

На правах рукописи

Кулаков Михаил Сергеевич

**Разработка принципов
организации мобильных сетевых структур
в авионике**

Специальность 05.12.13. –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»

Научный руководитель: **Шаврин Сергей Сергеевич** – доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Парамонов Александр Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Сети связи и передачи данных» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Абилов Альберт Винерович – кандидат технических наук, доцент, декан Приборостроительного факультета ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (ИжГТУ)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «22» марта 2018 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, МТУСИ, аудитория А-448 (малый зал заседаний учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.srd-mtuci.ru/index.php/ru/council> МТУСИ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь

к.т.н., доцент

Терешонок Максим Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Традиционными средствами управления воздушным движением (УВД) является радиолокация, радиопеленгация и голосовая радиосвязь. В дополнение к ним, в настоящее время, внедряются технологии цифровой передачи данных, призванные повысить эффективность УВД для современного авиационного трафика и активного развития беспилотной авиации. Одной из таких технологий является «автоматическое зависимое наблюдение вещательное» - АЗН-В (ICAO Doc 9896 AN/469. Руководство по сети авиационной электросвязи (ATN), использующей стандарты и протоколы пакета протоколов Интернет(IPS). 2010. Издание первое .С. 37). Её концепция заключается в периодической передаче данных о местоположении и намерениях участников воздушного движения. На территории Российской Федерации осуществляется внедрение двух стандартов, реализующих технологию АЗН-В, предназначенной для обеспечения *ситуационной осведомлённости* экипажа воздушного судна (ВС) и авиадиспетчеров - VDL Mode 4 и 1090ES.

Проблема ситуационной осведомленности существует в первую очередь в отдаленных и океанических регионах из-за низкой плотности покрытия наземными средствами контроля и управления воздушным движением. Построение телекоммуникационной сети между участниками воздушного движения сможет обеспечить решение этой проблемы путём передачи данных АЗН-В от ВС, находящихся за пределами прямого приёма пунктами УВД, в связи с этим тема является актуальной.

На рисунке 1 проиллюстрирована организация воздушного движения по концепции АЗН-В, где: ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы; ОВД – организация воздушного движения; РЛС – радиолокационная система; ЛКСС - локальная контрольно-корректирующая станция, FIS-В (Flight Information Service - Broadcast) – часть концепции АЗН-В, подразумевающая передачу данных о ВС, не оборудованных приёмопередатчиками АЗН-В; DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System) – система повышения точности ГНСС; CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communication) – связь «УВД – пилот».

Перспективный подход при построении такого рода сети - применение протоколов мобильных самоорганизующихся сетей, т.к. они обладают рядом свойств, необходимых для функционирования динамических сетевых структур:

автоконфигурация, самооптимизация, самовосстановление и при этом не требуют наличия жёсткой иерархии сетевых узлов.

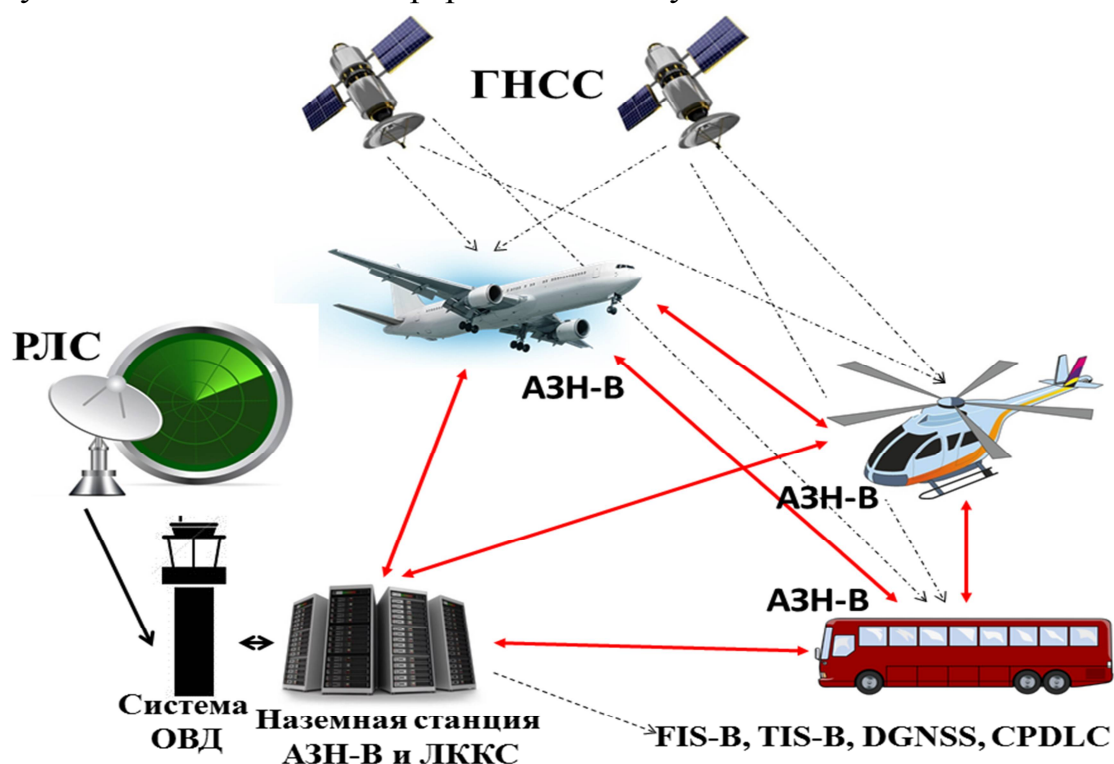


Рисунок 1. Общая схема организации воздушного движения по концепции АЗН-В

Сетевыми узлами могут являться любые транспортные средства, оборудованные приёмопередатчиком, реализующим технологию АЗН-В, при этом *базовыми станциями (БС)* являются приёмопередатчики, установленные в пунктах УВД.

Стандарты 1090ES и VDL Mode 4 ориентированы на передачу данных от различных систем авионики, поэтому они могут быть использованы для построения на их основе самоорганизующейся сети передачи данных АЗН-В. Однако, в связи с тем, что пригодность указанных стандартов для реализации на их основе мобильной самоорганизующейся сети до сих пор не была подтверждена теоретическими исследованиями и практическими реализациями, то существует задача проверки такой возможности.

Степень разработанности темы. Среди ученых, систематизировавших вопросы функционирования самоорганизующихся телекоммуникационных сетей, хотелось бы особо отметить: А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, А. Букерша, Ш. Раджива, Х. Лабиода. Вопросы производительности методов доступа к среде для мобильных самоорганизующихся сетей рассмотрены в публикациях С. Эйхлера, К. Билструпа, Е. Улемана, Г. Штрёма и других. Применение протоколов мобильных самоорганизующихся сетей для

транспорта и последние разработки в данной области представлены в публикациях А.В. Абилова, А.В. Рослякова, Й. Лиу, К.Е. Перкинса, М. Фога, Е. Паломара, В. Наумова, Б. Карпа, Х.Т. Кунга и иных исследователей.

К теме данной работы наиболее близки публикации исследовательской группы Ф. Хоффмана, Д. Медины, А. Волица, С. Аяза, К.Х. Рокитански. В работах группы рассматривается построение мобильной самоорганизующейся сети между участниками воздушного движения с целью обеспечения доступа в сеть Интернет пассажирам на борту. В качестве стандарта связи предлагается стандарт LDASC1, находящийся на стадии разработки и не принятый к внедрению на территории РФ. Общий подход к осуществлению маршрутизации сообщений схож (Medina D., Hoffmann F., Ayaz S., Rokitansky C. H. Feasibility of an Aeronautical Mobile Ad Hoc Network Over the North Atlantic Corridor // IEEE SECON. 2008. P. 109 – 116), а в качестве одного из алгоритмов маршрутизации рассматривается «жадный» алгоритм, но при этом отсутствует математическое доказательство применимости алгоритма.

Целью диссертационной работы является повышение ситуационной осведомленности пунктов УВД в отдаленных и океанических регионах путём создания мобильной самоорганизующейся сети между участниками воздушного движения для передачи данных АЗН-В. Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Проведены аналитические исследования связности сети в отдаленных и океанических регионах по реальным полётным данным с учётом особенностей физического уровня стандарта VDL Mode 4: частота канала, мощность передатчика, чувствительность приёмника, а также с учётом ослабления сигнала при распространении и воздействия помех.
2. Разработан протокол маршрутизации, позволяющий передавать сообщения АЗН-В наземным пунктам УВД в условиях низкой связности сети и пропускной способности канала.
3. Разработана дискретно-временная модель, в которой совмещены функциональная модель стандарта VDL Mode 4 и разработанный протокол маршрутизации. При реализации модели разработан комплекс алгоритмов решающего устройства, доступа к среде, генерирования трафика АЗН-В и взаимодействия уровней стандарта VDL Mode 4.
4. Проведено имитационное моделирование работы сети для различных сценариев движения ВС. По результатам произведена оценка производительности сети по числу отправленных и полученных

сообщений, задержкам передачи сообщений и общему количеству ВС, от которых были получены сообщения АЗН-В.

Методы исследований. При выполнении исследований были использованы методы математического моделирования, теории телекоммуникационных сетей, теории вероятностей и имитационного моделирования.

Научная новизна работы.

1. Предложен метод повышения ситуационной осведомленности систем УВД в отдаленных и океанических регионах, основывающийся на применении алгоритмов самоорганизующихся сетей для стандарта авиационной связи VDL Mode 4.

2. Разработан протокол маршрутизации самоорганизующейся телекоммуникационной сети для авиационного стандарта связи, обеспечивающий передачу данных в условиях низкой связности сети и низкой пропускной способности каналов связи. Достоинствами протокола являются: отсутствие необходимости получения данных обо всех узлах сети и необходимости использования дополнительных методов обхода сетевого графа, простота реализации, а также функционирование на любом транспортном средстве, оборудованном приёмопередатчиком VDL Mode 4.

3. Разработана дискретно-временная имитационная модель самоорганизующейся телекоммуникационной сети, построенной между участниками воздушного движения, а также пунктами УВД, учитывающая характер движения узлов, распространение сигнала и функциональную модель стандарта VDL Mode 4.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработке и исследовании модели мобильной самоорганизующейся сети, функционирующей на основе авиационного стандарта связи и построенной между участниками воздушного движения и пунктами наблюдения в отдаленных и океанических регионах.

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов и структур данных, необходимых для функционирования канального уровня приёмопередатчиков стандарта VDL Mode 4, которые могут быть использованы при их технической реализации.

Использование результатов имитационного моделирования позволит сократить количество ВС стандарта VDL Mode 4 в отдаленных и океанических регионах, а также планировать маршруты полётов с учётом связности сети для

обеспечения приёма сообщений АЗН-В от участников движения, находящихся за пределами прямой видимости.

Результаты диссертационной работы использованы в ФГУП «ГосНИИАС» (г. Москва): 1) при выполнении НИР «Модем» (отчет № 1601/13 от 28.07.2015 "Разработка технологий создания авиационных информационно-управляющих систем на основе транспондера АЗН-В, работающего в режиме VDL 4"); 2) в НИР «Айсберг» (отчёт № 147(16649)2015 от 01.08.2015); 3) в НИР «Исследование-Норма-Транспорт-2» (гос. контракт № 107131030010 от 25.07.2013, ФГУП «Морсвязьспутник», г. Москва).

Положения, выносимые на защиту

1. Применение алгоритмов маршрутизации самоорганизующихся сетей на основе стандарта VDL Mode 4 способствует повышению ситуационной осведомленности систем УВД, за счёт передачи данных АЗН-В от участников воздушного движения, находящихся за пределами прямой видимости систем УВД. Периоды получения данных через сеть могут составлять от нескольких минут до нескольких часов, и зависят от плотности воздушного движения и маршрутов полёта.

2. VDL Mode 4 является самым перспективным стандартом, внедряемым на территории РФ, для создания на его основе самоорганизующихся телекоммуникационных сетей передачи данных о местоположении и намерениях участников воздушного движения. В отличие от стандарта 1090ES он предоставляет возможность связи «борт-борт», поддерживает процедуры управления соединением, процедуры передачи пользовательской информации и использует метод доступа к среде, позволяющий каждому приёмопередатчику резервировать собственные слоты для передачи сообщений с низкой вероятностью коллизий.

3. Разработанная имитационная модель мобильной самоорганизующейся телекоммуникационной сети, построенной между участниками воздушного движения и пунктами УВД на основе стандарта VDL Mode 4, позволяет моделировать мобильность узлов по реальным полетным данным, учитывает изменение сигнала при распространении, вероятность возникновения битовых ошибок и особенности функциональной модели стандарта VDL Mode 4. С помощью модели можно оценить такие показатели производительности сети, как: количество отправленных и полученных сообщений, задержки при передаче сообщений по сети и число узлов, от которых поступили сетевые сообщения с данными АЗН-В.

4. Применение адаптивных значений, предложенных численных параметров - диапазона поиска временного слота, периода вещания сетевых сообщений БС и периода хранения записей в таблице маршрутизации, в зависимости от количества сетевых узлов, позволяют повысить эффективность работы сети, выражаемую в количестве отправленных и полученных сообщений, задержках при передаче сообщений по сети и число узлов, от которых поступили сетевые сообщения с данными АЗН-В.

Достоверность полученных результатов обеспечена соответствующим применением используемых математических методов, правильностью постановки решаемых задач, а также используемых допущений и ограничений, представлением и обсуждением полученных научных результатов на научно-технических конференциях, публикацией основных результатов работы в журналах, соответствием применяемых моделей физическим процессам в самоорганизующихся телекоммуникационных сетях, средствами имитационного моделирования.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования были доложены: на 7-й, 8-й, 9-й, 10-й международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (МТУСИ, г. Москва, 2013, 2014, 2015, 2016), на международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения INTERMATIC» (МИРЭА, г. Москва, 2012, 2013), на всероссийской научно-практической конференции «Моделирование авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС», г. Москва, 2013), на международной молодежной научно-практической конференции «ИНФОКОМ» (СКФ МТУСИ, г. Ростов-на-Дону, 2013), а также на 70й региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «СТУДЕНЧЕСКАЯ ВЕСНА» (СПбГУТ, г. Санкт-Петербург, 2016).

По теме диссертационного исследования опубликовано 13 печатных работ, из них 4 - в рецензируемых периодических изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России. Основные результаты по теме диссертации получены автором лично.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, библиографического списка, включающего 105 наименований, и трёх приложений. Работа содержит 186 страниц текста, 55 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана её разработанность, описаны используемые методы исследования, определены цель диссертационной работы и решаемые в ней задачи, показана научная новизна. Сформулированы научные положения, выносимые на защиту, охарактеризована достоверность полученных результатов и описана их апробация.

В первой главе анализируются особенности разновидностей технологии «автоматического зависимого наблюдения». Рассматриваются существующие протоколы мобильных самоорганизующихся сетей, предназначенные для маршрутизации данных между транспортными средствами. Проводится сравнение стандартов VDL Mode 4 и 1090ES, с целью определения возможности реализации на их основе мобильной самоорганизующейся сети. Рассмотрены публикации, касающиеся создания мобильной самоорганизующейся сети между участниками воздушного движения, а также публикации, посвященные производительности самоорганизующихся сетей, функционирующих на основе методов доступа к среде передачи, для транспортных средств.

Очевидными подходами для решения проблемы ситуационной осведомленности в отдаленных и океанических регионах является обеспечение подобных регионов необходимым количеством систем УВД или оснащение ВС передатчиками стандарта спутниковой связи, однако, в качестве альтернативы предлагается создание сети передачи данных АЗН-В между участниками воздушного движения.

VDL Mode 4 использует самоорганизующийся многостанционный доступ с временным разделением канала (self-organized time division multiple access - STDMA), который позволяет приёмопередатчику выбрать временной слот для передачи с вероятностью коллизии порядка 10^{-6} , в то время, как 1090ES, в качестве доступа к среде, использует метод случайного временного доступа - отсутствуют прослушивание канала и методы избегания коллизий. В исследованиях, посвященных вопросам функционирования методов доступа к среде для транспортных систем - IEEE 802.11p и STDMA, выделяется, что STDMA является более подходящим для передачи сообщений с местоположением и намерениями между участниками дорожного движения, т.к. в 802.11p существует вероятность коллизии между близкорасположенными приёмопередатчиками. Также STDMA позволяет передавать сообщения с

равными периодами и использовать слоты, зарезервированные дальними приёмопередатчиками при высокой нагрузке в канале.

Во многих современных исследованиях, для транспортных сетей, предлагается применение гибридных протоколов маршрутизации, использующих информацию о географическом местоположении сетевых узлов, при этом предполагается, что местоположение может быть получено узлами с помощью приёмников ГНСС, а затем передано соседним узлам. Данный подход исключает необходимость в построении маршрутов на каждом узле или хранении на узлах полной топологии сети, что уменьшает объём передаваемой по сети служебной информации.

Приемопередатчики стандарта VDL Mode 4 периодически отправляют в широкополосном режиме сообщения об их местоположении, направлении движения, также содержащие уникальный 27-битный бортовой адрес ICAO и другую навигационную информацию. Таким образом, все приемопередатчики, находящиеся в зоне прямой видимости, получают и записывают эту информацию. В связи с этим при выборе или разработке протокола маршрутизации мобильной самоорганизующейся сети рациональным является рассмотрение гибридного класса протоколов маршрутизации.

Во второй главе дана оценка положительного эффекта от развертывания мобильной самоорганизующейся сети, который выражается в увеличении времени получения сообщений АЗН-В о местоположении и намерениях от ВС базовыми станциями. На основе полученных результатов, произведена оценка периода времени получения сообщений ВС от конкретных ВС, при наличии самоорганизующейся сети и её отсутствии.

Сеть является связной тогда, когда между любой парой узлов существует маршрут, который, в общем случае, может включать одну или несколько ретрансляций. Для оценки связности использованы следующие допущения:

- связь между узлами существует, если расстояние между ними не более чем R (значение R для всех радиостанций одинаково);
- территориальное распределение радиостанций равномерное, при этом существование связи между узлами определяется по методу Ваксмана с использованием пуассоновского процесса;
- при распространении радиоволн учитываются средние потери распространения, а также медленные и быстрые замирания сигнала;
- приёмопередатчики используют антенны с круговой диаграммой направленности.

Значение требуемой дальности радиосвязи R при использовании узлами антенн с круговой диаграммой направленности, когда известно число узлов k и площадь территории S , определяется по формуле (Фокин Г.А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. СПб. 2009. 17 с.):

$$R[S, k] = \sqrt{\frac{\ln(-k/\ln P_{CON}) \cdot S}{k \cdot \pi \mu(\eta, \sigma)}}, \quad (1)$$

где $\mu(\eta, \sigma) = \frac{2}{\eta} \Gamma\left(\frac{2}{\eta}\right) e^{\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{\eta}\right)^2}$ – коэффициент влияния медленных и быстрых замираний на связность радиостанций, $\eta = 2 \div 4$ – параметр средних потерь распространения, $\sigma = (\ln 10)/10\sigma_{\text{дБ}}$; $\sigma_{\text{дБ}} = 6 \div 10\text{дБ}$ – параметр медленных замираний, $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция, P_{CON} – вероятность того, что две станции будут связаны.

В таблице 1 приведены полученные значения площади покрытия сети в зависимости от количества узлов для следующих условий: $R = 370,4$ км (согласно документации VDL Mode 4); $P_{CON} = 0.9$; $\eta = 2$; $\sigma_{\text{дБ}} = 10$ дБ.

Таблица 1. Площадь покрытия сети в зависимости от количества узлов

Площадь покрытия сети, млн. км ²	0.5	0.7	1	3	5	10
Количество узлов	3	5	9	35	75	150

Большинство отдаленных и океанических регионов занимают площади в несколько миллионов квадратных километров, при этом, в течение дня, количество ВС, пролетающих в них одновременно, может не достигать необходимых теоретических значений, что означает низкую, местами стремящуюся к нулю, связность развертываемой сети. Однако характер движения ВС, в рассматриваемых регионах, имеет свои особенности: ВС следуют по маршрутам с эшелонированием, расположение БС фиксировано, дальность радиосвязи в несколько раз превышает величину эшелонирования, воздушное движение имеет периоды минимума и максимума. С учётом этих особенностей, с помощью программного инструментария дискретно-событийного моделирования OMNET++, был смоделирован реальный полетный трафик ВС в некоторых отдаленных и океанических регионах: на Дальнем Востоке, Ямале и в Северо-Атлантическом коридоре.

При моделировании были учтены такие параметры, как: расстояние между объектами (по трем координатам); мощность передатчика;

чувствительность приемника; затухание при распространении радиоволн; диаграмма направленности; уровень шума и др. В таблице 2 приведены результаты моделирования 160 мин. полетных данных вертолётов в районе Ямала.

Таблица 2. Периоды получения сообщений от ВС для Ямала

Маршрут	Без сети, мин.	С сетью, мин.
Салехард – Овгорт (22401)	30	30
Салехард – Сабетта (25414)	50	140
Надым – Яр Сале (27197)	40	160
Яр Сале – Мыс Каменный (25597)	90	120
Надым – Бованенково (22464)	110	160
Надым – Бованенково (25800)	130	160

Выигрыш во времени обозревания ВС – это доля периода в процентах, когда ВС, находящееся за пределами прямой видимости пунктов УВД, может передать этим пунктам данные АЗН-В через других участников воздушного по самоорганизующейся сети. По результатам моделирования, выигрыш во времени обозревания ВС, в двух сценариях достигал 100%. Таким образом, в зависимости от плотности движения и расположения маршрутов ВС в различные моменты времени, величина периода получения сообщений через сеть варьировалась от нескольких минут до 2-х часов. Также были рассмотрены сценарии полёта ВС малазийских авиалиний маршрута МН370 (с возможными отклонениями), пропавшего в небе над Южно-Китайским морем 8 марта 2014 г. С учётом возможных изменений в пути следования маршрута, было установлено, что через сеть маршрут можно было бы наблюдать в среднем 20 мин., а значит, существовала возможность определить направление движения этого маршрута после исчезновения с радаров.

Полученные результаты позволили сделать выводы о возможности применения протоколов мобильных самоорганизующихся сетей для повышения ситуационной осведомленности пунктов УВД в отдаленных и океанических регионах.

В третьей главе описана разработанная компьютерная модель мобильной самоорганизующейся сети на основе стандарта VDL Mode 4.

Для разработки модели сети был выбран объектно-ориентированный программный инструментарий дискретно-событийного моделирования OMNeT++ с набором библиотек MiXiM, т.к. он содержит множество готовых модулей и функций для разработки моделей беспроводных сетей.

Структурно-функциональная модель VDL Mode 4, описанная в стандарте ICAO 9816 и семействе стандартов ETSI EN 301 842, разделена на 3 уровня, соответствующих модели OSI: физический, канальный и сетевой. Канальный уровень имеет комплексную структуру и разделен на следующие подуровни: «доступа к среде» (Media Access Control, MAC), «специальных сервисов линии передачи данных» VDL Mode 4 (VDL Mode 4 Specific Services, VSS), «установления соединения» (Data Link Service, DLS), «управления связью» (Link Management Entity, LME). Разработан комплексный модуль, состоящий из следующих элементов: модуль мобильности, модуль физического уровня и модуль канального уровня (с внутренним разделением). Структура разработанной модели сетевого узла представлена на рисунке 2.

Модуль мобильности позволяет использовать различные сценарии движения сетевых узлов при моделировании.

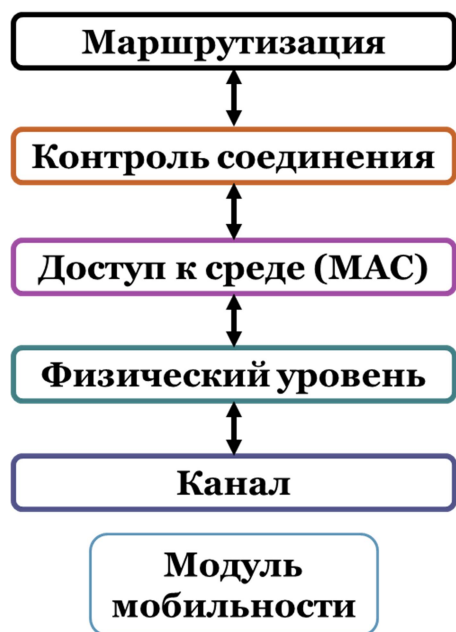


Рисунок 2. Структура модели сетевого узла

Модуль физического уровня разделяется на две составляющих – модель распространения радиоволн и решающее устройство. При моделировании могут быть использованы различные модели распространения сигнала, которые учитывают изменения сигнала, как во временном, так и в частотном домене. Решающее устройство делает вывод о возможности корректного приёма сигнала, учитывая его уровень, ОСШ, наличие битовых ошибок в принятом сообщении и др. Модуль физического уровня включает в себя физический уровень структурно-функциональной модели VDL Mode 4.

Модуль доступа к среде (MAC) содержит в себе уровни MAC и VSS. В нём реализован метод доступа STDMA, а также обрабатывается карта временных слотов, которая строится индивидуально для каждого узла.

Модуль LME отвечает за формирование АЗН-В сообщений, обработку таблицы соседних узлов и может осуществлять управление подуровнем DLS.

В модуле маршрутизации реализована основная часть функционала маршрутизации данных АЗН-В: обработка и генерирование сетевой информации и обработка таблиц маршрутизации.

Разработанная модель учитывает особенности функциональной модели VDL Mode 4, а также такие факторы, как: мобильность узлов сети; условия распространения волн; физический уровень; канальный уровень (с взаимодействием подуровней). Также предусмотрена возможность варьирования параметров модулей доступа к среде и маршрутизации. Модель позволяет получать следующие числовые показатели производительности сети: количество отправленных и полученных сообщений, задержки при передаче сообщений по сети, а также число узлов, от которых были получены сетевые сообщения с данными о местоположении и намерениях.

В четвертой главе рассматривается протокол маршрутизации для узлов мобильной самоорганизующейся сети, функционирующей на базе стандарта VDL Mode 4. Предложены алгоритмы обработки сетевых сообщений узлами. Рассматриваются численные параметры, влияющие на производительность работы сети: диапазон поиска временного слота для детерминированного доступа к среде, период вещания сетевых сообщений базовой станцией и период хранения записей в таблице маршрутизации.

Учитывая, что часть пропускной способности канала VDL Mode 4, величиной 19,2 кбит/с, постоянно используется приёмопередатчиками для передачи сообщений АЗН-В - главной задачей при разработке являлась минимизация количества передаваемой служебной информации в сети. Для получения местоположения БС мобильными узлами использован проактивный механизм: сообщения АЗН-В, передаваемые БС, периодически ретранслируются по сети, что обеспечивает создание записей в таблицах маршрутизации, которые содержат адрес узла и полученное от него сообщение БС.

Основой разработанного алгоритма маршрутизации АЗН-В сообщений от мобильных узлов к БС является «жадный» алгоритм, использующий данные таблицы соседних узлов, составляемых приёмопередатчиком VDL Mode 4 из принимаемых сообщений АЗН-В: 27-битный адрес ICAO и местоположение. Узел совершает локально оптимальный выбор согласно метрике «Most Forward Radius» (MFR) - в качестве маршрутизатора в зоне прямой видимости выбирается узел, который находится ближе всех к адресату. Если маршрутизатор ближе всего к адресату, то в качестве следующего узла выбирается тот, для которого значение времени жизни сообщения БС в таблице маршрутизации является максимальным. Рассмотрена алгебраическая система, основанная на связном направленном графе, имеющая четыре кортежа $\langle L, F,$

w, \leq), где: L - множество сигнатур связей (рёбер), F - множество потоков трафика, w - весовая функция связи (рёбер), \leq : порядок отношения (Li Y., Yang Y., Lu X. Rules of Designing Routing Metrics for Greedy, Face, and Combined Greedy-Face Routing // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2010. vol. 9. Issue No. 04. P. 1-9.).

При анализе рассмотренной алгебры выявлено, что протокол маршрутизации не образует петель и сходится в сетях, где алгоритм не получает пустого множества значений выбора. Если метрика комбинируется с проактивным методом построения маршрутов, то протокол имеет свойство согласованности. Согласованность протокола говорит о том, что для одного потока при передаче каждого сообщения используются одни и те же промежуточные узлы. Т.к. проблема подмены промежуточного узла является серьёзной угрозой функционирования сети и безопасности воздушного движения, то предлагается решение с использованием методов аутентификации и мультилатерации.

Разработанный протокол позволяет использовать «односотовые» сообщения и избежать задействования процедур «короткой» передачи, которые подразумевают отправку сообщений с подтверждением получения, что позволяет уменьшить число служебных сообщений в сети в 3 раза. Для подтверждения отправления сетевого сообщения узел хранит его в течение 5 мин., при вещании этого сообщения следующим узлом и его обратном получении (т.к. используются антенны с круговой диаграммой направленности) производится проверка на схожесть. В случае отсутствия на приёме схожего сообщения в течение 5 мин., производится новая попытка отправки сообщения.

Реализация процесса маршрутизации «односотовых» сообщений потребовала особых подходов при обработке служебной информации. На рисунке 3 изображены информационные единицы подуровней стандарта VDL Mode 4, обрабатываемые мобильными узлами. По мере ретрансляции сообщения от БС, на каждом промежуточном узле: уменьшается время жизни (TTL) на единицу, изменяется адрес источника, чтобы следующий узел мог записать соотношение «узел-БС» с учётом местоположения БС на подуровне маршрутизации.

При передаче по сети сообщения от узла, каждый промежуточный узел устанавливает адрес ретранслятора, выбранного им по информации в таблице маршрутизации, также изменяется поле резервирования, т.к. узел использует собственную карту слотов и процедуры резервирования. Сетевые сообщения

обрабатываются на всех подуровнях, при этом некоторые части должны оставаться неизменными, поэтому они связываются единой временной меткой (уникальность метки обеспечивается временем приёма сообщения).

Для управления производительностью сети в работе предложены несколько изменяемых числовых параметров, значения которых исследованы в процессе моделирования. Параметр резервирования позволяет выбирать для сетевых сообщений один из типов фиксированного доступа к среде, балансируя между вероятностью коллизии и временем доступа. Период вещания сетевых сообщений и хранения записей в таблице маршрутизации БС, необходим для поддержания актуальной информации на узлах с учётом связности сети и информационной нагрузки.

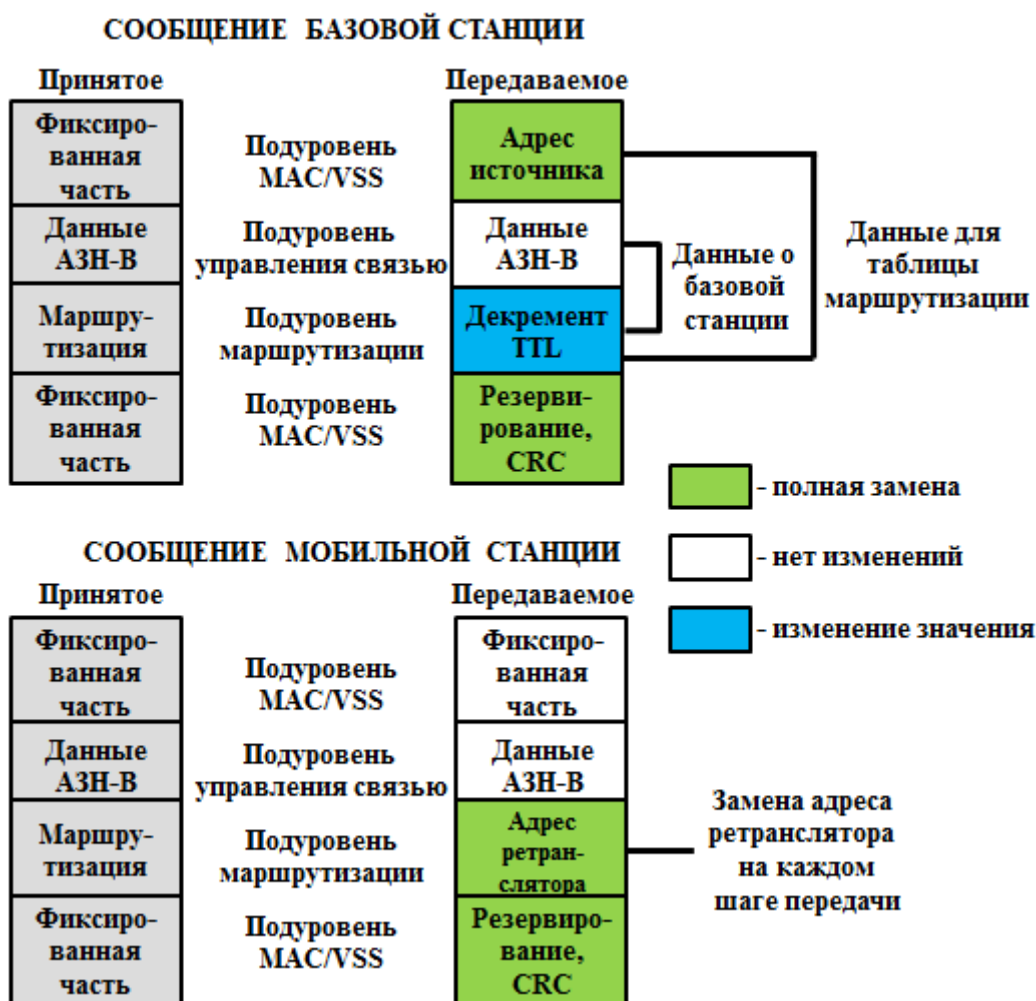


Рисунок 3. Изменение полей сообщения при его обработке на узлах

В пятой главе исследуются показатели производительности сети, полученные имитационным моделированием.

С учётом особенностей движения БС в отдалённых и океанических регионах и стандарта VDL Mode 4 для сценариев моделирования были использованы следующие параметры: БС движутся по маршруту через БС друг

за другом, либо навстречу друг другу с эшелонированием. Высота полета достигает 12 км, скорость движения варьируется от 700 до 1000 км/ч, дальность приёма ограничивается радиогоризонтом, мощностью передатчика и чувствительностью приемника. По стандарту VDL Mode 4 дальность прямого приёма равна приблизительно 370 км.

Рассмотрен сценарий, в котором общий вид движения сетевых узлов имеет форму креста с центром в районе БС, что соответствует небольшому аэропорту с двумя зонами прилёта и вылета. Количество сетевых узлов – 50, при этом 20% из них двигаются вне креста (маршруты, проходящие в стороне). Данное количество узлов распределено по территории площадью 10 млн. км², что теоретически обеспечивает вероятность связности сети величиной порядка 2%, однако, это количество является пиковым для рассматриваемой площади территории Дальнего Востока. С учётом условий эшелонирования, в районе прямой видимости БС, будут находиться не более 6 узлов, которые в процессе передачи данных АЗН-В по сети будут, в качестве маршрутизаторов, испытывать нагрузку сетевыми сообщениями АЗН-В от узлов вне зоны прямой видимости БС, что отразится на производительности сети. На рисунке 4 приведён общий вид рассмотренного сценария. В таблице 3 приведены

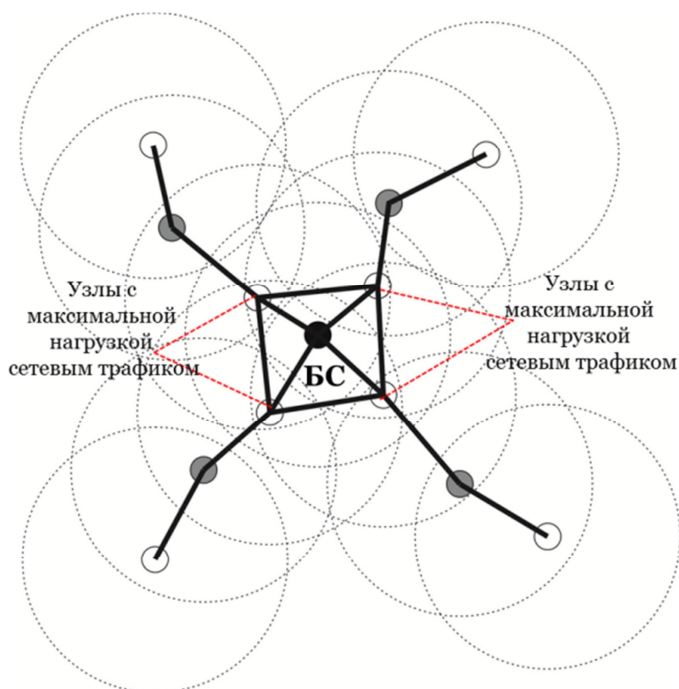


Рисунок 4. Общий вид сценария с 50 узлами

результаты работы модели для различных параметров. Частота вещания сообщений АЗН-В – 12 отчётов в минуту, для передачи по сети – 1 отчёт в минуту.

При значении диапазона выбора временного слота равного 75 слотам было достигнуто наилучшее значение по задержкам передаваемых сообщений. При значении параметра равным 400 слотам получено наилучшее значение по количеству полученных сообщений и их отношению к отправленным - при

меньших значениях диапазона выбора слота узлы чаще размещают резервирования, что приводит к уменьшению времени доступа к среде передачи. Подобные резервирования размещаются без предупреждения для

других узлов, результатом чего является меньшее количество принятых сообщений относительно больших значений параметра. Худшие показатели получены для параметра равного 4500 слотам, т.к. в карте слотов может быть выбран подходящий для инкрементированной (сообщаемой в другом резервировании) передачи слот, находящийся далеко относительно текущей позиции слота, что увеличивает период доступа к среде и задержки соответственно. Также это выражается в устаревании информации для маршрутизации – уменьшение кол-ва принятых сообщений относительно других значений параметра.

Таблица 3. Показатели производительности для сети с 50-ю узлами при изменении различных параметров («RtS» - отношение кол-ва полученных сообщений к отправленным)

Диапазон выбора временного слота				
Диапазон выбора временного слота, слоты	RtS, %	Задержка, с	Максимальная задержка, с	Получено сообщений
75	74%	14,1 с	125,9 с	1012
4500	70%	99,8 с	645,2 с	748
150	75%	14,7 с	150,5 с	1063
400	75%	17 с	135,3 с	1064
Период вещания сетевых сообщений базовой станцией				
Период вещания БС, с	RtS, %	Задержка, с	Максимальная задержка, с	Получено сообщений
60 с	81%	14,9 с	119,9 с	1078
150 с	78%	14,9 с	134,5 с	1008
300 с	75%	14,7 с	150,5 с	1062
Период хранения записей для маршрутизации				
Период хранения БС/ТМ, с	RtS, %	Задержка, с	Максимальная задержка, с	Получено сообщений
330 с / 180 с	78%	14,9 с	134,5 с	1009
330 с / 330 с	76%	14,5 с	138,4 с	1403
480 с / 480 с	73%	14,3 с	158,6 с	1428
660 с / 360 с	75%	14,3 с	128,6 с	1232
660 с / 660 с	71%	15 с	197,6 с	1498
Параметр периодического смещения на подуровне доступа к среде				
Параметр периодического смещения	RtS, %	Задержка, с	Максимальная задержка, с	Получено сообщений
0,1	71%	15 с	197,6 с	1500
0,2	70%	38 с	352,5 с	1476
0,4	56%	390,1 с	2137 с	1197
0,05	70%	7,6 с	110,5 с	1467
0,025	68%	4,4 с	63,4 с	1448

При периоде вещания сетевых сообщений БС равным 60 с достигаются лучшие показатели производительности по максимальным задержкам, кол-ву

полученных сообщений и их отношению к отправленным сообщениям. Это связано с тем, что при увеличении частоты вещания сетевых сообщений БС узлы чаще обновляют таблицы маршрутизации, т.е. дальние узлы отправляют меньше сообщений по «неактуальным» маршрутам. При значении параметра величиной в 300 с снижается актуальность информации для маршрутизации на узлах, что выражается в снижении показателей производительности сети. Стоит отметить, что величина средних задержек во всех случаях почти не отличается.

При коротком периоде хранения информации на промежуточных узлах, может происходить преждевременное удаление актуальной информации о маршрутизаторах, что сказывается на общем числе отправляемых сообщений. Поэтому при значении параметра периода хранения равного 330 с / 180 с уменьшилась информационная нагрузка и увеличилось отношение полученных сообщений к отправленным относительно других значений. Однако при длительном периоде, узлы отправляют сообщения, когда актуальность информации о маршрутизации была утеряна. Для периода 660 с, для двух записей, общее кол-во полученных сообщений максимально при наименьшем отношении полученных к отправленным сообщениям. Меньшие задержки получены для промежуточных значений, т.е. можно сделать вывод о необходимости применения адаптивных значений периодов хранения.

Параметр периодического смещения определяет зону вокруг номинального слота для размещения широковещательного периодического резервирования. При значении параметра равным 0,025 (наименьшем из рассмотренных) достигнуты наименьшие величины задержек сетевых сообщений. Это связано с тем, что если в процессе размещения резервирования узел не находит подходящих слотов для использования комбинированного резервирования, он использует процедуры размещения нового широковещательного резервирования. При увеличении значения рассматриваемого параметра увеличивается и зона выбора, в результате, может быть выбран слот, всё более отстоящий от текущего, что увеличивает задержки.

При исследовании производительности сети при варьировании кол-ва сообщений АЗН-В, передаваемых в прямой видимости (RR) и кол-ва сообщений, передаваемых по сети (NRR), отношение полученных сообщений к отправленным снижается при увеличении кол-ва сообщений. В данном случае увеличивается информационная нагрузка на канал, увеличиваются потери сообщений. В сценарии с установленным значением параметра 60/1 (RR/NRR) задержки минимальны – при увеличении частоты периодических

резервирований (24 и 60), увеличивается и количество комбинированных резервирований, используемых для сетевых сообщений – это положительно сказывается на кол-ве полученных сообщений и их задержках. Для значений NRR равным 6 и 12 максимальные задержки составили десятки минут, увеличилось и количество полученных сообщений, однако, не пропорционально эксперименту с 1 сетевым сообщением в минуту.

Стоит также отметить, что кол-во узлов, от которых БС получила сообщения АЗН-В по сети, для всех исследованных параметров составило 44 ± 1 узла, т.е. от большей части узлов удалось получить хотя бы одно сообщение.

Для сценария с двумя БС, для каждой БС, в среднем, были получены следующие значения: отношение кол-ва принятых сообщений к отправленным – 80%, пиковое время задержки – 118,1 с, усредненное время задержки – 7,2 с, получено сообщений каждой БС в среднем – 1487. Таким образом, суммарно для всей сети было получено сообщений около 3000 сообщений от 48 БС, что соответственно в 2 раза больше, чем в сценарии с одной БС, однако, остальные показатели остались прежними т.к. связность сети практически не изменилась.

В сценарии со 150ю узлами, при параметрах модели одинаковых для конфигурации с периодом хранения записей в таблице БС и таблице маршрутизации равным 660 с соответственно, наблюдалось: уменьшение отношения полученных сетевых сообщений к отправленным до значения равного 66%, увеличение времени задержек до 66,8 с, максимальных задержек до 1509,3 с. Ухудшение показателей связано с возрастанием информационной нагрузки в 3 раза. Однако кол-во полученных сообщений составило 7298, что в 4,87 раз больше, чем в сценарии с 50ю узлами. Это связано с увеличением связности сети (кол-во узлов больше в 3 раза на одной и той же территории).

Для исследования производительности сети также был рассмотрен сценарий с территорией Дальнего Востока площадью 4,8 млн. кв. км, который охватывает 4 аэропорта, в которых потенциально могут быть расположены БС: Петропавловск-Камчатский, Анадырь, Магадан и Оха. Полетные данные были взяты с сайта flightradar24.com, при этом в течение дня рассматривалось 13 промежутков по 50 мин., в которых суммарно было зафиксировано 58 бортов. Пиковое число узлов в один рассматриваемый период составило 13 шт. В результате, лучшие показатели были получены для меньших, относительно предыдущего сценария, значений периодов хранения информации для маршрутизации величиной в 480с (вместо 660с). Таким образом, для лучшего случая, были получены следующие значения: отношение кол-ва принятых

сообщений к отправленным – 61%, пиковое время задержки – 14,4 с, усредненное время задержки – 6,2 с. При этом суммарно было отслежено 48 бортов. В одном из рассматриваемых промежутков отношение числа принятых сообщений к отправленным составило 0,99, т.е. в течение 50 мин. существовала полностью связная структура, т.е. сообщения были потеряны только из-за битовых ошибок, вероятность возникновения которых была установлена в значение 10^{-4} согласно технической документации VDL Mode 4.

Также в работе был исследован характер нагрузки на пропускную способность канала VDL Mode 4. При варьировании числа узлов в сети и частоты вещания АЗН-В сообщений устанавливались предельные значения, в результате которых в какой-либо момент времени на любом узле все слоты оказывались занятыми. На рисунке 5 изображен случай для 30 сообщений АЗН-В в минуту, т.к. это число является предельным для одного канала.

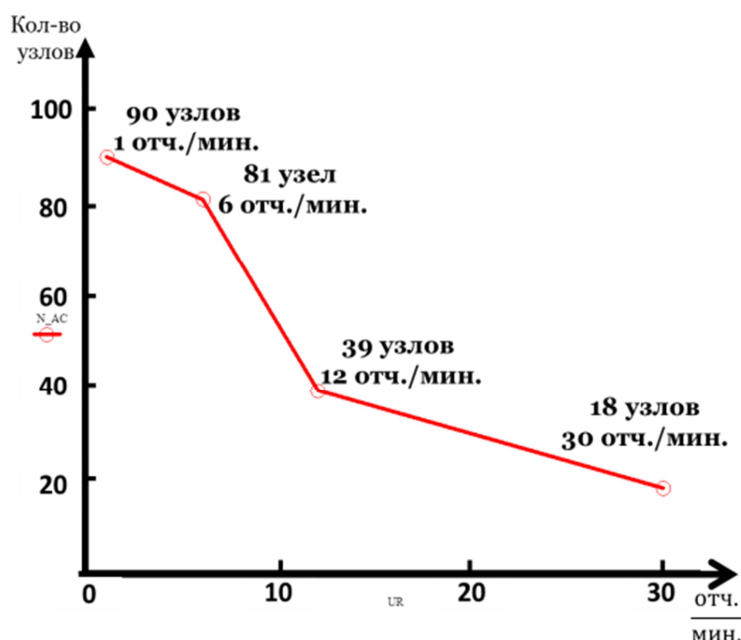


Рисунок 5. Число поддерживаемых узлов в сети в зависимости от частоты вещания АЗН-В сообщений

Максимально поддерживаемое число узлов равно 300 было получено при 12 АЗН-В сообщений в минуту и одном сообщении, отправляемом по сети в минуту. Однако, такой сценарий нереализуем на территории РФ – в отдаленных и океанических регионах не скапливается такого кол-ва ВС, при условии существования одной (и даже двух) БС. При

этом можно сделать вывод о существовании запаса по пропускной способности для будущего увеличения числа ВС.

Проведена валидация данных имитационного моделирования, в результате чего определен доверительный интервал средних значений анализируемых параметров и объем статистических данных, который необходимо получить, чтобы обеспечить требуемую точность и достоверность результатов. При допустимой погрешности $E=0,01$ и доверительном интервале $P_{[a,b]} = 0.99$ необходимое число измерений оцениваемых параметров составило порядка 9 тыс.

В результате проведенного моделирования можно сделать вывод, что предложенный метод повышения ситуационной осведомленности обеспечит возможность отслеживать десятки ВС в реальном времени, следующих по маршрутам в зонах без прямого наблюдения средствами УВД. Построение самоорганизующейся сети связи позволит также внедрять новые авиационные приложения, основанные на многоинтервальной передаче данных. ИКАО не предъявляет требований к производительности приложений на основе самоорганизующихся сетей, поэтому проведенные исследования могут стать их основой.

В заключении перечисляются основные результаты диссертационной работы.

Приложение содержит фрагменты программного кода имитационных моделей, описание алгебры «жадной» маршрутизации и акт об использовании научных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен метод повышения ситуационной осведомленности пунктов УВД в отдаленных и океанических регионах путём передачи сообщений АЗН-В от ВС, находящихся за пределами прямой видимости, с помощью мобильной самоорганизующейся сети.

2. Теоретическими исследованиями связности мобильной самоорганизующейся сети в отдаленных и океанических регионах и моделирования реальных полётных данных доказано, что существует возможность передачи данных АЗН-В по сети периодом до 2-х часов, в течение всего времени отсутствия прямого приёма между ВС и пунктами УВД.

3. Разработана компьютерная модель, учитывающая особенности функциональной модели VDL Mode 4, а также такие факторы, как: мобильность узлов сети и условия распространения радиоволн. Путём варьирования параметров программных модулей, модель позволяет получать следующие числовые показатели производительности сети: количество отправленных и полученных сообщений, задержки при передаче сообщений по сети, а также число узлов, от которых были получены сетевые сообщения с данными о местоположении и намереньях.

4. Разработан протокол маршрутизации сообщений АЗН-В от ВС до пунктов УВД, использующий «жадный» алгоритм выбора маршрутизаторов и проактивный метод построения таблиц маршрутизации. Разработанный

алгоритм позволяет использовать «односотовые» сообщения и минимизирует количество служебной информации, передаваемой по сети. Доказана применимость выбранной метрики маршрутизации для рассматриваемой сети.

5. Предложены числовые параметры: диапазон поиска временного слота, период вещания сетевых сообщений БС и хранения записей в таблице маршрутизации. По результатам моделирования установлено, что наилучшими значениями является 75 слотов, 60 с и 660 с для предложенных параметров соответственно. Наилучшие показатели усредненных и максимальных задержек составили 4,4 с и 63,4 с, число полученных сообщений – 1448 и было отслежено 44 борта в сценарии с 50 узлами. Максимальное число узлов в сети составило 300 шт. для 12 АЗН-В отчётов в минуту в зоне прямой видимости и 1 отчёту в минуту по сети.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Шаврин, С. Сети Ad Hoc для транспорта на базе авиационной системы связи VDL Mode 4 / С. Шаврин, М. Кулаков // Первая миля. – 2016. – № 7 (60). – С. 19 – 24.
2. Кулаков, М.С. Организация мобильных сетевых структур с коридороподобным типом движения сетевых узлов / М.С. Кулаков, С.С. Шаврин // Проектирование и технология электронных средств. – 2015. – №2. – С. 2. – 8.
3. Клёсова, Ю.В. Перспективные технологии в авиации на базе ОВЧ ЛПД Режим 4 / Ю.В. Клёсова, И.А. Татарчук, М.С. Кулаков // Т•Сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Том 9. – №8. – С. 63 – 67.
4. Кулаков, М.С. Анализ особенностей функционирования мобильных самоорганизующихся сетей MANET на уровне доступа к среде MAC / М.С. Кулаков // Т•Сomm. Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – Т.8. – N 10. – С. 39 – 42.

Публикации в других изданиях

5. Фальков, Э.Я. Имитационное моделирование самоорганизующейся сети АЗН-В в режиме VDL 4 / Э.Я. Фальков, М.С. Кулаков, В.В. Егоров //

- Авиационные системы в XXI веке: сборник докладов юбилейной всероссийской научно-технической конференции. – М.: ФГУП «ГосНИИАС», 2017. – С. 323 – 329.
6. Кулаков, М.С. Моделирование мобильной самоорганизующейся сети на базе ОВЧ ЛПД Режимы 4 / М.С. Кулаков // Технологии информационного общества: сборник трудов X международной отраслевой научно-технической конференции. – М.: МТУСИ, 2016. – С. 136.
 7. Шаврин, С.С. Разработка протокола маршрутизации самоорганизующейся Ad Hoc сети для систем АЗН-В / С.С. Шаврин, М.С. Кулаков // Труды учебных заведений связи. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 88-93.
 8. Григорьев, И.Д. Роль использования технологии самоорганизующихся сетей в концепции "интернет вещей" / И.Д. Григорьев, М.С. Кулаков // Телекоммуникации и информационные технологии. – М.: МТУСИ, 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 49-52.
 9. Кулаков, М.С. Моделирование авиационной ОВЧ ЛПД Режимы 4 / М.С. Кулаков // Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ'2015: материалы конференции. – Суздаль, 2015. – С. 129 – 133.
 10. Кулаков, М.С. Анализ сценариев развертки мобильных Ad Hoc сетей на базе режима VDL Mode 4 / М.С. Кулаков // INTERMATIC – 2013: материалы международной научно-практической конференции. – М.: МИРЭА, 2013. – Часть 4. – С. 49 – 53.
 11. Кулаков, М.С. Применение протоколов Location - Aware MANET для сети авиационного стандарта, функционирующей в режиме VDL Mode 4 / М.С. Кулаков // ИНФОКОМ – 2013: труды международной молодежной научно-практической конференции. – Ростов - на - Дону.: СКФ МТУСИ, 2013. – С. 127 – 130.
 12. Кулаков, М.С. Воздушные самоорганизующиеся сети / М.С. Кулаков // Моделирование авиационных систем: материалы всероссийской научно-практической конференции. – М.: ФГУП «ГосНИИАС», 2013. – С. 172 – 173.
 13. Кулаков, М.С. Применение алгоритмов самоорганизации для режима VDL 2 / М.С. Кулаков // INTERMATIC – 2012: материалы международной научно-практической конференции. – М.: МИРЭА, 2012. – Часть 5. – С. 58 – 62.