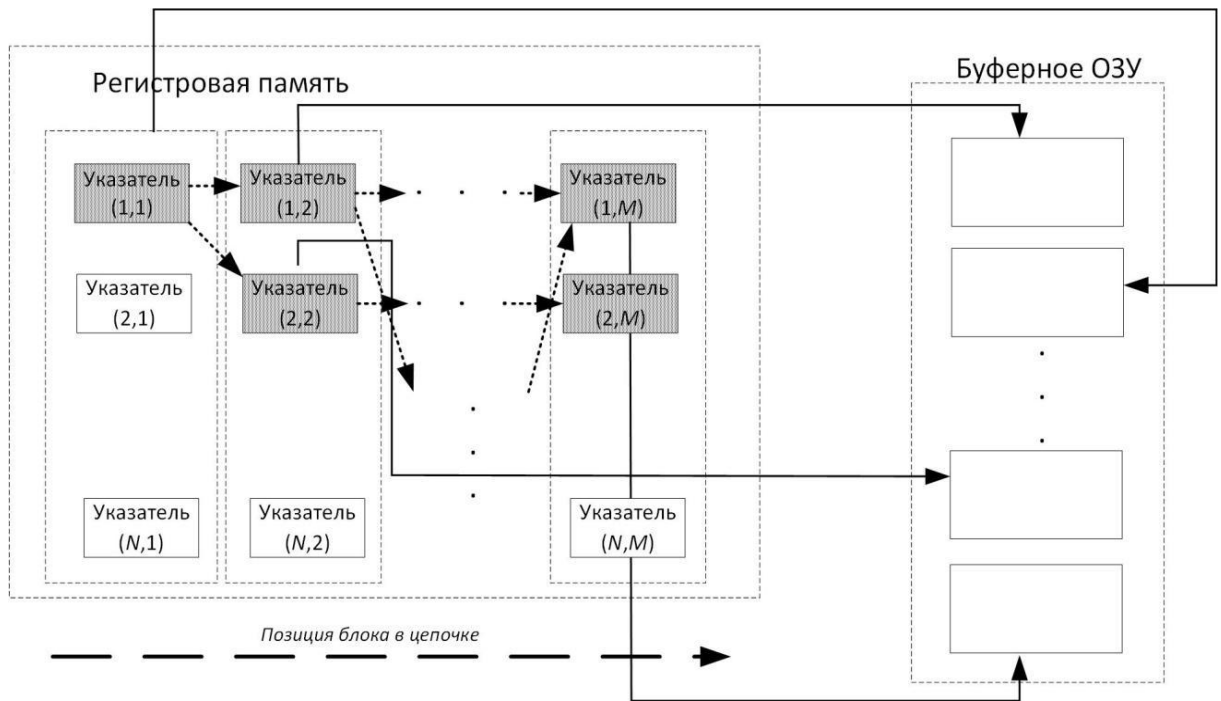


Рисунок 2.2 – Косвенная адресация блоков данных в модуле, выполняющем обработку служебных данных сообщений БСС.

При подобной организации каждое поступающее сообщение после декодирования его номера J в соответствии с идентификатором Ω (2.4) проверяется на возможность добавления к сообщениям в столбцах с номерами $(J - 1)$ и $(J + 1)$. Благодаря хранению в каждом регистре результата кодирования поля U_J^{inf} и слова U_J^{aut} проверка может быть организована за 1 такт двумя параллельно работающими блоками. Число тактов проверки определится числом строк в регистровой матрице, которое, в свою очередь, должно быть таким, чтобы частота возникновения ошибок записи в матрицу регистров была приемлемой для практического использования [119].

2.3 Формализация метода определения последовательности сообщений от элемента беспроводной сенсорной сети

На основании всего сказанного выше можно описать основные подходы к обработке сообщений БСС с целью определения их источника. Определение сенсора, сформировавшего сообщения, в общем случае однозначным образом определит правила дальнейшей обработки групп

сообщений. Поэтому считаем, что центральный модуль сбора и обработки информации, в состав которого входит специализированный вычислитель, выполняющий указанную процедуру разделения потока сообщений на подпотоки, получает данные от фиксированного множества сенсоров РИУС. Сообщения объединены в группы для более высокой достоверности выполнения операции определения их источника в условиях, когда размер единичного сообщения недостаточен для размещения в нём специализированного поля с идентификатором источника. Каждое сообщение кодируется на основании некоторого кодового слова-идентификатора источника Ω и состоит из информационного поля, поля порядкового номера сообщения в группе и поля КПДПБ. В множестве сообщений от конкретного сенсора выделяются граничные сообщения, следующие через определённое число (равное длине группы сообщений) обычных сообщений, которые отличаются используемым алгоритмом формирования содержимого информационного и служебных полей. Они отделяют друг от друга последовательно поступающие в окончательное устройство группы сообщений одного источника.

Основные этапы метода определения последовательности сообщений от сенсора беспроводной сенсорной сети:

1. С каждым сенсором, который взаимодействует с конкретным ЦМОИ, ассоциируется уникальное кодовое слово, используемое в течение цикла передачи и обработки данных для кодирования на стороне сенсора и декодирования в центральном модуле, осуществляющем определение источника поступающих в приёмник сообщений.

2. Кодирование сообщений на стороне сенсора происходит на основе ЦМОИ уникального кодового слова, данных предыдущего отправленного в приёмник сообщения и порядкового номера сообщения в последовательности таких сообщений

3. Для каждого поступающего в модуль обработки информации сообщения производится операция выделения его порядкового номера на

основе каждого хранящегося в приёмнике кодового слова, ассоциированного с источниками.

4. Для каждого кодового слова и ассоциированного с ним цикла передачи и обработки данных в модуле обработки информации хранится максимальный порядковый номер всех сообщений, вычисленный с помощью данного кодового слова в течение конкретного цикла передачи и обработки данных.

5. Сообщение обрабатывается в модуле обработки информации на основе кодового слова и проверяется на принадлежность последовательности сообщений сенсора, который ассоциирован с этим кодовым словом, в случае, если значение порядкового номера такого сообщения попадает в интервал, содержащий максимальный порядковый номер всех сообщений и определённый неравенствами (2.6).

Невыполнения условия (2.6) исключает сообщение из обработки при формировании последовательности сообщений от источника, уменьшает число элементарных операций сравнения КПДПБ и число требуемых для хранения элементов списочной структуры регистров ЦМОИ.

2.4 Алгоритмы обработки групп сообщений.

2.4.1 Алгоритм формирования динамических структур.

На основе описанного выше метода определения источника последовательности сообщений, предложенной организации буферной памяти, разработан нижеследующий алгоритм обработки блоков, формирования списочной структуры и последующей её обработки с целью определения источника сообщений. При описании алгоритма приняты следующие обозначения:

– матрица B размером N строк на M столбцов – структурный вычислитель, представленный в виде матрицы регистров, хранящей описатели элементов древовидной структуры (рис.2.2), формируемой при

определении принадлежности группы сообщений одному конкретному источнику;

– f^{ind} – операция декодирования содержимого поля блока, в котором содержится индекс;

– $G^{i,j}$ – множество сформированных указателей на следующий элемент в графе сообщений у элемента, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти, каждый указатель – номер строки в $j+1$ столбце, в котором содержится последующий элемент последовательности сообщений;

– $g_k^{i,j}$ – содержимое указателя с номером k у элемента, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти, совокупность таких указателей образует множество $G^{i,j}$;

– $B_{i,j}$ – отдельный элемент регистровой памяти, размещённый в её i -й строке и j -м столбце, размер элемента в битах определяется, исходя из реальных условий эксплуатации вычислителя;

– $u_{i,j}^{\text{inf}}$ – данные сообщения, описатель которого размещён в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти;

– $u_{i,j}^{\text{aut}}$ – КПДПБ блока, описатель которого размещён в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти;

– $B^{(j)}$ – содержимое j -го столбца регистровой памяти;

– $|B^{(j)}|$ – число занятых регистров в j -м столбце регистровой памяти.

– Z – битовый массив занятых блоков в буферном ОЗУ.

Основные этапы алгоритма:

1) Установка начальных значений $R := \{0, \dots, 0\}$, $|B^{(1)}| \dots |B^{(M)}|$, J_b , J_f , $J_{\text{max}}^t := 0$.

2) Получение блока данных u . Декодирование его номера блока J в цепочке: $J = f^{\text{ind}}(u, \Omega)$.

3) Установка переменной цикла $k := 0$, сброс флага $f := 0$.

4) Если $\max(1, J'_{\max} - J_b) \leq J \leq \min(M, J'_{\max} + J_f)$, то перейти к пункту 5, иначе – к пункту 2.

5) Повторять для k от 0 до $|Z| - 1$ раз. По окончании перейти к пункту 17.

6) Если $Z_k = 0$, то $Z_k := 1$, $A := k$ Записать блок данных u в буферное ОЗУ по адресу A . Перейти к пункту 7. В противном случае перейти к пункту 5.

7) Повторять для k от 1 до $N + 1$ раз. По окончании перейти к пункту 17.

8) $B_{k,J}^{\text{adr}} := \emptyset$, записать элемент в регистровую память $B_{k,J}^{\text{adr}} := A$, $|B^{(J)}| := |B^{(J)}| + 1$, $B_{k,J}^{\text{aut}} := u^{\text{aut}}$, $B_{k,J}^{\text{next}} := F(u^{\text{inf}}, \Omega)$, $f := k$. Перейти к пункту 9.

9) Повторять для k от 1 до N раз. Если $B_{k,J(u)-1}^{\text{next}} = u^{\text{aut}}$, тогда сохранить указатель на текущий элемент: $g_{|B^{(J-1)}|, J}^{|B^{(J-1)}|, J}_{|B^{(J-1)}|, J}_{+1} := f$ перейти к пункту 10. Если нет – $k := k + 1$. По окончании цикла перейти к пункту 10

10) $B_{k,J-1}^{\text{adr}} := \emptyset$, То конец цикла. Перейти к пункту 11.

11) $J'_{\max} := \max(J, J'_{\max})$.

12) Если $J = M$, перейти к пункту 18, иначе – перейти к пункту 13.

13) Установка переменной цикла $k := 0$, сброс флага $f := 0$.

14) Повторять для k от 1 до N раз. Если $F(u^{\text{inf}}, \Omega) = B_{k,J+1}^{\text{aut}}$, тогда перейти к пункту 15. Если нет – $k := k + 1$. По окончании цикла перейти к пункту 16.

15) Сохранить указатель на текущий элемент: $g_{|B^{(J)}|, J}^{|B^{(J)}|, J}_{|B^{(J)}|, J}_{+1} := k$.

Инкрементировать переменную цикла $k := k + 1$. Перейти к пункту 14.

16) Если сообщение u последнее в последовательности, перейти к пункту 18, иначе – перейти к пункту 2.

17) Выдать сообщение об ошибке. Перейти к пункту 18.

18) Конец процедуры добавления блока в регистровую память.

Следует отметить, что описанный алгоритм может быть распараллелен в части обработки поступающих сообщений (пункты 5 – 16) так как предложенная схема хранения промежуточных результатов предполагает только добавление данных в древовидную структуру и модификацию содержимого только трёх столбцов. Таким образом, если при декодировании порядкового номера двух сообщений в группе их номера будут отличаться более чем на 2, они могут быть обработаны двумя независимыми вычислительными блоками без возможности гонок двух потоков управления [122].

2.4.2 Алгоритм обработки сформированной динамической структуры.

Особенности реализации метода обработки данных для определения их источника подразумевают, что в формируемой динамической графовой структуре добавление элементов происходит не ко всем её элементам. Проверка каждого сообщения по условию (2.6) позволяет при значении J_{\max}^t превышающем J_b+1 начать обработку элементов такой структуры, хранящихся в столбцах с номерами $1 \dots J_b+1$ ещё до завершения поступления всех сообщений последовательности, которые источник передаёт в приёмник и вычислитель. Таким образом, существует возможность формирования групп сообщений путём реализации алгоритма, работающего параллельно с алгоритмом, описанном в 2.4.1. Используемые в алгоритме переменные:

- N_{col} – количество обработанных столбцов регистровой матрицы;
- R – множество векторов адресов сообщений в буферном ОЗУ, образующих последовательности сообщений, $R = \{R_1, R_2, \dots, R_r\}$;
- $r = |R|$ – число сформированных последовательностей;
- R_i^G – ассоциированное с каждым вектором R_i поле указателей (номеров регистров в соответствующем), копирующее поле G элемента регистровой матрицы B , соответствующее последнему элементу вектора R_i .
- γ_j^i – j -й элемент поля указателей R_i^G

С учётом этого, а также результатов работы приведенного выше алгоритма, основные этапы алгоритма обработки сформированной динамической структуры будут следующими:

1) Установка начального значения количества отработанных столбцов регистровой памяти $N_{\text{col}} := 0$, начального значения числа цепочек $r:=1$, определение начального сообщения u^{st} , установка начального состояния множества векторов $R:=\{ u^{\text{st}} \}$.

2) Если $\max (1, J'_{\text{max}} - J_{\text{b}} - N_{\text{col}}) > 1$, перейти к пункту 3, иначе – перейти к пункту 2.

3) Повторять для k_1 от 1 до r раз.

4) Повторять k_2 от 1 до $|R_{k_1}^G|$. Если $k_2 < 2$ добавляем элемент в последовательность $R_{k_1} := R_{k_1} + B_{R_{k_1}^{gk_2}, J'_{\text{max}} - J_{\text{b}} - N_{\text{col}}}$

5) Если $k_2 > 1$ добавляем цепочку $R_{r+1} = R_{k_1}$, $r := r + 1$.

$$R_r := R_r + B_{R_{k_1}^{gk_2}, J'_{\text{max}} - J_{\text{b}} - N_{\text{col}}}$$

6) Повторять для k_1 от 1 до r раз. По окончании перейти к пункту 9

7) Повторять для k_2 от 1 до $|R_{k_1}^G|$ раз. $R_{k_1} = B_{\gamma_{k_2}^{k_1}, N_{\text{col}}+1}^{\text{adr}}$, $R_i^G = B_{\gamma_{k_2}^{k_1}, N_{\text{col}}+1}^{\text{next}}$, $R_{r+1} = R_{k_1}$,

$r := r+1$. По окончании цикла перейти к пункту 8.

8) Удалить элемент R_r , $r := r-1$. Перейти к пункту 3

9) Присваиваем $k_1 := 1$.

10) Если $k_1 < r+1$, перейти к пункту 8, иначе – к пункту 13.

11) Если цепочка с пустым полем указателей: $|R_i^G| = 0$, удаляем её из множества цепочек $R_{k_1} = R_{r+1}$, $r := r-1$. Переходим к пункту 10.

12) Инкрементируем k_1 : $k_1 := k_1+1$. Перейти к пункту 10.

13) Инкрементируем N_{col} : $N_{\text{col}} := N_{\text{col}} + 1$.

14) Если $N_{\text{col}} := M+1$, то перейти к пункту 15, иначе – перейти к пункту 2.

15) Если $r = 1$, то выдать R_1 как вектор адресов сообщений целевого источника, иначе – выдать сообщение об ошибке определения источника.

16) Конец алгоритма.

Синхронизация работы данного алгоритма с работой описанного ранее выполняется в пункте 2, в котором происходит определение тех столбцов регистровой памяти, которые

2.4.3 Модификация алгоритма формирования динамических структур для увеличения числа сенсоров, описатели которых могут храниться в памяти центрального модуля системы управления.

С учётом структуры операндов алгоритма в п. 2.4.2, можно утверждать, что роль блокирующей переменной [120] для него играет J_{\max}^t . До того момента, пока не произойдёт инкрементация значения J_{\max}^t в алгоритме, описанном в п. 2.4.1 он находится в активном ожидании (вопросы скорости выполнения каждого из двух вышеописанных алгоритмов мы пока не рассматриваем). После выполнения требуемого условия стартует вычислительный процесс формирования последовательностей сообщений, представляющий собой две последовательные фазы: добавления элементов в множество R и его последующей редукции. Так как области памяти, которые задействуются алгоритмом формирования динамических структур ограничены условием, проверяемым на шаге 4, то модификация столбцов регистровой памяти под номерами $1 \dots J_{\max}^t - J_b$ будет уже невозможна. Таким образом исключаются гонки процессов, реализующих два алгоритма. При этом данные из столбцов $1 \dots J_{\max}^t - J_b$ будут скопированы в область памяти, содержащую множество указателей R .

Тот факт, что условие на шаге 4 алгоритма формирования динамической структуры запрещает доступ на модификацию о столбцам с номерами $J_{\max}^t + J_f \dots M$, ограничивает общее число столбцов регистровой

памяти, к которым происходит доступ со стороны процессов, реализующих оба алгоритма. В каждый момент времени физически адресуется только $J_b + J_f$ столбцов. Таким образом, осуществив переход от реального физического адреса столбца к их виртуальными адресами, мы можем сократить задействованный объём регистровой памяти. Сама трансляция может быть с помощью математического выражения [121]:

$$m' = m \bmod (J_b + J_f + 1) \quad (2.7)$$

где m – используемый в алгоритмах виртуальный номер столбца матрицы указателей B ;

m' – текущий номер столбца матрицы указателей B , который мы используем для последующей обработки сообщений в буферном ОЗУ;

$a \bmod b$ – операция нахождения остатка от деления a на b .

Соответственно, во всех местах данных двух алгоритмов, в которых происходит адресация в регистровой матрице B , необходимо заменить адрес столбца на адрес, транслированный по формуле (2.7). Введение параллельной обработки динамической структуры в сочетании с преобразованием адреса столбцов позволяет сократить в $M / (J_b + J_f + 1)$ раз затраты регистровой памяти на хранение промежуточных результатов по сравнению с затратами вычислителя, описанного в [71], что является актуальным для целевого класса устройств с невысокой аппаратной сложностью, производительностью и энергопотреблением.

Кроме того, использование динамической адресации столбцов матричной памяти позволяет реализовать концепцию единой регистровой памяти для хранения множества динамических структур от различных источников. В этом случае регистровая память не размещается в пределах одного вычислительного блока и используется только им, что подразумевает избыточность, так как метод определения источника подразумевает динамическое определение параметров J_b и J_f . В то же время число столбцов регистровой памяти должно быть равно максимально возможному значению

суммы $J_b + J_f + 1$. Реализация же единого пространства регистровой памяти подразумевает выделение каждому вычислительному блоку требуемого условиями сеанса передачи числа столбцов, позволяя расходовать её максимально эффективно. Это обеспечивает увеличение числа описателей сенсоров, которые могут одновременно храниться в памяти центрального модуля РИУС при реализации методов и алгоритмов определения источников поступающих в него сообщений

2.5 Выводы по разделу

1. Разработан метод определения источника последовательности сообщений, поступающих в центральный модуль сбора информации и выработки управляющих воздействий распределённой информационно-управляющей системы, использующий группировку сообщений источника для повышения достоверности выполнения операции при ограниченном размере одиночного сообщения. Использованный в нём подход к исключению из обработки части сообщений, основанный на анализе введённой в состав каждого сообщения последовательности, кодирующей порядковый номер сообщения в группе и проверке попадания указанного порядкового номера в динамически формируемый диапазон значений, позволяет повысить при сохранении требуемой достоверности определения сенсора, сформировавшего сообщения, снизить размер дополнительных служебных полей сообщения, снижая тем самым энергозатраты сенсора на передачу данных по беспроводному каналу связи в центральный модуль, увеличивая срок его автономной работы.

2. Предложена организация хранения результатов промежуточных вычислений, позволяющая за счёт комбинации матрицы регистровой памяти и динамически формируемой списочной структуры совместить процедуры декодирования сообщения и формирования последовательностей сообщений от элемента беспроводной сенсорной сети, что исключает временные затраты центрального модуля сбора и обработки информации на анализ

последовательностей после буферизации и обработки последнего сообщения в переданной группе.

3. Разработаны алгоритмы формирования и обработки динамической списочной структуры, позволяющие организовать проверку поступающих сообщений беспроводной сенсорной сети на возможность добавления в группы сообщений, сформированные целевым источником, за один такт машинного времени, хранить как результат промежуточных вычислений только вектора адресов сообщений, без дополнительных слов-результатов декодирования и указателей на элементы регистровой памяти.

4. Исследованы особенности параллельной работы алгоритмов формирования и обработки динамической списочной структуры, позволяющие за счёт трансляции адресов сократить требуемый объём регистровой памяти для хранения промежуточных результатов вычислений при определении источника сообщений. Трансляция адресов памяти позволяет реализовать в центральном модуле рассматриваемой распределённой информационно-управляющей системы, реализованной по технологии беспроводной сенсорной сети, выполняющем обработку сообщений ограниченной длины от множества сенсоров, реализовать совместную обработку сообщений от большего числа сенсоров при неизменных затратах внутренней памяти такого модуля.

3 Исследование характеристик метода обработки сообщений беспроводной сенсорной сети для определения их источника

3.1 Оценка влияния параметров формирования и обработки сообщений на результирующую достоверность определения источника

3.1.1 Математическая модель оценки вероятности ошибки определения сенсора, сформировавшего сообщение

Как следует из формулы для целевого критерия методов снижения размеров передаваемых сенсором данных (1.2), вероятность ошибки определения источника сообщения, наряду с размером дополнительных служебных полей, является значащим параметром. В рамках предлагаемого метода снижения мощности множества обрабатываемых сообщений является основой для уменьшения указанной вероятности.

Представим процесс получения информационных блоков в виде марковского процесса с непрерывным временем. За единицу условного времени выберем время получения группы блоков данных от целевого источника U_A мощностью M . Следовательно, интенсивность получения вычислителем блоков от целевого источника будет $P_{\text{legal}} = M$.

Вместе с сообщениями от целевого сенсора в центральный модуль сбора и обработки информации (ЦМОИ) поступают и сообщения от всех сенсоров системы, образуя вместе с множеством U . В качестве ещё одного параметра формируемой модели примем интенсивность поступления в ЦМОИ блоков, сформированных отличными от целевого сенсора элементами P_{false} , которую для простоты модели примем равной числу источников сенсоров в исследуемой сенсорной сети.

Так как результат декодирования номера блока J в цепочке $f^{\text{ind}}(u, \Omega)$ содержимого таких сообщений остальных сенсоров относительно идентификатора Ω есть величина случайная, то интенсивности отнесения

такого блока к одному из непересекающихся подмножеств U_1, U_2, \dots, U_M множества U (см. формулу (2.1)), одинаковы и равны P_{false} / M [106].

Граф, описывающий марковский процесс [123] поступления в вычислитель блоков данных приведён на рисунке 3.1.

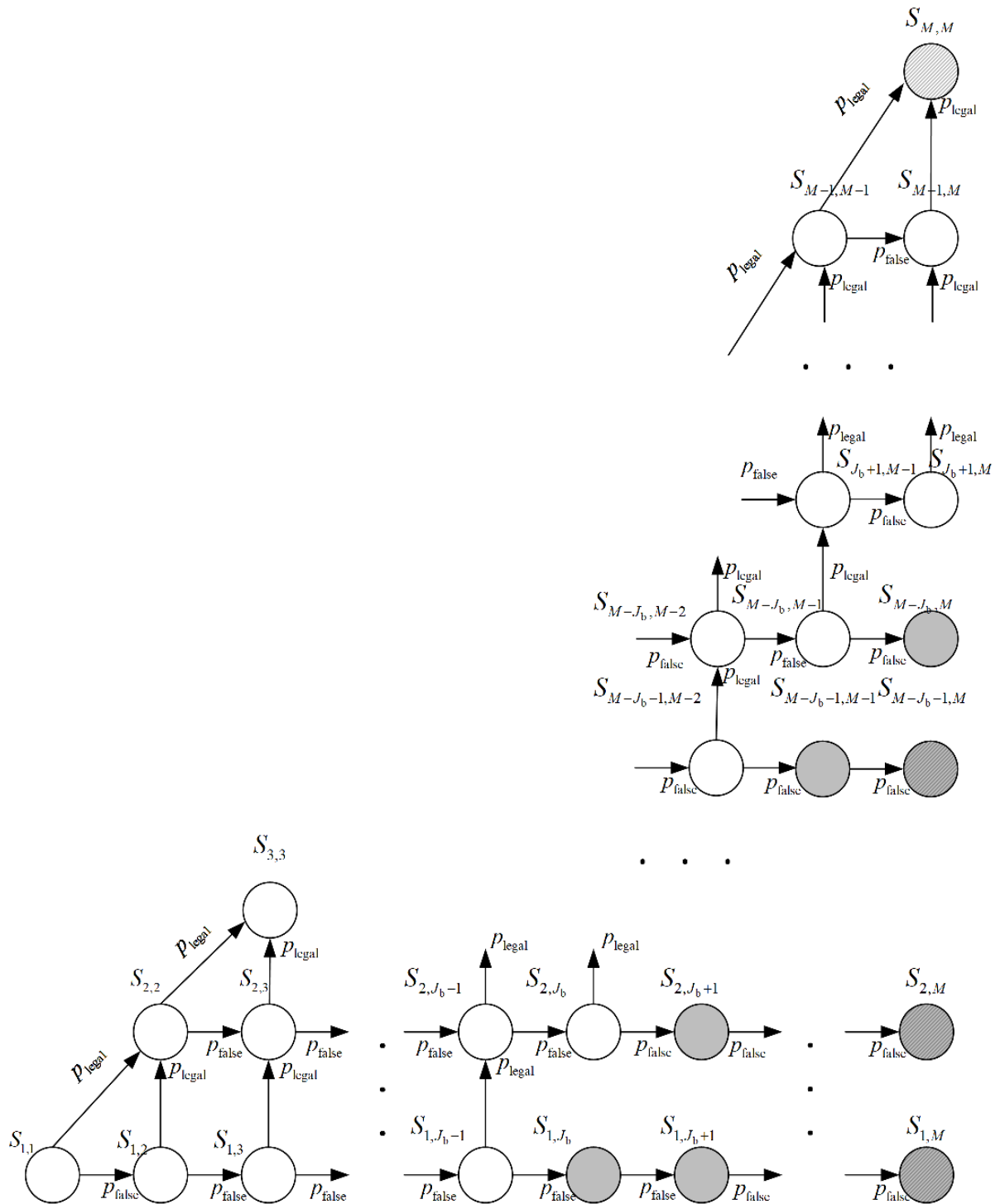


Рисунок 3.1 – Граф марковского процесса, моделирующего поступление в сообщений в модуль сбора информации от целевого и посторонних сенсоров

Мы исследуем ситуацию, характерную для большинства современных протоколов беспроводной связи, в которой порядок следования сетевых пакетов не претерпевает изменения, поэтому показатель J_f принимается равным 1, что позволяет исключать из обработки все информационные блоки с индексом большим, чем величина J_f+1 . Состояние $S_{i,j}$ на рисунке 3.1 соответствует поступлению в ЦМОИ i сообщений от целевого сенсора и произвольного числа сообщений от иных сенсоров, при этом максимальный индекс J_f поступивших сообщений равен j . Недопустимыми считаем состояния $S_{i,j}$ когда $i > j$. Переход из состояния $S_{i,j}$ происходит в следующие состояния:

- $S_{i,j+1}$ – происходит поступление в ЦМОИ и буферизация постороннего сообщения с индексом J_f+1 ;
- $S_{i+1,\max(i+1,j+1)}$ – происходит поступление в ЦМОИ и буферизация сообщения целевого сенсора; с учётом невозможности изменения порядка следования данных, его индекс будет равен $i+1$.

Состояния графа, отмеченные серым цветом, моделируют ситуацию, при которой разница между максимальным индексом обработанного и буферизированного сообщения целевого источника i и максимальным индексом j обработанного блока, который был сформирован посторонним сенсором, превышает значения J_b . При наступлении такого события, во-первых, происходит исключение из процесса формирования последовательности целевого источника, согласно правилу управления регистровой памятью (см. п. 2.4.3). Во-вторых, последующая обработка поступающих от сенсора сообщений становится невозможной согласно условию (2.6). В цепи Маркова (рис. 3.1) это проиллюстрировано таким образом, что отсутствуют переходы между состояниями $S_{i,j}$ и $S_{i+1,\max(i+1,j+1)}$ при $j-i \geq J_b$. Для процедуры определения источника данных это означает завершение её выполнения с ошибкой. У рассматриваемого марковского

процесса имеются поглощающие состояния, отмеченные на рисунке штриховкой:

– $S_{M,M}$ – поступление в ЦМОИ и размещение описателей блоков в регистровой памяти завершились записью в него всех сообщений от целевого сенсора,

– $S_{1,M} - S_{M-J_b,M}$ – часть сообщений от целевого сенсора были исключены из обработки (их описатели не были помещены с специализированную динамическую структуру) и, соответственно, выполнение процедуры определения источника для группы блоков данных невозможно.

Система уравнений Колмогорова [124], описывающих данный марковский процесс получения сообщений от компонентов распределённой системы вычислителем, выполняющем процедуру определения источника групп сообщений, выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{S_{i,j}}(t)}{dt} = -(p_{\text{legal}} + p_{\text{false}})P_{S_{i,j}}(t) + p_{\text{legal}}(P_{S_{i-1,j-1}}(t) + P_{S_{i-1,j}}(t)), \quad i = \overline{2 \dots M-1} \\ \frac{dP_{S_{1,1}}(t)}{dt} = -(p_{\text{legal}} + p_{\text{false}})P_{S_{1,1}}(t), \\ \frac{dP_{S_{M,M}}(t)}{dt} = p_{\text{legal}}(P_{S_{M-1,M-1}}(t) + P_{S_{M-1,M}}(t)), \\ \frac{dP_{S_{i,j}}(t)}{dt} = -p_{\text{false}}P_{S_{i,j}}(t) + p_{\text{false}}P_{S_{i,j-1}}(t), \quad i = \overline{2 \dots M-1}, j = \overline{i+1 \dots M-1}, \\ \frac{dP_{S_{i,W_{\text{chain}}}}(t)}{dt} = p_{\text{false}}P_{S_{i,M-1}}(t), \quad i = \overline{1 \dots J_b}, \end{array} \right. \quad (3.1)$$

где $P_{S_{i,j}}(t)$ – функция зависимости вероятности пребывания моделируемой системы в состоянии $S_{i,j}$ от времени.

Численное решение системы уравнений (3.1) позволяет определить вероятность попадания процесса в поглощающее стояние $S_{M,M}$. При $t \rightarrow \infty$ вероятность $P_{S_{M,M}}(t)$ есть итоговая вероятность успешного получения всех

блоков целевого источника при реализации метода ограничения числа обрабатываемых блоков. Варьируемыми и исследуемыми параметрами модели будут переменные J_b , M и мощность множества U всех сообщений.

3.1.2 Полученные оценки вероятности исключения из обработки сообщения, сформированного целевым сенсором

Путём численного решения приведённой в п. 3.1.1 с системы уравнений позволяет можно определить несколько интересующих нас величин [125]. На достаточно долгом временном интервале система попадёт в одно из поглощающих состояний. Достаточностью в нашем случае мы считали близостью к нулю производных по времени вероятности нахождения в поглощающих состояниях:

$$\frac{dP_{S_{i,j}}(t)}{dt} \leq 10^{-5}, i = \overline{1 \dots M}, j = \overline{i \dots M} \quad (3.2)$$

На рисунке 3.2 приведены графики зависимости нахождения системы в состоянии $S_{M,M}$ от времени. За единицу модельного времени принято среднее время передачи последовательности из M сообщений от целевого сенсора сети, исходя из которого посчитана интенсивность P_{false} .

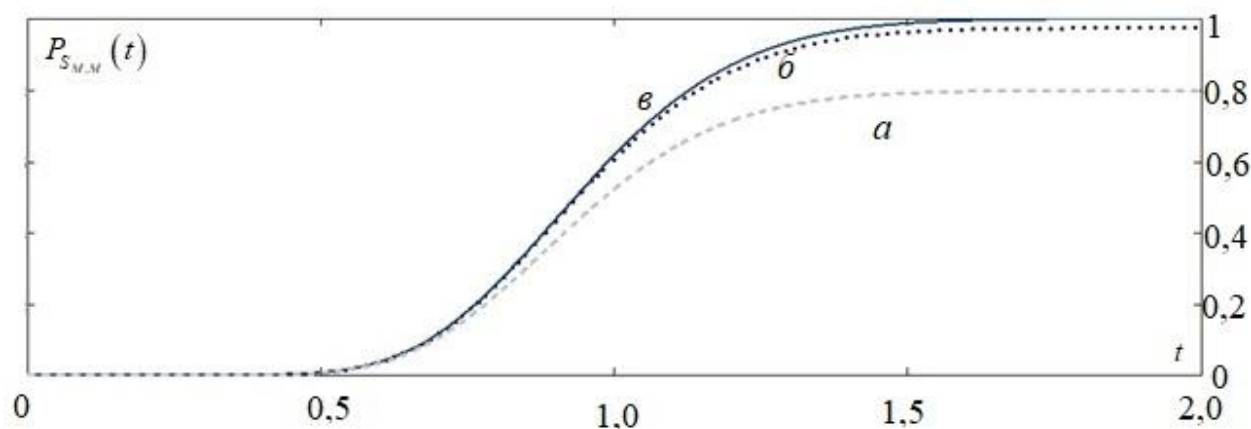


Рисунок 3.2 – График зависимости вероятности попадания в состояние $S_{M,M}$ от условного времени

а) $J_b = 9, M = 10, U = 100$; б) $J_b = 7, M = 10, U = 100$;

в) $J_b = 10, M = 15, U = 150$.

В результате моделирования установлено, что время перехода системы в поглощающие состояния (выполнение условия (3.2)) вне зависимости от параметров моделирования составляет за 1,7 ... 2,0 единиц модельного времени.

На рисунке 3.3 приведены графики зависимости суммы $\sum_{j=1}^{M-J_b} S_{j,M}$ вероятностей нахождения системы в поглощающих состояниях $S_{1,M} - S_{M-J_b,M}$, соответствующих невозможности записать в регистровую память вычислителя информации о сообщении от целевого источника из-за невыполнения условия (2.6), вызванного большим числом добавленных в древовидную структуру сообщений, полученных от посторонних сенсоров сети.

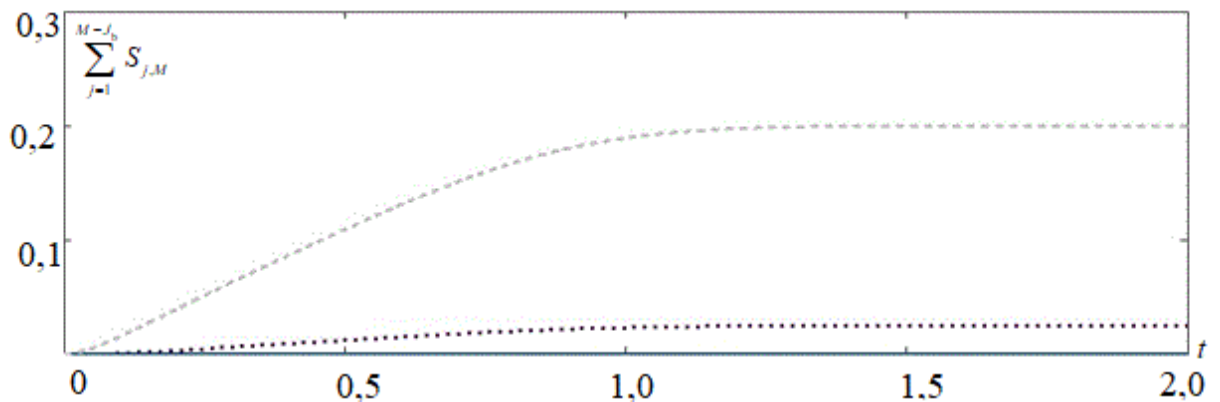


Рисунок 3.3 – График зависимости вероятности исключения из обработки сообщения целевого сенсора

Видно, что данные кривые асимптотически приближаются к своему максимуму и во временном диапазоне от 1,0 до 1,3 единиц модельного времени становятся практически горизонтальными. Выводом из полученного результата математического моделирования является прогнозирование времени начала обработки древовидной структуры и формирующего его множества последовательностей сообщений. Это актуально для случаев, когда последнее сообщение в группе не обрабатывается вычислителем из-за прекращения буферизации и обработки сообщений целевого сенсора. В

конечном счёте это позволит повысить скорость обработки групп сообщений за счёт исключения временных затрат на анализ содержимого заполненного буфера в случае, если с высокой долей вероятности последние сообщения последовательности целевого сенсора не были записаны в буфер [126].

Из анализа результатов математического моделирования, отдельные примеры которых приведены на рисунках 3.2 и 3.3 можно сделать вывод, что при величине параметра обработки сообщений J_b большем 5...7, вероятность возникновения ошибки исключения из обработки сообщения целевого источника незначительна (менее 0,05) по сравнению с достоверностью передачи сообщений по каналам связи с низкой пропускной способностью [50, 127]. При этом сама длина последовательности сообщений M в данной случае оказывает незначительное влияние на величину подобной ошибки, что делает особо эффективным использование метода ограничения числа обрабатываемых блоков данных при обработке последовательностей длиной более 20 сообщений

Для оценки вероятности данного события определим вероятность того, что к определенному моменту времени максимальный индекс записанного блока в буфере будет равен J_{\max}^t . Она определится выражением:

$$P_{J_{\max}}(t) = \sum_{i=0}^{J_{\max}-1} P_{S_{i, J_{\max}}}(t) \quad (3.3)$$

На рисунке 3.4 приведен график t зависимости вероятности величины $P_{J_{\max}}(t)$ при $J_{\max} < M$ и $J_{\max} = M$. Характерной особенностью графика вероятности $P_{J_{\max}}(t)$ при $J_{\max} = M$ является то, что он фактически состоит из двух частей: первая соответствует области, где кривая схожа по форме с кривой вероятности успешной передачи последовательности сообщений целевого источника (рисунке 3.3), расположенная в диапазоне изменения времени от нуля 1,0...1,2 единиц модельного времени. Вторая часть – пологое экспоненциальное приближение к единице, в диапазоне времени, превышающем 1,0...1,2 единиц модельного времени. Объясняется такая

форма графика тем, что попадание или непопадание моделируемой системы в состояния успешной и неуспешной передачи всей последовательности зависит от событий, которые происходят или не происходят до момента получения последнего элемента группы сообщений.

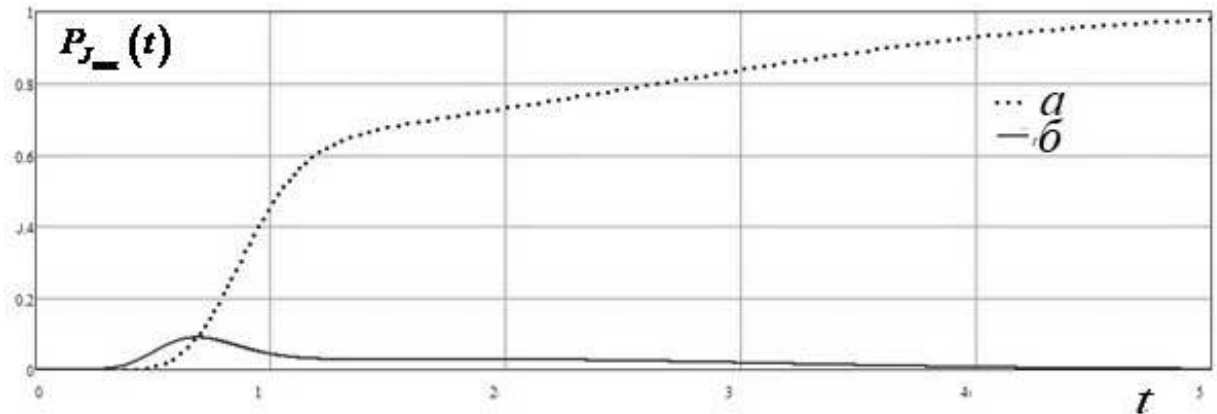


Рисунок 3.4 – График зависимости вероятности получения блока с максимальным индексом при низкой интенсивности поступления в вычислитель сообщений посторонних источников

а) $J_{\max} < M$, б) $J_{\max} = M$.

После попадания системы в состояния S_{1,J_b} , S_{2,J_b+1} , ..., $S_{M-J_b,M}$ обработка блоков данных от целевого источника прекращается, и в случае $P_{\text{false}} \ll P_{\text{legal}}$ производная вероятности $P_{J_{\max}}(t)$ по времени будет близка к нулю, то и видно на графике, когда вероятность успешного завершения передачи группы блоков перестаёт изменяться:

$$\frac{dP_{S_{i,j}}(t)}{dt} \approx 0, i = M, j = M \quad (3.4)$$

Вероятность $P_{J_{\max}}(t)$, $J_{\max} = M$ нарастает только за счёт роста вероятностей пребывания системы в состояниях S_{1,J_b} , S_{2,J_b+1} , ..., $S_{M-J_b,M}$. Иная картина наблюдается в случае приблизительного равенства вероятностей P_{false} и P_{legal} (рисунок 3.5)

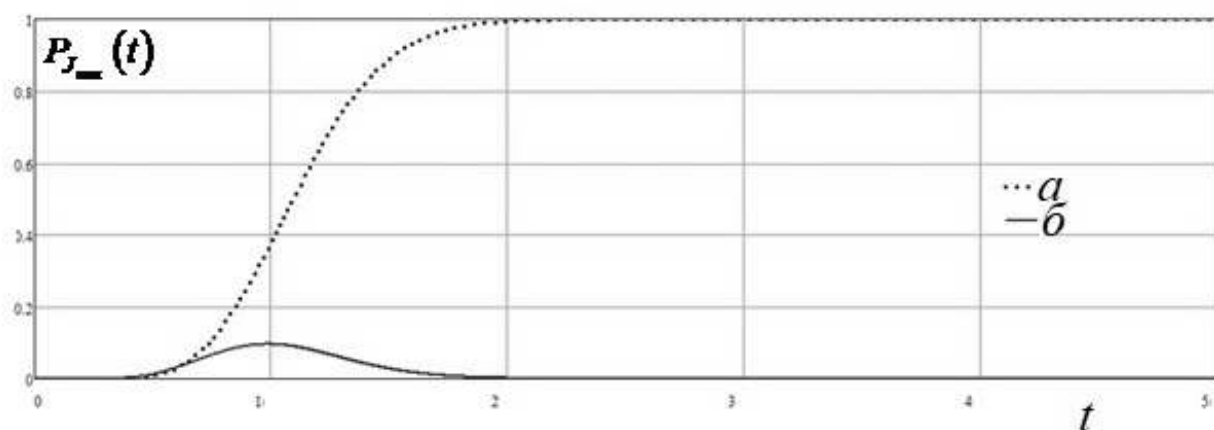


Рисунок 3.5 – График зависимости вероятности получения блока с максимальным индексом при равенстве интенсивностей поступления в вычислитель сообщений посторонних источников

а) $J_{\max} < M$, б) $J_{\max} = M$.

Следует отметить, что во время поступления сообщений в ЦМОИ и записи их в буфер, ни для одного из них не определено, сформирован ли он целевым сенсором или нет. Подобное разделение множества переданных от сенсоров сообщений происходит только после их окончательного анализа путём сравнения хеш-последовательностей, записанных в их дополнительных служебных полях [128]. Единственной информацией, которой обладает вычислитель до завершения обработки последовательностей блоков – это их максимальный индекс J_{\max} и среднее время передачи последовательности от целевого сенсора, вычисленное на основании предыстории поступления данных в ЦМОИ [129]. Но в случае, если будут вычислены отмеченные выше априорные вероятностные характеристики возникновения вышеописанной ошибки, заключающейся в прекращении обработки сообщений целевого сенсора из-за несоответствия их индексов условию (2.6), вычислитель может определить уже апостериорную вероятность такой ошибки при условии, что J_{\max} достиг некоторого определённого значения к текущему моменту времени.

3.1.3 Снижение вероятности ошибочной обработки данных из-за снижения числа обрабатываемых блоков данных

Для методов определения источников на основе кодирования сообщений в режиме сцепления блоков была создана математическая модель, позволяющая вычислить функцию вероятности P^{err} возникновения ошибки за счёт случайного совпадения КПДПБ в группах сообщений. Как было отмечено в разделе 1, данная функция непрерывно возрастающая на всём диапазоне изменения параметра U – числа обрабатываемых сообщений [129].

Число обрабатываемых сообщений при использовании исследуемого метода составляет $U' = (J_b + J_f) \times M^{-1} \times U$ или для случаев использования модели Аллоха [130] $U' = (J_b + 1) \times M^{-1} \times U$. При этом уменьшение параметра J_b снижает вероятность P^{err} , но, как следует из результатов, полученных в п. 3.1.2, увеличивает вероятность P^{out} пропуска блока целевого источника, равной сумме $\sum_{j=1}^{M-J_b} S_{j,M}$ вероятностей нахождения системы в поглощающих состояниях $S_{1,M} - S_{M-J_b,M}$.

Цель настоящего исследования – определить такие параметры обработки сообщений, которые давали бы максимальный прирост вероятности успешной обработки. Для этого на основе модели, предложенной в [70] определим функцию вероятности ошибки коллизии КПДПБ $p_{\text{tr}}^M = f(H, J_b, U', M)$, где H – размер поля КПДПБ, на основании которого формируются последовательности сообщений. В соответствии с методом определения источника [131] всё множество анализируемых сообщений разбиваются по значению их индекса на подмножества $w_1 - w_M$. Тогда мощности подмножеств w_i , $i = 1 \dots M$ есть случайные величины, подчинённые распределению Пуассона с интенсивностью $(U' - M)M^{-1} = (J_b + 1) \times U \times M^{-2} - 1$:

$$p^w(|w_i|) = \frac{\left(\frac{(J_b+1) \times U}{M^2} - 1\right)^{|w_i|} \times e^{-\frac{(J_b+1) \times U}{M^2}}}{|w_i|!} \quad (3.5)$$

Тогда вероятность выполнения условия (2.3) для k_1 сообщений, описатель которых должен быть размещён в ячейке матрицы регистров равна:

$$p_1(k_1) = \sum_{l=k_1}^{|U|-M} \left[p^w(l) \left(C_l^{k_1} (2^{-H})^{k_1} (1-2^{-H})^{l-k_1} \right) \right] \quad (3.6)$$

Плотность вероятности числа k_1^h различных вариантов результата кодирования $u_J^{\text{aut}} = F(u_{J-1}^{\text{inf}}, \Omega)$ для этих k_1 элементов:

$$p_1^h(k_1^h) = \sum_{l=k_1^h}^{|U|-n} \left[p_1(l) \left((2^{-H})^{j-k_1^h} \prod_{k=1}^{k_1^h} (1-(k-1)2^{-H}) \right) \right] \quad (3.7)$$

Для добавления элемента в следующий столбец матрицы регистров мы обрабатываем k_1^h результатов кодирования $u_J^{\text{aut}} = F(u_{J-1}^{\text{inf}}, \Omega)$ и $|w_2|$ элементов, которые могут быть туда записаны, что образует $k_1^h |w_2|$ испытаний, в каждом из которых вероятность совпадения идентификаторов для отнесения сообщения к группе равна 2^{-H} . Считая $k_1^h |w_2|$ достаточно большим, получаем вырождение биномиального распределения в распределение Пуассона с интенсивностью $k_1^h |w_2| 2^{-H}$ [132]. С учётом формулы для плотности распределения вероятностей для случайной величины $|w_2|$, аналогичной распределению для величины $|w_1|$:

$$p_2(k_2) = \left[\sum_{l=k_2}^{|U|-n} p^w(l) \sum_{k_1^h=1}^{|U|-n} p_1^h(k_1^h) \frac{(k_1^h \cdot l \cdot 2^{-H})^l \times e^{-k_1^h \cdot l \cdot 2^{-H}}}{l!} \right] \quad (3.8)$$

На основании формул (3.6) – (3.8) для плотностей вероятностей можно вывести формулы для итоговой вероятности получения k_r ,

отличающихся последовательностей блоков данных в динамической древовидной структуре:

$$p_r(k_r) = \sum_{l=k_r}^{|U|-M} p^w(l) \times \sum_{k_{r-1}=1}^{|U|-M} p_{r-1}^h(k_{r-1}) \frac{(k_{r-1}^h l 2^{-H})^l \times e^{-k_{r-1}^h l 2^{-H}}}{l!}, \quad (3.9)$$

$$p_r^h(k_r^h) = \sum_{l=k_r^h}^{|U|-M} p_r(l) \times \left((2^{-H})^{j-k_r^h} \prod_{k=1}^{k_r^h} (1 - (k-1)2^{-H}) \right).$$

Вероятность формирования в результате обработки сообщений по алгоритмам, описанным в разделе 2 двух отличающихся одним или несколькими элементами последовательностей сообщений, для каждого сообщения которых будет верной условие (2.3) равна:

$$p_{\text{col}}(j) = \sum_{l=1}^{|U|-n} \left[p_j(l) \left(1 - (1 - 2^{-H})^l \right) \right]. \quad (3.10)$$

Как показано в [84], ошибка определения источника для группы сообщений произойдёт, когда будут сформированы две последовательности (две ветви в древовидной структуре) сообщений длиной, равной длине оригинальной последовательности M , но отличающиеся одним или несколькими сообщениями, начиная с i -го. Вероятность этого будет определена по формуле:

$$P_i^{\text{sc}} = 1 - \prod_{j=1}^{M-i} (1 - p_{\text{col}}(j)). \quad (3.11)$$

Итоговая вероятность ошибки, вызванной коллизией КПДПБ:

$$p_{\text{tr}}^M = 1 - p_{\text{tr}}^M = 1 - \prod_{i=1}^{M-1} (1 - P_i^{\text{sc}}) = 1 - \prod_{i=1}^{M-1} (1 - p_{\text{col}}(i))^{M-i}. \quad (3.12)$$

Графики зависимости вероятности возникновения ошибки определения источника последовательности сообщений из-за коллизий вычисленных значений проверочных кодов, приведены на рисунке 3.6.

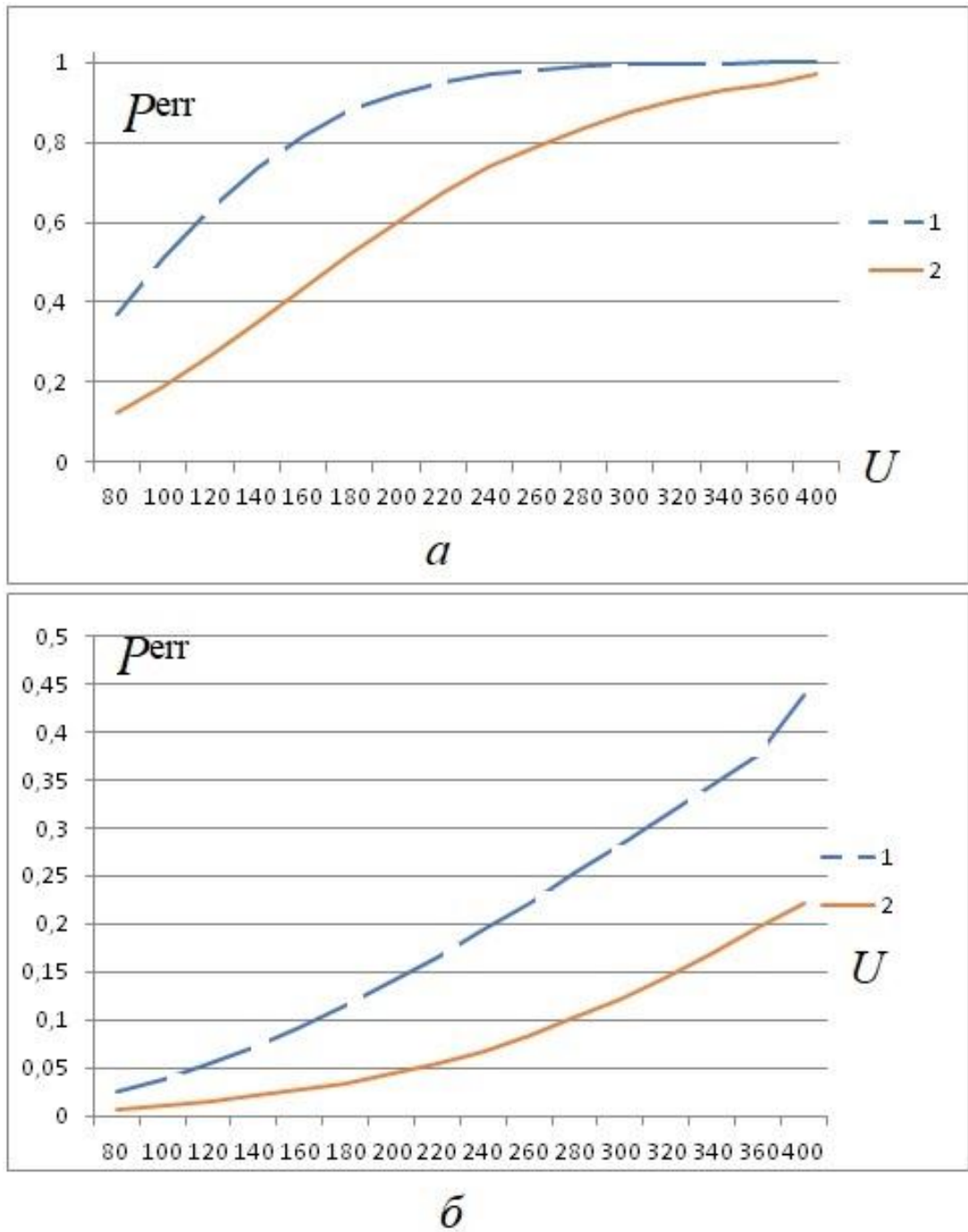


Рисунок 3.6 – График зависимости вероятностей ошибки P_{err} определения источника из-за коллизий КПДПБ 1 – без использования метода ограничения числа обрабатываемых блоков, 2 – с использованием метода ограничения числа обрабатываемых от общего числа сообщений, поступивших в приёмник U

а) $H = 5, M=10, J_b = 5$; б) $H = 7, M=10, J_b = 4$;

Анализ результатов математического моделирования показал, что вероятность ошибки определения сенсора, сформировавшего сообщения, в некоторых диапазонах мощности множества поступивших в ЦМОИ сообщений данных U снижается в 2 – 3 раза по сравнению с методами, в основе которых лежит реализация подхода анализа проверочных кодов, вычисленных в режиме сцепления блоков данных [133].

3.1.4 Итоговая оценка изменения вероятности ошибочной обработки метаданных сообщения сенсорной сети

Объединяя результаты предыдущих исследований, получим итоговую вероятность P^{sum} возникновения ошибки определения источника для группы сообщений, являющейся вероятностью наступления одного из двух событий: коллизии КПДПБ (вероятность P^{err}) и ошибки исключения из обработки сообщения целевого сенсора (вероятность P^{out}) [134]:

$$P^{\text{sum}} = 1 - (1 - P^{\text{err}})(1 - P^{\text{out}}). \quad (3.13)$$

Графики зависимости вероятности ошибки определения источника от длины обрабатываемой последовательности целевого сенсора M , параметра обработки индексов сообщений J_b , размера H слова $u_j^{\text{aut}} = F(u_{j-1}^{\text{inf}}, \Omega)$ и числа сообщений, поступающих в вычислитель за время передачи и обработки последовательности сообщений целевого источника U приведены на рисунке 3.7, графики I. Для сравнения, показаны зависимости вероятности P^{err} коллизии КПДПБ, являющейся вероятностью неправильной обработки последовательности сообщений без использования метода ограничения числа обрабатываемых сообщений (графики II). В области значений, где $J_b \geq M$ показано, что обе вероятности равны, так как равны мощности множеств U и U' [135].

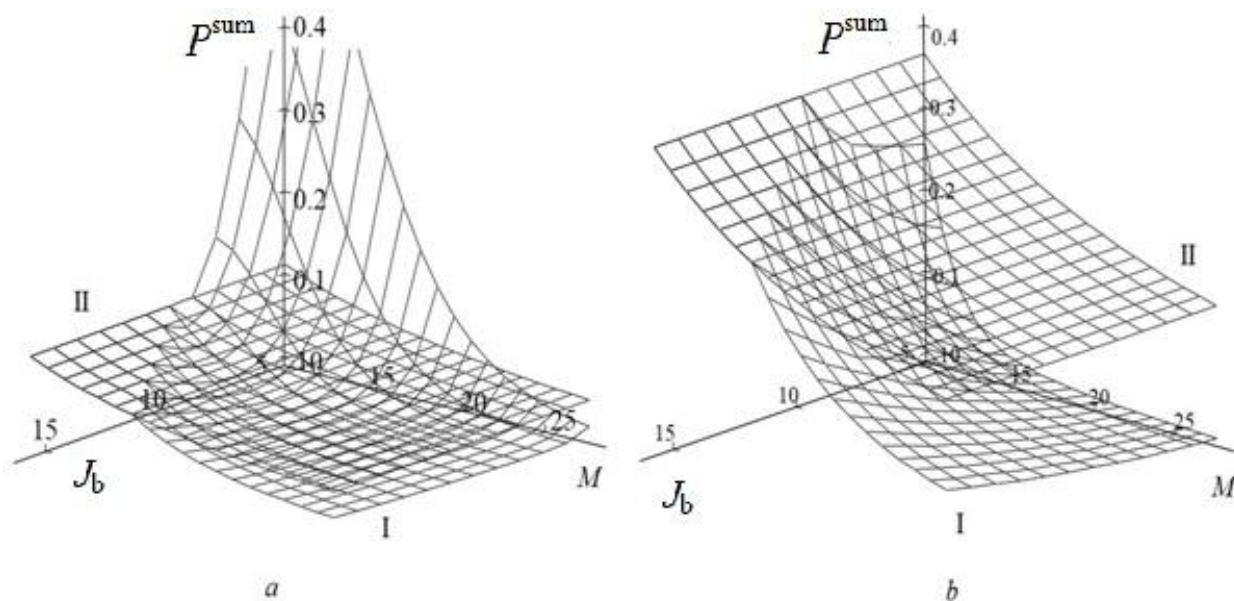


Рисунок 3.7 – Графики зависимости в вероятность P^{sum} возникновения ошибки определения источника для группы сообщений при $U = 150$:

I – с использованием метода ограничения числа анализируемых сообщений,
 II – без использования метода ограничения числа анализируемых сообщений

a) $H = 7$; b) $H = 6$.

Аналогичные математические эксперименты проводились для других значений числа обрабатываемых сообщений U (параметр изменялся в диапазоне от 50 до 500) и длины поля H , содержащего код, полученный из данных предыдущего сообщения (КПДПБ) [136]. Максимальное снижение вероятности ошибки P^{sum} наблюдалось в области значений $P^{\text{err}} = 0.2 \dots 0.6$ (рисунок 3.7, b), которое само по себе достигается диапазоне:

$$H \approx \log_2 \frac{U}{M} + 2, \quad (3.14)$$

теоретически определённом в [66] как область максимального значения частной производной функции P^{err} по параметру H .

При указанных соотношениях числа обрабатываемых сообщений, длины последовательности и размеру дополнительного поля наблюдалось кратное падение вероятности ошибки до уровня $0.1 \dots 0.15$, то есть до диапазона, приемлемого для условий передачи в целевых системах по протоколам с низкой пропускной способностью [137].

Таким образом, использование свойств протоколов передачи данных, основанных на модели Аллоха, а также стабильности значений времени поступления отдельных сообщений виз сенсора с центральный модуль РИУС является предпосылкой к разработке достоверных протоколов идентификации удалённых источников сообщений ограниченной длины, обладающих высокой достоверностью и низкой вычислительной сложностью.

3.1.5 Определение диапазона применимости методов и выбор целесообразных параметров обработки данных

В материалах предыдущего подраздела приведены результаты, показывающие снижение вероятности ошибочного определения источника сообщений за счёт ограничения множества обрабатываемых сообщений. Из графиков на рисунке 3.7 видно, что результирующая функция вероятности ошибки P^{sum} имеет единичный минимум, который в координатах M и J_b представляет собой линию, лежащую между двумя линиями, являющимися проекциями линии пересечения поверхности P^{sum} и поверхности P^{err} на данную плоскость. При этом указанные проекции, а также проекция линии минимального значения вероятности ошибки выходят из одной точки. На рисунке 3.8 приведён диапазон значений длины последовательности сообщений M и параметра J_b , при котором $P^{\text{sum}} < P^{\text{err}}$. Проекция линий пересечения поверхностей на плоскость M и J_b можно принять за прямые. При этом одна из границ, а именно прямая, соответствующая увеличению J_b с увеличением M есть прямая $J_b=M$ – граница области допустимых значений J_b . Как показали результаты математического моделирования при различных значениях параметров U и H , угол наклона второй прямой зависит от длины поля КПДПБ H при фиксированном значении числа поступающих в вычислитель сообщений U . При значениях H ниже порога (3.14) её можно считать практически нулевой.

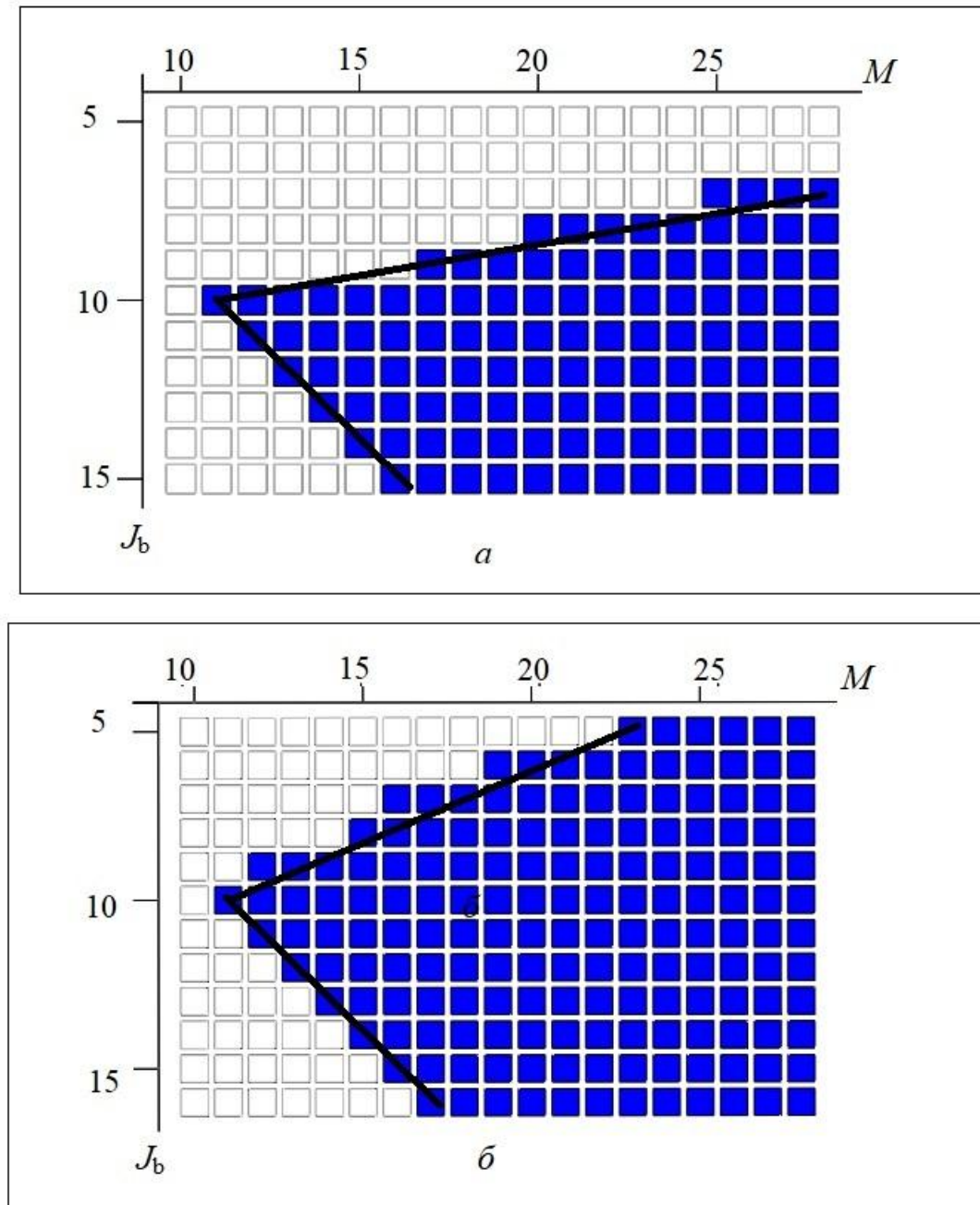


Рисунок 3.8 – Области значений длины последовательности сообщений M и параметра J_b при отношении $U/M=40$, при которых целесообразно использование метода ограничения числа обрабатываемых сообщений
 а) $H = 7$; б) $H = 6$.

Серии проведённых математических экспериментов позволили сформулировать эмпирическое уравнение данной прямой:

$$J_b = 2^{-\left(2 + \log_2 \frac{U}{M} - H\right)} (A - M) + B, \quad (3.15)$$

где и B – константы, $A=9\dots 10$, $B=8\dots 11$.

Зависимость между длиной последовательности сообщений M и параметром J_b , обеспечивающая минимальное значение P^{sum} (область равенства нулю градиента данной функции от M и параметром J_b), как показали исследования, хорошо аппроксимируется биссектрисой угла, показанного на рисунке 3.7. С учётом относительно узкого диапазона изменения параметра M , для определения целесообразного значений параметра обработки сообщений J_b , для аппроксимации мы использовали среднее значение J_b от значений этого параметра в точках пересечения прямых и прямой M . Эмпирическая формула для расчета целесообразного значения J_b выглядит следующим образом:

$$J_b \approx \left[2^{-\left(3 + \log_2 \frac{U}{M} - H\right)} (10 - M) + \frac{M}{2} + 4 \right], \quad (3.16)$$

где $\lceil A \rceil$ - минимальное целое число, меньшее A .

Значения вероятности P^{sum} , полученные для данного значения, а также минимальные значения данной вероятности, приведены в таблице А.1. Приложения А. Из данных таблицы видно, что относительное отклонение достигнутого минимума вероятности P^{sum} , полученного на основании формулы (3.16), находится в диапазоне 5 – 15% от минимального значения P^{sum} , полученного для данной комбинации параметров моделирования. При этом максимальное отклонение наблюдается в области минимальных значений вероятности $P^{\text{sum}} < 0.1$, что в абсолютных значениях имеет порядок 10^{-3} . Таким образом, использование полученной в настоящем исследовании эмпирической формулы (3.16) для определения целесообразного диапазона обработки поступающих в ЦМОИ сообщений сенсора БСС в последовательности позволяет кратно снизить вероятность ошибочного определения источника информации.

3.2 Исследование функционирования модуля сбора и обработки данных распределённой системы при определении источника сообщений

3.2.1 Оценка ресурсных затрат модуля сбора и обработки данных

Исходя из основных положений, приведённых в разделе 2, в центральном модуле обработки информации от сенсоров ЮСС вся поступающая метаинформация представляется в виде древовидной структуры. Для её хранения целесообразно использовать регистровую память для высокой скорости обращения к данным [138]. Так как количество регистров в каждом вычислителе ограничено, то возникает задача оценки потребности в ёмкости внутренней памяти для реализации метода обработки сообщений от множества сенсоров (центральный модуль в параллельном режиме производит разделение множества сообщений на подмножества, сформированные отдельными сенсорами). И если число столбцов матрицы регистровой памяти определяется длиной обрабатываемых последовательностей M и исчисляемым на его основе параметром J_b , то число строк в такой матрице определяется числом сообщений из множества обрабатываемых, для которых проверки условий (2.3) и (2.6) прошли успешно. При этом максимальное число таких сообщений $|B^{(j)}|$ определяет не только число элементов матрицы, но и их разрядность, так как оно непосредственно влияет на разрядность слова g_k^{ij} — указателя с номером k у элемента, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти (см. п. 2.4).

Для оценки требуемого объёма регистровой памяти (максимально возможного значения $|B^{(j)}|$), который непосредственно влияет на возможность параллельной обработки сообщений множества сенсоров, так как недостаток регистровой памяти будет вызывать ошибки её нехватки [139, 140], будем использовать модель поступления данных в вычислитель, описанную в п. 3.1.3. Так как поступление случайно сформированных

сообщений в регистровую память в результате выполнения условий (2.3) и (2.6), есть случайное событие, то математический аппарат теории вероятностей и теории случайных процессов есть адекватный инструмент исследования ресурсоёмкости предлагаемого метода обработки сообщений ограниченной длины и оценки аппаратной сложности вычислителя, его реализующего [141].

В формуле (3.9) переменная k_r есть число размещённых в r столбце указателей на сообщение в буферной памяти с учётом того, что максимальное значение данной переменной равно J_b . Это позволяет определить k_r как дискретную случайную величину, и, с помощью рекурсивных вычислений по формулам (3.6) – (3.8) получить её распределение. Число строк в матричной памяти ограничивается некоторым пороговым значением t . В результате возможно возникновение ошибки нехватки указателей или строк в матричной памяти, когда число записываемых в один столбец слов превысит t [129]. Вероятность такой ошибки $P^{\text{ovl}}(t)$ определится по формуле:

$$P^{\text{ovl}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^M \left(1 - \sum_{v=t}^N p_{J_b}(k_{J_b}) \right), \quad (3.17)$$

где: $N = \left\lceil U \frac{J_b}{M} \right\rceil - M$ – теоретически возможное максимальное число

сообщений, которые подлежат записи в один столбец регистровой памяти

$\sum_{v=t}^N p_{J_b}(k_{J_b})$ – вероятность нехватки указателей для одного столбца

регистровой памяти.

На основании полученных соотношений можно вычислить число регистров в каждом столбце матрицы памяти (рис.2.2), необходимое для корректного функционирования вычислителя, и, соответственно, разрядность каждого элемента вектора указателей $G^{i,j}$ (см. п. 2.4.1). На рисунке 3.9

приведен график зависимости вероятности ошибки нехватки указателей в P^{ovl} от числа указателей t и длины цепочки сообщений M [142].

Анализ приведённых на графиках зависимостей, а также зависимостей, полученных для других значений U , M и H , показал, что на форму поверхности P^{ovl} наиболее сильно влияет соотношение между числом $[UJ_bM^{-2}]$ и разрядностью КПДПБ H : при соотношении (3.14) вероятность ошибки падает практически до нулевых значений уже при $t < 5$ (рис. 3, а). Если же соотношение (3.14) не выполняется (с учётом отношения J_b к M , определённого на основании формулы (3.16)), вероятность ошибки стремится к 1, снижаясь лишь незначительно в диапазоне изменения параметра t от 5 до 15 (рис. 3, б). При удовлетворении разрядности поля КПДПБ условию (3.14), зависимость ошибки от длины последовательности сообщений M растёт практически линейно, изменяясь в диапазоне от 0,05 до 0,01 при числе строк в регистровой матрице $t = 3 \dots 6$.

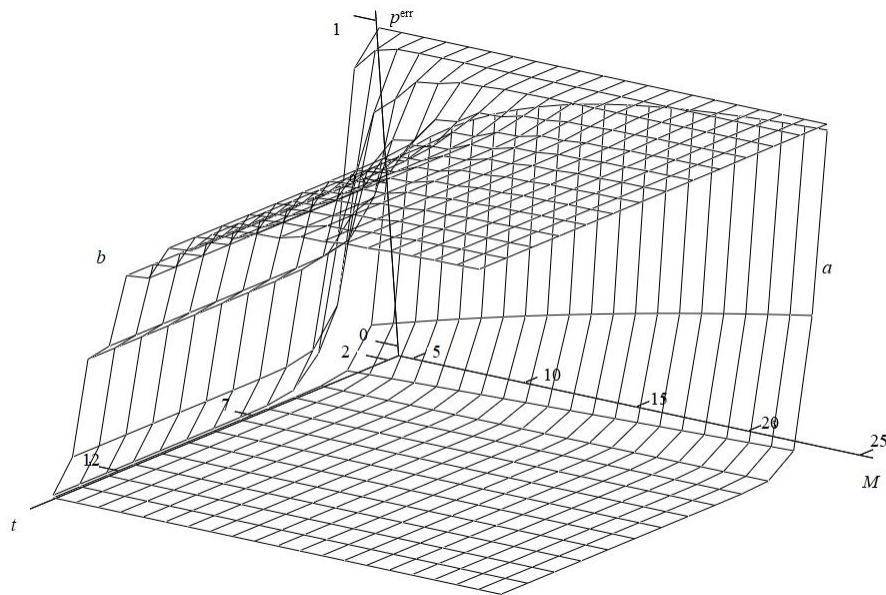


Рисунок 3.9 – График зависимости вероятности P^{ovl} ошибки нехватки регистров столбце матричной памяти от числа строк в регистровой памяти t и длины последовательно сообщений от одного сенсора M , отношении числа обрабатываемых сообщений к длине последовательности U/M и длине КПДПБ H .

а) $U/M = 30$, $H = 6$; б) $U/M = 30$, $H = 5$.

С практической точки зрения при синтезе вычислителя необходимо определить минимальное значения t^{\min} числа строк в матрице регистров, при котором вероятность P^{ovl} не будет превышать некоторого порогового значения P^{or} , в качестве которого можем использовать значение вероятности ошибки определения источника последовательности сообщений (рис. 3.10):

$$\exists! t^{\min}: \left(P^{\text{ovl}}(t^{\min}) < P^{\text{or}} \right) \vee \left(P^{\text{ovl}}(t^{\min} - 1) \geq P^{\text{or}} \right). \quad (3.18)$$

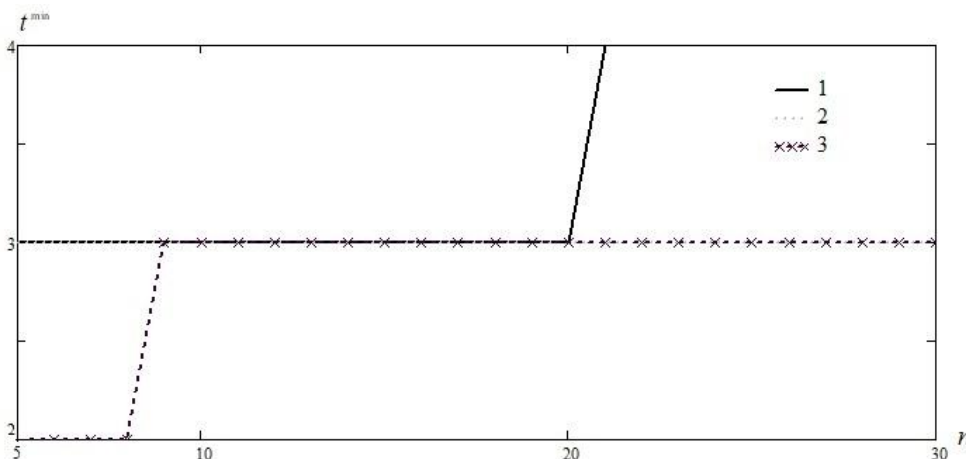


Рисунок 3.10 – График зависимости минимального числа строк в матрице регистров t^{\min} от длины последовательности сообщений M и максимальной ошибки P^{or} , отношении числа обрабатываемых сообщений к длине последовательности $U/M = 30$ и длине КПДПБ $H = 6$.

1) $P^{\text{or}} = 0,05$; 2) $P^{\text{or}} = 0,1$; 3) $P^{\text{or}} = 0,25$.

Серии математических экспериментов при различных значениях параметров U , M и H , с учётом формулы (3.16), вычисленных значениях вероятности ошибки P^{sum} , являющихся ограничением для P^{or} , позволили сформулировать следующее эмпирическое правила для расчета числа строк в матрице регистровой памяти :

$$t^{\min} = \left\lceil \frac{M}{10} \right\rceil + 2. \quad (3.19)$$

В исследуемых диапазонах $U=50\dots350$, $M=5\dots35$, с учётом соотношения для H (3.14) и J_b (3.16) вероятность ошибки P^{or} при

вычисленном по формуле (3.19) числе строк, не превышает значения вероятности P^{sum} , вычисленного для тех же значений.

Другим наблюдением, установленным в ходе математического моделирования, явилось то, что увеличение разрядности H проверочного поля проверяемых слов на 1 бит в среднем снижает требуемое число указателей в каждом элементе вектора $G^{i,j}$ (см. п. 2.4.1) на 1. Данная зависимость может быть использована для адаптивного управления работой ЦМОИ при распределении потока входящих сообщений от множества сенсоров.

Сделанные выше расчёты позволяют оценить общую потребность в регистровой памяти для хранения одной структуры, формируемой в ЦМОИ при выделении сообщений от одного сенсора. Структура состоит максимум из $J_b \times t^{\text{min}}$ описателей, каждый из которых состоит из следующих частей:

- адреса сообщения в памяти модуля, длиной $\lceil \log_2(U) \rceil + 1$ битов,
- дву слов по $H = \lceil \log_2(U/M) \rceil + 2$ для организации сравнения кодов данных, полученных из предыдущего блока,
- $(\lceil M/10 \rceil + 2) \times 2 \times \lceil \log_2(M/10 \rceil + 2)$ битов для хранения указателей на последующие элементы динамической структуры.

При этом последнее слагаемое, исходя из формулы (3.19) и используемых для организации работы РИУС параметров M можно принять равным ограничено 24 – 32 битам. Таким образом, общая потребность в регистровой памяти для хранения данных при обработке сообщений от одного сенсора лежит диапазоне 200 – 300 байтов или порядка 2 Кб, что, с учётом объёмов памяти современных микросхем программируемой логики позволяет реализовывать обработку сообщений от 30 до 150 сенсоров в одной микросхеме [143, 144].

Если сравнивать затраты в регистровой памяти в предлагаемой модели с аналогичными затратами в исключительно матричной системе хранения [71], в которой последовательности блоков представляют собой совокупность векторов, каждый элемент которых есть указатель на элемент в

каждом столбце регистровой памяти. В таких системах первые два слагаемых в элементе древоидной структуры остаются такими же, третье отсутствует, а вместо этого появляется компонента, равная произведению $2 \times \log_2(\lfloor M/10 \rfloor + 2) \cdot M \cdot N^{\text{chain}}$, где N^{chain} – константа, имеющая порядок 10^2 .

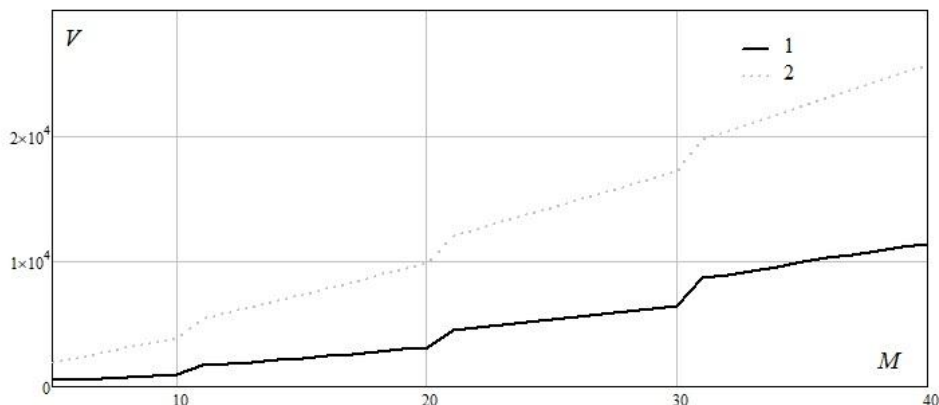


Рисунок 3.11 – Зависимость требуемой ёмкости V регистровой памяти (в битах) от длины цепочки блоков данных M при числе сенсоров, формирующих сообщения для ЦМОИ $K=60$.

- 1) предлагаемая модель регистровой памяти; 2) матричная организация регистровой памяти с дополнительными векторами ветвей древоидной структуры.

Графики зависимости потребности в регистровой памяти от длины цепочки блоков показывают (рис. 3.11), что в предлагаемой модели, за счёт использования исключения из обработки части сообщений, она на 50 – 60% меньше, чем в системах, где подобное ограничение не используется. Это повышает более чем в 2 раза число сенсоров распределённой системы, сообщения от которых могут быть обработаны ЦМОИ при его реализации на базе современных микросхем программируемой логики

3.2.2 Оценка числа элементарных операций, выполняемых модулем сбора и обработки данных при определении источника сообщений

Для оценки вычислительной сложности метода определения последовательности сообщений от сенсора сети при использовании кодирования в режиме сцепления блоков и исключения из обработки части

сообщений, процедура сравнения КПДПБ была представлена как линейный динамический процесс с дискретным временем [145]. За основу была взята рассмотренная в [52] модель случайного процесса построения динамических структур, адаптированная под используемый в настоящей работе подход к исключению из обработки части поступающих сообщений.

Состояние динамической системы изменяется в момент поступления нового сообщения в вычислитель, добавления сообщения в множество U :

$G_{i+1} = g(G_i)$ [146]. В каждый момент времени $i = \overline{0..U}$ процесс характеризуется определенным состоянием, описываемым набором следующих параметров:

– математическое ожидание числа сообщений с индексом J , выданных не целевым источником, а иными источниками, функционирующими в системе, в соответствующем столбце регистровой матрицы в i -й момент времени $M^i[J] = 0, J = \overline{J_{\max}..M}$;

– $\gamma^i[J], J = \overline{0..M}$ – вероятность добавления в множество U J -го сообщения из обрабатываемой последовательности M сообщений целевого источника;

– $\varphi^i[J], J = \overline{0..M}$ – вероятность добавления в множество U сообщения с индексом J или вероятность выполнения условия (2.6) для индекса поступающего в вычислитель сообщения.

При каждом факте передачи в РИУС сообщения от сенсора в центальный модуль, последний будет сравнивать код КПДПБ с записанными в регистровой матрице кодами предыдущих сообщений, в рамках выполнения пунктов 5 и 12 алгоритма формирования динамических структур, описанного в подразделе 2.4.1. Математическое ожидание числа N^i операций сравнения слов регистровой памяти определится выражением, выполняемое в дискретный момент времени i :

$$N^i = M^{-1} \sum_{j=1}^M (M^i[j] + \gamma^i[j]) \cdot (1 - \varphi^i[\min(j - J_b, 1)]) \quad (3.20)$$

В данной формуле мы принимаем во внимание, что индекс поступающего в вычислитель сообщения с вероятностью M^{-1} примет значение j , такое, что КПДПБ данного сообщения будет сравниваться с хранящимися в регистровой памяти словами $B_{i,j}^{\text{next}}$ и $B_{i,j}^{\text{aut}}$ предыдущих обработанных сообщений целевого источника (вероятность $\gamma^i[j]$) и с содержимым $B_{i,j}^{\text{next}}$ и $B_{i,j}^{\text{aut}}$ записей, хранящих описатели $M^i[j]$ посторонних сообщений. Процедура сравнения выполняется с вероятностью $1 - \varphi^i[\min(j - J_b, 1)]$, определяемой как вероятность выполнения условия (2.6) [147].

Далее, нам необходимо определить соотношения между каждым из параметров, описывающих состояния i и $i+1$, для получения рекуррентной зависимости, позволяющей вычислить итоговое число элементарных операций сравнения. Вероятность отсутствия сообщения от целевого источника в столбце регистровой матрицы j в момент $i+1$ есть вероятность наступления события противоположного совместному наступлению двух событий [148]:

- отсутствие сообщения целевого источника в столбце регистровой матрицы j в момент i ;
- одновременное отсутствие сообщения в столбце регистровой матрицы $j-1$ и не поступлению очередного сообщения.

В таком случае зависимость между вероятностями добавления в множество U J -го сообщения будет иметь вид:

$$\gamma^{i+1}(j) = 1 - (1 - \gamma^i(j))(1 - \gamma^i(j-1)) \left(\frac{U(J_b + J_f)}{M^2} \right)^{-1}, j = \overline{1 \dots M} \quad (3.21)$$

Аналогично получаем выражение для двух оставшихся параметров-характеристик:

$$M^{i+1}(j) = M^i(j) + (\gamma^i(j-1) + M^i(j-1)) \cdot \frac{\left(\frac{U(J_b + J_f)}{M^2}\right)^{-1} - 1}{2^H \left(\frac{U(J_b + J_f)}{M^2}\right)^{-1}} \quad (3.22)$$

и

$$\begin{aligned} \varphi^{i+1}(j) = & 1 - (1 - \varphi^i(j))(1 - \gamma^i(j-1)) \left(\frac{U(J_b + J_f)}{M^2}\right)^{-1} \times \\ & \times (1 - (\gamma^i(j-1) + M^i(j-1))) \frac{\left(\frac{U(J_b + J_f)}{M^2}\right)^{-1} - 1}{2^H \left(\frac{U(J_b + J_f)}{M^2}\right)^{-1}}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

Математическое ожидание общего числа сравнений КПДПБ для всех U сообщений, поступивших в центральный модуль, с учётом формул (3.21) – (3.23) имеет вид:

$$N^i = \sum_{i=1}^{b-n} \sum_{j=0}^{[n+1]} (M^i[j] + \gamma^i[j]) \cdot (1 - \varphi^i[\min(j - J_b, 1)]) \quad (3.24)$$

На основе полученных в предыдущем подразделе зависимостей был произведён численный расчет среднего числа сравнений от условий передачи. Результаты приведены на графиках на рисунках 3.12 и 3.13. Из рисунка 3.12 видно, что уже незначительное ограничение множества сообщений, обрабатываемых вычислителем с целью определения источника, при сохранении порядка их следования, даёт кратное уменьшение (до 4 – 5 раз) снижение числа операций сравнения кодовых последовательностей при формировании динамических структур в регистровой памяти [149]. При этом важным фактором является соблюдение выведенного выше соотношения (3.16) между размером кодовых полей, параметром обработки сообщений J_b , и общим числом обрабатываемых сообщений U . Как только длина кодового поля сообщения не удовлетворяет требованиям, мы видим резкий рост числа сравнений (левая часть графиков) вне зависимости от величины параметра J_b .

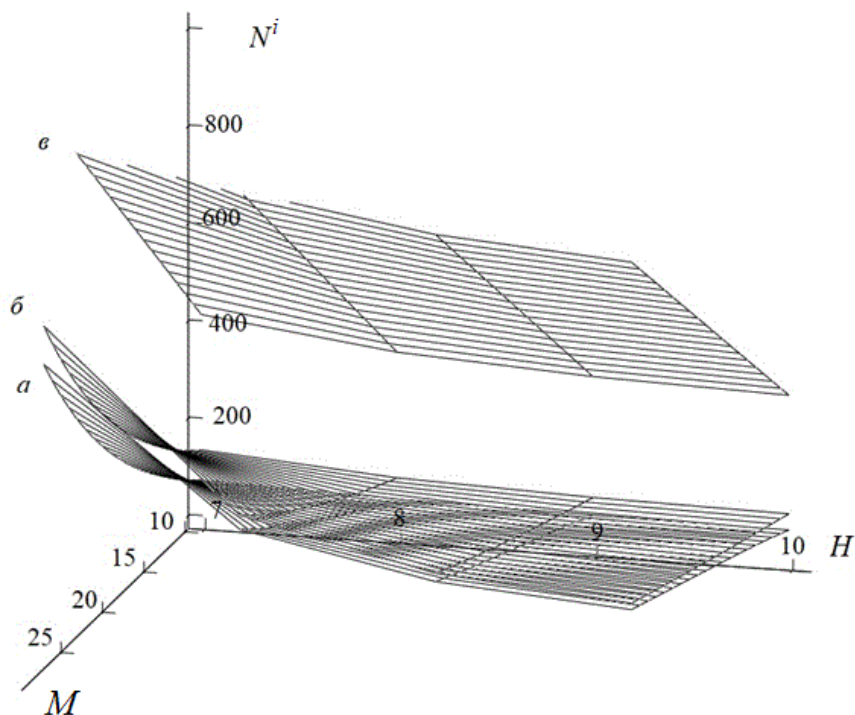


Рисунок 3.12 – Зависимость числа операций сравнения хешей от размера последовательности сообщений M и длины КПДПБ сообщения H и значениях параметра J_b метода обработки сообщений для определения их источника

а) $J_b = 7$; *б)* $J_b = 2$; *в)* $J_b = 0$ (нет ограничения множества обрабатываемых сообщений)

В связи с этим на рисунке 3.13 приведены результаты исследования зависимости между размером поля КПДПБ и числом сравнений, выполняемых вычислителем. Видно, что при выполнении условия (3.14) проекция трёхмерного графика на плоскость $U/M - N^i$ может быть аппроксимирована прямой, что позволяет сделать вывод о линейной зависимости между числом взаимодействующих в рамках распределённой системы вычислителей и числом сравнений. Аналогичная зависимость при выполнении условия (3.14) наблюдается и от параметра обработки J_b . С учётом того, что сама сложность пропорциональна длине последовательности сообщений и $M \cdot U/M = U$, указанное условие позволяет

определить вычислительную сложность алгоритма определения источника как $O(U \cdot J_b)$. Это характерно и для оригинального метода [71], не предусматривающем ограничения числа обрабатываемых сообщений. Но, при условии, что в оригинальном методе $J_b = M$, а также за счёт того, что за счёт ограничения числа обрабатываемых сообщений снижается число слов, подлежащих сравнению, в абсолютных значениях наблюдается снижение числа типовых операций сравнения КПДПБ в 4 – 5 раз.

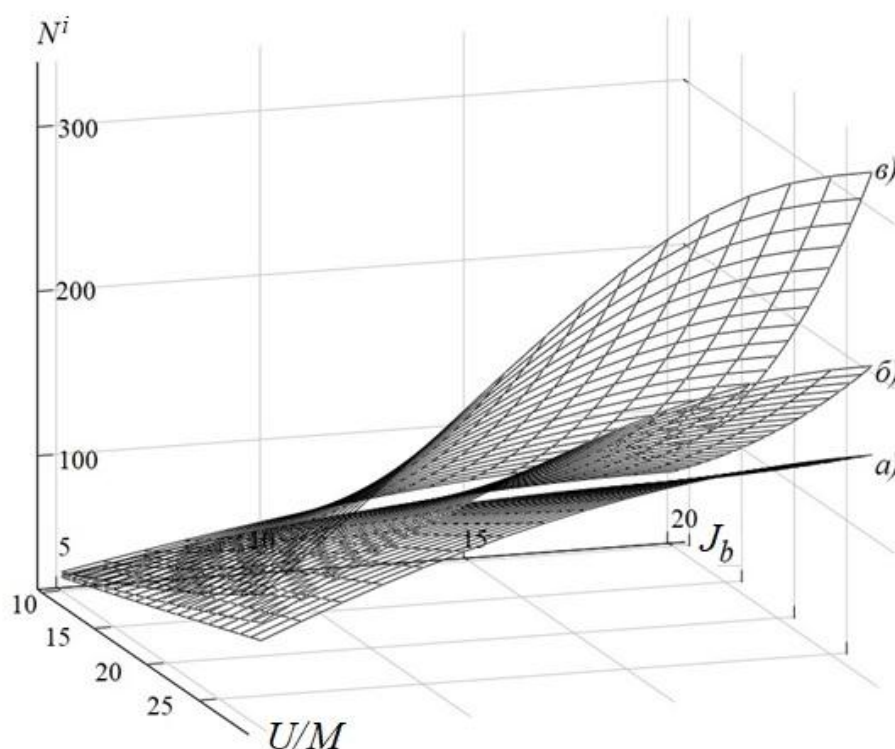


Рисунок 3.13 – Зависимость числа операций сравнения КПДПБ от параметра J_b от отношения числа обрабатываемых сообщений к длине последовательности U/M при длине группы сообщений $M=20$ и длине слова КПДПБ сообщения:

а) $H = 10$; б) $H = 8$; в) $H = 7$

На основе созданной математической модели выполнения процедур определения источника последовательностей кодированных сообщений, установлено что использование свойства сохранения очередности следования

сообщений от источника к приёмнику в качестве априорной информации (характерно для метода передачи данных в современных беспроводных сетях [150]), можно добиться кратного снижения вычислительной сложности алгоритмов определения источника. Это приводит к повышению общей скорости обработки сообщений при использовании ресурсоёмких и алгоритмически сложных методов на основе кодирования в режиме сцепления блоков [151].

Такой подход особенно полезен для методов связи, которые используют кодирование сообщений блоками, чтобы повысить достоверность. Основная область применения этого подхода - оборудование для приема и передачи данных в сетях связи и распределенных системах, где необходимо уменьшить размер сообщений до уровня, который не позволяет добавлять аутентифицирующие коды без значительного снижения пропускной способности канала.

Направлением дальнейших исследований видится вывод интегральной целевой характеристики работы вычислителей, выполняющих определение источника сообщений ограниченной длины, в которой бы учитывалась достоверность и трудоёмкость процедур идентификации. Это позволило бы в пространстве параметров работы вычислителей выделить области максимальных значений такой целевой функции, а также области максимальных значений её частных производных по параметрам. Это явилось бы теоретическим базисом для синтеза протоколов связи и аппаратного обеспечения, их поддерживающего, обладающих стабильными показателями передачи и обработки данных в условиях изменения характеристик каналов связи.

3.3 Оценка снижения объёма передаваемых сенсором беспроводной сети данных

3.3.1 Оценка увеличения доли полезной информации в сообщении сенсора беспроводной сенсорной сети

Целевым классом систем, для которых создавались вышеописанные вышеописанные технические решения формирования и проверки метаданных сообщений, являются распределённые информационно-управляющие системы, элементы которых, взаимодействуют по протоколам с большим радиусом действия и низким энергопотреблением. Типовая структура сетевого пакета, передаваемого и обрабатываемого в таких системах получаемого подобными устройствами с указаниями размеров полей представлена в таблице 3.1 [4]

Таблица 3.1 – Структура типового пакета данных транспортного уровня восходящего потока данных

Наименование поля	Размер в байтах
Node ID (Идентификатор, присвоенный устройству)	4
CRC-16 Node ID	2
Заголовок данных	1
Полезные данные	8
CRC-16 данных	2

Таким образом, для протоколов БСС доля полезной информации составляет около 50%. Применение алгоритмов и методов, основанных на неполном информационном описании идентификатора устройства, уменьшают размер поля «Node ID» с 32 битов до 8 – 12 (определённые выше). Таким образом, размер информационного блока снижается на величину от 9 до 18%, что в конечном итоге сказывается на длительности передачи такого блока в приёмник, которое составляет в исследуемом классе устройств значительную долю от длительности полного цикла обработки данных. Как было отмечено в разделе 1, мерой оценки снижения объёма передаваемой сенсором информации может служить величина,

рассчитываемая по формуле (1.2). Применительно к доле полезной информации, можно получить следующее выражение:

$$Q_0 = \frac{L_{\text{DATA}}}{L_{\text{DATA}} + L_{\text{SERV}}^0} (1 - P_0), \quad (3.25)$$

где: L_{DATA} – размер поля данных,

L_{SERV}^0 – размер стандартных служебных полей (всех полей, кроме поля данных),

P_0 – определённая стандартом вероятность ошибки передачи,
 $P_0=0.1$ [4, 5].

С использованием рассматриваемых метода и алгоритмов:

$$Q_1 = \frac{L_{\text{DATA}}}{L_{\text{DATA}} + L_{\text{SERV}}^1} \left(1 - \frac{L_{\text{DATA}} + L_{\text{SERV}}^1}{L_{\text{DATA}} + L_{\text{SERV}}^0} P_0 (1 - P_1) - P_1 \right), \quad (3.26)$$

где: L_{SERV}^1 – размер служебных полей и дополнительных блоков при использовании алгоритмов с неполным информационным описанием,

P_1 – вероятность ошибки определения источника сообщения БСС.

$P_0 + P_1 - P_0 P_1$ – вычисленная о правилу сложения вероятности независимых событий итоговая вероятность ошибки.

Тут мы учитываем, что из-за снижения размера блока данных пропорционально снижается вероятность канальной ошибки P_0 . С учётом того, что целевое значение вероятности определения источника сообщений находится в диапазон $0 \dots 0.1$, мы подбираем размеры полей атрибутов. Выигрыш ΔQ в доле полезной информации мы определим как разность между полученными значениями Q_1 и Q_0 . График зависимости выигрыша ΔQ от вероятности возникновения ошибки определения источника представлен на рисунке 3.14.

Видно, что абсолютный выигрыш в доле полезной информации, передаваемой, получаемой и обрабатываемой устройствами, находится в

диапазоне от 2.5% до 8% в зависимости от условий передачи, определяющих вероятность ошибки определения источника. В относительных значениях эта величина находится в диапазоне от 5% до 15%.

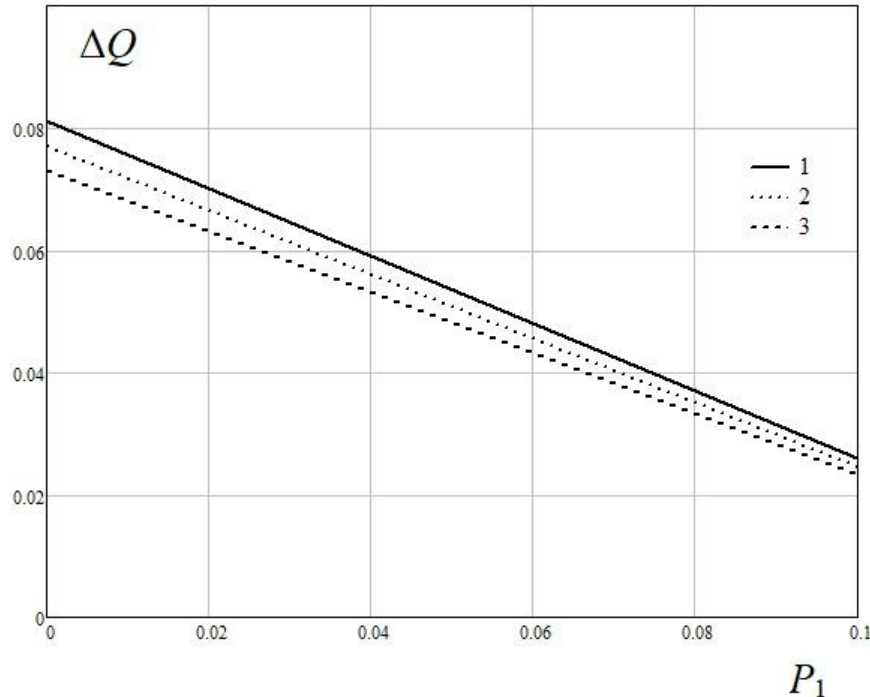


Рисунок 3.14 – Зависимость выигрыша в доле полезной информации от вероятности возникновения ошибки определения источника сообщения.

1) $P_0=0$, 2) $P_0=0.05$, 3) $P_0=0.1$.

Из проведённых в разделе 3 получены зависимости между размером полей атрибутов L_{SERV}^1 , вероятностью P_1 ошибки определения источника ИБ и числом взаимодействующих в составе РИУС сенсоров b , которое можно определить как соотношение $|U|/n$. С учётом полученных данных можно построить зависимость выигрыша в объёме обрабатываемых данных от числа взаимодействующих устройств (рис. 3.15), которые позволяют определять динамические характеристики РИСУС, такие, как срок эксплуатации и вероятность возникновения ошибки передачи информации в центральный модуль, на основе статических характеристик РИУС

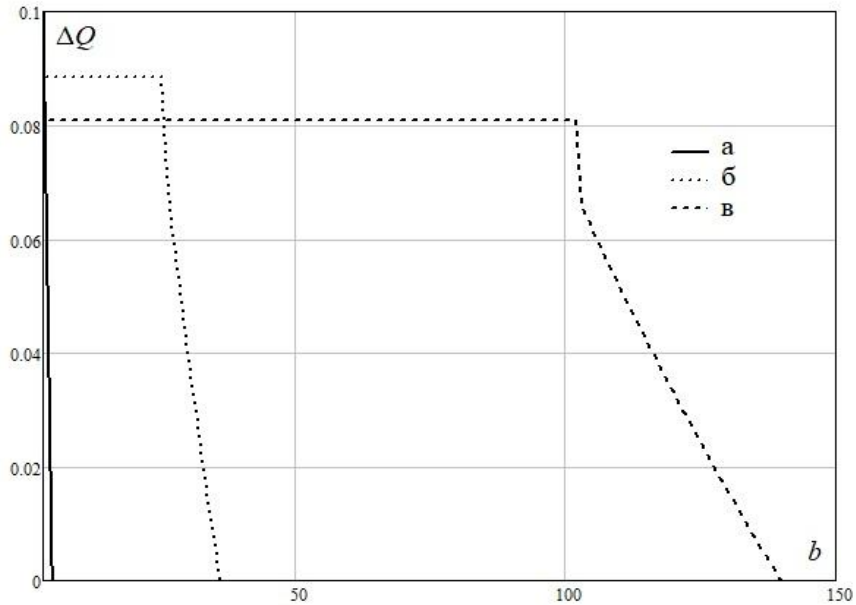


Рисунок 3.15 – Зависимость выигрыша в доле полезной информации от числа взаимодействующих устройств РИУС b и размера полей метаданных сообщения БСС L_{SERV}^1 в битах.

а) $L_{SERV}^1 = 7$, б) $L_{SERV}^1 = 10$, в) $L_{SERV}^1 = 12$.

3.3.2 Сравнение с известными решениями

При сравнении с известными решениями, имеющими своей целью минимизировать размер дополнительной служебной информации в сетевом пакете, необходимо учитывать тот факт, оценка эффективности предложенных решений в сравнении с аналогами должна проводиться в тех диапазоны значений длины последовательности сообщений M , числа поступивших сообщений от различных сенсоров U , длины поля КПДПБ, которые обеспечивают вероятность ошибки при обработки сообщения сенсора, не превышающую величину, определяемую стандартами БСС [4] и результатами обработки датасетов с реальных распределённых систем сбора мониторинговой информации [23, 28].

Значения показателя снижения объёма передаваемых сенсором БСС данных для разработанных метода и алгоритма, а также для известных

решений, использующих кодирование в режиме сцепления блоков [71] и кодирование одиночных пакетов данных [60], приведена на рис 3.16

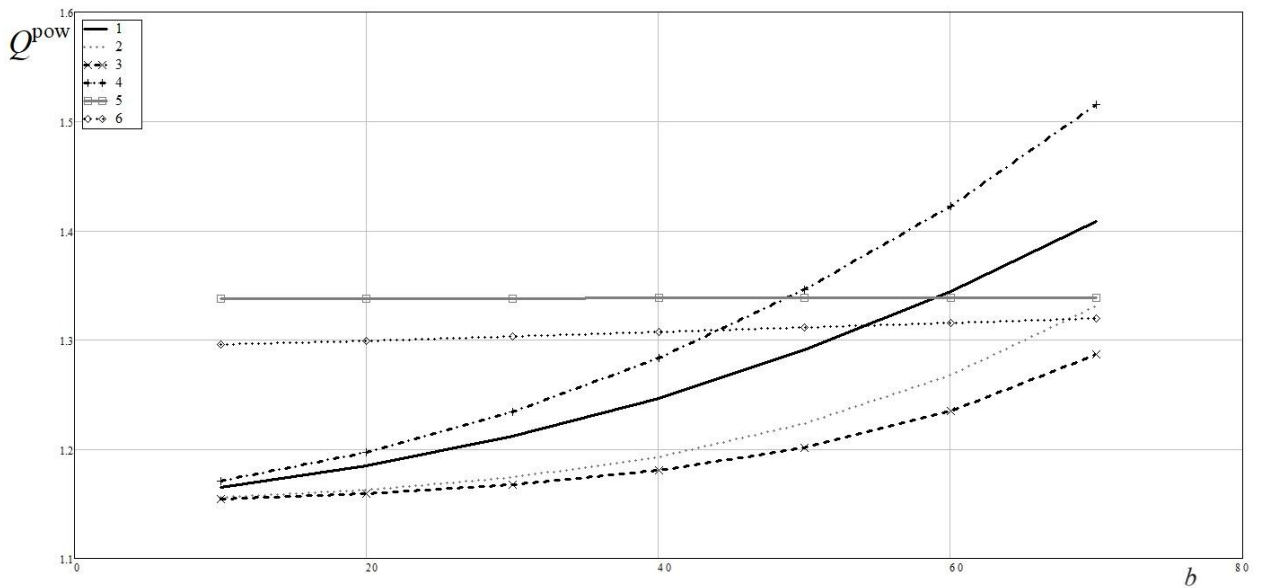


Рисунок 3.16 – Графики зависимости показателя снижения объёма передаваемых сенсором данных БСС от числа сенсоров РИУС b длины последовательности сообщений M и размеров N поля КПДПБ.

- 1) кодирование в режиме сцепления блоков, $M=15$, $N=7$;
- 2) предлагаемое решение, $M=15$, $N=7$;
- 3) предлагаемое решение, $M=20$, $N=7$;
- 4) кодирование в режиме сцепления блоков, $M=20$, $N=7$;
- 5) кодирование одиночного сообщения, $N=22$;
- 6) кодирование одиночного сообщения, $N=18$.

Из анализа графиков видно, что для методов, использующих групповое кодирование, целевой показатель Q^{pow} ухудшается (увеличивается) с увеличением числа b сенсоров, с которых происходит агрегирование информации центральным модулем обработки данных. Тогда как для методов, использующих кодирование одиночного блока, этот показатель медленно уменьшается увеличением числа сенсоров. Использование подхода, основанного на кодировании в режиме сцепления блоков, целесообразно при числе сенсоров $b < 100$, при этом предлагаемое решение, использующее исключение из обработки части сообщений, снижает значение

целевого параметра на 5 – 20% по сравнению с известными решениями, основанными на кодировании в режиме сцепления блоков, в зависимости от абсолютного значения показателя снижения объёма передаваемых сенсором БСС данных.

Более информативно для оценки результативности предлагаемого решения использование отношения Q^{pow} / Q^0 показателей снижения объёма передаваемых сенсором БСС данных известных и предлагаемого решений, представленного на рисунке 3.17

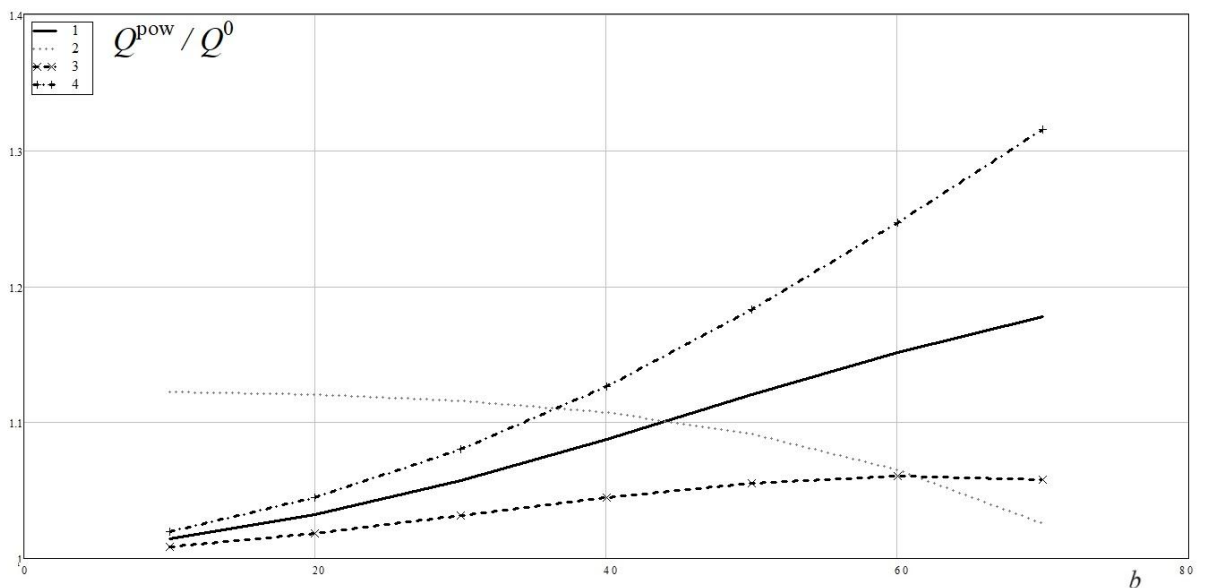


Рисунок 3.17 – Графики зависимости отношения показателей снижения объёма передаваемых сенсором БСС данных от числа сенсоров РИУС b .

- 1) отношение для кодирования в режиме сцепления блоков к предлагаемому решению, $M=20, H=7$;
- 2) отношение для кодирования одиночного блока к предлагаемому решению, $M=20, H=7$;
- 3) отношение для кодирования в режиме сцепления блоков к предлагаемому решению, $M=15, H=7$;
- 4) отношение для кодирования в режиме сцепления блоков к предлагаемому решению, $M=25, H=7$;

Анализ графиков показывает, что минимальное снижение целевого показателя находится в диапазон 5 – 12 %, при этом максимальной эффективности предлагаемый метод формирования и обработки сообщений сенсора БСС достигается при использовании его в системах управления с числом мониторинговых устройств от 40 до 60.

Сокращение объёмов передаваемых и обрабатываемых данных за счёт снижения размеров полей метаданных позволяет для распределённых информационно-управляющих систем, построенных по технологии беспроводных сенсорных сетей, снизить энергетические затраты на трансляцию этих данных в эфир, и, как следствие, повысить автономность отдельных сенсоров и всей системы в целом. Исходя из известных соотношений по энергозатратам в различных режимах работы сенсора [30], можно утверждать, что использование разработанного метода позволяет снизить энергопотребление дополнительно на 4 – 10% к существующим решениям по повышению энергоэффективности БСС, так как его использование не исключает использование известных подходов, основанных на кластеризации сенсоров, управлению маршрутизацией сообщения и контролю мощности сигнала сенсора.

3.4 Выводы по разделу

1. Создана математическая модель оценки вероятности ошибки определения сенсора, сформировавшего сообщение, в основу которой положена теория марковских процессов с дискретным временем. С её помощью получены оценки вероятности возникновения ошибок формирования последовательности сообщений, сформированных целевым сенсором беспроводной сенсорной сети.

2. На основании результатов, полученных с помощью разработанной математической модели определено, что максимальное снижение вероятности ошибки определения сенсора, сформировавшего сообщения (с диапазона 0.2... 0.6 в диапазон 0.1...0.15) происходит в области

максимального значения частной производной функции вероятности ошибки по длине дополнительного поля метаданных каждого сообщения БСС, используемого для определения его источника

3. Минимизация функции ошибки формирования последовательностей сообщений позволила получить функциональную зависимость между параметром обработки сообщений центральным моделью распределённой информационно-управляющей системы и набором следующих параметров формирования сенсором сообщений: длиной последовательности сообщений M , параметром, на основании которого происходит исключение сообщений из обработки, числом сообщений от множества сенсоров и размером дополнительного служебного поля, используемого для определения его источника.

4. На основе теории вероятностей создана модель заполнения регистровой матрицы адресов данными, описывающими размещение сообщений в основной буферной памяти, а также их размещение в списочной структуре, хранящей промежуточные результаты формирования последовательностей сообщений, сформированных целевым источником. С помощью данной модели получены оценки вероятности ошибки нехватки регистров в указанной матрице для хранения промежуточных результатов. Сопоставление данной вероятности с вероятностью ошибочного определения источника последовательности сообщений позволило установить зависимость между требуемым размером матрицы регистров и длиной формируемой последовательности сообщений

5. На основании известной модели линейного динамического процесса, описывающего процедуру обработки последовательности сообщений и сравнения содержимого их дополнительных служебных полей друг с другом при определении сенсора, сформировавшего сообщения, создана модель оценки ресурсных и вычислительных затрат на реализацию процедур обработки сообщений сенсоров центральным модулем системы. В результате математического моделирования была определена потребность в

регистровой памяти вычислителя, показавшая что исключение из обработки части сообщений сенсоров центральным модулем обеспечивает возможность реализации модуля обработки сообщений на ПЛИС без использования дополнительных блоков ОЗУ, реализовывать обработку не одной микросхеме сообщений от более чем ста сенсоров.

6. На основании форматов данных, которыми обмениваются элементы и устройства целевого класса распределённых информационно-управляющих систем, показано, что итоговое снижение избыточности данных, обрабатываемых такими устройствами находится в диапазоне от 2.5% до 9 % по сравнению с использованием методов с полным описанием структуры и источника фрагментированного сообщения.

7. Оценка результатов использования метода и алгоритма определения источника сообщений в беспроводных сенсорных сетях показала, что исключение из обработки части сообщений в центральном модуле сбора и обработки информации такой сети позволяет снизить объём передаваемых сенсором служебных и метаданных диапазон 5 – 12 %, что обеспечивает дополнительно к известным решениям по повышению энергоэффективности сенсорной сети снижение энергопотребления сенсора за счёт сокращения времени передачи данных в эфир на 4 – 10%.

Заключение

Диссертация посвящена решению актуальной научно–технической задачи разработки методов и алгоритмов формирования и обработки служебной информации в беспроводных сенсорных сетях, которые, с одной стороны сократят объём передаваемых служебных данных, тем самым повысив энергоэффективность узлов беспроводной сенсорной сети и их автономность и срок службы, а с другой – обеспечат требуемую достоверность опознавания источника сообщения со стороны главного модуля сбора информации и управления. Получены следующие результаты:

1. Анализ методов повышения энергоэффективности сенсоров беспроводных сенсорных сетей. Установлено, что на эксплуатационные характеристики подобных систем управления оказывает влияние время автономной работы узла-сенсора. Предложен подход к повышению автономности узла-сенсора за счёт сокращением объёма информации в заголовочной части сообщений сенсоров и снижения длительности фазы передачи данных по беспроводному каналу связи. Выведена целевая характеристика методов снижения размера объёма информации в заголовочной части: отношение общего размера сообщения к произведению размера поля полезной информации на вероятность безошибочного определения источника сообщения.

2. Разработан метод определения источника сообщений, поступающих в центральный модуль сбора информации и выработки управляющих воздействий распределённой информационно-управляющей системы, использующий исключение из обработки части сообщений, основанный на анализе введённой в состав каждого сообщения последовательности, кодирующей порядковый номер сообщения в группе. Используемый в нём подход попадания указанного порядкового номера в динамически формируемый диапазон значений позволяет при сохранении требуемой достоверности определения сенсора, сформировавшего сообщения,

уменьшить размер дополнительных служебных полей сообщения, снижая тем самым энергозатраты сенсора на передачу данных по беспроводному каналу связи в центральный модуль, увеличивая срок его автономной работы.

3. Разработан алгоритм обработки служебной информации в сообщении от элемента распределённой системы, позволяющие организовать определение источника поступающих в центральный модуль обработки информации и выработки управляющих воздействий сообщений беспроводной сенсорной сети, ориентированный на возможность параллельной обработки сообщений от разнородных узлов распределённой информационно-управляющей системы, обеспечивающей хранение результатов промежуточных вычислений при обработке данных от множества источников в едином адресном пространстве без необходимости реализовывать множественные операции декодирования каждого поступающего сообщения.

4. Создана математическая модель обработки множества сообщений элементом распределённой информационно-управляющей системы, с помощью которой установлено, что максимальное снижение вероятности определения источника сообщения, непосредственно влияющая на объём передаваемых сенсором данных и его энергопотребление, уменьшается с 0.2...0.6 до 0.1...0.15. Получены функциональные зависимости между параметрами формирования сообщений, посылаемых сенсором в центральный модуль обработки информации и выработки управляющих воздействий: длиной последовательности сообщений, параметром, на основании которого происходит исключение сообщений из обработки, числом сообщений от множества сенсоров и размером дополнительного служебного поля, используемого для определения его источника.

5. На основе теории вероятностей произведена оценка ресурсных затрат на организацию взаимодействия центрального модуля сбора информации и выработки управляющих воздействий на обработку сообщений сенсоров.

Показано, что для хранения результатов обработки сообщений от одного сенсора требуется 2 Кб регистровой памяти и 200 – 400 элементарных операций сравнения данных сообщения, что позволяет реализовывать модуль обработки сообщений от узлов-сенсоров на ПЛИС без использования дополнительных блоков ОЗУ, обрабатывая сообщения более ста сенсоров на одной микросхеме.

6. Предложен новый формат сообщений, которые получает центральный модуль сбора информации и выработки управляющих воздействий от узлов-сенсоров о состоянии объекта управления по беспроводному каналу, при котором объём дополнительных служебных данных уменьшается на величину от 2.5% до 9 % по сравнению с известными. Оценка результатов использования метода и алгоритма определения источника сообщений в беспроводных сенсорных сетях показала, что исключение из обработки части сообщений уменьшает объём передаваемых сенсором данных диапазон 5 – 12 %, что за счёт соответствующего сокращения времени передачи данных в эфир обеспечивает дополнительно к известным решениям по повышению энергоэффективности сенсорной сети снижение энергопотребления сенсора на 4 – 10%.

Список литературы

1. А. С. Степанова, Д. Ю. Муромцев. Анализ развития информационно-управляющих систем с использованием научно-технологического форсайта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. т. 11, №5(2). – С. 354-357..
2. Котов В. Н. Полезная модель 89257 G06F 15/00. Распределенная информационно-управляющая система на основе интеллектуальных датчиков [Текст] / В. Н. Котов, Э. В. Мельник, И. П. Щербинин, Я. С.Коровин; заявл. 2009.09.14, опубл. 2009.11.27
3. Акимов, А. А. Системы поддержки принятия решений на базе беспроводных сенсорных сетей с использованием интеллектуального анализа данных / А. А. Акимов, В. Е. Богатырев, А. Г. Финогеев // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2010. – Т. 1. – С. 225-229.
4. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802.15.4-2020, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691
5. Петров, Д. Стандарты беспроводной связи диапазона ISM // Электронные компоненты. - 2010. - № 10. - С. 28-32
6. Кранц М. Интернет вещей. Новая технологическая революция. – М.: Бомбора, 2018. – 336 с. ISBN– 978-5-04-090627-7 4.
7. Перри Л. Архитектура интернета вещей. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 454 с. ISBN– 978-5-97060-672-8.
8. Лихтциндер, Б. Я. Технологии передачи данных в беспроводных информационно-измерительных сетях / Б. Я. Лихтциндер, Ю. О. Бакай // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т. 29, № 1(69). – С. 92-103. – DOI 10.14498/tech.2021.1.7..
9. Юлдашев М.Н. Адаптивный энергосберегающий алгоритм классификации состояний в беспроводных сенсорных сетях: автор.

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

10. Аунг Мьо То, Аббас Саддам Ахмед, Жукова Н.А., Чернокульский В.В. Модели управления процессами сбора данных в сетях интернета вещей с динамической структурой // *Computational nanotechnology*. 2020. Т. 7. № 3. С. 62–71. DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-3-62-71

11. Лихтциндер Б. Я. Беспроводные сенсорные сети. Учебное пособие для вузов/ Лихтциндер Б. Я., Киричек Р. Ва., Федотов Е. Д., Голубничая Е. Ю., Кочуров А. А. – М.: Горячая линия–Телеком, 2020. – 236 с. ISBN–978-5-9912-0822-2.

12. Modinger D., Lorenz J.-H., Hauck F. J. Statistical privacy-preserving message broadcast for peer-to-peer networks // DOI: 10.1371/journal.pone.0251458. doi: 10.1371/journal.pone.0251458.

13. Нестеренко В. А., Таран А. А. Редукция размерности пространства состояний в задачах анализа сетевого трафика // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011. № 12(125). С. 96– 104.

14. Merschbrock, Christoph and Munkvold, Bjørn Erik A Research Review on Building Information Modeling in Construction—An Area Ripe for IS Research // *Communications of the Association for Information Systems*, 2012, Vol. 31 , Article 10. DOI: 10.17705/1CAIS.03110.

15. Penttilä, H. Describing the changes in architectural information technology to understand design complexity and free-form architectural expression. *Journal of Information Technology in Construction*, 11(29), pp. 395–408.

16. Фрейман, В.И. Изучение систем передачи с многократным повторением и обратной связью при помощи моделирования в среде MATLAB / В.И. Фрейман, В.А. Савиных // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2011. – № 5. – С. 271-275.

17. Перегудов, М.А. Вероятностная модель функционирования канального уровня сети цифровой радиосвязи в условиях деструктивных воздействий // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 64-89.

18. Плотников В.А., Катрашова Ю.В.. Перспективы развития и угрозы реализации концепции "Умный город" (на примере Санкт-Петербурга). // Экономический вектор, 2021 № 1, с. 131 – 138.

19. Патент № 2730468 С1 Российская Федерация, МПК H02J 7/00. Способ подзарядки аккумуляторов в беспроводной сенсорной сети : № 2020104003 : заявл. 30.01.2020 : опубл. 24.08.2020 / Б. Я. Лихтциндер, О. Н. Маслов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики".

20. Бабаев, Н. В. Описание методики оценки времени автономной работы оконечных устройств стандартов cellular IoT / Н. В. Бабаев, В. В. Мошков // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 3(13). – С. 26-35.

21. Semtech Corporation. LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview [Электронный ресурс] // URL: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf (дата обращения 03.10.2023).

22. LoRaWAN™, What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ [Электронный ресурс] // URL: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf> (дата обращения 06.10.2022).

23. Таныгин, М. О. Исследование характеристик сетей LoRaWAN / М. О. Таныгин, А. С. Гончаров // Телекоммуникации. – 2023. – № 3. – С. 32-39. – DOI 10.31044/1684-2588-2023-0-3-32-39/

24. Киреев, А. О., Светлов, А. В. Распределенная система энергетического мониторинга беспроводных сенсорных сетей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 5 (118). С. 60–65.

25. Галкин, П. В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей // ScienceRise. 2014. № 2 (2). С.55–61.

26. San Cheong Phui, Bergs Johan, Hawinkel Chris, Famaey Jeroen. Comparison of LoRaWAN classes and their power consumption // 2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT) / IEEE. 2017. Pp. 1–6.

27. Magrin Davide, Capuzzo Martina, Zanella Andrea. A Thorough Study of LoRaWAN Performance Under Different Parameter Settings // IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 1, pp. 116-127, Jan. 2020, doi: 10.1109/IJOT.2019.2946487.

28. Spadaccino P, Crinó FG, Cuomo F. LoRaWAN Behaviour Analysis through Dataset Traffic Investigation [Электронный ресурс]// Журнал “Sensors” – 2022 – №22: 2470 – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s22072470> (Дата обращения – 08.10.2023)

29. IEEE P802.11ahTM Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation, 2017.

30. Банков Д.В. Исследование механизмов случайного доступа к каналу в нелицензируемом диапазоне радиочастот в сетях Интернета вещей/ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 2020.

31. Зайцев В., Соколов Н. Особенности мультисервисного трафика с учетом сообщений, создаваемых устройствами IoT. // Первая миля, 2017 № 4, с. 44 – 47.

32. Xu, Y., Heidemann, J., Estrin, D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing // Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking. Rome, 2001. P. 70–84

33. Довгаль В.А., Довгаль Д.В. Модель взаимодействия анализирующих туманно-облачных вычислений для обработки информации о положении беспилотных летательных аппаратов // Осенние математические чтения в Адыгее: сб. материалов III Международной научной конференции. Майкоп: Изд-во: АГУ, 2019. С. 149–154

34. Татарникова, Т. М. Методы увеличения жизненного цикла сети Интернета вещей / Т. М. Татарникова, И. Н. Дзюбенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 5. – С. 843-849. – DOI 10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849.

35. Chen, Y., Nasser, N. Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks // Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks. New York: Qshine, 2006. Vol. 21. – P. 245–249. doi: 10.1145/1185373.1185401

36. Кучерявый, А. Е. Интернет вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24

37. Кучерявый, А. Е., Аль-Кадами, Н. А. Адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами // Электросвязь. 2015. № 3. С. 22–26

38. Молчанов, Д. А. Самоорганизующиеся сети и проблемы их построения // Электросвязь, 2006. № 6. С. 24–28

39. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik / F. Brezzi - Springer Science Business Media, 1959. - Vol. 1, Iss. 1. - P. 269-271. doi:10.1007/BF0138639

40. Татарникова, Т. М. Имитационная модель оценки срока службы интернета вещей в условиях атакующих воздействий, источающих энергию узлов / Т. М. Татарникова, П. Ю. Богданов // Программные продукты и системы. – 2021. – № 4. – С. 564-571. – DOI 10.15827/0236-235X.136.564-571.

41. Yuldashev M. N., Vlasov A. I., Novikov A. N. Energy-efficient algorithm for classification of states of wireless sensor network using machine

learning methods // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Volume 1015, Issue 3, article id. 032153. DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032153

42. Юлдашев М. Н., Власов А. И. Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера // Датчики и системы. 2018. № 1 (221). С. 24–30.

43. Терентьев М.Н. Модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени / Вестник Московского авиационного института.– Москва: МАИ, 2009 – Т. 16 – № 4 – с. 79–84.

44. Терентьев М.Н. Имитационная модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени / Вестник Московского авиационного института.– Москва: МАИ, 2010 – Т. 17 – № 3 – с. 178–183.с

45. Бакин, Е. А. Повышение эффективности сбора информации в беспроводных сенсорных сетях на основе оптимизации расписания : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.01 / Бакин Евгений Александрович. Санкт-Петербург, 2012. 105 с

46. Показатель расширения как важнейшая характеристика модуляции Loga / А. С. Гончаров, Т. В. Миронюк, Д. Л. Самсонов, М. О. Таныгин // Современные информационные технологии и информационная безопасность : сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 28 февраля 2023 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2023. – С. 18-20..

47. Иванова, И. А. Определение периметра зоны покрытия беспроводных сенсорных сетей // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 10. С. 25– 30

48. Jacobson V. Compressing TCP/IP Headers for Low-Speed Serial Links [электронный ресурс] / Network Working Group. Request for Comments, 1992. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc1144.txt> (дата обращения 25.04.2023)

49. G. McGregor The PPP Internet Protocol Control Protocol (IPCP) [электронный ресурс] // Network Working Group. Request for Comments, 1990: 1332. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc1332.txt> (дата обращения 25.06.2023)

50. Предварительный национальный стандарт РФ. ПНСТ 354-2019. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi) [Электронный ресурс] // URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200162760> (дата обращения 15.01.2023).

51. Таныгин М.О. Верификация данных, передаваемых между устройством и программным обеспечением [Текст] // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции (13–16 октября 2010 г.). – Томск: В-Спектр, 2011: В 2 ч. – Ч. 2. С. 49 – 52.

52. Таныгин, М. О. Методы, модели и вычислительные устройства обработки атрибутивных данных ограниченного размера : специальность 05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Таныгин Максим Олегович. – Курск, 2022. – 451.

53. Мальчуков А.Н., Осокин А.Н. Система автоматизированного проектирования кодеров помехоустойчивых кодов короткой длины // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 5. С. 70-75.

54. Мыцко Е.А Исследование алгоритмов вычисления контрольной суммы CRC8 в микропроцессорных системах при дефиците ресурсов / Е.А. Мыцко, А.Н. Мальчуков, С.Д. Иванов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 6. С. 22-29.

55. Burda K. Error Propagation in Various Cipher Block Modes // Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur. – 2006. – vol. 6 – November 2006 – P. 235–239.

56. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Authentication and Combined Confidentiality and // *Cryptologia* – 2010. – № 34 – P. 225 – 235 doi: 10.1080/01611191003598295.

57. Iwata T. OMAC: one-key CBC MAC / T. Iwata, K. Kurosawa // *Fast Software Encryption, 10th International Workshop.* – 2003. – P. 129 – 153 doi 10.1007/978-3-540-39887-5_11.

58. Dworkin M. SP 800-38D: Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC / Computer Security Division Information Technology Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8930, 2007.

59. Ifzarne S., Imad H., Idrissi N. Homomorphic Encryption for Compressed Sensing in Wireless Sensor Networks // *SCA '18, October 10–11, 2018, Tetouan, Morocco* DOI 10.1145/3286606.3286857

60. Бухарин В. В. Патент 2 710 284 RU H04L 9/32; G06F 21/00. Способ и устройство управления потоками данных распределенной информационной системы с использованием идентификаторов / Бухарин В. В., Казачкин А. В., Карайчев С. Ю., Шалагинов В. А., Пикалов Е. Д., Ступаков И. Г.; заявл. 17.06.2019, опубл. 25.12.2019.

61. Горохов А. Патент 2 419 219 RU H04L 1/00. Способы и системы для сокращения непроизводительных затрат для обработки для пакетов канала управления [Текст] / Горохов Алексей, Кхандекар Аамод, Борран Мохаммад Д., Пракаш Раджат; заявл. 27.07.2010, опубл. 20.05.2011

62. A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications / A. Rukhin [et al.]. – Gaithersburg, MD: U.S. Dept. of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2000. – 152 p. – (NIST special publication; 800-22)

63. Cazorla M., Marquet K., Minier M. Survey and benchmark of lightweight block ciphers for wireless sensor networks // *Proceedings of the 10th International Conference on Security and Cryptography, SECRIPT 2013, Reykjavík, Iceland, 29–31 July, 2013.* – Reykjavík, 2013. – P. 543–548.

64. Korol, O. G. Enhanced Mac algorithm based on the use of modular transformations // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2015. № 1–P. 60–67, DOI 10.15588/1607-3274-2015-1-8.

65. Ключев А. О. Распределенные информационно-управляющие системы. Учебное пособие. / А. О. Ключев, П. В. Кустарев, А. Е. Платунов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 58 с

66. Гурин О. Д. Патент 2695487 Российская Федерация G06F17/00. Способ и система обеспечения взаимодействия устройств интернета вещей [Текст] / Гурин Олег Дмитриевич; заявл 2018.09.26, опубл. 2019.07.23.

67. Ёкокава Т., Патент 2494538 Российская Федерация H03M 13/00. Приемное устройство, способ приема, программа и приемная система [Текст] / Ёкокава Такаси, Синья Осаму; заявл 2010.03.17, опубл. 2013.09.27.

68. Варгаузин, В.А., Цикин, И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи – СПб.: БХВ-Петербург, 2013 – 352 с. – ISBN 978-5-9775-0878-0.

69. Егоров С.И. Коррекция ошибок в информационных каналах периферийных устройств ЭВМ : монография – Курск : Курский государственный технический университет, 2008. - 251 с. : ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-7681-0449-8.

70. Таныгин М.О. Теоретические основы идентификации источников информации, передаваемой блоками ограниченного размера : монография / Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2020. - 198 с. Библиогр.: с. 178-198.

71. Алшаиа Хайдер, Я. А. Метод и алгоритм обработки данных на основе идентификаторов в специализированном вычислительном устройстве : специальность 05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алшаиа Хайдер Яхья Атоун. – Курск, 2021. – 138 с.

72. Black J. CBC MACs For Arbitrary-Length Messages: The Three-Key Constructions / J. Black, P. Rogaway // Advances in Cryptology CRYPTO '00

(2000), vol. 1800 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, pp. 197–215.

73. Яковлев, В. А. Аутентификация сеансового ключа на основе универсальных хэш-функций и случайных цепочек бит / В. А. Яковлев, С. А. Савинова // I-methods. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 1-12..

74. Diffie M., Hellman M. New directions in cryptography // IEEE Trans. Inf. Theory. 1976. Vol. 22. No. 6. Pp. 644-654.

75. Талаев, А. Д. Стандарты LPWAN для группового взаимодействия мобильных узлов / А. Д. Талаев, В. В. Бородин // Труды МАИ. – 2018. – № 99. – С. 19..

76. Баленко А. А. Патент 2 547 628 RU H04L 9/32; H04L 12/801. Способ и устройство управления потоками данных распределенной информационной системы [Текст] / Баленко А. А., Баленко О.А., Бухарин В. В., Кирьянов А. В., Нижегородов А. В., Стародубцев Ю. И.; заявл. 2012.11.12, опубл. 2014.03.10.

77. Шоломов Л.А. Элементы теории недоопределенной информации // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2009. № 2. С. 18-42.

78. Modinger D., Lorenz J.-H., Nauck F.J. (2021) Statistical privacy-preserving message broadcast for peer-to-peer networks. // PLoS ONE, 2021 16(5): e0251458. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.025145>

79. Таныгин М.О. Формальное описание модели взаимодействия устройств в условиях ограничения размера полей метаданных/ Таныгин М.О., Алшаиа Х.Я., Добрица В. П., // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. В. Г. Андронов. Курск, 2020. С. 7-10

80. Tanygin M.O. A method of the transmitted blocks information integrity control / Tanygin M.O., H.Y. Alshaeaa, E.A. Kuleshova // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2020. – № 1. pp. 181–189 e-ISSN 1607-3274.

81. Макаренко С. И. Экспериментальные исследования реакции сети связи и эффектов перемаршрутизации информационных потоков в условиях динамического изменения сигнально-помеховой обстановки / С. И. Макаренко, О. В. Афанасьев, И. А. Баранов, Д. В. Самофалов // Журнал радиоэлектроники 2016, N 4, с. 2.

82. Alshaeaa H.Y. Study of the influence of the unauthorized blocks number on the cost of the speed and memory RAM during the analysis data process / Alshaeaa H.Y., Tanygin M. O., Dobritsa V. P. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 928, 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/3/032020>

83. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си [Текст] / Б. Шнайер – М.: Издательство ТРИУМФ, 2002. – 816 с. ISBN–978-5-9908462-4-1.

84. Таныгин, М.О. Восстановление порядка следования информационных пакетов на основе анализа хеш-последовательностей [Текст] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24. – № 1. – С. 175–188.

85. Таныгин, М. О. Анализ системы контроля целостности цепочек информационных блоков на основе хэшей, / М. О. Таныгин, М.С. Брусов, Е.О. Ефремова, Ю.В. Сухорукова // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. / редкол.: В. Г. Андронов (отв. ред.) 2019 – Курск, 2019. – С.373 – 378.

86. Хисамутдинов, Р. А. Проблемы адекватности оценки производительности вычислительных систем и критерии разработки нового поколения тестовых систем // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2006. – Т. 7. – № 3. – С. 142-147.

87. M.A. Efremov The Model of Parallel Processing of Messages Buffered in the Shared Memory / M.A. Efremov, M.O. Tanygin, E.A. Tanygina // 2022

International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022, pp. 613-617, doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896326.

88. Губарев А.В. Патент 2591181 Российская Федерация H04L9/28, H04K1/00, G09C1/06. Способ определения подлинности передаваемых командных слов [Текст] / А.В. Губарев, М.О. Таныгин; заявл. 25.03.2016, опубл. 10.07.2016, Бюл. №19, 2016.

89. Губарев А.В. Моделирование работы системы контроля подлинности командных слов [Текст] / А. В. Губарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы – 2014. – № 4 – С. 169–175.

90. Алшаиа, Х.Я. Об одном методе контроля целостности передаваемой поблоково информации [Текст] / Таныгин М.О., Алшаиа Х.Я., Алтухова В.А. // Телекоммуникации. – 2019. – № 3. – С. 12-21.

91. Tanygin M.O. Analysis of the Secure Data Transmission System Parameters / Tanygin M.O. , H.Y. Alshaeaa ; M.A. Efremov // Advances in Automation Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, September 8–14, 2019, Sochi, Russia pp. 675 – 683 ISSN 1876-1100 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3>

92. Ахмад Али, А. А. Повышение энергоэффективности элементов беспроводных сенсорных сетей / А. А. Ахмад Али // Современные информационные технологии и информационная безопасность : сборник статей 3-й ВНТК – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 23-25.

93. Sørensen René Brandborg, Kim Dong Min, Nielsen Jimmy Jessen, Popovski Petar. Analysis of Latency and MAC-layer Performance for Class A LoRaWAN // IEEE Wireless.

94. A New Method for Energy Saving on Wireless Sensor Network Based on Clustering Method / Ahmad, A. A., Polat, H., Koçak, C., Tanygin M. O. & Ahmad, A. A. // Journal of Current Research on Engineering, Science and Technology, 2022, 8 (1), 81-94.

95. Adelantado Ferran, Vilajosana Xavier, Tuset Pere et al. Understanding the Limits of LoRaWAN // IEEE Communications Magazine. 2017.

96. Capuzzo Martina, Magrin Davide, Zanella Andrea. Mathematical Modeling of LoRaWAN Performance with Bi-directional Traffic // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) / IEEE. 2018. Pp. 206–212.

97. Mahmood Aamir, Sisinni Emiliano, Guntupalli Lakshminanth et al. Scalability Analysis of a LoRa Network under Imperfect Orthogonality // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. Vol. 15, no. 3. Pp. 1425–1436.

98. Tatyana Alekseevna Krasavina, Dmitry Viktorovich Bankov, Evgeniy Mikhailovich Khorov. Study of the study of distributed control of connecting devices in the absence of interference in the channel // Proceedings of the 39th interdisciplinary school-conference IPTP RAS "Information technologies and systems 2015". 2015, pp. 1074–1085.

99. Лоднева О.Н. Анализ трафика устройств интернета вещей. / Лоднева О.Н., Ромасевич Е.П. // Современные информационные технологии и ИТ-образование Том 14, № 1. 2018, с. 149 – 169.

100. Abramson Norman. THE ALOHA SYSTEM: Another Alternative for Computer Communications // Proceedings of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference. AFIPS '70 (Fall). New York, NY, USA: ACM, 1970. Pp. 281–285.

101. Патент № 2763290 С1 Российская Федерация, МПК H04L 1/00, H04L 12/70. Способ определения корректности передачи информационных пакетов : № 2021119469 : заявл. 02.07.2021 : опубл. 28.12.2021 / М. О. Таныгин, А. В. Митрофанов, А. Л. Марухленко, А. А. Ахмад ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

102. Таныгин, М.О. Установление доверительного канала обмена данными между источником и приёмником информации с помощью модифицированного метода одноразовых паролей [Текст] / М.О. Таныгин, Х.Я. Алшаиа, В.А. Алтухова, А.Л. Марухленко // Известия Юго-Западного

государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2018. – № 4(29). – С. 63-71.

103. Tanygin M.O. Establishing Trusted Channel for Data Exchange between Source and Receiver by Modified One-time Password Method / Tanygin M.O. , H.Y. Alshaeaa ; V.A. Altukhova // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, Номер статьи 8867590

104. Ali Ayid Ahmad A New Security Method for the Internet of Things Based on Ciphering and Deciphering Algorithms //Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS) Volume 13, Issue 3, September 2018, pp. (145-173) ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801

105. Ахмад, А. А. А. Реализация ограничения числа обрабатываемых блоков данных в системе определения источника данных / А. А. А. Ахмад, Е. А. Косилова // Современные информационные технологии и информационная безопасность : сборник статей 2-й ВНТК – Курск: ЮЗГУ, 2023. – С. 12-14

106. Метод ограничения множества обрабатываемых приёмником блоков данных для повышения достоверности операций определения их источника / М. О. Таныгин, О. Г. Добросердов, А. О. Власова, А. А. А. Ахмад // Труды МАИ. – 2021. – № 118. – DOI 10.34759/trd-2021-118-14.

107. Ахмад А. А. Метод управления буферизацией пакетов для повышения достоверности определения источника команд и данных / М. О. Таныгин, А. А. А. Ахмад, А. О. Власова // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений : Материалы XVI Международной научно-технической конференции, Курск, 14–17 сентября 2021 года / Редколлегия: С.Г. Емельянов, В.С. Титов (отв. ред.) [и др.]. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 239-241.

108. Таныгин М.О. Сложность алгоритма определения источника данных [Текст] / Таныгин М.О., Алшаиа Х.Я., Митрофанов А.В.// Труды МАИ. 2021. Выпуск № 117. DOI: <https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-12>.

109. Муравьева-Витковская Л. А., Фарашиани М. А. Вероятность распределения интервала времени между пакетами в корпоративной компьютерной сети // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 10. С. 957—960.

110. Муравьева-Витковская Л. А. Оценка структурных параметров маршрутизатора при приоритетном управлении неоднородным трафиком с произвольным распределением длин пакетов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 10. С. 951—956.

111. Bramson Norman. The ALOHA system: Another Alternative for Computer Communications // Proceedings of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference. AFIPS '70 (Fall). New York, NY, USA: ACM, 1970. Pp. 281–285.

112. Ben Othman, S., Alzaid, H., Trad, A., & Youssef, H. An efficient secure data aggregation scheme for wireless sensor networks. // IISA 2013, doi:10.1109/iisa.2013.6623701.

113. Таныгин. М. О. Алгоритм определения источника фрагментированных сообщений [Текст] // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, №9. – С.73 – 76.

114. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. И., Ривест Р. Л., Штайн К. Алгоритмы. Построение и анализ – М.: Вильямс, 2019. – 1328 с. ISBN 978-5-907114-11-1, 978-5-8459-2016-4.

115. Алшаиа Х.Я. Рекурсивный алгоритм формирования структурированных множеств информационных блоков для повышения скорости выполнения процедур определения их источника [Текст] / М.О. Таныгин, Х.Я.А. Алшаиа, В.П. Добрица, О.Г. Добросердов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. – № 2. – С. 51-64.

116. Shi, X. A reversible watermarking authentication scheme for wireless sensor networks / X. Shi, D. Xiao // Information Sciences. – 2013 – Vol. 240 – P. 173-183. – DOI:10.1016/j.ins.2013.03.031

117. D. Shant P. Premkumar, Block Level Data Integrity Assurance Using Matrix Dialing Method towards High Performance Data Security on Cloud Storage,» Scientific Research Publishing, т. 7, № 11, pp. 3626-3644, 2016

118. Таныгин, М.О. Оценка влияния организации буферной памяти на скорость выполнения процедур определения источника сообщений [Текст]/ М.О. Таныгин, Х.А. Алшаиа, В.П. Добрица // Труды МАИ – 2020 – № 5(114)– С.15

119. Губарев А. В. Исследование зависимости времени поиска легальных слов от ширины буфера принятых слов / А. В. Губарев, М. О. Таныгин // Телекоммуникации – 2015. – № 12 – С. 21–26.

120. Э. Танненбаум. Современные операционные системы = Modern Operating Systems. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2022, 1120 с. – ISBN 978-5-4461-1155-8.

121. М. О. Tanygin and A. A. Chesnokova, The Method for Reducing Memory Costs for Messages Processing // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 320-324, doi: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272829.

122. G. M. Karam, R. J. A. Buhr Starvation and critical race analyzers for Ada /IEEE Transactions on Software Engineering, vol. 16, no. 8, pp. 829-843, Aug. 1990, doi: 10.1109/32.57622.

123. Могилевский В. Д. Формализация динамических систем / В.Д. Могилевский. - М. : Вуз. кн., 1999. - 215 с. : ил.; 20 см.; ISBN 5-89522-019-3

124. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и её инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А.Овчаров. – М. : Наука, 1988. – 480 с. : ил.

125. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М. : Наука, 1989. – 432 с.: ил. 11

126. Повышение скорости обнаружения ошибок при формировании цепочек блоков данных на основе анализа числа совпадений хешей / М. О. Таныгин, Е. А. Кулешова, А. В. Митрофанов, Е. Ю. Гладилина //

Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 1(57). – С. 85-93. – DOI 10.54398/2074-1707_2022_1_85. –

127. Предварительный национальный стандарт РФ. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол обмена для высокочастотных сетей с большим радиусом действия и низким энергопотреблением [Электронный ресурс] // URL:https://drive.google.com/uc?id=12kPw5_ndO8zav7_BP_EХKdytu7uEyy3x&export=download (дата обращения 15.01.2023).

128. Таныгин М.О. Методы аутентификации устройств защиты информации и управляющих программных средств [Текст] / М. О. Таныгин, А. П. Типикин // Телекоммуникации – 2005. – № 9 – С. 37–42.

129. Ахмад А. А. Описание модели определения вероятности безошибочного принятия приемником пакетов сообщения / М. О. Таныгин, А. А. А. Ахмад, А. О. Власова // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения : Сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции, Курск, 15–16 апреля 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 358-362.

130. Ali A. Ahmad Reliability Improvement Of Communication Channels Between The Components Of Distributed Information Systems / Ali A. Ahmad , Dobritsa V.P., Huseyin P., Ahmad A. Ahmad., Tanygin M. O. // Webology (ISSN: 1735-188X) Volume 19, Number 2, 2022, pp 5230 – 5240

131. Таныгин, М.О. Обнаружение при программном управлении работой устройства команд, выданных посторонними программами [Текст // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание - 2005 сборник материалов 7-й Международной конференции. – 2005. – С. 202-203.

132. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами [Текст] / М. Абрамовиц / под ред. М. Абрамовиц, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

133. Таныгин М.О. Расчёт вероятности возникновения коллизий при использовании алгоритма контроля подлинности сообщений [Текст] / М. О. Таныгин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение – 2012. – Ч. 2 – № 2 – С. 179–182.

134. Горлач Б. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / Б. Горлач – СПб.: Лань, 2013. – 320 с.

135. Метод повышения достоверности обмена данными между удалёнными узлами в условиях ограниченного размера идентификационных полей сообщений / А. А. Ахмад, А. Л. Марухленко, В. П. Добрица, М. О. Таныгин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2022. – № 2. – С. 38-49. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2022/2/38-49.

136. Ахмад А. А. Описание модели определения вероятности безошибочного принятия приемником пакетов сообщения / М. О. Таныгин, А. А. А. Ахмад, А. О. Власова // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения : Сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции, Курск, 15–16 апреля 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 358-362.

137. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802.15.4-2020, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691

138. Джон, Ф. Проектирование цифровых устройств [Текст] / Ф. Джон, М. Уэйкерли ; пер. с англ. – М. : Постмаркет, 2002. – 543 с. : ил.

139. Dobritsa, V. P Study of the in-fluence of the unauthorized blocks number on the cost of the speed and memory RAM during the analysis data process", / Tanygin M. O., Alshaeaa H.Y., Dobritsa V. P. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 928, 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020) 15-16 July 2020, Thi-Qar, Iraq. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/3/032020>

140. Таныгин, М. О. Результаты исследования атаки типа «переполнение буфера» на систему передачи защищённых аутентифицированных сообщений/ М. О. Таныгин, Калущкий И.В., Морозов Е.В. // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения : материалы I всероссийской научно-практической конференции – Курск, 2014. – С.311 – 316

141. А. А. А. Ахмад. Снижение ресурсных затрат на обработку кодов аутентификации сообщений за счет ограничения числа обрабатываемых сообщений / М. О. Таныгин, А. А. Чеснокова, А. А. А. Ахмад // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 4(60). – С. 22-29

142. Ахмад А. А. Модель размещения данных во внутренней памяти вычислителя, реализующего схему кодирования данных в режиме сцепления блоков / М. О. Таныгин, А. А. Ахмад, О. В. Казакова, Д. Голубов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 73-91. – DOI 10.21869/2223-1560-2023-27-1-73-91

143. Наваби З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС [Текст] / Заиналабедин Наваби; пер. с англ. – М. : ДМК Пресс, 2016. – 464 с. : ил. ISBN 978-5-97060-174-7.

144. iCE65™ Ultra Low-Power mobileFPGA™ Family Datasheet v2.42. Lattice Semiconductor [электронный ресурс] // URL: https://media.partsearch.su/dgk/pdf/Data%20Sheets/Lattice%20PDFs/ICE65_UL-Pwr_FPGA.pdf (дата обращения 03.01.2024).

145. Маланин В.В. Методы и практика анализа случайных процессов в динамических системах / В.В. Маланин, И.Е.Полосков – М. : Регулярная и хаотическая динамика, 2005. - 296 с. : ил.; ISBN 5-93972-477-9

146. Ахмад А. А. Повышение скорости определения источника сообщений за счет ограничения множества обрабатываемых блоков данных / М. О. Таныгин, А. А. Чеснокова, А. А. Ахмад // Труды МАИ. – 2022. – № 125. – DOI 10.34759/trd-2022-125-20.

147. Ахмад А. А. Оценка трудоёмкости процедуры определения источника сообщений при ограничении мощности множеств обрабатываемых сообщений / М. О. Таныгин, А. А. Чеснокова, А. А. Ахмад // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения : Сборник научных статей по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции, Курск, 14–15 апреля 2022 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 341-343.

148. Ахмад А. А. Оценка зависимости числа операций сравнений от параметров обработки сообщений в устройствах разделения информационных потоков / М. О. Таныгин, А. А. Чеснокова, А. А. Ахмад // Современные информационные технологии и информационная безопасность : Сборник научных статей Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 17 мая 2022 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 70-72.

149. Ахмад, А. А. А. Ускорение аппаратноориентированных процедур обработки идентификаторов за счет редукции множества входящих сообщений / А. А. А. Ахмад, А.А. Чеснокова //Проблемы проектирования, применения и безопасности информационных систем в условиях цифровой экономики: материалы XXII Международной научно-практической конференции. 21–22 ноября 2022 года [Электронный ресурс]. – Ростов-на-Дону: Издательско-полиграфический комплекс Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), 2022.–Электрон. сетевое изд. – С. 192-195. – Режим доступа : <http://library.rsue.ru>.

150. Цыбаков Б. С., Бакиров В. Л. Устойчивость несинхронной системы Алоха // Проблемы передачи информации. 1984. Т. 20, № 1. С. 82 – 94.

151. Ali Ayid Ahmad Real time open system interconnection standard for data communication // International Journal of Enhanced Research In Science Technology & Engineering, Vol. 6 Issue 4, April-2017. – p. 27-32

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(информационное)

Результаты математического моделирования

Таблица А.1. – Значения вероятности ошибки определения источников.

Длина последовательности M	Число поступивших сообщений U	Длина поля проверочных данных H	Значение минимума вероятности P^{sum}	Значение минимума для рассчитанного J_b	Значение вероятности ошибки без применения метода
10	150	7	0,117	0,117	0,117
15	150	7	0,053	0,056	0,078
20	150	7	0,020	0,022	0,06
25	150	7	0,007	0,008	0,052
10	150	6	0,347	0,347	0,348
15	150	6	0,073	0,125	0,265
20	150	6	0,056	0,062	0,213
25	150	6	0,027	0,028	0,195
10	250	7	0,219	0,227	0,265
15	250	7	0,153	0,163	0,197
20	250	7	0,074	0,082	0,156
25	250	7	0,021	0,024	0,125
10	250	6	0,674	0,674	0,674
15	250	6	0,203	0,225	0,561
20	250	6	0,151	0,162	0,475
25	250	6	0,087	0,087	0,411
10	350	7	0,417	0,417	0,443
15	350	7	0,253	0,256	0,344
20	350	7	0,095	0,102	0,28
25	350	7	0,047	0,048	0,236
10	350	6	0,527	0,547	0,878
15	350	6	0,173	0,185	0,791
20	350	6	0,156	0,156	0,709
25	350	6	0,127	0,128	0,638

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(информационное)

Акты о внедрении результатов диссертационной работы



об использовании результатов диссертационной работы
Ахмада Али Айеда Ахмада,
представленной на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Мы, ниже подписавшиеся, начальник учебно-методического управления, к. х. н., доцент Протасов В.В., заместитель декана факультета фундаментальной и прикладной информатики, доцент кафедры программной инженерии к. т. н., доцент Конаныхина Т.Н., заведующий кафедрой информационной безопасности к. т. н., доцент Марухленко А. Л., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Ахмада А.А.А. внедрены в образовательный процесс Юго-Западного государственного университета, а именно:

– для направления подготовки 10.04.01 «Информационная безопасность» по дисциплинам «Математическое моделирование технических объектов и систем управления» используются разделы диссертации, связанные с созданием моделей оценки достоверности обработки метаинформации и служебных данных в сообщениях, формируемых компонентами распределённых систем

– для специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» по дисциплине «Проектирование защищённых телекоммуникационных систем» используются созданные метод и алгоритмы обработки и анализа метаинформации и служебных данных и определения их источника.

Начальник Учебно-методического управления,
к. х. н., доцент

В.В. Протасов

Заведующий кафедрой
информационной
безопасности к.т. н., доцент

А.Л. Марухленко

Зам. декана факультета
фундаментальной и
прикладной информатики,
к. т. н., доцент

Т.Н. Конаныхина



АКТ
 об использовании результатов диссертационной работы
 Ахмада Али Айеда Ахмада,
 представленной на соискание учёной степени
 кандидата технических наук

Комиссия в составе: начальник внедренческого отдела П.Д. Шестаков, начальник отдела ИС А.П. Зуев, специалист по информационным технологиям А.М. Чесноков установила, что результаты диссертационного исследования Ахмада Али Айеда Ахмада, посвящённые созданию алгоритмов и средств повышения скорости обработки пакетов данных в части разработки алгоритмов обработки сообщений и формирования структур, хранящих результаты промежуточных вычислений, были использованы при как разработке системы агрегирования и анализа показателей сложных информационных систем, выполненных в ООО «ВТИ-Сервис».

Данный акт не может служить основанием для финансовых расчётов

Начальник внедренческого

отдела

Начальник отдела ИС

Специалист по

информационным

технологиям

 П.Д. Шестаков
 А.П. Зуев
 А.М. Чесноков